

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Технология производства электровакуумных приборов: термовакuumная обработка. Экспериментальное сопровождение технологического процесса

Учебное пособие

Под редакцией И.П. Ли, Ю.В. Панфилова



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2 0 2 2

УДК 621.385.6
ББК 32.85
Т38

Издание доступно в электронном виде по адресу
ebooks.bmstu.press/catalog/7551/

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Авторы:

С.П. Бычков, И.П. Ли, В.С. Петров, А.А. Полунина, И.Ф. Ханбеков,
В.В. Васильевский, Д.Н. Локтев

Рецензент:

д-р техн. наук, профессор *В.В. Одинокоев*

Т38 **Технология производства электровакуумных приборов: термовакуумная обработка. Экспериментальное сопровождение технологического процесса :** учебное пособие / [С. П. Бычков и др.] ; под ред. И. П. Ли, Ю. В. Панфилова. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. — 119, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5823-3

Рассмотрены физико-химические основы и проанализирован процесс термовакуумной обработки электровакуумных приборов. Приведено описание специфических особенностей магнетрона как электровакуумного прибора для генерирования высокочастотного излучения. Перечислены особые свойства используемых материалов. Даны характеристики и указано своеобразие операций технологического процесса термовакуумной обработки магнетронов.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Наноинженерия» и «Электроника и микроэлектроника» в рамках дисциплины «Термовакуумные процессы и оборудование». Материал пособия можно использовать студентам и аспирантам соответствующего профиля при выполнении научно-исследовательских работ.

УДК 621.385.6
ББК 32.85



Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: info@bmstu.press

ISBN 978-5-7038-5823-3

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Предисловие

Учебное пособие предназначено для самостоятельного углубленного изучения модуля «Технология производства электровакуумных приборов: термовакuumная обработка» дисциплины «Термовакuumные процессы и оборудование», которая входит в образовательную программу бакалавриата по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» профиля «Электронное машиностроение» и направлению подготовки 28.03.02 «Наноинженерия» профиля «Инженерные нанотехнологии в машиностроении».

Цель издания — освоение студентами общих принципов, положений и методов разработки многооперационных наукоемких технологических процессов этого производства, содействие в подготовке специалистов производства электровакуумных приборов.

Для работы над материалом пособия требуется предварительное изучение таких предметов, как математический анализ, физика, химия, физико-химические основы электронных технологий (для направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»), физико-химические основы нанотехнологий (для направления подготовки 28.03.02 «Наноинженерия»).

Проработка дисциплины «Термовакuumные процессы и оборудование» необходима для последующего изучения образовательной программы, в частности дисциплины «Проектирование технологического оборудования», а также для подготовки и защиты выпускной квалификационной работы.

После изучения материала пособия студенты смогут:

знать

устройство и принципы действия технологических систем термовакuumной обработки электровакуумных приборов, используемых при производстве, в том числе оборудования и оснастки, необходимых для этого;

правила подготовки и проведения эксперимента;

уметь

анализировать полученные результаты;

владеть

комплексом методов, положений и основ для разработки сложных наукоемких технологических процессов.

Знание методов проведения подобных исследований, средств и способов обработки получаемых результатов необходимо для высокопрофессиональной подготовки выпускаемых специалистов, которые в ходе экспериментальных исследований смогут с помощью математической обработки полученных результатов рассчитать термодинамические и кинетические

константы технологических процессов производства. В частности, при серийном производстве магнетронов специалист приобретает возможность оценивать качество новой партии представленных для производства материалов, значительно сокращать время определения причин брака и корректировать параметры технологических процессов.

При подготовке учебного пособия были использованы материалы экспериментальных исследований технологических операций в производстве малогабаритных магнетронов, выполненных на базе НТЦ «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон», с которым кафедра «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана длительно сотрудничает. Особенностью производства здесь является относительно большой удельный вес экспериментального сопровождения технологических процессов, требующего наличия особых знаний. В настоящее время работники НТЦ «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон» совместно с главными конструкторами этого предприятия и сотрудниками кафедры ведут исследования по созданию принципиально новых типов электровакуумных приборов, например с безнакальным запуском с малым (не более 0,5 с) временем готовности, основанных на новейших физико-химических, физико-технологических, теплофизических принципах. Использование безнакальных катодов позволяет совершить качественный скачок в области электровакуумного приборостроения и создания суперсовременной аппаратуры специального назначения ближней и дальней радиолокации в условиях сверхвысоких скоростей наблюдаемых объектов.

Разработка технологий производства новых типов электровакуумных приборов вызывает необходимость решения некоторых задач, в том числе кадровых, т. е. обуславливает подготовку компетентных квалифицированных кадров, владеющих глубокими специальными знаниями в этой сфере. Данное пособие можно отнести к одному из инструментов реализации таких задач.

Структурно издание состоит из пяти тематических глав, которые предвзывает введение с описанием специфики электровакуумного производства, указанием основных типов электровакуумных приборов. На примере магнетрона в пособии рассмотрены особенности конструкции электровакуумных приборов.

Глава 1 посвящена сущности технологического процесса термовакуумной обработки электровакуумных приборов, характеристике основных технологических операций. Здесь перечислены требования к рабочему вакууму для основных типов электровакуумных приборов, подробно рассмотрены особенности реализации процесса штенгельной откачки приборов при проведении термовакуумной обработки с описанием типового оборудования, выделены две укрупненные последовательные стадии термовакуумной обработки, различающиеся характером газовыделения: первая стадия протекает до активирования катода, вторая — во время активирования.

В главе 2 подробно описаны физико-химические процессы, протекающие на первой стадии термовакуумной обработки электровакуумных

приборов, выделены специфические участки с различным характером изменения остаточного давления прибора, указаны факторы, определяющие изменение вакуума в приборе на разных участках термовакуумной обработки, даны характеристики газовыделения при термовакуумной обработке деталей из различных материалов, которые входят в состав обрабатываемого электровакуумного прибора. Рассмотрены особенности термического обезгаживания, представлены результаты исследования процессов активирования пористых геттеров. Кроме того, проанализировано применение термоакустического обезгаживания при одновременном тепловом и механическом воздействии на обрабатываемый прибор для увеличения количества удаляемых газов при термовакуумной обработке электровакуумного прибора. На результатах экспериментальных исследований показано увеличение эффективности обезгаживания.

Глава 3 посвящена физико-химическим процессам, протекающим на второй стадии термовакуумной обработки электровакуумных приборов, активированию катодов при этих процессах, главным образом применительно к различным типам оксидных катодов, наиболее широко используемым в настоящее время в этой сфере. Проанализировано влияние различных материалов, конструкционных характеристик катодов и параметров режимов их обработки на эмиссионную способность этих катодов, охарактеризованы различия конструкций и режимов работы термоэлектронных и безнакальных катодов.

В главе 4 рассмотрены физико-химические процессы, реализуемые после герметизации (отпая) прибора, показана важность операции отпая для обеспечения вакуумной плотности и герметичности прибора, представлены результаты исследований по оценке объема остаточных газов в приборе после его отпая, описаны действие геттеров для поддержания требуемого вакуума в приборе, а также процесс работы магнетрона при генерации требуемого потока излучения.

Наряду с изложенным представлены методически обработанные материалы, обобщающие и интерпретирующие результаты многолетних экспериментальных исследований физико-химических процессов, протекающих при изготовлении одного из важнейших представителей обширного семейства электровакуумных приборов — магнетронов — резонансных приборов, в которых электронный поток взаимодействует со сверхвысокочастотным полем. Исследования были выполнены главным образом в лабораториях АО «Плутон» — одного из основных производителей магнетронов в России.

Экспериментальные исследования описаны для термовакуумной обработки малогабаритных магнетронов при мелкосерийном производстве, отличающейся некоторыми особенностями.

Список принятых сокращений

ВЭЭ	—	вторичная электронная эмиссия
ГЦК	—	гранцентрированная кубическая (кристаллическая решетка)
КВЧ	—	крайне высокая частота
КЭМС	—	коэффициент электромеханической связи
НОЛН	—	нормальная осветительная лампа накаливания
ОВБ	—	оксидная ванадиевая бронза
ОЦК	—	объемно-центрированная кубическая (кристаллическая решетка)
ПУЛ	—	приемно-усилительная лампа
ТВО	—	термовакuumная обработка
ТЭЭ	—	термоэлектронная эмиссия
ФЭУ	—	фотоэлектронный умножитель
ЦЭЛТ	—	цветная электронно-лучевая трубка
ЩЗМ	—	щелочноземельные металлы
ЭВП	—	электровакуумный прибор
ЭВПр	—	электровакуумное производство
ЭЛТ	—	электронно-лучевая трубка
ЭОП	—	электронно-оптический преобразователь
ЭОС	—	электронно-оптическая система
ITU	—	International Telecommunication Union

Список принятых обозначений (с единицами измерения)

Обозначение	Наименование	Единицы измерения	
		в системе СИ	внесистемные
$D_{об}$	Коэффициент объемной диффузии	м ² /с	см ² /с
D_S	Коэффициент поверхностной самодиффузии	м ² /с	см ² /с
E	Энергия	Дж	эВ
f	Частота колебаний	Гц	—
m	Масса	кг	—
P	Давление	Па	Торр; кг/мм ²
$P_{пр}$	Предельное остаточное давление насоса	Па	Торр
Q	Количество откачанного газа	Па · м ³	Торр · л
S	Быстрота действия насоса	м ³ /с	л/с
T	Температура	К; °С	эВ
V	Объем	м ³	—
α	Коэффициент поляризуемости	м ³	нм ³ ; Å ³
α_v	Экспоненциальная константа	1/с	—
β_v	Гиперболическая константа	Па · с	Торр · с
γ_v	Параболическая константа	Па · с ^{0,5}	—
ζ	Относительное количество откачанного газа	Па · с	Торр · с
τ	Время	с	—
φ	Работа выхода	Дж	эВ

Примечание. 750 Торр = 10⁵ Па; 1 эВ ≈ 1,6 · 10⁻¹⁹ Дж;
1 К = 8,61732814974056 · 10⁻⁵ эВ.

Введение

Электронное машиностроение относится к научно-техническому и производственному направлениям в приборостроении и занимается проектированием и изготовлением специального технологического оборудования, предназначенного для производства электровакуумных и полупроводниковых приборов, радиодеталей, радиокомпонентов и других изделий электронной техники.

Впервые организация учебной специальности «Электронное машиностроение» была проведена Г.А. Шаумяном — заведующим кафедрой «Станки и автоматы» МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1944 г., что было связано с необходимостью разработки линейки сборочных станков-автоматов полупроводниковых приборов — селеновых и купроксных выпрямителей для зарядки аккумуляторов подводных лодок и оснащения радиотехнических приборов. Для этого в Москве построили новый завод с опытно-конструкторским бюро (ОКБ), работу которого курировал Г.А. Шаумян. Первый станок-автомат стал осуществлять сборку селеновых выпрямителей (столбов) в 1948 г.

Впоследствии специальность «Электронное машиностроение» несколько раз трансформировалась. В 1980-е годы кафедре присвоили название «Электровакуумное и полупроводниковое машиностроение». Ныне это кафедра «Электронные технологии в машиностроении» факультета «Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В штатный состав кафедры входят четыре доктора технических наук: профессор Ю.В. Панфилов, профессор Ю.Б. Цветков, профессор Е.А. Деулин, профессор В.П. Михайлов и 10 доцентов — кандидатов технических наук. Активное участие в работе кафедры принимают д-р техн. наук В.В. Одинокоев и д-р техн. наук С.Б. Нестеров.

Отдельным полноценным, самостоятельным и важным направлением деятельности кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана является реализация образовательных программ по подготовке специалистов для производства электровакуумных приборов.

В 1962 г. был создан Московский институт электронного машиностроения (МИЭМ), преподавателями-совместителями которого были ведущие специалисты Министерства электронной промышленности (МЭП): С.А. Зусмановский, А.Б. Киселев, Л.А. Семенов, А.И. Пипко, М.Ф. Копылов, Д.Б. Зворыкин, В.А. Солнцев, В.М. Пролейко.

В настоящее время одним из ведущих предприятий Российской Федерации по серийному производству электровакуумных приборов является АО «Плутон» (Москва), на котором работают выпускники главным образом

московских вузов: МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, МИЭМ, МИРЭА — Российского технологического университета, Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева и Московского авиационного института (национального исследовательского университета) — МАИ.

Электровакуумное производство связано с изготовлением приборов с одним из двух видов рабочей среды: электронных — с формированием и движением потока электронов и ионных — с формированием и движением потока ионов в форме различных газовых разрядов в вакууме. С учетом того, что в электронных приборах давление остаточных газов обычно не превышает 10^{-4} Па, а в ионных равно $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па и выше, электровакуумные приборы подразделяют на вакуумные приборы, в которых в качестве рабочей среды в процессе эксплуатации служит вакуум, и газонаполненные приборы, в которых в качестве рабочей среды в процессе эксплуатации выступает инертный газ или газовая смесь заданного состава, а вакуум используется как промежуточное состояние в процессе изготовления этих приборов.

Вакуумные приборы подразделяют по назначению следующим образом:

- приемно-усилительные лампы;
- СВЧ-приборы (клистроны, магнетроны);
- генераторные лампы;
- электронно-лучевые приборы — электронно-оптические преобразователи, рентгеновские электронно-оптические преобразователи, электронно-лучевые трубки, цветные электронно-лучевые трубки и др.

Газонаполненные приборы — это, как правило, газоразрядные лампы.

К электровакуумным приборам можно отнести также лампы накаливания (обычные и галогенные лампы накаливания, ксеноновые лампы), в которых вакуум и газовая среда используются в процессе изготовления и/или для обеспечения требуемого срока службы ламп.

Производство электровакуумных приборов характеризуется некоторыми особенностями:

- применением большого количества различных материалов (до 90 % элементов Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева);
- использованием материалов с особой чистотой или точностью состава;
- широким использованием тугоплавких металлов и связанной с этим сложностью их получения (в порошковой металлургии) и обработки — изготовление проволоки и ленты толщиной менее 10 мкм, рекристаллизация структуры и др.;
- огневой обработкой стекла (выдуванием, прессованием, вытягиванием, отливкой, получением металлостеклянных спаев), из которого изготавливается более 70 % деталей электровакуумных приборов по массе;
- созданием сверхвысокого ($10^{-10} \dots 10^{-6}$ Па) вакуума как рабочей среды функционирования или промежуточной среды при изготовлении прибора;
- высокими требованиями вакуумной гигиены по обязательному использованию интенсивного комплекса мероприятий для защиты деталей и узлов электровакуумных приборов от пыли и других загрязнений.

Основная часть технологического процесса изготовления электровакуумных приборов — это термовакuumная обработка, которую называют технологическим процессом создания в приборе необходимого вакуума и обеспечения условий сохранения его в процессе эксплуатации прибора, придания катоду способности эмитировать электроны, обеспечения оптимальной и стабильной работы прибора в течение регламентированного срока службы.

В пособии рассматривается технология термовакuumной обработки электровакуумных приборов на примере магнетронов различных конструкций с отражением подходов и приемов к экспериментальным методикам исследования параметров операций термовакuumной обработки (рис. В1).

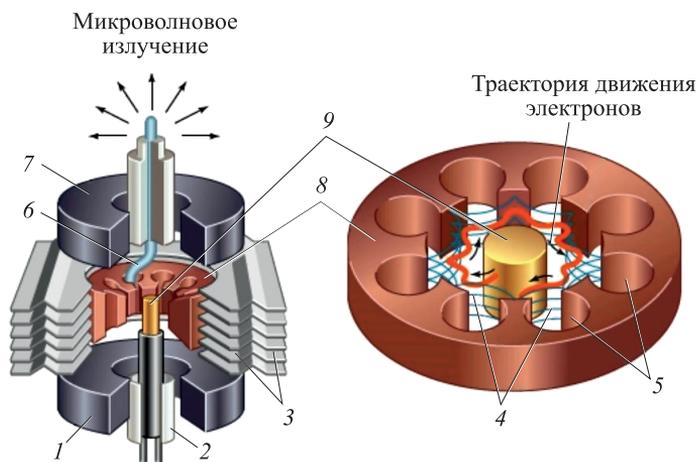


Рис. В1. Схема многорезонаторного магнетрона:

1, 7 — магниты; 2 — керамическая втулка; 3 — радиатор охлаждения; 4 — электромагнитное высокочастотное поле; 5 — многоканальный объемный резонатор; 6 — наружная антенна; 8 — анод; 9 — катод

В центре расположен цилиндрический катод 9 с подогревателем, вокруг него в медном анодном блоке 8 находятся многоканальные объемные резонаторы 5. Сверху и снизу магнетрона расположены магниты 1 и 7. Напряжение между анодом 9 и катодом 8 создает электрическое поле, перпендикулярное магнитному полю, в котором осуществляется движение электронов. Магнитная индукция в электромагнитном высокочастотном поле 4 направлена вдоль оси магнетрона. Резонаторы 5 в виде продольных щелей являются частью пространства взаимодействия между анодом и катодом. В этом пространстве электроны взаимодействуют с СВЧ-полем резонаторной системы. В пространстве взаимодействия магнетрона протекают эмиссионные и вторично-эмиссионные процессы, происходит формирование электронных потоков и осуществляется передача энергии в виде электромагнитного микроволнового излучения (см. рис. В1). Энергия выводится через наружную

антенну 6, подключенную через один из резонаторов. Катод изолирован от корпуса посредством керамической втулки 2. Избыточная теплота от анода рассеивается через радиатор охлаждения 3.

Изменяя конфигурацию резонатора с помощью щелевых резонаторов 3 (рис. В2) в объеме анода 1, который охватывает расположенный по оси катод 2 магнетрона, можно получить магнетрон с другими частотными характеристиками.

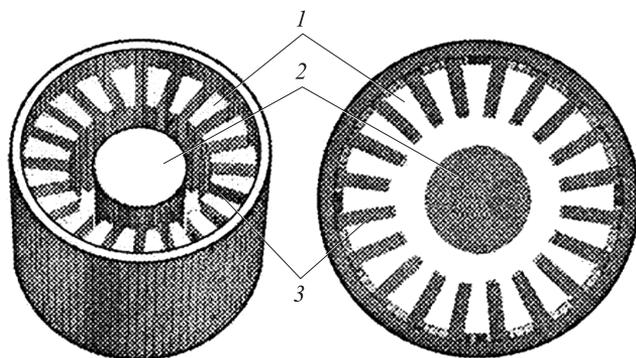


Рис. В2. Схема щелевого многорезонаторного магнетрона:
1 — анод; 2 — катод; 3 — многоканальный щелевой объемный резонатор

В классической электродинамике под электромагнитным излучением понимают образование электромагнитных волн благодаря ускоренно движущимся заряженным частицам в вакууме или переменному току на поверхности металлических антенных излучателей в атмосферных условиях.

В квантовой теории под электромагнитным излучением понимают возникновение фотонов при изменении состояния квантовой системы.

Электромагнитные волны (или электромагнитное излучение) — распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. В электромагнитных полях, порожденных электрическими зарядами и их движением, к излучению принято относить ту часть переменных электромагнитных полей, которая способна распространяться наиболее далеко от своих источников — движущихся зарядов, затухая наиболее медленно с расстоянием.

В зависимости от длины волны электромагнитное излучение условно подразделяется на диапазоны, границы между которыми не являются резкими, что связано, во-первых, с методами генерации и характером воздействия излучения на вещество, во-вторых, с методами теоретического описания. Первые пять диапазонов описываются методами квантовой физики, а последние два — методами классической электродинамики. Границы диапазонов, определенные Международным союзом электросвязи, представлены в табл. В1.

Таблица В1

**Диапазоны электромагнитного излучения, определенные
Международным союзом электросвязи**

Тип излучения	Длина волны, м	Частота, с ⁻¹	Энергия фотонов, эВ
γ-излучение	$< 10^{-11}$	$> 3 \cdot 10^{19}$	$> 10^5$
Рентгеновское	$10^{-11} \dots 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{19} \dots 3 \cdot 10^{16}$	$10^5 \dots 10^2$
Ультрафиолетовое	$10^{-8} \dots 4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{16} \dots 0,75 \cdot 10^{14}$	$10^2 \dots 3$
Видимое излучение	$4 \cdot 10^{-7} \dots 7,5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} \dots 7,5 \cdot 10^{14}$	3,0...1,6
Инфракрасное	$7,5 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{11}$	$1,6 \dots 10^{-3}$
Микроволновое	$10^{-3} \dots 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^9$	$10^{-3} \dots 10^{-5}$
Радиоволновое	$> 10^{-1}$	$< 3 \cdot 10^9$	$< 10^{-5}$

Международный союз электросвязи (International Telecommunication Union — ITU) — это международная организация, определяющая рекомендации в области телекоммуникаций и радио и регулирующая вопросы международного использования радиочастот, основана в Париже в 1865 г. как Международный телеграфный союз. Свое нынешнее название получил в 1934 г., а в 1947 г. стал специализированным учреждением Организации Объединенных Наций.

Регламент Международного союза электросвязи почти полностью совпадает с ГОСТ 24375—80 Российской Федерации, который дает обобщенную разбивку радиочастотного диапазона, основанную на международных стандартах (табл. В2).

Таблица В2

Диапазоны электромагнитного излучения по ГОСТ 24375—80

Частоты	Характеристика волн	Частота колебаний
Очень низкие частоты (ОНЧ)	Сверхдлинные	3...30 кГц
Низкие частоты (НЧ)	Длинные	30...300 кГц
Средние частоты (СЧ)	Средние	300...3000 кГц
Высокие частоты (ВЧ)	Короткие	3...30 МГц
Очень высокие частоты (ОВЧ)	Ультракороткие (метровые)	30...300 МГц
Ультравысокие частоты (УВЧ)	Дециметровые	300...3000 МГц
Сверхвысокие частоты (СВЧ)	Сантиметровые	3...30 ГГц
Крайне высокие частоты (КВЧ)	Миллиметровые	30...300 ГГц
Гипервысокие частоты (ГВЧ)	Субмиллиметровые	300...3000 ГГц