

Министерство образования и науки РФ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Институт инноватики

Утверждаю
Зав.кафедрой
«Управление инновациями»

_____ А.Ф. Уваров

" ____ " _____ 2011г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

«История и методология науки и производства в области электронной техники»

Подготовлена в рамках проекта:

«Апробация программы опережающей профессиональной подготовки (уровень - магистратура) и учебно-методического комплекса, ориентированных на инвестиционные проекты ГК «Роснано» по разработке и производству мультимедийных многопроцессорных систем на кристалле»

Заказчик: Фонд инфраструктурных и образовательных программ ОАО «Роснано»)

Факультет инновационных технологий

Кафедра «Управление инновациями»

2011

Министерство образования и науки РФ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
ИНСТИТУТ ИННОВАТИКИ
ФАКУЛЬТЕТ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «Управление инновациями»

ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

разработчик доцент, к.ф.– м.н. Дробот П.Н.

Томск 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ	5
2.1. Научное познание и специфика научной деятельности. Критерии научного знания.....	5
2.2. Структура научного знания. Методы и средства научного познания.	7
2.3. Этические нормы науки	9
2.4. Принципы экспериментального исследования	10
2.5. Научные традиции, открытия, революции.	13
2.6. Роль науки в развитии техники	16
2.7. Методология науки.....	17
3. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В XIX ВЕКЕ	25
3.1. Электропроводность и фотогальванический эффект	25
3.1.1 Полупроводниковый характер проводимости кристаллических веществ.	25
3.1.2. Возникновение фото–электродвижущей силы в полупроводнике при его освещении.	28
3.2. Эффект выпрямления и эффект Холла	29
3.2.1. Эффект выпрямления в точечном контакте металла к полупроводнику	29
3.2.2. Классический эффект Холла.....	34
4. XIX–XX ВЕК. РАЗВИТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДО ОКОНЧАНИЯ ВТОРОЙ МИРОВОЙ ВОЙНЫ.....	38
4.1. Широкое техническое применение полупроводников до конца 30-х годов XX века.....	38
4.2. Развитие физики полупроводников и объяснение принципов работы полупроводниковых приборов	48
4.3. Открытие p–n–перехода, развитие полупроводниковой технологии, производство ВЧ диодов для радиолокации.	50
5. XX ВЕК. ТРАНЗИСТОРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ	53
5.1. Изобретение биполярных и полевых транзисторов, туннельных диодов, скачок в развитии полупроводниковой технологии.	53
5.2. Освоение промышленного производства транзисторной электронной техники.	61
6. XX ВЕК. ИНТЕГРАЛЬНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ	64
6.1. Изобретение интегральных схем, развитие технологии их производства	64
6.2. Освоение промышленного производства интегральной радиотехники.....	66
6.3. Развитие советской микроэлектроники, создание НИИ, научных центров и заводов полупроводниковых приборов.	69
6.4. Создание микропроцессоров и микроконтроллеров, микроминиатюризация, скачок в развитии технологии производства интегральных схем.....	72
7. XX–XXI ВЕК. ПРОБЛЕМЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ. НАНОЭЛЕКТРОНИКА.....	75
7.1 Проблемы микроминиатюризации и качественные изменения в микроэлектронике.	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	77

1. ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «История и методология науки и производства в области электронной техники» в соответствии с учебным планом направления подготовки магистров 220600.68 «Инноватика» относится к дисциплинам направления федерального компонента ДНМ.02 и является одной из завершающих в системе подготовки магистров.

При изучении этой дисциплины магистранты знакомятся с историей и методологией науки и производства на примере полупроводниковой электроники и электронной техники; с основами научного познания; с концептуальными основами методологии, с теориями, оказавшими наибольшее влияние на формирование образа науки в сознании современного общества, а также с основными проблемами философии науки. Дисциплина помогает осмыслению теории и практики естественнонаучных дисциплин; вырабатывает способность магистрантов к анализу и аргументации впечатлений и выводов, полученных ими на примере собственной практики. Магистранты учатся применять научную методологию при научно-исследовательской работе и находить решения конкретных научных проблем в различных ситуациях.

В первой части курса «Методология науки» раскрывается специфика научного познания, даётся характеристика основных понятий, принципов, уровней, методов и проблем науки. Читатель знакомится с методами и средствами научного познания, принципами экспериментального исследования, методологией науки. Во второй части «История науки и производства в области электронной техники» показывается процесс возникновения, развития и современное состояние науки и производства электронной техники, в первую очередь твердотельной, начиная с первых открытий полупроводниковых свойств кристаллов, до наших дней, акцентируется внимание на становлении методологической базы науки. Слушатели знакомятся с историей жизни и деятельности выдающихся естествоиспытателей, с историей изобретений важнейших технических средств и устройств полупроводниковой электроники, с логикой, динамикой и трудностями развития электроники и электронной техники.

У слушателей формируются навыки методологически грамотного осмысления конкретно-научных проблем с видением их в мировоззренческом контексте истории науки, формируется научное мировоззрение; возрастает готовность к восприятию новых научных фактов и гипотез. Усваиваются основы знаний методологии и её уровней; формируется умение ориентироваться в методологических подходах и видеть их в контексте существующей научной парадигмы.

История науки и техники – самостоятельная, оформившаяся отрасль знаний, дисциплинарное формирование которой еще не сформировалось и происходит в настоящее время. Это научная и учебная дисциплина с развитым научным аппаратом и инфраструктурой, вместе с тем нужно учитывать обширность и сложность предмета и методов. Цели и задачи истории научных открытий и технических изобретений чрезвычайно многообразны, а предмет изучения весьма широк. Вместе с тем, по своей сущности данная дисциплина является вводной к изучению специальных дисциплин по управлению инновациями в области современной электронной техники. Поэтому представляется полезным и необходимым сузить круг рассматриваемых исторических и методических вопросов изучением истории и методологии полупроводниковой электроники и производства.

В историческом плане нас будут интересовать открытие удивительных полупроводниковых свойств веществ, их применения в первых образцах твердотельной электронной техники, успешно работающей, хотя теоретического и полного понимания физики работы новых приборов еще не было; великое озарение, наступившее с развитием квантовой физики и, связанный с этим, еще более стремительный прогресс в электронной технике. Наступившие затем великие научно-технические революции: транзисторная и интегральная, компьютерная и информационная и постепенный неизбежный переход к качественно новой твердотельной электронике – наноэлектронике.

2. МЕТОДОЛОГИЯ НАУКИ

2.1. Научное познание и специфика научной деятельности. Критерии научного знания

Наука – это деятельность по выработке знаний об объективной реальности и их систематизация и это важнейшая функция науки. Это и деятельность по получению нового знания, и результат этой деятельности в виде суммы знаний, составляющих основу научной картины мира.

Цель науки – описание, объяснение и предсказание действительности, всех процессов и явлений, они – предмет науки, предмет ее изучения. Эта цель реализуется на основе открываемых наукой законов, научных законов.

Условное деление науки по предмету и методу познания показано схемой:

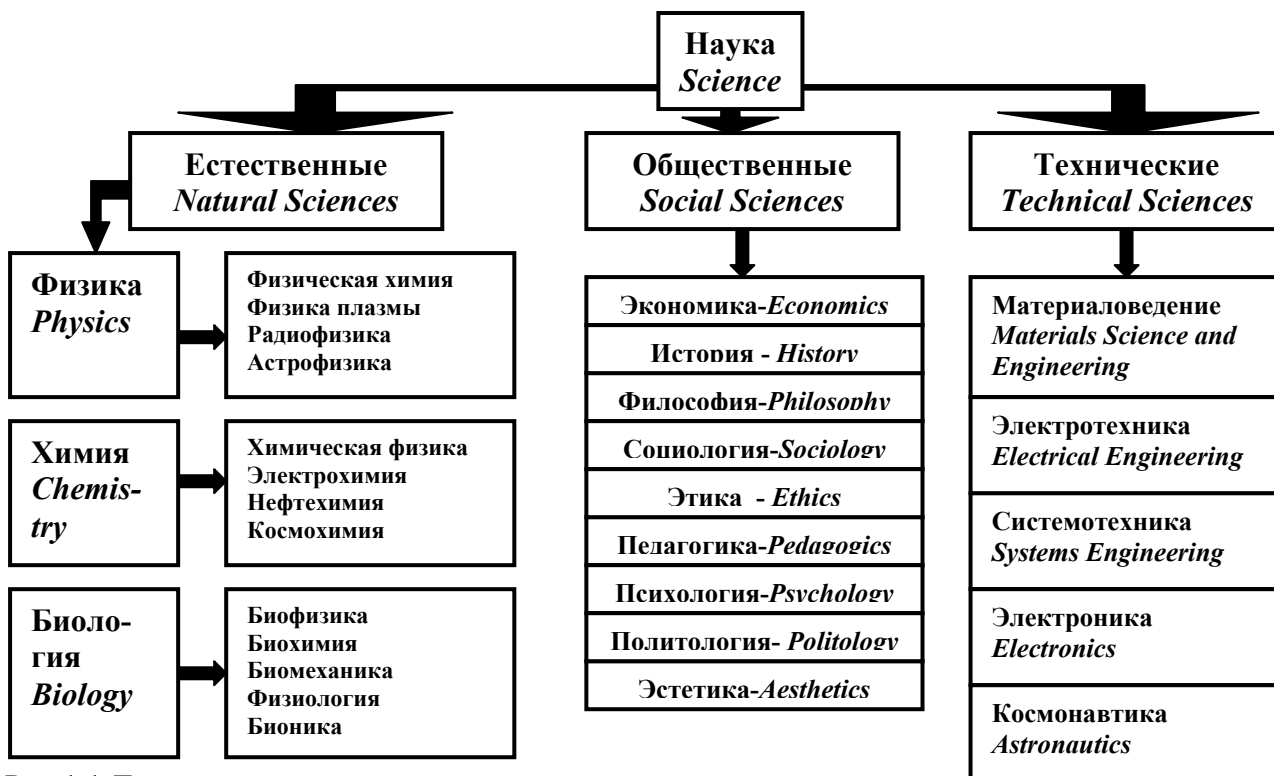


Рис.1.1 Деление науки по предмету и методу познания

Группы наук (естественные, общественные и технические) делятся на отрасли (физика, химия, биология и другие), а отрасли – на отдельные дисциплины (физическая химия, физика плазмы, радиофизика, химическая физика, биофизика и т. п.).

По связи с производством науки делят на два крупных типа:

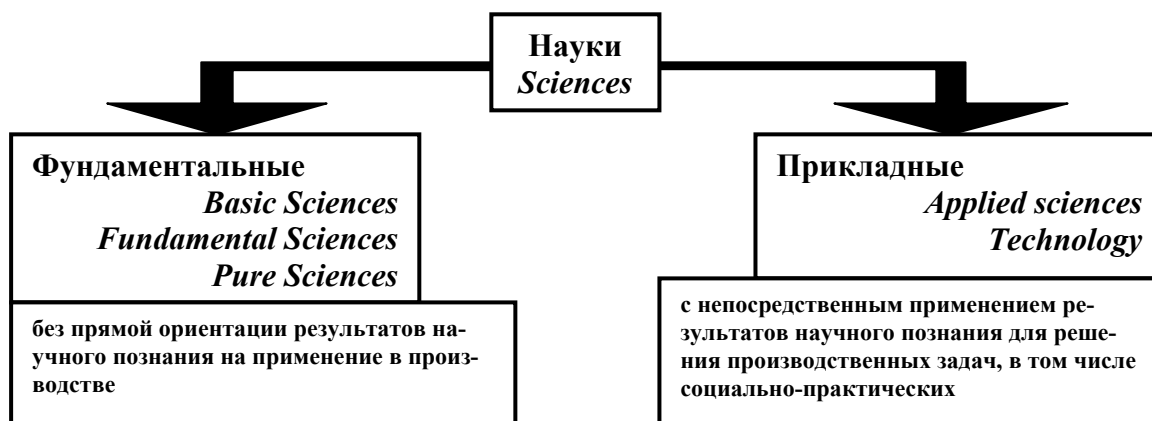


Рис.1.2. Деление науки по связи с производством

Рассмотренное структурирование науки сложилось за многовековую историю развития человечества и значительная длительность и историческая протяженность этого развития послужили основой для неоднозначности ответа на вопрос – когда возникла наука?

Можно считать, что естествознание возникло в каменном веке, когда человек стал накапливать и передавать другим знания о мире. Естествознание имеет дело с манипуляциями и преобразованиями материи, поэтому главный поток науки вытекает из практических, технических приемов первобытного человека – так считал английский физик и общественный деятель Джон Бернал (1901 – 1971). Значительная часть его работ – о проблеме происхождения жизни и роли и месту науки в обществе. Его книга «Социальная функция науки» (1939) положила начало новой области – науке о науке, или науковедению.

Но если науку трактовать как знание с его обоснованием, то справедливо считать, что наука возникла в 5 веке до новой эры в Греции, так как только греки начали доказывать теоремы, хотя большой объем знаний был накоплен до греков в Древнем Египте и Вавилоне.

Большинство историков считает, что в привычном нам смысле естествознание появилось в 16-17 веках вместе с работами Иоганна Кеплера, Христиана Гюйгенса, Галилео Галилея и в особенности Исаака Ньютона – то есть вместе с рождением физики и обслуживающего ее математического аппарата.

Одновременно наука формируется в особый социальный институт – в 1662 году возникло Лондонское королевское общество, а в 1666 году – Парижская академия наук.

Все это время наука была свободной деятельностью отдельных ученых и никак специально не финансировалась. Обычно оплачивался преподавательский труд ученого в университетах. Но в 19 веке по инициативе крупных ученых Германии, прежде всего философа Иоганна Фихте и теолога Фридриха Шлейермахера, 16 августа 1809 года был основан Берлинский университет. Под влиянием идей Шлейермахера дипломат и языковед Вильгельм фон Гумбольдт разработал концепцию университета. Его целью было введение новой системы образования. Основным постулатом его концепции была тесная связь обучения и исследовательской работы. Появилось понятие научный работник, наука стала профессиональной, чем и завершилось ее становление как современной науки. В настоящее время в мире около 5 млн. человек профессионально занимаются наукой. Наука стала производительной силой, объем научной деятельности в виде открытий, научной информации, числа научных сотрудников начиная с 17 века возрастает вдвое каждые 15 лет.

Особенности научного познания:

1. Главная цель – установление законов объективной реальности, существующей независимо от нас и от наших знаний о ней. Это законы природы, общества и законов самого процесса познания.
2. Высшая ценность – объективная истина. Наука и истина не тождественны. Истинное знание может быть и ненаучным, что не предполагает негативную оценку. Оно может быть получено в обыденной жизни. Научная деятельность специфична, и научное обоснование не всегда и не везде возможно и уместно. История показала, что науки и научное знание не всегда истинны. Часто понятие «научный» применяется в ситуациях, не гарантирующих получение истинных знаний. Любое теоретическое утверждение всегда имеет шанс быть опровергнутым в будущем, а в результате ошибок в постановке эксперимента получают неверные экспериментальные результаты и выводы.
3. Это сложный, противоречивый процесс воспроизводства знаний. Важный показатель научности – процесс непрерывного самообновления наукой своих концепций, понятий, теорий, гипотез, законов, система которых в едином целом и представляет знание.
4. Научные знания должны иметь строгую доказательность, полученные результаты – обоснованы, выводы – достоверны.

Особенности научного познания формируют потребность в установлении критериев, согласно которым знания могут быть признаны научными.

Критерии научного знания:

1. Системность – органическое единство. Знание должно быть подвергнуто специфичной научной систематизации со следующими чертами:

а) стремление к полноте – ученый всеми силами старается получить наиболее полную картину об изучаемом предмете, охватить все детали, нюансы, подробности;

б) непротиворечивость – собранные детали, нюансы, подробности не должны противоречить друг другу и истинной сущности изучаемого предмета;

в) четкие основания систематизации – ясное, недвусмысленное толкование правил и принципов систематизации фактов, законов, теорий.

2. Обоснованность и доказательность знания, с чем, собственно, и связано само возникновение науки. Для обоснования эмпирического, экспериментального знания применяются многократные проверки – повторение эксперимента в неизменных условиях. В силу случайных ошибок результаты будут отличаться. Затем следует статистическая обработка результатов многократных экспериментов и т. п. При обосновании теорий и теоретических моделей проверяют их непротиворечивость, соответствие данным эксперимента, возможность описывать и предсказывать явления.

Итак, мы установили, что научное познание это динамический процесс и развивающаяся система знаний. Будет интересно и концептуально верно познакомиться со структурой системы знаний.

2.2. Структура научного знания. Методы и средства научного познания.

Научное знание включает три, связанных друг с другом, но отличающихся, уровня:



Рис.1.3. Структура научного знания.

Все, что доступно живому наблюдению, в том числе посредством инструментов, приборов, измерительных средств, то есть со стороны внешних проявлений объекта, изучается на эмпирическом уровне. Здесь происходит сбор фактов, первичное обобщение, описание данных, систематизация и классификация. При этом используются следующие методы и средства:

- 1) *сравнение* – познавательская операция, позволяющая судить о сходстве или различии объектов, выявляющая качественные и количественные характеристики предметов;
- 2) *измерение* – определение отношения измеряемой величины к другой однородной величине, принятой за единицу, хранящуюся в техническом средстве измерений;
- 3) *наблюдение* – целенаправленное и организованное восприятие, регистрация и описание фактов и данных об изучаемом объекте;
- 4) *эксперимент* – (от лат. experimentum – проба) исследование в управляемых условиях.
- 5) *анализ* – (от древнегреческого «разложение», «расчленение») операция мысленного или реального расчленения целого на составные части;
- 6) *индукция* – движение мысли от частного к общему.

Что касается теоретического уровня, то важно, что опыт никогда не делается вслепую, в этом нет никакого смысла – он планируется в соответствии с теорией от первоначального плана до последних деталей в экспериментальной лаборатории. Главная задача теоретического познания – достижение объективной истины во всей ее конкретности и полноте содержания. В какой степени это удастся – зависит от верности теории, от степени ее упрощений и приближений к реальности. При этом широко используются следующие познавательные приемы и средства:

- 1) *абстрагирование* – мысленное выделение из конкретного множества некоторых элементов и отвлечение их от прочих элементов,
- 2) *идеализация* – создание чисто мысленных объектов («точка», «идеальный газ» и др.),
- 3) *синтез* – объединение результатов анализа в систему,
- 4) *дедукция* – движение познания от общего к частному,
- 5) *восхождение* от абстрактного к конкретному и др.

На основе теоретического объяснения и открытых законов научно предсказывается будущее. Если исходные абстракции верны, то и следствия из них будут верны.

Теоретический уровень делится на две части:

- 1) фундаментальные теории, работающие с абстрактными идеальными объектами,
- 2) теории, описывающие конкретную область реальности на базе фундаментальных теорий.

Эмпирический и теоретический уровни взаимосвязаны, граница между ними условна и подвижна. Эмпирическое переходит в теоретическое в определенных точках развития науки. При этом отдавать приоритет какому-либо одному уровню недопустимо – такой перекокс неизбежно приведет к перекоксу и искажению познания.

Третий уровень структуры научного познания – уровень философских предпосылок, философских оснований. Содержит общие представления о действительности и процессе познания и определяет философские основания науки, которые часто могут быть спорными.

Примером может служить острая дискуссия отца теории относительности Альберта Эйнштейна и создателя первой квантовой теории атома Нильса Бора.

А. Эйнштейн считал, что квантовая механика неполна, так как ее предсказания носят вероятностный характер, а действительность всецело детерминирована. Его противник Н. Бор наоборот утверждал полноту квантовой механики, которая отражает принципиально неустранимую вероятность, характерную для микромира.

Вместе с тем имеется много теорий, не вызывающих полемики по поводу их философских оснований, так как они основаны на общепринятых философских представлениях.

В современной науке давно сложилась специализация профессиональных ученых в соответствии со структурой научного познания – это так называемые теоретики и экспериментаторы. Инструментарий первых – это бумага и карандаш, языки программирования высокого уровня (Fortran, Algol, Pascal), навык работы с ЭВМ, персональный компьютер, начиная со второй половины 80-х годов прошлого века. Вторые, экспериментаторы, проводят рабочее время в экспериментальных лабораториях, среди измерительных приборов, собранных на их основе экспериментальных установок: вакуумных, нагревательных, охлаждающих, рентгеновских, измерительных и многих других, соответствующих разнообразию объектов и методов их исследования. Ну и, конечно, и те и другие используют книги – физико-математические справочники, таблицы, монографии и обширные информационные ресурсы интернет, начиная со второй половины 90-х годов прошлого века.

Склонность к теоретизированию, хорошее знание высшего уровня теории отраслей наук (математики, физики, химии и других), входящих в три группы наук (рис. 1.1) встречаются реже, чем влечение к экспериментальной деятельности, соответственно теоретиков встречается меньше, чем экспериментаторов. Но труд экспериментатора физически более тяжел, требует специфических знаний о технике и методах эксперимента, знания и навыков обработки экспериментальных данных на основе теории ошибок, соответственно – хорошего владения компьютером и разнообразными прикладными программами.

Основными методами получения эмпирического знания являются *наблюдение* и *эксперимент*. При *наблюдении* главное – не вносить самим процессом наблюдения какие-либо изменения в изучаемую реальность. Наоборот, в *эксперименте* изучаемое явление ставится в особые условия. Английский философ, историк, политический деятель, основоположник эмпиризма Френсис Бэкон, автор знаменитого афоризма «Знание – сила» («*Knowledge itself is power*», «*Знание само по себе – сила*») утверждал: «природа вещей лучше обнаруживает себя в состоянии искусственной стесненности, чем в естественной свободе».

Очень важно понимать, что эмпирическое исследование не начинается без определенной теоретической установки.

Также как задачи эмпирии не сводятся к сбору фактического материала, – ученый должен организовать факты, – так и научные теории не появляются как прямое обобщение собранных эмпирических фактов. Нет такого логического пути, который мог бы привести от наблюдений к основным принципам теории. Теории – продукт сложного взаимодействия теоретического мышления и эмпирии в ходе решения чисто теоретических проблем, в процессе взаимодействия науки и культуры в целом.

При разработке теории применяют различные способы теоретического мышления:

1) *мысленный эксперимент* – здесь теоретик проигрывает возможные варианты поведения разработанных им идеализированных объектов.

2) *математический эксперимент* – современная разновидность мысленного эксперимента, при котором возможные последствия изменения условий в математической модели просчитываются на компьютерах.

Характер движения научного познания, быстрее или медленнее, значительно определяется развитием используемых наукой средств. Например, в астрономии – от подзорной трубы к телескопу, затем к радиотелескопу. В биологии – от оптического микроскопа – к электронному. А использование компьютера вообще революционизировало развитие науки.

Методы и средства, используемые в разных науках, не одинаковы. Эти различия определяются и спецификой предмета исследования и уровнем развития средств в каждой отрасли. Но постоянно происходит взаимопроникновение методов и средств разных наук, что является одним из источников новаций в науке.

2.3. Этические нормы науки

Вследствие развития науки как социального института и роста ее роли в жизни общества весьма заметной и неотъемлемой стороной научной деятельности становятся ценностные и этические проблемы. Этические нормы регулируют не только применение научных результатов, но и саму научную деятельность. Наличие определенных ценностей и норм, воспроизводящихся от поколения к поколению ученых и являющихся обязательными для человека науки, т. е. определенного этоса науки («этос» – термин античной философии, обозначающий характер какого-либо лица или явления), очень важно для самоорганизации научного сообщества. Отдельные нарушения этических норм науки в общем чреваты большими неприятностями скорее для самого нарушителя, чем для науки в целом. Однако если такие нарушения приобретают массовый характер, под угрозой уже оказывается сама наука.

История научной этики начинается еще с древних времен. Основная идея этики науки была выражена ещё Аристотелем – «Платон мне друг, но истина дороже».

В наше время, когда наука стала производительной силой общества, превратилась в крупный социальный институт и роль ее в обществе стала весьма значительной, вопросы научной этики стали соответственно очень важными.

Идеалы науки выражены в следующих принципах:

- 1) перед лицом истины все исследователи равны;
- 2) никакие прошлые заслуги не учитываются, если речь идёт о научных доказательствах;
- 3) научная честность при изложении результатов исследования – учёный может ошибаться, но не имеет права подтасовывать результаты, он может повторить уже сделанное открытие, но не имеет права заниматься плагиатом;

При опубликовании научных результатов в статьях и монографиях обязательным условием являются ссылки на работы других авторов, чтобы зафиксировать авторство тех или иных идей и научных текстов, и обеспечивать чёткое разделение уже известного в науке и новых результатов. Что касается соавторов научной статьи, разработаны правила, каким условиям они должны отвечать. Общеизвестны правила, разработанные в Гарвардском Университете: «Каждый, кто перечислен в качестве автора, должен внести существенный прямой интеллектуальный вклад в работу. Например, должен внести вклад в концепцию, дизайн и/или интерпретацию результатов. «Почетное» соавторство запрещено. Предоставление финансирования, техни-

ческой поддержки, пациентов или материалов, как бы это ни было важно для работы, само по себе не является достаточным вкладом в работу для того, чтобы стать соавтором. Каждый, кто внес существенный вклад в работу, должен быть соавтором. Каждый, кто внес менее значительный вклад в работу должен быть перечислен в списке людей, которым выносятся благодарности в конце статьи.»

Научная этика – это не только административные правила, но и совокупность моральных принципов, которые обеспечивают функционирование науки.

Один из самых известных американских социологов двадцатого века Роберт Мертон в своих работах по социологии науки создал четыре моральных принципа:

Коллективизм – результаты исследования должны быть открыты для научного сообщества.

Универсализм – оценка любой научной идеи или гипотезы должна зависеть только от её содержания и соответствия техническим стандартам научной деятельности, а не от социальных характеристик её автора, например, его статуса.

Бескорыстность – при опубликовании научных результатов исследователь не должен стремиться к получению какой-то личной выгоды, кроме удовлетворения от решения проблемы.

Организованный скептицизм – исследователи должны критично относиться как к собственным идеям, так и к идеям, выдвигающимся их коллегами.

Особая роль отводится также сохранению «доброе имя», а не только известности, популярности в широкой публике. Однако в XX веке ситуация несколько изменилась – менее строгие требования, наука кое-где стала более «богатой», коммерциализованной, когда основной целью является гонка за финансированием. Снижение «качества знания» при нарушении этики науки ведёт к макулатурной науке, идеологизации науки, к чрезмерной коммерциализации науки.

В различных научных сообществах может устанавливаться различная жесткость санкций за нарушение этических принципов науки. Одним из рычагов контроля за выполнением научной этики является анонимное рецензирование научных статей, проектов и отчетов.

В Германии существует институт омбудсменов особого рода, задача которых – следить за соблюдением этических норм в области научных исследований. Эта инстанция учреждена не только в отдельных университетах и исследовательских центрах, но и при Немецком научно-исследовательском сообществе (Deutsche Forschungsgemeinschaft - DFG). Они планируют введение во всех вузах Германии обязательной для студентов двухчасовой лекции, посвященной изложению основ научной этики. А для аспирантов это должен быть двухнедельный курс: в США такой курс уже давно стал нормой.

2.4. Принципы экспериментального исследования

Предваряя обсуждение такого метода исследования, как эксперимент нам необходимо дать два важных определения: 1) научная проблема и 2) научная гипотеза. Говоря об этом полезно вспомнить известную сентенцию о форме, в которую облачено содержание.

Проблема – это форма знания, содержание которого еще не познано, но его нужно познать. Для успешного решения проблемы нужен правильный анализ предшествующих фактов, верные обобщения, умение точно поставить проблему. Решение конкретной проблемы есть существенный момент развития знания, при котором возникают новые проблемы, идеи, в том числе гипотезы.

Гипотеза – это форма знания, содержание которого есть предположение, сформулированное на основе ряда фактов, истинное значение его не определено и нуждается в доказательстве. Гипотеза носит вероятный, а не достоверный характер и требует проверки, обоснования. В ходе доказательства выдвинутых гипотез одни из них становятся истинной теорией, другие видоизменяются, уточняются и конкретизируются, превращаются в заблуждения, если проверка дает отрицательный результат.

Решающей проверкой истинности гипотезы является практика. Проверенная и доказанная гипотеза переходит в разряд достоверных истин, становится научной теорией.

Перейдем к принципам экспериментального исследования. В эксперименте мы исследуем проблему, для чего принимаем некоторую гипотезу и намереваемся проверить ее экспериментально. От принятия гипотезы до выводов из анализа экспериментальных результатов нужно пройти большой трудный путь и успех в этом деле зависит от правильной постановки эксперимента.

Обычно цель эксперимента – установление некоторой причинно-следственной взаимосвязи. Постановка эксперимента и создание экспериментальной методики – это самая индивидуальная, самая интересная и самая творческая часть в работе ученого. Здесь он проявляет все свое искусство экспериментатора и знание техники эксперимента, измерительных приборов, основ обработки результатов эксперимента, природы и теории ошибок измерений.

Экспериментатор создает некоторое воздействие на исследуемый объект и наблюдает результат этого воздействия. Исследователю обычно приходится решать несколько задач

1) Выбор воздействия, подходящего для целей эксперимента.

Воздействие должно быть «локально-целевым», так, чтобы оно обособленно влияло на одно единственное изучаемое свойство объекта и в этом смысле, воздействие должно быть элементарным. Отсюда следует еще одно требование – полная характеристика воздействия – исследователь должен как можно лучше знать, что именно происходит с изучаемым объектом в результате этого воздействия.

2) Продумать адекватный способ регистрации эффекта воздействия.

Способ и метод регистрации эффекта нуждается в не менее глубоком продумывании, чем характер воздействия. Регистрирующая аппаратура, с помощью которой измеряется и фиксируется эффект воздействия, может создать целый комплекс проблем: погрешности (ошибки) измерения разных видов, методические ошибки (погрешности), влияние прибора на объект исследования. Рассмотрим все отмеченные проблемы.

Любое измерение не является точным абсолютно, благодаря чему возникла целая научная отрасль – метрология, наука о погрешностях, о методах и средствах измерений, испытаний и контроля. Характеристикой точности измерения является его ошибка (погрешность) – разность между истинным и измеренным значениями величины. Погрешности делятся на приборные – систематические и случайные и методические.

Систематическая погрешность чаще всего связана с неисправностью прибора (например, неправильной градуировкой шкалы) или особенностями метода. Это – постоянное по величине и знаку отклонение измеряемой величины от истинного значения. Систематические ошибки могут быть устранены, их обычно довольно легко учесть, а в экспериментах, где сравниваются разные измерения, выполненные одним и тем же прибором, они вообще не сказываются на результате.

Случайные погрешности отклоняют измеренное значение от истинного в разных направлениях и на разную величину. с разнообразными разнонаправленными процессами, которые в разных измерениях. Полностью исключить случайные погрешности невозможно, а оценить можно только в среднем, проведя несколько повторных измерений одной и той же величины.

Таким образом, первое требование к измерительной аппаратуре состоит в том, что ее погрешность должна быть существенно – хотя бы на порядок – меньше, чем величина ожидаемого эффекта.

От измерительной аппаратуры обычно требуют, чтобы она создавала объективную документированную запись изучаемого процесса, чтобы эту запись впоследствии мог проанализировать экспериментатор. Это важно по двум причинам. Во-первых, подобная запись позволяет во время эксперимента сосредоточиться на его проведении, а анализ провести позднее, в спокойной обстановке. Во-вторых, объективная запись позволяет свести к минимуму субъективизм в интерпретации полученных данных.

Далее, очевидно, что прибор может зарегистрировать только такое событие, которое как-то воздействует на этот прибор. Но односторонних воздействий в природе не бывает – прибор в процессе измерения влияет на поведение изучаемого объекта. Псевдоэффекты, возникающие в результате действия экспериментальной процедуры на объект и искажающие его поведение, принято называть артефактами. Чтобы отличить артефакт от открытия, необходимо глубокое знание всех протекающих в экспериментальной системе процессов

Условия эксперимента должны быть предельно стандартными. В действительности же все условия могут слегка отличаться от опыта к опыту, что будет вносить в результаты дополнительную погрешность, так что общая погрешность экспериментальных результатов будет складываться из двух компонентов – приборной погрешности и погрешности методики. Чтобы количественно оценить величину погрешности эксперимента (или, используя более общее выражение, величину разброса данных), необходимо поставить серию опытов. Результаты каждого опыта в этой серии будут несколько отличаться друг от друга, но, изучив характер распределения, можно узнать наиболее вероятный результат и количественно описать величину разброса данных, используя методы математической статистики. Кроме того, чтобы выделить эффект изучаемого воздействия из колебаний результатов, вызванных случайными факторами, ставят не одну, а две серии экспериментов – опытную и контрольную. Опытная – это серия, в которой на объект выдается исследуемое воздействие; в контрольном эксперименте условия ничем не отличаются от опыта, но исследуемого воздействия не выдается. Это требование идентичности настолько важно, что получило специальное название – принцип прочих равных условий. Его соблюдение приведет, в частности, к тому, что артефакты, создаваемые экспериментальной установкой, будут одинаковы в опытной и контрольной сериях и не повлияют на заключение об эффекте воздействия.

Прежде всего, результаты измерения должны иметь однозначную интерпретацию. Исследователь должен точно знать, что именно он измеряет.

После получения экспериментальных результатов воздействия на исследуемый объект необходимо их интерпретировать. С этой целью необходимо привлечь все знания об изучаемом объекте и экспериментальной методике, глубоко продумать, какие изменения в объекте могло вызвать внешнее воздействие и по каким взаимосвязям оно могло изменять реакцию объекта. Это самый сложный этап в интерпретации данных, с которым связано больше всего ошибок – ибо легко можно упустить из вида какую-нибудь существенную взаимосвязь.

Среди экспериментаторов бытует много разных шуток, например такая. Молодой начинающий ученый, аспирант, показывает экспериментально полученный график исследуемой зависимости своему умудренному опыту научному руководителю, профессору, и просит прокомментировать сложный вид графика. Профессор, со словами «ну, это все очень просто» живо начинает объяснять физические закономерности, обусловившие поведение графика. Тут аспирант спохватывается со словами «ах, простите, я перевернул график» и разворачивает лист на 180 градусов. Профессор несколько не смущаясь, говорит «а, ну это еще проще» и с той же живостью дает другие комментарии.

2.5. Научные традиции, открытия, революции.

Традиции науки сложились в процессе ее многовекового развития, поэтому, рассматривая научные традиции, полезно обратиться вначале к вопросу о периодизации науки. Периодизация науки сама по себе представляет интересный самостоятельный научно-методологический вопрос. Можно выделить по крайней мере два подхода к решению этого вопроса.

Обычно выделяют следующие периоды развития науки:

Преднаука – зарождение науки в цивилизациях Древнего Востока: астрология, доевклидова геометрия, нумерология.

Античная наука – формирование первых научных теорий, таких как атомизм, и составление первых научных трактатов в эпоху Античности: астрономия Птолемея, ботаника Теофраста, геометрия Евклида, физика Аристотеля, а также появление первых протонаучных сообществ в лице Академии Платона, в которой разрабатывался широкий круг дисциплин: философия, математика, астрономия, естествознание и другие.

Средневековая магическая наука – формирование экспериментальной науки на примере алхимии Джабира, знаменитого арабского алхимика, врача, фармацевта, математика и астронома, в средневековой Европе известного под латинизированным именем Geber. Его работы оказали значительное влияние на средневековую науку, прежде всего алхимию. Многие из этих трудов носили теоретический или мистический характер, в других приводились подробные описания лабораторных экспериментов.

Классическая наука – сформировавшаяся в современном смысле под влиянием научной революции в трудах Галилея, Ньютона, Линнея.

Неклассическая наука – наука эпохи кризиса классической рациональности: теория эволюции Дарвина, теория относительности Эйнштейна, принцип неопределенности Гейзенберга, гипотеза Большого Взрыва, теория катастроф Рене Тома, фрактальная геометрия Мандельброта.

Возможно другое деление на периоды:

1) *доклассический* (ранняя античность, поиск абсолютной истины, наблюдение и размышление, метод аналогий);

2) *классический* (XVI–XVII вв., появляется планирование экспериментов, введен принцип детерминизма, повышается значимость науки);

3) *неклассический* (конец XIX в, появление мощных научных теорий, например, квантовой механики, теории относительности, поиск относительной истины, становится ясно, что принцип детерминизма не всегда применим, а экспериментатор оказывает влияние на поиск эксперимента);

4) *постнеклассический* (конец XX в., появляется синергетика, расширяется предметное поле познания, наука выходит за свои рамки и проникает в другие области, поиск целей науки).

Для классических представлений о науке характерен постоянный поиск «надежного фундамента», на который могла бы опираться вся система научных знаний. Однако в современной науке развивается представление о гипотетическом характере научного знания, когда опыт не является больше фундаментом познания, а выполняет в основном критическую функцию. На смену фундаментальной обоснованности и детерминизму как ведущей ценности в классических представлениях о научном познании все больше выдвигается такая ценность, как эффективность в решении проблем. В качестве эталонов на протяжении развития науки выступали разные области научного знания.

Долгое время притягательным эталоном буквально во всех областях знания были «Начала» древнегреческого математика Евклида – основное сочинение Евклида, в котором последовательно излагались все основные факты геометрии и теоретической арифметики, планиметрия, стереометрия и ряд вопросов теории чисел. «Начала» Евклида быстро вытеснили книги с таким же названием, которые составлялись ранее другими знаменитыми учеными – Гиппократом, Леонтом и Февдием. На геометрической системе Евклида – евклидовой геометрии – основывается вся классическая физика.

Триумф механики в XVII – XIX веках привел к тому, что ее стали рассматривать как идеал, образец научности.

Затем весь комплекс *физического знания* утверждался как эталонная наука в Новое время, то есть, начиная с периода в истории человечества, находящегося между Средневековьем и Новейшим временем (с 1918 года по нынешнее время). Физический идеал научного знания, бесспорно, доказал свою эвристичность, надежную обусловленность экспериментом. Но в наше время понятно, что реализация физического идеала часто тормозит развитие других наук – математики, биологии, социальных наук и др.

Иногда в качестве образца научного знания предлагаются гуманитарные науки, в центре внимания которых активная роль субъекта в познавательном процессе. Однако не на все науки может быть распространен гуманитарный идеал научного познания.

Характерное для классических представлений о науке тяготение выделить «стандарт научности», критикуется в современной методологии науки, для которой характерна плюралистическая тенденция, множественность мнений в истолковании науки, независимых и несводимых друг к другу начал, утверждение равноценности различных стандартов научности, их несводимость к какому-то одному стандарту.

Вместе с исключительно высоким уровнем творчества в научной деятельности в современной методологии науки существует отчетливое понимание, что наука и научная деятельность может быть традиционной. Отцом теории о научных традициях является Т. Кун, американский историк и философ науки, считавший, что научное знание развивается скачкообразно, посредством научных революций. Кун показал, что традиция является не тормозом, а наоборот, необходимым условием быстрого накопления научных знаний. Традиция организует научное сообщество, порождает «индустрию» производства знаний.

Кун вводит понятие *парадигма* как общепринятые научные достижения, которые в течение определенного времени дают научному сообществу модель постановки проблем и методы их решения. Согласно Куну парадигма – это то, что объединяет членов научного сообщества и, наоборот, научное сообщество состоит из людей, признающих определенную парадигму. Как правило, парадигма фиксируется в учебниках, трудах ученых и на многие годы определяет круг проблем и методов их решения в той или иной области науки, научной школе. К парадигме можно отнести, например, взгляды Аристотеля, систему Коперника, механику Ньютона, кислородную теорию Лавуазье, теорию относительности Эйнштейна и т. п. Точное и понятное определение парадигмы дает Кун в следующих цитатах. «Под парадигмами я подразумеваю признанные всеми научные достижения, которые в течение определенного времени дают научному сообществу модель постановки проблем и их решений.». «Вводя этот термин, я имел в виду, что некоторые общепринятые примеры фактической практики научных исследований – примеры, которые включают закон, теорию, их практическое применение и необходимое оборудование, – все в совокупности дают нам модели, из которых возникают конкретные традиции научного исследования.».

В концепции Куна традиционная наука называется «нормальной наукой», которая представляет собой «исследование, прочно опирающееся на одно или несколько прошлых достижений, которые в течение некоторого времени признаются определенным научным сообществом как основа для развития его дальнейшей практической деятельности».

Кун показывает, что история науки – это чередование периодов «нормальной науки» и отрицающей ее «революционной науки». Так, аристотелевская физика функционировала в качестве парадигмы нормальной науки от классической античности до позднего Средневековья; в течение всего этого периода она задавала понятийный инструментарий и основное направление научного поиска. Физические и математические открытия XVI и XVII веков, связанные с именами Коперника, Галилея, Декарта и Ньютона, создали ситуацию научной революции, в ходе которой сторонники старой парадигмы столкнулись с приверженцами «новой науки». Период нормальной науки вновь наступил лишь в конце XVII века, когда ньютоновская физика обрела широкое признание среди ученых и утвердилась в качестве парадигмы научного исследования.

Увеличение соперничающих вариантов в развитии нормальной науки, готовность опробовать что-либо еще, выражение явного недовольства, обращение за помощью к философии и об-

суждение фундаментальных положений – все это симптомы перехода от нормального исследования к экстраординарному. Кризис в развитии нормальной науки разрешается возникновением новой парадигмы. Тем самым происходит научная революция, и вновь складываются условия для функционирования нормальной науки. По Куну, переход от одной парадигмы к другой, невозможен посредством логики и ссылок на опыт. Сам переход осуществляется резко, как переключение.

Научные революции обычно затрагивают мировоззренческие и методологические основания науки, нередко изменяя сам стиль мышления. Они по своей значимости могут выходить далеко за рамки той конкретной области, где они произошли, поэтому можно говорить о частнонаучных и общенаучных революциях.

Ярким примером общенаучной революции является возникновение квантовой механики, поскольку ее значение выходит далеко за пределы физики. Дарвиновская революция по своему значению вышла далеко за пределы биологии. Она коренным образом изменила наши представления о месте человека в Природе, оказала сильное методологическое воздействие, повернув мышление ученых в сторону эволюционного развития.

Вторым важным научно-революционным фактором является возникновение новых методов исследования. Они могут приводить к далеко идущим последствиям, к смене проблем, к смене стандартов научной работы, к появлению новых областей знаний. В этом случае их внедрение означает научную революцию.

Например, научную революцию означало появление микроскопа в биологии. Всю историю биологии можно разбить на два периода, разделенные появлением и внедрением микроскопа. Микробиология, цитология, гистология и другие фундаментальные разделы биологии – обязаны своим развитием внедрению микроскопа.

Третьим важным научно-революционным фактором является открытие каких-то ранее неизвестных аспектов действительности, новых областей непознанного: мира новых объектов и явлений, например, открытие мира микроорганизмов и вирусов, мира атомов и молекул, мира элементарных частиц; открытие явления гравитации, радиоактивности, других галактик и т. п.

Таким образом, одним из факторов, приводящих к научной революции, являются научные открытия, которые совершаются двумя способами: экспериментально и теоретически. Еще с XIX века стало ясно, что нет никакой логики и алгоритма открытий. Многие крупные открытия совершаются на вполне определенной теоретической базе, например, на основе небесной механики путем исследования возмущений в движении планеты Уран Адамсом и Леверье была открыта планета Нептун. Поль Дирак теоретически открыл позитрон, создав теорию электрона, которая описывала не только электрон с отрицательным электрическим зарядом, но и аналогичную частицу с положительным зарядом. Отсутствие такой частицы в природе рассматривалось как указание на «лишние решения» уравнений Дирака. Зато открытие позитрона явилось триумфом теории.

Другие виды научных открытий связаны с созданием фундаментальных научных теорий и концепций, таких как геометрия Евклида, гелиоцентрическая система Коперника, классическая механика Ньютона, геометрия Лобачевского, генетика Менделя, теория эволюции Дарвина, теория относительности Эйнштейна, квантовая механика. Эти открытия изменили представление о действительности в целом, т. е. носили мировоззренческий характер.

В истории науки есть много фактов, когда фундаментальное научное открытие делалось независимо друг от друга несколькими учеными почти в одно время. Например, неевклидова геометрия была построена одновременно Лобачевским, Гауссом и Больяни; Дарвин опубликовал свои идеи об эволюции можно сказать тогда же, когда Уоллес; специальная теория относительности была разработана одновременно Эйнштейном и Пуанкаре. Из этого следует вывод об исторической обусловленности фундаментальных открытий, которые отличаются от других тем, что они связаны не с дедукцией из существующих принципов, а с разработкой новых основополагающих принципов.

2.6. Роль науки в развитии техники

Техника (др.-греч. τεχνικός от τέχνη – искусство, мастерство, умение) – это общее название различных приспособлений, механизмов и устройств, не существующих в природе и изготавливаемых человеком. Представляет собой совокупность средств, создаваемых для осуществления процессов производства и обслуживания непрямых потребностей общества.

Иногда термин «техника» употребляют также для совокупной характеристики навыков и приемов, используемых в каком-либо деле или в искусстве: техника каллиграфического письма, техника игры на баяне (фортепиано).

Основное назначение техники – полная или частичная замена производственных функций человека с целью облегчения труда и повышения его производительности, избавление человека от выполнения физически тяжёлой или рутинной (однообразной) работы, чтобы предоставить ему больше времени для творческих занятий, облегчить его повседневную жизнь. Различные технические устройства позволяют значительно повысить эффективность и производительность труда, более рационально использовать природные ресурсы, а также снизить вероятность ошибки человека при выполнении каких-либо сложных операций.

Различают технику производственную (механизмы, машины, инструменты, аппаратура управления машинами и технологическими процессами, средства транспорта, связи и т. д.) и непрямую (бытовая, научных исследований, образования и культуры, военная, спортивная и др.).

С древних времен, начиная с эпохи античности, четко просматривается связь предметов деятельности и самих ее субъектов, поскольку под техникой понимались три составляющих:

- 1) внутренняя способность человека к созидательной деятельности;
- 2) законы созидательной деятельности;
- 3) механизмы, помогавшие человеку в продуктивном осуществлении созидательной деятельности.

Техника имеет еще социальную сущность, поскольку орудия труда, изготавливавшиеся вручную, представляли собой произведения искусства, отражавшие индивидуальный стиль создавшего их мастера. Социальную значимость придавали орудия использованные для его изготовления знания и навыки, а затем, применение самого орудия для производства социально значимого продукта. В современном обществе, когда наука стала производительной силой общества, опредмечиваются коллективные трудовые навыки, знания и опыт в познании и использовании природных сил.

Техника может существовать и действовать только по логике человека и благодаря его потребностям. Поэтому система техники, сформированная под влиянием машинного производства орудий труда, не отвергает, а наоборот, включает в себя человека.

Эту картину дополняет природа, ибо человек создает технику по законам природы, для производства продуктов труда использует природный материал, и, в конечном счете, продукты человеческой деятельности сами становятся элементами окружающей среды.

С точки зрения развития, наука и техника связаны очень сильно. И если в древности развитие техники происходило в основном эмпирически, на основе опыта, то в настоящее время это происходит на срезе новых научных знаний и исследований, как следствие фундаментальных открытий. Предварительным условием создания таких устройств, как ядерный реактор или современный компьютер, является глубокое изучение физических, химических и других процессов, лежащих в основе их работы. С другой стороны, научные исследования уже невозможны без современной техники высочайшего уровня, в этих областях всегда применяются самые передовые разработки, например большой адронный коллайдер.

Таким образом, синхронное развитие техники и науки является неременным условием движения человеческой цивилизации по выбранному ей пути технологии. И, хотя данный путь подвергается иногда критике, в настоящее время альтернатив ему не существует.

2.7. Методология науки

Методология науки – это умения, навыки, методы и принципы исследовательской деятельности ученых, посредством которых реализуются наука как деятельность (это функция, функциональный смысл науки) и наука как знание (это предмет науки). Методология науки абстрагируется в какой-то мере от других аспектов науки, занимаясь преимущественно способами, методами и приемами научно-исследовательской деятельности.

Методология науки опирается и оперирует следующими терминами и определениями.

Метод (от греч. μέθοδος – «способ») – путь исследования или познания, буквально «путь к чему-либо» – систематизированная совокупность шагов, действий, которые необходимо предпринять, чтобы решить определенную задачу или достичь определенной цели. В отличие от области знаний или исследований, является авторским, то есть созданным конкретной персоной или группой персон, научной или практической школой. В силу своей ограниченности рамками действия и результата, методы имеют тенденцию морально устаревать, преобразовываясь в другие методы, развиваясь в соответствии с временем, достижениями технической и научной мысли, потребностями общества. Совокупность однородных методов принято называть подходом. Развитие методов является естественным следствием развития научной мысли.

Научный метод – метод использования старого знания для получения нового знания. Совокупность основных способов получения новых знаний и методов решения задач в рамках любой науки. Если предмет науки указывает какой объект следует изучать, то научный метод свидетельствует о том, с помощью каких приемов и способов нужно исследовать данный объект. Таким образом, научный метод есть путь познания, который исследователь прокладывает к своему предмету, руководствуясь своей гипотезой. С помощью научного метода гипотезы постулируются, проверяются и затем обобщаются до уровня закона или на их основе формулируется теория.

Современная система научных методов столь же разнообразна, как и сама наука. Например, говорят о методах эксперимента, методах обработки эмпирических данных, методах построения научных теорий и их проверки, методах изложения научных результатов.

Методика – совокупность методов обучения чему-нибудь, практического выполнения чего-либо, целесообразного проведения какой-либо работы.

Методология науки – учение о структуре и логической организации научного метода познания, принципах, формах, способах и средствах организации теоретической и практической деятельности. Характеризует объект и предмет исследования, научную проблему и задачу, совокупность исследовательских средств, а также формирует последовательность движения исследователя в процессе решения проблемы или задачи.

Зачатки методологических знаний обнаруживаются уже в древнем мире. В Древнем Египте геометрия выступала в форме нормативных предписаний, которые определяли последовательность измерительных процедур при разделе и перераспределении земельных площадей. Важную роль при этом сыграло обучение трудовым операциям, их последовательности, выбору наиболее эффективного способа действия.

Родоначальником привычной нам методологии науки является английский философ Ф.Бэкон, впервые выдвинувший идею вооружить науку системой методов и реализовавший эту идею в трактате «Новый органон», вышедшем в 1620 году. В этом трактате он провозгласил целью науки увеличение власти человека над природой, которую определял как бездушный материал, цель которого быть использованным человеком.

Обоснование Бэконом эмпирического подхода к научному познанию имело огромное значение. В качестве образца научной методологии признавались принципы механики, ставшие руководящими для Галилея и Декарта. По Галилею, научное познание должно базироваться на планомерном и точном эксперименте – как мысленном, так и реальном. Для реального эксперимента характерны непосредственное изменение условий возникновения явлений и установление между ними закономерных причинных связей, обобщаемых посредством математического аппарата. Далее, в развитие методологии, французский мыслитель Р. Декарт сформулировал проблему познания науки как проблему отношения субъекта и объекта. Декарт разработал правила рациона-

листического метода, среди которых первым является требование допускать в качестве истины только такие положения, которые осознаются ясно и отчетливо. За исходные принимаются аксиомы как самоочевидные истины, которые разум усматривает интуитивно, без всякого доказательства; новое знание выводится дедуктивно из непосредственно познаваемых положений.

Особый статус методологии впервые обосновал немецкий философ И. Кант. Он разделил объективное содержание знания и форму, которая его организует в систему и заложил начало анализа познания как специфической деятельности со своими особыми формами внутренней организации.

Диалектическая философия Гегеля развила элементы диалектики кантовского анализа процесса познания. Разработанные Гегелем категории и законы диалектики образовали мыслительный аппарат, который позволил под принципиально новым углом зрения исследовать взаимосвязи, противоречия и развитие бытия и мышления. Важнейшую роль у Гегеля играет принцип восхождения от абстрактного к конкретному – от общих и бедных содержанием форм к расчлененным и наиболее богатым содержанием, к системе понятий, позволяющей постичь предмет в его сущности.

Революционные изменения в социальной практике, науке, технике в XIX веке привели к быстрому росту методологических исследований, связанных с разделением, одной стороны, и с интеграцией научного знания, с другой стороны, с коренной реформой классических дисциплин и появлением множества новых дисциплин, с превращением науки в производительную силу общества. Возникают глобальные проблемы экологии, демографии, урбанизации, освоения космоса и др., решение которых требует крупномасштабных программ, реализуемых благодаря взаимодействию многих наук. Возникает необходимость связать воедино усилия специалистов разного профиля и объединить разные представления и решения в условиях принципиальной неполноты и неопределенности информации о сложном объекте (системе). Нужно разрабатывать методы и средства, способные обеспечить эффективное взаимодействие и синтез методов различных наук: системный анализ, теоретическая кибернетика и др.

Методологию науки можно разделить на общую и частную. Общая развивает методы, общие для всех наук, а частная опирается на выводы общей и изучает познавательные действия, характерные для некоторых наук. Общая методология оперирует с понятиями «классификация», «обоснование», «дедукция», «индукция», «проблема», «гипотеза», «закон», «теория». Частная – с понятиями «измерение», «диагностика», «понимание», «доказательство», «формализация».

Разновидности частной методологии – методология естественных наук (физика, химия, биология, и т. п.) и методология общественных наук.

Согласно другому делению выделяют методологию формальных наук и методологию реальных наук. Формальные (дедуктивные) науки – математика, логика. Реальные (эмпирические) – науки о природе: физика, астрономия, химия, биология и т. д.; науки о человеке: медицина, психология и науки об обществе.

В методологии можно выделить два научных уровня – общенаучный и конкретно-научный. Общенаучный уровень охватывает общие свойства, общие закономерности развития бесконечно многообразных явлений объективного мира. Конкретно-научный уровень методологии обусловлен принципами, выводимыми в процессе конкретизации общенаучных методологических систем, подходов и принципов.

Обычно начало развития методологии конкретного уровня связывают с механикой и физикой Галилея. А до него господствовала методология Аристотеля с основополагающим методологическим принципом – в науке о природе всегда надо стремиться к определению первопричинных начал, понятие которых у него играет ключевую роль. Однако точного определения начал Аристотель не дает. Он указывает только, что «для всех начал общее то, что они суть первое, откуда то или иное есть, или возникает, или познается; при этом одни начала содержатся в вещи, другие находятся вне ее». Для уяснения «начала» Аристотель предлагает расчленить вещи, начала которых мы ищем, на составные части и логически проанализировать эти простейшие составные части. Отсюда вытекает формулировка второго методологического принципа Аристотеля: исследование должно быть продолжено путем анализа. Но, признавая ключевую роль опыта в познании мира, он не дошел до ставшего лишь гораздо позднее очевидным вывода о принципиальной роли эксперимента и как источника знания, и как критерия истинности.

Преодоление недостатков системы Аристотеля привело к формированию отличной от аристотелевской методологии Галилея, которая легла в основу механистической методологии, господствовавшей в науке вплоть до начала 20 века.

Интересно отметить, что разрушая аристотелевскую картину мира, механика Галилея, Ньютона и Декарта не отказалась от ее методологии, а продолжала ее развивать путем дополнения. Дальнейшее развитие механики опровергало постановку проблем и их формулировку, уточненные благодаря историческому опыту и введение Галилеем и Бэконом экспериментального обоснования теории в качестве методологического принципа.

Бэкон обосновал этот принцип, исходя из философских соображений. А Галилей пришел к этому через свои экспериментальные исследования. Галилей рассматривал эксперимент и как источник, и как критерий истинности знания, но совсем не отрицал роль идей в становлении и развитии теории. Теоретической основой для Галилея было единство физики и геометрии у Архимеда, а практический взгляд на мир определил галилеевский эмпиризм.

Галилей критикует Аристотеля, но критикует он аристотелевскую физику, а не методологию, используя для доказательства все методы Аристотеля и дополняя собственными.

Основные методологические принципы Галилея: 1) «не умножать сущностей сверх того, что дает природа» – не усложняй; 2) чувственный опыт может быть обманчивым; 3) анализ имеет важную роль; 4) широкое использование метода аналогий; 5) мир познаваем; 6) единственного опыта достаточно для сокрушения вероятных теоретических рассуждений; 7) критика теории необходима: «сила правды иногда укрепляется нападками на нее».

Впервые цельную физическую картину мира создал Исаак Ньютон. Пространство и время он считал абсолютными понятиями, едиными для всей Вселенной, и явно указал на это в своих «Началах». «Математические начала натуральной философии» (лат. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) – фундаментальный труд Ньютона, в котором он сформулировал закон всемирного тяготения и три закона Ньютона, заложившие основы классической механики.

Как физический, так и математический уровень труда Ньютона совершенно несопоставимы с работами его предшественников. В нём совершенно (за исключением философских отступлений) отсутствует аристотелева или декартова метафизика, с её туманными рассуждениями и неясно сформулированными, часто надуманными «первопричинами» природных явлений. Ньютон, например, не провозглашает, что в природе действует закон тяготения, он строго *доказывает* этот факт, исходя из наблюдаемой картины движения планет. Метод Ньютона – создание модели явления, «не измышляя гипотез», а потом уже, если данных достаточно, поиск его причин. Такой подход, начало которому было положено Галилеем, означал конец старой физики. Математический аппарат и общую структуру книги Ньютон сознательно построил максимально близкими к тогдашнему стандарту научной строгости — «Началам» Евклида.

В первой главе Ньютон определяет базовые понятия — масса, сила, инерция («врождённая сила материи»), количество движения и др. Постулируются абсолютность пространства и времени, мера которых не зависит от положения и скорости наблюдателя. На основе этих чётко определённых понятий формулируются три закона ньютоновой механики. Впервые даны общие уравнения движения, причём, если физика Аристотеля утверждала, что скорость тела зависит от движущей силы, то Ньютон вносит существенную поправку: не скорость, а ускорение.

Методы доказательства, за редким исключением – чисто геометрические, дифференциальное и интегральное исчисление явно не применяется (вероятно, чтобы не умножать число критиков), хотя понятия предела («последнего отношения») и бесконечно малой, с оценкой порядка малости, используются во многих местах.

Ньютон впервые в истории науки разработал единую научную картину мира, закрепив этим тенденцию к единству и единственности одной отдельно взятой научной теории максимальной степени общности и окончательно определив стратегию развития всей науки на столетие вперед. Работа Ньютона обусловила и стремление методологии к единственно верной целостной системе и борьбу различных методологических систем за право называться таковой.

Как все новое «Начала» подверглись критике, одна из причин – убежденность ученых в том, что понять какое-либо природное явление можно лишь тогда, когда оно наглядно представлено, действие же на расстоянии наглядно непредставимо. Согласно концепции дальнего действия,

тела действуют друг на друга без материальных посредников, через пустоту, на любом расстоянии. Такое взаимодействие осуществляется с бесконечно большой скоростью (но подчиняется определенным законам). Примером силы и непосредственного действия на расстоянии, можно считать силу всемирного тяготения в классической теории гравитации Ньютона.

Позднее так же критически будут встречены и теория Эйнштейна, и теория Бора. С течением времени идеи Ньютона стали завоевывать все больше сторонников, потому что замечательно совпадали результаты математических вычислений и наблюдений.

Ньютон формулирует закон всемирного тяготения, объединяющий земные и небесные движения, и таким образом создает «систему мира». «Начала» представляют собой систематизацию всей физики того времени, гениальное обобщение всего, созданного как самим Ньютоном, так и его предшественниками и современниками. Ньютон говорил, что если он видел дальше других, то потому, что «стоял на плечах гигантов», воздав этим признанием должное своим коллегам. Кстати, точно такие же слова можно встретить в нобелевских лекциях многих лауреатов. Именно в объединении всех имевшихся тогда достижений физики и ее методологии в систему – великая заслуга Ньютона. Эта система стала затем теоретическим и методологическим фундаментом дальнейшего развития физики – в ее основе методологические принципы:

1) Не должно требовать в природе других причин, сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснений явлений.

2) Посему, поскольку возможно, те же причины должно приписывать проявлениям природы одинакового рода.

3) Такие свойства тел, которые не могут быть ни усиливаемы, ни ослабляемы и которые оказываются присущими всем телам, над которыми возможно проводить испытания, должны быть почитаемы за свойства всех тел вообще.

4) В экспериментальной философии предложения, выведенные из явлений с помощью общей индукции, должны быть почитаемы за точные или приближенно верные, несмотря на возможность противных им гипотез, пока не обнаружатся такие явления, которыми они еще более уточняются или же окажутся подверженными исключениям. Этому правилу должно следовать, чтобы доводы индукции не уничтожались гипотезами.

Из методологических правил — принципов Ньютона вытекает следующее:

1) идея причинности – все природные явления причинно обусловлены и, следовательно, подчиняются строгим закономерностям. Ньютон заимствовал эту идею у древнегреческих философов вместе с учением об атомизме.

2) идея простоты – природа проста, и в ней нет места излишним причинам.

3) представление об аналогии и индукции, заложенное в третьем правиле. Аналогия же, согласно современным представлениям, есть одна из форм симметрии. В явном виде идея симметрии выражена в третьем законе Ньютона.

4) четвертое правило требует признавать индуктивные методы и выводы, пока не окажется необходимым их корректировать.

Правила Ньютона представляют собой глубоко продуманную и твердую методологическую платформу, остающуюся непоколебимой до настоящего времени.

Итак, развитие методологии конкретно-научного уровня применительно к классической физике, науке макроявлений, воспринимаемых человеком непосредственно, привело к созданию строгой и стройной, логически замкнутой методологической системы. Система эта такова.

Во-первых, ее основанием является понимание предмета и объекта как объективных, существующих реально и независимо от нашего сознания, от сознания познающего субъекта. Поведение объектов подчиняется строгим законам однозначно детерминированного характера и описывается определенным математическим формализмом, допускающим и геометрическое представление.

Во-вторых, направленность научного познания на достижение абсолютного знания о мире (в лапласовском смысле) является методологическим требованием, определяющим направления развития физики.

В-третьих, обозначились четкие методологические принципы научного познания: принцип причинности, принцип познаваемости, принцип полноты теории, принцип однозначности результатов, принцип повторяемости, принцип наблюдаемости и т. п.

В-четвертых, определились методы познания: анализ и синтез, индукция и дедукция, математизация, эксперимент и наблюдения.

Методологическая система такого рода в классической физике выступала как общая для всего физического познания. Сами же принципы и методы исследования специфицировались в зависимости от объектов. Методологическая система классического периода развития физики характеризуется как метафизическая. Считается, что материальные объекты этого мира не меняются, меняются только с течением времени количественные характеристики.

Вплоть до начала XX века все законы Ньютона считались незыблемыми. Физики постепенно привыкли к дальнодействию, и даже пытались приписать его, по аналогии, электромагнитному полю (до появления уравнений Максвелла). Природа тяготения раскрылась только с появлением работ Эйнштейна по Общей теории относительности, когда дальное действие наконец исчезло из физики.

Разрушение методологической системы механицизма началось с 1820 года, когда Г. Эрстед показал, что электрический ток в прямолинейном проводнике, идущем вдоль меридиана, отклоняет магнитную стрелку от направления меридиана. Этим экспериментом Эрстед показал существование сил неньютоновского типа. Из опыта Эрстеда было ясно видно, что сила действует не по прямой, соединяющей магнитный полюс и элемент тока, а по нормали к ней. Классическое описание взаимодействия тел по ньютоновскому типу оказалось невозможным.

Продолжили разрушение абсолютизма методологической системы классической механики исследования А. Ампера и М. Фарадея, а после создания Дж. Максвеллом электродинамики это разрушение стало неизбежным.

Много лет спустя Максвелл писал: «...невозможно себе представить, как из своих экспериментов Ампер мог сформулировать свой закон в такой изумительной математической форме». Это могло случиться потому, что Ампер был одновременно и блестящим экспериментатором и блестящим теоретиком. Память Андре Мари Ампера увековечена: одна из гор на Луне носит его имя, в Париже его именем названа улица. Но главное — любой из нас, измеряя силу тока в электрической цепи, произносит его имя.

Для Максвелла исходным пунктом в создании электродинамики послужили исследования Фарадея, которые были столь оригинальны, что ученые-современники не могли ни воспринять их, ни усвоить.

К концу XIX века электродинамика представлялась уже окончательно сформированной, четко определенной наукой, а установленные принципы допускали практическое свое воплощение в процессе создания электрических машин. Однако Максвелл разрушил идиллическую картину, коренным образом изменив исходные принципы существующей электродинамики. Максвелловский вариант электродинамики вызвал серьезные возражения, направленные как против используемых фундаментальных положений и понятий, так и против слишком вольного обращения с методами, ставшими уже традиционными для физиков. Поскольку же уравнения, полученные Максвеллом, не только давали результаты, полностью согласующиеся с результатами эмпирическими, но и позволяли предсказывать новые следствия, то их просто приняли в качестве постулатов. Дело в том, что методологическая система Ньютона требовала рассматривать пространство как пустое вместилище, а взаимодействие — как непосредственный контакт тел или как действие на расстоянии без какого-либо промежуточного передатчика этого действия. Второй вариант не удовлетворял ученых, ибо отсутствовали наглядность и объяснение причин такого взаимодействия. Введение же представлений об эфире только усложняло ситуацию, ибо в этом случае появлялись совершенно противоречивые свойства. Но идея эфира имела то неоспоримое достоинство, что позволяла дать наглядное представление о передатчике взаимодействия.

Согласно представлениям Ньютона, материя состоит из атомов, находящихся в абсолютно пустом пространстве. Исследования же электромагнитной индукции привели Фарадея к однозначному выводу, что материя «сплошь непрерывна, и рассматривая массу ее, мы не должны предполагать различия между ее атомами и промежуточным пространством». Максвелл, про-

должая исследования Фарадея, определил такую материю, сплошь заполняющую пространство, как поле, введя тем самым в физику понятие, разрушающее представления классической механики. Развитие электродинамики привело к изменению прежде всего мировоззрения и онтологических оснований теоретических представлений. На смену идее дискретности пришла идея непрерывности, абсолютность была заменена относительностью, дальное действие — близкодействием. Но принципы причинности, наглядности и другие, методы математизации, анализа и т. д. остались без существенных изменений, которые могли бы разрушить методологическую систему. Тем не менее электродинамика формировала условия для такого разрушения. В целом же развитие естествознания второй половины XIX века привело к тому, что в начале XX века в методологии сложилась революционная ситуация, которая разрешилась в связи с созданием теории относительности и квантовой механики действительной революцией в методологии, разрушившей дух аристотелизма.

В самом деле, все попытки построения теории вещества и поля на основе классической методологии оказывались безуспешными, так как приводили к результатам либо противоречивым, либо не интерпретируемым в рамках классической методологической парадигмы. Наиболее явно это проявилось при попытках построить электродинамику движущихся сред на основе классической методологии. Х. Лоренцу пришлось здесь вводить представления о сокращении размеров тел в направлении движения, что выглядело совершенно искусственным, прийти к принципиальным противоречиям с принятыми представлениями о времени. Ньютоновские взгляды на пространство и время не позволяли преодолеть возникшие трудности. Необходимо было радикально менять фундамент теории, ее основания, требовалось пересмотреть и методологическую систему.

Сколько-нибудь убедительной физической интерпретации формулам Лоренца в классическом духе не было найдено, т. е. не было никаких оснований для введения таких формул в физику. Кроме того, не было возможности согласовать полевые представления с механическими. С развитием электронной теории были предприняты попытки свести законы механики к законам электродинамики и также безуспешно. В процессе согласования классической механики и электродинамики были отброшены и идеи эфира, и идеи абсолютных пространств и времени.

Таким образом, выявилась несостоятельность фундаментальных физических представлений, лежащих в основе классической физики, для описания совершенно нового класса явлений.

В конечном итоге критический анализ привел к пониманию того, что механика Галилея—Ньютона в своем завершенном виде — это гипотетико-дедуктивная система, эмпирическое обоснование которой имеет опосредованный характер, так как прямой экспериментальной проверки осуществить невозможно.

Решительный шаг в направлении радикального пересмотра теоретико-физических и методологических оснований был сделан Альбертом Эйнштейном, создавшим теорию относительности и внесшим большой вклад в развитие квантовой механики. Именно в процессе становления и развития квантовой механики был сделан наиболее радикальный, революционный шаг в создании новой методологической системы для новой физики.

Квантовая механика разрушила старые представления о материи и движении, взаимодействии, причинности и закономерности и создала новые. Если в основе классической физики лежат корпускулярные представления, в основе электродинамики и теории относительности — волновые, полевые, то в основе квантовой механики — корпускулярно-волновые.

Мир предстал как квантово-полевая система, в которой объективны не только необходимые, но и «случайные» события. Вполне очевидно, что такие радикальные изменения оснований теоретических не могли не привести одновременно и к не менее радикальному изменению оснований методологических, всей методологической системы.

Как известно, квантовая механика возникла в связи с невозможностью в рамках классических представлений объяснить экспериментально наблюдаемое распределение энергии в непрерывном спектре излучения абсолютно черного тела. Для объяснения такой ситуации и ее описания физики вынуждены были ввести понятие элементарных частей энергии — квантов, которое позволяло описывать взаимодействие между веществом и излучением. Фактически здесь речь идет о том, чтобы отбросить классическую электродинамику и заменить ее новой теорией.

Для спасения уравнений Планк предположил, что испускание и поглощение излучения дискретны, а само излучение непрерывно. Эйнштейн же предложил порвать с классической волновой оптикой и признать за квантами энергии особую индивидуальность, не отрицая однако, что волновая теория света, оперирующая с непрерывными функциями точки, прекрасно «работает» при описании чисто оптических явлений. Но группа явлений, связанных с возникновением и превращением света, лучше объясняется предположением, что энергия света распространяется не непрерывно, как трактовалось волновой теорией и чего придерживался и Планк, а дискретно. Тогда «энергия пучка света, вышедшего из некоторой точки, не распространяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только целиком».

В процессе анализа квантовых явлений Эйнштейн основывал тезис, имеющий фундаментальное значение для квантовой механики: «...Нельзя считать несовместимыми обе структуры (волновая и квантовая), которыми одновременно должно обладать излучение в соответствии с формулой Планка». Этим самым он фактически подошел к идее квантово-волнового дуализма, синтезирующего противоположности в единое целое как некую физическую реальность.

Однако в 1951 году Эйнштейн написал: «После 50 лет раздумий я так и не смог приблизиться к ответу на вопрос, что же такое световой квант». Для него квантовая физика все время находилась в кризисе, так как не могла быть согласована с методологическими требованиями классической механики, классической физики в целом, и прежде всего такими, как принцип полноты описания, принцип простоты, принцип причинности в классической интерпретации, от которых он не мог отказаться.

Это препятствие первыми преодолели основоположники квантовой физики – Н. Бор, В. Гейзенберг и Луи де Бройль, но и те сделали это в объеме далеко не полном, который не мог быть сравним с классической методологической системой. Наиболее полно методология в контексте квантовой теории была рассмотрена Бором. Согласно Бору, квантовая теория характеризуется признанием принципиальной ограниченности классических физических представлений в применении к атомным явлениям. В рамках классических представлений физическое явление наблюдается без оказания на него какого-либо влияния. В квантовой же теории ситуация прямо противоположная, так как всякое наблюдение явлений на атомарном уровне предполагает их взаимодействие со средствами наблюдения, которым нельзя пренебречь.

Следовательно, для решения проблемы соотношения пространственно-временного описания и причинности необходимо ввести в методологическую систему принцип дополнительности. Эту идею подтвердил принцип неопределенностей Гейзенберга. Следующий принцип, который Бор выдвигает и обсуждает в качестве методологического, – принцип соответствия, требующий установления связи между классическими представлениями и неклассическими теориями и рассмотрения последних как рационального объяснения и обобщения первых. Другими словами, неклассическая теория при предельном переходе становится классической.

Таким образом, в соответствии с методологической системой Бора не имеет смысла говорить одновременно о локализации квантовой частицы и ее волновых свойствах. Эти два аспекта реальности носят взаимодополнительный характер, и никакие эксперименты не могут обнаружить одновременное проявление указанных двух свойств. Методология Бора позволила существенно развить квантовую теорию, но она не позволила раскрыть физическое содержание такой дополнительности и поставила проблему так называемых «скрытых параметров», которую до сих пор не удалось решить в полном объеме. Отсюда квантовую механику можно определить как феноменологическую теорию.

Неизбежным следствием такого подхода к физике явилось утверждение, что физика может в лучшем случае определить, какова вероятность нахождения в определенный момент времени в некотором объеме пространства (причем это пространство может и не совпадать с реальным физическим пространством) того, что мы называем частицей.

Отрицание возможности познания мира как такового, без последствий вмешательства в него, имело первостепенное методологическое значение в неклассическом научном познании, и именно здесь скрывается непреодолимое противоречие между классической методологической системой и неклассической. Пожалуй, большинство современных физиков до сих пор считают,

что тезис о познаваемости мира как такового, не зависящего от наблюдателя, не имеет физического смысла. Против отрицания возможности познания мира за пределами наших ощущений, предполагающей, что целью физики является всего лишь рациональное координирование человеческого опыта, выступали Эйнштейн и Планк. Так, Планк писал: «Основой и первым условием любой действительно плодотворной науки является метафизическая гипотеза, недоказуемая, конечно, с чисто логической точки зрения, но которую логика тем не менее никогда не сможет опровергнуть, гипотеза о существовании внешнего мира, мира в себе, совершенно не зависящего от нас, хотя мы и не можем получить о нем непосредственного знания, не прибегая к нашим органам чувств».

3. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В XIX ВЕКЕ

3.1. Электропроводность и фотогальванический эффект

3.1.1 Полупроводниковый характер проводимости кристаллических веществ.



Рис.3.1 Фарадей запечатлен на одной из подлинных ранних фотографий (дагерротип)

В 1833 году было зарегистрировано и описано первое наблюдение полупроводниковых свойств кристаллического материала – Майкл Фарадей (Michael Faraday) описывает «экстраординарный случай» наблюдения им электропроводности, которая увеличивается с ростом температуры в кристаллах сульфида серебра. Это совершенно противоположно поведению электропроводности, наблюдаемого в меди и других металлах.

Английский «естественный философ» («natural philosopher»), в наше время таких ученых называют просто физиками, Майкл Фарадей родился 22 сентября 1791 года в предместье Лондона в семье кузнеца. Известен своим открытием взаимодействия между электричеством и магнетизмом, правил электромагнитной индукции и электромагнитного вращения, которые привели к разработке электродвигателя и генератора электроэнергии. В его честь названа

единица измерения электрической емкости – фарад (farad), Ф (F).

Экспериментальная работа Фарадея по химии, связанная с открытием бензола, кроме этого, привела его к первому зарегистрированному наблюдению свойств материала, который в наше время называется полупроводник. Исследуя влияние температуры на сульфид серебра (sulphurette of silver, silver sulfide) в 1833 г., он обнаружил, что электропроводность сульфида серебра увеличилась с увеличением температуры. Это явление, как известно в наши дни, типичное для полупроводников, противоположно для металлов, таких как медь, в которых происходит уменьшение удельной проводимости с ростом температуры.

Сульфид серебра – твердое кристаллическое вещество, является наименее растворимым в воде соединением серебра, имеет черно-серый цвет. Принадлежит к классу бинарных соединений, имеет химическую формулу Ag_2S . Встречается в естественном виде в природе в виде минерала аргентита или акантита. Сульфид серебра можно получить взаимодействием серебра и его соединений с серой, сероводородом или сульфидами. Вот как описывает сам Фарадей изготовление сульфида серебра в своем фундаментальном труде «Экспериментальные исследования по электричеству» в разделе, названном «Общие соображения об электрической проводимости» («On Conducting Power Generally»): «Для изготовления его сплавлялась смесь осажденного серебра и сублимированной серы; с поверхности сплавленной массы с помощью напильника сни-

малась пленка серебра; сернистое серебро превращалось в порошок, смешивалось с новым количеством серы и вторично расплавлялось без доступа воздуха в трубке из зеленого стекла. Если еще раз снять поверхностный слой помощью напильника или ножа, сернистое соединение можно считать совершенно свободным от несвязанного серебра.»

Там же Фарадей пишет: «недавно я натолкнулся на необычный случай ..., который находится в прямом противоречии с влиянием тепла на металлические тела ... Когда под сернистым



Рис.3.2. 1914 год, репринтное издание (перепечатка) книги Фарадея «Экспериментальные исследования по электричеству» издания 1839 года.

соединением ставилась лампа, проводимость быстро возрастала с нагреванием; ... и сернистое серебро оказывалось проводящим, как какой-нибудь металл. Если удалить лампу и позволить теплу упасть, наблюдаются обратные действия»

В наше время мы понимаем, что нагревание большинства полупроводников увеличивает плотность носителей заряда в них и, следовательно, их удельную проводимость. Это явление используется, чтобы изготавливать термисторы – специальные сопротивления, которые проявляют уменьшение электрического сопротивления (или увеличение удельной проводимости) с увеличением температуры.

Заинтересованному читателю будет интересно познакомиться с историей создания труда Фарадея

«Экспериментальные исследования по электричеству». Вначале Фарадей работал в области химии. И первая опубликованная в научном журнале его статья была посвящена результатам анализа тосканской извести (1816 г.). Заметка эта, снабженная введением его научного руководителя Г. Дэви, принесла много радости автору, помогла преодолеть робость. После этого он стал часто писать в журнал отчеты о своих опытах. Имя его получало известность в ученом мире.

Но 15 февраля 1820 г. произошло событие, повлиявшее на всю дальнейшую научную судьбу Фарадея – датский ученый Г. Эрстед обнаружил удивительное явление: при протекании электрического тока по проводнику стрелка компаса отклоняется. Английский ученый Волластон (Wollaston William) предположил, что проволока с протекающим по ней током, должна вращаться вокруг своей оси под действием магнита. Но проведенный эксперимент положительного результата не дал. При разговоре присутствовал Фарадей. Шел 1821 г. В это время по совету Р. Филлипса – редактора научного журнала – молодой ученый пишет научную работу «Опыт истории электромагнетизма», чтобы обобщить все, что было достигнуто в этой области. Он следует своему излюбленному методу – лично проверять все опыты. Неожиданно обобщение «чужого» опыта закончилось блестящим успехом. Фарадей добился непрерывного вращения магнитов и проводов, по которым идет электрический ток. Свое открытие он изложил в статье «О некоторых новых электромагнитных движениях и о теории магнетизма». Датирована она 11 сентября 1821 г. и позже была опубликована в томе втором «Экспериментальных исследований по электричеству». Объясняя достижение Фарадея, можно с уверенностью сказать, что успех пришел к нему после того, как он вооружился историей и методологией науки и техники в области электричества, присовокупив к этому свой великий талант, искусство экспериментатора и огромную работоспособность.

Далее Фарадей работает очень интенсивно, проводя многочисленные опыты, буквально один опыт за другим. Результаты всех опытов по электромагнетизму Фарадей свел в одну статью и 24 ноября доложил собранию членов Королевского общества основные положения этой статьи.

Через пять дней после доклада 29 ноября 1831 г. Майкл Фарадей сообщает в письме редактору научного журнала «Annales of Phylosofy» Королевского общества Ричарду Филлипсу о намерении опубликовать систематически исследования под общим заглавием «Экспериментальные исследования по электричеству».

Первая статья (их Фарадей называл «сериями») датирована 24 ноября 1831 г. Открывалась она разделом «Об индукции электрических токов». В результате открытия оказалось возможным



Рис.3.3 Первое издание на русском языке избранных работ Фарадея

создать приспособление, вырабатывающее электрический ток непрерывно. Основа такого приспособления – проволока, вращающаяся в поле постоянного магнита. Все наши современные электростанции вырабатывают электроэнергию по такому же принципу.

Всего с 1831 по 1838 г.г. Фарадей опубликовал в журнале 14 серий. В марте 1839 г. Фарадей решил серии, которые появились «в течение последних семи лет», собрать в один том. Он хотел «предоставить возможность приобрести за умеренную цену полное собрание этих докладов, снабженное указателем, тому, кто пожелал бы их иметь». Фарадей ничего не менял, он хотел дать «верное воспроизведение или отчет о ходе и результатах всего исследования».

Всего с 1831 по 1855 г.г. Фарадей опубликовал 30 серий «Экспериментальных исследований электричества». Вначале они печатались в журнале Королевского общества. Потом эти «серии» вошли в три тома «Экспериментальных исследований электричества», изданных в Лондоне в 1839, 1844, 1855 гг. Таким образом, гигантский труд был завершён. Более трех тысяч параграфов, составляющих три тома «Исследований», шаг за шагом раскрывают сущность электромагнитных явлений.

На русском языке труды Фарадея по электричеству впервые были изданы в виде сборника отдельных наиболее интересных работ в 1939 г. в Государственном объединенном научно-техническом издательстве СССР [Фарадей М. Избранные работы по электричеству. М.-Л.: ГОНТИ, 1939]. В основу издания положен текст «Experimental Researches in Electricity» 1839–1855 гг. Перевод сверен с трехтомным немецким изданием S. Kalischer'a (1889–1891 гг.) и изданием Ostwalds Klassiker под редакцией A. Oettingen'a. Последнее издание является, собственно, изданием исправленного перевода Поггендорфа, опубликованного в Poggendorffs Annalen – это название дали журналу Annalen der Physik und Chemie в период, когда его редактором и издателем был Иоганн Христиан Поггендорф (нем. Johann Christian Poggendorff). На выпуски журнала до 1900 года часто ссылались по имени действующего редактора – Gilbert's Annalen, или Wiedemann's Annalen или Poggendorffs Annalen.

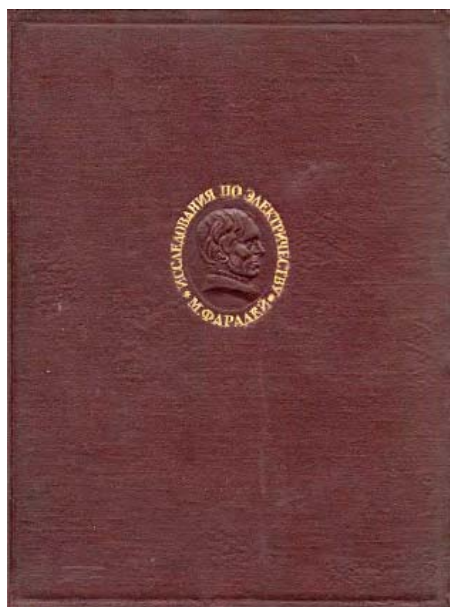


Рис.3.4. Полное издание «Экспериментальных исследований по электричеству» на русском языке.

Ввиду важности вопроса в качестве исключения в советское издание избранных работ Фарадея включена шестая лекция из популярной работы Фарадея: «A course of six lectures on the various forces of matter and their relations to each other». Эта лекция дает формулировку закона сохранения энергии. При отборе статей и отрывков для сборника составитель имел в виду, во-первых, дать документы, касающиеся важнейших открытий Фарадея в области электромагнетизма и электрохимии, во-вторых, показать эволюцию физических воззрений Фарадея и, наконец, выявить философские основы физики Фарадея.

Материал, приведенный в сборнике, расположен в хронологическом порядке и начинается с двух работ Фарадея исторического характера: «Опыт истории электромагнетизма» и «Историческая заметка, касающаяся электромагнитного вращения». Основная работа 1831 г. об электромагнитной индукции дана полностью. В качестве документа исторического значения ей предшествует отмеченное выше письмо Фарадея к Филлипу от 29 ноября 1831 г.

Книжная серия «Классики науки» издается с 1946 года по настоящее время, здесь выпускаются труды выдающихся ученых различных областей знания (физиков, математиков, химиков, биологов, историков, философов). Серия издаётся под эгидой Академии наук (АН) СССР; с 1992 года – Российской АН. Инициатором создания серии был Президент АН СССР академик С. И. Вавилов. Многие работы известных ученых были подготовлены и впервые изданы в рамках серии. За подготовку изданий обычно отвечали ведущие специалисты СССР в соответствующих областях знания.

Одной из первых публикаций серии «Классики науки» были «Экспериментальные исследования по электричеству» М.Фарадея: в 1947 г. вышел первый том «Исследований», в 1951 – второй том и в 1959 – третий том. Комментатором и редактором всех трех томов являлся профессор, член-корреспондент АН СССР Торичан Павлович Кравец, его неожиданная смерть оборвала эту работу. Им был составлен план третьего тома, отредактирован весь текст перевода и написаны примечания к сериям с XIX по XXVI включительно. Профессор Я.Г. Дорфман с коллегами взяли на себя задачу подготовки рукописи третьего тома к печати, ими написан краткий обзор его содержания и самые необходимые примечания, начиная с XXVII серии до конца тома. Третий том «Экспериментальных исследований по электричеству» содержит «серии» от XIX до XXIX включительно и ряд самостоятельных статей.

3.1.2. Возникновение фото–электродвижущей силы в полупроводнике при его освещении



Рис.3.5. Александр Эдмон Беккерель. Литография Пьера Петье (Pierre Petit, 1832-1885)

В 1839 году французский ученый Александр Эдмон Беккерель обнаружил, что при освещении «плохого» проводника светом появляется электродвижущая сила (ЭДС). Действие света по генерации электрического тока, возникновение фото-ЭДС или фотогальванический эффект стал второй загадкой в ряду неразгаданных и удивительных свойств полупроводников.

Парижская семья Беккерель по всей видимости, сделала для науки девятнадцатого века примерно то же, что семья Бах сделала для музыки восемнадцатого века. В 1829 году Антуан Сезар Беккерель построил первую батарею, чтобы дать стабильный источник тока (более ранние версии страдали от серьезного эффекта деполяризации, который быстро снижал полезный выход), а в 1839 году его сын Александр Эдмунд Беккерель заметил, что, когда свет падал на один из электродов батареи, ток возрастал. Это был первый доклад о том, что мы теперь называем «фотовольтаический эффект», который позже был связан с контактом металл–полупроводник. Самым известным членом семьи, однако, был внук Антуана Сезара – Антуан Анри Беккерель, который в 1903 году был удостоен половинной доли Нобелевской премии за открытие радиоактивности.

А.Э. Беккерель (Alexandre Edmond Becquerel) – французский физик, родился 24 марта 1820 года, в

1840 году получил ученую степень доктора, защитив диссертацию в Парижском университете, состоял профессором в агрономическом институте (с 1849 по 1852 год), заведующим кафедрой физики в консерватории ремесел и искусств (с 1853 г.), профессором – администратором в историческом музее естествознания (с 1878 г.), президентом общества содействия национальной промышленности. Первой опубликованной работой Беккереля было изучение солнечного спектра и электрического света ("Comptes rendus de l'Acad. des sc.", 1839 - 41); другие важнейшие работы Беккереля это: "Lois du degagement de la chaleur pendant le passage des courants electriques"; "Effets produits sur les corps par les rayons solaires" (Законы нагревания гальваническим током и действия солнечных лучей на тела). Это перечисление работ А.Э. Беккереля, хотя и не полное, показывает, как разнообразны предметы его исследований. Большая часть их описана в журналах «Annales de chim. et de phys.» (Серия III, IV и V), а также в «Comptes rendus de l'Acad. des sciences».

В контексте развития электронной техники нас будут интересовать исследования А.Э. Беккерелем электрических явлений, происходящих от освещения тел. Явление возникновения электрической энергии, фото-ЭДС, Александр Эдмон Беккерель впервые наблюдал в 1839 г. Причем это было случайное открытие, которое Беккерель описал в своих мемуарах, изданных в 1839 г. в «Comptes Rendus de l'Académie des sciences» – отчётах Парижской академии наук: А.Е. Becquerel, «Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires». Comptes Rendus 9: 561–567. Была установлена возможность генерации напряжения при освещении перехода между электролитом и полупроводником.

А.Э. Беккерель экспериментировал с электролитическим элементом, состоящим из двух электродов, помещенных в электропроводящий водный раствор азотной кислоты. Один электрод был изготовлен из листовой платины и был покрыт тонким слоем хлорида серебра AgCl . Характер второго электрода не совсем ясен из отчета, но это была, вероятно, пластина из платины. Когда платиновый электрод, покрытый хлоридом серебра освещался солнечным светом, то между электродами возникала фото-эдс и протекал ток. А.Э. Беккерелю удалось показать, что ток не вызван эффектом нагрева. Он также получил приблизительную кривую спектральной чувствительности с помощью цветных фильтров, помещавшихся между электродом и источником света – солнцем. Кроме того, он предположил, что ток возникает благодаря химической реакции у электрода и дал правильное описание реакции. С позиции наших дней ясно, что в результате химической реакции получалось серебро и фото-эдс генерировалась на контакте металл–полупроводник Ag-AgCl .

Открытие А.Э. Беккереля оставалось незамеченным вплоть до 1873 г., когда Уиллоуби Смит обнаружил подобный эффект при облучении светом селеновой пластины. Нас интересует история твердотельных полупроводников, поэтому отметим, что до 1870-х годов еще не было такого, чтобы влияние освещения, оптические эффекты, были отмечены в отношении сухого твердого тела (не электролита). В 1873 году Уиллоуби Смит отметил, что электрическое сопротивление образца селена значительно уменьшалось, когда он был под воздействием света. И хотя первые опыты У. Смита были далеко несовершенны, они знаменовали собой начало истории полупроводниковых солнечных элементов. Наблюдения Смита отличались от наблюдения фото-электрического эффекта Беккереля в том, что у Смита проявлялись объемные свойства селена, а не поверхностные, связанные с одним электродом, как в электролитической ячейке Беккереля.

3.2. Эффект выпрямления и эффект Холла

3.2.1. Эффект выпрямления в точечном контакте металла к полупроводнику

Вскоре после открытия Фарадеем отрицательного температурного коэффициента сопротивления «плохих» проводников (полупроводникового характера проводимости) физиком Розеншельдом (1804-1860) (швед. Munck af. Rosenschöld Peter Samuel), работавшим в Германии, на-

блюдалось явление асимметричной проводимости в твердых телах. Розеншельд опубликовал свои исследования в журнале *Annalen der Physik und Chemie* за 1835 год, том 54, стр. 437–463. Статья называлась «*Versuche über die Fähigkeit starrer Körper zur Leitung der Elektrizität*» (нем.) – «Опыты над способностью твердых тел проводить электричество». Перевод работы Розеншельда на русский язык в очень сокращенном виде был опубликован в историческом сборнике «Из предыстории радио», выпущенном в СССР к 50-летию радио. В переводе были оставлены только описания экспериментов по проводимости измельченных порошков, явившихся предтечей изобретения когерера, что соответствовало тематике сборника. После публикации в 1835 г. научная работа Розеншельда по асимметричной проводимости оказалась заброшенной на долгое время и никто не обратил на нее внимания, а выдающееся физическое явление односторонней проводимости твердых тел пришлось через сорок лет заново переоткрывать немецкому физику Карлу Брауну в 1874 г.

Впрочем, возможно, что практического применения полупроводниковые выпрямители тогда, в первой половине девятнадцатого века, не нашли бы. Тогда еще не было беспроводной телеграфии (радио) и не было необходимости детектирования радиосигналов. Генераторы переменного электрического тока в то время только начали появляться. Еще долго практического применения переменному току не обнаруживалось, вплоть до 1878 года, когда русский ученый П.Н. Яблочков предложил использовать переменный ток для питания своих электрических свечей освещения.

Почему судьба распорядилась именно так, задержав на десятки лет появление кристаллических выпрямителей, остается только догадываться, ясно только, что появление твердотельных выпрямителей переменного тока и светочувствительных фотоэлементов могло произойти на целых сорок лет раньше, если бы ученые заинтересовались всерьез работами Розеншельда.



Рис.3.6. Карл Фердинанд Браун

В 1874 году немецкий физик Карл Фердинанд Браун (Karl Ferdinand Braun) открыл выпрямительный эффект в точечном контакте металл–полупроводник. В первом, записанном в рабочем журнале, описании полупроводникового диода Браун отмечает, что в точечном контакте между металлическим острием и кристаллом свинцового блеска электрический ток свободно протекает только в одном направлении. В журнале *Annalen der Physik und Chemie* за 1874 г. Браун опубликовал свою статью, где он описал важнейшее свойство полупроводников (на примере серных металлов) – возможность проводить ток только в одном направлении.

Карл Фердинанд Браун является одним из наиболее выдающихся физиков Германии, работы которого на протяжении нескольких десятилетий украшали немецкие физические журналы. Краткие биографические сведения о К.Ф.Брауне можно получить из официальных материалов о нобелевских лауреатах, например из «*Les Prix Nobel*», издания Шведской академии наук, от которой Браун получил нобелевскую премию в 1909 году, когда ему было 35 лет. В наше время эти сведения можно найти на официальном сервере о нобелевских лауреатах и в русском варианте сборника о нобелевских лауреатах по физике.

Карл Фердинанд Браун родился в небольшом немецком городке Фульда 6 июня 1850 года и окончил в 1868 году гимназию в своем родном городе. Уже в школьные годы юный Браун проявил склонность к научной работе – в 15-летнем возрасте сочинил и оформил рукописную книгу по кристаллографии, снабдив ее двумястами собственноручно выполненными рисунками. Посещал затем лекции в университетах Марбурга и Берлина и окончил с дипломом доктора Берлинский университет в 1872 году, представив работу о колебаниях упругих струн. Затем он поступил ассистентом к профессору Квинке (Quinke) в Вюрцбург и оставил это место осенью 1874 года, приняв место преподавателя в гимназии Святого Фомы (St. Thomas) в Лейпциге. Осенью 1876 г. он принял предложение занять экстраординарную профессию теоретической физики в Марбургском университете и затем в 1880 г. перешел на ту же должность в Страсбургский университет.

В 1883 году он перешел ординарным профессором в высшую техническую школу в Карлсруэ, а в 1885 г. – в Тюбингенский университет, где ему выпала задача построить физический институт. В 1895 году он возвратился в Страсбург директором Физического Института и здесь оставался до кончины, несмотря на приглашение переехать в Лейпциг на место профессора Видеманна (G. Wiedemann).

Первые работы Брауна относились к колебаниям струн и упругих стержней и в особенности к влиянию амплитуды и окружающей среды на колебания. В будущем эти знания сыграют свою роль в развитии таких важных технических направлений, как, например, вибросчетные датчики, обладающие уникальными свойствами – прямое преобразование значения физической величины в значение частоты колебаний (частотный выход).

Большая часть работ Брауна принадлежала исследованиям в области электричества. Он показал (1878 и 1882 г.г.), что Томсон-Гельмгольцевская теория электродвижущих сил обратимых гальванических элементов недостаточна, и что химическая энергия вообще не может целиком переходить в электрическую. В других исследованиях (1874 г. и следующие годы) он установил, что большая часть двойных соединений (серный колчедан и другие) обнаруживает отступления от закона Ома и показывает вентильное действие для переменных токов – свойство, используемое в последующие годы для беспроводной телеграфии, когда данными веществами стали пользоваться как детекторами радиосигналов.

В 1891 году он обнаружил, что внутри однородного электролита, при прохождении тока через очень узкий канал, заполненный электролитом, наступает разложение (стенолиз), если сила тока переходит известный предел.

В 1897 Браун описал трубку с катодными лучами, носящую его имя, которая позволяет изучать течение во времени весьма частых изменений силы тока и напряжений.

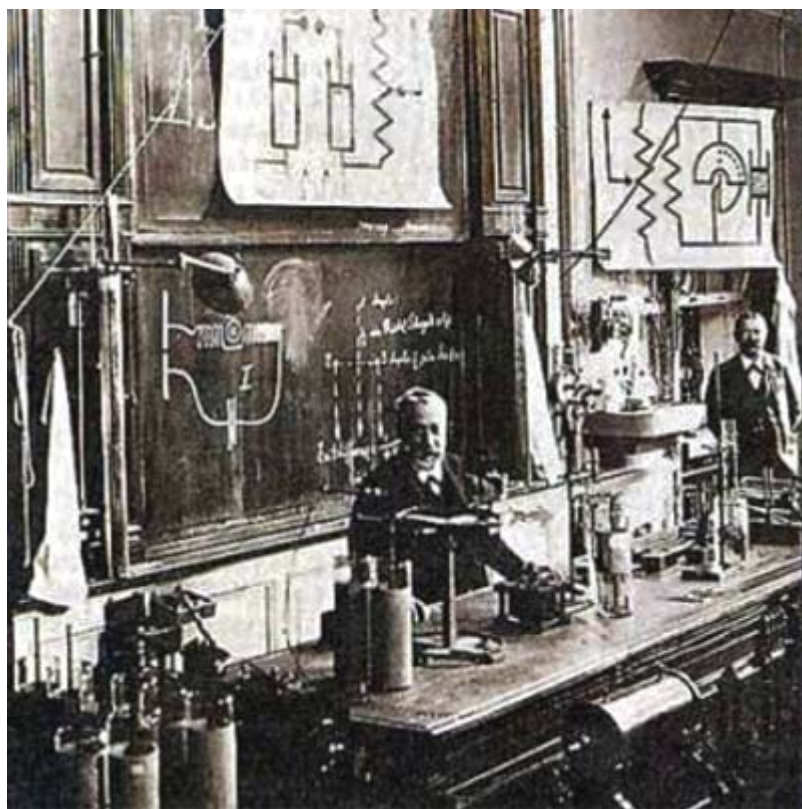


Рис.3.7. К.Ф. Браун в своей лаборатории.

В 1898 году он начал заниматься беспроводной телеграфией. Вслед за опытами, касающимися передачи сигналов при помощи частых колебаний. Браун ввел связанные системы в беспроводную телеграфию, причем связь устанавливалась или индуктивная, или прямая, или являлась комбинацией той и другой. На рис.3.7, где Браун на переднем плане изображен в своей лаборатории, хорошо видны плакаты с изображением связанных систем с индуктивной или прямой связью. В начале 1901 года он опубликовал свой метод настройки радиоприемной системы; летом 1902 года он доказал возможность направленной беспроводной телеграфии, осуществленной при помощи наклонения антенны. В течение этого же года Браун дал различные методы, увеличивавшие энергию излучающей системы; в

1905 году он закончил опыты над направленной телеграфией при помощи колебаний, отличающихся по фазе друг от друга. В 1906 году он описал вентильный кристаллический детектор, свойства которого он исследовал ранее, в молодые годы.

Будучи молодым 24-летним выпускником Берлинского университета и ассистентом профессора Квинке в университете Вюрцбурга, Браун изучал характеристики электролитов и кри-

сталлов, которые проводят электричество. Когда он исследовал контакт кристалла свинцового блеска (сульфид свинца PbS) и тонкой металлической проволоки, то заметил, что ток протекал свободно только в одном направлении. Сопротивление контакта не подчинялось известному и почитаемому всеми физиками закону Ома. Более того, свойства контакта определялись величиной и знаком приложенного напряжения.

Его эксперименты на сульфидах металлов однозначно показали отклонения от закона Ома: токи через контакт между металлом и полупроводником проходили более легко в одном направлении, чем в другом. Различия были невелики, поэтому, возможно, другие наблюдатели не обращали на них внимания, хотя по крайней мере один – Хервиг (Herwig, 1874) мимоходом отметил их. Но дотошный Браун, убедившись, что это не были экспериментальные артефакты, признал эти различия как значительные и установил, что они составляют величину до 30 процентов. Открытие Брауном выпрямительного эффекта стало залпом в битве за понимание трудных и сложных разделов физики твердого тела, что приведет в будущем к огромным технологическим последствиям. Но в то время эти наблюдения не произвели сенсацию по нескольким причинам. Не у всех исследователей наблюдался этот эффект. По крайней мере, один исследователь, француз Дуфет (Dufet) в 1875 году сообщал, что в своих экспериментах не смог наблюдать ничего подобного. Однако опыты Брауна успешно повторил в 1876 году Вернер фон Сименс (Werner von Siemens) (1816-1892) в Германии, подтвердив полученный Брауном результат. Причем Сименс отмечал, что явление было «очень изменчивым и трудно предопределяемым». Оказалось, что успех зависел от того, как были установлены кристаллы и металлические электроды. Но это еще не все – в том же 1874 году, когда Браун обнародовал свое открытие, молодой Артур Шустер (Arthur Schuster) (1851-1934) в Англии провел успешные эксперименты по наблюдению выпрямительного эффекта. Однако Шустер в своих экспериментах имел дело с контактом окисла меди с неокисленной медной проволокой. В эксперименте Шустера слой оксида меди, выращенный на неокисленной проволоке, играл роль полупроводника и обеспечивал контакт, обладающий выпрямляющими свойствами. Шустер впервые дал этому эффекту название «односторонняя проводимость», опубликовав свои результаты в статье «On Unilateral Conductivity» в журнале *Philosophical Magazine*, том 48 (октябрь 1874 года), стр. 556–563.

В последующей статье Браун (1877 год) отметил вклады Шустера и Сименса и особо подчеркнул, что один из результатов Сименса подтвердил то, что и Браун тоже обнаружил: эксперимент проходил успешно только тогда, когда площадь металлического контакта была значительно меньше чем площадь поверхности кристалла. В своей первой статье Браун этого не показал. Это было именно то, почему Дуфет, работавший с контактными электродами равного размера потерпел неудачу. В своей статье 1877 года Браун не только подробно остановился на этих вопросах, но также сообщил, что сопротивление, вероятно, не зависит от числа контактов, используемых при его измерениях. Он пришел к выводу, что главные вентильные явления, должны иметь место в тонком поверхностном слое. В этом Браун выходит далеко за рамки его статьи 1874 года, в которой он предположил, что изменения сопротивления, наоборот, могут иметь место внутри кристалла.

Итак, Браун обнаружил явление выпрямления в точке контакта между металлами и некоторыми кристаллическими материалами в 1874 году, что было подтверждено экспериментами Шустера и Сименса. 14 ноября 1876 года в Обществе естественных наук в Лейпциге Браун продемонстрировал полупроводниковый выпрямительный эффект ученой аудитории на примере пяти различных материалов. В протоколе собрания торжественно записано: «отклонения [указателя измерительного прибора] различались в зависимости от направления тока». Однако это интересное явление не нашло полезного применения вплоть до появления радио и в начале 1900-ых оно было использовано для детектирования радиосигналов в системе «кристаллического радио». Конструкция точечного детектора получила описательное имя «кошачий ус» («cat's-whisker»), поскольку в ней использовался заостренный металлический зонд для электрического контакта с поверхностью кристалла. Заостренная проволока и кристаллическая пластина и сейчас присутствуют на электрических схемах в виде схематического изображения твердотельного диода.

Эффект выпрямления тока был обнаружен во многих минеральных веществах. К ним были отнесены сульфиды и оксиды металлов – сернистый цинк, перекиси свинца, карборунда и других, кремний, закись меди и другие. Этот класс веществ стали называть полупроводниками. Большинство ученых связывали вентильный эффект плохих проводников с термическим, тепловым эффектом. Но Браун показал, что это не так и что побочный нагрев не является причиной выпрямления тока. Однако истинную природу выпрямления тока тогда объяснить так и не удалось. Это была третья загадка «плохих проводников».

В 1883 году Уильям Хаммер (William J. Hammer), работая в лаборатории Т.Эдисона (Thomas Edison's), заметил явление выпрямления, когда он добавил второй электрод к горячей нити накаливания в вакуумной лампочке. В 1904 году Джон Флеминг (John Fleming) запатентовал однонаправленную «колебательную лампу», основанную на, так называемом, «эффекте Эдисона». Это устройство преобразовывало переменные токи радиосигнала в звуковые сигналы в наушниках или громкоговорителе. Известный сегодня как вакуумный диод, лампа Флеминга была первым практическим электронным прибором, восполнившим недостатки полупроводников и на десятки лет вытеснившим их из электроники.

Точечный выпрямительный диод Брауна, появившийся за тридцать лет до вакуумной лампы, выполняет ту же самую функцию, используя полупроводниковые свойства кристаллических веществ, а не термоэлектронные свойства вакуумных ламп. Интересно отметить, что открытие Брауном вентильного эффекта явилось формальным поводом для отказа в 1900 году в выдаче немецкого патента русскому пионеру беспроволочной телеграфии Александру Степановичу Попову на изобретение *детекторного* «телефонного приемника депеш», успешно запатентованного



Рис.3.9. Карл Фердинанд Браун, 1909

во Франции и в Англии, хотя кристаллические детекторы Брауна фактически стали применяться только с 1906 г. В 1909 году Браун разделил Нобелевскую премию с Гульельмо Маркони (Guglielmo Marconi) за «вклад в разработку радиотелеграфии». Если бы не безвременная кончина А. С. Попова в 1906 году, он, несомненно, разделил бы в 1909 г. славу Нобелевского лауреата вместе с Г. Маркони и К. Ф. Брауном.

В своей нобелевской лекции «Electrical oscillations and wireless telegraphy», прочитанной Брауном 11 декабря 1909 года при вручении нобелевской премии за работы в области беспроволочной телеграфии (радио), Браун уже называл выпрямительный элемент *детектором* и так описывал сделанное им открытие вентильного эффекта точечного контакта металла с полупроводником: «И еще в одном месте беспроволочная телеграфия привела меня к исследованиям, проведенным мной ранее; на этот раз это была работа, которой я занимался в юности. В 1874 году я обнаружил, что материалы типа галенита, колчедана, пиролюзита, тетраэдрита и т.п. не подчиняются закону Ома, особенно когда электрод контактирует с малой площадью поверхности. Эти материалы очень меня интересовали, поскольку они проводят электричество



Рис.3.8 Александр Степанович Попов. 1905 год.

без электролиза, несмотря на то, что представляют собой двойные соединения. Получалось, что сопротивление зависит от направления и силы тока, так что я мог, к примеру разделить с помощью этих материалов токи замыкания и отключения небольшого индуктора так же, как это происходит в трубке Гейслера. Мне не удалось «объяснить» данные явления, например, какая асимметрия материала соответствует электрическим асимметриям (которые, несомненно, существуют). Мне пришлось удовольствоваться тем, что я показал, что наблюдаемые явления возникают не вследствие вторичных эффектов типа нагрева. Я сумел показать, что это свойство проявляется количественно, по крайней мере, даже за $1/500$ долю секунды, и был убежден, что, может быть, в самой отдаленной степени, здесь идет речь о безынерционном процессе. Это мнение поддержал Э. Кон, который провел несколько экспериментов и обнаружил, что несимметричное сопротивление постоянному току может следовать за колебаниями тока с частотой 25 кГц. Но меня не покидало чувство неудовлетворенности, а вместе с ним и смутное воспоминание, которое, судя по всему, продолжало дремать в глубинах моего разума. Когда в 1898 году я начал заниматься беспроволочной телеграфией, то опять инстинктивно пришел к этому эффекту клапана (с помощью которого я много раз, хотя и тщетно, пытался получить постоянный ток из световых колебаний). Элементы проявляли ожидаемый эффект детектора, но в то время не дали никаких преимуществ над когерером. Когда произошел переход к принятию сообщений на слух, я вернулся к этим материалам и в 1901 году понял, что они могут оказаться полезными для этой цели. В 1905 году Gesellschaft für drahtlose Telegraphie (Компания беспроволочной телеграфии), исходя из моей рекомендации, решила начать технический проект в этой сфере деятельности. Сегодня эти детекторы, включая и другие комбинации подобного рода, распространены очень широко. Пирс с помощью электронно-лучевой трубки продемонстрировал для медленных колебаний почти полное разделение положительной и отрицательной составляющих тока в случае молибденита. Мне кажется, что вопрос о том, происходит ли то же самое и для быстрых колебаний, по-прежнему остается открытым.»

Нобелевская речь К.Ф. Брауна впервые была переведена на русский язык его учениками и сотрудниками Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси и под названием «Мои работы по беспроволочной телеграфии и электрооптике» была издана отдельной книгой в России, в Одессе, в издательстве «Матезис» в 1910 году и стала раритетом. В 2002 году нобелевская лекция Брауна была издана на русском языке в сборнике «Нобелевские лекции по физике 1901–1921». Замечательное издательство «Матезис» возродилось в наши дни, есть его прекрасный сайт по адресу <http://www.mathesis.ru>. С оригиналом нобелевской лекции Брауна и других лауреатов премии Нобеля можно познакомиться на сайте <http://www.nobelprize.org>.



рис.3.10 Эдвин Холл

3.2.2. Классический эффект Холла

В 1879 году Эдвин Холл (англ. Edwin Herbert Hall, 7 ноября 1855 – 20 ноября 1938) в возрасте 24-х лет будучи аспирантом работал над своей докторской диссертацией (эквивалентно российской диссертации кандидата наук) в новой физической лаборатории своего научного руководителя профессора Генри Роулэнда при Университете Джона Хопкинса (англ. Johns Hopkins University). Это – частный исследовательский университет, основанный Джоном Хопкинсом (американский финансист и филантроп) в городе Балтимор, штат Мэриленд, США. С этим университетом связана научная и исследовательская деятельность 34-х лауреатов Нобелевской премии, работавших здесь в разное время, университет Хопкинса один из самых цитируемых в мире.

Генри Аугуст Роулэнд (англ. Henry Augustus Rowland), получивший известность за его работу по дифракционным решеткам и их применению в спектроскопии, попросил Холла исследовать некое замечание, сделанное экспериментом Джеймсом

Клерком Максвеллом о влиянии магнитного поля на электрический ток. В «Трактате по электричеству и магнетизму» Максвелл писал, что когда проводник с током помещен в магнитное поле, то поле действует на проводник, а не на ток.

Роулэнд полагал, что магнитное поле, направленное под прямым углом к направлению тока, должно приводить к стремлению носителей заряда отклоняться к одной стороне образца, тем самым создавая разность потенциалов на противоположных гранях образца. Он пытался, но безуспешно, измерить этот эффект в достаточно толстом образце металла. Холл позже показал правильность гипотезы Роулэнда, измерив такой потенциал, причем Холл, по совету Роулэнда, использовал в качестве образца *тонкие пластинки* сусального золота (золотую фольгу). Для количественных измерений Холл использовал фольгу с точными размерами: ширина 2 см и длина 9 см, размещенную на толстом листовом стекле. Медные полированные контакты прижимались к краям полоски золота, а свободный от контактов участок фольги имел длину 5 см и сопротивление 2 Ома. По краям полоски золота, ровно посередине, были закреплены полюса гальванометра Томсона с высоким сопротивлением для измерения поперечного напряжения. Благодаря непосредственным советам и помощи профессора Роулэнда эксперименты с золотой фольгой оказались успешными, их результаты были опубликованы Холлом в статье «On a New Action of the Magnet on Electric Currents» в журнале *American Journal of Mathematics* vol 2, 1879, p.287-292.

Роулэнд, по-видимому, был чрезвычайно скромным человеком и не закрепил свое собственное имя за этим эффектом, поэтому этот эффект получил название «эффект Холла».

Холл обнаружил, что вдоль прямой, перпендикулярной к вектору напряженности магнитного поля и к вектору тока образуется разность потенциалов. Первая трактовка этого явления была неправильной, потому что в случае других проводников разность потенциалов возникала в направлении, противоположном направлению в случае с золотом. В одних проводниках и полупроводниках возникающее электрическое поле направлено в одну сторону, в других – в противоположную. Получалось, что кроме отрицательно заряженных частиц существуют и какие-то, в то время неизвестные, частицы, заряженные положительно. Открытое явление стало четвертой загадкой «плохих» проводников.

Сам Холл следующим образом описывал этот эффект в своей дневниковой записи от 10 ноября 1879 года: «Казалось неосторожным поверить, что открыто новое явление, но теперь, когда прошло почти две недели и эксперимент был успешно повторен при разных обстоятельствах ..., уже можно заявить, что магнит в самом деле действует на электрический ток или, по крайней мере, на электрическую цепь, и этот эффект никогда явно не наблюдался и не был доказан».

Итак, Холл обнаружил, что если проводник с током поместить в магнитное поле, перпендикулярное току, то в проводнике возникнет электростатическое поле, направленное перпендикулярно магнитному полю и току. Это поле создает разность потенциалов на взаимно противоположных гранях образца, которую можно непосредственно измерять в экспериментах.

В оригинальном эксперименте Холла с тонкой золотой пластинкой знак поперечного напряжения оказался отрицательным и такое поведение проявляется у ряда других металлов, но другие материалы давали положительные знаки возникающего поперечного напряжения. Как положительные, так и отрицательные носители заряда отклонялись к одной из сторон образца в зависимости от знака заряда и направления магнитного поля, что создавало поперечное напряже-



Рис.3.11 Генри Аугуст Роулэнд (1848-1901)

ние того или иного знака. Холл осознал, что направление вектора напряжения будет зависеть от того, какие заряды – отрицательные или положительные – являются носителями тока. Отсюда следует важная особенность открытия Холла – знак носителей заряда мог быть установлен из знака поперечного напряжения – напряжения Холла.

В 1880 году эти эксперименты были опубликованы в качестве тезисов докторской диссертации Холла в журналах «American Journal of Science» и «Philosophical Magazine».

На момент своего открытия эффект Холла не мог быть точно интерпретирован, потому что природа носителей заряда была в то время по-прежнему неизвестна. Механизм ионной проводимости электролитов был достаточно хорошо изучен и были ученые, которые выступали за аналогичный механизм в твердых телах. Идея электронного газа, хотя и была неизбежна, но находилась пока в ожидании открытия Дж. Дж. Томсоном электрона в 1897 году.

Более полувека, полузабытое явление, обнаруженное Холлом, оставалось в тылу физической науки. Откопали его в архивах специалисты по твердотельной электронике. Выяснилось, что, если грубые измерительные приборы времен Холла заменить на современные, то открытое им явление можно использовать для подсчета числа заряженных частиц, движение которых порождает электрический ток. Это очень важно для конструкторов малошумящих и других высокочувствительных микроэлектронных устройств, работающих с очень слабыми токами и магнитными полями.

Эффект Холла позволяет определить тип носителей заряда (электронный или дырочный) в металле или полупроводнике, что делает его незаменимым методом исследования свойств полупроводников. Холловские измерения дают очень важные сведения о количестве электронов в единице объема проводника, так как отношение напряжения Холла U_x к току I , пропускаемому через проводник, зависит от концентрации носителей заряда n . Это отношение обычно называют холловским сопротивлением и обозначают R_x , оно пропорционально индукции магнитного поля B и обратно пропорционально концентрации электронов n .



рис.3.12 Сольвеевский конгресс 1924 года. 1 ряд слева-направо: Э.Резерфорд, мадам Кюри, Э.Г.Холл, Х.А.Лоренц, У.Г.Брэгг, М.Бриллюэн, В.Х.Кеезом, И.Ван-Обель. 2 ряд слева-направо: П.Дебай, А.Ф.Иоффе, О.У.Ричардсон, В.Броневский (Варшава), В.Розенхайн, П.Ланжевен, Д.де Хевеши, 3 ряд слева-направо: Л.Бриллюэн, Э.Хенриот, Т.де Дондер, Эд.Герцен, О.Пикар, Э.Шредингер, П.У.Бриджмен, Ю.Вершафельт.

Эдвин Холл впоследствии стал крупным ученым, известным физиком. В 1924 году он участвовал в IV Сольвеевском конгрессе вместе с известными крупными физиками всего мира.

Сольвеевские конгрессы – целый ряд конгрессов, которые возникли по инициативе Эрнеста Сольве (16 апреля 1838 — 26 мая 1922). Это был бельгийский химик-технолог и предприниматель, предложивший в 1911 году провести международный форум физиков, названного в честь него Сольвеевским конгрессом. Сольве основал Международный институт физики, далее руководивший проведением конгрессов. Сольвеевский конгресс позволял обсуждать фундаментальные проблемы физики, поэтому послужил стимулятором развития физики. В период с 1911 по 2005 гг. в Брюсселе состоялось 25 Сольвеевских конгрессов.

Конгресс установил новый тип научных встреч: для обсуждения самых важных проблем приглашались только самые компетентные эксперты. Эта традиция сохранялась многие годы. Ранние Сольвеевские конгрессы – это уникальные исторические источники о развитии физики.

4. XIX–XX ВЕК. РАЗВИТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДО ОКОНЧАНИЯ ВТОРОЙ МИРОВОЙ ВОЙНЫ

4.1. Широкое техническое применение полупроводников до конца 30-х годов XX века.

Следует особо отметить, что созданная в 1860–1865 годах Дж. Максвеллом теория электромагнитного поля не объясняла ни одну из четырех полупроводниковых загадок: электропроводность полупроводников, установленную М.Фарадеем; фотогальванический эффект Эдмона Беккереля; эффект выпрямления К.Ф. Брауна; эффект Э.Холла. Но ничто не мешало предприимчивым ученым использовать на практике указанные явления.



рис.3.13 Уиллоуби Смит

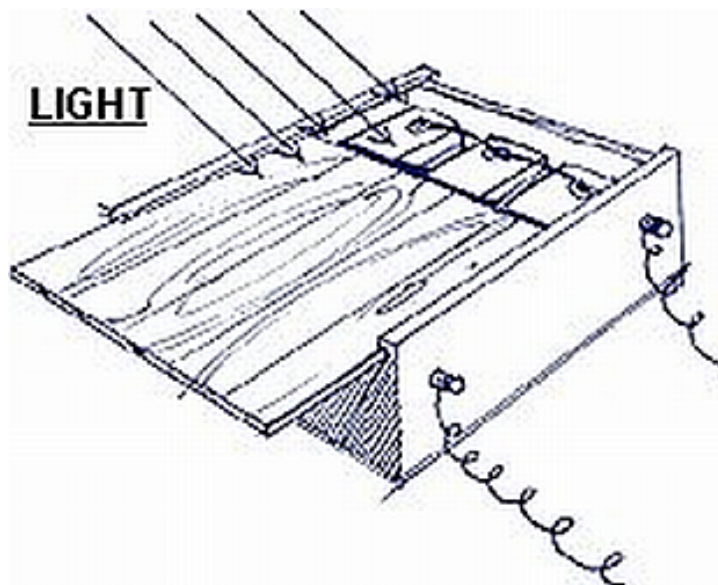


рис.3.14 Внутри коробки селеновые элементы. Закрытая крышка – высокое сопротивление. Открытая крышка – низкое сопротивление.

Вернемся к открытию У.Смитом светочувствительности электропроводности селена. Уиллоуби Смит (англ. Smith Willoughby, 6 апреля 1828 года – 17 июля 1891 года) был известным английским инженером–электриком, занимался прокладыванием подводных морских кабелей для телеграфа и искал материал для надежной изолирующей оболочки для кабеля. В то время селен называли металлом (как таковые полупроводники еще не были известны), но с очень высоким сопротивлением, близким к диэлектрическому. Значения сопротивления селена, измеренные разными экспериментаторами, не совпадали друг с другом. Внимание Смита на это обратил его наблюдательный помощник Мэй, который заметил, что в темноте селен имел высокое электрическое сопротивление, а при освещении солнечным светом сопротивление заметно уменьшалось. Вследствие этого не совпадали результаты измерений сопротивления разных экспериментаторов, из которых никто не обращал внимания на различные условия освещенности. Смит предпринял несколько опытов с селеном, а результаты экспериментов опубликовал в 1873 году в журнале Nature, том 7, стр.303 в статье под названием «Effect of Light on Selenium during the passage of an Electric Current». Вот как Смит описывает свои опыты (перевод автора данной работы): «Необходимость соответствующего более высокого сопротивления для использования в соединении береговой станции с моей системой испытания и передачи сигналов во время погружения длинного подводного телеграфного кабеля, стимулировали меня экспериментировать с образцами селена, известным металлом очень высокого сопротивления..... около 1,4 мегаОм. Я получил несколько образцов различной длины от 5 до 10 сантиметров и диаметром от 1 до 10 миллиметров.

Каждый образец был герметично закрыт в стеклянную трубку и по краям образца снабжен двумя платиновыми выводами. ... Когда образцы помещались в коробку со сдвигающейся крышкой, так чтобы исключить весь свет, их сопротивление становилось очень высоким и стабильным, что полностью удовлетворяло моим требованиям; но когда крышка сдвигалась, то проводимость увеличивалась на величину от 15% до 100%, в зависимости от интенсивности освещения.

Простое движение руки над трубками увеличивало сопротивление селена на 15-20%. Если свет пропускаться через пластинку из соли или через разноцветные стекла, то сопротивление изменялось в соответствии с количеством света, проходящего через стекло. Чтобы исключить влияние температуры на эксперименты один из образцов помещался в емкость с водой, так чтобы слой воды для прохождения света имел толщину около дюйма, но результаты оставались теми же. Если же над поверхностью воды на расстоянии девяти дюймов воспламенялась узкая полоска магния, то от освещения сопротивление уменьшалось более чем на две трети, возвращаясь к прежнему темновому значению после прекращения света». У. Смит и его помощник Джозеф Мэй впоследствии установили, что этим свойством обладают и другие вещества.

Эффект фотопроводимости селена стали использовать для практических целей. В первую очередь как селеновый резистор, меняющий свое сопротивление при освещении. При этом, конечно, селеновый элемент нужно было включать в цепь с источником питания.

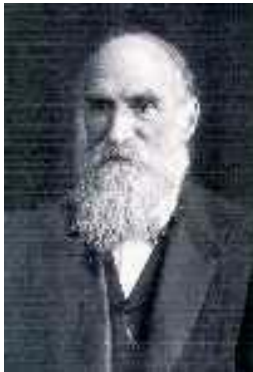


рис.3.15 Адамс У.

Уже в 1876 году, всего через 3 года после того, как У.Смит обнаружил фоточувствительность объемной проводимости селена, британский ученый, профессор Кингс-колледжа в Лондоне Уильям Адамс (англ. William Grylls Adams, 1836 – 1915) и его студент Ричард Эванс Дэй (англ. Richard Evans Day) открыли фотогальванический эффект на

границе двух твердых тел. Адамс и Дэй работали с образцами селена, к которым они прикрепили электроды – платиновые проволочки. Экспериментируя с такими образцами, они заметили, что при освещении солнечным светом контакта платины и селена на торцевых платиновых электродах появляется

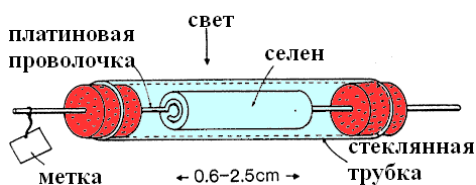


рис. 3.17 эксперимент Адамса

электрическое напряжение, а в цепи с таким образцом возникает

электрический ток. В наши дни ясно, что, по существу, контакт платины и селена создавал запорный слой, генерирующий электрический ток вследствие его освещения солнечным светом. Таким образом, Адамс и Дэй изготовили

первый фотоэлемент на основе контакта селена и платины – первый солнечный элемент. Результаты работ Адамс опубликовал в Трудах Королевского общества в Лондоне (англ. Proceedings of the Royal Society of London). Нет ничего удивительного в том, что публикации вышли в свет под авторством одного профессора Уильяма Адамса: первая (англ. The Action of Light on Selenium-

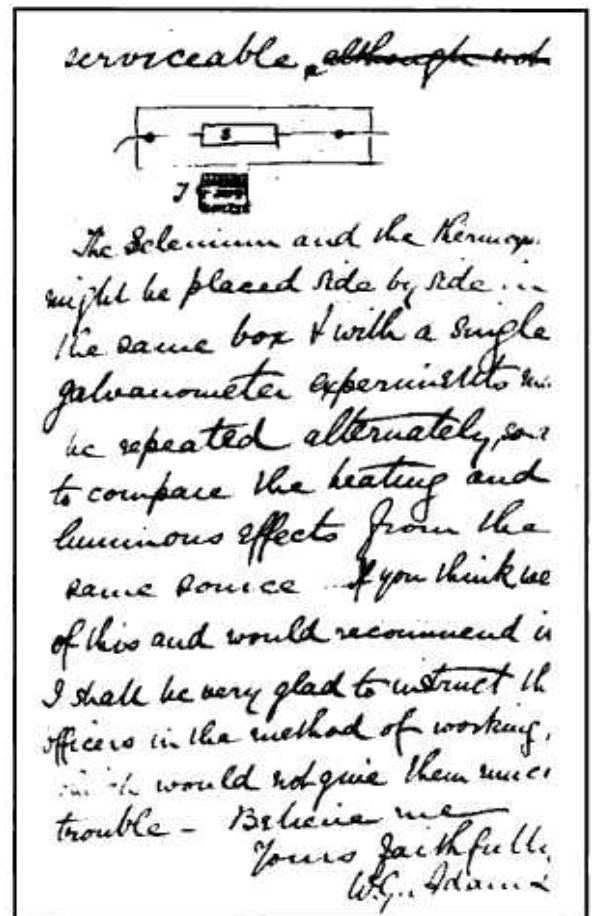


рис.3.16 Страница из рукописи Адамса и Дэй, подготовленной для опубликования их важного открытия, с рисунком Адамса, изображающим первый селеновый солнечный элемент.

Действие света на селен, 1874 год, том 23, стр. 535–539) и вторая (англ. On the Action of Light on Tellurium and Selenium–Действие света на теллур и селен, 1875 год, том 24, стр.163–164). Следующие две работы вышли уже в соавторстве с Ричардом Дзем: первая – в тех же Трудах Королевского общества в Лондоне (англ. The Action of Light on Selenium–Действие света на селен, 1876 год, том 25, стр. 113–117), вторая работа – в журнале Философские труды Королевского общества в Лондоне (англ. Philosophical Transactions of the Royal Society of London) (англ. The Action of Light on Selenium–Действие света на селен, 1877 год, том 167, стр.313-349). Слово «философский» в названии журнала обозначает натурфилософию, которой в то время называли естественные науки. В рукописи на рис.3.16 можно видеть, что в начале говорится о селене (англ. The Selenium and the...), а в конце различима подпись W.G.Adams.

В 1883 году американский электротехник и изобретатель из Нью-Йорка Чарльз Эдгар Фриттс (англ. Charles Edgar Fritts), опираясь на свой опыт работы в качестве электротехника, изготовил первый солнечный элемент (фотоэлектрический преобразователь) на основе селена. Результаты работы были опубликованы им в статье «A New Form of Selenium Cell» в журнале American Journal of Science, том 26, (декабрь, 1883), стр. 465-472.

Процедура изготовления фотоэлемента заключалась в следующем. Расплавленный селен сжимался между пластинами из двух разных металлов и получалась тонкая пленка селена, которая, за счет хорошей адгезии, присоединялась к одной из двух пластин, а именно к медной пластине. Толщина пленки селена имела значения от 25 до 125 микрон. К другой пластине адгезии селена не было и эта пластина убиралась. На свободную поверхность селена при нажатии наносилась тончайшая полупрозрачная пленка сусального золота, тем самым образовывался "тонкопленочный" фотоэлектрический элемент, его площадь составляла 30 см². Через пленку золота свет проникал к контакту между золотом и селеном и производил электродвижущую силу, которая измерялась между золотым электродом и медной подложкой.

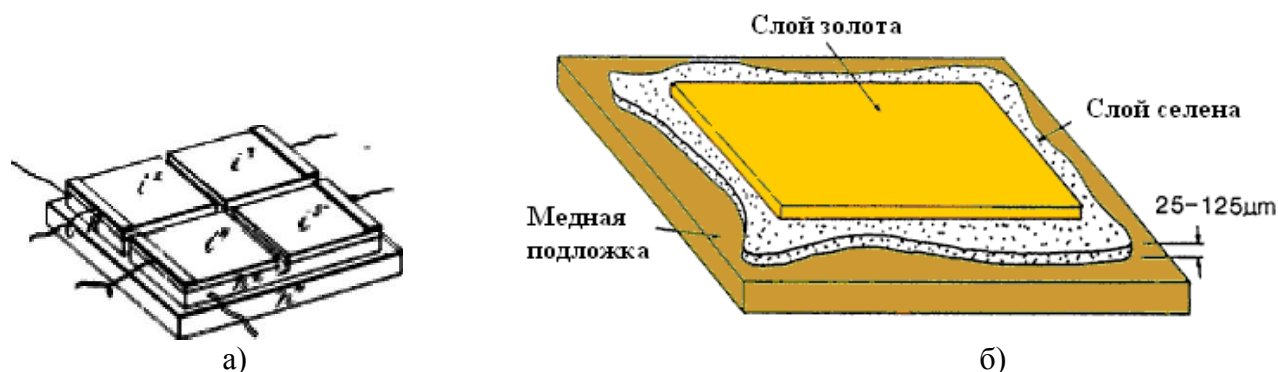


Рис.3.18 солнечный элемент Фриттса (а) и его конструкция (б)

Работая над селеновыми фотоэлементами в период с 1883 по 1886 годы, Фриттс считал, что его фотоэлектрические ячейки будут конкурировать с новыми угольными электрогенераторными установками Томаса Эдисона. Однако этого не получилось, поскольку коэффициент полезного действия селенового элемента составлял 0,7%. Поэтому эта работа не привела к практическому использованию фотоэлементов, но можно сказать, что этим изобретением было положено начало развития солнечной энергетики. Изобретение Фриттса доказало, что можно использовать солнечный свет для создания электроэнергии. Хотя его изобретение никогда не конкурировало с электрогенераторами Эдисона, работы Фриттса заложили необходимый фундамент для будущих разработок в технологиях солнечной энергетики.

В тот же период времени в 1884 году Фриттс также сообщил об открытии инфракрасного фотовольтаического эффекта в природном натуральном сульфиде свинца (галенит) и сконструировал селеновый выпрямитель. Следует отметить, что технология Фриттса изготовления селенового слоя методом расплавления селенового порошка и последующего прессования между металлическими пластинами оказалась настолько принципиально правильной, простой и удобной, что сохранилась вплоть до двадцатого века и использовалась для производства селеновых вы-

прямителей в промышленных масштабах. И толщина слоя селена в современных выпрямителях осталась в том же диапазоне, что у Фриттса и составляла 65–85 мкм.

Таким образом, эффект выпрямления стал применяться на практике только через 10 лет после его открытия Брауном и в первую очередь в виде плоскостных селеновых выпрямителей. Использование для выпрямления точечных кристаллических диодов с целью получения источников постоянного тока оказалось неэффективным в силу их недостатков для этих целей. Эти выпрямители ограничены низкой мощностью. Попытки поднять мощность, пропускную способность путем параллельного соединения нескольких точечных контактов не удались из-за существенных различий вольт-амперных характеристик (ВАХ) отдельных кристаллических точечных выпрямителей. Только именно радиосвязь стала первой большой задачей, в которой кристаллические точечные детекторы нашли свое важное практическое применение.

Первоначально для регистрации радиоволн использовали когерер. Когерер был изобретен французским изобретателем, физиком и инженером Эдуардом Бранли (фр. Édouard Eugène Désiré Branly; 23 октября 1844 года – 24 марта 1940 года) в 1890 году и тогда это устройство называлось «трубка Бранли». Это была стеклянная трубка, наполненная металлическими опилками. Под действием радиосигнала проводимость опилок на несколько порядков увеличивалась. Энергия радиосигнала создавала искровой пробой окисла на поверхности опилок и они приобретали хороший электрический контакт друг с другом. Для детектирования новой волны «трубку Бранли» нужно было встряхнуть, чтобы нарушить контакт между опилками. Английский физик и изобретатель Оливер Лодж (англ. Oliver Joseph Lodge 12 июня 1851 года – 22 августа 1940 года) в 1894 году усовершенствовал «трубку Бранли» и назвал это устройство «когерер». Лодж добавил к устройству Бранли молоточек, приводимый в действие часовым механизмом через равные промежутки времени и встряхивающий трубку, тем самым приводя проводимость опилок к исходному высокому значению. Александр Степанович Попов усовершенствовал конструкцию когерера, заставив сам радиосигнал, посредством реле включать ударник, встряхивавший опилки когерера.

В летний период времени 1899 года русское Военное ведомство дало разрешение Попову и его сотрудникам П.Н. Рыбкину и Д.С.Троицкому на проведение экспериментальных исследований по беспроволочной телеграфии между фортами острова Котлин в Финском заливе Балтийского моря. Так совпало, что на этот период времени была намечена заграничная командировка А.С. Попова. Основной целью этой командировки было размещение заказов на радиоаппаратуру для экспериментов. А. С. Попов во Франции договорился с французской фирмой «Дюкрете» парижского инженера и предпринимателя Эжена Дюкрете, которая по указанию Попова, стала готовить радиоаппараты.

В этих экспериментах на Балтийском флоте, для приема сигналов использовался когерерный радиоприемник. Однажды во время проведения экспериментов исчез прием сигналов на телеграфный аппарат. Экспериментаторы решили, что это связано с малой мощностью приходящего сигнала. На это указывало и то, что молоточек, встряхивающий когерер, бездействовал, оставаясь неподвижным, хотя радиосигналы передавались с соседнего форта. Испытания производились на миноносце 115, главная же береговая станция находилась на форте «Константин». Как раз во время опытов на миноносце 115, прибыли три полные станции, произведенные французской фирмой «Дюкрете» по заказу Попова.

П. Н. Рыбкин, пытаясь установить возможные неисправности радиоприемника, предположил, что возникшая неисправность может быть связана с поломкой нового электромагнитного реле, включенного на выходе приемника. Недолго думая, он подключил наушники вместо реле и отчетливо услышал телеграфные сигналы, посылаемые с форта «Константин». Прием азбуки Морзе на слух, означал, что когерер работает в режиме амплитудно-линейного детектирования, причем без встряхивания металлического порошка. Немедленно была послана телеграмма А.С. Попову, который в этот момент времени уже был в Швейцарии, с текстом: «Открыто новое свойство когерера».

14 июня А.С. Попов возвратился в Кронштадт и в течение месяца занимался исследованием эффекта детектирования когерера. Результатом этой работы стала разработка схемы радиоприемника с использованием эффекта детектирования когерера и изготовление на ее основе ре-

альной конструкции. Первый в мире слуховой радиоприемник был назван изобретателем «Телефонный приемник депеш», роль полупроводникового детектора в нем выполняли металлические опилки, покрытые окислом, который и являлся полупроводником. Слуховой радиоприемник имел чувствительность в несколько раз большую, чем радиоприемник с обычным когерером.

14 июля 1899 года А.С. Попов подал в Комитет по техническим делам при Департаменте торговли и мануфактур России прошение о выдаче ему патента на разработанный детекторный радиоприемник с наушниками. К заявке было приложено: описание приемника, чертежи схем и квитанция Санкт-Петербургского губернского казначейства об уплате взноса в размере 30 рублей.

Через некоторое время, не дожидаясь официальной выдачи автору патента на изобретение, фирма «Дюкрете» в Париже наладила производство телефонных приемников конструкции А.С. Попова. Процедура выдачи отечественного патента затянулась на целых два года. За этот период времени Попову удалось запатентовать свое изобретение в Англии и Франции. Английский патент №2797 от 7 апреля 1900 года был выдан на «усовершенствование когереров для телефонной сигнализации». Интересно, что английское патентное бюро рассмотрело заявку в рекордно короткий срок, менее чем за два месяца. Патентование за границей принесло ученому определенный доход, а после его кончины, семья получала дивиденды от этого изобретения. Только 30 ноября 1901 года ученый получил, наконец, русский патент – «привилегию №6066 на приемник депеш, посылаемых с помощью электромагнитных волн».

Результаты исследований по беспроволочной телеграфии с применением слухового детекторного приемника были доложены А.С. Поповым на Международном электротехническом конгрессе в Париже 8 августа 1900 года и получили общее научное признание. А.С. Попов не остановился на достигнутых результа-

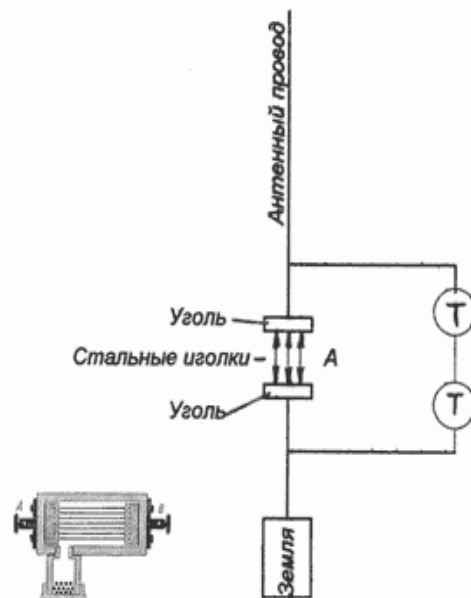


рис.3.20. Схема кристаллического приемника и конструкция детектора А. С. Попова. 1900 г. Т–обозначение головных телефонов.

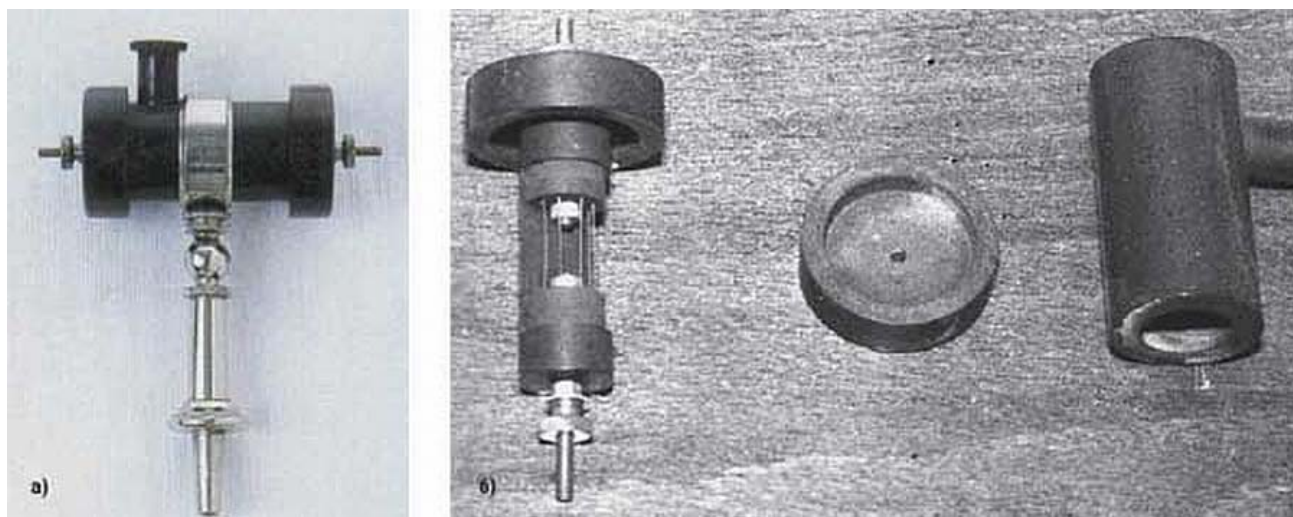


рис.3.19 Общий вид (а) и устройство (б) кристаллического детектора А. С. Попова. 1900 г.

тах и продолжал совершенствовать конструкцию слухового детекторного радиоприемника. Все в том же, 1900 году, ему удалось создать первый твердотельный детектор, пригодный для практических целей.

Детектор представлял собой кристаллический точечный диод с контактом стальных иглок и угольных шайб. Конструктивно кристаллический детектор А.С. Попова был выполнен в виде эбонитового цилиндрического корпуса с навинчивающимися на его основания двумя крыш-

ками, внутри которых находились угольные диски. Между шайбами, параллельно большей оси корпуса, располагались поджатые крышками, стальные иголки, имеющие заострение с обоих концов. Кристаллический диод был успешно применен А.С. Поповым в детекторном телефонном радиоприемнике. Тем самым А.С. Попов развил открытие односторонней проводимости Брауна в устройство, применимое для детектирования радио.

Уголь является одной из модификаций элементарного углерода, в наши дни принято считать, что таких модификаций четыре: уголь (графит), алмаз, карбин и поликумулен (разновидность карбина) и четвертая модификация – фуллерит. Алмаз можно отнести к широкозонным полупроводникам, ширина запрещенной зоны которых составляет порядка нескольких электрон-вольт. Карбин – черный мелкокристаллический порошок, обладает полупроводниковыми свойствами, ширина запрещенной зоны карбина 1 – 2 эВ для различных образцов карбина. Под действием света электропроводность карбина сильно увеличивается, на этом свойстве основано первое практическое применение карбина – в фотоэлементах. Твердый фуллерит является полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,5 эВ. Это означает, что при облучении обычным видимым светом электрическое сопротивление кристалла фуллерита уменьшается, фотопроводимостью обладают не только чистый фуллерит, но и его различные смеси с другими веществами.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОВОДИМОСТИ. НЕ-МЕТАЛЛЫ. 51

Углерод. Алмаз и чистые древесный и каменный уголь не проводят электричества. Прокаленный уголь, кокс и графит хорошие проводники. Весьма замечательно, что проводимость угля уменьшается при понижении температуры, как показал впервые Matthiessen. Beetz (1876) объяснял это тем, что при нагревании частицы плотнее прилегают друг к другу. И. И. Боргман (1877) исследовал стрелки из графита, ретортного кокса, коксового угля, употребляемого для электрического освещения, угля Карре, древесного (соснового) угля и антрацита. Он нашел следующие температурные коэффициенты a :

Сосновый уголь	23°—143°	$a = -0,00548$
	23°—260°	$a = -0,00384$
Антрацит	25°—152°	$a = -0,00390$
	25°—260°	$a = -0,00265$
Графит	25°—193°	$a = -0,00088$
	25°—279°	$a = -0,000816$
Кокс (эл. освещ.)	26°—187°	$a = -0,000319$
	26°—346°	$a = -0,000248$

рис.3.21. Фрагмент: О.Д.Хвольсон. Курс физики. Т.5. Госиздат, Берлин,1923 год.– стр.51.

Из фрагмента (рис.3.21) известного курса физики Хвольсона, неоднократно переиздававшегося в России и до революции 1917 года, и после, следует, что в начале двадцатого века уголь, как и алмаз, рассматривались как плохие проводники электричества, то есть полупроводники. Тогда как графит являлся хорошим проводником. В опытах Попова образцы угля в детекторах обладали полупроводниковыми свойствами. В наши дни о полупроводниковых свойствах угля уже не вспоминают и как полупроводник в практической электронной технике уголь не используется. В 20-е годы двадцатого века имел распространение упрощенный вариант кристаллического детектора конструкции А. С. Попова в виде контактной пары «металлическая монета – кусочек угля».

А.С. Попов первым изобрел кристаллический детектор, тем самым опередив на год индийского пионера радио Бозе и всех последующих изобретателей твердотельных детекторов.

Одним из основоположников исследования радио и микроволновой оптики был Джагдиш Чандра Бозе, бенгальский учёный-энциклопедист: физик, биолог, биофизик, ботаник, археолог и

писатель-фантаст. Бозе основал фонды экспериментальной науки на индийском субконтиненте. Его считают отцом бенгальской научной фантастики и одним из создателей радио.

Джагадиш Чандра Бозе родился 30 ноября 1858 г. в селении Рарукхал области Дакка в Восточной Бенгалии. Получив начальное образование



рис.3.22 Бозе делает доклад в Британской ассоциации в Ливерпуле (British Association for the Advancement of Science). 1896 год.

на родном языке в г. Фаридиуре, куда вскоре переехала его семья, Бозе поступил в английский колледж Сент-Ксавье в Калькутте, где проявил большой интерес к естествознанию и особенно к физике. Двадцати лет, получив степень бакалавра искусств, он, несмотря на материальные затруднения (благодаря поддержке, оказанной ему матерью), смог поехать в Англию продолжать образование. Вначале он изучал медицину в Лондонском университете, а в 1881 году поступил в Кембриджский университет (Крайстс колледж), где занимался физиологией, эмбриологией, ботаникой, химией и физикой (под руководством Рэля). Получив степень бакалавра естественных наук, 25-летний Бозе вернулся в Калькутту и после продолжительного сопротивления английской администрации был назначен профессором физики Президенци Колледжа (1885 год). Очень скоро он приобрел значительную популярность как лектор и затем, преодолевая огромные трудности в приобретении и изготовлении физических приборов, осуществил серию выдающихся исследований свойств электромагнитных волн.

В течение 1894 – 1900 годов Бозе выполнил работы в области миллиметровых и сантиметровых волн. Бозе сконструировал (1894–95) (независимо и одновременно с П.Н. Лебедевым в России) генератор затухающих электромагнитных волн миллиметрового и сантиметрового диапазона. Установка Бозе имела, в частности, «спиральный когерер», примененный в качестве индикатора электромагнитных волн. Это был модерни-

зированный, для повышения чувствительности, когерер Лоджа. Для этого металлические опилки были заменены стальными спиральными пружинками диаметром 2 мм и длиной 4–5 мм из проволоки диаметром 0,2 мм. С помощью этой установки Бозе исследовал свойства электромагнитных волн и их действие на растения. Его опыты, так же как и эксперименты П.Н.Лебедева, способствовали утверждению электромагнитной теории света. В 1894 году Бозе дистанционно с помощью электромагнитных волн воспламеняет порох и включает электрический звонок, демонстрируя, что сигналы связи можно посылать без проводов. В 1895 году Бозе передаёт сигнал на расстояние около одной мили. Особенно большое внимание привлек доклад, сделанный Бозе в 1896 году на заседании Британской Ассоциации, проходившем в Ливерпуле, «О полном приборе для изучения свойств электрических волн» (Philosophical Magazine, 43, 1897, стр. 55–68.). Тогда же Бозе была присуждена докторская степень.

Для доказательства общности свойств радиоволн и света, нужно было показать, что они испытывают двойное преломление в кристаллах в соответствии с законами оптики.

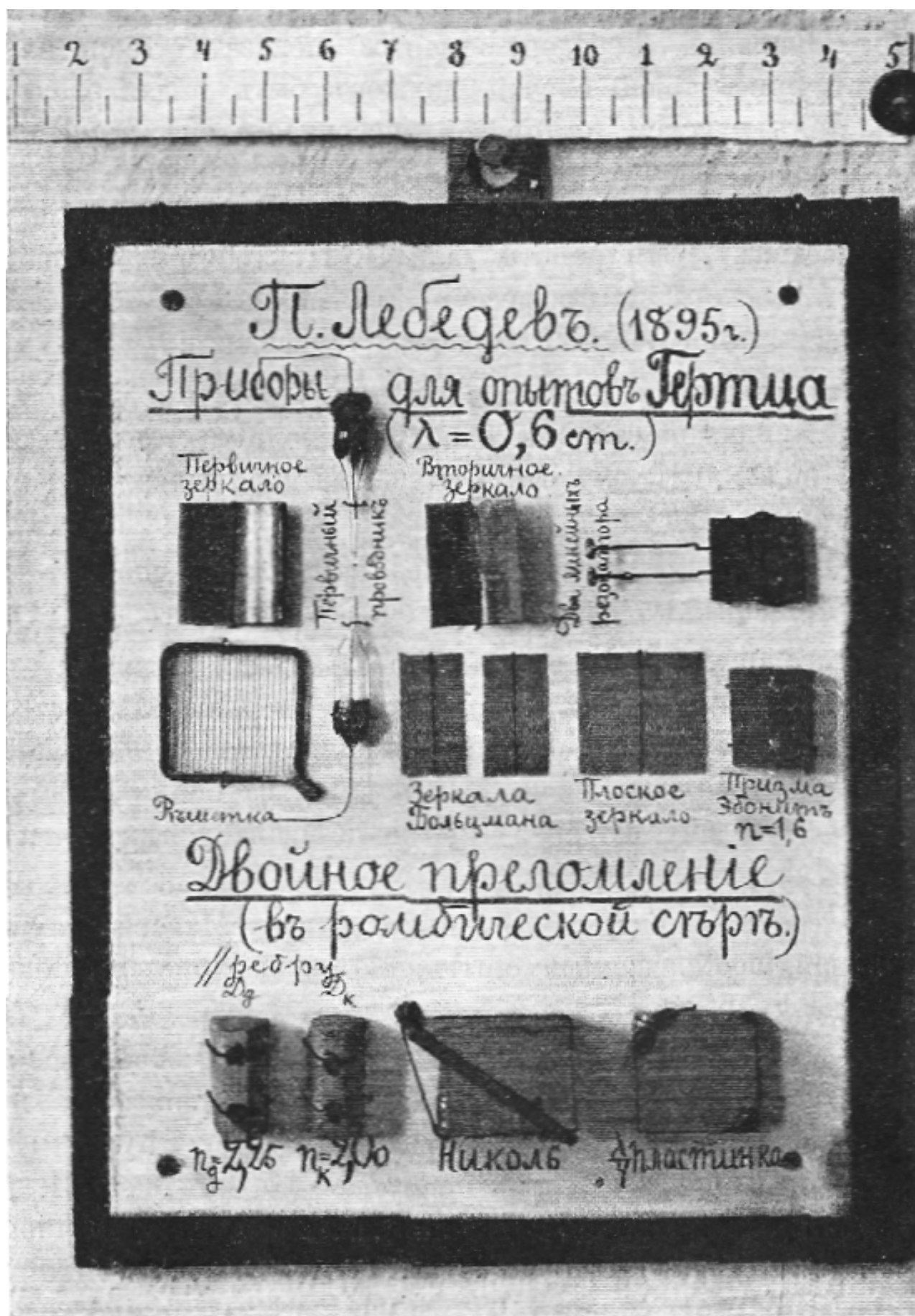


рис.3.22. В соответствующем масштабе представлены те приборы, с которыми работал П.Н.Лебедев.

Для этих опытов Бозе сконструировал источник очень коротких миллиметровых волн и создал когерер с повышенной чувствительностью. Самые короткие из полученных Бозе волн имели длину 6 мм но, ввиду малой мощности, он работал преимущественно с волнами длиной около 2 см. В 1894 году появляется первая работа Лебедева, посвященная действию волн на резонаторы. В трех работах, появившихся одна за другой, Лебедев выясняет закон этих действий. Метод Лебедева заключался в том, что электрические колебания, падая на подвижный резонатор, отклоняют его от первоначального положения. В 1895 году Лебедев делает изящную с технической стороны работу о двойном преломлении лучей электрической силы в кристаллах ромбической серы. В этом исследовании им были открыты самые короткие электромагнитные волны, существовавшие до сих пор, с длиной волны 3 – 6 мм.

Соответственно таким коротким волнам излучатель Бозе представлял собой сильно уменьшенный искровой генератор Герца с некоторыми существенными усовершенствованиями. Между двумя платиновыми шариками ($d=2$ мм), соединенными с концами вторичной обмотки небольшой катушки Румкорфа, помещался третий платиновый шарик ($d=8$ мм), так что оба искровых промежутка имели длину 0,3–0,5 мм (рис.3.21,а).

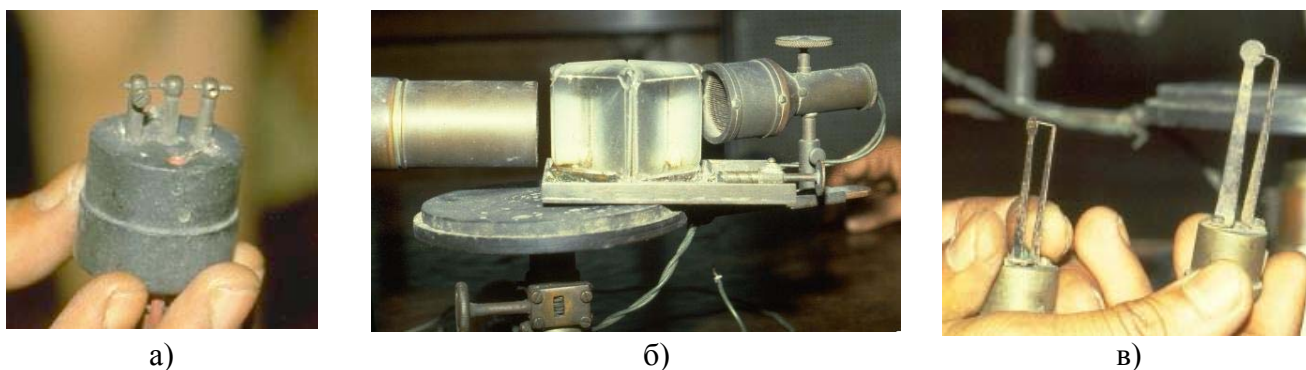


рис.3.21. (а) – излучатель миллиметровых волн; (б) – установка изучения двойного лучепреломления. Слева передающая антенна, внутри которой излучатель; в центре вращающийся стол, на котором могут быть установлены для исследования различные микроволновые компоненты – призмы, линзы, сетки, поляризаторы; справа от призмы – приемная антенна, внутри которой точечный детектор. Сверху приемной антенны расположен регулировочный винт для подбора прижимного давления в точечно–контактном кристаллическом детекторе. (в) – два точно–контактных кристаллических детектора Бозе, вынутые из приемной антенны.

Бозе экспериментально изучил также электрические контактные явления. Для детектирования радиоволн Бозе исследовал и использовал различные переходы металл–кристалл, включая их последовательно с высокочувствительным гальванометром. Он, впервые среди своих современников, подробно измерил и изучил вольт–амперные характеристики этих переходов и отметил их нелинейный характер.

В 1901 году Бозе продемонстрировал использование точечного контакта металлического зонда с кристаллом свинцового блеска (сульфид свинца, PbS) для детектирования электромагнитных волн миллиметровой длины. В сентябре 1901 года Бозе подал заявку на патент в патентное ведомство США, которая была зарегистрирована 30 сентября 1901 года за номером 77028. Заявка была удовлетворена 29 марта 1904 года выдачей патента №755840 «Детектор электрических возмущений» (J. C. Bose, Detector for Electrical Disturbances, U.S. Patent No. 755840, Patented March 29, 1904, (Application filed September 30, 1901, Serial No. 77,028)). Бозе первым из индусов получил патент США на полупроводниковый выпрямитель типа «кошачий ус» для детектирования радиосигналов.

В период между 1902 и 1906 г.г. инженер - электрик американской компании American Telephone and Telegraph Г.Пиккард (Greenleaf W. Pickard) протестировал тысячи минеральных образцов, чтобы оценить их свойства выпрямления. Наилучшие результаты были получены с

кристаллами кремния от компании Вестингауз (Westinghouse). 20 августа 1906 г. Пиккард подал заявку на патент США «Средство для того, чтобы получить интеллектуальную коммуникацию электрическими волнами» на основе кремниевого точечного детектора; в том же ноябре патент был получен. С двумя партнерами Пиккард основал «Компанию беспроводной специальной аппаратуры», чтобы продавать кристаллические детекторы типа «кошачий ус» для радиолокаторов; вероятно, это была первая компания, которая делала и продавала кремниевые полупроводниковые приборы.

В 1906 году Дж. Пирс доказал электрическую природу выпрямления тока. Пока лучшие теоретики искали объяснения полупроводниковых свойств, инженеры все шире применяли полупроводники. В начале нашего века ученых захватили исследования в области беспроводной связи. Они создавали приемники радиоволн, которые могли детектировать сигналы. В первых конструкциях радиоприемников использовались контакты полупроводникового материала и металла, например, карбид кремния, теллур, окись цинка, селен совместно с металлической пружиной. Кристаллические полупроводниковые детекторы излучения позволяли выпрямлять радиочастотные сигналы, но усилить их не могли.

Много других изобретателей экспериментировали с разнообразными материалами. Г. Данвуди (Henry Dunwoody) получил патент для детектора из карборунда (карбид кремния) всего спустя две недели после Пиккарда. В 1908 г. В. Торриката (Wichi Torikata) из Электротехнической Лаборатории (ETL) получил японский патент №15345 для минерального детектора.

Наш соотечественник, выдающийся радиоинженер Олег Владимирович Лосев из Нижегородской радиолaborатории в Ленинграде, изучая в 1922 году свойства кристаллического детектора из кристаллов карборунда и цинкита, обнаружил на вольтамперной характеристике кристалла участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, и на основе этого кристалла получил генерирующий детектор. Советский радиоинженер впервые в мире построил полупроводниковый прибор, способный усиливать и генерировать электромагнитные колебания на частотах до 5 МГц. Основой его служила контактная пара: металлическое острие – полупроводник (кристалл цинкита). Этот прибор вошел в историю полупроводниковой электроники как «кристадин» Лосева. Позднее, в 1927 году, Лосев открыл также явление свечения кристалла карборунда при прохождении тока через точечный контакт. По существу это был первый светодиод. Открытия Лосева вызвали большой, но кратковременный интерес. Четкого объяснения открытых явлений дано не было, и в то же время воспроизводимость опытов оставляла желать лучшего. Промышленное внедрение так и не состоялось. Тем более что те далекие 30–40-е годы прошлого века были порой расцвета электровакуумных ламп.

Идеи электронной лампы попытались воплотить в твердотельный аналог. Юлиус Эдгар Лилиенфельд (Julius Edgar Lilienfeld) был рожден 18 апреля 1882 г. в г. Лемберг Австро-Венгерской империи, ныне г. Львов в Украине. Свою научную карьеру начал в университете в Лейпциге, а в 1920 г. переехал в США. В 1925 году профессор физики Юлиус Лилиенфельд получил несколько патентов на конструкцию усилителя с использованием полупроводника. В описании патента он обрисовал трех-электродный усилительный прибор, основанный на полупроводниковых свойствах сульфида меди (Lilienfeld, J. E. "Method and apparatus for controlling electric currents," U. S. Patent No. 1,745,175 (Filed October 8, 1926. Issued January 18, 1930)). Сегодня этот прибор называли бы полевым транзистором.

Спустя десять лет в 1934 г. в Англии был выдан патент немецкому инженеру–электрику и изобретателю Оскару Хейлю на полевой триод. В нем предлагалось использовать управляющий электрод для регулирования тока через слой полупроводника. Оскар Хейль (Oskar Heil), работая в Кембриджском университете, оформил патент по управлению электрическим током в полупроводнике через емкостную связь под электродом – по существу это был полевой транзистор с изолированным затвором (Oskar Heil. «Improvements in or relating to electrical amplifiers and other control arrangements and devices» first filed in Germany March 2, 1934). Хотя оба ученых получили патенты, нет никаких рабочих отчетов, доказывающих, что Хейл или Лилиенфельд фактически построили функционирующие приборы.

В 1938 немецкие физики Р. Поль (Robert Pohl) и Р. Хильш (Rudolf Hilsch) экспериментировали на кристаллах бромистого калия с тремя электродами в геттингенском университете (Гет-

тинген, Германия). Поль и Хильш разработали конструкцию кристаллического усилителя, действие которого основано на использовании проволочной сетки для управления потоком электронов через нагретый кристалл бромида калия. Они сообщили об усилении низкочастотных (приблизительно 1 гц) сигналов – созданный ими полупроводниковый прибор позволял усиливать сигналы и доказывал возможность создания кристаллических полупроводниковых приборов. Но их исследование не привело ни к каким практическим приложениям – у разработанного ими кристаллического усилителя была очень низкая рабочая частота.

Ненадежные в те времена полупроводниковые приборы не могли конкурировать с электронными вакуумными лампами. Известно, что хорошая теория быстро продвигает технические идеи на уровень внедрения. А в полупроводниковой электронике четыре загадки так и остались неразгаданными с прошлого века:

- Почему сопротивление полупроводников падает с ростом температуры?
- Почему сопротивление полупроводников уменьшается при их освещении?
- Почему сопротивление контакта двух полупроводников зависит от полярности прикладываемого напряжения?
- Почему в полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле, могут существовать отрицательно и положительно заряженные носители заряда?

На все эти и другие «почему» никто не мог дать ответ почти 100 лет.

4.2. Развитие физики полупроводников и объяснение принципов работы полупроводниковых приборов

Немецкое слово «полупроводник» – «halbleiter», переведенное на английский язык как «semiconductor» – «полупроводник», впервые использовалось с 1911 г. для описания материалов со значениями удельной проводимости между значениями для металлов (проводники) и для изоляторов. Но объяснение свойств полупроводников постоянно ускользало от ученых в течение десятилетий в силу причин вполне объективных – господства прежней парадигмы в физике, превалирующих классических представлений о веществе. В главе 1 мы уже говорили о научных традициях и революциях, о смене парадигм. В силу понятных причин в физике твердого тела стали происходить революционные изменения, вызванные появлением квантовой механики и квантовой физики.

В 1900 г. Макс Планк постулировал квантовую гипотезу, ставшую основой атомной теории и впоследствии теории, объясняющей поведение электронов в твердых телах. Именно на основе работы Планка Альберт Эйнштейн смог объяснить в 1905 г. фотоэлектрический эффект Беккереля: в 1906 г. в немецком журнале «Annalen der Physik» появились три статьи 26-летнего Альберта Эйнштейна, – о теории относительности, квантовой теории фотоэффекта и теории броуновского движения, – которые обозначили поворот в развитии физики. Хотя первые исследователи и сумели установить, что фотоны могут вызвать эмиссию электронов из некоторых материалов, до Планка и Эйнштейна не существовало ответа на загадочный вопрос: почему, если число полученных электронов пропорционально интенсивности света, их энергия пропорциональна длине волны света? Квантовая теория предложила считать природу фотонов двойственной, обладающей свойствами как волн, так и частиц: если свет действительно состоит из небольших волновых пакетов, энергия которых пропорциональна длине волны, то экспериментальные данные могут быть удовлетворительно объяснены.

К началу 1920-х годов считалось общепринятым, что хорошая проводимость металлов объясняется наличием в них свободных электронов. Однако, для количественного объяснения поведения электронов в твердых телах потребовалось знаменитое квантово-механическое уравнение Эрвина Шредингера, которое австрийский физик опубликовал в 1926 г. Введя понятие функции, описывающей состояние микрообъекта, Шрёдингер получил знаменитое «волновое уравнение» материи, названное его именем, играющее в атомной физике такую же фундаментальную роль, как ньютоновские уравнения в классической механике и уравнения Максвелла в классической электродинамике. В течении следующих 10 лет это уравнение помогало энергич-

ным физикам, так как оно позволяло связать все загадочные явления в твердых телах, открытые в предыдущем столетии.

В 1928–1930 годах американский физик Феликс Блох, французский физик Леон Бриллюэн и английский физик-теоретик немецкого происхождения Рудольф Пайерлс изучали особенности поведения электронов в кристаллах и заложили основы зонной теории твердых тел. Пайерлс в 1929 году предложил концепцию дырочной проводимости полупроводников (независимо от Якова Френкеля). В дальнейшем теорию дырок развил английский физик Поль Дирак и немецкий физик Вернер Гейзенберг в середине тридцатых годов XX века.

Наконец наступил переломный 1931 г. Это был год, когда крупный немецкий физик-теоретик Вольфганг Паули с сомнением высказывался о будущем полупроводников: «невозможно работать с полупроводниками, представляющими собой грязный беспорядок; кто знает, существуют ли вообще какие-нибудь полупроводники». Это говорил ученый, с именем которого связано такое фундаментальное понятие квантовой механики, как спин элементарной частицы и который сформулировал «принцип запрета» (1924 г.) – принцип Паули, за что был удостоен Нобелевской премии по физике за 1945 год.

Алан Вильсон, физик из университета в Кембридже, работая в Германии в Лейпциге, приспособил квантовую теорию твердых тел, разработанную Блохом и Пайерлсом, чтобы создать модель, описывающую полупроводник. Это была квантовая теория полупроводников, разработанная с привлечением математического аппарата квантовой механики.

В соответствии с этой теорией в твердом теле энергетические состояния электронов образуют так называемые зоны, разделенные промежутками запрещенных значений энергий. Верхняя зона, в которой находятся свободно перемещающиеся заряды, получила название *зоны проводимости*, а нижняя, в которой заряды находятся в связанном состоянии, была названа *валентной зоной*. Промежуточное расстояние называли *запрещенной зоной*.

Исходя из представлений о зонной структуре электронного спектра, Вильсон провел деление кристаллов на металлы, полупроводники и диэлектрики. Если ширина запрещенной зоны велика, то в твердом теле с такой энергетической характеристикой электропроводность отсутствовала. Такие вещества называются диэлектриками. Если же ширина запрещенной зоны невелика, то существуют различные возможности возбуждения электронов. Это *полупроводники*. Например, при разогреве твердого тела происходит тепловое возбуждение электронов, повышается их энергия, и они из валентной энергетической зоны переходят в более высокоэнергетическую зону проводимости. При этом вещество с такой энергетической зонной структурой обладает большей электропроводностью, а значит, меньшим сопротивлением. С ростом температуры число возбужденных электронов увеличивается, стало быть, сопротивление полупроводников падает. Возможен и другой механизм перевода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Речь идет о возбуждении электронов квантами света. Термически или оптически возбужденные электроны становятся свободными электронами проводимости.

Таким образом, теория Вильсона объяснила две первые загадки: почему сопротивление полупроводников падает при нагревании и освещении. Впоследствии выяснилось, что процесс электропроводности полупроводников значительно сложнее. Квантово-механическое представление структуры твердого тела подсказывало исследователям, что освободившиеся от электронов места в процессе их перехода в зону проводимости образуют вакансии или *дырки* и становятся свободными носителями положительного заряда. Поведение дырок аналогично поведению возбужденных электронов. Они обладают подвижностью, эффективной массой и могут образовывать электрический ток, направление которого противоположно току электронов. Стал понятен эффект Холла, когда в одних полупроводниках преобладают отрицательные носители заряда, а в других – положительные.

Стало ясно, что существуют полупроводники с *электронным* типом проводимости (*n*-типа), для которых эффект Холла имеет отрицательное значение во всей области температур. Вместе с тем, есть полупроводники с положительным значением эффекта Холла, которые имеют *дырочный* тип проводимости (*p*-тип). Первые были названы донорными, а вторые – акцепторными. Зонная теория «заработала». Открытия посыпались, как из рога изобилия.

А вот разгадать загадку выпрямления долго не удавалось. В 1932 Вильсон попытался объяснить однонаправленный электрический ток в точечном диоде, как обусловленный квантово-механическим туннелированием из металла в полупроводник – или наоборот. Но наряду с подобными попытками других ученых в начале 1930-ых годов, его объяснение, в конечном счете оказалось неверным. Ни теория Вильсона, ни дальнейшее ее развитие не могли объяснить этот феномен полупроводников. А между тем на практике широко использовались полупроводниковые выпрямители электрического тока. Хорошие выпрямители одновременно выполняли функции хороших фотоэлементов. Выяснилось также, что величина термо-ЭДС в полупроводниках на несколько порядков выше, чем в металлах. Все эти экспериментальные факты нуждались в обобщении и объяснении. Теория Вильсона не могла все объяснить, в частности механизм выпрямления тока. Оставалась одна загадка – «загадка века».

Весомый вклад в развитие квантовой теории полупроводников внесли как зарубежные теоретики, так и выдающиеся отечественные ученые – Френкель, Тамм, Давыдов.

Выдающийся советский физик Яков Ильич Френкель в 1926 году в немецком физическом журнале *Zeitshrift Physics* (том 5, стр. 652) опубликовал работу, показавшую реальную картину внутреннего мира кристаллов. Френкель обратил внимание на то, что наряду с испарением атомов с поверхности кристаллической решетки в окружающее пространство может иметь место своеобразное испарение атомов из равновесных положений в кристалле в пространство междуузлий (ионы в междуузлиях, как заметил другой выдающийся советский физик А.Ф.Иоффе, играют определяющую роль в электропроводности ионных кристаллов; в его работе, однако, оставались без внимания пустые узлы кристаллической решетки, образовавшиеся за счет ухода атома (иона) в междуузлие). Такого рода диссоциация кристаллической решетки на атомы (ионы) в междуузлиях и вакантные узлы (дырки) приводят к образованию того, что в литературе получило название «дефектов по Френкелю». Дырка (или вакантный узел решетки) может перемещаться по кристаллу независимо от покинувшего ее атома. Она может, в частности, «испариться», выйдя на поверхность). Атомы в междуузлиях совместно с вакантными узлами (дырками) и образуют картину реального кристалла.

В 1932 году советский физик Игорь Евгеньевич Тамм предсказал существование на поверхности кристаллов особых состояний электронов – *уровней Тамма*.

В 1938 г., семь лет спустя после опубликования теории электронных полупроводников Вильсона, Борис Давыдов (Физико-технический институт АН СССР под руководством А.Ф.Иоффе, г. Ленинград), Невилл Мотт (Бристольский университет, Великобритания), и Вальтер Шоттки («Сименс&Хальске, Мюнхен, Германия) независимо друг от друга объясняют эффект выпрямления и предлагают теорию контактных явлений.

Оказывается, в полупроводниковых материалах вблизи границы дырочного и электронного типов полупроводников имеет место область обеднения носителями заряда. В этом месте возникает эффективный электронно-дырочный барьер для равновесных электронов, который не позволяет электронам и дыркам свободно «гулять» по полупроводнику. Через такую систему ток проходит свободно в одном направлении, а в другом – плохо. Электрическое сопротивление системы зависит от величины и направления приложенного напряжения. Например, при приложении электрического поля в прямом направлении высота барьера снижается, и наоборот. Неосновные носители заряда (дырки в электронном и электроны в дырочном полупроводнике) играют определяющую роль.

4.3. Открытие р–п–перехода, развитие полупроводниковой технологии, производство ВЧ диодов для радиолокации.

Вдохновленный исследованием купроксных (оксид меди) выпрямителей в Лаборатории Белл Телефон (Bell Telephone Laboratories) и теми трактовками полупроводникового выпрямления, которые сделали Невилл Ф. Мотт и Вальтер Г. Шоттки (Nevill F. Mott и Walter H. Schottky), Уильям Шокли (William Shockley) записал в декабре 1939: «Сегодня мне открылось, что усилитель, использующий полупроводники, а не вакуум, в принципе возможен.». По этому

его направлению Уолтер Браттейн (Walter Brattain) и другие исследователи выполнили эксперименты на полупроводниковых приборах с тремя электродами, но не получили усиления.

Bell Telephone Laboratories ((известная также как Bell Labs, прежние названия – AT&T Bell Laboratories, Bell Laboratories)– американская корпорация, крупный исследовательский центр в области телекоммуникаций, электронных и компьютерных систем, основана в 1925 г. как исследовательский центр компании AT&T, США. В 1995 году Bell Labs стала принадлежать Lucent Technologies, которая в 2006 году в результате слияния с французской компанией Alcatel преобразовалась в Alcatel-Lucent. В настоящее время является исследовательским центром корпорации Alcatel-Lucent. Alcatel-Lucent – франко-американская компания, осуществляющая деятельность в области телекоммуникационного и компьютерного оборудования, программного обеспечения и др. Головной офис компании размещается в Париже, американский офис – в городе Мюррей-Хилл, штат Нью-Джерси. Обладает всеми юридическими правами на формат аудиоданных MP3. Bell Labs и ее сотрудники сыграли выдающуюся роль в развитии полупроводниковой электроники как в США, так и во всем мире.

В середине 1930-ых Рассел Ойл (Russell Ohl), электрохимик из Белл Телефон в городке Холмдел в Нью-Джерси, начал исследовать применение кремниевых выпрямителей в качестве детекторов для радаров. Он нашел, что очистка кремния и «увеличение кремниевой беспримесности» помогло улучшить способность обнаружения детекторов. 23 февраля 1940 г. он тестировал маленькую кремниевую пластинку, что привело к странным, удивительным результатам. Когда пластинка подставлялась яркому свету, ток, текущий через нее, заметно подсакивал. Он также заметил, что различные части кристалла демонстрировали противоположные электрические явления (это контролировалось зондом в виде контактной пружины типа «кошачий ус»).

Ойл и его коллега Джек Скафф (Jack Scaff) обнаружили границу раздела в кремниевой пластине на области, содержащие явно противоположные виды примесей. Одна примесь, элемент фосфора, создавала слабый избышек электронов в одной области пластины, а другая примесь, бор, создавала в другой области пластины небольшой недостаток электронов (позже признанный как «дырки»). Они назвали области электронной и дырочной соответственно, а поверхность или «барьер», где эти области встречались стали называть как « $p-n$ переход» Свет, падающий на этот спай, стимулировал электроны для перетекания из n -области в p -область, приводя к электрическому току. Ойл обнаружил фотогальванический эффект, на котором основаны сегодняшние солнечные элементы.

Впоследствии из случайного открытия Ойла 1940 года родилась концепция плоскостного транзистора Шокли в 1948 году, а $p-n$ переход стал наиболее привычной и стандартной формой выпрямителя, используемого в электронной промышленности и с тех пор стал фундаментальной основой для разработки полупроводниковых приборов.

Независимо от Ойла и одновременно с ним советский физик Вадим Евгеньевич Лашкарев впервые обнаружил $p-n$ -переход в закиси меди. В 1941 году в журнале Известия АН СССР он опубликовал статью «Исследование запирающих слоев методом термозонда» (Известия АН СССР, сер. Физика .–1941 .– Т. 5). Он установил, что обе стороны «запорного слоя», расположенного параллельно границе раздела медь–закись меди, имели противоположные знаки носителей тока. Также Лашкаревым был раскрыт механизм инжекции – важнейшего явления на основе которого действуют полупроводниковые диоды и транзисторы. Работающий транзистор, сделанный Бардином и Браттейном появился только через семь лет после статьи Лашкарева.

Итак, только спустя сто лет, в 40-е годы XX века удалось разгадать все загадки полупроводников. Разработанная независимо друг от друга Давыдовым, Моттом и Шоттки теория выпрямления тока в области контакта материалов разного типа проводимости получила блестящее экспериментальное подтверждение. Таким образом, была решена последняя загадка полупроводников.

Вторая мировая война предъявила особые требования к качеству полупроводниковых диодов, что потребовало совершить гигантский скачок в развитии технологии получения высокочистых кристаллов германия и кремния. Потребовалось поставить на военную службу полупроводниковые диоды, поскольку радарные приемники нуждались в твердотельных детекторах для

обнаружения и преобразования микроволновых сигналов на частотах выше, чем могли позволить электровакуумные диоды.

Следуя пионерским работам Рассела Ойла на кремнии исследователи в университетах и компаниях в Великобритании и Соединенных Штатах разрабатывали технологии, как для очистки полупроводников, так и для легирования их выбранными примесями, чтобы получить желательные полупроводниковые свойства. Миллионы кристаллических выпрямительных диодов, с металлическим острием, контактирующим с крошечным осколком кремния или германия, помещенные в металлический корпус, были изготовлены для использования в радарных приемниках союзников.

Летом 1940 года после оккупации гитлеровцами Западной Европы Англия оказалась один на один против армады нацистских бомбардировщиков, начавших планомерное разрушение ее обороны и подготовку морского десанта. От краха Англию спасли чудо, решительность нового премьера У.Черчилля и... радары (так на западе называли радиолокаторы). Появившиеся еще в предвоенные годы почти одновременно в СССР, Англии и США, радары позволяли быстро и точно обнаруживать вражеские самолеты и своевременно организовывать противодействие. В небе над Ла-Маншем развернулась грандиозная «битва за Британию», достигшая своего апогея 15 сентября 1940 года (именно эта дата выбита на мемориальном камне в Вестминстерском аббатстве — как важнейшая во всей биографии У.Черчилля), после чего гитлеровцы, потеряв более 1000 самолетов, отказались от идеи вторжения. Отметим, что много лет спустя одна из книг, посвященных тому времени, вышла под весьма выразительным названием: «Как горстка пионеров радиолокации выиграла вторую мировую войну!»

Итак, Англии нужны были радары, радарам — кристаллические детекторы, детекторам — совершенные германий и кремний. Война продвинула эту проблему необычайно быстро, и вскоре германий в значительных количествах появился на заводах и в исследовательских лабораториях — трамплин для прыжка к транзистору был готов. С кремнием, из-за высокой температуры его обработки, поначалу дело шло не так гладко, но через несколько лет тоже успешно разрешилось.

Большинство исследований по очистке германия происходило в университете имени Джона Пердью (Purdue University) под руководством Карла Ларк-Горовица (Karl Lark-Horovitz). Кремниевая очистка развивалась главным образом в университете Пенсильвании под руководством физика Фредерика Зейтца (Frederick Seitz) под эгидой Лаборатории излучений Массачусетского технологического института и Химической компании Дюпон (Dupont). К концу войны стал возможным получать кремний 99,999 процентов чистоты.

Также крайне важными были программы исследований в Bell Labs во главе с металлургом Джеком Скаффом и химиком Генри Тойнером (Henry Theurer). Эти работы помогли понять, как наличие различных примесей приводят к электронным полупроводникам с избытком электронов и к дырочным полупроводникам с дефицитом электронов (или избытком дырок). Добавляя буквально крошечное количество элементов, таких как фосфор из пятого столбца (пятой группы) таблицы Менделеева, к чистому кремнию или германию, они получали материал *n*-типа. Добавление элементов третьей группы, таких как бор, давало дырочный полупроводник.

В военные годы быстрыми темпами развивалась радиолокация, мощные источники высокочастотной энергии. Нужны были электронные приборы дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн, в котором, как отмечалось выше, электронные лампы были не годны, а эффективными в этой области были именно твердотельные, германиевые и кремниевые, детекторы (СВЧ-диоды), способные работать в частотном диапазоне до 4 ГГц.

В СССР эти работы велись в основном в НИИ-108 и НИИ-160 под научным руководством Сергея Григорьевича Калашникова и Александра Викторовича Красилова, соответственно.

В области полупроводников в те годы стояла нерешенная проблема — протекание тока через контакт "металл — полупроводник". Широко применялись методы зондовых исследований поверхностного потенциала вокруг точечного контакта. Был выявлен эффект управления током одного из точечных контактов с помощью рядом расположенного другого контакта. Однако интерпретация была разной. Наши исследователи были очень осторожны, не поверили в эффект усиления сигнала и заставляли сотрудников более тщательно чистить поверхность (Калашников

С. Г., Пенин Н.А.). А вот американские физики увидели новое явление и создали точечный транзистор.

Еще до войны, в 1936 году, директор Bell Telephone Laboratories Мервин Келли решает сформировать группу ученых, которая провела бы серию исследований, направленных на замену ламповых усилителей полупроводниковыми. Группу возглавил Джозеф Бекер, привлечший к работе физика-теоретика Уильяма Шокли и блестящего экспериментатора Уолтера Браттейна.

Окончив докторантуру в Массачусетском технологическом институте и поступив на работу в Bell Telephone Laboratories, Шокли, будучи исключительно амбициозным и честолюбивым человеком, энергично берется за дело. В 1938 году, в рабочей тетради 26-летнего Шокли появляется первый набросок полупроводникового триода. Идея проста и не отличается оригинальностью: сделать устройство, максимально похожее на электронную лампу, с тем лишь отличием, что электроны в нем будут протекать по тонкому нитевидному полупроводнику, а не пролетать в вакууме между катодом и анодом. Для управления током полупроводника предполагалось ввести дополнительный электрод (аналог сетки) – прикладывая к нему напряжение разной полярности. Таким образом, можно будет либо уменьшать, либо увеличивать количество электронов в нити и, соответственно, изменять ее сопротивление и протекающий ток. Все как в радиолampe, только без вакуума, без громоздкого стеклянного баллона и без подогрева катода. Вытеснение электронов из нити или их приток должен был происходить под влиянием электрического поля, создаваемого между управляющим электродом и нитью, то есть благодаря полевому эффекту. Для этого нить должна быть именно полупроводниковой. В металле слишком много электронов и никакими полями их не вытеснишь, а в диэлектрике свободных электронов практически нет. Шокли приступает к теоретическим расчетам, однако все попытки построить твердотельный усилитель ни к чему не приводят.

Работы по твердотельному усилителю в Bell Telephone Laboratories прерываются с началом Второй мировой войны. Уильям Шокли и многие его коллеги откомандированы в распоряжение министерства обороны, где работают до конца 1945 года над проблемами, весьма далекими от создания твердотельного усилителя.

5. XX ВЕК. ТРАНЗИСТОРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

5.1. Изобретение биполярных и полевых транзисторов, туннельных диодов, скачок в развитии полупроводниковой технологии.

В послевоенные годы фирма Bell Telephone Laboratories начала формировать программу глобальной связи – быстрой и надежной связи каждого с каждым в планетарном масштабе. Аппаратура связи сороковых годов прошлого века использовала для усиления, преобразования и коммутации сигналов в абонентских цепях два элемента: электронную лампу и электромеханическое реле. Они были громоздки, малонадежны, срабатывали медленно и потребляли много энергии. Усовершенствовать этих мастодонтов было бессмысленно – новой идее нужны и новые средства реализации. Это означало вернуться к идее использования полупроводников. В Bell Labs вновь создается исследовательская группа, научным руководителем которой становится вернувшийся «с войны» Уильям Шокли. Группа небольшая, всего из 6-7 человек разных специальностей. В команду входят физик-экспериментатор Уолтер Браттейн, электротехник Джон Пирс, физхимик Роберт Гибни, радиотехник Берт Мур, физик-теоретик Джон Бардин.

Руководителем группы был Шокли – естественно, группа начала разрабатывать его предвоенную идею усилителя с эффектом поля, но электроны внутри полупроводника упрямо и, казалось бы, противоестественно игнорировали любые изменения потенциала на управляющем электроде. От высоких напряжений и токов кристаллы даже взрывались, но никак не желали изменять свое сопротивление. Снова Шокли был не в состоянии достичь им же самим предсказанных в 1939 г. результатов.

Над этим задумался теоретик Джон Бардин. Шокли, не получив быстрого результата, охладел к теме и не принимал активного участия в работе. Бардин предположил, что значительная

часть электронов на самом деле не «разгуливает» свободно по кристаллу, а застревает в каких-то ловушках у самой поверхности полупроводника. Заряд этих «застрявших» электронов экранирует прикладываемое извне поле, которое не проникает в объем кристалла. Так что поверхностные явления могут приводить к провалу попыток построить рабочие полупроводниковые приборы. Вот так в 1946 году в физику твердого тела вошла теория поверхностных состояний. Теперь, когда, казалось, причина неудач найдена, группа начала более осмысленно реализовывать идею эффекта поля. Других идей просто не было.

Стали различными способами обрабатывать поверхность германия, надеясь устранить ловушки электронов, кстати, использовали пластинки германия высокой чистоты, разработанного в университете Перду. Перепробовали все – химическое травление, механическую полировку, нанесение на поверхность различных пассиваторов. Кристаллы погружали в различные жидкости, но результата не было. Тогда решили максимально локализовать зону управления, для чего один из токопроводов и управляющий электрод изготовили в виде близко расположенных подпружиненных иглолок. Экспериментатор Браттейн «мог 25 часов в сутки крутить ручки осциллографа, лишь бы было с кем поболтать». Теоретик Бардин всегда был рядом, готовый сутки напролет проверять свои теоретические выкладки, они сдружились, «теория» и «эксперимент» объединились. Однако время шло, а сколько-нибудь существенного результата не появлялось.

Однажды Браттейн, издерганный от неудач, сдвинул иголки золотых проволочек почти вплотную, более того – случайно перепутал полярности прикладываемых к ним потенциалов. Ученый не поверил своим глазам. Он был поражен, но на экране осциллографа было явно видно усиление. Напряжение на одном электроде модулировало ток, текущий через другой, усиливая входной сигнал до 100 раз.

Теперь наступило время теоретика Бардина, он сработал почти мгновенно и безошибочно: эффекта поля как не было так и нет, а усиление возникает совсем по иной причине. Во всех предыдущих оценках в расчет принимались только электроны – основные носители тока в германиевом кристалле, а «дырки», неосновные носители, которых было в миллион раз меньше, естественно игнорировались. А оказалось, что в них-то и «зарыта собака»: введение дырок через один электрод (этот процесс называли инъекцией) вызывает неизмеримо больший ток в другом электроде – так в кристалле происходит усиление тока. И все это на фоне неизменности состояния огромного количества электронов, как бы и не участвующих в процессе.

Вот так, непредсказуемым образом, 19 декабря 1947 года на свет появился точечный транзистор. Сначала новое устройство называли германиевым триодом. Бардину и Браттейну название не понравилось. Не звучало. Они хотели, чтобы название заканчивалось бы на «тор», по аналогии с резистором или термистором. Здесь им на помощь приходит Джон Пирс, который прекрасно владел словом (в дальнейшем он станет известным популяризатором науки и писателем-фантастом под псевдонимом J. J. Coupling). Пирс вспомнил, что одним из параметров вакуумного триода служит крутизна характеристики, по-английски — *transconductance*. Он предложил назвать аналогичный параметр твердотельного усилителя *transresistance*, а сам усилитель, а это слово просто вертелось на языке, – транзистором. Название всем понравилось.

Через несколько дней после замечательного открытия, в канун Рождества, 23 декабря 1947 года состоялась презентация транзистора руководству Bell Telephone Laboratories. Уильям Шокли, который проводил отпуск в Европе, срочно возвратился в Америку. Он назвал это событие «великолепным рождественским подарком». Несмотря на хрупкую механическую структуру, было произведено много тысяч транзисторов в металлическом корпусе, получившем фирменное название Bell Labs – транзистор «тип А».

Неожиданный успех Бардина и Браттейна глубоко задевает самолюбие Шокли. Он раньше других задумался о полупроводниковом усилителе, возглавил группу, выбрал направление исследований, но на соавторство в «звездном» патенте претендовать не мог. На фоне всеобщего ликования Шокли выглядел разочарованным и мрачным, в течение месяца он проводит интенсивные теоретические исследования. 23 января 1948 г. он предлагает принципиально другую конструкцию транзистора (которую изобрел в новогоднюю ночь в течение недели после презентации транзистора руководству Bell Labs, которую он назвал своей «страстной неделей») и теорию транзистора с p-n-переходами, обнаруженными Ойлом и Лашкаревым в 1940 г. Шокли не

согласился с объяснением Бардина того, как работал точечный транзистор. Он утверждал, что положительно заряженные дырки могли проникать через объем германия, а не только протекать вдоль поверхностной пленки. Это явление, названное им «инжекция неосновных носителей заряда», было крайне важно для режима работы его плоскостного транзистора – трехслойной структуры с тремя слоями электронных и дырочного полупроводника, отделенных p–n–переходами. Это тот механизм, на котором сегодня работают все «биполярные» плоскостные транзисторы.

16 февраля 1948 г. физик Джон Шив (John Shive) установил механизм работы транзистора в образце германия с точечными электродами на противоположных сторонах, а не друг рядом с другом, продемонстрировав, что дырки действительно текли через германий. В июне 1948 г. Шокли подал заявку на патент на плоскостной транзистор и в 1949 г. издал детальную теорию его работы. Но это было еще за два года до того, как ученые Bell Labs и инженеры разработали технологии, позволившие изготовить плоскостной транзистор в промышленных масштабах.

Предложение принципиальной схемы более эффективного твердотельного усилителя со слоеной структурой уравнило Шокли в правах на открытие транзисторного эффекта с Бардиным и Браттейном.

Малоизвестной до сих пор страницей в транзисторной истории является независимое от американских ученых изобретение транзистора в Европе в 1948 г. Два немецких физика, работавшие в Париже, Герберт Матаре (Herbert Mataré) и Генрих Велкер (Heinrich Welker) независимо создают германиевый точечно-контактный транзистор.

Во время Второй мировой войны эти ученые участвовали в германской радарной программе. Матаре разрабатывал кристаллические выпрямители из кремния и германия в лабораториях Телефункен в Берлине и Силезии, а Велкер работал над очисткой германия в Мюнхене. После того, как война закончилась, они были наняты французской компанией «Compagnie des Freins et Signaux», филиалом американской Westinghouse, для разработки и производства твердотельных выпрямителей из этих материалов.

В 1947 г. Матаре начал исследовать нечетное явление, названное «интерференцией», которую он обнаружил в германиевых выпрямителях во время войны. В 1944 г. Матаре сконструировал прибор, который назвал дуодиодом. Это была пара работающих параллельно точечных выпрямителей, использующих одну и ту же пластинку германия. Если два точечных контакта располагались достаточно близко, в пределах 100 микрометров друг от друга, то потенциал на одном из них мог влиять на ток, текущий через другой. При правильном подборе параметров устройство подавляло шумы в приемном блоке радара. Тогда Матаре обнаружил, что колебания напряжения на одном электроде могут обернуться изменением силы тока, проходящего через второй электрод. Заметим, что описание подобного эффекта со держалось еще в патенте Лилиенфельда, и не исключено, что Матаре знал об этом. Но как бы там ни было, он заинтересовался наблюдаемым явлением и продолжал исследования.

Велкер пришел к идее транзистора с другой стороны, занимаясь квантовой физикой и зонной теорией твердого тела. В самом начале 1945 года он создает схему твердотельного усилителя, очень похожего на устройство Шокли. В марте Велкер успевает его собрать и испытать, но ему повезло не больше, чем американцам – устройство не работло.

В начале 1948 года Матаре достиг отдельных, единичных эффектов усиления электрических сигналов. К июню 1948 г. он получил воспроизводимые результаты, используя образцы германия более высокой чистоты, изготовленные Велкером. Но месяц спустя, они узнали удивительную новость, что Bell Labs только что изобрела подобный полупроводниковый усилитель.

Европейский транзистор появляется на полгода позже, чем устройство Бардина и Браттейна, но абсолютно независимо от него. О работе американцев Матаре и Велкер не могли ничего знать. Первое упоминание в прессе о «новом радиотехническом устройстве», вышедшем из Bell Laboratories, появилось только 1 июля 1948 г.

Дальнейшая судьба европейского изобретения сложилась печально. Матаре и Велкер в августе 1948 г. подготовили заявку на изобретение, но французское бюро патентов очень долго изучало документы. Только в марте 1952 года они получают патент на изобретение транзитрона – такое название выбрали немецкие физики своему полупроводниковому усилителю. Они стремились дать такое название, которое отличало бы их прибор от американского транзистора. К

тому времени парижский филиал Westinghouse уже начал серийное производство транзитронов. Основным заказчиком выступало Почтовое министерство. Во Франции строилось много новых телефонных линий. Тем не менее, век транзитронов был недолог. Несмотря на то, что они работали лучше и дольше своего американского «собрата» (за счет более тщательной сборки), завоевать мировой рынок транзитроны не смогли. Впоследствии французские власти вообще отказались субсидировать исследования в области полупроводниковой электроники, переключившись на более масштабные ядерные проекты. Лаборатория Матаре и Велкера приходит в упадок. Ученые принимают решение вернуться на родину. К тому времени в Германии начинается возрождение науки и высокотехнологичной промышленности. Велкер устраивается на работу в лабораторию концерна Сименс, которую впоследствии возглавит, а Матаре переезжает в Дюссельдорф и в 1952 г. становится президентом небольшой компании Intermetall, выпускающей полупроводниковые приборы.

В годы, предшествующие изобретению транзистора, в СССР были достигнуты значительные успехи в создании германиевых и кремниевых детекторов. В этих работах использовалась оригинальная методика исследования приконтактной области путем введения в нее дополнительной иглы, вследствие чего создавалась конфигурация, в точности повторяющая точечный транзистор. Как позднее вспоминали, иногда при измерениях выявлялись и транзисторные характеристики, но их отбрасывали как случайные и неинтересные аномалии. Мало в чем наши исследователи уступали американским специалистам, не было у них лишь одного – нацеленности на транзистор, и великое открытие выскользнуло из рук.

Во время войны работа по развитию полупроводниковой электроники в СССР затормозилась, но достаточно быстро возобновилась после войны. Возрождение хозяйства и науки шло буквально по следам отступавших нацистских армий. Из действующей армии отзывали учёных и инженеров для развития научных работ и уже отменялась мобилизация старшекурсников технических вузов – нужно было готовить специалистов. В 1946 в Киеве уже работали институты, а из Москвы откомандировывались академики для содействия возрождению Академий наук Украинской и Белорусской ССР. Вернулся в Киев из эвакуации Лашкарев, ещё в 1939 открывший явление p-n-перехода в полупроводниках. В Москве же, работа шла ещё активнее.

В 1948 г. в Московском Химико-технологическом институте (МХТИ) на кафедре «Технология электровакуумных и газоразрядных приборов» произошло заурядное событие – распределение дипломных работ среди студентов. Тема «Исследование материалов для кристаллического триода» досталась последнему в списке группы застенчивому студенту. Испугавшись, что не справится, тот попросил дать ему что-нибудь другое. Руководительница группы подозвала оказавшуюся рядом девушку и сказала: «Сусанна, поменяйся с ним. Ты у нас девушка смелая, активная и с этим разберёшься». Так 22-летняя дипломница Сусанна Мадоян, сама того не ожидая, оказалась первым разработчиком транзисторов в СССР.

Вскоре её направили в подмосковный город Фрязино, в НИИ-160 (НИИ «Исток»), в лабораторию А.В. Красилова. Особых познаний о транзисторах, кроме общей теории полупроводников, у Сусанны не было, однако Красилов оказался замечательным руководителем и постарался снабдить её всей доступной научной литературой. Правда эта «литература» ограничивалась несколькими выдержками из закрытых технических бюллетеней, в частности работой Кикоина, да ещё в 1948 г. в американском журнале *Physical Review*, в отделе «Письма» промелькнула небольшая статья об усилительном эффекте в точке пересечения металлических контактов и поверхности полупроводниковой пластинки. Никаких технических подробностей она не содержала.

Конечно, не было никаких материалов специально подготовленных для экспериментов. Исследователи раздобыли пластинку полупроводникового материала, вынутую из какого-то трофейного немецкого датчика, а затем Сусанна соорудила конструкцию из двух контактных пружинок, сделанных из бериллиевой бронзы, и двух стальных скобок. Эта контактная пара перемещалась взад-вперед по пластинке с помощью горизонтального винта, приводимого в движение отвёрткой, а вся миниатюрная экспериментальная установка по виду мало отличалась от обыкновенного реостата или потенциометра. Снимаемый сигнал подавался на «характериограф» – прибор подобный осциллографу, который настраивался другим лаборантом. Передвигая контакты по пластинке можно было снимать характеристики и отыскивать точки, дававшие лучшие показате-

ли. Красилов периодически интересовался, получен ли усилительный эффект. Однако характеристики были очень нестабильными и после примерно получаса работы контакты приходилось переводить в какое-нибудь другое место. Тем не менее «усилительный (транзисторный) эффект» в конце концов был получен. В 1949 г. было зарегистрировано первое наблюдение «транзисторного эффекта» и, по сути дела, создание первого советского триода.

1949 г. отмечен еще одним важным событием для развития электронной техники в СССР – был создан Координационный комитет по экспортному контролю, более известный как КоКом или КОКОМ (Coordinating Committee for Multilateral Export Controls, CoCom). Эта международная организация была создана странами Запада для многостороннего контроля над экспортом в СССР и другие социалистические страны; ее штаб-квартира в Париже. В эпоху холодной войны КоКом составлял перечни «стратегических» товаров и технологий, не подлежащих экспорту в страны «восточного блока», а также устанавливал ограничения по использованию товаров и технологий, разрешенных для поставки в виде исключения. Комитет разработал стратегию *«контролируемого технологического отставания»*.

Чрезвычайно подорванная экономика СССР, огромные человеческие потери – все эти последствия войны сами по себе очень затрудняли возрождение промышленности и развитие электроники в частности. Сверх этого наложилась еще активная деятельность КОКОМ, членами которого были 17 государств: США, Канада, Австралия, Япония, Великобритания, Бельгия, Дания, Франция, ФРГ, Греция, Италия, Люксембург, Нидерланды, Норвегия, Португалия, Испания, Турция. Кроме того, в вопросах экспорта с этой организацией сотрудничали такие страны, как Австрия, Финляндия, Ирландия, Новая Зеландия, Швеция и Швейцария.

После работы Красилова и Мадоян были получены транзисторы в ФИАНе в лаборатории Бенциона Моисеевича Вула, в ЛФТИ в лаборатории Владимира Максимовича Тучкевича, в НИИ-108 в лаборатории Сергея Григорьевича Калашникова, и, наконец, в ИРЭ АН Полониным Н. А.

В 1951 году академик, заместитель министра обороны, Аксель Иванович Берг созвал совещание специалистов по развитию транзисторостроения. Ленинградский физико-технический институт АН СССР представлял Наследов и Тучкевич, ФИАН АН СССР делегировал Вула и Ржанова, от НИИ-108 Калашников и Пенин, от Украинской АН – Лашкарев, от НИИ "Исток" (НИИ-160) – Красилов. Результатом совещания стала постановка ОКР по точечным транзисторам "Точка" в НИИ "Исток" (руководитель Красилов) и по плоскостным транзисторам НИР "Плоскость". Эта научно-исследовательская работа выполнялась несколькими организациями: ЛФТИ (руководитель Наследов), ФИАН (руководитель Вул), НИИ «Исток» (руководитель Красилов). В конце 1953 года эти работы были сданы Госкомиссии, которая работала во вновь созданном НИИ «Пульсар» (НИИ-35). Сюда же была передислоцирована лаборатория Красилова. В этой лаборатории были изготовлены первые в СССР плоскостные транзисторы П1, П2, П3, которые стали основой для других серийных полупроводниковых приборов. Промышленный выпуск был освоен на ЛОЭП «Светлана».

Был создан второй полупроводниковый институт – НИИ-311 в дальнейшем НИИ «Сапфир». Его профилем стали работы по созданию диодов. Одновременно с этим академик Берг создал новый Институт радиоэлектроники (ИРЭ) в рамках АН СССР, который сам и возглавил. Сюда перешли преимущественно сотрудники ЦНИИ-108, работы которого по полупроводникам были свернуты.

После того, как теория Шокли о транзисторе с $p-n$ -переходами была подтверждена многочисленными экспериментальными проверками, промышленное производство работоспособных транзисторов все еще представляло огромные проблемы. Главной проблемой было отсутствие достаточно чистых, однородных полупроводниковых материалов.

Химик из Bell Labs Гордон Тил (Gordon Teal) утверждал, что в ближайшем будущем будут востребованы большие монокристаллы германия и кремния, но очень немногие, включая Шокли, прислушивались к нему. С небольшой поддержкой от руководства компании и с помощью инженера-механика Джона Литтла (John Little) и техника Эрнста Белера (Ernest Buehler) Тил построил оборудование, необходимое для выращивания кристалла. Метод был основан на технологиях, разработанных в 1917 г. польским химиком Яном Чохральски (Jan

Czochralski). Небольшой кристалл германия («затравка») подвешивался в тигле с расплавленным германием и медленно вытягивался вверх, образуя длинный, узкий монокристалл. Шокли позже назвал это достижение «самой важной научной разработкой в полупроводниковой сфере в первые годы».

Используя эту технологию, другой химик из Bell Labs Морган Спарк (Morgan Sparks) изготавливал *p-n*-переходы, добавляя крошечные навески (шарики) примесей в расплавленный германий во время выращивания кристалла. В апреле 1950 г. Спарк и Тил начали добавлять в плавку поочередно два шарика, первый с акцепторной примесью и второй – с электронной примесью. В результате образовалась *n-p-n* структура с тонким внутренним, или базовым, слоем. Год спустя, такие «тянутые транзисторы» превосходили лучшие точечно-контактные транзисторы по производительности. Bell Labs объявила об этом прогрессе 4 июля 1951 г. на пресс-конференции, проведенной Шокли.

Но наиболее прогрессивной технологией, разработанной в Bell Labs в начале 1950-ых годов, является технология зонной плавки (зонной очистки), которая приводит к ультрочистым образцам германия и кремния с числом примесей столь же малым как одна часть в десяти миллиардах, что по смыслу эквивалентно щепотке соли в трех грузовых вагонах сахара. Такие образцы высокочистого полупроводника позволяют точно управлять *n*-областью и *p*-областью, добавляя небольшое количество примесей.

Инженер - химик Bell Labs Уильям Пфанн (William Pfann) впервые провел зонную очистку в 1950–51 г.г. Зонная плавка – метод очистки твердых веществ, основанный на различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазах. Метод является разновидностью направленной кристаллизации, от которой отличается тем, что в каждый момент времени расплавленной является некоторая небольшая часть образца. Такая расплавленная зона передвигается по образцу, что приводит к перераспределению примесей. Если примесь лучше растворяется в жидкой фазе, то она постепенно накапливается в расплавленной зоне, двигаясь вместе с ней. В результате примесь скапливается в одной части исходного образца. По сравнению с направленной кристаллизацией этот метод обладает большей эффективностью. Метод, предложенный Пфанном завоевал большую популярность. В настоящее время метод используется для очистки более 1500 веществ.

Эта технология не работала для кремния, потому что кремний имеет более высокую температуру плавления (1415°C против 937°C для германия) и взаимодействует почти со всеми другими материалами. В 1952 г. химик из Bell Labs Генри Тойрер (Henry Theurer) модификацию технологии, которая получила название зонной очистки с плавающей зоной. Этот метод особенно подходит для очистки кремния. Установка представляет собой вакуумную камеру с закрепленным в ней вертикально кремниевым стержнем, окруженным витком из медной трубки. Медный виток служит нагревательным индуктором и токами высокой частоты расплавляет узкую поперечную зону стержня. Нагревательный виток можно перемещать вверх по стержню либо, при неподвижном витке, перемещать слиток. В обоих случаях расплавленная зона тоже перемещается и переносит оказавшиеся в ней примеси. В начале 1955 г. метод позволял получать кремний с уровнем примесей ниже одной части на миллиард. Технология была разработана независимо в двух других лабораториях: в U. S. Army Signal Corps, Форт-Монмут, штат Нью-Джерси и под руководством Шпенке в Сименсе в Западной Германии.

В течение первых шести лет существования транзисторов все они были сделаны из германия. Хотя с германием намного легче работать, чем с кремнием и он позволяет более высокочастотный режим транзистора, у германиевых приборов большие токи утечки в режиме «выключено», а это проблема для компьютерной логической схемы. Кроме того, у германиевых приборов рабочий температурный диапазон от 0 до 70°C, что ограничивает их использование. Кремниевые приборы работают в диапазоне от –55 до 125°C, что стало возможным с использованием высокочистого кремния от фирмы Дюпон. В январе 1954 химик Bell Labs Морис Танненбаум (Morris Tanenbaum) разработал первый кремниевый транзистор, используя модернизированную технологию Спаркса и Тила по выращиванию *p-n*-переходов.

Однако компания Bell Labs не развивала эту технологию дальше, полагая ее непривлекательной для коммерческого внедрения. Оставив Bell Labs, чтобы организовать

исследовательскую лабораторию в конкурирующей фирме Texas Instruments (TI), Тил нанял команду ученых и инженеров во главе с химиком Уиллисом Эдкоком (Willis Adcock), чтобы производить кремниевые транзисторы. 14 апреля 1954 г., используя высокочистый кремний Дюпон, они сделали свой первый успешный кремниевый транзистор – *n-p-n*– структуру, используя технологию выращенных *p-n*–переходов. К концу 1950-ых кремний стал привилегированным полупроводниковым материалом промышленности.

Новые технические решения могут открывать отдельные направления в полупроводниковой электронике. Таким примером может служить разработка *полевых транзисторов*, идея которых была предложена еще Лилиенфельдом в 1925 г. Этот прибор одновременно мог выполнять функции резисторов, управляемых напряжением. Первый промышленный полевой транзистор был изготовлен в 1958 году Станиславом Тешнером во Франции и получил название *текнетрон*. Он представляет собой стерженек из полупроводника длиной 2 мм и диаметром 0,5 мм. На этом стерженьке сделана глубокая круговая выемка, на которую нанесен тонкий слой индия. В этом приборе одна из частей стерженька играет роль катода с избыточным количеством электронов, к другой приложен положительный потенциал и она служит анодом. Кольцо из индия аналогично сетке в вакуумном триоде – подачей на него потенциала можно управлять величиной протекающего тока. Принцип действия текнетрона основан на зависимости эффективного сечения полупроводника, а следовательно, и его сопротивления в этом месте, от интенсивности приложенного к полупроводнику электрического поля. Германий, из которого сделан стержень, обладает проводимостью *n*–типа и протекающий в стержне ток создается потоком электронов.

Современный полевой транзистор создается на базе структуры *металл — окисел — полупроводник* (МОП). В кремниевой подложке, например, *p*–типа, создаются два островка кремния *n*–типа. Эти островки снабжены металлическими контактами, один из которых называется *истоком*, другой — *стоком*. На поверхности кремния над пространством между истоком и стоком (каналом) наносится слой двуокиси кремния. Поверх этого слоя осаждается тонкая металлическая пленка, образующая третий электрод, называемый *затвором*. Двуокись кремния являясь хорошим изолятором, поэтому затвор не имеет прямого электрического контакта с полупроводниковой подложкой. Электрическая связь осуществляется через электрическую емкость, другими словами, через электрическое поле, генерируемое зарядом на затворе. Электрическое поле эффективно влияет на движение заряженных носителей в канале полупроводника. В МОП–транзисторе со встроенным каналом в инверсном канале под слоем диоксида кремния ток образуется носителями только одного знака. Поэтому этот тип транзисторов иногда называют *униполярным*. Как и биполярный транзистор, полевой МОП–транзистор обладает способностью усиливать электрический ток. Однако в этом случае усиление происходит по напряжению, а не потоку, как в биполярном транзисторе.

Выдающийся бизнесмен и человек Арнольд Орвилл Бекман (Arnold Orville Beckman; 10 апреля 1900 — 18 мая 2004) – американский химик, изобретатель рН–метра, основатель компании Beckman Instruments, также известен тем, что в 1956 г. предоставил финансирование первому предприятию, занявшемуся производством кремниевых полупроводников в Кремниевой долине. В сентябре 1955 г. Шокли и Бекман пришли к соглашению создать Shockley Semiconductor Laboratory как отделение Beckman Instruments, для того «чтобы участвовать быстро и энергично в активности, связанной с полупроводниками». Шокли арендовал здание в городке Маунтин-Вью (Mountain View) в Калифорнии и начал набирать, по его словам, «самую творческую команду в мире для разработки и производства транзисторов». Он привлек чрезвычайно способных инженеров и ученых, включая Гордона Мура (Gordon Moore) и Роберта Нойса (Robert Noyce), которые разработали технологии, связанные с кремнием и диффузией. В декабре 1956 г. Шокли получил Нобелевскую премию по физике за изобретение транзистора, разделив ее с Бардиным и Браттейном, но его сотрудники стали разочаровываться в нем из-за его тяжелого, высокомерного, стиля руководства. Они также чувствовали, что компания должна преследовать более близкие цели производства кремниевых транзисторов, а не отдаленную задачу создания *p-n-p-n*–диода с четырьмя слоями, который Шокли задумал еще в Bell Labs для переключателей в телефонных системах.

После неудачной просьбы к Бекману о приглашении нового профессионального менеджера, восемь служащих Шокли, – Гордон Мур, Роберт Нойс, Джулиус Блэнк (Julius Blank), Виктор Гринич (Victor Grinich), Жан Эрни (Jean Hoerni), Юджин Кляйнер (Eugene Kleiner), Джей Ласт (Jay Last) и Шелдон Робертс (Sheldon Roberts), – покинули Шокли в сентябре 1957 г., вследствие этого их окрестили «вероломной восьмеркой». «Восьмерка» при финансовой поддержке известной компании Fairchild Camera and Instrument организовала компанию Fairchild Semiconductor Corporation в Пало Альто. Компанию назвали в честь инвестора, предоставившего венчурное финансирование размером в 1,5 млн. долларов взамен на право выкупить Fairchild Semiconductor в течение 8-и лет. Fairchild Camera and Instrument воспользовалась этим правом уже в 1958 г.

Вначале компания производила диффузионные транзисторы с мезаструктурами, но вскоре перешла на более технологичные планарно-диффузионные. Fairchild Semiconductor стала прибыльной всего через 6 месяцев после основания, продав IBM 100 транзисторов 2N697 по 150\$ за штуку. Компания оказалась успешным коммерческим проектом и одним из лидеров электроники в области исследования и разработки полупроводниковых элементов и полупроводниковых приборов.

Компания Шокли продолжала работу над диодом и оставалась убыточной и, в конце концов, была продана. Сам Шокли перешёл на преподавательскую работу профессором электротехники в Стэнфорд. Первооткрыватель транзисторного эффекта и автор важнейших работ по теории полупроводников – в конце своей жизни считал своим главным достижением вклад в генетику (фактически в евгенику).

На конференции в июне 1958 г. в Брюсселе Лео Эсаки (Leo Esaki) сообщил о новом диоде, который он разработал в фирме Sony. Ток в диоде уменьшался с ростом напряжения, эффективно показывая «отрицательное сопротивление». Диод Эсаки или туннельный диод, названный по названию явления квантово-механического туннелирования, лежащего в основе его работы, предоставлял высокую скорость переключения и очень низкое потребление энергии. Председатель конференции Шокли приветствовал эту разработку и предсказал ей широкое употребление в компьютерах. В 1973 Эсаки, работавший к тому времени в IBM, получил Нобелевскую премию за его работы по тунелированию электронов в твердых телах, разделив ее с Айвором Джайевером и с Джозефсоном. В то время, как туннельный диод нашел нишу своего применения, он никогда не оправдал возлагавшихся на него надежд стать сверхбыстродействующим полупроводниковым ключом. Как дискретный компонент, это не могло конкурировать с интегральными схемами, которые были достаточно быстродействующими и предложили существенные преимущества в стоимости, надежности, и плотности упаковки.

В том же 1958 г. компания Fairchild Semiconductor создала так называемый мезатранзистор, названный так за его выпуклую, подобную горке, структуру («меза», название, которое в Южной Америке служит для обозначения горных плато с обрывистыми краями). Началось все с заказа 100 транзисторов для IBM по 150\$ за штуку. Не было такого производителя транзисторов, который бы удовлетворил жестким техническим требованиям к кремниевому высоковольтному транзистору для запуска электронной памяти на магнитных сердечниках в бортовом компьютере сверхзвукового бомбардировщика В-70. Параллельно было запущено два рабочих проекта: Команда Гордона Мура разрабатывала микротранзистор *n-p-n*-структуры, а команда Жана Эрни создавала *p-n-p*-транзистор.

Только через пять месяцев литейщики отладили режим выращивания кристаллов (Шелдон Робертс), затем были разработаны фотофотолитографические методы маскирования, используя 16-миллиметровые линзы кинокамеры (Джей Ласт, Роберт Нойс), были установлены способы нанесения алюминия, необходимые для того, чтобы установить электрические контакты (Гордон Мур) и отстроены собственное производство и испытательная аппаратура (Джулиус Блэнк, Виктор Гринич, Юджин Кляйнер). Они разработали первую коммерческую технологию двойной диффузии для изготовления и эмиттера и базы мезатранзистора. Команда Мура успешно выдала транзистор *n-p-n*-структуры, получивший обозначение 2N697 и большое признание на выставке Wescon в августе 1958 г.

5.2. Освоение промышленного производства транзисторной электронной техники.

Через полгода после успешной демонстрации точечного транзистора руководству Bell Telephone Laboratories, 30 июня 1948-го, в Нью-Йорке, в штаб-квартире Bell Telephone Laboratories, после улаживания всех необходимых патентных формальностей, прошла *открытая* презентация транзистора. В то время уже началась холодная война между США и Советским Союзом, поэтому технические новинки, прежде всего, оценивались военными. К удивлению всех присутствующих, эксперты из Пентагона не заинтересовались транзистором и порекомендовали использовать его в слуховых аппаратах. Через несколько лет новое устройство стало незаменимым компонентом в системе управления боевыми ракетами, но именно в тот день близорукость военных спасла транзистор от грифа «совершенно секретно».

Журналисты отреагировали на изобретение тоже без особых эмоций. На сорок шестой странице в разделе «Новости радио» в газете «Нью-Йорк Таймс» была напечатана только краткая заметка об изобретении нового радиотехнического устройства.

В Bell Telephone Laboratories не ожидали такого развития событий. Военных заказов с их щедрым финансированием не предвиделось даже в отдаленной перспективе. Срочно принимается решение о продаже всем желающим лицензий на транзистор. Сумма сделки – \$25 тыс. Организовывается учебный центр, проводятся семинары для специалистов.

В апреле 1952 г., более чем 100 представителей от 40 компаний приехали для девятидневного Симпозиума по транзисторной технологии, включая посещение ультрасовременного транзисторного завода - изготовителя Western Electric в Аллентауне, Пенсильвания. Были участники от таких титанов электронной аппаратуры как Дженерал Электрик и RCA, так же как от тогда еще мелких фирм Texas Instruments и Sony. Изданный Bell Labs и впоследствии отредактированные Ван Нострандом (D. Van Nostrand) в исправленном издании труды первого симпозиума – *Транзистор*, нежно прозванные как "Поваренная книга мамы Bell" – стали библией динамично развивающейся полупроводниковой промышленности, которая появилась в 1950-ых годах.

Результаты не заставляют себя ждать. Транзистор быстро находит применение в самых различных устройствах – от военного и компьютерного оборудования до потребительской электроники. В 1952 г. появляются созданные на транзисторах потребительские товары. Несмотря на их первоначально высокую стоимость по сравнению с электровакуумными приборами, транзисторы нашли свои самые первые потребительские приложения в мобильных приборах, таких как слуховые аппараты и радиоприемники, где главным было небольшой размер и низкое потребление энергии.

Первый переведенный на транзисторы потребительский товар в США был слуховым аппаратом за 229,50\$ от фирмы Sonotone в 1952 г. В нем использовались два электровакуумных прибора и один транзистор, сделанный компанией Germanium Products Corporation. Фирма Raytheon предоставила первый транзистор массового производства CK718 для полностью транзисторного слухового аппарата, введенного в 1953 компанией Maico. К 1954 г. 97 процентов всех слуховых аппаратов использовали только транзисторы. Агрессивное поведение Raytheon на этом рынке при вице-президенте Нормане Крим (Norman Krim) сделало компанию наибольшим изготовителем транзисторов между 1952 г. и 1955 г.

Intermetall Corp. из Дюссельдорфа в Западной Германии (со-учредитель–Герберт Матаре – изобретатель европейского транзистора) в 1953 г. публично продемонстрировала на ярмарке Радио в Дюссельдорфе радиоприемник на четырех точечных транзисторах. Первый транзисторный радиоприемник TR-1, доступный для американских потребителей по цене 49,95\$, становится хитом США в октябре 1954 г. – продано более чем 100 000 экземпляров. С тех пор слово «транзистор» вошло в общественный словарь – первый портативный радиоприемник долгое время так и называли – транзистор.

В тот же месяц компания Tokyo Telecommunications Company, позже переименованная в Sony, продавала «германиевые часы» и слуховые аппараты и показала прототип транзисторного радиоприемника в универсаме Mitsukoshi в Токио. В марте 1955 г. Sony начала продавать свои транзисторные радиоприемники TR-52 в США за 29,95\$, вскоре захватив этот рынок.

В течение 1950-ых полупроводниковые приборы постепенно замещали электровакуумные приборы в компьютерах. К 1960 г. новые разработки были полностью переведены на транзисторы. Эксплуатируемый в апреле 1950 г. Восточный Автоматический Компьютер (SEAC) Национального Бюро Стандартов США использовал 10500 германиевых диодов и 747 электровакуумных ламп.

16 ноября 1953 г. Ричард Гримсдейл (Richard Grimsdale) и Дуглас Вебб (Douglas Webb) из университета в Манчестере продемонстрировали прототип компьютера на транзисторах. 48-битовая машина использовала 92 точечных транзистора и 550 диодов, изготовленных фирмой STC, британским филиалом корпорации ИТТ. В 1955 г. был закончен расширенный вариант компьютера с 250 плоскостными транзисторами.

В 1954 г. Жан Фелкер (Jean H. Felker) возглавил команду Bell Labs, куда входил инженер Джеймс Харрис (James R. Harris), который сконструировал и построил полностью транзисторный компьютер TRADIC (TRAnsistor DIgital Computer) для американских военно-воздушных сил. Компьютер содержал около 700 точечных транзисторов и свыше 10000 диодов, работал на частоте 1 МГц и потреблял всего менее 100 Вт электрической мощности. Самолетный вариант компьютера (Flyable TRADIC) был построен на плоскостных транзисторах и заменил аналоговую вычислительную машину, управляющую навигацией и бомбометанием на самолете С-131. Под руководством Уильяма Папиана (William Parian) в апреле 1956 г. расширенная группа разработчиков в лаборатории Линкольна Массачусетского технологического института использовали быстродействующие германиевые переключающие транзисторы производства Philco Corporation, для создания цифрового компьютера общего назначения с рабочей частотой 5 МГц, названного TX-0 (Экспериментальный Микротранзистор). Также в 1956 г. в Японии в лаборатории электротехники в Токио, построен первый транзисторный компьютер ETL Mark III, в котором применялось 130 точечно-контактных транзисторов и 1800 диодов, проектом руководил Хироши Вада (Hiroshi Wada).

В СССР вычислительная (компьютерная) техника тоже не стояла на месте. Термин «компьютер» и аббревиатура «ЭВМ», принятая в СССР, являются синонимами. В настоящее время словосочетание «электронная вычислительная машина» вытеснено из бытового употребления. Аббревиатуру «ЭВМ» в основном используют как правовой термин в юридических документах, инженеры цифровой электроники, а также в историческом смысле – для обозначения компьютерной техники 1940-1980-х годов. Также ЦВМ – цифровая вычислительная машина.

Ламповые ЭВМ, – первое поколение компьютеров, – работали на лампах, но в запоминающих устройствах уже использовались полупроводниковые диоды. Например, ЭВМ общего назначения БЭСМ-1 (БЭСМ – большая электронно-счетная машина) выпущенная в 1953 г. являлась самой быстродействующей машиной в Европе и одной из самых быстродействующих ЭВМ в мире. Имела оперативную память (ОЗУ) на ферритовых сердечниках емкостью 1024 числа, долговременное запоминающее устройство на полупроводниковых диодах (ДЗУ) емкостью до 1024 чисел, всего имела около 5 тыс. электронных ламп.

Краткая история ЭВМ первого поколения такова. В 1950 году в Институте электротехники АН УССР (г. Киев) была испытана построенная под руководством академика С. А. Лебедева (1902—1974) первая советская ЭВМ – малая электронная счетная машина (МЭСМ). В октябре 1951 года она была введена в эксплуатацию. Серийное производство ЭВМ в СССР началось с 1953 года. В этом году был изготовлен первый экземпляр машины «Стрела», разработанной по проекту и под руководством Героя Социалистического Труда Ю.Я. Базилевского. С 1958 года начался выпуск наиболее массовых машин первого поколения – М-20 (руководитель разработки С. А. Лебедев).

В начале 50-х годов наряду с созданием больших ЭВМ (типа БЭСМ) несколько коллективов разрабатывали малые ЭВМ. В Энергетическом институте имени Г. М. Кржижановского под руководством члена-корреспондента АН СССР И.С. Брука были построены машины М-1, М-2 и М-3. Начиная с 1954 года выпускались машины типа «Урал» (руководитель разработок доктор технических наук Б. И. Рамеев).

Интересна история машины М-1, созданной в лаборатории электросистем Энергетического института Академии наук СССР в 1951 г.. Начало исследовательских работ И. С. Брука по

проблеме ЦВМ относится к 1948 г. Он первым в СССР (совместно с Б. И. Рамеевым) разработал проект цифровой ЭВМ с жестким программным управлением. Свидетельство об изобретении на «ЦВМ с общей шиной» было получено ими в декабре 1948 г.

В процессе проектирования и разработки М-1 были предложены и реализованы принципиально новые решения, в частности, двухадресная система команд, нашедшая впоследствии широкое применение в отечественной и зарубежной вычислительной технике.

Новации были и в технических решениях. Еще в конце сороковых годов в одном из своих авторских свидетельств на изобретение – «Однозначный сумматор двоичных чисел» (Справка о первенстве № 366940 от 7.02.1949 г.) И.С.Брук указывал на возможность использования селеновых или германиевых выпрямителей в качестве элементов, выполняющих логические и арифметические операции в цифровых вычислительных машинах.

Серьезные трудности при проектировании М-1 и реализации проекта создавало почти полное отсутствие комплектующих изделий. И. С. Брук нашёл оригинальный выход, воспользовавшись имуществом со складов военных трофеев. С этих складов в лабораторию электросистем поступили некоторые наиболее дефицитные и необходимые для работы приборы и комплектующие элементы (осциллографы, генераторы импульсов, радиолампы, *купроксные выпрямители* и др.).

В результате в основу проекта были положены следующие идеи и трофеи:

1. сочетание малой номенклатуры компонент самого разного происхождения;
2. всего два типа электронных ламп;
3. купроксные выпрямители электроизмерительных приборов;
4. магнитные головки от бытового магнитофона;
5. электронно-лучевые трубки от осциллографа;
6. трофейный телетайп из генштаба вермахта.

Для цифрового двоичного счетчика в арифметическом узле был разработан сумматор на лампах 6Х6 (разработчик Н. Я. Матюхин). Брук подбросил Матюхину очень важную идею – использовать для построения логических элементов вместо электронных ламп поступившие по репарациям немецкие купроксные выпрямители. Матюхин поручил молодому сотруднику технику Ю.В.Рогачеву, только что демобилизовавшемуся из армии, изготовить макет цифрового двоичного счётчика, аналогичного ранее выполненному, заменив в схеме ламповые диоды 6Х6 трофейными купроксными выпрямителями. Прежде всего, предстояло определить технические характеристики купроксных выпрямителей. Они оказались точным аналогом отечественных приборов КВМП-2-7 (купроксные выпрямительные малогабаритные приборы – 7 шайб диаметром 2 мм). Брук договорился о выпуске специальной модификации такого выпрямителя размером с обычное сопротивление, был создан набор типовых схем. Менее чем через год машина уже заработала (а было в ней несколько сотен ламп и несколько тысяч купроксов).

Впервые в мировой практике создания ЭВМ логические схемы в машине М-1 строились на полупроводниковых элементах – малогабаритных купроксных выпрямителях КВМП-2-7, что позволило в несколько раз сократить количество электронных ламп в машине и значительно уменьшить ее размеры.

На смену ламповым ЭВМ (первое поколение) пришли в конце 50-х годов машины, использовавшие полупроводниковые и магнитные элементы. В 60-е годы в СССР было разработано около 30 моделей полупроводниковых ЭВМ. Первая серийная машина на транзисторах «Раздан-2» изготовлена в 1961 году. В следующем году начат выпуск «Проминя», а в 1963 году — машин серии «Минск». Быстродействие наиболее мощной из них «Минск-32» — 65 тысяч операций в секунду. С 1964 года выпускались полупроводниковые «Уралы», БЭСМ-4 и М-220. Среди малых ЭВМ, разработанных в этот период в СССР, наибольший интерес представляют машины Института кибернетики АН УССР «МИР» и «МИР-2» (руководитель работ академик В. М. Глушков).

В 1967 году в СССР была создана самая мощная вычислительная машина семейства БЭСМ – БЭСМ-6, высокопроизводительная и оригинальная по архитектуре отечественная вычислительная машина на транзисторной элементной базе. Это была вычислительная машина мирового уровня. В БЭСМ-6 использовалось 60 тысяч транзисторов и 200 тысяч полупроводниковых диодов. Для обеспечения высокой надежности использовался режим работы приборов с

большим запасом по мощности. БЭСМ–6 имела исключительно высокое для своего времени быстродействие - 1 млн. операций в сек., обладала отличным коэффициентом отношения производительности к стоимости вычислений.

6. XX ВЕК. ИНТЕГРАЛЬНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

6.1. Изобретение интегральных схем, развитие технологии их производства.

Поскольку вычислительные системы становились все более сложными, инженеры искали более простые способы соединить тысячи микротранзисторов, которые они использовали. Для решения этой задачи правительственные учреждения финансировали разработки микромодульных конструкций и методы проектирования многокристальной гибридной схемы.

Со середины до конца 1950-ых годов появилось несколько успешных проектов по объединению отдельных электронных элементов на одном чипе (микросхеме). В RCA Харвик Джонсон (Harwick Johnson) запатентовал генератор, а Уолмарк (Torcel Wallmark), и Маркус (Sanford Marcus) построили сдвиговые регистры и логические элементы. Д'Асапо (Arthur D'Asaro) и Росс (Ian Ross) из Bell Labs создали четырехступенчатый счетчик для телефонных приложений. Лог (Joe Logue) и Дилл (Rick Dill) из IBM построили счетчик, используя двухкомпонентную диодную структуру. Таруи (Yasuro Tarui) из MITI (Япония) и Стюарт (Richard Stewart) из TI подали заявку на патент на мультикомпонентный прибор. Бек (Dudley Buck) из Массачусетского технологического института разрабатывал криотрон, интегральный сверхпроводниковый элемент. Достигая различной степени функциональных возможностей, ни одна из этих идей не привела к решению вопроса о создании универсальной системы интеграции.

В 1952 г. Джеф Даммер (G.W.A.Dummer) из британского Telecommunications Research Establishment предположил «Теперь, с появлением транзистора и вообще исследований по полупроводникам, кажется возможным предусмотреть всю электронную начинку в едином твердотельном блоке без соединительных проводов». То есть Даммер выдвинул идею, что всю электронику можно сделать в виде единого блока. При этом говорилось об использовании слоев, работающих в качестве усилителя, сопротивления и т.п. Электрические соединения можно было бы тогда реализовать простым вырезанием площадок в различных слоях [5]. Это было замечательное предложение. Однако Даммер не указал никакого способа, как все это сделать.

В 1956 г. Даммер подписал небольшой контракт с некой британской фирмой на создание подобного устройства. У них ничего не получилось, в частности потому, что они работали с технологией транзистора на *p-n*-переходе и затем пытались связать различные слои. Хотя Даммер потерпел неудачу, он был на правильном пути. Объемное сопротивление самого полупроводника и емкость *p-n*-перехода, создаваемого внутри него, можно было скомбинировать с транзисторами и создать завершенную схему из одного и того же материала.

Заслуга Килби в том, что он взял эту идею и превратил ее в реальность. 12 сентября 1958 г. Джек Килби (Jack Kilby) из Texas Instruments создал схему, на основе кристалла германиевого мезатранзистора *p-n-p*-типа, части которого он химически травил, чтобы получить отдельные транзистор, конденсатор и резистивные элементы. Используя высокопробное золото для формирования электрических соединений, он соединил отдельные элементы в схему генератора. А через неделю он продемонстрировал усилитель. В марте 1959 г. Texas Instruments объявил о концепции «устройства на основе твердого тела» Килби, через год в марте 1960 г. выпустил на этой основе первое коммерческое устройство – триггер «Тип 502» по цене 450\$. Однако реализованная технология имела недостатки и не являлась практической технологией, пригодной для производства. В технологии Килби отдельные дискретные полупроводниковые элементы коммутировались тонкой золотой проволокой. При всем очевидном прогрессе эта технология не позволяла оптимизировать параметры элементов, выход годных составлял около 10%, производство было неэкономичным, отсутствовала возможность доработки.

В октябре 1961 г. Texas Instruments ввел 51 серию DCTL «монокристаллической схемы», изготовленную с использованием планарной технологии с напылением металла.

Изобретение планарной технологии произошло в 1959 г. В поисках решения проблемы надежности мезатранзисторов физик из Fairchild Жан Эрни повторно обратился к идее, которую он сформулировал в декабре 1957 г. Это была идея новой технологии, в которой окисную пленку оставляют в нужном месте на кремниевой пластине, чтобы предохранить чувствительные р-п-переходы под ней. Тогда, в 1957 г. компания Фэрчайлд, сосредоточившаяся на получении ее первых транзисторов, не уделяла внимания этой технологии. В новой планарной технологии диоксид кремния успешно защищал все переходы и спаи. После оформления патента на новую технологию в январе 1959 г. Эрни продемонстрировал работающий планарный транзистор в марте 1959 г. Окисная пленка, как и предсказал Эрни, успешно выполняла свою защитную функцию.

Приборы, изготовленные по планарной технологии, имели лучшие электрические характеристики, значительно снизились токи утечки, которые очень важны в проектировании компьютерной логики. И можно было все узлы интегральной схемы изготавливать с одной стороны пластины. В апреле 1960 г. компания Fairchild запустила в коммерческое производство планарный транзистор 2N1613 и лицензировала права на эту технологию. Производство интегральных схем, содержащих миллиард транзисторов в наше время, основано на прорывной идее Эрни. Один историк назвал это «самым важным новшеством в истории полупроводниковой промышленности».

В то время как планарная технология позволила кремниевым транзисторам удовлетворить строгим требованиям авиакосмической промышленности, продавцы полупроводниковых приборов продолжали сталкиваться с новыми механизмами отказов приборов с каждым большим шагом в прогрессе технологии. Существенные проблемы в 1960-ых – это "пурпурная чума" в золотой проволоке для термокомпрессионной сварки, электромиграция алюминиевых соединений и стабильность МОП-транзисторов. "Пурпурная чума" – образование интерметаллидов золота и алюминия, связано с тем, что в микросхемах Килби выводы к полоскам алюминиевых межсоединений делаются термокомпрессионной приваркой золотых проволочек. Электромиграция – это явление переноса вещества за счет постепенного дрейфа ионов в проводнике, возникающее благодаря обмену количеством движения при столкновениях между проводящими носителями и атомной решеткой. Этот эффект играет существенную роль в тех прикладных областях, где используются прямые токи большой плотности, в частности, в микроэлектронике, где может привести к частичному или полному разрушению проводника.

Еще за месяц до того, как фирма Texas Instruments сообщила об изобретении Джека Килби, Роберт Нойс, соучредитель Fairchild Semiconductor, набросал в лабораторном журнале собственную интегральную схему. «Я ленив, – говорил Нойс впоследствии, – интегральную схему я придумал потому, что видел, как люди трудились в поте лица, припаявая проволочки к этим штукам, и мне показалось, что это ужасное расточительство».

Его работающая модель, изготовленная в 1959 г., обладала рядом важных преимуществ по сравнению со схемой Килби. Во-первых, он воспользовался в ней изобретением, которое сделал Курт Леховец из фирмы Sprague Electric Company, что находилась в шт. Массачусетс, в 5000 км от Пало-Альто. В апреле того же года, через несколько месяцев после того, как весть об изобретении Килби облетела весь мир, Леховец запатентовал идею своей схемы. Компоненты его схемы разделялись р-п-переходами, через которые ток мог проходить только в одном направлении. В устройстве Нойса р-п-переходы сочетались с планарным процессом Херни и покрытием из двуокиси кремния. Чтобы добавить проводящие соединения между элементами, в выгравированные на поверхности покрытия крошечные бороздки напылялись частички металла. Такой метод был гораздо эффективнее трудоемкой, кропотливой процедуры впаивания тончайших проводничков, которое проводилось под микроскопом вручную.

Интегральные схемы (ИС) Нойса были настолько практичнее схем Килби, что даже фирма Texas Instruments приняла их на вооружение. В 1962 г. обе фирмы начали массовое производство ИС, вскоре прозванных «чипами». В 60-е годы, по мере уменьшения размеров отдельных компонентов на кристалле количество их на одном чипе возрастало с головокружительной быстротой, примерно удваиваясь, каждый год. Например, в 1964 г. на кристалле размером 7 квадратных сантиметров умещалось 10 транзисторов и других компонентов, а к 1970 г. в кристалле того же размера содержалось уже не менее 100 элементов приблизительно при той же стоимости ИС. Изо-

бретение ИС в 2000 году было отмечено Нобелевской премией, которую получил Килби. К сожалению, Р. Нойс до этого дня не дожил.

В 1960 г. в мир вошла структура метал-окисел-полупроводник (МОП) и первые транзисторы на ее основе. В 1959 г. Эталл (M. M. Atalla) и Хан (Dawon Kahng) из Bell Labs получили первый полевой транзистор с изолированным затвором (полевой транзистор), который так долго ожидали Лилиенфельд, Хейль, Шокли и другие ученые, преодолевая поверхностные состояния, которые не позволяли электрическому полю проникать в полупроводник. Исследуя термически окисленную поверхность кремния, Эталл и Хан обнаружили, что число поверхностных состояний на границе раздела между кремнием и его диоксидом может быть заметно уменьшено в многослойной структуре, состоящей из металла, окисла и полупроводника (кремния). Поскольку этот прибор был достаточно медленным и малопригодным для переключателей в телефонных системах, то его производство не расширялось. Но в записке от 1961 г. Хан указал на его простоту изготовления и возможность применения в интегральных схемах.

Но исследователи из Fairchild и из RCA признали эти преимущества МОП-транзистора и в 1960 г. Карл Цайнингер (Karl Zaininger) и Чарльз Мюллер (Charles Meuller) создали МОП-транзистор в RCA, а Саа (C.T. Sah) из Fairchild построил управляемый МОП-тетрод. Хейман (Fred Heiman) и Хофштейн (Steven Hofstein) создали в RCA в 1962 г. экспериментальную ИС с 16 транзисторами.

В 1960 г. появляется на свет эпитаксиальная технология – технология осаждения эпитаксиального слоя, что значительно увеличивает производительность транзисторов. Разработка тонкопленочной технологии выращивания кристаллов приводит к созданию транзисторам с высокими скоростями переключения.

Еще в 1951 Тил и Кристенсен в Bell Labs разработали технологию осаждения эпитаксиального слоя, для выращивания тонкого слоя материала на толстой прочной подложке, который продолжает и повторяет основную кристаллическую структуру. В СССР в 1957 г. Шефтель, Кокориш и Красилов описали подобную работу на германии и кремнии.

В 1960 г. по настоянию Иена Росса (Ian Ross) команда Bell Labs во главе с Тойрером (Henry Theurer) использовала химическое осаждение из паровой фазы, чтобы наростить тонкую эпитаксиальную пленку кремния между подложкой и коллектором транзистора. Эта технология увеличивала на порядок напряжение пробоя транзистора и резко увеличивала его скорость переключения – две важных характеристики для проектирования ИС. Добавленная стоимость производства из-за дополнительной технологической операции была более чем возмещена улучшением рабочих характеристик. Технология была быстро перенесена в Western Electric и использовалась в производстве кремниевых транзисторов для электронных телефонных переключателей в Bell System.

Термин интегральная схема, интегральная электроника (ИЭ) отражает идею интеграции элементов. Позже за этим направлением в электронике прочно закрепилось название микроэлектроника, который отражает идею микроминиатюризации. Интегральные транзисторы стали основными изделиями микроэлектроники. Сначала успешно развивались биполярные транзисторы. Наряду с традиционными структурами для дискретной полупроводниковой электроники в семействе интегральных транзисторов появились уникальные. Речь идет о многоэмиттерных и многоколлекторных транзисторах, транзисторах с барьером Шоттки и др. Именно с их помощью удалось создать эффективные схемные решения.

В последние годы интерес проявлен к униполярным транзисторам. Технология их изготовления более простая. К этому типу относятся n-МОП и p-МОП транзисторы, имеющие структуру. Особенно перспективны *комплементарные* или взаимодополняющие транзисторы (КМОП). В этих структурах используются одновременно два транзистора с каналами проводимости p- и n-типов, они отличаются высокой экономичностью и надежностью.

6.2. Освоение промышленного производства интегральной радиотехники

Начиная с 1961 г. на коммерческий рынок выходит узкоспециализированная полупроводниковая испытательная аппаратура, которая необходима для оперативного контроля параметров выпускаемых полупроводниковых приборов в производстве с высокой пропускной

способностью. Компании Fairchild, Signetics, Texas Instruments и другие начали продавать свою специализированную испытательную аппаратуру для полупроводников их клиентам и конкурентам.

С 1962 г. начинаются первое промышленное применение ИС – в космических системах и компьютерах. Размер, вес, и уменьшенное потребление энергии интегральных схем по сравнению с разработками на дискретных транзисторах оправдывают их более высокую стоимость в военных и космических системах. Первые интегральные схемы были относительно медленны, замещали только небольшое количество узлов и имели более высокую цену. Космические и военные системы были среди немногих приложений, где низкое потребление энергии и небольшой размер перевешивали эти недостатки.

В 1963 г. в трудах конференции Саа и Вэнласс из Лаборатории исследований и разработки компании Fairchild показали, что логические схемы, комбинирующие МОП-транзисторы с каналом n-типа и каналом p-типа в комплементарно симметричную цепь, обеспечивали в режиме хранения информации потребляемую мощность, близкую к нулевой. Вэнласс запатентовал это новшество, которое сегодня называют комплементарной МОП-структурой.

Первые массовые приложения для ИС на комплементарных МОП-транзисторах появились в работающих от батареек потребительских товарах, таких как цифровые часы.

В это трудно поверить, но, как это обычно бывает, нечто новое, революционное, выходящее за рамки традиционных представлений, всегда встречается в штыки сторонниками привычных подходов и решений. Это вполне согласуется и с теорией научной методологии, рассмотренной нами в первой главе. Так и идеи миниатюризации электроники поначалу активно критиковались.

Тогда не было очевидно, что концепция монолитного полупроводника окажется более продуктивной, чем другие идеи. Мур, Нойс, Килби и другие в течение последующих пяти лет устраивали технические демонстрации на специализированных конференциях, обсуждая и доказывая достоинства различных систем миниатюризации.

Имелось три главных возражения. Например, считалось, что практический выход пригодных изделий будет столь низким, что новая технология никогда не будет выгодной. Надо помнить, что в то время менее 10% всех изготавливаемых транзисторов работали должным образом.

Другая группа утверждала, что для простейших электронных элементов используются неподходящие материалы (полупроводники), поскольку лучшие резисторы и конденсаторы делались тогда отнюдь не из полупроводников. Кроме того, истинные «транзисторщики» не хотели видеть на микросхеме свои элегантные устройства вперемешку с остальной «дребеденью». Эти сомнения было трудно оспаривать, так как по сути своей они были обоснованными.

Наконец, многие сотрудники больших компаний, полагали, что если полупроводниковая технология окажется успешной, то проектировщики схем во всем мире останутся без работы. В действительности, конечно, занятость проектировщиков только возрастала с течением времени, но их работа стала совсем другой, чем в эпоху транзисторов.

Ситуация в корне изменилась благодаря двум приоритетным военным программам 1960-х годов – подготовки полета космического корабля «Аполлон» на Луну и разработки ракеты «Минитмен». Использование интегральных схем в этих программах сослужило хорошую службу для всеобщего признания интегральной электроники.

В 1964 г. несколько предприимчивых компаний стали использовать интегральные схемы в коммерческих изделиях. Рабочая группа Texas Instruments разработала первый микрокалькулятор. Digital Equipment Corporation также была в числе первых потребителей интегральных схем, и к концу 60-х большинство инженеров признали их право на существование и к разработке интегральных схем подключились сотни, а затем и тысячи лучших инженеров мира.

Успехи интегральной электроники, достигнутые в последующие 40 лет, значительно превзошли все, что было достигнуто ранее, на протяжении 400 лет, прошедших после того, как Вильям Гильберт впервые употребил слово "электричество".

Благодаря работе сотен тысяч лучших инженеров мира, были найдены не только новые применения интегральных схем, но были значительно улучшены и методы их изготовления. Были предложены новые производственные процессы, разработаны более эффективные и надежные

транзисторы, созданы сложные технологии компьютерного проектирования интегральных схем. Прогресс в этой области был весьма быстрым.

Среди прочих достижений можно выделить ряд важных разработок. Корпус DIP был изобретён компанией Fairchild Semiconductor в 1965 году. Его появление позволило увеличить плотность монтажа по сравнению с применявшимися ранее круглыми корпусами. Корпус хорошо подходит для автоматизированной сборки. Однако, размеры корпуса оставались относительно большими по сравнению с размерами полупроводникового кристалла. Корпуса DIP широко использовались в 1970-х и 1980-х годах.

В июле 1968 г. Нойс и его коллега Мур основали небольшую фирму, ставшую впоследствии корпорацией INTEL, с головным офисом, называемым сейчас «Robert Noyce Building» в городе Санта-Клара («Силиконовая долина» в штате Калифорния). Через совсем короткое время к ним присоединился сослуживец по компании Шокли инженер-химик венгерского происхождения А. Гроув. Для составленного первого бизнес-плана оказалось достаточно всего лишь одной страницы формата А4. Спустя два года они создали Intel 1103 – первую запоминающую микросхему DRAM, производимую в коммерческих масштабах. DRAM (dynamic random access memory) – тип энергозависимой полупроводниковой памяти с произвольным доступом. RAM – также запоминающее устройство, наиболее широко используемое в качестве ОЗУ современных компьютеров. Как запоминающее устройство, DRAM-память представляет собой модуль различных конструктивов, состоящий из электрической платы, на которой расположены микросхемы памяти и разъём, необходимый для подключения модуля к материнской плате.

Годом позже после образования INTEL, в 1969 г., их бывшие сотрудники по работе в компании Шокли во главе с Дж. Сандерсом основали конкурирующую компанию AMD (Advanced Micro Devices) со штаб-квартирой в городе Саннивел (также в «Силиконовой долине»), ставшую в США второй по значимости в разработке и производстве микроэлектронных изделий. Сандерс стал в ней бессменным ответственным руководителем и исполнительным директором.

В 1968 г. фирма Burroughs выпустила первый компьютер на интегральных схемах, а в 1970 г. фирма Intel начала продавать интегральные схемы памяти. В 1971 г. был сделан ещё один важный шаг на пути к персональному компьютеру: фирма Intel выпустила интегральную схему, аналогичную по своим функциям процессору большой ЭВМ. Так появился первый микропроцессор Intel-4004. Уже через год был выпущен процессор Intel-8008, который работал в два раза быстрее своего предшественника.

В 1965 году, через шесть лет после изобретения интегральной схемы, Мур сделал эмпирическое наблюдение и высказал предположение, что число транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые 24 месяца. Представив в виде графика рост производительности запоминающих микросхем, он обнаружил закономерность: новые модели микросхем разрабатывались спустя более или менее одинаковые периоды (18—24 мес.) после появления их предшественников, а ёмкость их при этом возрастала каждый раз примерно вдвое. Это наблюдение получило название закон Мура.

Если первые простейшие чипы состояли из десятка элементов, то к 1970 г. микросхемы включали до 10 тысяч элементов, а сегодня – до ста миллионов. Этот прогресс сопровождался быстрым уменьшением стоимости электронных устройств. В 1958 г. один транзистор стоил около \$10. Сегодня приблизительно за ту же цену можно купить микросхему с более чем ста миллионами транзисторов. Цена будет почти наверняка уменьшаться и в будущем. Это уменьшение стоимости в сто миллионов раз значительно расширило область применения электроники.

Сегодня мощный персональный компьютер стоит менее \$1000. И он гораздо более эффективен, чем миллион 10-долларовых калькуляторов образца 1960-х годов.

С увеличением числа транзисторов в одной микросхеме уже стало не обойтись без автоматизация проектирования электронных приборов. Созданные человеком микросхемы и компьютеры стали использовать для автоматизации проектирования новых микросхем и компьютеров. Эту технологию называли CAD (Computer-Aided Design) или EDA (Electronic Design Automation). EDA – комплекс программных средств для облегчения разработки электронных устройств, создания микросхем и печатных плат. Комплекс позволяет создать принципиальную электрическую схему проектируемого устройства с помощью графического интерфейса, создавать и модифици-

ровать базу радиоэлектронных компонентов, проверять целостность сигналов на ней. Введённая схема непосредственно или через промежуточный файл связей («netlist») может быть преобразована в заготовку проектируемой печатной платы, с различной степенью автоматизации. Современные программные пакеты позволяют выполнить автоматическую расстановку элементов, и автоматически развести дорожки на чертеже многослойной печатной платы, соединяя тем самым выводы радиоэлектронных компонентов в соответствии с принципиальной схемой. Системы автоматизации проектирования электроники могут иметь возможность моделирования разрабатываемого устройства и исследования его работы до того, как оно будет воплощено в аппаратуру. Примеры программ EDA: P-CAD; OrCAD; AVR Studio; Altium Designer.

6.3. Развитие советской микроэлектроники, создание НИИ, научных центров и заводов полупроводниковых приборов.

На развитие советской микроэлектроники в 1960–70-е годы сильно влияла деятельность КОКОМ. Все попытки Советского Союза получить официальный доступ к новейшим технологиям производства электронно-вычислительной техники оканчивалась безрезультатно – ни одно государство не отваживалась нарушать запрет КОКОМ.

В СССР электронная промышленность выделяется в самостоятельную отрасль (Госкомитет по электронной технике – ГКЭТ, преобразованный затем в Минэлектронпром – МЭП) во главе с министром Александром Ивановичем Шокиным.

В 1959 году группа молодых разработчиков КБ Рижского завода полупроводниковых приборов (Карнов, Осокин, Пахомов) создала образцы германиевых ИС – логические элементы «2 ИЛИ-НЕ». К 1963 году была разработана первая технологическая линейка для изготовления бескорпусных ИС «Р12-2». Три-четыре таких ИС помещали в металлический модуль и заливали компаундом. В середине 60-х годов их выпуск достиг 300 тыс. штук в год.

В том же 1959 году работы по созданию германиевых ИС начались и в НИИ-35 (НИИ «Пульсар», Москва). В начале 1961 года в НИИ-35 был организован отдел ИС, который возглавил Б.В.Малин. Однако германий для ИС оказался не перспективен. Это быстро поняли и в Texas Instruments, и в НИИ-35 и перешли на планарный кремний. В августе 1961 г. группу молодых специалистов НИИ-35 (Б.В.Малин, В.А.Стружинский и А.Ф.Трутко) направили на стажировку в США для изучения планарной технологии. Впоследствии Борис Владимирович Малин стал одним из первых специалистов в микроэлектронике и создателем первой серии отечественных ИС.

В отечественной производственной практике освоение планарной технологии практически было начато только в 1962 году с нулевого уровня. Существенным толчком к развитию работ явилось изобретение кремниевых интегральных схем и их производство американцами для использования в системе наведения ракеты «Минитмен».

Действовали концепции повторения и копирования американского технологического опыта – методы так называемой “обратной инженерии” МЭП. Образцы-прототипы и производственные образцы кремниевых интегральных схем для воспроизводства были получены из США, и их копирование было строго регламентировано приказами МЭП. Концепция копирования жёстко контролировалась министром Шокиным на протяжении более 19 лет вплоть до 1974 года. Лозунг «догнать и перегнать» был больше чем лозунг – руководство к действию. Шокин впервые побывал в США в возрасте 26 лет, почти год возглавлял организацию радиоэлектронных репараций из разгромленной Германии. Как все, был потрясен увиденным там, кого-то это повергло в растерянность, его же реакция была вполне адекватной и абсолютно прагматичной – заимствовать, воспроизводить лучшее без какой-либо рефлексии. Служба изучения зарубежных образцов и документации (в том числе и приобретаемых по спецканалам) была в МЭПе поставлена на высшем уровне.

К счастью, транзисторные разработки американцами фактически не секретились – от кого? В разлухе послевоенного мира никто не стремился и не мог украсть их секреты, не до того –

так по крайней мере они считали. "Труды Института радиоинженеров" (Proceeding IRE), журналы фирмы Bell, книги знаменитой Массачусетской серии, посвященной радарному проекту, стали прекрасными пособиями по воспроизведению американских приборов. С конца 1950-х годов возобновилась практика стажировки специалистов в Штатах, что способствовало появлению у нас планарной технологии, элионики, интегральных схем, полупроводниковых лазеров. Наибольшую технологическую помощь оказывал процесс копирования реальных действующих американских образцов кремниевых интегральных схем. Копирование осуществлялось после разгерметизации и снятия крышки с образца, копирования плоского (планарного) рисунка транзисторов и резисторов в схеме, а также после исследования под микроскопом структуры всех функциональных областей. Результаты копирования выпускались в виде рабочих чертежей и технологической документации.

Второй половине 1963 года в зеленоградском НИИМП уже были получены первые результаты по тонкопленочной технологии. Необходимо было проверить их на реальном изделии и публично продемонстрировать возможности советской микроэлектроники. Решили сделать микроприемник. Вспоминает И.Н.Букреев: «Первая модель – «Микро» – был приемник прямого усиления, а второй, чуть больше по размерам, уже супергетеродинный. У него была очень острая настройка и, так как в СССР радиостанций было тогда на средних и длинных волнах совсем мало, это казалось недостатком. Но когда я в 1964 году привез этот приемник в США на съезд радиоинженеров, он произвел там мировую сенсацию! Статьи в газетах, фотографии: как СССР смог нас обогнать? ... в Нью-Йорке, где было около 30 местных радиостанций, острая настройка нашего приемника пришлась в самый раз. «Микро» продавали потом за валюту также во Франции, Англии, и везде там за ним в 60-е годы очереди стояли. В общем, «Микро» стал первой сенсацией для руководства. Хрущев брал их с собой за границу как сувениры, дарил Г. Насеру, королеве Елизавете...».

Создание первой отечественной кремниевой интегральной схемы было сконцентрировано на разработке и производстве с военной приёмкой серии интегральных кремниевых схем ТС-100 (37 элементов — эквивалент схемотехнической сложности триггера, аналога американских ИС серии SN-51 фирмы Texas Instruments). Работы проводились НИИ-35 (директор Трутко) и Фрязинским заводом (директор Колмогоров) по оборонному заказу для использования в автономном высотомере системы наведения баллистической ракеты.

Разработка включала шесть типовых интегральных кремниевых планарных схем серии ТС-100 и с организацией опытного производства заняла в НИИ-35 три года (с 1962 по 1965 год). Ещё два года ушло на освоение заводского производства с военной приёмкой во Фрязино (1967 год). Анализ внедрения цикла планарной технологии (свыше 300 технологических операций) в отечественной практике показал, что эту критическую технологию пришлось осваивать с нулевого уровня и практически самостоятельно, без помощи извне, в том числе, и по технологическому оборудованию. Над решением этой проблемы работал коллектив в 250 человек научно-технологического отдела НИИ-35 и опытного цеха, специально созданного при отделе. Одновременно отдел служил полигоном для обучения специалистов многих предприятий МЭП, осваивавших эту технологию. Например, специалисты полупроводникового завода 2-го Главного управления МЭП в Воронеже (директор Колесников, ведущий — Никишин), обучались именно в этом отделе.

Основное внимание при разработке планарной технологии было уделено производственному освоению техники промышленной фотолитографии с высоким оптическим разрешением, вплоть до 1000–2000 линий на миллиметр. Эти работы велись в тесном взаимодействии со специалистами-оптиками из ЛИТМО (Капустина) и ГОИ (Ленинград).

Большую роль сыграли также разработки отдела по автоматизации планарной технологии и конструированию специального технологического оборудования (ведущий конструктор Захаров). Разрабатывались автоматизированные агрегаты пооперационной обработки кремниевых технологических пластин (отмывка, нанесение фоторезиста, конвейерное окисление и т.п.) на основе использования пневмоавтоматики и пневмоники.

В 1964 году научно-технологический отдел НИИ-35 по разработке интегральных схем посетил Председатель ВПК Смирнов. После этого визита отдел получил японское научное оборудование, которое было использовано в перспективных разработках.

Концепция копирования относилась не только к разработкам микроэлектроники, но и к созданию на её основе компьютерной техники, например, при воспроизводстве компьютеров серии IBM-360 – (отечественная серия “РЯД 1-2”). В середине 1960-х годов в СССР в области вычислительной техники выявился ряд проблем, а именно: общее количество ЭВМ было явно недостаточным; производились десятки различных несовместимых друг с другом моделей ЭВМ, что затрудняло решение крупных вычислительных и организационных задач; для осуществления проектов автоматизированных систем управления была крайне желательна унификация компьютерных средств; ориентация советских ЭВМ того времени исключительно на численные расчёты и отчасти на управление оборудованием, а также ориентация вычислительной техники на специалистов в области математики и физики; значительным было отставание в области системного программирования: в то время в СССР всё ещё нормой были работа без операционной системы и программирование непосредственно в машинных кодах (даже без ассемблера); бедность периферийного оборудования.

Назревала необходимость «большого скачка» – перехода к массовому производству унифицированных ЭВМ, оснащённых большим количеством стандартизированного программного обеспечения и периферийного оборудования. Для решения этой задачи в 1966 году в народнохозяйственном плане появилось задание министерства радиопромышленности (МРП) разработать аванпроект по ОКР «Ряд», сформулированное начальником Главного управления по вычислительной технике МРП М.К. Сулимом. Специально для этого проекта был создан Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники (НИЦЭВТ). Значительная часть работы НИЦЭВТа состояла в клонировании оригинального программного обеспечения System/360, множество сотрудников были заняты исследованием дизассемблированного машинного кода оригинального компьютера и его адаптацией. В ЕС ЭВМ скопирована была только архитектура системы, аппаратная же реализация была создана заново. На надёжность и эксплуатационные характеристики этой серии отрицательно влияло низкое качество советских компонентов. В результате возникла ЕС ЭВМ (Единая система электронных вычислительных машин) – серия компьютеров. Аналогия серий System/360 и System/370 фирмы IBM, выпускавшихся в США с 1964 года. Программно и аппаратно (аппаратно – только на уровне интерфейса внешних устройств) совместимы со своими американскими прообразами. В ЕС ЭВМ скопирована была только архитектура системы, аппаратная же реализация была создана заново. На надёжность и эксплуатационные характеристики этой серии отрицательно влияло низкое качество советских компонентов.

Для изготовления, в том числе воспроизводства и повторения, транзисторов и микросхем нужны заводы и технология. Конструкцию можно заимствовать у американцев, но материалы и технология всегда свои, поэтому разработка и даже просто воспроизведение микросхем требуют развития материаловедения, аналитики, инструментального хозяйства, спецоборудования, автоматизации, организации производства.

Для ведущей мировой державы, каким был СССР, масштабы производства ИС были явно недостаточны. 8 августа 1962 года было подписано Постановление ЦК КПСС и СМ СССР о создании Научного центра микроэлектроники в подмосковном городе Крюкове. В соответствии с ним в состав Центра вошли вновь созданные НИИ теоретических основ микроэлектроники, НИИ микросхемотехники, НИИ технологии микроэлектроники, НИИ машиностроения, НИИ специальных материалов и три опытных завода при этих институтах. Началось интенсивное строительство Центра и города со сложной инфраструктурой, обслуживающей Центр. Сегодня этот город носит название Зеленоград, ныне ставший районом Москвы и являющийся в некоем отношении аналогом Кремниевой долины (США).

Научный Центр должен был охватывать все аспекты микроэлектроники, весь цикл «исследование – производство». Постановление было документом де-юре. Де-факто все сложилось по-другому, более масштабно. И это только благодаря усилиям Министра электронной промышленности Александра Ивановича Шокина.

В 1962 году был введен в строй НИИ микроприборов (директор Букреев И. Н.) с опытным заводом «Компонент» и институт по разработке специального технологического оборудования – НИИ точного машиностроения (директор Иванов Е. Х.) с заводом электронного машиностроения «Элион». В 1963 году был организован НИИ точной технологии (директор Сергеев В. С.), которому через некоторое время был придан завод «Ангстрем», НИИ материаловедения (директор Малинин А. Ю.) с заводом «Элма». Год спустя вошел в строй НИИ молекулярной электроники (и. о. директора Гуреев И. А.) с заводом «Микрон». Одновременно было организовано Центральное бюро применения интегральных схем (ЦБПИМС). Поисковыми исследованиями должен был заниматься НИИ физических проблем (директор Лукин Ф. В.). Было решено готовить кадры на месте, в зоне Научного центра. В 1965 году был образован институт электронной техники (МИЭТ), которому был придан собственный опытный завод.

А пока кадры подрастали, целые коллективы воспитывались в Москве. Так практически коллектив будущего НИИ МЭ воспитывался в отделе Малина Б. В. в НИИ «Пульсар». К этому времени в НИИ «Пульсар» было развито не только полупроводниковое производство, но и реально разрабатывались первые ИС. В 1965 году НИИ МЭ возглавил Камиль Ахметович Валиев, ныне академик, директор физико-технологического института РАН. На основе технологии, близкой к технологии производства планарных транзисторов «Плоскость», коллективом НИИ МЭ под руководством К. А. Валиева уже в 1966 году были разработаны ИС типов «Иртыш», «Микроватт», «Логика», диодно-транзисторные логические схемы. К концу этого года их было выпущено около 100 тысяч штук.

Структура предприятий Научного центра менялась в соответствии с задачами промышленности. Со временем на базе НИИ микроприборов и завода «Компонент» было создано научно-производственное объединение «Элас», тесно связанное с космической отраслью.

С середины 60-х по середину 70-х годов XX века в Томске возникает и интенсивно развивается исследование полупроводников и разработка полупроводниковых приборов. В январе 1964 г. в Томске был открыт НИИ полупроводниковых приборов (НИИПП) с заводом при нем. Первым директором и инициатором открытия этого НИИ был профессор физического факультета ТГУ Виктор Алексеевич Преснов. Большой вклад в исследование арсенида галлия и диодов Ганна из этого перспективного материала внесли учёные Томского государственного университета (ТГУ) и Сибирского физико-технического института (СФТИ) при ТГУ, Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

В ТГУ и в ТУСУР открываются новые специальности, призванные удовлетворить потребность в кадрах формирующейся электронной промышленности.

В 1968 г. работы по сложным полупроводникам A^3B^5 были начаты в Сибирском физико-техническом институте при ТГУ. Некоторые из этих работ были далее реализованы в промышленности, в частности в НИИ полупроводниковых приборов, где и по настоящее время выпускаются оптоэлектронные изделия.

Признанием большого вклада томских учёных являются периодически проводимые в Томске конференции по арсениду галлия и полупроводникам состава A^3B^5 .

6.4. Создание микропроцессоров и микроконтроллеров, микроминиатюризация, скачок в развитии технологии производства интегральных схем

Особое значение для массового производства микросхем представляет метод проектирования микросхем, разработанный Деннардом из фирмы IBM. В 1973 г. Деннард и его коллеги показали, что размеры транзистора можно уменьшать без ухудшения его ВАХ (вольт-амперных характеристик). Этот метод проектирования получил название закон масштабирования.

Развитие серийного производства интегральных микросхем шло ступенями:

- 1) 1960 – 1969 гг. – интегральные схемы малой степени интеграции, 10^2 транзисторов на кристалле размером 0,25 x 0,5 мм (МИС).
- 2) 1969 – 1975 гг. – интегральные схемы средней степени интеграций, 10^3 транзисторов на кристалле (СИС).

- 3) 1975 – 1980гг. – интегральные схемы с большой степенью интеграции, 10^4 транзисторов на кристалле (БИС).
- 4) 1980 – 1985гг. – интегральные микросхемы со сверхбольшой степенью интеграции, 10^5 транзисторов на кристалле (СБИС).
- 5) С 1985г. – интегральные микросхемы с ультрабольшой степенью интеграции, 10^7 и более транзисторов на кристалле (УБИС).

Переход от МИС до УБИС происходил на протяжении четверти века. В качестве параметра количественно иллюстрирующего этот процесс используют ежегодное изменение числа элементов размещаемых на одном кристалле, что соответствует степени интеграции. По закону Мура число элементов на одной ИС каждые три года возрастает в 4 раза. Наиболее популярны и прибыльны оказались логические кристаллы высокой плотности – микропроцессоры фирмы Intel и Motorola.

В 1981– 1982 годах прогресс интегральных микросхем СБИС стимулировался наличием технологии литографии (электронно-лучевая, рентгеновская и на глубоком ультрафиолете от эксимерного лазера) и наличием производственного оборудования. Уже в 1983 г., как отметил Мур (на международной конференции), ввиду образования излишних производственных мощностей, как в США так и в Азии, прогресс в развитии микроэлектроники стал определяться только ситуацией на рынке. Так уже в 1985 – 1987 годах 80% всех ДЗУПВ в США поставляют уже Япония, так как им удалось усовершенствовать технологию и снизить цены.

В 1971 г. японская фирма BASICOM обратилась в INTEL с техническим заданием на разработку 12 микросхем. В ответ было предложено объединить их в одну универсальную управляемую сборку. Так появился процессор Intel 4004, спроектированный по МОП технологии 10 мкм в кристалле размерами 3,18x1,59 мм и сопоставимый по производительности с первой ламповой ЭВМ «ENIAC» разработки 1946 г.. В 1972 г. заказчик на основе процессора Intel 4004 создал «Basicom calculator» — вычислительный калькулятор, проложивший путь к появлению массового персонального компьютера. Процессор Intel 4004 встроили также в бортовую аппаратуру расчета траектории полета космического зонда «Pioneer-10».

Процессор Intel 8080 стал первым устройством, обеспечивающим видеоигры. В 1975 г. в обращение поступил самый первый и успешный бытовой персональный компьютер (ПК) «Altair 8800», сконструированный на таком процессоре.

Процессор Intel 8086 послужил основой для разработки портативного изделия. По заданию NASA американская компания GRID Systems разработала в 1979 г. первый ноутбук (НБ) «GRID Compass 1100» с цветным электролюминесцентным экраном.

В августе 1981 г. модуль Intel 8088 – выдающийся образец техники для того времени — американской компанией IBM был использован в центральном процессоре компьютера IBM PC5150 – прародителя современных ПК. Процессор Intel 80286 стал первым преемником в запуске программ предшественников. Представленный в октябре 1990 г. Intel 80386SL с числом элементов 855 000 по технологии 1000 нм отличился малым энергопотреблением. Его первым рекомендовали для НБ широкого применения.

14-я, по порядку качественных шагов, нанотехнологическая инициатива – это технология 45 нм. Ранее в 13-ти предыдущих поколениях, в том числе и трех последних (130, 90, 65 нм), разработчикам кристаллов (ядер) удавалось находить оптимальные решения по оптимизации токов утечки, энергопотребления и тепловыделения при одновременном повышении быстродействия. Вместе с тем в транзисторах по технологии 65 нм толщина диэлектрической прослойки из оксида кремния между затвором и каналом равна всего пяти атомным слоям кремния, т. е. 1,2 нм. Дальнейшее ее истончение не позволяет реализовать технологию 45 нм.

Далее специалисты INTEL впервые посягнули на, казалось бы, незыблемые устои технологии: предложили заменить диоксид кремния новым изоляционным материалом. Выбор пал на гафний – редкоземельный элемент №72 в таблице Д. И. Менделеева, открытый в 1923 г. Сам гафний, будучи металлом, проводит электрический ток, а хорошими изоляционными свойствами обладает окисел гафния HfO_2 . Он превосходит окисел кремния по качественным характеристикам примерно в 10 раз. Новый материал с высокой диэлектрической проницаемостью K условно обозначают «high K ». Толщину прослойки избрали равной 1–3 нм. Получают ее атомарным на-

пылением (слоями в один атом). Для совместимости с ней понадобилось заменить и материал самого затвора. Подходящими оказались силициды – соединения кремния с никелем (NiSi) и другими металлами, которые обозначают «metal gate». Гордон Мур определил новые решения как «наиболее серьезные изменения в транзисторной технологии за последние 40 лет».

Следует отметить, что к началу текущего столетия наряду с разработкой INTEL микропроцессоров с очень высокими характеристиками подоспел и MICROSOFT с доступным программированием, а на востоке взошло «китайское экономическое чудо» – малозатратное производство. В результате пользователи получили доступные по цене и довольно простые в эксплуатации устройства, по уровню совершенства значительно опережающие многие привычные приборы во всех сферах жизни. Некоторые популяризаторы науки и техники полагают, что если бы в других областях человеческой деятельности развитие технологий соответствовало темпам совершенствования микропроцессоров, то сейчас по цене менее одного цента продавали бы легковые автомобили, билеты на самолет в любое место планеты, квадратные метры жилой площади и др.

В начале июня 2008 года «Российская корпорация нанотехнологий» (РОСНАНО) и корпорация INTEL в рамках 12-го Петербургского экономического форума подписали соглашение о намерениях. Они обязались проводить совместные научно-исследовательские работы по разработке и программированию многопроцессорных систем, методов и средств построения устройств по технологии 45 нм и менее, подготовке кадров. Еще в 2004 г. отделение INTEL в России образовало в Московском физико-техническом институте на факультете радиотехники и кибернетики кафедру микропроцессорных технологий. Преподают на ней сотрудники американской корпорации. Ежегодно 10 самых успешных студентов старших курсов обучаются в институте, будучи зачисленными в штат INTEL.

Сотрудничают с INTEL и другие российские ВУЗы. В университетах Томска, Уфы, Челябинска установлены суперкомпьютерные кластеры (СКК — совокупность компьютеров, объединенных волоконно-оптическими линиями связи). Всего в российских ВУЗах в 2007- 2008 гг. построили около 20 супервычислителей. СКК производительностью 10,1 трлн операций/с установлен в компьютерном центре Российской Академии наук (РАН).

Отечественным проектом нанотехнологий в электронике является объединение усилий российских компаний в создании отечественных мультимедийных процессоров. Это программа работ в области цифрового телевидения, которые будут реализовываться ЗАО «Элекард наноДевайсез», ЗАО «МНИТИ» и ОАО «НИИМЭ и Микрон» в рамках проекта РОСНАНО «Мультимедийные многопроцессорные системы на кристалле». Программа начала действовать с момента согласования летом 2010 г. и содержит план мероприятий до 2015 года. Целью программы является координация разработки и вывода в серийное производство новейшего поколения чипов (интегральных схем) для приемников цифрового телевидения по технологиям 90–65 нм. В результате выполнения программы должны появиться чипы для цифровых приемников российской разработки. На основе интегральных схем будет организована отечественная сборка приемной аппаратуры для цифрового телевидения. ЗАО «Элекард наноДевайсез» создана для реализации проекта «Мультимедийные многопроцессорные системы на кристалле». Входит в группу компаний «Элекард», являющуюся ведущим мировым производителем программных и аппаратных решений для цифрового телевидения. Клиентами «Элекарда» являются более 7000 компаний из 63 стран мира. В Томском университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) создан совместный проект ТУСУРа и ЗАО «Элекард Девайсез» по открытию магистерской программы «Мультимедийные многопроцессорные системы на кристалле» на кафедре «Управление инновациями» Института инноватики ТУСУРа.

Появление интегральных микросхем сыграло решающую роль в развитии электроники, положив начало новому, четвертому, этапу микроэлектроники. Микроэлектроника четвертого периода уже схематическая, потому что в составе основных базовых элементов можно выделить элементы эквивалентные дискретным электро-радиоэлементам и каждой интегральной микросхеме соответствует определенная принципиальная электрическая схема, как и для электронных узлов аппаратуры предыдущих поколений. Интегральные микросхемы – это уже микроэлектронные устройства, рассматриваемые как единое изделие, имеющее высокую

плотность расположения элементов эквивалентных элементам обычной схемы. Усложнение, выполняемых микросхемами функций, достигается повышением степени интеграции.

7. XX–XXI ВЕК. ПРОБЛЕМЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ. НАНОЭЛЕКТРОНИКА

7.1 Проблемы микроминиатюризации и качественные изменения в микроэлектронике.

Развитие микроэлектроники продолжается. За 40 лет развития ИС плотность размещения транзисторов на кристалле ежегодно увеличивается примерно на 50%. Это первым заметил Гордон Мур, автор закона Мура и основной разработчик серий микропроцессоров. За четыре десятилетия степень интеграции возросла в 10000 раз! Сегодня разработчики интегральных схем считают, что экспоненциальный рост степени интеграции будет сопровождаться экспоненциальным ростом потребляемой энергии.

Масштабирование элементов транзистора, выход на субмикронные размеры порождает ряд труднорешаемых проблем. Например, металлические токоведущие дорожки могут потерять свойство проводников и превратиться в емкостные и индуктивные элементы. Масштабированные транзисторы уже не просто транзисторы. По мере уменьшения длины каналов МОП транзисторов уменьшается толщина затворного окисла, а значит, и уменьшается пороговое напряжение.

Сегодня для включения/выключения транзистора необходимо приблизительно 1000 электронов. Ожидается, что к 2010 г. эту же операцию смогут выполнять всего 100 электронов. В прогнозе на 2010 г. предполагается появление материалов с большой диэлектрической постоянной. Если этого и не произойдет, то просто в результате дальнейшей миниатюризации можно предсказать уменьшение количества необходимых электронов до десяти к 2010 г. и до одного электрона на транзистор к 2020 г. Это значение, разумеется, является естественным физическим пределом.

Пэт Гелсинджер (Pat Gelsinger), глава технологического подразделения Intel сказал: «Было время, когда Intel и ее коллеги задавались вопросом, удастся ли достичь технологического процесса в 100 нм. Мы это сделали тогда, а сегодня мы видим ясно, что нам удастся преодолеть и 10 нм рубеж. С законом Мура у нас всегда есть расчеты на 10-летнюю перспективу, а что мы будем делать за гранью 10 нм пока точно неизвестно».

В 1965 году Мур впервые представил свой «закон», который вел полупроводниковую индустрию в течение 33 лет с невероятной скоростью. Напомним его постулат: «Через каждые 2 года, число транзисторов удваивается». Так еще в 1971 году номы производства были 10 мкм, в 1978 — 3 мкм, в 1989 — 1 мкм, в 1997 — 0,25 мкм, в 2005 — 65 нм. Впервые трудности начались в эпоху Pentium 4, когда тепловыделение окончательно стало основной проблемой движения вперед.

В 2008 году сам господин Мур признал, что его «закон» уже перестает действовать из-за атомарных ограничений и влияния скорости света. Переход на более тонкие нормы техпроцесса дается компьютерной индустрии все сложнее.

Прогнозируется, что через 10 лет минимальные топологические нормы составят 0,01 мкм. Это прорыв транзисторных структур в субмикронный диапазон. Характеристики элементов таких размеров уже достигают порога фундаментальных ограничений известных физических процессов, протекающих в транзисторе. Что же дальше? Одни специалисты, считая, что традиционные кремниевые структуры уже бесперспективны, ищут решения в хорошо забытых конструкциях (например, транзисторы с проницаемой базой, в которых, как и в вакуумных триодах, используется вольфрамовая сетка, встроенная в объем GaAs, а также транзисторов на горячих электронах), реализуемых на новых материалах с помощью новой технологии. Ряд исследователей разрабатывают нанотранзисторы, на базе которых предположительно будут построены наносхемы.

А часть исследователей развивают принципиально новые идеи создания одноэлектронных транзисторов, работающих по принципу «один обработанный электрон - один бит информации»

и обеспечивающих сверхнизкие значения потребляемой мощности и рабочего напряжения, а также чрезвычайно высокую плотность размещения элементов электронных функциональных схем. При переходе к наномасштабам на первый план выходят квантовые свойства электрона, который может быть представлен волной, описываемой соответствующей волновой функцией. В результате электрон при столкновении с потенциальным барьером (формируемым диэлектриком) преодолевает его (туннелирует), даже если полная энергия электрона меньше потенциальной энергии барьера.

Новые идеи транзисторостроения связывают с появлением наноматериалов, в первую очередь углеродных нанотрубок. Транзисторы на нанотрубках выгодно отличаются меньшими размерами и энергопотреблением.

Процесс изменения в логической цепи состояния "0" или "1" в микроэлектронике, как правило, обеспечивается «переносом» через р-n-переход транзистора порядка 100 тысяч электронов. Для передачи одного бита информации такой подход выглядит несколько расточительным. К тому же, часть из этих сотен тысяч электронов создаст тепловой шум, другая часть, из-за туннельного эффекта, вообще «улетает» через подложку, не выполнив полезной работы. Еще одна часть просто рассеивается в окружающее пространство. Все перечисленные недостатки, как и многие другие, неотъемлемы для современных микроэлектронных устройств.

Ожидается, что при переходе к транзисторной наноэлектронике электрические свойства транзисторных структур существенно улучшатся. В этом случае даже один электрон сможет перенести один бит информации. Но при этом резко возрастают трудности реализации, связанные с проблемой «тирании межсоединений». И процесс обработки и хранения информации может быть основан на использовании волновых свойств электрона и перемещении единичного электрона за счет туннельного эффекта с учетом направления его спина.

Ряд подходов, инициированных возникающими затруднениями, предполагают использование, среди прочего, "квантовых клеточных автоматов" (quantum-cellular automata) и молекулярных переключателей. Многие полагают, что когда будут достигнуты эти нанометровые масштабы, химически созданные структуры заменят сегодняшние рисованные и вытравленные.

Но это не все. Некоторые свойства электрона еще не реализованы в информационных системах. Впереди – пикоэлектроника...

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. А.Ф.Кравченко. История и методология науки и техники .– Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005.– 360 с.
2. Т. Кун. Структура научных революций.– М.: Прогресс, 1977.–176 с.
3. А. Эйнштейн, Л. Инфельд. Эволюция физики. – М., 1965. – 296 с.
3. А.А.Щука. Электроника .– СПб: БХВ–Петербург, 2005 .– 800 с.
4. В. Шокли. Теория электронных полупроводников .– Москва: ИИЛ, 1953 .– 714 с.
5. Электроника: прошлое, настоящее, будущее. – М.: Знание, 1979. - 64 с.: (Новое в жизни, науке, технике. N 5, Серия "Физика")

Дополнительная литература

1. А.Ф.Кравченко. История науки и техники .– Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005.– 435 с.
2. Л.И. Шарыгина. Хронология развития радиоэлектроники. – Томск : ТУСУР, 2009. –197 с.
4. 100 лет радио: Сборник статей / В. Г. Астафуров, Б. Вайсберг, А. В. Нефедов, Б. Брудерманс ; ред. В. В. Мигулина, ред. А. В. Гороховского. – М. : Радио и связь, 1995. – 384 с.
5. М.Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству. Том 1.– Издательство АН СССР, 1947.–848 с.