

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».  
(ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
«Управление инновациями»  
\_\_\_\_\_/А.Ф.Уваров  
(подпись) (ФИО)  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ  
по дисциплине  
Промышленные технологии и инновации

Составлена кафедрой

«Управление инновациями»

Для студентов, обучающихся  
по направлению подготовки 220600.62 «Инноватика»  
по специальности 220601.65 «Управление инновациями»

Форма обучения очная

Составитель  
Доцент, к.ф-м.н.,

\_\_\_\_\_/П.Н.Дробот

Томск 2011 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Практическое занятие № 1 Основные понятия предмета изучения .....	3
Практическое занятие № 2 Приоритетные направления развития техники и технологий ...	6
Практическое занятие № 3 Сопоставление и анализ Приоритетных направлений развития техники и технологий разных лет .....	7
Практическое занятие № 4 Применения и конкретные устройства газотурбинной и парогазовой установок .....	18
Практическое занятие № 5 Инновационные проекты в области энергетики. Альтернативные источники энергии. ....	22
Практическое занятие №6. Атомно-водородная энергетика.....	27
. Практическое занятие №7 Лазерная обработка материалов .....	29
1. Оборудование лазерной обработки. ....	29
2. Оптические системы лазерных установок .....	31
3. Промышленные лазерные технологические установки. ....	35
4. Классификация режимов лазерной обработки материалов.....	36
5. Особенности технологических процессов лазерной обработки. ....	37
Практическое занятие №8. Электронно-лучевая, плазменная и ультразвуковая обработка материалов .....	43
1. Электронно-лучевая обработка материалов. ....	43
2. Плазменная обработка материалов.....	46
3. Ультразвуковая обработка материалов. ....	47
Практическое занятие №9. Новые оптические материалы и их применение. Часть 1. Полупроводниковые материалы .....	50
2. Фотогальванические устройства.....	55
3. Твердотельные фотоприемники.....	58
Практическое занятие №10. Новые оптические материалы и их применение. Часть 2. Диэлектрические и композитные материалы .....	59
1. Оптические модуляторы .....	59
2. Оптические волокна .....	62
3. Волноводы.....	63
4. Оптические системы хранения информации .....	64
5. Дисплеи .....	67
6. Нелинейная оптика.....	68
Библиографический список .....	70
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	<b>72</b>
Приложение 1 Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 .....	72
Приложение 2 Критические технологии федерального уровня 1996 г.....	73
Приложение 3 Приоритетные направления развития науки и техники 2002 года. ....	75
Приложение 4 Перечень критических технологий Российской Федерации 2002 года. ....	76
Приложение 5 Перечень критических технологий Российской Федерации 2006 г.....	77
Приложение 6 Научные приоритеты Российской академии наук .....	78

## **Введение**

Дисциплина «Промышленные технологии и инновации» относится к федеральному компоненту цикла общепрофессиональные дисциплины, к разделу цикла «Технологические основы инновационной деятельности» ГОС ВПО по специальности 220601.65 «Управление инновациями и ГОС ВПО по направлению 220600.62 «Инноватика». В рамках дисциплины должны быть рассмотрены следующие вопросы: Определение понятий. Значение технологических инноваций. Научно-технический прогресс и конкурентоспособность технологий. Классификация технологий: по уровню применения - микро-, макро- и глобальные технологии; по функциональному составу - технологии заготовительного, основного и вспомогательного производства; классификация технологий по отраслям народного хозяйства; классификация по конечному продукту. Физические основы и производственные возможности технологий. Как создаются технологии. Физико-химические основы современных промышленных технологий и материаловедение.

Научные основы выбора материала. Обзор промышленных технологий (по отраслям). Инвариантные технологии инновационных проектов. Организационные технологии проектирования производственных систем. Нормативная база проектирования. Технологи автоматизированного управления объектами и производствами. Локальные системы управления. Компьютеризированное управление технологическим оборудованием. CAD/CAM/CIM - системы. Технологии диагностики, пуска-наладки и испытаний производственных систем. Перспективы и прогнозирование развития промышленных технологий. Предлагаемые практические занятия позволят глубже освоить теоретические и практические вопросы научной методологии, глубоко изучить и понять вопросы истории полупроводниковой электроники и электронной техники и научиться применять полученные знания на практике в профессиональной деятельности для оценки инновационных разработок, в первую очередь в сферах полупроводниковой электроники и электронной техники: степень методологической проработки, высота технического уровня, изобретательский уровень.

Основная цель практических занятий - углубленное изучение проблем, затронутых в лекционном курсе и отработка практических умений и навыков управления технологическими процессами с использованием современного программного обеспечения

### **Практическое занятие № 1 Основные понятия предмета изучения**

План практического занятия 1.

1. Понятие технология.
2. Макротехнологии.
3. Критические технологии.
4. Технологии двойного назначения.
5. Информационные технологии.
6. Региональные технологии.
7. Глобальные технологии.

Рассматриваются два подхода к понятию технологии:

1. Технология представляет собой вид деятельности, обеспечивающий преобразование сырья или ресурсов в конечную продукцию с заранее заданными требованиями.

2. Технология как характеристику деятельности исполнителя и как способ ее организации и воспроизводства.

Приводятся примеры для двух подходов.

Макротехнологии — это совокупность всех технологических процессов по созданию определенного вида продукции с заданными параметрами, т. е. НИОКР, подготовка производства, производство, сбыт, сервисная поддержка и пр.

Анализ мирового рынка показывает: производство наукоемкой продукции обеспечивают всего порядка 50 макротехнологий (макротехнология представляет собой совокупность знаний и производственных возможностей для выпуска на мировой рынок конкретных изделий – самолетов, реакторов, судов, материалов, компьютерных программ и т.п.). Семь наиболее развитых стран, обладая 46 макротехнологиями, держат 80% этого рынка. США ежегодно получают от экспорта наукоемкой продукции около 700 млрд. долл., Германия – 530, Япония – 400.

Исходя из наличия в России огромных мощностей в области машиностроения и металлообработки (включая и предприятия ВПК), сырьевой базы и высококвалифицированных кадров (особенно в сфере науки и образования), а также учитывая геополитические интересы России, можно сформулировать ряд национальных приоритетов России в области макротехнологий. Россия на период до 2025 г. могла бы поставить задачу приоритетного развития по 12-16 макротехнологиям. Причем до 2010 г. основными макротехнологиями могли бы быть 6-7 из них, по которым наш суммарный уровень знаний сегодня приближается к мировому, если не превосходит его (авиация, космос, ядерная энергетика, судостроение, спецметаллургия и энергетическое машиностроение). Если указанные макротехнологии удастся сделать конкурентными, то Россия на рынке наукоемкой продукции способна подняться с 0,3% до 10-12% занимаемой на нем доли, что только за счет экспорта дало бы до 140-180 млрд долларов в год. Ключевыми факторами успеха здесь будут конкурентные качество, цена, соответствующее сервисное обеспечение продукта и услуг. Реализация такого рода политики обеспечит социальный спрос на науку и образование. По 16 макротехнологиям прогноз на перспективу уже сделан.

Таблица 1.1 Прогноз рынка макротехнологий России (в млрд.долл.)

№	ТЕХНОЛОГИЯ	2010	2015
		г.	г.
	Авиационные технологии	18-22	28
	Космические технологии	4	8
	Ядерные технологии	6	10
	Судостроение	4	10
	Автомобилестроение	2	6-8
	Транспортное машиностроение	4	8-12
	Химическое машиностроение	3	8-10
	Спецметаллургия. Спецхимия. Новые материалы	12	14-18
	Технология нефтедобычи и переработки	8	14-22
	Технология газодобычи и транспортировки	7	21-28
	Энергетическое машиностроение	4	12-14

	Технология промышленного оборудования. Станкостроение	3	8-10
	Микро- и радиоэлектронные технологии	4	7-9
	Компьютерные и информационные технологии	4,6	7,8
	Коммуникация, связь	3,8	12
	Биотехнологии	6	10
	Всего	94-98	144-180

(Источник: "Известия", 30 декабря 1997 г.)

Для России сейчас, как никогда, актуальна интеграция в мировой рынок наукоемкой технологии. В стране почти отсутствует платежеспособный спрос на часть наукоемкой продукции, что приводит к застою и старению наиболее передовой технологической базы (авиация, космонавтика, электроника, информатика, связь и т.п.). Согласно прогнозам, объем экспорта по приоритетным макротехнологиям уже в первом десятилетии XXI века позволит в 2-3 раза повысить платежеспособность населения и обеспечить спрос на наукоемкую продукцию на внутреннем рынке. Это послужит стимулом дальнейшего экономического роста. Однако, для достижения этого Россия должна научиться создавать конкурентоспособную на мировом рынке промышленную продукцию.

#### Критические технологии.

С учетом гражданских проблем и развития рыночной экономики к критическим, с другой стороны, следует относить технические проекты и технологии, создание которых может радикально повлиять на улучшение качества жизни населения, состояние здоровья и решения социальных проблем, содействующих стабилизации внутривнутриполитической ситуации, повышению занятости населения, уровня и качества образования, а также системы государственного управления и информированности государственных и муниципальных органов, коммерческих и общественных организаций, предприятий и отдельных граждан.

Пример критических технологий Российской Федерации 2011 г. – в Приложении 1.

Рассматриваются и обсуждаются принципы построения критических технологий России

Технологии двойного назначения.

Технологии двойного назначения - это технологии, которые могут быть использованы при создании как вооружения и военной техники, так и продукции гражданского назначения.

В бывшем СССР на оборонных заводах производились значительные объемы гражданской продукции, например бытовой техники (холодильники, радиоприемники, телевизоры и т. д.). Однако даже в оборонном комплексе технологическое развитие военного и гражданского секторов промышленного производства происходило обособленно друг от друга.

В середине 1990-х гг. элементом технологической политики в военной промышленности стала разработка «двойных технологий», которые рассматриваются как средство коммерциализации и конверсии оборонных производств.

Политика поощрения «двойных технологий» в России концептуально заимствована из американского опыта. Ее особенность заключается в высоком спросе гражданской

промышленности на технологические инновации военной сферы, позволяющие создать уникальные продукты или услуги и получить дополнительную прибыль.

Технологический разрыв между военными и гражданскими отраслями в России очень велик. Политика «двойных технологий» направлена на стимулирование процесса взаимообогащения военной и гражданской промышленности на основе разрушения организационно-административных барьеров между ними. Ожидается, что такое технологическое взаимодействие, с одной стороны, повысит эффективность гражданского сектора промышленности, а с другой — облегчит бремя финансовых расходов государства на создание вооружений.

**Информационные технологии.**

Именно вокруг информационных технологий возникли крупные технологические прорывы последних двух десятилетий двадцатого века в области новых материалов, источников энергии, медицины, производства (в том числе и нанотехнологии). Информационные технологии все шире используются в практике предприятий и организаций (об использовании CALS-технологий в промышленности будет рассказано в следующих лекциях). Информационные технологии дали возможность конкретным предприятиям получать разнообразные положительные эффекты. Их применение обеспечило создание новых знаний, которые позволили по-новому увидеть свой бизнес.

Крупные технологические прорывы последних двух десятилетий XX в. в области новых материалов, источников энергии, медицины, производства (например, нанотехнологии) возникли именно вокруг этого ядра информационных технологий. Современный процесс технологических преобразований расширяется экспоненциально благодаря взаимосвязи между разными технологиями («технологическими полями») на основе общего цифрового языка. С его помощью информация создается, хранится, извлекается, обрабатывается и передается.

**Глобальные технологии.**

Дальнейшему развитию региональных технологий, которые ограничены частью земной, водной и воздушной поверхности планеты, способствуют глобальные технологии, обеспечивающие работу систем связи, мониторинга из космоса состояния поверхности Земли и водных бассейнов и т. д. Космические технологии связаны с выведением в космос различных объектов и обеспечением их работы, исследованием Вселенной и т. д.

## **Практическое занятие № 2 Приоритетные направления развития техники и технологий**

План практического занятия 2.

1. Приоритетные направления развития техники и технологий.
2. Критические технологии.
3. Принципы анализа критических технологий.
4. Трансформация содержания критических технологий федерального уровня с 1996 по 2006 годы.

Под приоритетными направлениями развития науки и техники понимаются основные области исследований и разработок, реализация которых должна обеспечить значительный вклад в социально-экономическое и научно-техническое развитие страны и в достижение за счет этого национальных социально-экономических целей.

Рассматриваются и обсуждаются критические технологии федерального уровня и их трансформация.

На основе литературного обзора выполнена оценка каждой технологии по отношению к лучшим мировым аналогам, ее значимость для создания продукции, конкурентоспособной на внешнем рынке, обеспечения обороноспособности страны, улучшения экологической обстановки и качества жизни. Оценивалось также значение технологии с точки зрения практического использования конечных результатов, ожидаемый срок достижения существенных результатов, стадия жизненного цикла, требующая наибольших усилий для достижения практических результатов и др.

Соотношение критических технологий федерального уровня с лучшими зарубежными аналогами

Технологии, где российские разработки превосходят лучшие зарубежные аналоги.

1. Системы жизнеобеспечения и защиты человека в экстремальных условиях
2. Трубопроводный транспорт угольной суспензии.

Технологии, где российские разработки соответствуют лучшим зарубежным аналогам

1. Системы распознавания и синтеза речи, текста и изображений
2. Системы математического моделирования
3. Лазерные технологии
4. Электронно-ионно-плазменные технологии
5. Технологии ускоренной оценки и комплексного освоения стратегически важного горнорудного (алмазы, золото, платина) и техногенного сырья
6. Композиты
7. Авиационная и космическая техника с использованием новых технических решений, включая нетрадиционные компоновочные схемы
8. Технологии изучения недр, прогнозирования, поиска, разведки запасов полезных ископаемых и урана
9. Технологии разрушения горных пород, проходки горных выработок и бурения нефтяных и газовых скважин
10. Технологии воздействия на нефтегазовые пласты
11. Нетрадиционные технологии добычи и переработки твердых топлив и урана
12. Технологии углубленной переработки нефти, газа и конденсата
13. Атомная энергетика
14. Технологии регенерации отработавшего ядерного топлива, утилизации и захоронения радиоактивных отходов
15. Технологии электронного переноса энергии
16. Водородная энергетика
17. Технологии прогнозирования развития климатических, экосистемных, горно-геологических и ресурсных изменений

Рассматриваются и анализируются критические технологии Российской Федерации (Приложение 1–5)

Практическое занятие № 3 Сопоставление и анализ Приоритетных направлений развития техники и технологий разных лет

### **План практического занятия 3.**

1. Сопоставление Приоритетных направлений развития техники и технологий разных лет.

## 2. Приоритетные направления РАН.

Выполняется сопоставление и анализ Приоритетных направлений развития техники и технологий разных лет (Таблица 3.1).

Таблица 3.1.

Сравнение критических технологий Российской Федерации

Критические технологии федерального уровня 1996	Критические технологии федерального уровня 2002	Критические технологии федерального уровня 2006
<i>Информационно-телекоммуникационные технологии и электроника</i>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Многопроцессорные ЭВМ с параллельной структурой</li> <li>2. Вычислительные системы на базе нейрокомпьютеров, транспьютеров и оптических ЭВМ</li> <li>3. Системы распознавания и синтеза речи, текста и изображений</li> <li>4. Системы искусственного интеллекта и виртуальной реальности</li> <li>5. Информационно-телекоммуникационные системы</li> <li>6. Системы математического моделирования</li> <li>7. Микросистемная техника и микросенсорика</li> <li>8. Сверхбольшие интегральные схемы и наноэлектроника</li> <li>9. Опто- и акустоэлектроника</li> <li>10. Криоэлектроника</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокопроизводительные вычислительные системы</li> <li>2. Компьютерное моделирование</li> <li>3. Искусственный интеллект</li> <li>4. Информационно-телекоммуникационные системы</li> <li>5. Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров</li> <li>6. Распознавание образов и анализ изображений</li> <li>7. Опто-, радио- и акустоэлектроника, оптическая и СВЧ-связь</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Технологии обработки, хранения, передачи и защиты информации</li> <li>2. Технологии производства программного обеспечения</li> <li>3. Технологии распределенных вычислений и систем</li> <li>4. Технологии обработки, хранения, передачи и защиты информации</li> </ol>
<b>Производственные технологии</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Лазерные технологии</li> <li>2. Прецизионные и мехатронные технологии</li> <li>3. Робототехнические системы и микромашины</li> <li>4. Электронно-ионно-плазменные технологии</li> <li>5. Гибкие производственные системы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Быстрое возведение и трансформация жилья</li> <li>2. Мехатронные технологии</li> <li>3. Лазерные и электронно-ионно-плазменные технологии</li> <li>4. Оценка, комплексное освоение месторождений и глубокая переработка стратегически важного сырья</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. Технологии мехатроники и создания микросистемной техники</li> <li>6. Технологии создания электронной компонентной базы</li> </ol>

<p>6. Интеллектуальные системы автоматизированного проектирования и управления</p> <p>7. Технологии ускоренной оценки и комплексного освоения стратегически важного горнорудного (алмазы, золото, платина) и техногенного сырья</p> <p>8. Технологии глубокой переработки горнорудного и техногенного сырья с использованием нетрадиционных методов</p> <p>9. Модульные технологии производства массовой металло-продукции с новым уровнем свойств</p> <p>10.</p>	<p>5. Технологические совмещаемые модули для металлургических мини-производств</p> <p>6. Микросистемная техника</p> <p>7. Информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CALS-технологии, CAD-CAM, CAE)</p> <p>8. Прецизионные и нанометрические технологии обработки, сборки, контроля</p> <p>9. Технологии глубокой переработки отечественного сырья и материалов в легкой промышленности</p> <p>10. Технологии на основе сверхпроводимости</p>	
<p>Новые материалы и химические технологии</p>		
<p>1. Материалы для микро- и наноэлектроники</p> <p>2. Композиты</p> <p>3. Полимеры</p> <p>4. Керамические материалы и нанокерамика</p> <p>5. Материалы и сплавы со специальными свойствами</p> <p>6. Сверхтвердые материалы</p> <p>7. Биосовместимые материалы</p> <p>8. Катализаторы</p> <p>9. Мембраны</p> <p>10. Дизайн химических продуктов и материалов с заданными свойствами</p>	<p>1. Металлы и сплавы со специальными свойствами</p> <p>2. Синтетические сверхтвердые материалы</p> <p>3. Каталитические системы и технологии</p> <p>4. Материалы для микро- и наноэлектроники</p> <p>5. Мембранные технологии</p> <p>6. Обезвреживание техногенных сред</p> <p>7. Керамические и стекломатериалы</p> <p>8. Полимеры и композиты</p>	<p>7. Нанотехнологии и наноматериалы</p> <p>8. Технологии создания биосовместимых материалов</p> <p>9. Технологии создания и обработки композиционных и керамических материалов</p> <p>10. Технологии создания и обработки кристаллических материалов</p> <p>11. Технологии создания и обработки полимеров и эластомеров</p> <p>12. Технологии создания мембран и каталитических систем</p> <p>13. Технологии создания электронной компонентной базы</p>
<p>Технологии живых систем</p>		

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Биополимеры клетки</li> <li>2. Генодиагностика и генотерапия</li> <li>3. Биотехнология на основе биоинженерии</li> <li>4. Технология иммунокоррекции</li> <li>5. Химический и биологический синтез лекарственных средств и пищевых веществ</li> <li>6. Системы жизнеобеспечения и защиты человека в экстремальных условиях</li> <li>7. Белковые препараты и композиты с заданными функциональными свойствами</li> <li>8. Трансгенные формы растений и животных</li> <li>9. Рекомбинантные вакцины</li> <li>10. Биологические средства питания и защиты растений и животных</li> <li>11. Биотехнологические процессы производства и переработки сельскохозяйственного сырья</li> <li>12. Технологии хранения продовольствия</li> <li>13. Технологии искусственного выращивания ценных объектов аквакультуры</li> <li>Технологии, обеспечивающие безопасность пищевых продуктов функционального назначения</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Технологии биоинженерии</li> <li>2. Генодиагностика и генотерапия</li> <li>3. Технологии иммунокоррекции</li> <li>4. Безопасность и контроль качества сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов</li> <li>5. Системы жизнеобеспечения и защиты человека</li> <li>6. Синтез лекарственных средств и пищевых добавок</li> <li>7. Биологические средства защиты растений и животных</li> <li>8. Производство и переработка сельскохозяйственного сырья</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>14. Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии</li> <li>15. Биомедицинские и ветеринарные технологии жизнеобеспечения и защиты человека и животных</li> <li>16. Геномные и постгеномные технологии создания лекарственных средств</li> <li>17. Клеточные технологии</li> <li>18. Технологии биоинженерии</li> <li>19. Технологии экологически безопасного ресурсосберегающего производства и переработки сельскохозяйственного сырья и продуктов питания</li> </ol>
<p>Новые транспортные технологии</p>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Авиационная и космическая техника с использованием новых технических</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Экологически чистый и высокоскоростной наземный транспорт</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>20. Технологии создания интеллектуальных систем навигации и</li> </ol>

<p>решений, включая нетрадиционные компоновочные схемы</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Транспортные средства на альтернативных видах топлива</li> <li>3. Высокоскоростной наземный транспорт на новых принципах движения</li> <li>4. Навигационные системы</li> <li>5. Системы обеспечения безопасности движения</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. Транспортные и судостроительные технологии освоения пространств и ресурсов мирового океана</li> <li>3. Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений</li> <li>4. Безопасность движения, управление транспортом, интермодальные перевозки и логистические системы</li> <li>5. Технологии высокоточной навигации и управления движением</li> </ol> <p>Космические технологии</p>	<p>управления</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>21. Технологии создания новых поколений ракетно-космической, авиационной и морской техники</li> <li>22. Технологии создания и управления новыми видами транспортных систем</li> </ol>
<p><b>Топливо и энергетика</b></p>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Технологии изучения недр, прогнозирования, поиска, разведки запасов полезных ископаемых и урана</li> <li>2. Технологии разрушения горных пород, проходки горных выработок и бурения нефтяных и газовых скважин</li> <li>3. Технологии воздействия на нефтегазовые пласты</li> <li>4. Нетрадиционные технологии добычи и переработки твердых топлив и урана</li> <li>5. Технологии освоения углеводородов континентального шельфа</li> <li>6. Технологии углубленной переработки нефти, газа и конденсата</li> <li>7. Атомная энергетика</li> <li>8. Процессы трансформации твердого топлива в электрическую и тепловую энергию</li> <li>9. Парогазовые и газотурбинные процессы трансформации природного</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Энергосберегающие технологии</li> <li>2. Поиск, добыча, переработка и трубопроводный транспорт нефти и газа</li> <li>3. Безопасность атомной энергетики</li> <li>4. Обращение с радиоактивными отходами и облученным ядерным топливом</li> <li>5. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии и новые методы ее преобразования и аккумулирования</li> <li>6. Добыча и переработка угля</li> <li>7. Производство электроэнергии и тепла на органическом топливе</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>23. Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом</li> <li>24. Технологии водородной энергетики</li> <li>25. Технологии новых и возобновляемых источников энергии</li> <li>26. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов</li> <li>27. Технологии оценки ресурсов и прогнозирования состояния литосферы и биосферы</li> <li>28. Технологии производства топлив и энергии из органического сырья</li> <li>29. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии</li> </ol>

<p>газа в электрическую и тепловую энергию</p> <p>10. Технологии регенерации отработавшего ядерного топлива, утилизации и захоронения радиоактивных отходов</p> <p>11. Технологии освоения нетрадиционных возобновляемых источников энергии (солнца, ветра, биомассы и др.), а также вторичных энергоресурсов</p> <p>12. Технологии электронного переноса энергии</p> <p>13. Трубопроводный транспорт водоугольной суспензии</p> <p>14. Водородная энергетика</p> <p>15. Топливные элементы</p> <p>16. Энергосберегающие технологии межотраслевого применения</p>		
<p>Экология и рациональное природопользование</p>		
<p>1. Технологии мониторинга природно-техногенной сферы</p> <p>2. Технологии прогнозирования развития климатических, экосистемных, горногеологических и ресурсных изменений</p> <p>3. Технологии обеспечения безопасности продукции, производств и объектов</p> <p>4. Технологии неистощительного природопользования</p>	<p>1. Снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф</p> <p>2. Мониторинг окружающей среды</p> <p>3. Прогнозирование биологических и минеральных ресурсов</p> <p>4. Природоохранные технологии, переработка и утилизация техногенных образований и отходов</p> <p>5. Переработка и воспроизводство лесных ресурсов</p>	<p>30. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы</p> <p>31. Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов от угроз террористических проявлений</p> <p>32. Технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф</p>

<p>5. Технологии реабилитации окружающей среды от техногенных воздействий</p> <p>6. Технологии минимизации экологических последствий трансграничных воздействий</p>	<p>6. Сохранение и восстановление нарушенных земель, ландшафтов и биоразнообразия</p>	
---	---	--

Изучение Научных приоритетов Российской академии наук проводится для целей определения взаимосвязи фундаментальных исследований и их технических воплощений (Приведены в приложении 6).

Готовится таблица поддержки Критических технологий Российской Федерации и Научных приоритетов Российской академии наук. Образец таблицы 3.2 приведен ниже.

Таблица 3.2. Поддержка Критических технологий Российской Федерации фундаментальными исследованиями

Критические технологии Российской Федерации 2006 года	Научные приоритеты Российской академии наук.
<p>2. Биоинформационные технологии</p> <p>3. Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии</p> <p>4. Биомедицинские и ветеринарные технологии жизнеобеспечения и защиты человека и животных</p> <p>5. Геномные и постгеномные технологии создания лекарственных средств</p> <p>6. Клеточные технологии</p> <p>7. Нанотехнологии и наноматериалы</p> <p>8. Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом</p> <p>9. Технологии биоинженерии</p> <p>10. Технологии водородной энергетики</p> <p>11. Технологии механотроники и создания микросистемной техники</p> <p>12. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы</p> <p>13. Технологии новых и возобновляемых источников энергии</p> <p>14. Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений</p> <p>15. Технологии обработки, хранения, передачи и защиты информации</p>	<p>Отделение информационных технологий и вычислительных систем</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Искусственный интеллект, системы распознавания образов, принятие решений при многих критериях</li> <li>• Нейроинформатика и биоинформатика</li> </ul> <p>и т.д.</p>

<p>16. Технологии оценки ресурсов и прогнозирования состояния литосферы и биосферы</p> <p>17. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов</p> <p>18. Технологии производства программного обеспечения</p> <p>19. Технологии производства топлив и энергии из органического сырья</p> <p>20. Технологии распределенных вычислений и систем</p> <p>21. Технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф</p> <p>22. Технологии создания биосовместимых материалов</p> <p>23. Технологии создания интеллектуальных систем навигации и управления</p> <p>24. Технологии создания и обработки композиционных и керамических материалов</p> <p>25. Технологии создания и обработки кристаллических материалов</p> <p>26. Технологии создания и обработки полимеров и эластомеров</p> <p>27. Технологии создания и управления новыми видами транспортных систем</p> <p>28. Технологии создания мембран и каталитических систем</p> <p>29. Технологии создания новых поколений ракетно-космической, авиационной и морской техники</p> <p>30. Технологии создания электронной компонентной базы</p> <p>31. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии</p> <p>32. Технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем</p> <p>33. Технологии экологически безопасного ресурсосберегающего производства и переработки</p>	
--	--

<p>сельскохозяйственного сырья и продуктов питания</p> <p>34. Технологии экологически безопасной разработки месторождений и добычи полезных ископаемых</p>	
--	--

## Практическое занятие № 4 Применения и конкретные устройства газотурбинной и парогазовой установок

План практического занятия 4.

1. Устройство газотурбинной установки
2. Устройство парогазовой установки.

Цель занятия: рассмотреть на практике область применения и конкретные устройства газотурбинной и парогазовой установок.

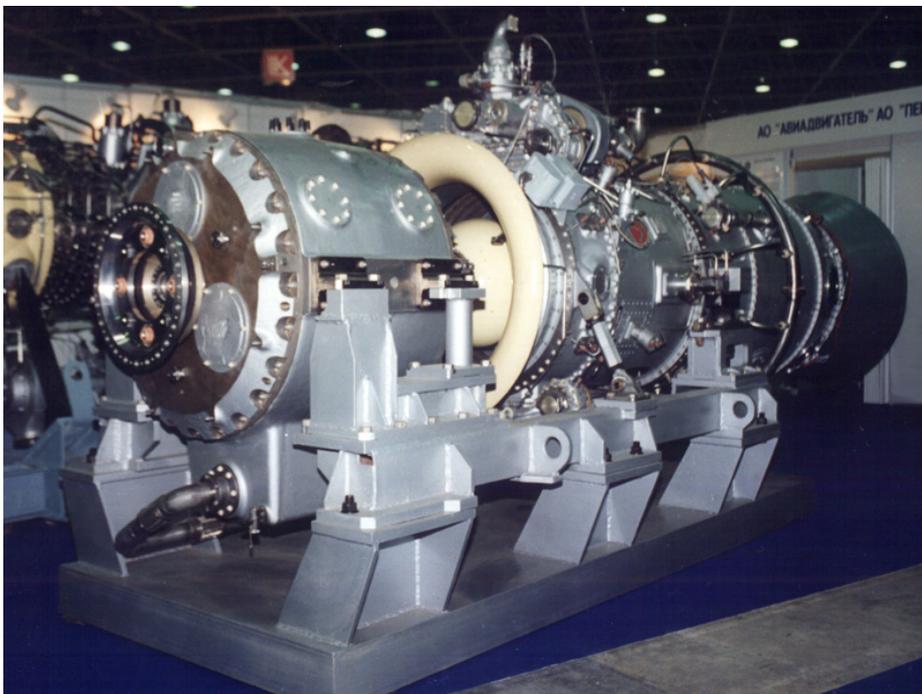
ГТУ - газотурбинная установка.

ГТУ могут быть разделены на две основные части - газогенератор и силовую турбину, размещенные в одном корпусе. Газогенератор включает в себя турбокомпрессор и камеру сгорания, в которых создается высокотемпературный поток газа, воздействующий на лопатки силовой турбины. ГТУ предусматривают работу на двух видах топлива - жидком и газообразном. Постоянная работа производится на газе, а в резервном (аварийном) режиме происходит автоматический переход на дизельное топливо.

Оптимальный режим работы ГТУ - комбинированная выработка тепловой и электрической энергии. ГТУ производят гораздо большее количество тепловой энергии, чем газопоршневые агрегаты.



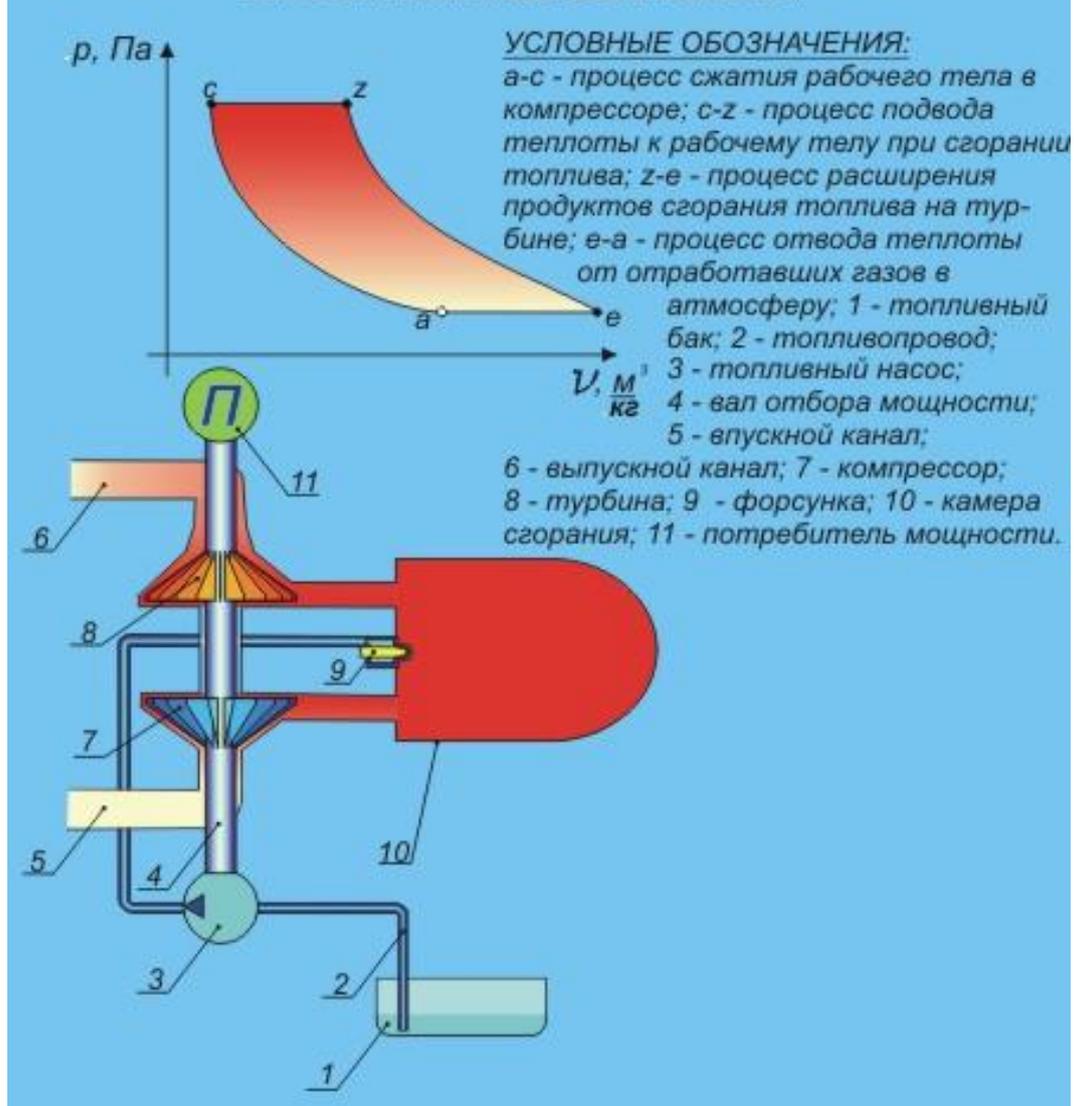
ГТУ-16ПЭР Мощность 16,8 МВт, КПД 35,6%



ГТУ-25П Мощность 25,6 МВт КПД 40,0%

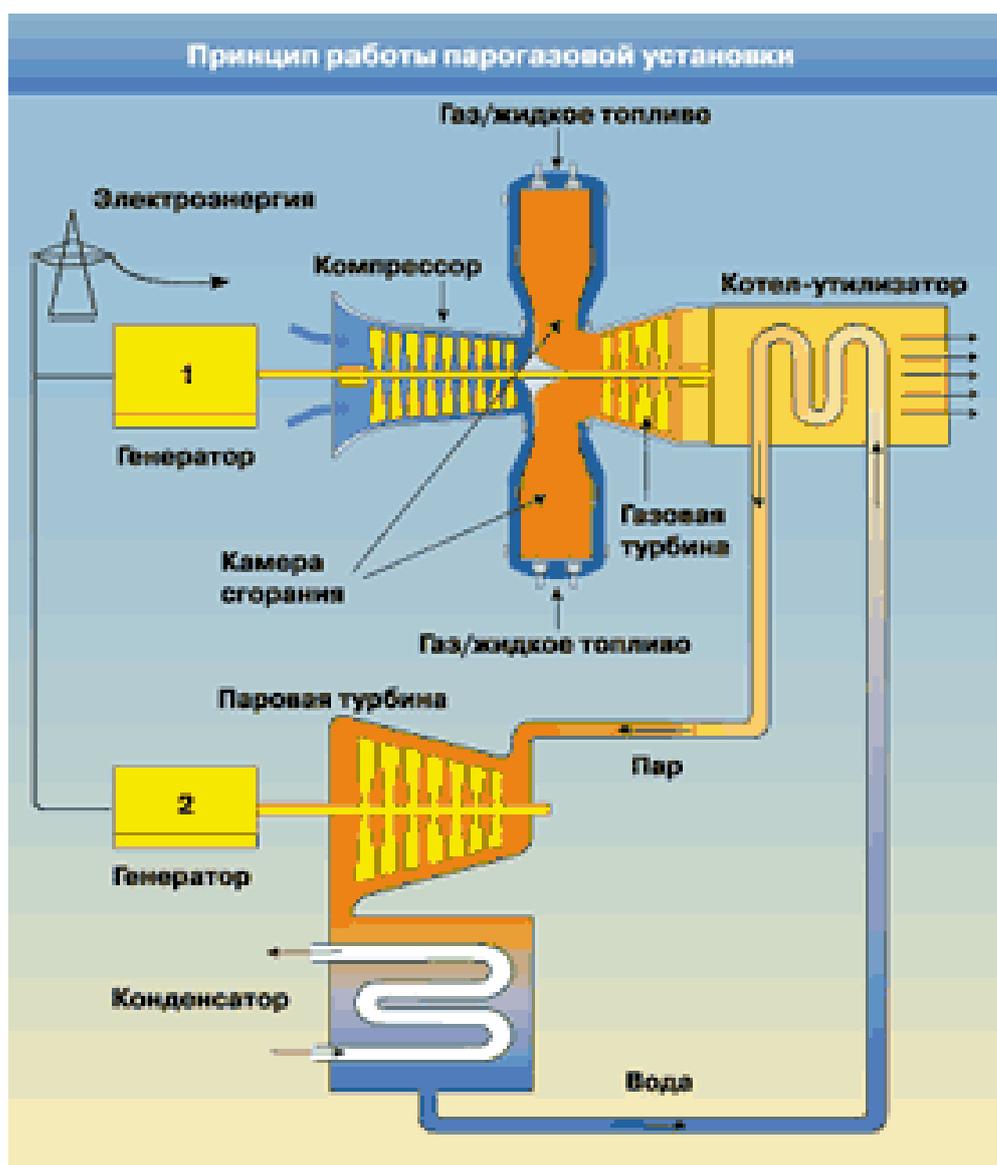


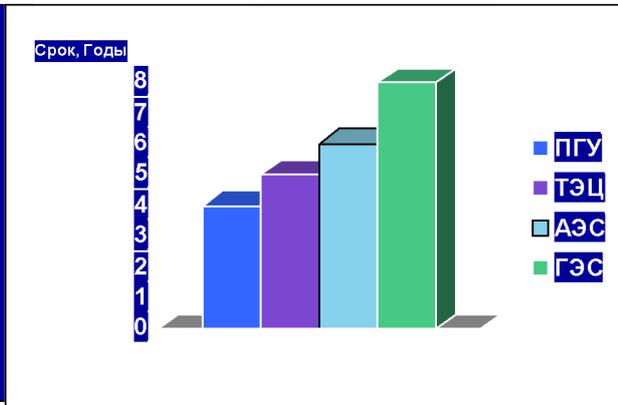
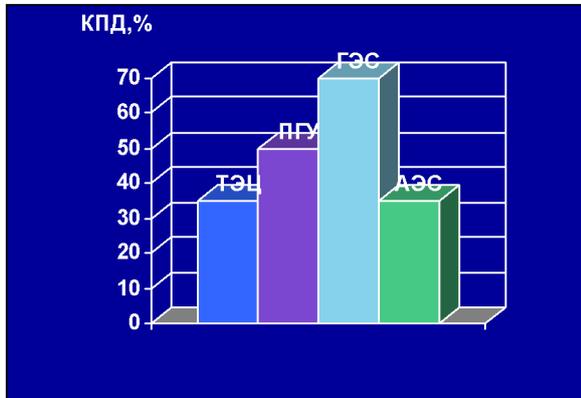
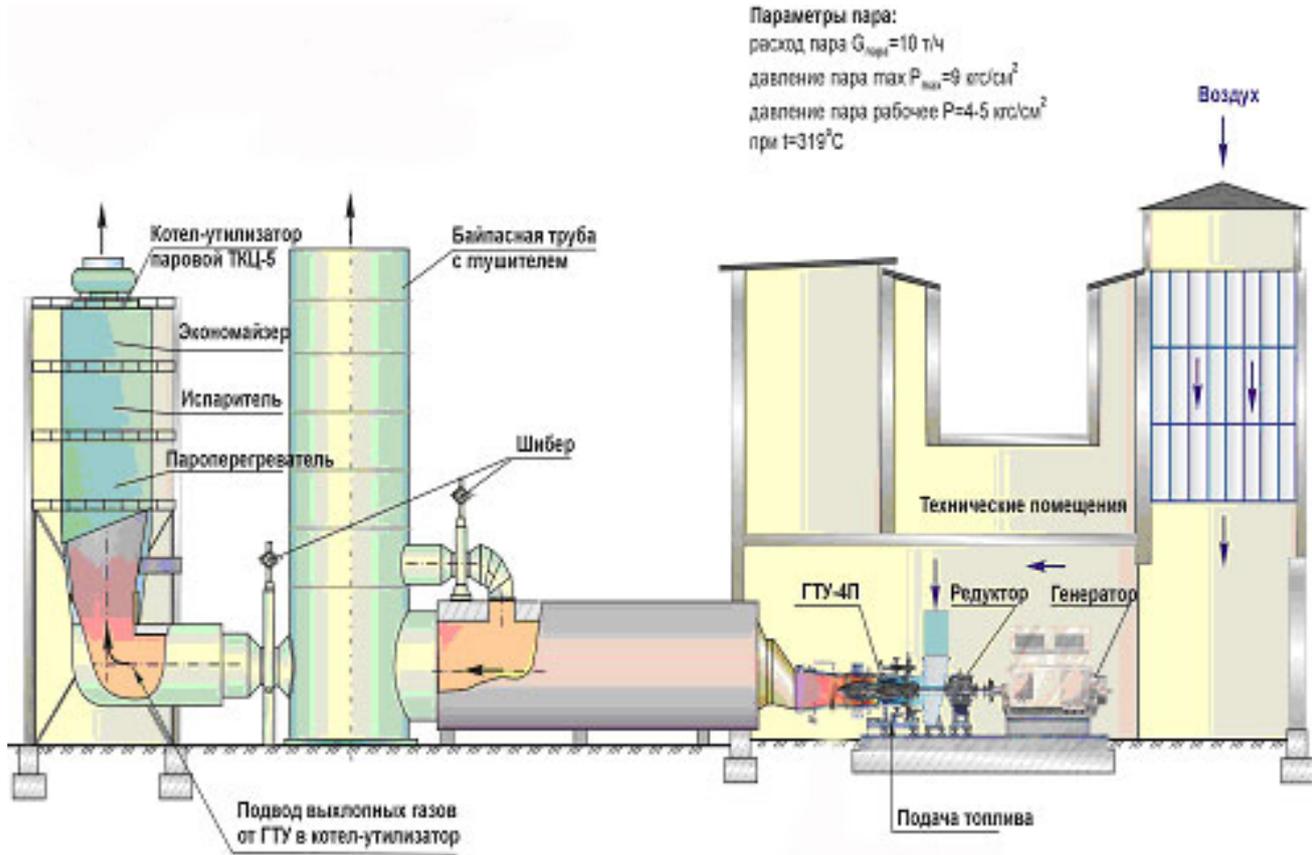
**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РАБОЧИЙ ЦИКЛ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ИЗОБАРНЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ**



ПГУ - Парогазовая установка.

ПГУ большой единичной мощности, включающие 1-2 газовые турбины и одну паровую турбину, обеспечивают достижение КПД до 53-55%. ПГУ средней и малой мощности, в том числе на базе реконструируемых авиационных газовых турбин, характеризуются высокой экономической эффективностью, маневренностью. ПГУ большой мощности предназначены для использования в составе объединенных энергосистем для выработки электроэнергии, а также для комбинированного производства электроэнергии и тепла для теплоснабжения крупных населенных пунктов.





КПД различных типов энергостанций.

Срок введения в эксплуатацию различных типов электростанций

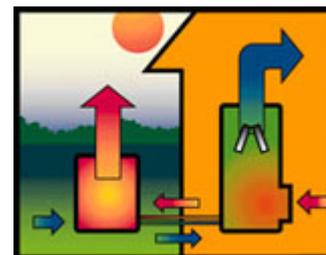
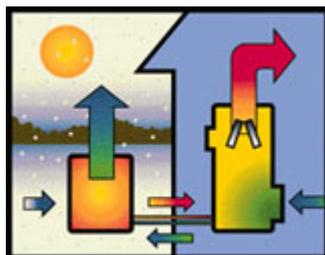
**Практическое занятие № 5 Инновационные проекты в области энергетики. Альтернативные источники энергии.**

План практического занятия 20

Тепловые насосы. Область применения тепловых насосов.

Технологии освоения нетрадиционных возобновляемых источников

Цель занятия рассмотреть на практике область применения и конкретные устройства тепловых насосов и нетрадиционных возобновляемых источников



Типы устройств

#### Геотермальный тепловой насос с открытым циклом (open loop)

Тепловые насосы открытого цикла используют грунтовые воды как главный источник энергии. Теплоноситель подается непосредственно из водоема и после прохождения цикла охлажденным возвращается обратно. При идеальных условиях, использование ТН с открытым циклом может быть наиболее экономичным типом геотермальной системы.

#### Геотермальный тепловой насос с водоемным циклом (pond loop)

Тепловые насосы с закрытым водоемным циклом крайне экономичны, так как при установке используется доступный водоем, и отсутствуют затраты на земляные работы. Спирали труб просто помещаются на дно водоема.

#### Геотермальный тепловой насос с горизонтальным теплообменником (horizontal loop)

Тепловые насосы с горизонтальным теплообменником рассматриваются лишь при наличии поверхности необходимой площади. Замкнутый контур теплообменника укладывается горизонтально в глубокие траншеи, длина которых варьируется от 30 до 120 метров.

#### Геотермальный тепловой насос с вертикальным теплообменником (vertical loops)

Замкнутый контур теплообменника устанавливается вертикально в подготовленные отверстия. Применяется в тяжелом грунте или при ограниченности пространства участка. Буровое оборудование используется для сверления отверстий малого диаметра на глубину 25-90 метров.

Сведения о некоторых ИНТ

ИНТ	Среда промежуточного контура	Температура источника, °С
Грунтовые воды	вода	8..15
Грунт	антифриз	2..10
Вода с водозабора	вода	6..10
Речная вода	антифриз	1..10

Канализационные стоки	вода	10..17
Окружающий воздух	воздух	-8..15
Вытяжной воздух	воздух	18..25

Сведения о ПВТ (потребитель высокотемпературной теплоты)

Система	Примечание	Расчетная температура ПВТ, °С
Отопление	Теплые полы	25..35
	Жилой дом	95-105
	Промышленное здание	95-150
Горячее водоснабжение	—	50..55
Теплоснабжение вентиляции	—	95..150

Технологии освоения нетрадиционных возобновляемых источников

1. Солнечная батарея. Исходный материал: монокристаллический кремний Защита: покрытие - двойной ламинат, закалённое стекло с высоким светопропусканием (92%), 3 мм толщиной

Рама: анодированный алюминий Распределительная коробка: поликарбонат, наполненный стеклом

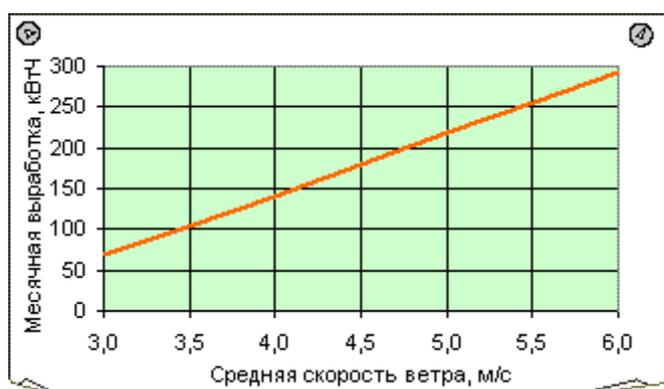


Улавливание и преобразование солнечной энергии в теплоту осуществляется с помощью оптической системы отражателей и приемника сконцентрированной солнечной энергии, используемой для получения водяного пара или нагрева газообразного или жидкометаллического теплоносителя (рабочего тела).

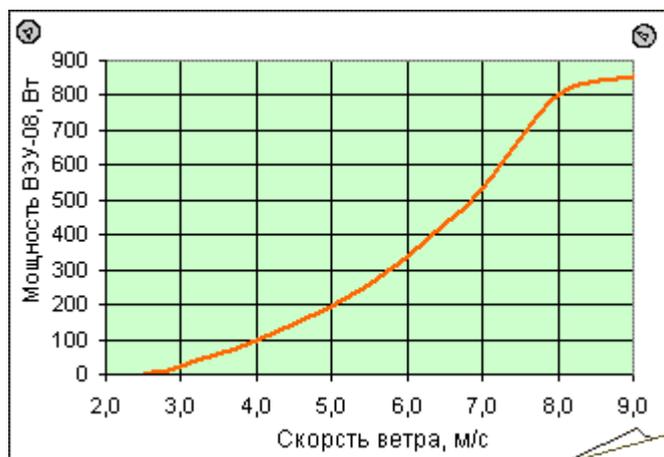
2. Ветроустановка ВЭУ-08 предназначена для обеспечения электроэнергией небольших объектов.

Применяется как в местах, где отсутствует сетевая энергия (туристические лагеря, фермерские хозяйства, дачные участки, питание автономных комплексов), так и в качестве резервного источника электроэнергии для частных домов, коттеджей.

Зависимость месячной выработки энергии от средней скорости ветра

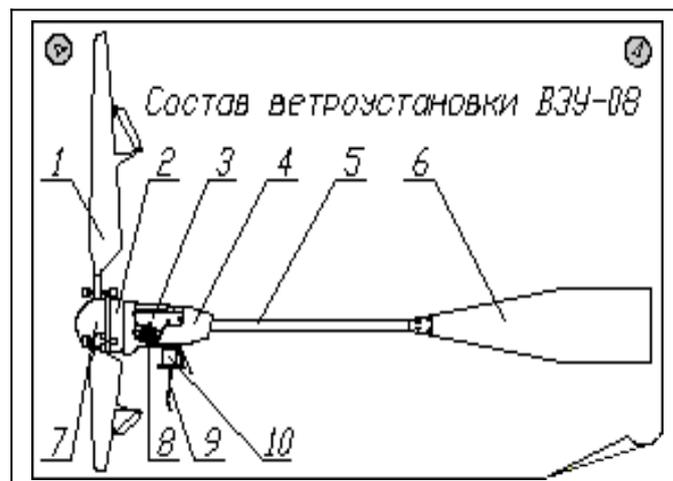


Зависимость мощности от скорости ветра



Состав ветроустановки ВЭУ-08.

- 1 – Ветротурбина
- 5 - Хвостовая балка
- 2 – Генератор
- 6 – Киль
- 3 - Центральная рама
- 7 - Кок ветротурбины
- 4 – Кожух
- 8 – Выпрямитель



- 9 - Трос флюгирования ветротурбины
- 10 - Опорно-поворотное устройство с токосъемом

Основные характеристики ветроустановки ВЭУ-08:

Номинальная мощность-800 Вт  
 Диаметр ветротурбины-3.1 м  
 Стартовая скорость ветра-2.5 м/с  
 Расчетная скорость ветра-8 м/с Макс.  
 эксплуатационная скорость ветра-50 м/с  
 Номинальная частота вращения-310 об/мин  
 Метод останковки -флюгирование  
 Регулирование оборотов -изменение шага  
 Номинальное напряжение генератора-24 В  
 ЭДС генератора-до 60 В  
 Рекомендуемая высота мачты-11..17 м

В типовой состав системы энергообеспечения нагрузок 220В/50Гц на основе ВЭУ-08 входят следующие компоненты:

Головка ВЭУ-08 - вырабатывает "грубую" электроэнергию с нестабильными параметрами, зависящими от скорости ветра. Фотоэлектрический модуль (ФЭМ) - опциональный компонент, вырабатывающий дополнительную "грубую" энергию. Повышает надежность энергообеспечения и суммарную выработку энергии. Аккумуляторная батарея (АБ) - накопитель энергии для согласования графиков выработки и потребления энергии. Применяется кислотная АБ с номинальным напряжением 24В и рекомендуемой емкостью 190АЧ. Может состояться из двух автомобильных стартерных АБ 12В. Источник бесперебойного питания ИБП-1.5/3С-ВГ/ФМ - устройство, согласующее между собой указанные выше компоненты, нагрузку и внешнюю сеть 220В. Заряжает АБ от ВЭУ, ФЭМ и внешней сети 220В. Преобразует накопленную в АБ энергию в стабилизированные 220В/50Гц с номинальной мощностью до 1.5кВт. Автоматически коммутирует нагрузку на питание от внешней сети 220В или от преобразователя. Отображает параметры системы на цифровом индикаторе. Мачта - служит для установки головки на высоте 11-17м, на которой ветровой поток не затеняется препятствиями и имеет достаточную скорость.

### 3. Гидротермальные источники энергии.



## Практическое занятие №6. Атомно-водородная энергетика

План практического занятия 7.

1. Использование водорода в энергетике.
2. Технологии получения водорода.
3. Хранение и транспортировка водорода

Цель занятия рассмотреть на практике область применения и конкретные устройства водородной энергетики.

В соответствии со схемой 1 рассмотрим различные способы получения водорода

Основные источники и пути получения водорода Схема 1



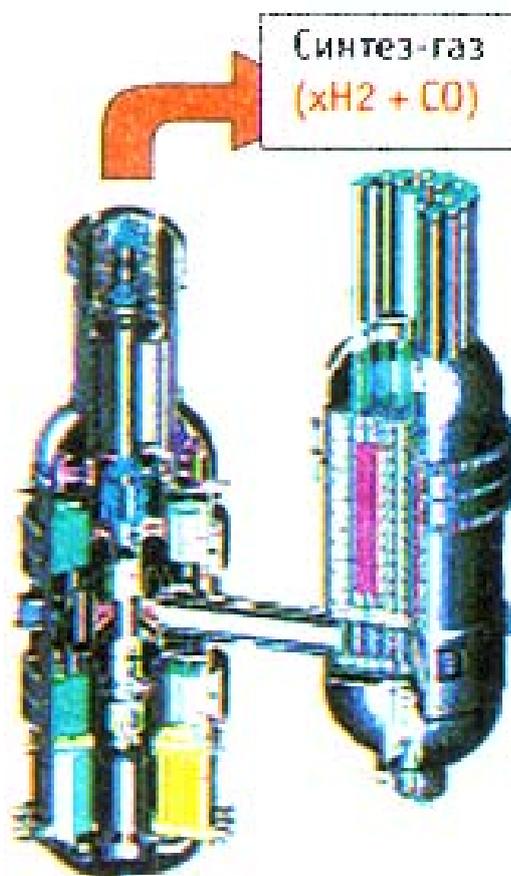
Первый способ - это паровая конверсия метана (CH<sub>4</sub>). При температуре печи выше 800°C происходит разложение метана и выделение водорода, осуществляемое на каталитических поверхностях. В настоящее время в мире большая часть производимого в промышленном масштабе водорода получается в процессе паровой конверсии метана (ПКМ). Полученный таким путем водород используется как реагент для очистки нефти и как компонент азотных удобрений, а также для ракетной техники. Пар и тепловая энергия при температурах 750-850°C требуются, чтобы отделить водород от углеродной основы в метане, что и происходит в химических паровых реформерах на каталитических поверхностях. Первая ступень процесса ПКМ расщепляет метан и водяной пар на водород и монооксид углерода. Вслед за этим на второй ступени «реакция сдвига»

превращает монооксид углерода и воду в диоксид углерода и водород. Эта реакция происходит при температурах 200-250°C.

Следующий способ получения водорода основан на использовании термохимических реакций химически активных соединений йода или брома. Первичным продуктом служит вода, а сам процесс осуществляется в несколько циклов. Требуется несколько стадий — обычно три, чтобы выполнить полный процесс.

Третья технология производства водорода – электролитическое разложение воды. Осуществляется под высоким давлением и получается высокий выход водорода. Электролитический водород является наиболее доступным, но дорогим продуктом. В промышленных и опытно-промышленных установках реализован КПД электролизера ~ 70-80% при плотностях тока менее 1 А/см<sup>2</sup>, в том числе для электролиза под давлением. Японские исследователи разработали экспериментальные мембранно-электродные блоки с твердополимерным электролитом, обеспечивающие электролиз воды с КПД (по электричеству) > 90% при плотностях тока 3 А/см<sup>2</sup>.

В настоящее время наиболее рентабельный способ производить водород — паровая конверсия. Согласно данным Минэнерго США, в 1995 г. стоимость водорода была 7 долл./ГДж (для условий большого завода), что эквивалентно стоимости бензина 0.24 долл./л. Для расчета принималась стоимость природного газа 2.30 долл./ГДж (80 долл./1000м<sup>3</sup>), примерно в 3 раза превышающая его стоимость в России. Таким образом, даже при увеличении внутренних цен на природный газ в России в 2-3 раза водород, производимый с помощью ПКМ, будет более дешевым поставщиком энергии, чем бензин при текущих внутренних ценах на углеводородное топливо.



## . Практическое занятие №7 Лазерная обработка материалов

План практического занятия 7.

1. Оборудование лазерной обработки.
2. Оптические системы лазерных установок.
3. Промышленные лазерные технологические установки.
4. Классификация режимов лазерной обработки материалов.
5. Особенности технологических процессов лазерной обработки.

Цель занятия: рассмотреть на основные характеристики и особенности режимов лазерной обработки материалов.

### 1. Оборудование лазерной обработки.

В настоящее время известно большое число разнообразных типов оптических квантовых генераторов, часто называемых просто лазерами. Для обработки материалов в основном используют твердотельные и газовые лазеры, т. е. так называемые технологические лазеры.

В твердотельных лазерах генерация излучения осуществляется в твердом активном элементе, в качестве которого используют стержни из кристалла искусственного рубина, стекла с примесью редкоземельного элемента неодима (Ст—Nd) или иттрий-алюминиевого граната с добавкой неодима (YAG—Nd).

В газовых лазерах в качестве активной среды используют различные газы и смеси газов. Наиболее распространены технологические газовые лазеры на диоксиде углерода  $\text{CO}_2$ .

Рассмотрим схему твердотельного лазера (рис. 1). Твердый активный элемент 2 размещают в резонаторе между двумя зеркалами 1 и 3. Зеркало 1 полностью отражает все падающее на него излучение, а зеркало 3 является полупрозрачным. Оптическая накачка активной среды осуществляется энергией газоразрядной лампы-вспышки 4. Для получения более эффективного облучения лампу 4 вместе с активным элементом 2 помещают в кожух 5, на внутреннюю поверхность которого нанесено отражающее покрытие типа серебра, золота и др. Кожух 5 имеет эллиптическую форму, а лампа и кристалл размещаются в фокусах эллипса. Этим достигаются наилучшие условия равномерного и интенсивного освещения кристалла. Питание лампы-вспышки обычно осуществляется от специальной высоковольтной батареи 6 конденсаторов.

Часть излучения выходит из генератора через полупрозрачное зеркало 3 (см. рис. 1). Диаметр луча, полученного лазерным излучением, примерно равен диаметру

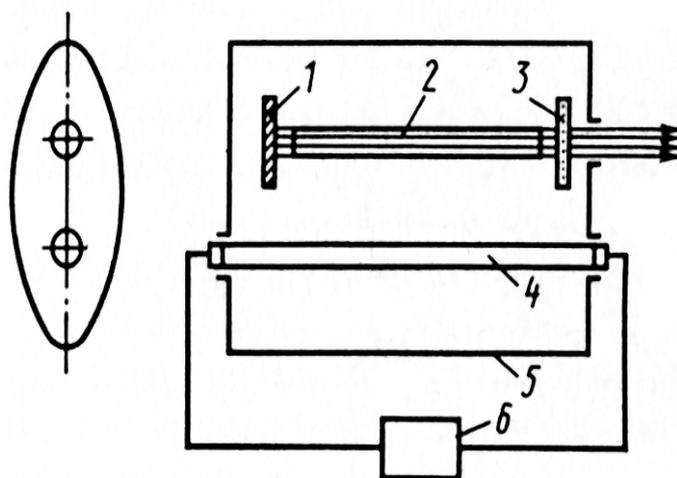


Рис. 1.  
Принципиальная схема  
твердотельного лазера.  
Пояснения см. в тексте.

использования кристалла. Плотность

мощности выходного лазерного излучения сравнительно невелика. Последующей фокусировкой значительно уменьшают диаметр луча, в результате чего существенно возрастает плотность мощности лазерного излучения. В таком сфокусированном виде лазерное излучение и используется для обработки материалов.

Твердотельные лазеры с активными элементами в виде рубинового стержня обычно работают в импульсно-периодическом режиме излучения с длительностью импульсов  $t = 10^{-3} - 10^{-9}$  с на длине волны  $\lambda = 0,69$  мкм. Энергия излучения в импульсе  $W_{\text{и}} = 10^{-2} - 10^3$  Дж при максимальной частоте повторения импульсов  $F_{\text{и}} \sim 10$  Гц. Полный коэффициент полезного действия (КПД), определяемый отношением энергии лазерного излучения к затратам электрической энергии, подведенной из сети к лазерной установке, для рубинового лазера сравнительно мал и составляет 0,3–0,5 %.

Твердотельные лазеры на стекле с неодимом и на гранате с неодимом генерируют излучение на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм и отличаются высокой мощностью излучения в импульсе при импульсно-периодическом режиме генерации. Частотный режим современных твердотельных неодимовых лазеров изменяется в пределах 0,05—200 Гц, сохраняя высокую мощность при к.п.д. 4–7 %. При низких частотах 0,1—1 Гц эти лазеры способны генерировать энергию в десятки джоулей в импульсе при длительности импульса порядка 100 мкс.

Отличительной особенностью твердотельных лазеров на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом является возможность генерации излучения не только в импульсно-периодическом, но и в непрерывном режиме. Мощность непрерывной генерации современных лазеров на YAG—Nd достигает 500 Вт и выше. Благодаря этому лазеры на YAG—Nd могут найти широкое применение в обработке материалов.

Для лазерной обработки материалов весьма перспективны газовые лазеры, способные развивать большую мощность в непрерывном и импульсно-периодическом режимах генерации.

Газовым лазерам свойственна более высокая монохроматичность излучения. Благодаря этому достигается уровень расходимости, близкий к предельно возможному, т. е. к дифракционному. Это условие обеспечивает получение высоких значений плотности мощности излучения в фокальном пятне.

Наибольшее применение в технологических установках получили электроразрядные лазеры на диоксиде углерода  $\text{CO}_2$ , генерирующие инфракрасное излучение с длиной волны 10,6 мкм. Для увеличения мощности к рабочему газу  $\text{CO}_2$  добавляют молекулярный азот ( $\text{N}_2$ ) и гелий (He), т. е. эти лазеры используют в качестве активной среды газовую смесь  $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ . Молекулы  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  возбуждаются соударениями с электронами газового разряда. При этом возбуждение молекул  $\text{CO}_2$  усиливается в результате передачи энергии от возбужденных молекул  $\text{N}_2$ . Гелий способствует созданию инверсной заселенности, обеспечивает хороший теплоотвод от рабочей смеси и стабилизирует разряд.  $\text{CO}_2$ -лазеры характеризуются высоким к.п.д. – 20–30 %.

Рассмотрим принципиальную схему одного из видов  $\text{CO}_2$ -лазера (рис. 2). В стеклянной газоразрядной трубке 4 возбуждается продольный электрический разряд между двумя кольцевыми электродами / с помощью высоковольтного источника 2 питания. В газоразрядной трубке предусматривается постоянная прокачка газовой рабочей смеси для обеспечения подачи свежей смеси в зону разряда. Охлаждение газоразрядной трубки осуществляется проточной водой, подаваемой в кожух вокруг трубки. На левом торце трубки установлено охлаждающее зеркало 5, а на правом торце — окно 3 из материала, пропускающего инфракрасное лазерное излучение. В качестве

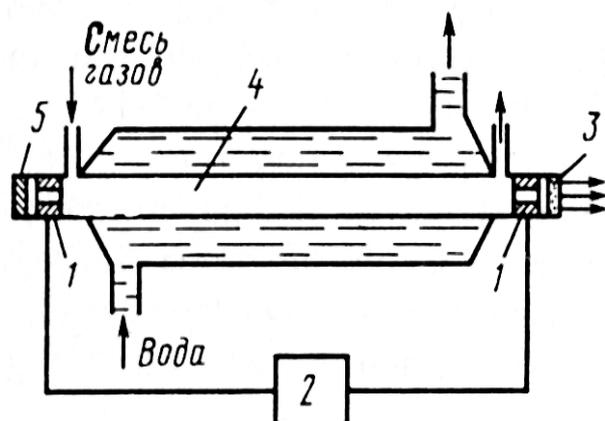


Рис. 2. Принципиальная схема  $\text{CO}_2$ -лазера. Пояснения см. в тексте.

таких материалов используются кристаллы из солей  $\text{NaCl}$  (хлористый натрий),  $\text{KBr}$  (бромистый калий),  $\text{Ge}$  (германий),  $\text{ZnSe}$  (селенид цинка),  $\text{GaAs}$  (арсенид галлия) и др. Как уже указывалось, одним из основных условий эффективной работы  $\text{CO}_2$ -лазера является недопустимость перегрева рабочей газовой смеси и, следовательно, необходимость ее эффективного охлаждения. В зависимости от способа охлаждения рабочей смеси все газоразрядные лазеры разделяют на лазеры с диффузионным и конвективным охлаждением.

В лазерах с диффузионным охлаждением отвод теплоты от рабочей смеси  $\text{CO}_2$ -лазера осуществляется с помощью охлаждаемой стенки разрядной трубки. В этих лазерах прокачка рабочей смеси проводится с малой скоростью, поэтому их называют газоразрядными лазерами с медленной прокачкой. При наличии устройств регенерации лазерной смеси скорость газа в этих лазерах может быть равной нулю.

В лазерах с конвективным охлаждением отвод теплоты из зоны разряда осуществляется путём замены нагретой порции рабочей газовой смеси новой. В этих лазерах прокачка рабочей смеси проводится с большой скоростью, поэтому их называют газоразрядными лазерами с быстрой прокачкой.

В зависимости от взаимной ориентации скорости потока газовой смеси и разряда различают лазеры с продольной (см. рис. 2) и поперечной прокачкой; в последнем случае прокачка газовой смеси осуществляется в направлении, перпендикулярном направлению электрического разряда.

Большие мощности излучения получают в технологических быстропротекающих лазерах с поперечной прокачкой газовой смеси.

## 2. Оптические системы лазерных установок

Увеличение концентрации энергии на поверхности обрабатываемой детали достигается с помощью оптических фокусирующих систем — линзовых или зеркальных.

В различных технологических процессах лазерной обработки материалов возникает необходимость изменить направление лазерного излучения, переместить лазерный луч в процессе обработки. С этой целью используются различные зеркальные оптические системы преобразования лазерного излучения.

В зависимости от назначения зеркала геометрическая форма его поверхности может быть плоской либо криволинейной (сфера, парабола, гипербола и др.). Плоские зеркала применяют для поворота лазерного излучения. Криволинейные зеркала (в первую очередь сферические) используют для фокусировки лазерного излучения.

Требования к материалу, используемому для изготовления зеркал, следующие: коэффициент отражения не менее 98 %; высокий коэффициент теплопроводности для

быстрого отвода теплоты от рабочей поверхности зеркала; высокая твердость с целью облегчить полирование поверхности зеркала, обеспечить ее стойкость к разрушениям и низкую шероховатость; химическая стойкость поверхности зеркал к воздействию окружающей среды в процессе эксплуатации.

Для удовлетворения этих требований используют многослойные покрытия из различных материалов. Например, зеркало на медной основе, на которую наносят слой никеля (что облегчает полирование), а затем напыляют слой золота (обеспечивает высокий коэффициент отражения и практически не окисляется в процессе эксплуатации).

Как правило, металлические поверхности зеркал подвергают суперполированию (т. е. обработке суперабразивной суспензией) с целью уменьшить шероховатость. После полирования и суперполирования осуществляют финишную обработку (ионно-лучевую; плазменную; химическую и др.). Широко применяют алмазное точение, повышающее производительность изготовления зеркал в 6–10 раз по сравнению с суперполированием.

При большой мощности излучения технологического лазера (свыше 1 кВт) обычно применяют охлаждаемые (как правило, проточной водой) зеркала с целью не допустить перегрева и окисления рабочей поверхности зеркала и уменьшить его тепловые деформации.

Для лазерной обработки применяют разнообразные оптические системы. В большинстве случаев основной задачей является обеспечение относительного перемещения луча и обрабатываемой детали. В случае обработки тяжелых, крупногабаритных деталей перемещают лазерный луч, а в случае обработки малогабаритных деталей — обрабатываемую деталь.

Обработка неподвижных деталей может осуществляться по любому заданному контуру с помощью двух подвижных зеркал (рис. 3). Плоские зеркала 2 и 3 (рис. 3а) перемещаются линейно: зеркало 2 — вдоль оси выходящего из лазера 1 луча, а зеркало 3 — вдоль оси луча, отраженного от зеркала 2. Фокусирующее устройство 4 и зеркало 3 перемещаются синхронно с зеркалом 2. Перемещение луча можно осуществить и путем поворота зеркал 2 и 3 (рис. 3б) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

На рис. 4 показана система перемещения лазерного луча с помощью трех поворотных плоских зеркал, содержащая подвижную раму 7, перемещающуюся по рельсам 8 над обрабатываемой крупногабаритной деталью 9. Зеркало 2 направляет

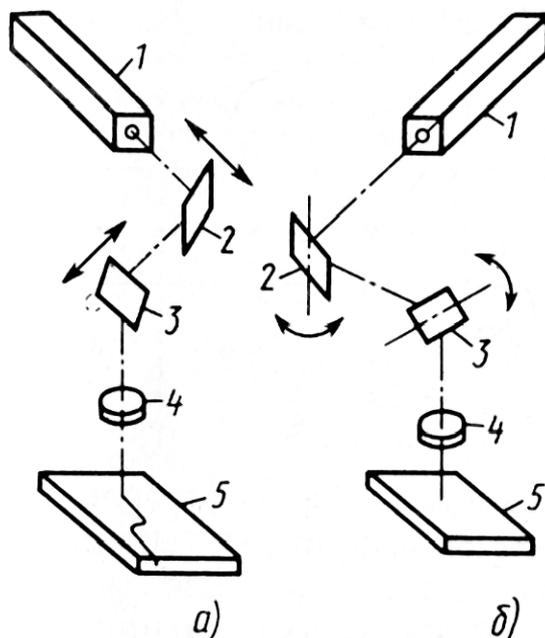


Рис. 3. Системы перемещения луча путем линейных перемещений (а) или поворота (б) двух зеркал:  
1 — лазер, 2, 3 — плоские зеркала,  
4 — фокусирующее устройство,  
5 — обрабатываемая деталь.

лазерный луч параллельно направлению перемещения рамы

ы 7, зеркало 3 — вдоль рамы 7. Зеркало 5 установлено на каретке 6, перемещающейся совместно с фокусирующим устройством 4 вдоль рамы 7.

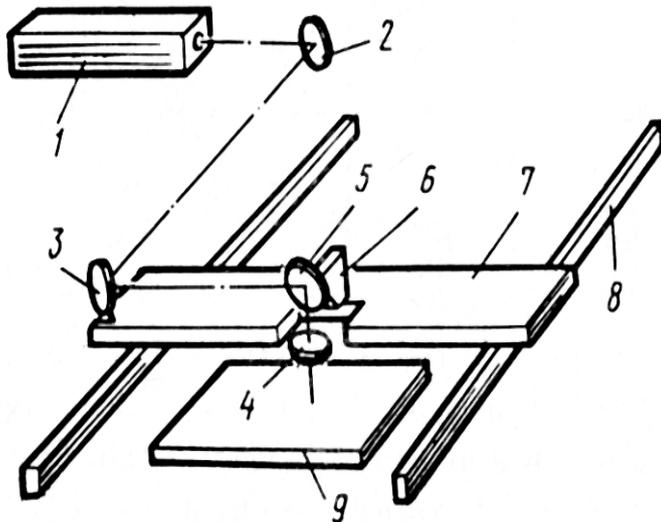


Рис. 4. Система перемещения луча тремя зеркалами:

1 — лазер, 2, 3, 5 — плоские зеркала, 4 — фокусирующее устройство, 6 — каретка для крепления зеркала, 7 — подвижная рама, 8 — рельс, 9 — обрабатываемая деталь.

Известно большое число конструкций оптических систем, используемых для управления перемещением лазерного луча по различным траекториям для обработки простых и сложных деталей. Следует также отметить, что лазерное излучение легко поддается регулированию и управлению путем его деления на несколько частей с помощью простых оптических устройств.

Для фокусировки лазерного излучения применяют как прозрачную оптику проходного типа (линзы), так и отражательную металлооптику (зеркала).

Для фокусировки лазерного излучения малой мощности (1–3 кВт) используют прозрачные линзы, а для фокусировки лазерного излучения повышенной мощности — зеркала, обеспечивающие значительно больший срок службы. Применяют как одиночные фокусирующие зеркала, так и более сложные по конструкции, но зато и более эффективные двухзеркальные объективы Кассегрена.

На рис. 5 показаны схемы лазерной обработки с использованием вогнутого фокусирующего зеркала и поворотного плоского зеркала. В схеме, где исходное лазерное излучение 1 имеет сплошное сечение (рис. 5а), применяют плоское сплошное зеркало 4 и

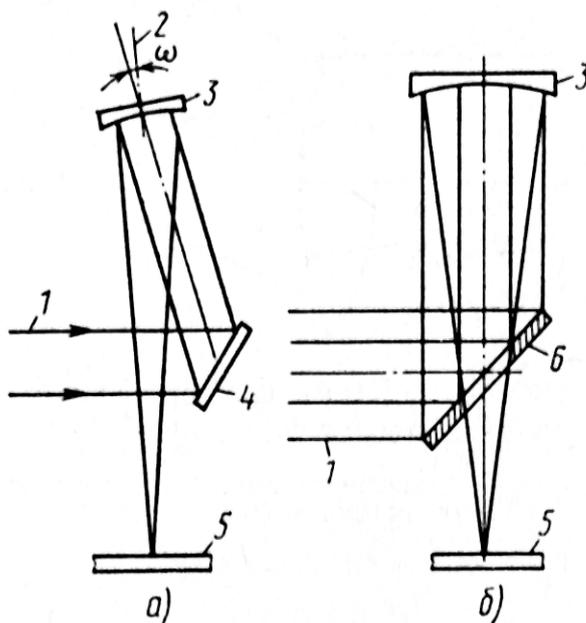


Рис. 5. Схемы лазерной обработки с одиночным фокусирующим зеркалом, наклоненным под углом к лучу (а) и соосным с лучом (б):

1 — лазерный луч, 2 — ось зеркала, 3 — фокусирующее зеркало, 4 — плоское сплошное зеркало, 5 — обрабатываемая деталь, 6 — плоское кольцевое зеркало

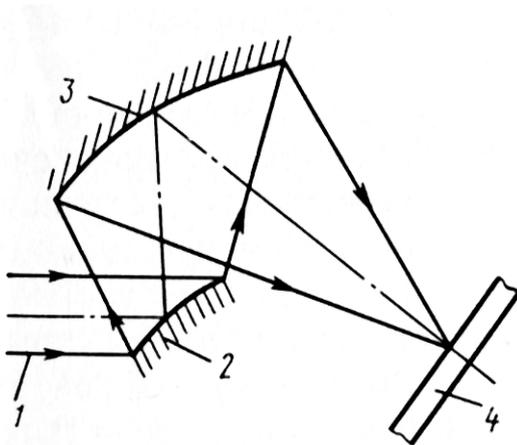


Рис. 6. Схема внеосевого фокусирующего объектива Кассегрена:  
1 — лазерный луч, 2 — выпуклое зеркало, 3 — вогнутое зеркало, 4 — обрабатываемая деталь.

фокусирующее сферическое зеркало 3, установленное под углом со к оси падающего на него луча.

В схеме, где исходное лазерное излучение 1 имеет кольцевое сечение (рис. 5б), применяют плоское кольцевое зеркало б и фокусирующее сферическое зеркало 3, соосное с падающим на него лучом.

Наибольшими возможностями фокусировки лазерного излучения обладают внеосевые объективы Кассегрена (рис. 6), состоящие из выпуклого зеркала 2 и вогнутого зеркала 3. Этот двухзеркальный объектив позволяет достичь высокой концентрации энергии лазерного излучения.

Фокусировка лазерного излучения сравнительно небольшой мощности (до 1–3 кВт) осуществляется линзами из оптически прозрачных материалов. Наилучшие условия фокусировки (т. е. минимальный диаметр пятна сфокусированного излучения) удастся получить при фокусировке луча двояковыпуклой линзой (рис. 7) с неравными радиусами кривизны поверхности; при этом линза должна быть установлена более выпуклой стороной к излучению.

Для технологических  $\text{CO}_2$ -лазеров с длиной волны излучения 10,6 мкм в качестве материала при изготовлении линз используют искусственные оптические кристаллы из хлористого натрия (NaCl), хлористого калия (KCl), фтористого натрия (NaF) и др. Также используют оптические линзы из германия (Ge), селенида цинка (ZnSe), кремния (Si), арсенида галлия (GaAs), имеющие более высокий коэффициент преломления и вследствие этого увеличенные потери на отражение. Поэтому на эти материалы наносят интерференционные просветляющие покрытия. Простые, дешевые в изготовлении линзы из монокристаллов KCl и NaCl, имеющие небольшие показатели преломления и обеспечивающие малые потери на отражение, используют без покрытий. Недостатками этих материалов являются их гигроскопичность, низкая прочность и малая стойкость при эксплуатации.

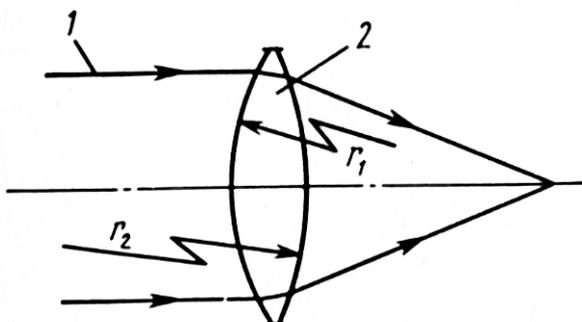


Рис. 7. Схема фокусировки излучения прозрачной линзой:  
1 — лазерный луч,  
2 — двояковыпуклая линза.

Фокусировка излучения твердотельных технологических лазеров с длиной волны 0,69 мкм и 1,06 мкм осуществляется стеклянными линзами.

### 3. Промышленные лазерные технологические установки.

Лазерная обработка материалов в промышленности осуществляется с помощью лазерных технологических установок. При этом независимо от назначения и типа применяемых лазеров установки имеют общую структурную схему (рис. 8). В состав установок входят, как правило, следующие основные узлы: лазер; оптическая система для формирования лазерного излучения — энергетический канал; устройство для закрепления и перемещения обрабатываемого объекта; система управления лазером и координатным столом.

Лазерные технологические установки должны обладать высокой стабильностью в работе, достаточно большим сроком службы и надежностью, минимальной массой и максимальной простотой конструкции. Помимо этого к лазерным установкам предъявляются и такие требования, как ремонтпригодность; быстроразъемность блоков, узлов и деталей; удобство обслуживания; простота управления; безопасность работы; возможность дистанционного наблюдения за обрабатываемыми деталями; современный внешний вид; высокий КПД генерации излучения; низкая стоимость эксплуатации.

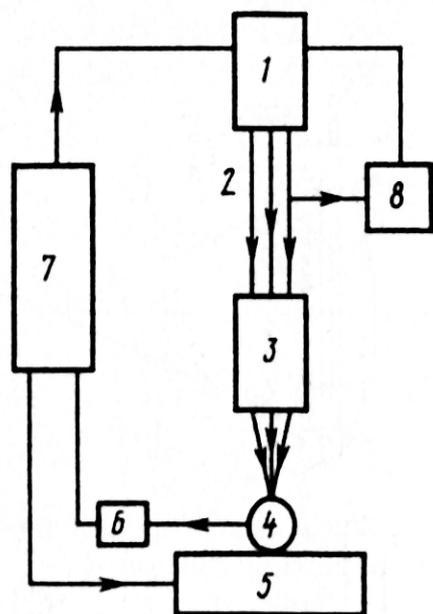


Рис. 8. Структурная схема лазерной технологической установки:

1 — технологический лазер, 2 — лазерное излучение, 3 — оптическая система, 4 — обрабатываемая деталь, 5 — устройство для закрепления и перемещения детали, 6 — датчики параметров технологического процесса, 7 — программное устройство, 8 — датчики параметров излучения.

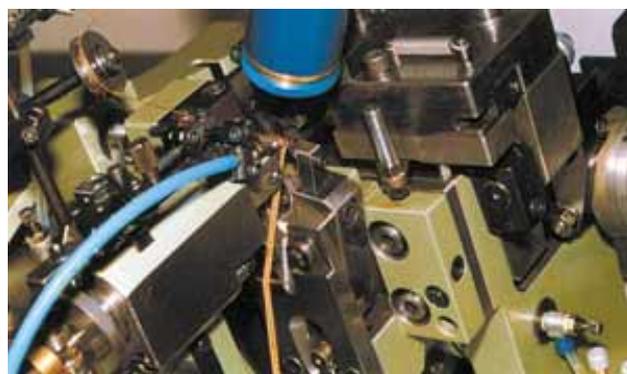


Рис. 9. Примеры лазерных технологических установок.

#### 4. Классификация режимов лазерной обработки материалов

Использование лазерной энергии для обработки материалов основано на поглощении лазерного излучения веществом. Излучение проникает в непрозрачный материал на незначительную глубину и энергия выделяется в тонком приповерхностном слое толщиной  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  мм. Лазерное излучение можно рассматривать как источник энергии, расположенный на поверхности детали.

Особенностью лазерного источника нагрева является возможность регулирования в широких пределах величины вводимой в материал энергии. Это позволяет применять один и тот же источник нагрева для разнообразных технологических операций, связанных с нагревом, плавлением и испарением материалов.

Для правильного определения возможностей и областей применения лазерной обработки ее классифицируют по энергетическому и технологическому признакам.

Для классификации по энергетическому признаку используют такие параметры как плотность мощности и время воздействия излучения.

Плотность мощности  $E = (4P)/(\pi d^2)$ , где  $P$  — мощность лазерного излучения,  $d$  — диаметр пятна нагрева.

Время воздействия излучения  $\tau = d/v$ , где  $v$  — скорость перемещения источника.

Для импульсных источников время воздействия определяется длительностью импульса лазерного излучения.

На рис. 10 представлена диаграмма использования методов лазерной обработки, классифицированных по энергетическому признаку, для реализации различных технологических процессов.

На диаграмме можно выделить четыре зоны: 1) поверхностного нагрева; 2) плавления; 3) удаления материала; 4) образования плазмы.

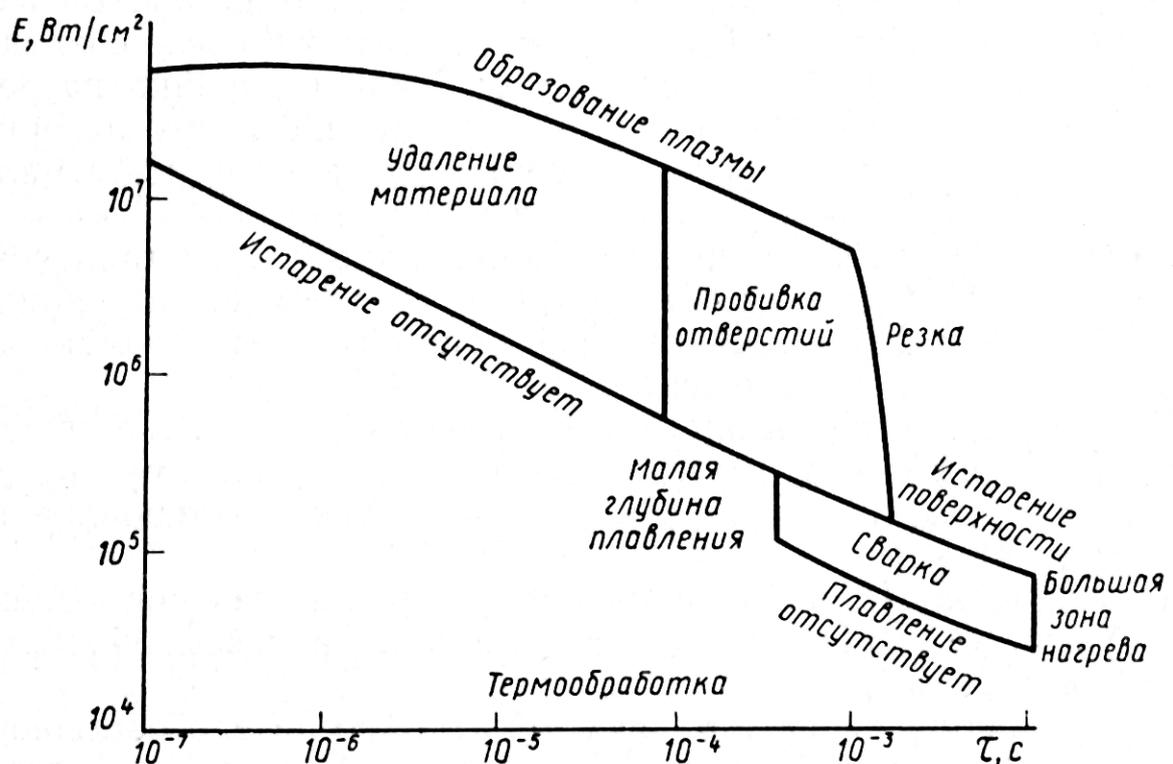


Рис. 10. Диаграмма использования методов лазерной обработки, классифицированных по энергетическому признаку, для реализации различных

технологических процессов

( $E$  — плотность мощности;  $\tau$  — время воздействия излучения).

При  $E = 10^5\text{--}10^4$  Вт/см<sup>2</sup> и  $\tau = 10^{-4}\text{--}10^{-3}$  с происходит только нагрев металла, приводящий к различным структурным изменениям на его поверхности. В этой зоне осуществляются процессы термической обработки — закалка, отжиг. При сокращении времени воздействия ( $\tau = 10^{-5}\text{--}10^{-6}$  с) и увеличении  $E$  на поверхности металла образуются бескристаллические структуры, так называемые аморфные пленки.

При  $E = 10^5\text{--}10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и  $\tau > 10^{-3}$  с осуществляются процессы, связанные с плавлением материала: сварка; наплавка; поверхностное легирование; резка.

При  $E = 10^7\text{--}10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и  $\tau = 10^{-5}\text{--}10^{-4}$  с осуществляются операции, связанные с удалением материала в виде паров или под действием сил реакции паров: пробивка отверстий; маркировка; балансировка; резка в режиме испарения и др.

При  $E > 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и  $\tau < 10^{-3}$  с технологические операции не осуществляются, так как возникающая над поверхностью материала плазма практически полностью поглощает лазерное излучение, препятствуя прохождению его к материалу.

Исходя из данной диаграммы, можно выбрать соответствующее оборудование и метод обработки, необходимый для изготовления того или иного изделия.

### ***5. Особенности технологических процессов лазерной обработки.***

Упрочнение поверхности. Сущность процесса заключается в локальном нагреве участка поверхности детали до сверхкритических температур лазерным излучением. После прекращения действия источника излучения этот участок охлаждается в результате теплоотвода энергии во внутренние слои металла. Нагрев может осуществляться как с оплавлением, так и без оплавления поверхности металла. Основная цель лазерного упрочнения или лазерной термической обработки — это повышение твердости и износостойкости поверхности детали.

Специфической особенностью зоны лазерного воздействия в отличие от воздействия других источников нагрева является ее слоистое строение (рис. 11). Это объясняется тем, что различные слои нагреваются до разных температур. Первый слой — зона плавления — получается при закалке из расплавленного состояния. В большинстве случаев он имеет столбчато-ден-дритное строение, первичные оси кристаллов направлены перпендикулярно нижней границе зоны плавления. Микротвердость первого слоя углеродистых и низколегированных сталей составляет 8000–10 000 МПа и более, что объясняется мелкодисперсностью структур и повышенной дефектностью кристаллической решетки.

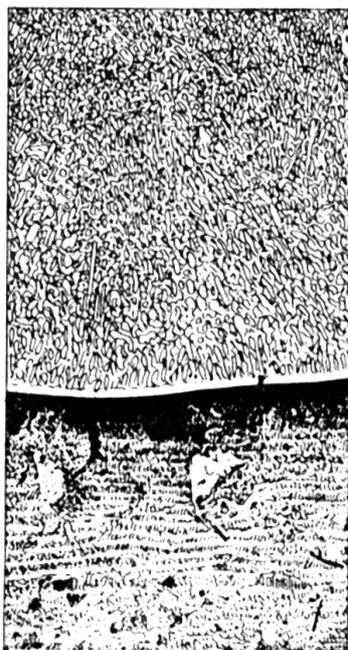


Рис. 11.  
Микроструктура  
термоупрочненного слоя  
(верхняя часть рисунка)  
и основного металла  
(нижняя часть рисунка)

Второй слой — зона закалки из твердой фазы — получается при закалке без плавления. В этом слое осуществляется как полная, так и неполная закалка. Микротвердость сталей в этом слое изменяется в широких интервалах от 2000–3000 МПа (феррит) до 8000–10 000 МПа (мартенсит).

Третий слой — переходная зона — образуется при нагреве металла ниже критической температуры фазовых превращений. Микроструктура и твердость в этом слое могут быть различными в зависимости от исходного состояния сплава. При лазерной обработке предварительно закаленной или отпущенной стали в этом слое происходит понижение микротвердости.

Эффект термообработки зависит также от химического состава материала. Наиболее значительный эффект достигается при обработке углеродистых сталей с содержанием углерода до 1% (например, сталь 45, сталь 40 и др.). Увеличение содержания углерода более 1,3%, так же как и уменьшение до 0,5%, приводит к снижению эффекта термообработки.

Достаточно высокий эффект достигается при поверхностной обработке углеродистых низколегированных сталей типа 30ХГСА, 9Х, 40Х и др.

С увеличением легирующих элементов в стали прирост твердости снижается, т. е. высоколегированные стали менее эффективно упрочняются термической обработкой. Из легированных сталей хорошо упрочняются коррозионно-стойкие стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов (40Х13). Стали аустенитного класса типа 12Х18Н10Т упрочнить практически невозможно.

Наличие большого числа легирующих элементов в стали препятствует диффузионной подвижности углерода, что создает достаточно узкий интервал режимов, где упрочнение возможно. Этот интервал режимов для каждой стали определяется экспериментально. В частности, быстрорежущие стали упрочняются до твердости 650–1050.

Из различного многообразия чугунов наиболее эффективно лазерным излучением обрабатываются серые чугуны перлитного класса. Упрочнение достигается путем превращения перлитной матрицы. В отличие от сталей чугун имеет меньшую зону

лазерного воздействия. При упрочнении чугунов достигается твердость 1100. Белый чугун незначительно упрочняется лазерной обработкой.

Алюминиевые и медные сплавы в большинстве случаев не упрочняются при лазерной обработке. Однако существуют небольшие группы сплавов, где эффект упрочнения все-таки достигается. Из алюминиевых — это литейные сплавы АЛ4, АЛ25, АЛ9, АЛ10В и др. В этих сплавах существенно повышаются твердость и износостойкость.

Из медных сплавов эффект упрочнения достигается на оловянистой бронзе БрОСЦ-4-4-2,5; микротвердость в зоне плавления увеличивается в 1,5–2 раза.

Повышенная твердость поверхности сплавов, упрочненных лазерным излучением, предполагает прежде всего повышение их износостойкости. Износостойкость повышается при трении качения и скольжения. Например, износостойкость стали 45 после лазерной закалки увеличивается в 5–6 раз.

В тех случаях, когда лазерная закалка приводит к повышению однородности фазового состава, заметно увеличивается коррозионная стойкость.

Лазерная обработка с плавлением чугунов, алюминиевых и медных сплавов приводит к повышению коррозионной стойкости зон обработки. При лазерной обработке некоторых видов нержавеющей сталей увеличивается стойкость против межкристаллитной коррозии.

Вместе с тем повышенная концентрационная неоднородность высокоуглеродистых и легированных сталей, сохранение элементов исходных структур (феррита и карбидов), наличие остаточного аустенита, образование повышенной неоднородности при упрочнении с перекрытием зон обработки способствуют ухудшению коррозионной стойкости.

Лазерная наплавка. Процесс заключается в нанесении на поверхность материала покрытия путем расплавления основы и присадочного материала. Причем процесс осуществляется таким образом, что основа подплавляется минимально, а свойства покрытия определяются в основном свойствами присадочного материала.

Высокое качество покрытия достигается при использовании присадочного материала порошков, наносимых предварительно на поверхность подложки. Наиболее технологично использование паст, приготовленных из порошка с неметаллическими связующими. Паста является не только средством удерживания порошка, но и выполняет роль поглощающего покрытия (рис. 12).

Важным является выбор состава связующего вещества для приготовления смеси. Связка должна быть нетоксичной, технологичной при изготовлении пасты и нанесении ее на поверхность, не должна препятствовать формированию наплавочного валика, легко удаляться при расплавлении присадочного материала и не влиять на свойства получаемого покрытия. В наибольшей степени этим требованиям отвечают связки на нитроцеллюлозной основе (например, цапонлак, клейстер и некоторые виды клеев). Эти материалы под воздействием лазерного излучения легко сгорают, не нарушая процесса формирования наплавочного валика.

Для энергетической оценки процесса наплавки используют такой показатель, как удельная энергия, при которой обеспечивается минимальное плавление подложки. Величину этой энергии можно вычислить по формуле  $E = P/(d_n v)$ , где  $P$  — мощность излучения,  $d_n$  — диаметр луча;  $v$  — скорость наплавки.

При наплавке с использованием паст для получения наплавленного слоя толщиной 1 мм необходима удельная энергия  $E = 60–90$  Дж/мм<sup>2</sup>.

При наплавке можно использовать присадочный порошок, подаваемый непосредственно в зону обработки одновременно с лазерным излучением (рис. 13). Порошок может подаваться вибропитателями под действием силы тяжести или путем продува инертным газом. Формирование валика при этом происходит постепенным наращиванием слоя от основания к поверхности.

Этот способ характеризуется минимальным тепловым воздействием на материал подложки;  $E = 30\text{--}50 \text{ Дж/мм}^2$ .

Высококачественные наплавленные слои получают также при лазерной переплавке покрытий, наплавленных плазмой. Плазменные покрытия отличаются низкой адгезионной прочностью и пористостью. В то же время они являются удобной формой подготовки для лазерной переплавки. При плавлении таких покрытий достаточно просто и качественно получают широкие полосы с перекрытиями. Для переплавки плазменного покрытия необходима энергия  $E = 200\text{--}300 \text{ Дж/мм}^2$ .

Наплавленный металл и металл плазменного покрытия после лазерной обработки имеют мелкодисперсную, многофазную структуру с равномерным распределением по объему упрочняющих фаз. Поверхностный слой имеет плотное сварное соединение с металлом основы.

Все рассмотренные методы наплавки могут выполняться как твердотельными лазерами малой мощности, так и газовыми лазерами большой мощности. Твердотельные лазеры используют для прецизионной наплавки в тех случаях, когда производительность не является основным фактором и толщина наплавленного слоя незначительна.

В тех случаях, когда скорость обработки достигает  $100\text{--}150 \text{ м/ч}$ , а толщина покрытий — нескольких миллиметров, необходимо применение лазеров мощностью в несколько киловатт.

Поверхностное легирование. Процессы легирования, так же как закалка и наплавка, предназначены для повышения механических характеристик и коррозионной стойкости поверхностного слоя материала. Сущность процесса заключается в одновременном расплавлении присадочного материала, расположенного на поверхности, и основного

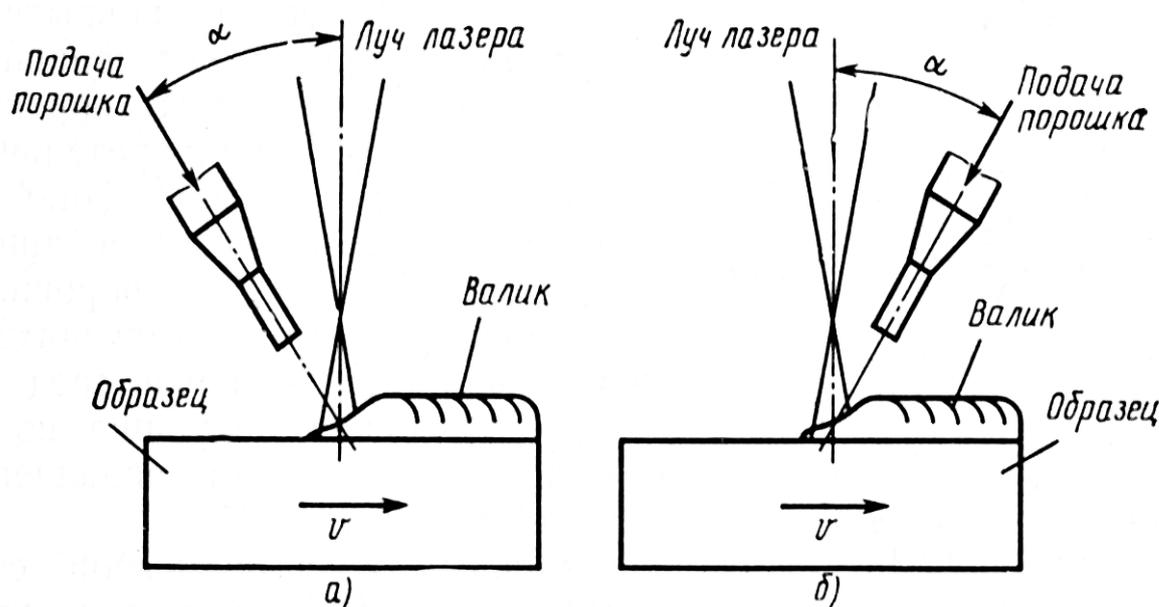


Рис. 13. Схема лазерной наплавки с попутной (а) и встречной (б) подачей порошка в зону обработки.

(обрабатываемого) материала с их интенсивным перемешиванием для получения поверхностного слоя основного металла с добавками присадочного материала (рис. 14).

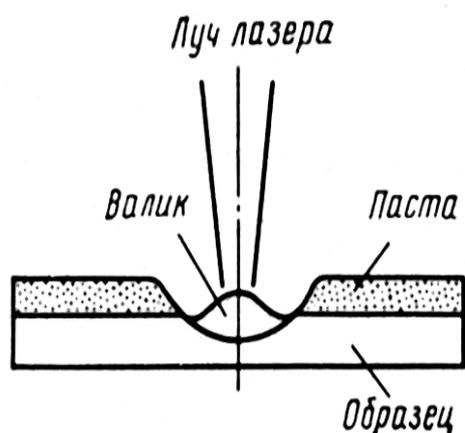


Рис. 14. Схема лазерного легирования с нанесением порошковой пасты на поверхность

Легирующие вещества обычно располагаются на поверхности детали до начала процесса обработки. Наносят их различными способами: электролитическим; напылением; нанесением покрытий в виде пасты из металлического порошка и различных связующих веществ. В некоторых случаях легирующий металл в виде порошка насыпают на поверхность образца либо накатывают в виде фольги.

Аморфизация поверхности — одна из разновидностей лазерной обработки — заключается в получении поверхностного слоя металла с хаотичным расположением атомов относительно друг друга. В литературе этот процесс также называют «остеклованием» поверхности.

Физическая природа аморфизации следующая. При медленном охлаждении расплавленного металла жидкость кристаллизуется в точке плавления с образованием кристаллической решетки атомов. Если охлаждать жидкость достаточно быстро, чтобы атомы не успевали перегруппироваться, то расплав замерзнет при сохранении беспорядочного расположения атомов. Этот процесс может протекать при очень высоких скоростях охлаждения ( $10^5$ – $10^6$ °C/с). Лазерное излучение позволяет создавать подобные скорости охлаждения на поверхности материала в слоях толщиной порядка десятков микрометров.

Лазерная сварка — технологический процесс получения неразъемного соединения частей изделия путем местного сплавления металлов этих частей по их примыкающим поверхностям, в результате чего возникает прочное сцепление, основанное на межатомном взаимодействии, причем источником нагрева служит сконцентрированный поток лазерного излучения.

Наиболее общими энергетическими признаками, характеризующими лазерную сварку, являются плотность мощности ( $E$ ) и длительность лучевого воздействия ( $\tau$ ).

Для осуществления лазерной сварки необходимо иметь плотность мощности  $E = 10^5$ – $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Для осуществления того или иного процесса лазерной сварки возможны следующие сочетания  $E$  и  $\tau$ :

$E = 10^5$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и  $\tau > 10^{-2}$  с (сварка сплошным швом с использованием непрерывного излучения лазера с различными длинами волн);  $E = 10^6$ – $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и  $\tau < 10^{-3}$  с (импульсно-периодическая сварка прерывистым швом);  $E = 10^5$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и  $10^{-3}$  с  $< \tau < 10^{-2}$  с (точечная сварка).

По технологическим признакам различают лазерную сварку с глубоким плавлением и лазерную сварку материалов малых толщин.

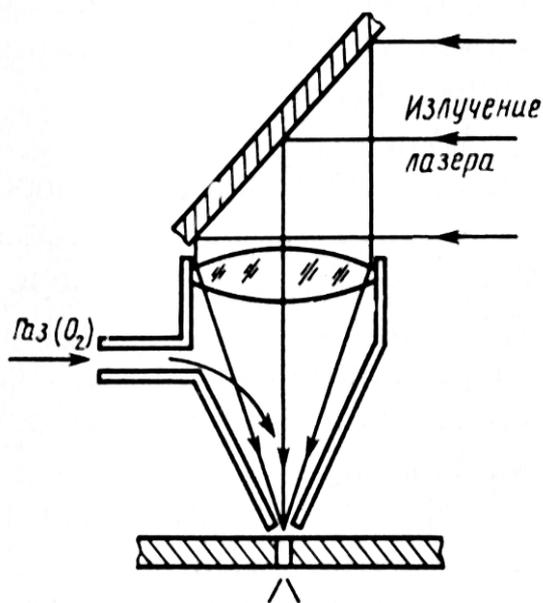


Рис. 15. Схема газолазерной резки.

При сварке с глубоким плавлением соединяют материалы толщиной более 1 мм. Процесс может осуществляться как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме излучения лазера. При непрерывном излучении можно получать узкие глубокие швы при скорости сварки 30–40 мм/с. Сварка по этому методу осуществляется мощными газовыми лазерами. Сваривают исключительно сплошным швом по различным геометрическим контурам.

Лазерная резка — процесс разделения материалов путем местного раскалывания, выплавления, выжигания или испарения сфокусированным пучком лазерного излучения.

Лазерная резка осуществляется в широком диапазоне плотности энергии ( $E = 10^4$ – $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>). Особенность этого процесса заключается в том, что, изменяя количество энергии и механизмы резки, можно разделить практически все известные конструкционные материалы.

Для резки большинства металлов и неметаллов используют способ газолазерной резки, основанный на плавлении и удалении расплавленного металла (рис. 15). Лазерное излучение расплавляет материал на всю глубину, а дополнительный поток газа удаляет жидкую фазу из зоны резки, обеспечивая тем самым разделение материала.

Для химического механизма характерен существенный вклад теплоты реакции горения материала в общий тепловой баланс. Излучение лазера нагревает металл до точки воспламенения, а затем вступает в действие экзотермическая реакция, обеспечивающая основную долю энергии. Наибольший эффект достигается при использовании в качестве окислительной атмосферы кислорода. Этот способ позволяет с помощью лазера мощностью в несколько сотен ватт осуществлять резку листового металла значительной толщины, тогда как при отсутствии кислорода для этого потребовалась бы мощность в несколько киловатт. Для резки с кислородом необходимо иметь плотность мощности  $E = 10^5$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Способ эффективен для материалов, у которых температура плавления оксидов ниже температуры плавления металла. К таким металлам относятся низкоуглеродистая сталь, титан, ниобий, никель, нержавеющие стали.

Для материалов с тугоплавкими оксидами, имеющих малый тепловой эффект реакции горения, применяют резку с физическим механизмом воздействия струи газа. В этом случае газ служит для удаления расплава из зоны реза, а также для охлаждения кромок реза. Основным источником энергии является лазерное излучение. Наиболее

эффективно разделяются этим методом алюминий, медь, цинк и др. Для продувки используют воздух или инертные газы.

Резка с физическим механизмом эффективна для разделения неметаллических материалов, где газ также охлаждает кромки с целью предупредить воспламенение (например, при резке бумаги, тканей и др.). Данный способ требует более высокой, чем в предыдущем случае, плотности мощности ( $E = 10^6\text{--}10^7$  Вт/см<sup>2</sup>).

Разделение материалов путем испарения основано на свойстве лазерного луча с высокой плотностью мощности ( $E = 10^7\text{--}10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) нагревать до температуры кипения и испарять практически все существующие материалы. Испарительный процесс применяют для разделения труднообрабатываемых материалов, таких, как вольфрам, ниобий, тугоплавкие оксиды, композиционные материалы на основе тугоплавких металлов.

Пробивка отверстий. Основными процессами, приводящими к образованию отверстий в непрозрачных материалах лазерными источниками, являются испарение и плавление вещества. При этом отверстие увеличивается в глубину в основном в результате испарения, а по диаметру — в результате плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением пара.

В зависимости от требований, предъявляемых к изделию, применяют два основных способа пробивки отверстий: 1) способ копирования, при котором формируемая поверхность повторяет с той или иной степенью точности форму луча; 2) способ обхода по контуру, при котором форма обрабатываемой поверхности определяется траекторией относительного перемещения луча и обрабатываемой детали.

Оба эти способа могут осуществляться как единичными импульсами, так и серией импульсов, направленных в одну точку.

Многоимпульсная обработка может использоваться для решения двух различных технологических задач: 1) получение максимально глубоких отверстий без особой точности; 2) получение неглубоких отверстий с высокой точностью.

## **Практическое занятие №8. Электронно-лучевая, плазменная и ультразвуковая обработка материалов**

План практического занятия 8.

1. Электронно-лучевая обработка материалов.
2. Плазменная обработка материалов.
3. Ультразвуковая обработка материалов.

Цель занятия: изучить основные применения и особенности использования электронно-лучевой, плазменной и ультразвуковой обработки материалов.

### **1. Электронно-лучевая обработка материалов.**

Электронный луч, необходимый для реализации технологического процесса, создается в специальном приборе — электронно-лучевой пушке, схема которой показана на рис. 35. Пушка имеет катод 1, который нагревается до высоких температур проходящим током или путем бомбардировки электронами вспомогательного катода. Раскаленный катод испускает (имитирует) свободные электроны. Катоды изготавливают из тугоплавких металлов и из специальной керамики. Катод размещен внутри прикатодного электрода 2, изготовленного из нержавеющей стали. На некотором удалении от катода находится ускоряющий электрод (анод) 3 с отверстием. Между катодом и анодом создается электрическое поле высокой напряженности, в результате чего электроны,

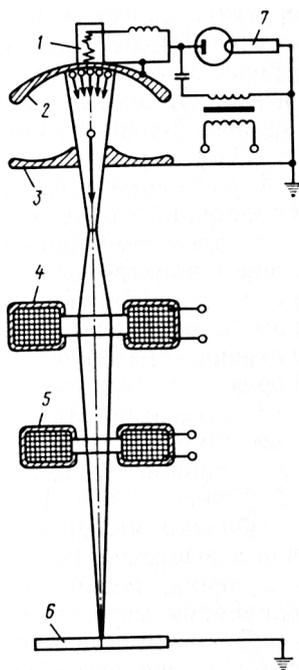


Рис. 1. Схема электронно-лучевой пушки.

ВЫЛ  
ете  
ВШ  
ие с  
кат  
ода  
,  
уск  
оря  
ютс  
я.  
Пр  
ика  
ТОД  
НЫ  
й и  
уск

Ускоряющие электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, имитированные катодом, на пути к аноду приобретают значительную скорость и энергию.

После ускоряющего электрода электроны движутся равномерно. Питание пушки электрической энергией осуществляется от высоковольтного источника 7 постоянного тока. Электроны имеют одинаковый заряд, поэтому они отталкиваются друг от друга, в результате чего диаметр электронного луча увеличивается, а плотность энергии в луче уменьшается.

Для увеличения плотности энергии в луче после выхода электронов из первого анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе 4, представляющей собой катушку, питаемую электрическим током. Фокусировка электронов в пучок минимального размера происходит на некотором удалении от магнитной линзы. В этой области обычно и осуществляется электронно-лучевая обработка. Сфокусированные в плотный пучок летящие электроны ударяются с большой скоростью о малую ограниченную площадку на изделии 6, при этом кинетическая энергия электронов (вследствие торможения в веществе) превращается в теплоту, нагревая металл до очень высокой температуры.

Для перемещения луча по поверхности обрабатываемого объекта на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему 5, которая, изменяя напряженность магнитного поля в катушке, может отклонять луч по любой траектории и с любой частотой. Эти системы используют для установки луча точно по стыку (при сварке), интенсивного перемешивания металла (при сварке и металлургическом плавлении), отклонения луча на значительное расстояние (при напылении).

Свободное движение электронов без соударений и отклонений может быть обеспечено только в вакууме. Кроме того, вакуум необходим для тепловой и химической изоляции раскаленного катода, который в атмосфере воздуха мгновенно перегорает. Наличие высокого напряжения между катодом и анодом создает опасность возникновения дугового разряда между ними в воздушной среде. Сфокусированный электронный луч в атмосфере воздуха или других сред при соударении с ними расфокусируется, в результате чего теряется необходимая для реализации технологического процесса плотность мощности. Все это требует наличия в электронной пушке и на всем пути следования луча до изделия глубокого вакуума.

Для осуществления процесса электронно-лучевой сварки применяют специальные установки. В состав установки входят следующие основные элементы: электронно-лучевая пушка; вакуумная камера; источник питания пушки; вакуумные насосы; система управления установкой; механизмы крепления и перемещения изделия.

Вакуумная камера должна быть газонепроницаемой и достаточно прочной, чтобы выдерживать наружное атмосферное давление. Обычно вакуумные камеры имеют вакуумные вводы для передачи вращательных и поступательных движений, подачи охлаждающей воды. Кроме того, нужны вакуумные электрические вводы для подачи электрической энергии к катоду, магнитным линзам и т. д.

В вакуумных камерах обычно имеются люки, обеспечивающие загрузку изделий, механизмов и устройств, расположенных внутри камеры, а также несколько смотровых люков для наблюдения за процессом сварки.

При электронно-лучевой сварке (так же, как и при лазерной) можно регулировать в широких пределах плотность энергии или мощность. Благодаря этому сварку можно осуществлять как путем теплопроводности, так и путем глубокого плавления, сопровождаемого образованием парогазового канала.

Сварку путем теплопроводности используют для соединения материалов малых толщин в микроэлектронике, приборостроении. Сварка с глубоким плавлением (до нескольких десятков миллиметров) позволяет получать швы малой ширины (так называемые «кинжальные» швы), обеспечивающие минимальные деформации деталей, малые размеры зоны термического влияния, благоприятную структуру шва и высокие механические показатели сварных соединений. С помощью электронно-лучевой сварки соединяют такие тугоплавкие металлы, как вольфрам, ниобий, тантал. Вакуумная защита обеспечивает качественную сварку алюминиевых и титановых сплавов.



Рис. 2. Система подачи деталей и вакуумная камера установки электронно-дуговой сварки.

## 2. Плазменная обработка материалов.

С помощью плазменной струи производят резку и поверхностную обработку различных материалов, нагрев под пайку и термическую обработку, сварку тонколистовых металлов. В струе плазмы можно расплавить различные материалы: сталь, асбоцемент, кристаллокорунд (температура плавления  $2050^{\circ}\text{C}$ ), карбокорунд (температура плавления  $2200^{\circ}\text{C}$ ) и др.

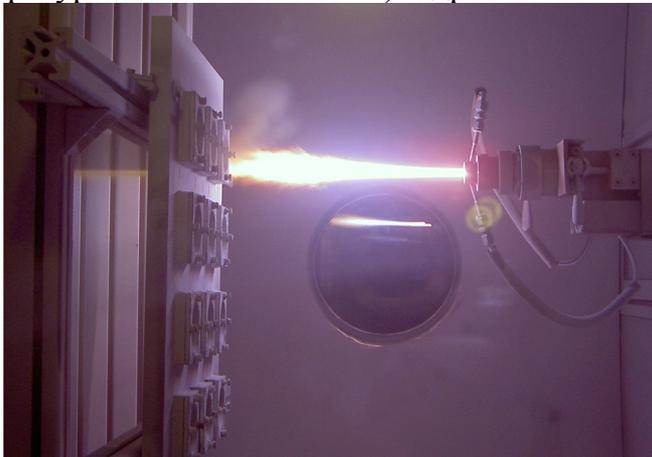


Рис. 3. Плазменная горелка.

Существует несколько схем устройств для получения плазменной струи: отдельные сопло и канал (плазменная струя выделяется из столба дуги; рис. 4а); совмещенные сопло и канал (плазменная струя выделяется из столба дуги; рис. 4б); сопло и канал совмещены со струей, совпадающей со столбом дуги (рис. 4в).

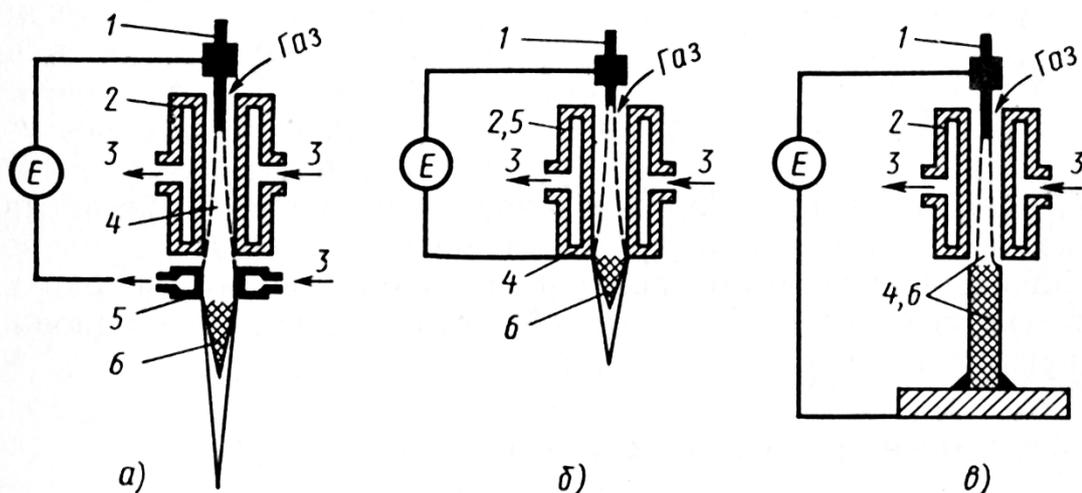


Рис. 4. Схема устройств для создания плазменной струи: а, б — независимая плазма, в — зависимая плазма. Пояснения см. в тексте.

Плазменная струя создается дуговым разрядом 4, возбуждаемым электродом / и электродом 5 с отверстием, выполняющим роль сопла. Дуговой разряд происходит в канале 2, электрически изолированном от сопла и электрода. Через канал вдоль столба дуги пропускается газ, который, проходя по направлению от электрода к соплу через плазму дуги, ионизируется и выходит из сопла в виде ярко светящейся струи 6. Устройство для создания плазмы охлаждается водой 3. Малоионизированная сравнительно холодная струйная оболочка газа, соприкасающаяся со стенками сопла и канала, изолирует последнее от теплового воздействия разряда. Опусканием электрода в канал регулируют напряжение дуги и мощность плазменной струи.

При создании плазменной струи по схеме со совмещенным каналом и соплом (см. рис. 4б) электрически активное пятно дуги в зависимости от состава и расхода газа, длины канала и других факторов располагается или на боковой поверхности канала, или на его торце. В этом случае длина дуги не является независимым параметром регулирования эффективной мощности плазменной струи.

В обоих случаях плазменную струю, выделенную из токоведущего столба дуги, используют как независимый источник теплоты, т. е. не связанный электрически и механически с изделием.

При обработке плазменной струей электропроводных металлов для увеличения эффективности тепловой мощности, вводимой в изделие, последнее можно подключить к источнику питания (см. рис. 4в). В этом случае плазменная струя полностью совпадает с токоведущим столбом разряда, частично проходя через изолированный канал 2.

Температура плазменной струи, выделенной из токоведущего столба дуги, а также совпадающей со столбом при использовании в качестве защитного газа аргона, достигает 10 000–15 000 К и выше и обусловлена в основном высокой плотностью энергии в столбе разряда в результате его обжата газовым потоком в узком канале плазменной головки.

При резке используют аргон и его смесь с водородом (до 35% H<sub>2</sub>). Скорость резки зависит от толщины разрезаемого металла, параметров плазменной головки, силы тока и напряжения. Скорость резки струей прямого действия при прочих равных условиях выше скорости резки струей независимого действия.

### *3. Ультразвуковая обработка материалов.*

Известны четыре основные области применения энергии ультразвука при механической обработке (рис. 5): 1) снятие заусенцев с мелких деталей свободно направленным абразивом (рис. 5а); 2) ультразвуковая размерная обработка деталей из хрупких материалов абразивными зёрнами, получающими энергию от специального инструмента (рис. 5б); 3) очистка и смазка рабочей поверхности круга при работе шлифовального станка (рис. 5в); 4) сообщение вынужденных ультразвуковых колебаний малой амплитуды режущим инструментом (металлическим и абразивным) для интенсификации обычных процессов резания труднообрабатываемых материалов (рис. 5г).

Наряду с указанными методами в промышленности применяют совмещенные методы: ультразвуковой и электрохимический, лазерный и ультразвуковой. Реализация в этих случаях нескольких рабочих процессов в одной технологической операции является весьма эффективной — удается значительно интенсифицировать оба рабочих процесса.

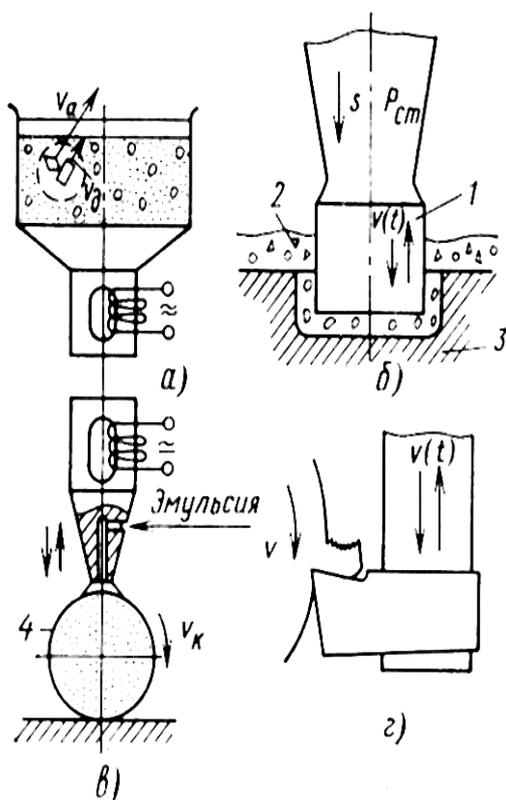


Рис. 5. Принципиальные схемы ультразвуковых методов механической обработки:

*а* — ультразвуковое снятие заусенцев;  
*б* — ультразвуковая размерная обработка хрупких материалов;  
*в* — очистка шлифовального круга 4;  
*г* — ультразвуковая интенсификация обычных процессов резания.

Ультразвуковое снятие заусенцев. Эрозионная и кавитационная активность звукового поля возрастает при добавлении в жидкость мелких абразивных зерен, размер которых соизмерим с радиусом действия ударной волны, возникающей при захлопывании кавитационной полости. Ультразвуковое снятие заусенцев (см. рис. 5а) осуществляется в ультразвуковой ванне, заполненной водно-глицериновой смесью, в которой взвешены мелкие абразивные зерна. В качестве абразива применяются диамантин, электрокорунд, карбид кремния. Кроме чисто кавитационного разрушения наиболее слабых участков деталей — заусенцев, происходит дополнительная обработка их абразивными зернами. При возникновении акустических течений зерна абразива и детали из-за различной плотности и размеров получают неодинаковые скорости. При взаимном проскальзывании абразивных зерен и деталей происходит снятие заусенцев.

Усовершенствование этого способа путем создания в ультразвуковой ванне избыточного статического давления позволяет значительно интенсифицировать эрозию; производительность процесса снятия заусенцев увеличивается в 10 раз и более. Повышенное статическое давление в ультразвуковой ванне создается сжатым воздухом или азотом. Исследованиями процесса удаления заусенцев установлено, что кавитационные пузырьки сосредотачиваются в месте соединения заусенца с деталью. При атмосферном давлении малые пульсации пузырьков обычно не приводят к разрушению заусенцев, а при повышении давления заусенец разрушается примерно через 3 с.

Ультразвуковая размерная обработка. Схема этого процесса простая (см. рис. 5б). Инструмент *1* совершает ультразвуковые колебания, а в рабочую зону подаются взвешенные в воде зерна абразива *2*. Инструмент играет роль молота: периодически ударяет по зернам абразива и выкалывает небольшие частицы материала обрабатываемой детали *3*.

Разрезание и раскрой образцов из кварца, кремния, феррита и рубина можно выполнять одиночным (рис. 6а) и многоместным (рис. 6б) инструментом. Обработку одиночным инструментом осуществляют в опытном производстве и при значительных

размерах заготовок (диаметром более 20 мм и толщиной свыше 2 мм). При отрезке пластин малой толщины (менее 0,5 мм) одиночным инструментом заготовки часто ломаются из-за возникновения поперечных колебаний тонкого инструмента.

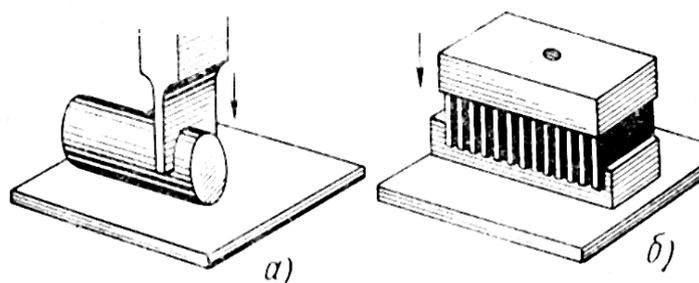


Рис. 6. Схемы  
ультразвукового разрезания  
заготовок:

*a* — одиночным инструментом;  
*б* — многоместным  
инструментом.

Из этих соображений, а также для повышения производительности более выгодным является применение многоместного инструмента. Для предотвращения сколов обрабатываемого материала на выходе инструмента заготовку перед ультразвуковой обработкой приклеивают к подложке.

Данную технологию, в частности, широко применяют при изготовлении пластин-заготовок для пьезодатчиков. Время ультразвуковой резки (абразив — карбид бора № 3); примерно вдвое меньше, чем при алмазной резке, ранее применявшейся для изготовления этих заготовок.

Ультразвуковая технология получения прямоугольных пластин-заготовок предотвращает сколы на кромках деталей, т. е. обеспечивает высокое их качество. При этом неизбежны отходы материала на перемычки, связывающие заготовки после разрезания, однако эти отходы окупаются разницей в толщине реза. Преимущества ультразвуковой резки перед резкой алмазными кругами возрастают при увеличении количества лезвий в инструменте.

Формообразование деталей и заготовок по наружному контуру чаще всего производят путем вырезания их из плоских заготовок-пластин. Эта операция выполняется за один или несколько переходов в зависимости от сложности формы и размеров вырезаемого контура. За одну операцию получают детали и заготовки, имеющие сравнительно простую форму (круглая, квадратная, шестигранная, эллипсообразная и др.).

Особенно эффективно применение ультразвука при вырезании заготовок некруглой формы; производительность процесса увеличивается в 10–20 раз по сравнению с абразивными методами. Более сложные по форме детали и заготовки получают за несколько операций, обрабатывая контур по элементам. За несколько операций (обычно за две) вырезают различные прямоугольные и квадратные элементы из пьезокварца, турмалина, керамики и других хрупких материалов.

Обработка отверстий также является распространенной операцией ультразвуковой размерной обработки. На ультразвуковых установках обрабатывают отверстия различной формы размером от 0,2 до 60–80 мм и глубиной до 20–30 мм. Необходимо отметить, что обработку на глубину более 15–20 мм удастся достаточно эффективно вести лишь при активных способах подвода абразивной суспензии (прокачка под давлением и вакуумный отсос). Ультразвуковую обработку глубиной более 30 мм целесообразно вести алмазным инструментом на металлической связке.

Ряд работ, выполняемых ультразвуковым методом (трепанация стержней, обработка глухих отверстий диаметром менее 1 мм), другими методами выполнить невозможно. В частности, применение электронно-лучевой и лазерной технологии при

обработке полупроводниковых материалов существенно ограничено из-за структурных изменений в поверхностных слоях, вызванных высокими температурами в рабочей зоне.

Ультразвуковая технология перспективна и при обработке самых твердых в природе веществ — натуральных и синтетических алмазов. Ультразвук применяют при чистовой обработке рабочего канала алмазных волок, шлифования волок, улучшении свойств алмазных порошков, повышении прочности алмазно-металлических композиций.

Наиболее эффективной областью ультразвуковой технологии является изготовление алмазных фильер (волок) для волочения проволоки из черных и цветных металлов с наибольшим рабочим диаметром до 2 мм.

Ультразвуковые колебания применяют также при лазерной обработке с целью повышения точности процесса формообразования. Деталь, в которой лазером необходимо обработать отверстие, получает ультразвуковые колебания вдоль своей оси с амплитудой 5–10 мкм. Ультразвуковые колебания, сообщаемые детали в процессе лазерной обработки, способствуют более стабильному протеканию процесса и лучшей эвакуации частиц расплавленного металла. В результате уменьшаются размеры входных и выходных конусов, т. е. повышается точность обработки.

Гравирование. Ультразвуковое гравирование стеклянных изделия можно выполнить тремя способами: 1) рисунок образуют сочетанием неглубоких (0,2–0,4 мм) линий и участков узора, вырезанных ультразвуковым способом, с оставшимися нетронутыми участками полированной поверхности изделия; 2) линии рисунка наносят последовательно непрофилированным инструментом, обычно вручную; 3) объемное ультразвуковое гравирование. В первом случае инструмент имеет на торце гравированный на глубину 0,5–1,5 мм рисунок, который отпечатывается сразу по всей поверхности за несколько секунд. Недостаток способа — ограниченный размер рисунка (диаметр не более 100–120 мм) и высокая стоимость изготовления инструмента, которым удается сделать сравнительно небольшое количество отпечатков (100–300). Во втором случае обычно применяют установку с ручной акустической головкой. Рисунок выполняют вручную или по трафарету тонким инструментом. Способ эффективен для маркировки стеклянных изделий. Для ручного гравирования и обработки небольших отверстий в изделиях из стекла и керамики обычно применяют небольшие переносные установки с выходной мощностью генератора 50–100 Вт. В третьем случае ультразвуковой метод применяют для изготовления сувениров и других художественных изделий из минералов и других полудрагоценных камней.

Внедрение ультразвука при гравировании взамен травления позволяет сократить технологический цикл, улучшить условия труда, исключить применение сильнодействующих кислот.

## **Практическое занятие №9. Новые оптические материалы и их применение.**

### **Часть 1. Полупроводниковые материалы**

План практического занятия 24.

1. Типы полупроводниковых материалов.
2. Фотогальванические устройства.
3. Полупроводниковые лазеры.
4. Твердотельные фотоприемники.

Цель занятия: рассмотреть основные применения полупроводниковых материалов и структур в качестве активных оптических сред.

Основные свойства рассмотренных соединений и основные области их применения приведены в таблице.

Полупроводниковые материалы используются в оптических системах, главным образом, для создания светоизлучающих диодов, полупроводниковых лазеров различных типов, фотоприемников (за счет внутреннего фотоэффекта), а также как пассивные материалы линейной и нелинейной оптики инфракрасного диапазона.

Оптические свойства полупроводников могут изменяться в результате квантовых эффектов, когда по крайней мере один из размеров материала становится менее нескольких сотен ангстрем. В настоящее время нашли практические применения структуры с квантовыми ямами — структуры, в которых тонкая пленка вещества ограничена двумя слоями ограничивающего материала (барьера). Оптические свойства таких систем определяются параметрами обеих сред — пленки и барьера, а также их толщинами. Кроме того, существенную роль могут играть дополнительные факторы, такие, как качество интерфейса и взаимопроникновение контактирующих материалов.

Большинство имеющихся справочников ограничиваются структурами, образованными веществами с одинаковыми или близкими параметрами кристаллической решетки. Различия параметров решетки элементов структуры вызывает появление в них механических напряжений. Если возникающее механическое напряжение превышает критическое значение, в структуре возникают дислокации, трещины, что приводит к деградации материала. Критическая величина напряжения определяется величиной различия параметров решетки, и толщинами слоев. Толстые слои требуют точного соответствия параметров структур, тогда как тонкие, соответствующие появлению квантовых эффектов, могут значительно отличаться. Это снижение требований к согласованию параметров решеток дает возможность расширять возможности создания структур с квантовыми эффектами. В связи с этим подобные системы с напряженными квантовыми ямами все шире используются в последнее время при создании полупроводниковых диодов и лазеров.

## Полупроводниковые III-V оптоэлектронные материалы

Системы	Подложка	Пленка	Напряженная пленка	Основные приложения
AlGaAs	GaAs	GaAs	$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ $0 < x < 0.25$	Излучатели, модуляторы: 0.75–1.1 мкм
		$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $0 < x < 1$		Детекторы: 0.4–1.1 мкм
		AlAs		Активные фильтры: 0.8–0.9 мкм
GaInAsP/InP	InP	$\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$	$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ $0.4 < x < 0.6$	Модуляторы на 1.3 мкм и 1.55 мкм
		$\text{GaIn}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ $x = 0.47y; 0 < y < 1$	$\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ $0 < x < 0.2$	
		InP		
AlGaInAs/InP	InP	$(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ $0 < x < 1$	$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ $0.4 < x < 0.6$	Модуляторы на 1.3 мкм и 1.55 мкм
		$\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$		
AlGaInP	GaAs	GaAs	$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ $0 < x < 0.25$	Излучатели в красной области
		$\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$ $0.4 < x < 0.6$	
		$(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ $0 < x < 1$		
		$\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$		
AlGaAsSb/ GaInAsSb/ GaSb	GaSb	GaSb		Излучатели и детекторы: 2–3 мкм
		$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ $x = 12y, 0 < x < 1$		
		$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ $x = 1.1y; 0 < x < 1$		
GaAsP	GaAs или GaP	GaAs (на подложке GaAs); GaP (на подложке GaP)	GaAsP	Светодиоды видимой области

### *Системы Al–Ga–As*

Системы Al–Ga–As изучены наиболее подробно; это связано с тем, что они напыляются без напряжений на подложку GaAs во всем диапазоне составов — для большинства других систем такое согласование параметров решетки достигается только при использовании сложных четырехкомпонентных составов.

Система Al–Ga–As является модельной для полупроводников III–V; именно на ней обычно отрабатываются новые идеи и устройства, прежде чем перенести их на другие, более сложные составы. Эта система широко используется для создания устройств электроники и оптоэлектроники. В частности, в электронике эти составы используются для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов (ВПЭ-транзисторов), биполярных транзисторов на гетеропереходе, резонансных туннельных диодов. Среди оптоэлектронных устройств: лазеры и диоды, фотогальванические элементы, высокоскоростные фотодетекторы, оптические модуляторы, активные (насыщающиеся) фильтры.

Как и у большинства других полупроводниковых систем, с ростом ширины запрещенной зоны наблюдается снижение показателя преломления и показателя поглощения. Такое соотношение параметров облегчает создание лазерных диодов: свет легко проникает в гетероструктуру через окно из материала с широкой запрещенной зоной при ограниченном доступе электронов к центрам безызлучательной рекомбинации. Типичное оптоэлектронное устройство на основе этой системы представляет собой слой GaAs (или напряженного GaInAs), изолирующий волноводный слой, и прозрачные слои фотодетектора на основе AlGaAs.

Длинноволновая граница рабочего диапазона излучателей и детекторов на основе ненапряженных составов AlGaAs определяется шириной запрещенной зоны GaAs и составляет 870 нм. Использование квантовых ям на основе напряженного  $Ga_{1-x}In_xAs$  (типичные значения  $x = 0.2–0.25$ ) позволяет расширить этот диапазон ниже 1 мкм, что включает практически значимые длины волн 980 нм (накачка допированных эрбием оптоволоконных усилителей) и 1.06 мкм (Nd-YAG лазеры).

### *Системы GaInAsP/InP*

Состав четырехкомпонентных систем  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  определяется параметрами  $x$  и  $y$ , которые могут изменяться независимо. Наиболее важными из них являются те, параметры структуры которых совпадают с InP, и именно они обозначаются GaInAsP/InP. Эти структуры могут рассматриваться как смеси двух более простых соединений  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  и InP, каждое из которых также обладает структурой InP. Из них соединение  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  характеризуется меньшей шириной запрещенной зоны и большим показателем преломления, по сравнению с InP. Такое сочетание свойств и совпадение параметров решетки дает возможность создавать на их основе двойные гетероструктуры и системы с квантовыми ямами для излучающих устройств.

Большинство оптоэлектронных устройств на основе этих гетероструктур работают на длинах волн 1,3 мкм и 1,55 мкм. Это могут быть диодные лазеры на основе двойных гетероструктур или с лазеры с квантовой точкой (см. рис.). Производятся также детекторы инфракрасного излучения с активным слоем  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ , работающие на длинах волн короче ширины запрещенной зоны (1,65 мкм); таким образом, их рабочий диапазон включает и используемые в системах телекоммуникаций длины волн 1,3 мкм и 1,55 мкм.

### *Системы AlGaInAs/InP*

Наиболее интересными, с точки зрения приложений, среди этих систем являются те, параметры решетки которых совпадают с InP. Такие системы можно представить как смесь двух компонент:  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  и  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ , параметры каждой из которой соответствуют InP. Наименьшая ширина запрещенной зоны для этих составов равна 0.75 эВ (состав  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ), наибольшая – 1,45 эВ (состав  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ ), что очень близко к рассмотренному ранее семейству GaInAsP/InP. Как следствие, их применения практически совпадают, а предпочтения определяются удобствами технологий синтеза гетероструктур (AlGaInAs/InP более удобны для молекулярно-лучевой эпитаксии).

### *Системы AlGaInP*

Параметры решеток различных составов четырехкомпонентной системы AlGaInP меняются в широком диапазоне, и могут соответствовать как решетке InP, так и GaP. Однако наиболее часто применяются составы с решетками промежуточных размеров, соответствующие решетке GaAs. Эти составы можно рассматривать как смеси  $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  и  $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$  – их параметры решеток совпадают с GaAs. Основное применение – работающие в красной области спектра лазеры на двойных гетероструктурах, либо лазеры с квантовой ямой; в последнем случае изолирующим слоем является слой, обогащенный алюминием.

### *Системы GaSb*

Существуют два четырехкомпонентных состава, AlGaAsSb и GaInAsSb, параметры решеток которых совпадают с параметрами подложки GaAs. Смешивание GaSb с  $\text{AlAs}_{0.083}\text{Sb}_{0.917}$  увеличивает ширину запрещенной зоны (по сравнению с чистым GaSb), тогда как примесь  $\text{InAs}_{0.911}\text{Sb}_{0.089}$  сужает запрещенную зону, а параметры ячейки остаются неизменными. Это позволяет широко варьировать возможные оптические диапазоны устройств на основе этих систем.

Наиболее часто они используются в качестве фотоприемников либо излучателей в инфракрасном диапазоне 2–3 мкм. При этом GaInAsSb играет роль активного (излучающего либо поглощающего свет) слоя, а AlGaAsSb – роль запирающего слоя или окна детектора.

### *Системы GaAsP*

Электронная структура систем  $\text{GaAs}_{x-1}\text{P}_x$  похожа на  $\text{AlGa}_{x-1}\text{As}_x$ . Долгое время это были основные материалы для светодиодов видимого диапазона, хотя сейчас появляются более эффективные среды для этих применений. Их сильной стороной является сравнительно простые технологии получения гетероструктур, что снижает себестоимость производства, однако сложности согласования геометрических параметров структур активной среды и подложки приводит к низкому качеству получаемых пленок. Как правило, сложные многокомпонентные пленки на основе этих структур выращиваются на подложках GaAs или GaP без согласования геометрических параметров, что приводит к большому числу структурных дефектов. Системы с меньшими ширинами запрещенной зоны используются для создания светодиодов в красной области спектра. Более широкозонные системы, с более сложной электронной структурой, работают в желто-зеленой части спектра – хотя и обладают значительно более низкой квантовой эффективностью.

## 2. Фотогальванические устройства.

Фотогальванические ячейки производят прямое преобразование света в электричество.

Открытие фотогальванического эффекта обычно приписывают Беккерелю, в 1839 году, однако фототок, который он наблюдал при освещении платиновых электродов, покрытых галогенидами серебра, в водном растворе, в настоящее время принято описывать как фотоэлектрохимический эффект. «Современную версию» фотогальванического эффекта обнаружили в 1877 году при исследовании фотопроводимости в селене, Первая действующая фотогальваническая ячейка была создана Чарльзом Фрицем (Charles Fritts) в 1883 г.; она состояла из слоя селена, нанесенного на железную подложку и покрытого полупрозрачной пленкой золота. Фотодетекторы такой конструкции были коммерциализованы в 1930 году и до сих пор используются в качестве фотоэкспонометров.

Эффективность преобразования энергии в этих ячейках была существенно менее 1% из-за большого темнового тока. Уже первые исследования *p-n* структур в кремнии позволили достичь эффективности преобразования 4.5%. К 60-м годам была достигнута эффективность 10%, и фотогальванические батареи нашли применение уже на первых космических аппаратах; в 70-х годах начались первые «земные» применения солнечных батарей. Основным материалом для их промышленного производства остается кремний.

Типичная объемная фотогальваническая ячейка представляет собой полупроводниковую пластину толщиной не менее 300 мкм, на глубине 0,5 мкм которой находится *p-n* переход. Переход создается путём легирования материала с определённым типом проводимости (т. е. или *p*- или *n*- типа) примесью, обеспечивающей создание поверхностного слоя с проводимостью противоположного типа. Концентрация легирующей примеси в этом слое должна быть значительно выше, чем концентрация примеси в базовом (первоначальном) материале, чтобы нейтрализовать имеющиеся там основные свободные носители заряда и создать проводимость противоположного знака. У границы *n*- и *p*- слоёв в результате перетекания зарядов образуются обеднённые зоны с нескомпенсированным объёмным положительным зарядом в *n*-слое и объёмным отрицательным зарядом в *p*-слое. Эти зоны в совокупности и образуют *p-n* переход. Возникший на переходе потенциальный барьер (контактная разность потенциалов) препятствует прохождению основных носителей заряда, т. е. электронов со стороны *p*-слоя, но беспрепятственно пропускают неосновные носители в противоположных направлениях. Это свойство *p-n* переходов и определяет возможность получения фото-ЭДС при облучении ячейки солнечным светом. Созданные светом в обоих слоях ячейки неравновесные носители заряда (электронно-дырочные пары) разделяются на *p-n*-переходе: неосновные носители (т.е. электроны) свободно проходят через переход, а основные (дырки) задерживаются. Таким образом, под действием солнечного излучения через *p-n* переход в обоих направлениях будет протекать ток неравновесных неосновных носителей заряда – фотоэлектронов и фотодырок, что как раз и нужно для работы ячейки. Если теперь замкнуть внешнюю цепь, то электроны из *n*-слоя, совершив работу на нагрузке, будут возвращаться в *p*-слой и там рекомбинировать (объединяться) с дырками, движущимися внутри ячейки в противоположном направлении. Для сбора и отвода электронов во внешнюю цепь на поверхности полупроводниковой структуры ячейки имеется контактная система. На передней, освещённой поверхности преобразователя контакты выполняются в виде сетки или гребёнки, а на тыльной могут быть сплошными.

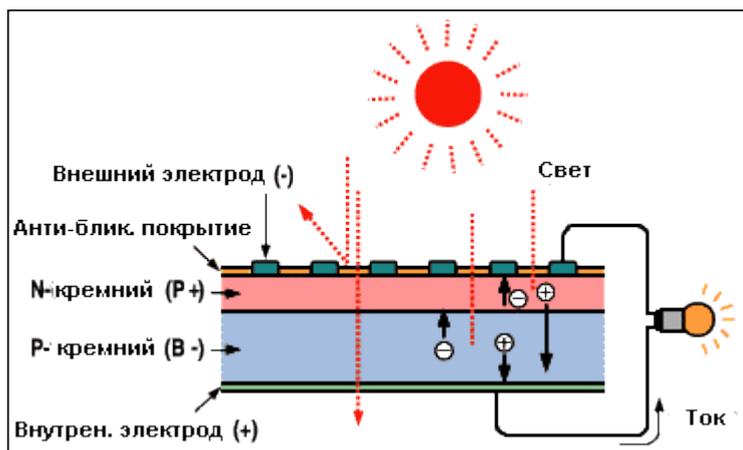


Рис. 1. Строение ячейки солнечной батареи.

Все виды фотогальванических ячеек можно разделить на три поколения. Ячейки первого поколения изготавливаются на основе кремниевых пластин, достаточно толстых, чтобы механически выдерживать собственный вес – не менее 0.3 мм. Производство таких пластин (как монокристаллических, так и поликристаллических) составляет в настоящее время свыше 90%. Типичная эффективность преобразования 12–15%. Основной ограничивающий их применение фактор – это высокая стоимость кремния требуемой чистоты.

Ячейки второго поколения изготавливаются на основе тонких полупроводниковых пленок, что снижает их цену при некотором снижении эффективности преобразования. Толщина активного полупроводникового слоя этих ячеек составляет несколько микрон, что требует наличия механической основы или жесткого прозрачного покрытия. В то же время наличие механически прочной основы позволяет на одной подложке формировать одновременно большой массив ячеек. Основные активные материалы таких ячеек:  $\alpha$ -кремний, поликристаллический кремний, CdTe, CuInS<sub>2</sub>; эффективность таких ячеек составляет до 10%. В последнее время появились ячейки этого же типа, с использованием органических полупроводниковых материалов: при сравнительно низкой цене и простоте получения тонких пленок на их основе, эффективность органических ячеек в настоящее время не превышает 5%.

Ячейки третьего поколения изготавливаются на основе полупроводниковых тонкопленочных гетероструктур. Наиболее распространены двухслойные структуры аморфный Si/микроструктурный Si, аморфный Si/аморфный Ge, структуры на основе соединений III-V групп. Широкие возможности варьирования составов гетероструктур позволяют достигать рекордных эффективностей преобразования (десятки процентов), однако при очень высокой стоимости производства.

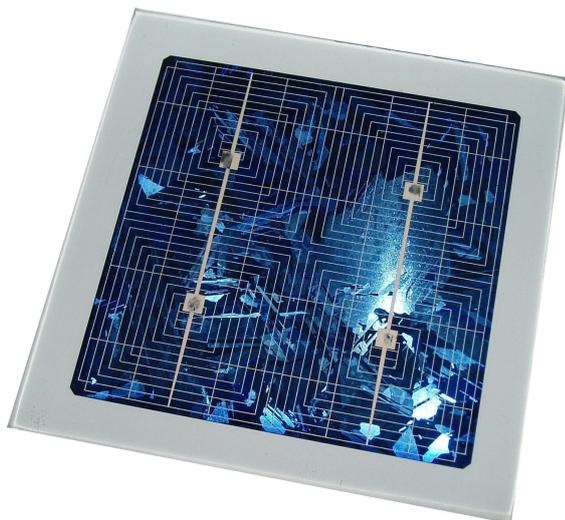


Рис. 2. Секция солнечной батареи первого типа.

Направление светоиндуцированного тока противоположно разрешенному току через полупроводниковый диод. Идеальную ячейку можно рассматривать как диод, параллельно которому соединен источник тока с ЭДС, пропорциональной интенсивности падающего света.

Сила тока через ячейку описывается выражением:

$$I = I_L - I_0[\exp(eV/kT) - 1]$$

где  $I_L$  – светоиндуцированный ток,  $I_0$  – темновой ток в насыщении,  $e$  – заряд электрона,  $V$  – напряжение на ячейке,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

Основные необратимые потери энергии в ячейках связаны со следующими факторами:

- отражением солнечного излучения от поверхности,
- прохождением части излучения без поглощения,
- рассеянием энергии фотонов на колебаниях решётки,
- рекомбинацией образовавшихся фотопар,
- внутренним сопротивлением преобразователя.

Для уменьшения всех видов потерь энергии разрабатываются и успешно применяются различные мероприятия. К их числу относятся:

- использование полупроводников с оптимальной для солнечного излучения шириной запрещённой зоны;
- направленное улучшение свойств полупроводниковой структуры путём её оптимального легирования и создания встроенных электрических полей;
- переход от гомогенных к гетерогенным и варизонным полупроводниковым структурам;
- оптимизация конструктивных параметров (глубины залегания р-п-перехода, толщины базового слоя, частоты контактной сетки и др.);
- применение многофункциональных оптических покрытий, обеспечивающих просветление, терморегулирование и защиту от космической радиации;
- разработка ячеек, прозрачных в длинноволновой области солнечного спектра за краем основной полосы поглощения;

– создание каскадных ячеек из специально подобранных по ширине запрещённой зоны полупроводников, позволяющих преобразовывать в каждом каскаде излучение, прошедшее через предыдущий каскад, и пр.

Также существенного повышения КПД удалось добиться за счёт создания преобразователей с двухсторонней чувствительностью (до +80% к уже имеющемуся КПД одной стороны), применения люминесцентно переизлучающих структур, предварительного разложения солнечного спектра на две или более спектральные области с помощью многослойных плёночных светоделителей (дихроичных зеркал) с последующим преобразованием каждого участка спектра.

### 3. Твердотельные фотоприемники.

Фотоприемник – это устройство, преобразующее оптическую энергию в электрическую. Основным механизмом, который используется с этой целью в полупроводниковых устройствах, является фотопроводимость. Подобно тому, как это происходит в фотогальванических ячейках, поглощение кванта света приводит к образованию пары электрон–дырка. Эти свободные носители заряда начинают двигаться под действием приложенного поля, что и приводит к росту проводимости вещества. (рис. 7). Существует ряд физических механизмов, которые приводят к усилению фототока в процессе распространения носителей, что усиливает эффект.

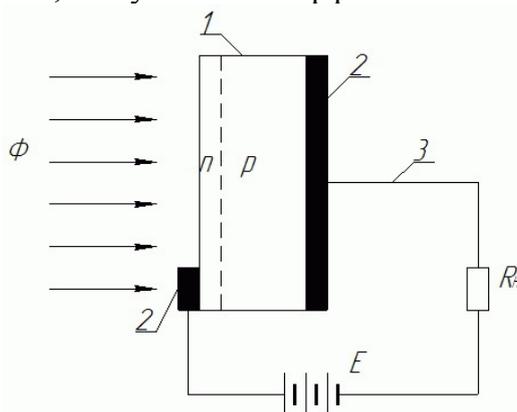


Рис. 7. Структурная схема фотодиода. 1 — кристалл полупроводника; 2 — контакты; 3 — выводы;  $\Phi$  — поток электромагнитного излучения; E — источник постоянного тока;  $R_n$  — нагрузка.

Простейший тип полупроводникового фотоприемника – это полупроводниковая пластина с парой электродов. Более эффективны фотоприемники на основе p-n перехода или на основе структур металл–полупроводник (структуры с барьером Шоттки).

Основные типы фотодиодов:

*PIN фотодиод*: в p-i-n структуре средняя i-область заключена между двумя областями противоположной проводимости. При достаточно большом приложенном поле оно пронизывает i-область, и свободные носители, появившиеся за счет поглощения фотонов при облучении, ускоряются электрическим полем p-n переходов. Это дает выигрыш в быстродействии и чувствительности. Повышение быстродействия в p-i-n фотодиоде обусловлено тем, что процесс диффузии заменяется дрейфом электрических зарядов в сильном электрическом поле. Уже при  $U_{обр} \approx 0.1$  В p-i-n фотодиод имеет преимущество в быстродействии.

Основные достоинства PIN диода перед обычным: 1) возможность повышения чувствительности в длинноволновой части спектра за счет изменения ширины i-области; 2) высокая чувствительность и быстродействие; 3) малое рабочее напряжение.

Недостатки: сложность получения требуемой высокой чистоты i-области.

*Фотодиод Шоттки* (фотодиод с барьером Шоттки): структура металл-полупроводник. При образовании структуры часть электронов переходит из металла в полупроводник p-типа.

*Лавинный фотодиод*: в структуре используется лавинный пробой. Он возникает, когда энергия фотоносителей превышает энергию образования электронно-дырочных пар. Диоды этого типа очень чувствительны: значение коэффициентов внутреннего усиления составляет 10–100 в зависимости от типа.

Для реализации лавинного умножения необходимо выполнить два условия: 1) электрическое поле области пространственного заряда должно быть достаточно большим, чтобы на длине свободного пробега электрон набрал энергию, большую, чем ширина запрещенной зоны; 2) ширина области пространственного заряда должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега.

*Фотодиод с гетероструктурой*. Гетеропереходом называют слой, возникающий на границе двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны. Один слой p+ играет роль «приемного окна». Заряды генерируются в центральной области. За счет подбора полупроводников с различной шириной запрещенной зоны можно перекрыть весь диапазон длин волн. Недостаток – сложность и, как следствие, высокая стоимость изготовления.

### **Практическое занятие №10. Новые оптические материалы и их применение.**

#### **Часть 2. Диэлектрические и композитные материалы**

План практического занятия 10.

1. Оптические модуляторы
2. Оптические волокна
3. Волноводы
4. Оптические системы хранения информации
5. Дисплеи
6. Нелинейная оптика

Цель занятия: рассмотреть основные применения диэлектрических материалов и структур в качестве активных оптических сред.

#### **1. Оптические модуляторы**

Основные характеристики модулятора оптического излучения:

1. Быстродействие.
2. Линейность (линейная связь выходного и управляющего сигнала). Эта характеристика определяет динамический диапазон работы модулятора; она особенно важна при работе с аналоговыми сигналами.
3. Эффективность (отношение мощности управляемого сигнала к управляющей мощности).
4. Возможность работать с большими мощностями. Желательно, чтобы эффективность модуляции сохранялась даже при больших модулируемых мощностях.
5. Оптические характеристики модулируемого луча. Модуляция должна влиять только на определенные заданные характеристики луча (амплитуду, фазу, поляризацию) и не изменять остальные.
6. Рабочий диапазон длин волн модулятора.

Световую волну на входе модулятора можно описывать как комплексную переменную функцию:

$$A(x, y, t)\exp\{-j[\Omega t + k_1x + k_2y + \varphi(x, y, t)]\}$$

В общем случае модулятор изменяет фазу, поляризацию и амплитуды (интенсивность) волны. Модуляция фазы может рассматриваться также как модуляция частоты или амплитуды. Как правило, желательно, чтобы модулятор изменял только один из параметров волны, оставляя остальные неизменными.

Классический электрооптический модулятор представляет собой двулучепреломляющий материал с нанесенными на него электродами, помещенный между двумя скрещенными поляризаторами (рис. 1). При подаче поля на электроды показатели преломления материала изменяются, в результате изменяются фаза и поляризация светового луча, прошедшего через материал. Если поле приложено вдоль направления распространения луча, то интенсивность прошедшего света описывается выражением:

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \sin^2\left\{\frac{\pi}{2}\left(\frac{V}{V_{\pi}}\right)\right\}$$

где полуволновое напряжение  $V_{\pi} = \lambda/n^3r$  характеризует эффективность модулирующего материала и зависит от длины волны модулируемого излучения. Важно отметить, что данное выражение существенно нелинейно.

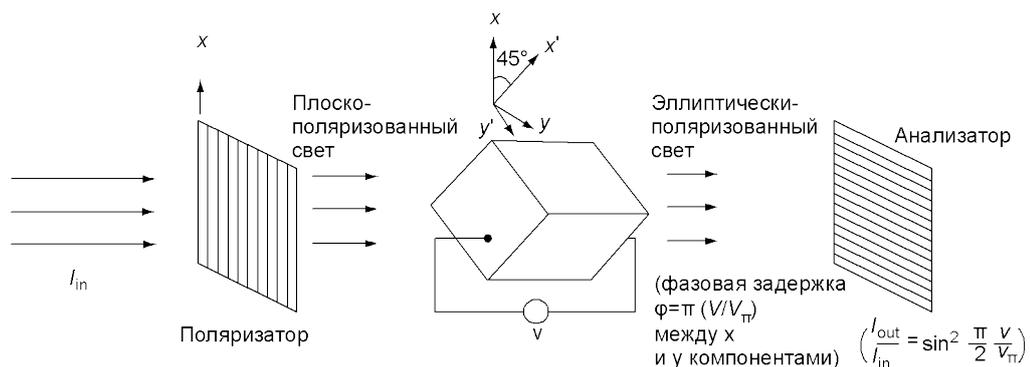


Рис. 1. Схема устройства электрооптического модулятора.

Кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  и  $(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})_{1-x/4}\text{O}_3)$ , (PLZT) – типичные примеры с линейным и квадратичным электрооптическим откликом, соответственно. Неорганические кристаллы обладают высокоскоростным (доли пикосекунд) электрооптическим откликом, так как он определяется реакцией их электронной подсистемы на электрическое поле. Эта скорость может понижаться при использовании поликристаллических (керамических) материалов.

В последние годы усилился интерес к применению органических материалов в качестве модулирующих сред, однако, при достаточно высокой эффективности модуляции, в них пока не достигнуты скорости, сравнимые с неорганическими средами.

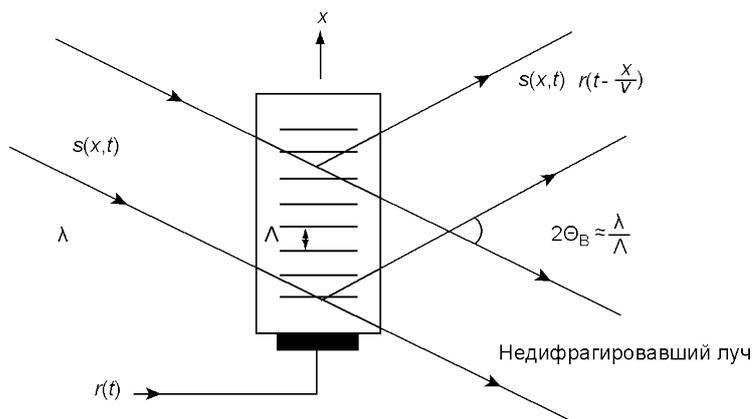
В акустооптических материалах ультразвуковая волна за счет фотоупругого эффекта вызывает изменения показателя преломления. Эти изменения показателя преломления имеют ту же периодичность, что и звуковая волна, и вызывают дифракцию световой волны (подобно дифракционной решетке). Как и в случае дифракции на решетке, имеется несколько дифракционных максимумов, что нежелательно для приложений. Увеличивая длину дифракции и подбирая угол падения светового луча, можно добиться почти полного погашения дополнительных максимумов. Если считать

среду, в которой происходит дифракция, изотропной, то условие существования единственного максимума – это условие Брэгга. При этом угол падения луча и угол его дифракционного отражения равны:

$$\sin\theta = \lambda/(2\Lambda)$$

где  $\lambda$  – длина волны света,  $\Lambda$  – длина волны звуковой волны.

Схематически конструкция акустооптического модулятора показана на рис. 2. Адресация модулятора производится переменным электрическим сигналом. Для преобразования электрического сигнала в акустическую волну используется пьезопреобразователь. Чем меньше толщина преобразователя, тем выше частоты сигнала, которые он может преобразовывать; механически уменьшая его толщину, удается достичь частот до нескольких гигагерц.



Схематическое изображение акустооптического модулятора

Интенсивность дифрагировавшего пучка определяется выражением

$$I_o = I_{in} C_o \sin^2 \{ \sqrt{M_2} (\pi^2 / 2\lambda^2) (L/H) C_{rf} P r f \}$$

где  $C_o$  и  $C_{rf}$  – коэффициенты потерь в оптическом и электрическом тракте модулятора,  $L$  и  $H$  – геометрические размеры области дифракции, показатель качества  $M_2 = (n^6 p^2) / (\rho v^3)$ ,  $n$  – показатель преломления среды,  $p$  – фотоупругая константа,  $\rho$  – плотность среды,  $v$  – скорость звука.

Если плоскополяризованный свет проходит через оптически прозрачный магнитооптический материал, то в результате эффекта Фарадея плоскость поляризации света поворачивается на угол, который определяется напряженностью магнитного поля  $H$  и толщиной образца  $d$ :

$$\theta = V H d,$$

где  $V$  – постоянная Верде. Изменение плоскости поляризации может быть использовано для модуляции амплитуды или фазы световой волны точно также, как это делается в электрооптических модуляторах.

Развитие нанотехнологий в последние годы привело к появлению широкого ряда материалов с характерными размерами в диапазоне 1–1000 нм. Среди них – так называемые *фотонные кристаллы*, периодические диэлектрические структуры с запрещенной зоной в плотности фотонных состояний. Как правило, это периодическая композитная структура, состоящая из материалов с различными показателями преломления (например, кварцевые сферы, промежутки между которыми заполнены воздухом, полупроводник с протравленной периодической решеткой отверстий,

регулярно уложенные кремниевые стержни). Основная особенность таких сред состоит в том, что они пространственно периодичны с периодом, сравнимым с рабочей длиной волны. В результате дифракции световой волны на такой структуре в спектре оптических фотонов и возникает запрещенная зона. Наличие такой запрещенной зоны может использоваться для модуляции света.

## 2. Оптические волокна

В основе действия оптоволокон лежит хорошо известное явление полного внутреннего отражения (рис. 3).

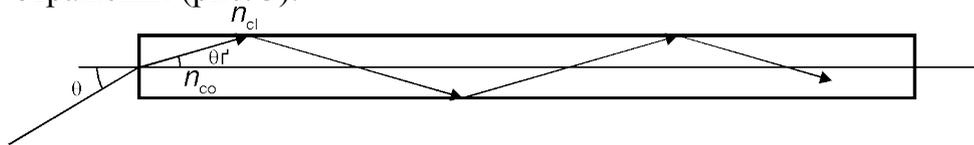


Рис. 3. Полное внутренне отражение света в оптоволоконне.

Луч, вошедший в оптоволоконно под углом к его оси, меньшим, чем критический:

$$\sin(\theta_c) = (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$$

испытывает полное внутренне отражение на границе с оболочкой и распространяется внутри волокна, не выходя из него. Очевидно, что для этого показатель преломления сердцевинны волокна  $n_{co}$  должен быть больше, чем показатель преломления оболочки  $n_{cl}$ .

Лучи, вошедшие в волновод под разными углами, будут распространяться с различными скоростями. Это приводит к искажению аналоговых сигналов, расплыванию цифровых импульсов, тем самым, снижает возможные скорости передачи, сужает рабочий частотный диапазон. В настоящее время используется два подхода, чтобы решить эту проблему.

Первый – это использование градиентных многомодовых волокон, то есть использование волокна с постепенным увеличением показателя преломления от центра к оболочке. Луч, вошедший под большим углом, проходит больший оптический путь: это компенсируется большим показателем преломления для этого луча.

Второй подход состоит в использовании *одномодового* волокна – то есть волокна, в котором свет распространяется только под одним фиксированным углом к оси. Здесь уширение импульсов и полоса пропускания определяются только частотной дисперсией показателя преломления для рабочей моды волокна.

Важным условием использования оптоволокон является минимизация потерь. Источником потерь являются колебательные полосы поглощения и рэлеевское рассеяние. Колебательные полосы, связанные с движением тяжелых ионов, лежат в дальней инфракрасной области, однако их высокочастотные крылья заходят в область, используемую для оптоволоконной связи (0.8–1.6 мкм). Связанные с ними потери в этой области могут достигать 0.5 дБ/км. Стекло, из которого изготавливается оптоволоконно, в качестве примеси часто содержит ионы  $OH^-$ . Этот ион имеет сильную полосу поглощения на длине волны 2,71 мкм; обертоны и составные тоны от этой полосы лежат на длинах волн 0.95, 1.25, и 1.38 мкм. Чтобы минимизировать связанные с ними потери, для оптоволоконной связи обычно используют длины волн 0.8, 1.3 и 1.55 мкм. Рэлеевское рассеяние – это квазиупругое рассеяние света на статичных дефектах и неоднородностях стекла. В области 1.55 мкм типичная величина затухания, обусловленного рэлеевским рассеянием, составляет 0.1 дБ/км; эта величина быстро растет (обратно пропорционально

четвертой степени длины волны) с переходом к более коротким волнам: в области 1.3 мкм она составляет уже более 0.3 дБ/км.

### 3. Волноводы

Оптические волноводные структуры, то есть пленочные структуры, предназначенные для передачи и преобразования оптических волн, можно разделить на ступенчатые: гетероструктуры, в которых показатель преломления изменяется скачком от слоя к слою, и слои с непрерывным, градиентным изменением показателя преломления (gradient-index, GRDIN). Первые обычно производятся путем послойного напыления и протравливания. Для создания градиентных материалов используются несколько методов; одним из наиболее популярных который широко используется в полупроводниковых материалах, в сегнетоэлектриках, таких, как ниобат лития, и других – это диффузия ионов. Ионный обмен широко применяется для создания градиентных материалов на основе многокомпонентных оксидных стекол. Эти стекла, как правило, состоят из трех типов оксидов, различающихся силой и типом связи между катионами и атомами кислорода. Оксиды с сильной ковалентной связью, образующие прочную сеть связей (такие, как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), определяют такие свойства макроскопические стекла, как вязкость, температура стеклования. Оксиды с промежуточной прочностью связи, как  $\text{PbO}$  или  $\text{ZnO}$ , не образуют стекол сами по себе, однако существенно влияют на свойства стекла как примесь. Слабо связанные ионные оксиды, такие, как  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , принято называть модификаторами – они предотвращают быструю кристаллизацию при охлаждении расплава. Именно ионы модификаторов наиболее часто замещаются при создании градиентных составов. Из-за различия ионных радиусов и поляризуемостей ионов-заместителей такое замещение приводит к изменению локальных электрических, оптических и механических свойств стекла. Это свойство делает ионный обмен эффективной технологией получения градиентных оптических материалов.

Примеры методик получения градиентных волноводов показаны на рис. 4.

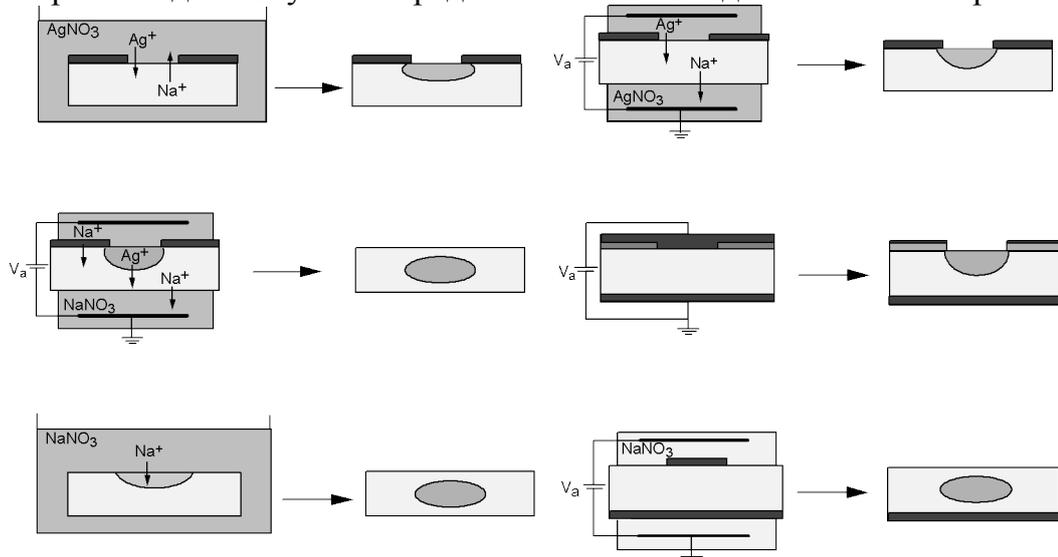


Рис. 4. Методики формирования градиентных оптических волноводных структур.

На рис. 5 – примеры формирования световых пучков в волноводах сложного профиля.

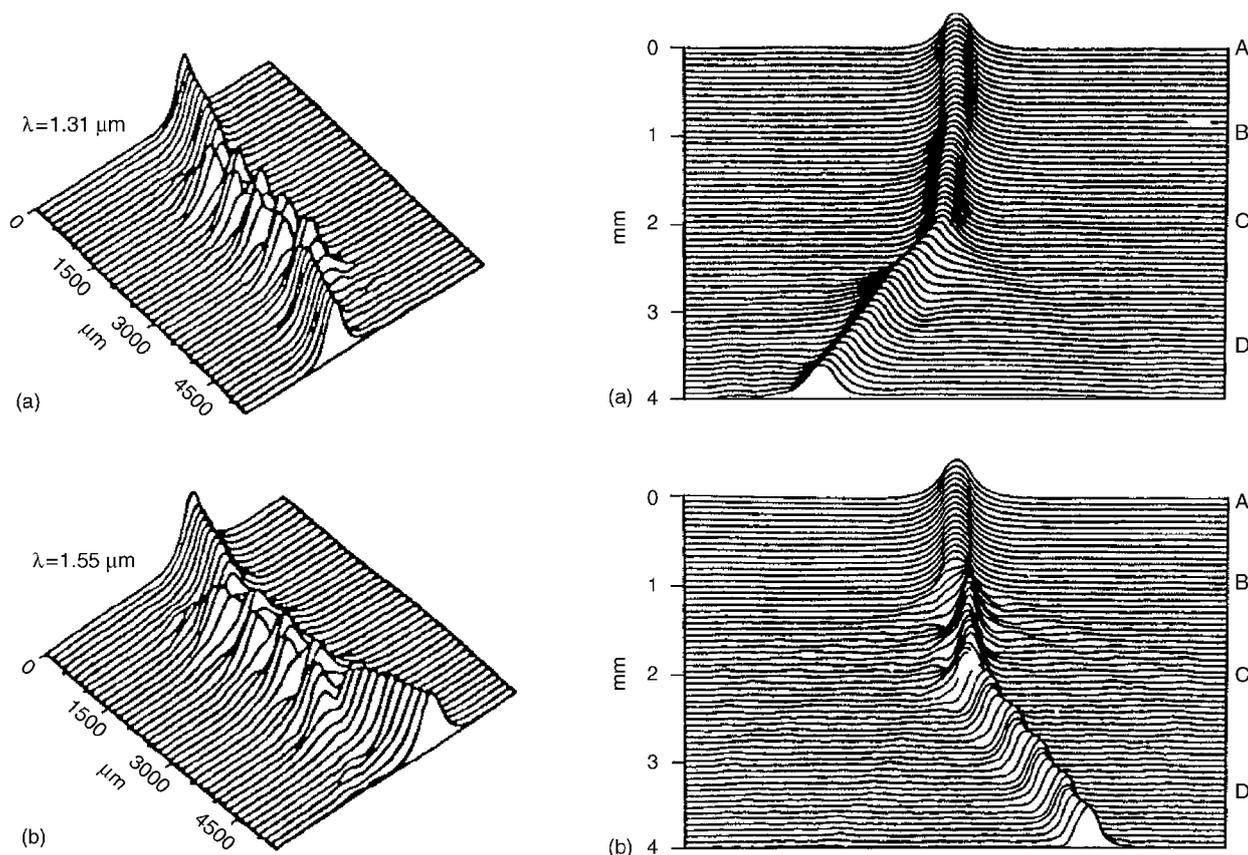


Рис. 5. Примеры формирования пучков в волноводах.  
Переключение направления светового потока.

#### 4. Оптические системы хранения информации

Несомненным конкурентным преимуществом оптических систем является бесконтактный характер процессов чтения-записи. В магнитных системах для записи информации необходим значительный градиент магнитного поля, что требует максимальной близости носителя к головке – вплоть до виртуального контакта. В оптических системах запись производится оптическим лучом, что позволяет обеспечить расстояние от фокусирующей системы до носителя в несколько миллиметров – и тем самым полностью исключить возможность их механического контакта. Кроме высокой механической надежности такой системы, это существенно упрощает процесс смены носителя. Это позволило создать на основе оптических носителей различные типы устройств: запись только для чтения (ROM), однократная запись (WORM), многократная запись, что отсутствовало в системах магнитной записи. В совокупности с использованием опыта, накопленного при создании магнитных систем, это позволяет оптическим системам конкурировать с магнитными по параметру «цена за бит».

Механизм записи информации на оптический носитель заключается в следующем. Излучение твердотельного (как правило – полупроводникового диодного) лазера фокусируется на носитель, где поглощается и преобразуется в тепловую энергию. Типичное значение мощности лазерного луча на поверхности носителя составляет 10 мВт, размер пятна – порядка 1 мкм, и длительность засветки 50 нс. Это обеспечивает мощность 1МВт/см<sup>2</sup> или плотность энергии 50 мДж/см<sup>2</sup>. Если эта мощность полностью поглощается средой, при типичной толщине 100 нм это обеспечивает локальный нагрев на несколько сотен градусов за несколько наносекунд. В результате физические или химические свойства среды изменяются, что и обеспечивает оптический контраст между

записанной и незаписанной областью. В качестве физических изменений среды могут выступать абляция среды, ее деформация, изменение цвета, переход из кристаллического в аморфное состояние, смена магнитного состояния и др. Если такое изменение связано с фазовым переходом в среде, то такой переход может быть обратимым – и иметь практическое значение для перезаписи информации, если время обратного перехода не превышает микросекунд. В магнитооптических дисках запись заключается в нагреве области диска достаточно близко к температуре магнитного перехода, когда переключение магнитного состояния может быть произведено достаточно слабым магнитным полем. Показано, что такая запись обеспечивает практически неограниченное количество циклов перезаписи. Считывание производится за счет магнитооптического эффекта Керра с использованием детектирующей оптики, чувствительной к поляризации света. Для всех типов оптической записи считывающий луч имеет существенно меньшую мощность, чем та, которая требуется для записи информации, как правило, менее одного милливатта. Наиболее распространенные диски используют в качестве записывающей среды органические красители либо среды со сменой фазового состояния.

Информация на CD-дисках, предназначенных только для чтения, записывается с помощью небольших углублений в поликарбонатной подложке, которые делаются в процессе их выплавки (штамповки). Глубина такого углубления составляет около 100 нм, что составляет примерно половину длины волны света в поликарбонате, и при считывании информации используется различие фаз световых волн, отраженных от зеркальной поверхности диска и от такого углубления. Процесс формирования диска показан на рис. 6.

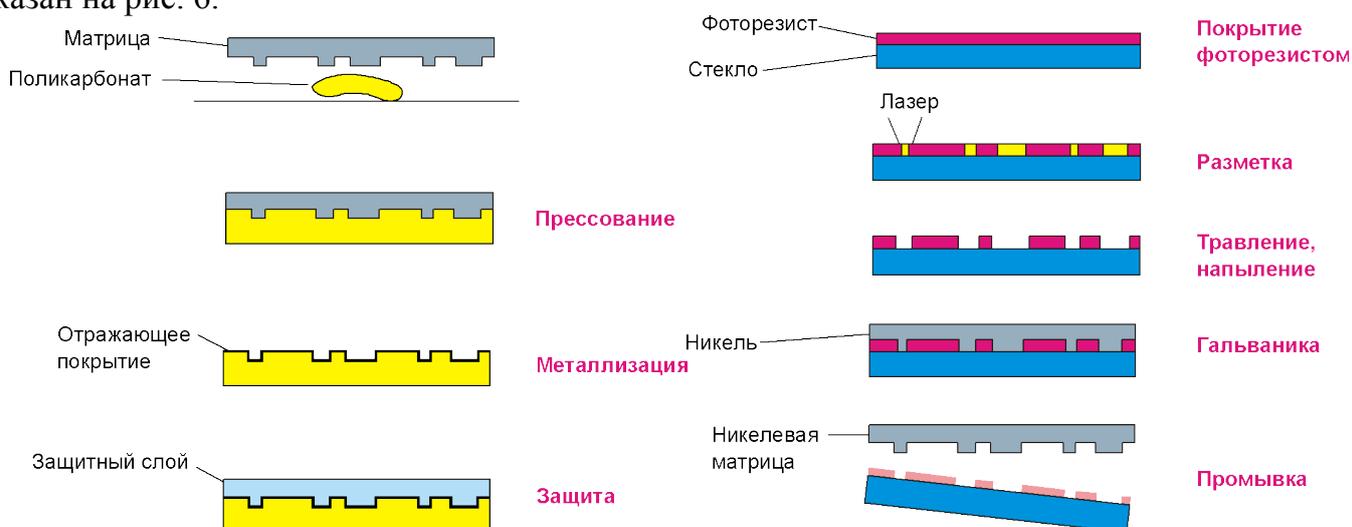


Рис. 6. Формирование CD-диска, предназначенного только для чтения.

Диски для однократной записи используют процесс абляции. При достаточной мощности сплошная металлическая пленка либо пленка органического красителя, запрессованная в диск, плавится или даже испаряется при попадании в фокус луча, образуя отверстие. На рис. 7 – микрофотография поверхности диска с точками записи.

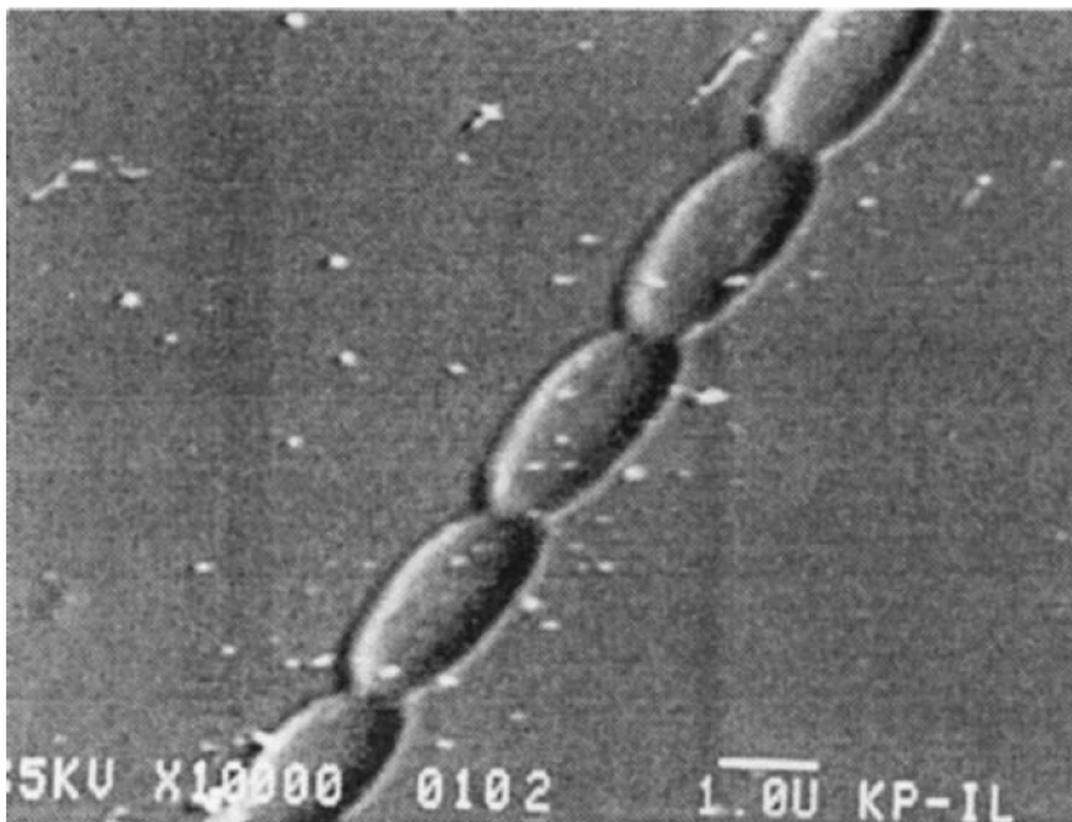


Рис. 7. Поверхность диска для однократной оптической записи.

Некоторые твердотельные материалы имеют несколько устойчивых состояний, отличающихся оптическими свойствами, и записывающий лазерный луч может обратимо переводить их из одного состояния в другое. Так, некоторые легкоплавкие элементы, как Se, Te, Ge, In, Sn, Sb, а также их сплавы существуют как в аморфном, так и в кристаллической состояниях; их коэффициенты отражения существенно отличаются. На их основе изготавливаются диски для многократной записи. (рис. 8).

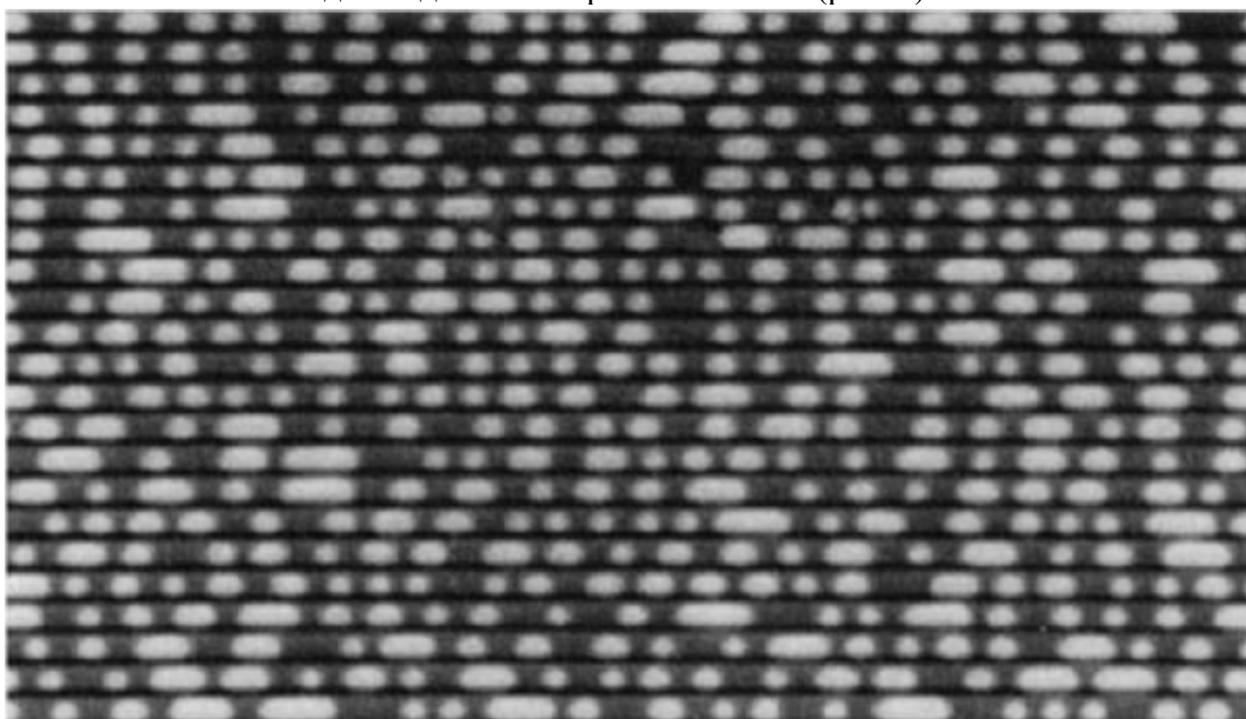


Рис. 8. Поверхность диска для многократной записи информации на основе сплава SbInSn.

Магнитооптические диски многократной записи информации для создания оптического контраста поверхности используют эффект Керра – то есть вращение плоскости поляризации луча под действием магнитного поля металлической пленки. В качестве материала магнитной пленки используются сплавы редкоземельный металл – переходной металл. Под действием лазерного луча в пленке происходит переход между фазами с различным магнитным моментом, на основе чего и происходит запись информации.

## 5. Дисплеи

В настоящее время разработан ряд технологий для создания устройств отображения информации. Наиболее распространенными и быстро развивающимися являются плазменные панели, где изображение формируется за счет разряда в газе, жидкокристаллические устройства, использующие электрооптические свойства жидких кристаллов, электролюминесцентные, испускающие свет за счет эффекта электролюминесценции в твердых телах, и светодиодные, где изображение формируется излучением полупроводниковых или органических светодиодов.

Для создания ячейки ЖК-дисплея тонкий слой жидкого кристалла помещается между двумя стеклами с нанесенными на них прозрачными электродами. Эти стекла покрываются поляризующей свет пленкой таким образом, что при отсутствии напряжения свет через них не проходит. При подаче напряжения на жидкий кристалл его двулучепреломление изменяется, он разворачивает плоскость поляризации проходящего через него света, и ячейка становится прозрачной.

Для получения цветного изображения электроды таких ячеек группируются в триады; в каждую из ячеек устанавливается красный, зеленый или синий светофильтр.

Структура триады показана на рис. 9; некоторые виды ЖК-ячеек, отличающиеся ориентацией молекул жидкого кристалла и, соответственно, быстродействием, величиной управляющего напряжения и апертурой – на рис. 10.



Рис. 9. Структура ячейки жидкокристаллического дисплея.

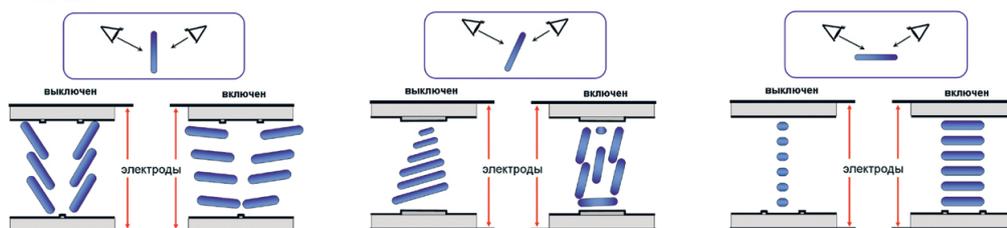


Рис. 10. TFT, IPS, MVA ячейки ЖК-дисплея.

Технология плазменных дисплеев позволяет изготавливать устройства отображения информации самых больших на сегодня размеров. Свечение здесь возникает в результате газового разряда, причем разряд может вызываться постоянным или переменным напряжением, либо их комбинацией. Цветные изображения формируются также триадами люминофоров, которые возбуждаются ультрафиолетовым излучением газового разряда (рис. 11).

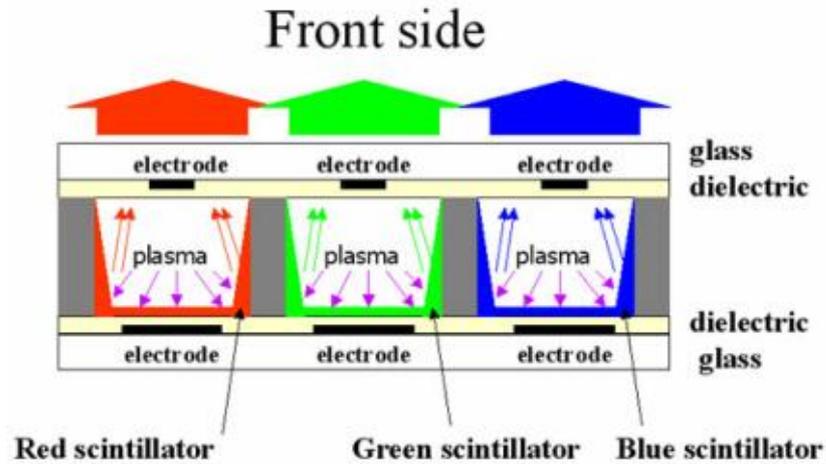


Рис. 11. Триада плазменного дисплея.

## 6. Нелинейная оптика

Нелинейными оптическими явлениями называются эффекты, связанные с нелинейной зависимостью свойств материала от напряженности поля световой волны. В результате такого нелинейного отклика среды возникает большое количество новых эффектов. Среди них можно указать преобразование частоты лазерного излучения, генерацию сверхкоротких лазерных импульсов, компенсацию дисперсии среды в оптических системах связи и пр.

При большой напряженности светового поля ее связь с поляризацией среды становится нелинейной:

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}EE + \chi^{(3)}EEE + \dots$$

здесь введены нелинейные восприимчивости второго и третьего порядка. Именно они определяют большинство используемых в настоящее время нелинейных оптических свойств вещества.

Если представить электрической поле в веществе в виде гармоник:

$$E = \sum E(\omega_n)\exp(i\omega_n t) + \text{компл. сопр.}$$

то существование нелинейных восприимчивостей приведет к появлению компонент поляризации с частотами, равными различным линейным комбинациям частот электрического поля.

Среди эффектов, связанных с наличием нелинейной восприимчивости второго порядка, наиболее часто используются генерация суммарной частоты (ап-конверсия):

$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2,$$

генерация второй гармоники:

$$\omega_2 = 2\omega_1,$$

и генерация разностной частоты (оптическая параметрическая генерация):

$$\omega_3 = \omega_1 - \omega_2.$$

На рис. 12 показан преобразователь инфракрасного излучения 1,06 мкм во вторую гармонику.

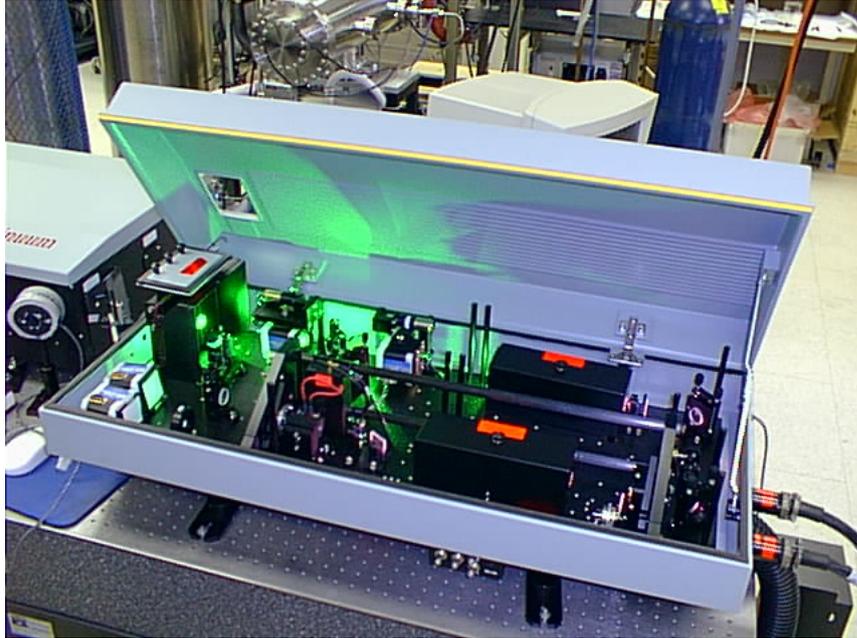


Рис. 12. Удвоитель частоты инфракрасного излучения 1.06 мкм.

Данные частотные соотношения являются выражением закона сохранения энергии для фотонов, взаимодействующих в веществе. Очевидно, что для них должен выполняться также закон сохранения импульса:

$$k_3 = k_1 \pm k_2, \Delta k = k_1 \pm k_2 - k_3 = 0,$$

или условие фазового согласования (фазового синхронизма). Если это условие не выполняется, то при распространении взаимодействующих волн в среде их волновые фронты движутся с различными скоростями, и на длине

$$L_c = 2/\Delta k$$

процесс преобразования прекращается.

Условие фазового синхронизма иначе можно переписать в виде:

$$n_3\omega_3 = n_1\omega_1 \pm n_2\omega_2.$$

Поскольку большинство оптически нелинейных сред имеет нормальную дисперсию (показатель преломления монотонно возрастает с частотой), то как правило это условие оказывается не выполнено: для его выполнения требуются специальные усилия. При нарушении этого условия коэффициент преобразования резко падает (рис. 13).

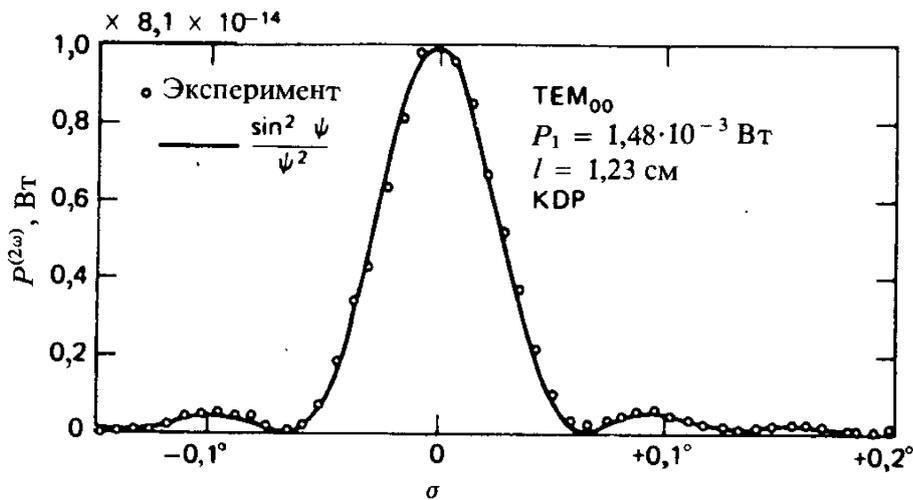


Рис. 13. Резкое снижение мощности второй гармоники при нарушении условия фазового синхронизма.

Наиболее часто выполнения этого условия добиваются подстройкой ориентации кристалла-преобразователя. Большинство кристаллов, обладающих нелинейной восприимчивостью второго порядка, оптически анизотропны и обладают двулучепреломлением – то есть в каждом направлении кристалла могут распространяться две волны заданной частоты, показатель преломления для которых зависит от их поляризации. Таким образом, подбирая направление распространения взаимодействующих волн, можно добиться того, что разница показателей преломления, возникающая из-за частотной дисперсии, будет скомпенсирована эффектом двулучепреломления.

В последнее время возросло внимание к методу, называемому квази-фазовым согласованием. Идея метода заключается в том, что свойства нелинейной среды периодически модулируются в направлении распространения излучения (например, с помощью создания периодической доменной структуры). Условие фазового согласования в такой среде приобретает вид:

$$\Delta k = k_1 \pm k_2 - k_3 = 2\pi/d,$$

где  $d$  – период модуляции структуры. Подбирая эту величину, можно добиться выполнения модифицированного условия.

Еще один метод согласования фаз используется в волноводных структурах. Здесь волна накачки распространяется в нелинейном волноводе, а генерируемая волна – в подложке, на которую он нанесен. Подбором показателей преломления подложки и волновода также удастся добиться согласования фаз взаимодействующих волн.

#### Библиографический список

1. В.М. Виноградов. Технология машиностроения: введение в специальность : учебное пособие для вузов / В. М. Виноградов. - 3-е изд., стереотип. - М. : Академия, 2008. – 174 с. (14 экз. в библиотеке ТУСУР).

2. Л. Р. Битнер. Материалы и элементы электронной техники и твердотельная электроника : учебное пособие / Л. Р. Битнер, Р. М. Капилевич, П. Е. Троян ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра физической электроники. - Томск : ТМЦДО, 2007. - 267 с. (27 экз. в библиотеке ТУСУР).
3. В.В. Клепиков, Н.Л. Никишина. Основы инженерной деятельности: Учебно-методическое пособие. – М: МГИУ, 2008 - 160 с.
4. В. С. Сорокин. Материалы и элементы электронной техники. В 2 томах. / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – М.: Академия. –2007.–174 с.
5. З.Ю. Готра. Технология микроэлектронных устройств: Справочник / З. Ю. Готра. - М. : Радио и связь, 1991. - 528 с.
6. В. Н. Давыдов. Материалы и элементы электронной техники : учебное пособие / В. Н. Давыдов ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2007. – 122 с. (99 экз. в библиотеке ТУСУР)
7. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. Учебник, - М: ИНФРА-М, 2005. - 278 с.
8. Физические эффекты в машиностроении: Справочник/ В.А. Лукьянец и др. - М.: Машиностроение, 1993. - 212 с.
9. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов/Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. - М.: Машиностроение, 1990. -416 с.
10. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т./Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1986. Т.1 - 656 с., т.2 - 496 с.
11. Прогрессивная технология металлообработки/Сост. В.А. Волосатов. -Л.: Лениздат, 1985. -207 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011

Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации»

Дата принятия: 07.07.2011

Орган/источник: Президент Российской Федерации

Тип документа: Указ

Президент подписал Указ «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».

Текст Указа

В целях модернизации и технологического развития российской экономики и повышения ее конкурентоспособности постановляю:

1. Утвердить прилагаемые:

а) приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации;

б) перечень критических технологий Российской Федерации.

2. Правительству Российской Федерации обеспечить реализацию настоящего Указа.

3. Настоящий Указ вступает в силу со дня его подписания.

Указ подготовлен в соответствии с поручением Президента от 17 апреля 2003 года №Пр-655 о корректировке приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации решениями Президента по представлению Правительства не реже одного раза в четыре года.

Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации

1. Безопасность и противодействие терроризму.
2. Индустрия наносистем.
3. Информационно-телекоммуникационные системы.
4. Науки о жизни.
5. Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники.
6. Рациональное природопользование.
7. Транспортные и космические системы.
8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

Перечень критических технологий Российской Федерации

1. Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники.
2. Базовые технологии силовой электротехники.
3. Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии.
4. Биомедицинские и ветеринарные технологии.
5. Геномные, протеомные и постгеномные технологии.
6. Клеточные технологии.
7. Компьютерное моделирование наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий.
8. Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии.

9. Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.

10. Технологии биоинженерии.

11. Технологии диагностики наноматериалов и наноустройств.

12. Технологии доступа к широкополосным мультимедийным услугам.

13. Технологии информационных, управляющих, навигационных систем.

14. Технологии наноустройств и микросистемной техники.

15. Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику.

16. Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов.

17. Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов.

18. Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем.

19. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения.

20. Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.

21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

22. Технологии снижения потерь от социально значимых заболеваний.

23. Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта.

24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения.

25. Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств.

26. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

27. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе.

Приложение 2 Критические технологии федерального уровня 1996 г.

(Утверждены Председателем Правительственной комиссии по научно-технической политике В.С.Черномырдиным 21 июля 1996 г. (2728п-П8)).

1. Информационные технологии и электроника

- Многопроцессорные ЭВМ с параллельной структурой
- Вычислительные системы на базе нейрокомпьютеров, транспьютеров и оптических ЭВМ
- Системы распознавания и синтеза речи, текста и изображений
- Системы искусственного интеллекта и виртуальной реальности
- Информационно-телекоммуникационные системы
- Системы математического моделирования
- Микросистемная техника и микросенсорика
- Сверхбольшие интегральные схемы и наноэлектроника
- Опто- и акустоэлектроника

- Криоэлектроника
- 2. Производственные технологии
  - Лазерные технологии
  - Прецизионные и мехатронные технологии
  - Робототехнические системы и микромашинны
  - Электронно-ионно-плазменные технологии
  - Гибкие производственные системы
  - Интеллектуальные системы автоматизированного проектирования и управления
  - Технологии ускоренной оценки и комплексного освоения стратегически важного горнорудного (алмазы, золото, платина) и техногенного сырья
    - Технологии глубокой переработки горнорудного и техногенного сырья с использованием нетрадиционных методов
    - Модульные технологии производства массовой металло-продукции с новым уровнем свойств
- 3. Новые материалы и химические продукты
  - Материалы для микро- и наноэлектроники
  - Композиты
  - Полимеры
  - Керамические материалы и нанокерамика
  - Материалы и сплавы со специальными свойствами
  - Сверхтвердые материалы
  - Биосовместимые материалы
  - Катализаторы
  - Мембраны
  - Дизайн химических продуктов и материалов с заданными свойствами
- 4. Технологии живых систем
  - Биополимеры клетки
  - Генодиагностика и генотерапия
  - Биотехнология на основе биоинженерии
  - Технология иммунокоррекции
  - Химический и биологический синтез лекарственных средств и пищевых веществ
  - Системы жизнеобеспечения и защиты человека в экстремальных условиях
  - Белковые препараты и композиты с заданными функциональными свойствами
  - Трансгенные формы растений и животных
  - Рекомбинантные вакцины
  - Биологические средства питания и защиты растений и животных
  - Биотехнологические процессы производства и переработки сельскохозяйственного сырья
    - Технологии хранения продовольствия
    - Технологии искусственного выращивания ценных объектов аквакультуры
    - Технологии, обеспечивающие безопасность пищевых продуктов функционального назначения
- 5. Транспорт
  - Авиационная и космическая техника с использованием новых технических решений, включая нетрадиционные компоновочные схемы
  - Транспортные средства на альтернативных видах топлива
  - Высокоскоростной наземный транспорт на новых принципах движения

- Навигационные системы
- Системы обеспечения безопасности движения
- 6. Топливо и энергетика
  - Технологии изучения недр, прогнозирования, поиска, разведки запасов полезных ископаемых и урана
  - Технологии разрушения горных пород, проходки горных выработок и бурения нефтяных и газовых скважин
  - Технологии воздействия на нефтегазовые пласты
  - Нетрадиционные технологии добычи и переработки твердых топлив и урана
  - Технологии освоения углеводородов континентального шельфа
  - Технологии углубленной переработки нефти, газа и конденсата
  - Атомная энергетика
  - Процессы трансформации твердого топлива в электрическую и тепловую энергию
    - Парогазовые и газотурбинные процессы трансформации природного газа в электрическую и тепловую энергию
    - Технологии регенерации отработавшего ядерного топлива, утилизации и захоронения радиоактивных отходов
    - Технологии освоения нетрадиционных возобновляемых источников энергии (солнца, ветра, биомассы и др.), а также вторичных энергоресурсов
    - Технологии электронного переноса энергии
    - Трубопроводный транспорт водоугольной суспензии
    - Водородная энергетика
    - Топливные элементы
    - Энергосберегающие технологии межотраслевого применения
- 7. Экология и рациональное природопользование
  - Технологии мониторинга природно-техногенной сферы
  - Технологии прогнозирования развития климатических, экосистемных, горногеологических и ресурсных изменений
    - Технологии обеспечения безопасности продукции, производств и объектов
    - Технологии неистощительного природопользования
    - Технологии реабилитации окружающей среды от техногенных воздействий
    - Технологии минимизации экологических последствий трансграничных воздействий

Приложение 3 Приоритетные направления развития науки и техники 2002 года.  
(Утверждены Президентом Российской Федерации В.В.Путиным 30 марта 2002 г.  
(Пр-577))

Приоритетные направления развития науки, технологий и техники Российской Федерации

1. Информационно-телекоммуникационные технологии и электроника
2. Космические и авиационные технологии
3. Новые материалы и химические технологии
4. Новые транспортные технологии
5. Перспективные вооружения, военная и специальная техника
6. Производственные технологии
7. Технологии живых систем

8. Экология и рациональное природопользование
9. Энергосберегающие технологии

Приложение 4 Перечень критических технологий Российской Федерации 2002 года.

(Утверждены Президентом Российской Федерации В.В.Путиным 30 марта 2002 г. (Пр-577))

1. Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений
2. Безопасность атомной энергетики
3. Безопасность движения, управление транспортом, интермодальные перевозки и логистические системы
4. Безопасность и контроль качества сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов
5. Биологические средства защиты растений и животных
6. Быстрое возведение и трансформация жилья
7. Высокопроизводительные вычислительные системы
8. Генодиагностика и генотерапия
9. Добыча и переработка угля
10. Информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CALS-, CAD-CAM-, CAE-технологии)
11. Информационно-телекоммуникационные системы
12. Искусственный интеллект
13. Каталитические системы и технологии
14. Керамические и стекломатериалы
15. Компьютерное моделирование
16. Лазерные и электронно-ионно-плазменные технологии
17. Материалы для микро- и нанoeлектроники
18. Мембранные технологии
19. Металлы и сплавы со специальными свойствами
20. Мехатронные технологии
21. Микросистемная техника
22. Мониторинг окружающей среды
23. Нетрадиционные возобновляемые экологически чистые источники энергии и новые методы ее преобразования и аккумулирования
24. Обезвреживание техногенных сред
25. Обращение с радиоактивными отходами и облученным ядерным топливом
26. Опто-, радио- и акустоэлектроника, оптическая и сверхвысокочастотная связь
27. Оценка, комплексное освоение месторождений и глубокая переработка стратегически важного сырья
28. Переработка и воспроизводство лесных ресурсов
29. Поиск, добыча, переработка и трубопроводный транспорт нефти и газа
30. Полимеры и композиты

31. Прецизионные и нанометрические технологии обработки, сборки, контроля
32. Природоохранные технологии, переработка и утилизация техногенных образований и отходов
33. Прогнозирование биологических и минеральных ресурсов
34. Производство и переработка сельскохозяйственного сырья
35. Производство электроэнергии и тепла на органическом топливе
36. Распознавание образов и анализ изображений
37. Синтез лекарственных средств и пищевых добавок
38. Синтетические сверхтвердые материалы
39. Системы жизнеобеспечения и защиты человека
40. Снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф
41. Сохранение и восстановление нарушенных земель, ландшафтов и биоразнообразия
42. Технологии биоинженерии
43. Технологии высокоточной навигации и управления движением
44. Технологии глубокой переработки отечественного сырья и материалов в легкой промышленности
45. Технологии иммунокоррекции
46. Технологии на основе сверхпроводимости
47. Технологические совмещаемые модули для металлургических мини-производств
48. Транспортные и судостроительные технологии освоения пространств и ресурсов Мирового океана
49. Экологически чистый и высокоскоростной наземный транспорт
50. Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров
51. Энергосбережение
52. Базовые и критические военные и специальные технологии

Приложение 5 Перечень критических технологий Российской Федерации 2006 г.  
(Утверждены Президентом Российской Федерации В.В.Путиным 21 мая 2006г.  
(Пр-842))

1. Базовые и критические военные, специальные и промышленные технологии
2. Биоинформационные технологии
3. Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии
4. Биомедицинские и ветеринарные технологии жизнеобеспечения и защиты человека и животных
5. Геномные и постгеномные технологии создания лекарственных средств
6. Клеточные технологии
7. Нанотехнологии и наноматериалы
8. Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом
9. Технологии биоинженерии

10. Технологии водородной энергетики
11. Технологии механотроники и создания микросистемной техники
12. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы
13. Технологии новых и возобновляемых источников энергии
14. Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений
15. Технологии обработки, хранения, передачи и защиты информации
16. Технологии оценки ресурсов и прогнозирования состояния литосферы и биосферы
17. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов
18. Технологии производства программного обеспечения
19. Технологии производства топлив и энергии из органического сырья
20. Технологии распределенных вычислений и систем
21. Технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф
22. Технологии создания биосовместимых материалов
23. Технологии создания интеллектуальных систем навигации и управления
24. Технологии создания и обработки композиционных и керамических материалов
25. Технологии создания и обработки кристаллических материалов
26. Технологии создания и обработки полимеров и эластомеров
27. Технологии создания и управления новыми видами транспортных систем
28. Технологии создания мембран и каталитических систем
29. Технологии создания новых поколений ракетно-космической, авиационной и морской техники
30. Технологии создания электронной компонентной базы
31. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии
32. Технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем
33. Технологии экологически безопасного ресурсосберегающего производства и переработки сельскохозяйственного сырья и продуктов питания
34. Технологии экологически безопасной разработки месторождений и добычи полезных ископаемых

#### Приложение 6 Научные приоритеты Российской академии наук

##### Отделение математических наук

- Алгебра, теория чисел, математическая логика
- Геометрия и топология
- Математический анализ
- Дифференциальные уравнения и математическая физика
- Теория вероятностей и математическая статистика
- Вычислительная математика
- Математическое моделирование
- Теоретическая информатика
- Параллельные и распределенные вычисления
- Дискретная математика
- Системное программирование

- Информационные системы
- Математические проблемы механики и исследования космоса

Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233

Отделение физических наук

Физика конденсированных сред

- Развитие теории конденсированных сред
- Структурные исследования конденсированных сред
- Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры
- Физика полупроводников
- Физика твердотельных наноструктур, мезоскопика
- Физика низкоразмерных систем, физика поверхности и поверхностей раздела
- Физика низких температур, включая квантовые кристаллы и жидкости
- Сверхпроводимость
- Свойства веществ при высоких давлениях
- Физика диэлектриков
- Физика металлов
- Физическое материаловедение и новые материалы

Оптика и лазерная физика

- Классическая и квантовая оптика
- Нелинейные оптические явления, материалы и устройства
- Сверхбыстрые явления в оптике
- Взаимодействие лазерного излучения с веществом, в т.ч. в сверхсильных полях
- Волоконная оптика и оптическая связь. Интегральная оптика.
- Оптическая информатика, голография
- Развитие методов и применений спектроскопии, люминесценции.

Прецизионные оптические измерения

- Физика лазеров и лазерных материалов
- Лазеры в физике, химии, биологии, медицине, экологии и технике
- Новые оптические материалы, технологии и приборы, их применение

Радиофизика и электроника, акустика

• Когерентные источники микроволнового излучения и их применение в науке и технике

• Физика твердотельных элементов и устройств генерации, усиления, преобразования и приема электромагнитных волн

• Разработка методов и средств генерации и приема излучения в терагерцовом диапазоне

- Физика нелинейных волн и нелинейная динамика
- Фундаментальные проблемы распространения радиоволн
- Акустика, в том числе нелинейная и низкочастотная, акустоэлектроника.

Развитие методов акустической диагностики природных сред

• Наносекундная релятивистская электроника больших мощностей и ее применение в науке и технике

- Радиофизические методы диагностики окружающей среды

Физика плазмы

- Физика высокотемпературной плазмы и управляемый термоядерный синтез
- Физика лазерной плазмы и ее применение
- Физика низкотемпературной плазмы
- Плазменные процессы в геофизике и астрофизике

- Разработка плазменных устройств и их применение в науке и технике
- **Астрономия и исследование космического пространства**
- Происхождение, строение и эволюция Вселенной
- Нестационарные звезды и звездные атмосферы
- Образование звезд и планетных систем и их эволюция
- Солнечная активность
- Исследование планет

#### Ядерная физика

- Физика элементарных частиц и квантовых полей
- Фундаментальная физика атомного ядра
- Физика космических лучей и ядерные аспекты астрофизики
- Физика и техника ускорителей заряженных частиц
- Ядерно-физические проблемы энергетики
- Создание ускорителей и интенсивных источников нейтронов, мюонов и синхротронного излучения для исследований по физике и в других областях науки, для технологических, медицинских, экологических и других применений

Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233

#### Отделение информационных технологий и вычислительных систем

- Теория информации, научные основы информационно-вычислительных систем и сетей, системный анализ
- Искусственный интеллект, системы распознавания образов, принятие решений при многих критериях
- Системы автоматизации, математические методы исследования сложных управляющих систем и процессов, CALS-технологии
- Нейроинформатика и биоинформатика
- Глобальные и интегрированные информационно – телекоммуникационные системы и сети
- Архитектура, системные решения и программное обеспечение информационно-вычислительных комплексов новых поколений
- Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров. Материалы для микро - и наноэлектроники. Микросистемная техника
- Опто -, радио - и акустоэлектроника, оптическая и СВЧ-связь. Вакуумная электроника

Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233

#### Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления

##### Энергетика

- Тепломассообмен, гидро-, газо- и плазмодинамика
- Безопасность, надежность, ресурс и экология в энергетике
- Проблемы атомной, термоядерной и водородной энергетики
- Низкотемпературная плазма и технологии на ее основе. Теплофизические и электрофизические свойства веществ в широком диапазоне параметров; экстремальные состояния
- Исследования в области современной теплотехники, электротехники, прямого преобразования энергии и возобновляемых источников энергии
- Энергоресурсосбережение и энергоэффективные технологии. Повышение эффективности комплексного использования природных топлив

- Современная энергетическая политика и механизмы ее реализации. Управление энергетическими системами

- Математическое моделирование электроэнергетических и теплоснабжающих систем

- Проблемы сильноточной импульсной энергетики

- Проблемы авиационной, космической и транспортной энергетики

#### Механика

- Общая механика. Динамика космических тел и управляемых аппаратов, транспортных систем

- Механика жидкости, газа и плазмы, твердого тела, неидеальных и многофазных сред

- Физико-химическая газодинамика и процессы при высоких плотностях энергии: горение, детонация, взрыв, высокоскоростной удар и взаимодействие потоков направленной энергии с веществом

- Физика и механика деформирования и разрушения сплошных структурированных материалов, в том числе, в экстремальных условиях. Трибология

- Механика природных процессов и сред, механика добычи и трубопроводного транспорта нефти и газа

- Биомеханика

#### Машиноведение

- Теория машин и механизмов, анализ и синтез машинных комплексов

- Безопасность, ресурс, живучесть машин и сложных технических

- систем

- Динамика машин, волновые и вибрационные процессы в технике

- Эргономика и биомеханика систем «человек - машина - среда»

- Создание и функционирование макро- и микроробототехнических, мехатронных комплексов

- Комплексные проблемы машиноведения; повышение безопасности машин, снижение техногенных и технологических рисков для объектов гражданского и оборонного назначения

- Математическое и физическое моделирование перспективных конструкций, материалов и технологий в авиации, ракетной и атомной технике, судостроении, наземном транспорте, станко- и приборостроении

#### Процессы управления

- Теория систем и общая теория управления. Системный анализ

- Управление в детерминированных, стохастических системах и в условиях неопределенности

- Моделирование и идентификация систем управления. Информационное взаимодействие в сложных системах

- Методы оптимизации и интеллектуализации систем и процессов управления.

Адаптивное управление.

- Сложные технические системы и информационно-управляющие

- комплексы

- Управление движущимися объектами. Системы навигации, ориентации и наведения

Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233

Отделение химии и наук о материалах

- Теория химического строения и химической связи, кинетика и механизмы химических реакций, реакционная способность химических соединений, стереохимия, кристаллохимия
  - Синтез и изучение новых веществ, разработка материалов и наноматериалов с заданными свойствами и функциями (полимеров и полимерных материалов, композитов, сплавов, керамик, продуктов биологического и медицинского назначения, оптических, сверхпроводящих, магнитных материалов и особо чистых веществ)
  - Химическая энергетика: разработка путей преобразования и аккумуляции энергии в химических системах, создание эффективных путей сопряжения энерговыделяющих и энергопоглощающих процессов. Новые химические источники тока, топливные элементы и разработка химических генераторов для энергетики больших мощностей и бытовых нужд
  - Химическая аналитика: создание методов и средств определения и контроля веществ в окружающей среде. Разработка новых методов и средств химического анализа веществ и материалов
  - Теоретические основы химико-технологических процессов, включая создание и совершенствование химико-технологической аппаратуры
  - Разработка эффективных экологически чистых и максимально безопасных технологических процессов переработки природного сырья (в том числе газа, нефти, угля), органического и минерального сырья (включая полиметаллические руды), облученного ядерного топлива, радиоактивных отходов и материалов
  - Создание катализаторов для синтеза и переработки химического сырья. Моделирование и использование принципов синтеза и функционирования биологических молекул и систем для создания высокоэффективных химических процессов и новых материалов
  - Поверхностные явления в коллоидно-дисперсных системах, физико-химическая механика
  - Развитие теории прочности, пластичности и формообразования
  - Супрамолекулярные и наноразмерные самоорганизующиеся системы для использования в современных высоких технологиях
  - Химия и физикохимия твердого тела, расплавов и растворов
  - Химические процессы в веществах, находящихся в экстремальных состояниях или подвергнутых экстремальным воздействиям, процессы горения
  - Химическое сопротивление материалов, защита металлов и других материалов от коррозии и окисления
  - Химия и технология радиоактивных элементов
  - Химия окружающей среды, в том числе атмосферы и океана. Разработка проблем химической защиты человека и биосферы

Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233

Отделение биологических наук

- Структура и функции биологических макромолекул и макромолекулярных комплексов. Биокатализ
  - Структура и функция низкомолекулярных биорегуляторов. Дизайн и синтез новых биологически активных препаратов
  - Геномика, протеомика. Белковая и геновая инженерия. Трансгеноз, генотерапия.
- Молекулярная медицина
- Хроматин. Регуляция работы гена и генома в целом

- Пост-транскрипционные этапы экспрессии генетической информации и их контроль. Молекулярные механизмы трансляции
  - Структура и функция биологических мембран. Биоэнергетика. Фотосинтез
  - Структура и функционирование клетки. Рецепция и клеточная сигнализация.
- Межклеточные взаимодействия. Молекулярные механизмы клеточной дифференцировки, иммунитета и онкогенеза. Взаимодействие вирус-клетка
- Теоретические основы клеточных технологий: стволовые клетки, клеточная инженерия, клеточная терапия
  - Биологическая подвижность
  - Биохимия и физиология микроорганизмов и грибов. Использование микроорганизмов и грибов в биотехнологии
  - Биохимия и физиология растений. Механизмы роста, адаптации и взаимодействия с другими организмами. Фотобиотехнология
  - Механизмы функционирования сенсорных и двигательных систем
  - Физиологические механизмы деятельности висцеральных систем
  - Организация поведения и высших психологических функций человека и животных. Экологические и эволюционные аспекты поведения и коммуникации
  - Физиологические механизмы адаптации. Эволюционная физиология, биохимия и морфология. Физиология экстремальных состояний. Системы жизнеобеспечения и защиты человека
  - Клиническая физиология
  - Механизмы морфогенеза. Сравнительная и функциональная морфология
  - Механизмы и закономерности индивидуального развития организмов
  - Механизмы генетических процессов и разработка принципов управления наследственностью. Молекулярная экология
  - Организация и биосферные функции природных экосистем - лесных, морских, пресноводных и других. Динамика и механизмы устойчивости сообществ
  - Проблемы экологии, популяционной биологии и адаптации организмов к среде обитания
  - Инвазии чужеродных видов. Проблемы интродукции. Паразитарные системы.
- Биологические средства защиты растений и животных
- Физико-химические и биологические процессы почвообразования
- Пространственно-временная организация почв
- Воздействие факторов внешней среды на биологические системы. Радиобиология
  - Эволюция органического мира и проблемы палеобиологии. Космическая биология
  - Систематика и таксономия организмов. Флористика, фаунистика и биогеография
  - Оценка состояния и проблемы сохранения биоразнообразия. Мониторинг
  - Научные основы рационального использования и воспроизводства биологических ресурсов
  - Нелинейные процессы и самоорганизация в биологических системах
  - Математические модели в биологии. Биоинформатика
  - Методы, приборы и оборудование для исследований в области физико-химических основ биологии и биотехнологии
  - Проблемы биобезопасности
- Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233

### Отделение наук о земле

- Физические поля Земли, их природа, взаимодействие и интерпретация
- Глубинное строение и геодинамика Земли; взаимодействие внутренних и внешних (гидросфера, атмосфера, ионосфера) геосфер и их влияние на окружающую среду
- Современная геодинамика, движения и напряженное состояние земной коры, сейсмичность и сейсмический прогноз
  - Современные и древние процессы седиментогенеза, литогенеза и осадочного рудообразования
  - Глобальные и региональные модели строения и формирования основных типов структур Земли
  - Ранние этапы геологической истории Земли, особенности геологии и металлогении раннего докембрия, формирование гидросферы и атмосферы
  - Осадочные бассейны континентов, шельфа и континентального склона: закономерности образования и строения, полезные ископаемые
  - Проблемы зарождения биосферы Земли и ее эволюция; геологическая функция биоты в истории Земли: биогеохимические циклы, роль в седиментогенезе, экологические кризисы и катастрофы; палеоклимат
  - Фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа, развитие нефтегазового комплекса России
  - Экспериментальные исследования физико-химических проблем геологических процессов и термодинамика природных систем
  - Изотопные системы в природных процессах; изотопная геохронология и источники вещества
  - Биостратиграфические, хемотратиграфические, изотопно-геохронологические методы стратиграфии и периодизации истории Земли
  - Наночастицы в природе: условия образования, экологические и технологические аспекты их изучения
  - Проблемы магматизма: состав, источники, эволюция, механизмы образования и дифференциации магм, роль флюидов, связь с рудообразованием
  - Генетические особенности и условия образования крупных и суперкрупных месторождений стратегических видов минерального сырья и проблемы их комплексного освоения
  - Проблемы комплексного освоения недр Земли и новые технологии извлечения полезных ископаемых из минерального и техногенного сырья
  - Эволюция окружающей среды и прогноз ее развития в условиях быстрых природных и антропогенных изменений
  - Мировой океан: геологическое строения дна и минеральные ресурсы; физические процессы в океане и их влияние на климат Земли; морские экосистемы и их роль в формировании биологической продуктивности
  - Водные ресурсы, качество вод и проблемы водообеспеченности страны; динамика и охрана подземных и поверхностных вод и ледников
  - Изменение окружающей среды и климата: исследования, мониторинг и прогноз состояния природной среды; природные катастрофы, анализ и оценка природного риска, вулканизм
  - Исследование, мониторинг и прогноз состояния криосферы и изменений мерзлотных условий

- Физические и химические процессы в атмосфере, термодинамика, перенос радиации, изменение состава
  - Изменение природно-территориальных комплексов России в зонах интенсивного техногенного воздействия; основы рационального природопользования
  - Разработка новых методологий, технологий, технических средств и аналитических методов исследований поверхности и недр Земли, ее гидросферы и атмосферы
  - Изучение вещественного состава и строения Земли, Луны и других планет; космохимия и метеоритика как средство познания происхождения и эволюции Земли
  - Геоинформатика, создание геоинформационных систем
- Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233

#### Отделение общественных наук

- Философия, социология, психология и правовые науки
- Цивилизационные перемены в современной России: духовные процессы, ценности и идеалы
  - Социальные теории на рубеже XXI века: парадигмы, тенденции, перспективы
  - Проблемы взаимодействия человека, общества и природы: концепция устойчивого развития и ее реализация в России
  - Социально-политическое развитие и консолидация современного российского общества
  - Политические отношения в российском обществе: власть, демократия, личность
  - Трансформация социальной структуры российского общества
  - Укрепление российской государственности, включая федеративные отношения
  - Правовая и судебные реформы в России и международный правопорядок XXI века
  - Человек как субъект общественных изменений: социальные, гуманитарные и психологические проблемы
  - Проблемы развития массового сознания
- Экономические науки
- Методологические проблемы экономической теории
  - Закономерности эволюции социально-экономических систем и институтов и их реформирование. Формирование институтов смешанного общества. Организационно-управленческие структуры и механизмы их обновления
  - Теоретические проблемы становления «экономики знаний»
  - Технологическое развитие России: состояние, условия, перспективы
  - Научные основы концепции социально-экономической стратегии Российской Федерации.
  - Анализ нестационарных динамических макроэкономических процессов. Теория и методы экономико-математического моделирования
  - Теоретические проблемы социально-экономической динамики и ее прогнозирование
  - Проблемы развития человеческого потенциала
  - Потенциал Российской Федерации и проблемы воспроизводства национального богатства. Проблемы обеспечения устойчивого и экологически безопасного экономического роста. Проблемы и механизмы обеспечения социально-экономической

безопасности. Качество экономического роста. Промышленная политика Российской Федерации

- Научные основы финансовой, кредитно-денежной и ценовой политики.

Формирование современной финансово-кредитной системы

• Закономерности трансформации аграрных отношений и реформирование агропромышленного комплекса

• Трансформации социально-экономического пространства России; стратегия территориального развития. Научные основы региональной политики; экономический федерализм. Устойчивое развитие регионов и городов

- Интеграция Российской Федерации в мировое экономическое пространство.

Формирование единого экономического пространства в рамках СНГ

- Экономическая история России и история российской экономической мысли

Мировое развитие и международные отношения

- Формирование основ современной системы международных отношений

• Система международной безопасности. Пути предотвращения и разрешения международных конфликтов. Национальная безопасность России

• Место и роль России в мировом хозяйстве. Особенности интеграции России в мировое экономическое сообщество

- Развитие СНГ. Национальные интересы и стратегия России в СНГ.

• Основные центры силы (США, Европа, Япония, Китай, новые индустриальные страны) и стратегия России в мировом развитии

• Развивающиеся страны и страны с переходной экономикой в мировых хозяйственных и социально-экономических процессах

• Комплексные исследования экономического и политического развития зарубежных стран и регионов мира во взаимосвязи с национальными интересами России.

Опыт реформ в зарубежных странах

- Проблемы глобализации и регионализации в международных отношениях

Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233

Отделение историко-филологических наук

- Методология и теория исторического процесса

- Общественный потенциал истории и опыт российских и мировых

трансформаций

• Изучение эволюции человека, обществ и цивилизаций: человек в истории и история повседневности

• Историко-культурное и государственное развитие России и ее место в мировом историческом и культурном процессе; Россия и славянский мир

• Этногенез, этнокультурный облик народов, современные этнические процессы; историко-культурное взаимодействие Евразии

• Сохранение и изучение археологического, культурного и научного наследия и эстетические ценности отечественной и мировой литературы и фольклора в современном осмыслении

• Духовные и эстетические ценности отечественной и мировой литературы и фольклора в современном осмыслении

• Фундаментальные исследования теории, структуры и исторического развития языков мира

- Грамматический и лексический строй русского языка, его функционирование и эволюция; создание электронного корпуса текстов русского языка, литературы и фольклора как базы для фундаментальных и прикладных исследований

Постановление Президиума РАН от 1 июля 2003 г. № 233