

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

Кафедра электронных приборов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО- ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В БЕЗМАСЛЯНОМ ВАКУУМЕ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направлений «Фотоника и оптоэлектроника» и
«Электроника и микроэлектроника»
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

2012

621.3
О-662

УДК 621.385:620.165.29(076.5)

Орликов, Леонид Николаевич.

Исследование процесса электронно-лучевой обработки материалов в безмасляном вакууме = Методические указания к лабораторной работе для студентов направлений «Фотоника и оптоэлектроника» и «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. - 17 с.

В данной работе исследуется обработка материала в безмасляном вакууме с помощью электронного луча. Проводится анализ вакуумной среды, содержащей и не содержащей углеводороды на производство электронных приборов. Рассматриваются подходы к математическому моделированию процессов.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоэлектроника» по курсу «Основы технологии оптических материалов и изделий» и по направлению «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства») по курсу «Технология материалов и изделий электронной техники»

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой ЭП

_____ С.М. Шандаров

« ____ » _____ 2012 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В БЕЗМАСЛЯНОМ ВАКУУМЕ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направлений «Фотоника и оптоэлектроника» и
«Электроника и микроэлектроника»
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Разработчик

д-р техн. наук, проф. каф. ЭП

_____ Л.Н. Орликов

_____ 2012 г

Содержание

1 Введение.....	5
2 Теоретическая часть.....	5
2.1 Особенности процесса откачки	5
2.2 Средства для без масляной откачки газа	6
2.3 Электронно-лучевая обработка материалов	7
2.3.1 Выбор режимов обезгаживания деталей приборов.....	7
2.3.2 Особенности проведения техпроцессов для уменьшения влияния углеводородов.....	8
2.3.3 Выбор мощности электронного пучка.....	9
2.4 Контрольные вопросы	10
3 Экспериментальная часть.....	11
3.1 Оборудование	11
3.1.1 Вакуумное оборудование	11
3.1.2 Экспериментальная модель источника электронов	12
3.2 Порядок выполнения работы и методические указания.....	13
3.3 Задание на работу.....	14
3.4 Выключение установки	14
3.5 Вопросы для самопроверки	14
3.6 Содержанке отчета.....	15
Список литературы	16

1 Введение

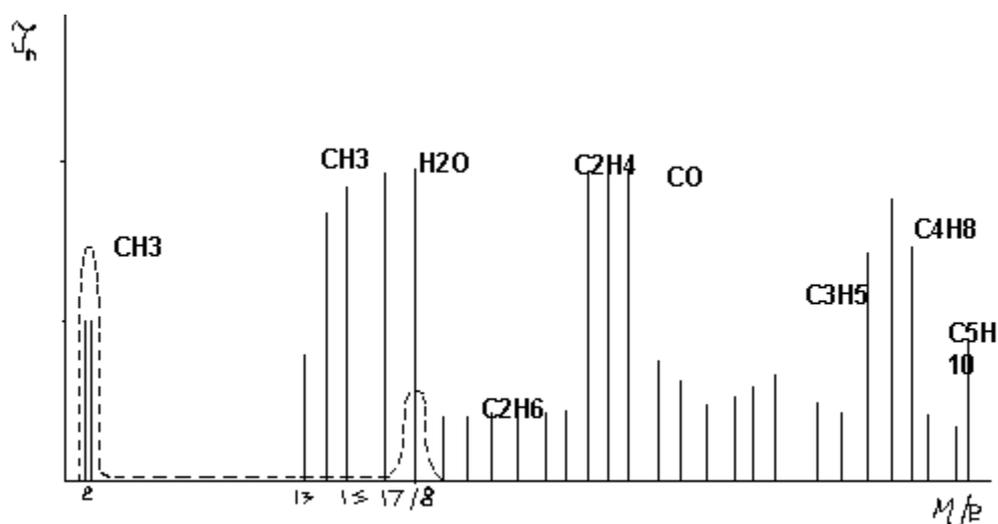
В настоящее время бурно развиваются технологии с использованием ионной имплантации, ионного легирования, а также получения качественных пленок с применением электрического разряда, лучевых и плазменных методов /1-9/. Большинство этих процессов требует высокого и чистого вакуума. Подавляющее количество электронно-лучевых установок в настоящее время содержит масляные средства откачки на базе диффузионных паромасляных насосов. Однако простота получения высокого вакуума диффузионными насосами оборачивается тем, что в откачиваемом объеме присутствуют углеводороды с давлением насыщенных паров равном предельному давлению насосов. Это приводит к осаждению углеродных пленок в нежелательных для технологии местах, к изменению состава остаточной атмосферы, к нарушению адгезии пленок, изменению их стехиометрического состава, изменению электрической прочности изоляторов и другим нежелательным последствиям. Особенно необходим чистый вакуум при нанесении пленок, т.к. энергия адсорбции паров масел меньше, чем энергия адсорбции паров испаряемого материала.

2 Теоретическая часть

2.1 Особенности процесса откачки

Работа электровакуумного прибора требует наличия в нем высокого вакуума на уровне 10^{-3} - 10^{-5} Па. При этих давлениях обеспечивается беспрепятственный пролет большинства электронов от катода к аноду. При уменьшении давления газа в приборе или при повышении температуры происходит выделение различных газов из материалов прибора (в основном это углеводороды: вода, азот, водород).

При разработке режимов масляной откачки требуется знание возможности откачных средств и вакуумной арматуры по удержанию паров рабочих масел, а также знание спектра газовыделений материалов, из которых изготовлен прибор. На рис. 2.1 представлен спектр остаточных газов для масляной и безмасляной откачки (штриховая линия соответствует безмасляной откачке).



— для безмасляной откачки;
 ----- для паромасляной откачки

Рисунок 2.1 - Спектр остаточных газов

2.2 Средства для без масляной откачки газа

Для безмасляной откачки с атмосферного давления существует несколько типов насосов: эластомерные механические /4/, криогенные чаще двухтактные с автономными ожижителями) /1/, эжекторные (газовые, паровые, водяные и водокольцевые) /2/, электродуговые /1/, адсорбционные, турбомолекулярные /10/.

Предельное давление, развиваемое насосами, зависит от давления насыщенных паров используемых рабочих веществ и материалов.

Часто, по экономическим соображениям, для получения безмасляного вакуума используют масляные средства откачки с последующим улавливанием паров масел механическими, электроразрядными сорбционными, либо вымораживающими ловушками. Каждый тип ловушек характеризуется пропускной способностью (около 2,5 л·см²) и обратным потоком паров масел (10⁻⁸-10⁻¹⁰ Торр л·с).

В последнее время появились термостойкие рабочие жидкости с очень низким давлением насыщенных паров, позволяющие получать вакуум по спектральному составу неотличающийся от безмасляного. Среди отечественных рабочих жидкостей это следующие: ВМ-8, ВМ-9, ФМ-2, ПФМС-2, ПФМС-13. среди зарубежных: это масла – ДС-702, ДС-703, ДС-705.

По принципам создания высокого вакуума (безмасляного) откачные средства можно разделить на следующие: электрофизические, криогенные, механические, сорбционные, прочие.

Электрофизические откачные средства предполагают существование

разряда в объеме насоса. Откачка предполагает использование сорбирующих свойств электрического разряда и распыляемого в разряде материала. К таким насосам можно отнести электроразрядные, орбитронные, геттерно-ионные, геттерные, электродуговые.

Криогенные откачные средства удаляют газ посредством адсорбции газа холодной поверхности. Хладогентом чаще служит жидкий азот, гелий. Конструкция криогенных откачных средств может быть самой разнообразной. Отличительной особенностью криогенных насосов является развитая рабочая поверхность (например, в виде пчелиных сот), наличие внешней тепловой изоляции, необходимость удаления льда после проведения процесса.

В качестве прочих откачных безмасляных средств могут выступать насосы, имеющие совокупность эффектов откачки, либо новые явления в удалении газов (на основе взрыва диффузии, облучения и т.д.).

Широкое распространение в техники нашли механические турбомолекулярные насосы, в которых откачка производится посредством наклонных прорезей в дисках быстровращающейся турбины. Преимущество турбомолекулярных насосов перед другими типами откачных средств заключается в следующем:

- не загрязняют вакуумную систему рабочим веществом по сравнению с крионасосами, а адсорбционными и электрофизическими свойствами;
- откачивают труднооткачиваемые газы такие как: водород, гелий, неон;
- допускают откачку кислородосодержащих средств, имеют быструю готовность к работе;
- имеют откачку на выходе, что обеспечивает согласование с вакуумной системой по потоку газа.

Диапазон рабочих давлений турбомолекулярных насосов зависит от количества дисков в турбине. С уменьшением их количества давление запуска возрастает вплоть до атмосферного.

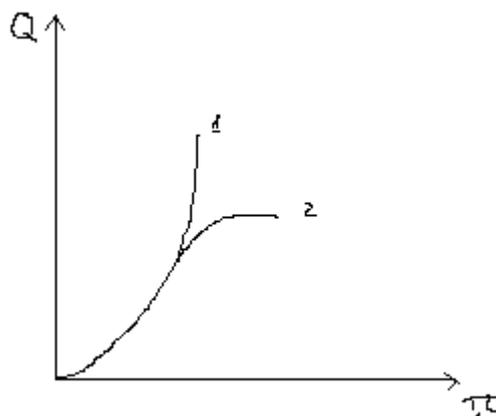
К недостаткам турбомолекулярных насосов следует отнести:

- невозможность прогрева элементов насоса;
- большая металлоемкость по отношению к скорости откачки;
- невозможность профилактики турбины при попадании в насос посторонних или крекинговых материалов.

2.3 Электронно-лучевая обработка материалов

2.3.1 Выбор режимов обезгаживания деталей приборов

При давлении в вакуумной системе менее 10 Па основной поток газа составляет газы выделения с элементов. Длительность и полнота обезгаживания прибора в большой степени зависит от материала деталей, режима предварительной обработки. Это определяет состав остаточных газов и их количество. На рис.2.2 показаны типичные кривые газы выделения для различных типов нагрева.



- 1 - электронный нагрев;
2 - термический нагрев

Рисунок 2.2 – Зависимость потока газовой выделения от температуры.

Электронный нагрев, по сравнению с температурным, способствует высвобождению газа из глубины материала (на один электрон высвобождается около десяти молекул газа), а также способствует высвобождению газа из-за диссоциации ионизированных молекул.

Спектр выделившихся газов зависит от температуры обрабатываемого материала. На рис.2.3 представлен график суммарного потока газовой выделений стекла от температуры-

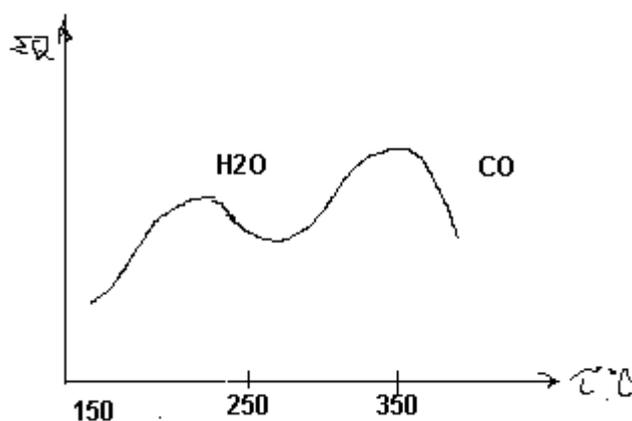


Рисунок 2.3 – График суммарного потока газовой выделений

2.3.2 Особенности проведения техпроцессов для уменьшения влияния углеводородов

Перед проведением процесса рекомендуется провести анализ всех материалов вакуумной системы и источника электронов, предельных режимов эксплуатации оборудования, составить последовательность технологических операций. Проанализировать температуру держателей,

экранов, подложки. При масляной откачке с атмосферного давления рекомендуется как можно с более высокого давления включать высоковакуумное откачное средство, не переходя грань аварийного режимам. Рекомендуется обеспечить обезгаживание элементов в режимах, составляющих около 80 % от рабочих, в течение времени нескольких десятков, минут. Спектральный состав выделившихся газов зависит от энергии адсорбции веществ. В табл.2.1 приведены теплоты адсорбции некоторых веществ.

Таблица 2.1 – Теплоты адсорбции некоторых веществ

Вещество	Воздух	Углекислый газ	Вода	Масло	Водород	Оксид углерода	Алюминий
H, $\times 10^{-6}$ дж/кмоль	20	33	92	90	9	12,6	96

Из таблицы 2.1 видно, что легче всего оседают на поверхность пары масла и воды.

Проводить технологический процесс рекомендуется при напуске газа (лучше инертного), что разбавляет концентрацию нежелательных примесей. Напыление пленок желательно проводить с максимальными скоростями, при локальном распылении газопоглотителя, при охлаждении стенок камеры.

2.3.3 Выбор мощности электронного пучка

Электроны проникают в материал на глубину так называемого проекционного пробега R

$$R = U^2 / \rho * b \quad (2.1)$$

где U - ускоряющее напряжение, В ;

ρ - плотность материала, г см;

b - константа зависящая от материала (для металлов $b=2.1 \cdot 10^{-12}$)

Например, при энергии электронов 60 кэВ проекционный пробег электронов в стали составляет 10 мм.

Максимум энергосодержания происходит на глубине δ , определяемой выражением :

$$\delta = (0.2 \div 0.4)R \quad (2.2)$$

Технологические применения электронного пучка зависят от его параметров. Диаметр пучка пропорционален току и обратно пропорционален напряжению. В первой приближении связь диаметра пучка d с током I определяется выражением

$$d = S(I/U)^{3/8} \quad (2.3)$$

где S - постоянная электронно-оптической системы.

Мощность пучка, необходимую для проведения технологической операции подбирают исходя из критической мощности W , необходимой для испарения вещества

$$W = 4aL\rho\delta / d^2 = UI \quad (2.4)$$

где a - теплопроводность материала;

L - удельная энергия испарения вещества, кал.моль

$$L = 1.9Tk * \ln 82 * Tk$$

где Tk - температура кипения материала

В табл. 2.2 приведены значения теплопроводности различных материалов.

Таблица 2.2 - Значения теплопроводности различных материалов

Материал	<i>Ag</i>	<i>Au</i>	<i>Cu</i>	<i>W</i>	<i>Si</i>
Теплопроводность $M^2/c \cdot 10^4$	1,7	1,2	1,1	0,62	0,53

Для проведения операции нагрева детали массой m в течении времени Δt требуется затратить количество энергии Q

$$Q = c * m * \Delta t = UI\Delta t \quad (2.5)$$

где c - удельная теплоемкость материала (для стали $c=0,164$)

Δt - разность температур.

2.4 Контрольные вопросы

2.4.1. Какие факторы влияют на спектр остаточных газов при безмасляной откачки?

2.4.2. Основные параметры ловушек для паров масел ?

2.4.3. Какие марки отечественных масел имеют низкое давление паров ?

2.4.4. Чем обусловлена зависимость производительности откачных средств от давления и рода газа?

2.4.5. Какие достоинства и недостатки турбомолекулярных насосов?

2.4.6. Из каких материалов предпочтительно изготавливать элементы вакуумной системы и Электронного источника?

2.4.7. Некие особенности проведения технологического процесса для уменьшения количества паров масел на подложках?

2.4.8. Какие преимущества электронно-лучевого обезгаживания материалов перед термическим?

- 2.4.9. Что такое проекционный пробег?
 2.4.10. Как связаны ток, напряжение и диаметр пучка?
 2.4.11. Как определить мощность электронной пушки для проведения технологического процесса?

3 Экспериментальная часть

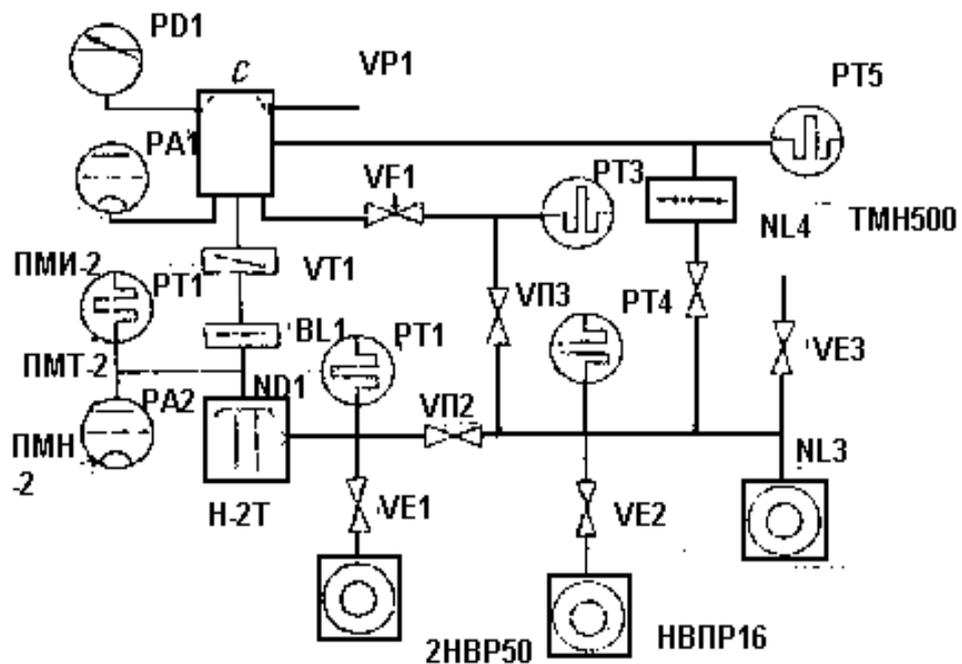
3.1 Оборудование

Для выполнения работы используется следующее вакуумное и электронное оборудование:

- 1) вакуумный агрегат установки А-3Об.05;
- 2) вакуумметрическая аппаратура;
- 3) источник высокого напряжения ПУР-5/50;
- 4) источник электронов.

3.1.1 Вакуумное оборудование

Схема вакуумной системы приведена на рис.3.1. Высоковакуумная насосная группа состоит из высоковакуумного диффузионного (паромаляного) насоса Н-2Т и турбомолекулярного (безмасляного) насоса ТМН-500.



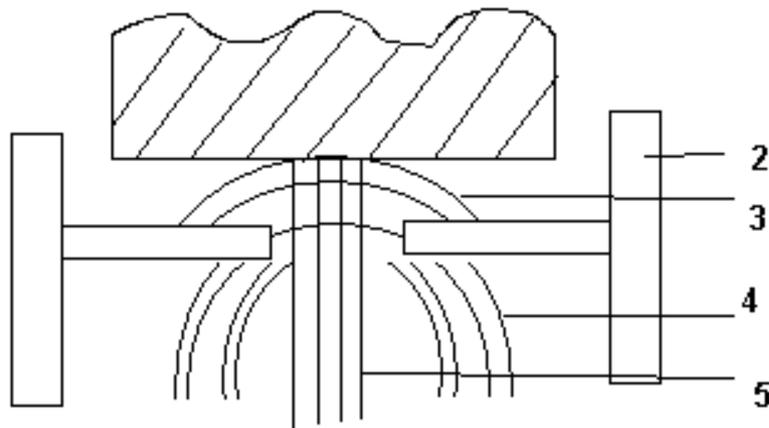
ND1, NL1-NL4 - вакуумнасосы; PD1, PA1, PA2, PT1-PT5- датчики давления; BL1-ловушка; VP1-VP3, VT4, VE1-VE4-вентили.

Рисунок 3.1 – Схема вакуумной системы установки

Предварительное разряжение в камере и на выходе высоковакуумных насосов обеспечивается форвакуумными насосами НВПР-16 и 2НВПР-5ДМ, связанными общим вакуумпроводом. Связь вакуумнасосов позволяет сокращать время выхода установки на рабочий режим, обеспечивать согласование с высоковакуумной откачной группой в режиме обмена газа за счет напуске и откачки, подавлять случайные течи и потоки десорбции, возникающие за счет отражения электронов и ионов от стенок камеры. Вакуумная система снабжена рядом манометрических преобразователей давления, позволяющих оценивать давления в различных точках установки.

3.1.2 Экспериментальная модель источника электронов

Для проведения исследований используется электронная пушка основе высоковольтного тлеющего разряда, разрядная схема которой изображена на рис.3.2. Разрядная система образована холодным катодом 1 и анодом 2.



1 - катод; 2 - анод; 3 - линии электрического поля; 4 - плазма разряда; 5 - электронный луч

Рисунок 3.2 – Схема электронной установки

При обеспечении давления 1—10 Па (развиваемого только форвакуумными насосами) и подачи на катод высокого (более 10^3 В) напряжения в системе электродов возбуждается высоковольтный тлеющий разряд. Разряду соответствуют условия левой ветви кривой – Пашена. Пространство разряда заполняют в основном две области: область катодного падения потенциала (на которой сосредоточено практически все напряжение разряда) и область прианодной плазмы, на которую приходится менее 0,5% приложенного напряжения. Ионы из плазмы разряда 4 (см. рис.3.2) диффундируют в область катодного падения, ускоряются электрическим полем 3 в направлении катода, ионизируют газ, испытывают перезарядку. В результате этих процессов на катод попадают и быстрые нейтральные

атомы. Под действием ионно-электронной эмиссии с поверхности катода выбиваются электроны, которые формируются в пространстве катодного падения потенциала в электронный луч 5 (см. рис.3.2). Электроны производят дополнительную ионизацию, способствуя поддержанию разряда.

Величина тока разряда регулируется плотностью плазмы за счет газа, чем легче газ, тем выше давление.

Электронная пушка питается от выпрямителя ПУР-5/50 через балластное сопротивление. Особенностью пушек подобного типа является несколько меньшая яркость электронного тучка, по сравнению с термокатодом; эрозия катода под действием ионной бомбардировки и вследствие этого ухудшение параметров пучка; малая плотность тока на катоде (до 1 А/см²)

3.2 Порядок выполнения работы и методические указания

3.2.1. Работа проводится на основании плана эксперимента, предварительно составленного студентом и обсужденного с преподавателем на предмет технической возможности проверки гипотез или моделирования процесса на ЭВМ. В эксперимент могут входить фрагменты поискового характера отдельные работы, связанные с функционированием предприятия и т.п.

3.2.2. Перед работой рекомендуется составить схему вакуумной и электрической части установки, определить рабочие диапазоны насосов, датчиков, источников питания, рассчитать время достижения рабочих режимов, рассчитать мощность, необходимую для проведения процесса.

3.2.3. Провести монтаж изделий в вакуумной камере, зарисовать схему эксперимента с обязательным указанием геометрии разрядной системы и расположения изделий относительно пучка. Составить технологический цикл, на все проведение работы и таблицы для снимаемых экспериментальных величин.

3.2.4. Закрывать все вентили, натекатели, проверить, все ли тумблеры выключены. Включить рубильник. Включить форвакуумный насос. Открыть обводную систему откачки камеры. Открыть воду для охлаждения мишени насосов и источника питания. Через 2-3 мин открыть трассу основной откачки. Откачать камеру до давления 5 Па.

3.2.5. Включить насос откачки выхода ТМН-500. Откачать выход ТМН-500 до наименьшего давления (5·10⁻³ мм. рт.ст.). Перевести тумблер частоты в положение ЧАСТОТА 150 Гц. Включить кнопку МАСЛОНАСОС, и кнопку ДВИГАТЕЛЬ ТМН. При этом загорится лампочка ПУСКОВОЙ РЕЖИМ. Погасание лампочки соответствует 9000 об/мин.

3.2.6. Провести измерения распределения давления по вакуумной системе. Снять зависимость давления на входе ТМН от расхода газа.

3.2.7. Перевести тумблер частоты в положение ЧАСТОТА 300 Гц. Вновь загорится лампочка ПУСКОВОЙ РЕЖИМ. Погасание лампочки соответствует 18000 об/мин. Снять зависимость предельного давления

от времени откачки. Провести калибровку термпарного датчика, снять расходные характеристики, провести работы по заданию преподавателя.

3.3 Задание на работу

3.3.1. Снять вольт-амперные характеристики пушки для нескольких значений давлений и построить их.

3.3.2. Установить определенное значение давления, довести ускоряющее напряжение до 5 кВ, измерить значения тока разряда и тока цилиндра Фарадея. Повторить эксперимент для нескольких давлений. Построить зависимость тока разряда от давления при постоянном напряжении разряда.

3.3.3. В точке фокуса электронного пучка снять зависимость тока магнитных линз от ускоряющего напряжения.

3.3.4. Снять зависимость тока разряда и тока цилиндра Фарадея от ускоряющего напряжения. оценить долю потери тока по элементам устройства.

3.3.5. Оценить плотность мощности на мишени. Сопоставить минимально необходимую для процесса мощность с экспериментальной.

3.3.6. Оценить давление паров испаряемого материала по температуре испарения.

3.3.7. Оценить параметры пленки: толщину, адгезию, равномерность скорости нанесения.

3.4 Выключение установки

3.4.1. Выключить двигатель ТМН, не выключая маслонасоса и форвакуумного насоса.

3.4.2. Провести газовое торможение ротора путем напуска воздуха в осушитель при давлении 10 Па. При этом время торможения составит около 15 мин.

3.4.3. Закрывать вентили входа и выхода ТМН, перекрыть входы форвакуумных насосов. Выключить насосы. Сделать напуск газа в насосы, закрыть воду. Перевести тумблеры в выключенное состояние, сдать установку преподавателю.

3.5 Вопросы для самопроверки

3.5.1. Почему для форвакуумных насосов нарастание паров масел проявляется при давлении менее 10 Па, а для диффузионных - при давлении менее 10-3 Па?

3.5.2. Что общего в спектре остаточных газов при масляной и безмасляной откачке?

3.5.3. Какие газы выделяются при обезгаживании деталей и как они

вливают на спектр остаточных газов?

3.5.4. В чем преимущества электронно-лучевого обезгаживания перед термическим?

3.5.5. Какие средства применяются для безмасляной откачки с атмосферного давления?

3.5.6. Чем объясняется зависимость скорости откачки от рода газа для турбомолекулярного насоса?

3.5.7. Как получить высокий безмасляной вакуум с помощью масляных откачных средств?

3.5.8. Как графически обозначаются безмасляные откачные средства?

3.5.9. Какой диапазон работы откачного и измерительного оборудования в эксперименте?

3.5.10. Что такое ионно-электронная эмиссия?

3.5.11. При каких давлениях работает источник электронов?

3.5.12. Какой принцип работы электронной пушки?

3.5.13. Как регулируются периметры разряда?

3.5.14. Как влияет материал катода и анода на характеристики пушки?

3.5.15. Влияет ли род газа на рабочее давление и почему?

3.5.16. Какое назначение балластного сопротивления?

3.5.17. Какие достоинства и недостатки пушек на основе высоковольтного тлеющего разряда?

3.6 Содержание отчета

Отчет о проделанной работе оформляется с соблюдением стандартов. Каждый студент оформляет свою часть отчета. Защита работы проводится на следующем занятии по всему отчету. В соответствующих разделах отчета необходимо представить:

- схему вакуумной установки, не которой проводилась работа с подписью диапазонов работы оборудования и проводимостью трассы;
- расчет газовой выделений и сравнение их с экспериментальным;
- данные по расходу газа при работе на частотах 150 Гц, 300 Гц;
- измерение давления во времени откачки и без откачки. Расчет потока десорбции;
- расчетные данные скорости откачки откачных средств и сравнение их с паспортными;
- варианты установок с безмасляной откачкой газе;
- элементы конструкции вакуумной системы (соединение, токоввод, ввод вращения и т.д., по одному на каждого участника эксперимента);
- конструкцию электронной пушки и ее вольт-амперные и эксплуатационные характеристики;

- расчет мощности на проведение процесса;
- технологический цикл работы;
- данные эксперимента;
- теоретические данные по спектру выделения различных газов из используемых материалов.

Список литературы

1. Барыбин В.Г. Физико- технологические основы электроники. – СПб.: Лань, 2001. – 270 с.
2. Шадрин Г.А. Лабораторный практикум по дисциплине материалы и компоненты электронной техники. – Томск: ТПУ, 2000. – 128 с.
3. Данилина Т.И. Смирнов С.В. Ионно-плазменная технология в производстве СБИС. – Томск: ТУСУР, 2000. – 140 с.
4. Бубенчиков А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий. – М.: Высш.школа. 1989. – 200 с.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Исследование процесса электронно-лучевой обработки материалов в
безмасляном вакууме

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Технология материалов и изделий электронной техники»

Усл. печ. л. _____ Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40