

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

А.И. Аксенов

И.В. Осипов

Н.И. Буримов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
ПРИБОРОВ КВАНТОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания по выполнению курсовой работы
для студентов технических вузов

Томск 2026

УДК 621.383.29

ББК 32.851

А42

Рецензент:

Шляхтун С.В., начальник отдела разработки и производства электронных пушек
ООО «ТЭТА»

Аксенов, Александр Иванович

А42 Проектирование технологических процессов производства приборов квантовой и оптической электроники: методические указания по выполнению курсовой работы для студентов технических вузов / А.И. Аксенов, И.В. Осипов, Н.И. Буримов – Томск: ТУСУР, 2026. – 14 с.

В методических указаниях рассмотрены общие принципы выполнения расчетных курсовых работ, представлены варианты заданий на курсовые работы, даны рекомендации по проведению расчетов.

Авторами данных методических указаний являются профессорско-преподавательский состав кафедры электронных приборов (А.И. Аксенов и Н.И. Буримов), а также сотрудник профильного предприятия, коммерческий директор компании ТЭТА, г. Томск, И.В. Осипов.

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-26 от 05.05.2026 г.

УДК 621.385

ББК 32.851

© Аксенов А. И, Осипов И.В.,
Буримов Н.И. 2026

© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2026

Оглавление

Введение	4
1. Цели и задачи курсовой работы	5
2. Тематика курсовой работы.....	5
3. Структура индивидуального задания.....	6
4. Календарный график выполнения курсовой работы.....	6
5. Термозмиссионные катоды	6
5.1 Типы и параметры катодов.	6
5.2 Прямокальные катоды	7
5.2.1 Чисто металлические катоды.....	7
5.2.2 Карбидно-ториевые катоды	7
5.2.3 Оксидные катоды	8
5.2.4 Импрегнированные катоды.....	8
5.2.5 Прессованные катоды.....	8
5.2.6 Катоды на основе оксидов иттрия.....	8
5.2.7 Металлосплавные катоды	8
5.2.8 Металлокерамические катоды	9
5.2.9 Гексаборидные катоды	9
6. Расчет прямокальных катодов	10
7. Расчет подогревных катодов.....	11
8. Конструирование катодного узла	12
9. Способы увеличения эмиссии с катода	12
Список рекомендуемой литературы	14

Введение

В настоящее время электронные и ионные пучки широко используются в различных промышленных технологических установках для нагрева, сварки, плавки, размерной обработки, распыления и для физических исследований. Такое широкое применение электронно-лучевые методы получили благодаря своим особенностям при обработке металлов, а также широкой номенклатуре промышленных материалов со специальными свойствами, обработка которых существующими методами затруднена или невозможна.

Пучки электронов используются не только для обработки изделий, но и для контроля результатов этой обработки. Взаимодействие пучка частиц с веществом приводит к появлению новых квантов в виде электронов и фотонов. Регистрация этих квантов позволяет получить информацию о составе, структуре и размерах получаемого изделия. Контроль может осуществляться непосредственно в процессе технологической обработки изделия, что позволяет автоматизировать технологический процесс.

При создании электронно-лучевой установки основной задачей является разработка электронно-оптической системы, в первую очередь катодного узла, способной создать пучки электронов с необходимыми параметрами. Эти задачи могут быть решены только специалистами, овладевшими новыми методами обработки материалов и способными создать сложные электронно-лучевые установки. Однако, среди технической литературы, посвященной электрофизическим способам обработки материалов до настоящего времени нет учебного пособия, в котором были бы обобщены вопросы разработки электронно-оптических систем установок технологического назначения. В связи с этим, при выполнении курсовой работы, данные методические указания будут полезными для студентов технических направлений подготовки.

1. Цели и задачи курсовой работы

Целью курсовой работы является:

- 1) закрепление и расширение теоретических и практических знаний по данному курсу;
- 2) применение полученных знаний для решения конкретных технологических задач;
- 3) освоение методов расчета катодных узлов электронно-лучевых пушек с применением вычислительной техники;
- 4) получение навыков поиска и работы с научно-технической литературой.

Курсовая работа должна отражать достижения современной науки и техники, а принятые технические решения должны быть рациональными в технико-экономическом отношении.

Самостоятельный расчет данной курсовой работы по дисциплине «Проектирование технологических процессов производства приборов квантовой и оптической электроники» является важным этапом в формировании специалиста в области электронной техники.

2. Тематика курсовой работы

Курсовая работа по дисциплине «Проектирование технологических процессов производства приборов квантовой и оптической электроники» посвящена большому разделу дисциплины – эмиссионная электроника. Студентам предлагается широкий спектр тем по разработке катодных узлов для электронно-лучевых установок технологического назначения.

Темы курсовых работ должны удовлетворять следующим критериям:

- 1) катодный узел должен быть рассчитан и спроектирован для определенного технологического устройства;
- 2) катодный узел должен быть функционально законченным и иметь самостоятельное эксплуатационное значение;
- 3) проектируемое устройство должно отвечать современным требованиям вакуумной техники;
- 4) катодный узел должен иметь такую компоновку, которая позволяла бы быструю замену вышедших из строя деталей.

Варианты заданий для курсовой работы

Вариант №1

Рассчитать и спроектировать катодный узел.

Исходные данные к проекту:

- 1 Ток эмиссии – 400 мА;
- 2 Материал катода – вольфрам;
- 3 Режим работы – непрерывный.

Вариант №2

Рассчитать и спроектировать катодный узел.

Исходные данные к проекту:

- 1 Ток эмиссии – 1 А;
- 2 Материал катода – оксид;
- 3 Режим работы – непрерывный.

Вариант №3

Рассчитать и спроектировать катодный узел.

Исходные данные к проекту:

- 1 Ток эмиссии – 15 А;
- 2 Материал катода – LaB₆;
- 3 Режим работы – импульсный.

3. Структура индивидуального задания

Курсовая работа состоит из пояснительной записки и чертежа катодного узла. Пояснительная записка должна включать в указанной ниже последовательности следующие документы:

- 1) титульный лист;
- 2) задание;
- 3) содержание;
- 4) введение
- 5) выбор и обоснование катода;
- 6) основная часть;
- 7) заключение;
- 8) список использованных источников;
- 9) приложение.

4. Календарный график выполнения курсовой работы

Календарный график предназначен для рационального распределения времени студента в период выполнения индивидуального задания, самоконтроля студентом результатов своей работы и контроля хода проектирования руководителем. График составляется руководителем совместно со студентом. Продолжительность выполнения курсовой работы составляет 18 недель. Для компенсации непредвиденных затрат времени при составлении календарного графика необходимо предусмотреть резерв времени 5 - 7 дней раньше указанного срока.

Примерный график выполнения курсовой работы приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Недели	Наименование этапа	Объём, %
3	Подбор и изучение литературы. Составление обзора по литературным источникам.	10
9	Расчет идеального катода.	30
12	Расчет реального катода.	20
15	Разработка и компоновка сборочного чертежа катодного узла.	20
16	Обзор способ увеличения эмиссии.	10
18	Написание пояснительной записки. Сдача работы на проверку.	10

5. Термоэмиссионные катоды

5.1 Типы и параметры катодов.

Существует большое количество различных типов катодов, отличающихся материалами, структурой активного слоя, температурным режимом, способом нагрева и способом отбора тока.

По способам нагрева термоэлектронные катоды можно подразделять на прямонакальные, косвенного накала (подогревные и с электронным подогревом).

В прямонакальном катоде ток накала проходит непосредственно по телу катода.

В случае катода косвенного накала нагрев осуществляется специальным подогревателем за счет излучения или теплопроводности изолированного покрытия подогревателя, через который пропускается ток накала.

Катод с электронным подогревом нагревается в результате бомбардировки его ускоренными в электрическом поле электронами. Для этого требуется дополнительный, обычно прямонакальный катод и значительная разность потенциалов между дополнительными и основными катодами.

По материалам и структуре активного слоя термоэлектронные катоды можно подразделить на четыре группы. К первой группе относятся чисто металлические катоды, выполненные из вольфрама, тантала, рения, ниобия и их сплавов. Вторая группа – это пленочные катоды, полученные, например, путем конденсации паров цезия, бария и тория на чистый вольфрам. Третью группу составляют толстослойные катоды (оксидные). В четвертую группу входят сложные катоды, синторповодные, импрегнированные (пропитанные) катоды из металлической губки и прессованные из спеченных смесей на основе оксидов (карбонатов) или тугоплавких солей.

Сравнение катодов и их эксплуатационных данных ведут по таким параметрам, как удельная эмиссия, удельная мощность накала, эффективность и долговечность. Удельная эмиссия (плотность тока эмиссии) – это величина тока электронной эмиссии катода, получаемая с 1 см^2 поверхности катода. Плотность тока определяется эффективной работой выхода материала и температурой катода.

Подводимая к катоду мощность накала расходуется на излучение, отвод тепла к держателям катода и эмиссию электронов. Величину мощности накала, отнесенную к 1 см^2 активной поверхности катода, называют удельной мощностью накала.

Отношение тока эмиссии катода к мощности, затрачиваемой на его нагрев, называют эффективностью катода. Она показывает какую эмиссию можно получить с катода на 1 Вт мощности накала.

Время, в течение которого эмиссия катода падает незначительно и возможна нормальная работа катода, называют долговечностью (сроком службы) катода.

5.2 Прямонакальные катоды

5.2.1 Чисто металлические катоды.

Металлы, как материал для катода должен иметь следующие свойства:

- 1) низкая эффективность работы выхода;
- 2) температура плавления значительно выше рабочей температуры;
- 3) иметь малую скорость испарения при рабочей температуре;
- 4) обладать достаточно высокой механической прочностью;
- 5) способность обеспечивать устойчивую эмиссию при высоких ускоряющих напряжениях;
- 6) способность обеспечивать устойчивую эмиссию при значительном давлении остаточных газов.

В технологии металлические катоды часто выполняются из вольфрама, тантала, ниобия и их сплавов.

5.2.2 Карбидно-ториевые катоды

Катоды с пленкой тория на предварительно науглероженной поверхности вольфрамового, молибденового или танталового катодов получили название карбидированные. Эти катоды имеют более низкую эффективную работу выхода и обладают повышенной чувствительностью к высоким ускоряющим напряжениям.

Пленки тория получают путем добавления в вольфрам оксида тория ThO_2 . Доза водимого оксида является критической: при малом количестве мала эмиссия, а при большом велика хрупкость катода. Окись составляет от 1 – 2 %.

Эффективная работа выхода линейно зависит от коэффициента покрытия поверхности катода пленкой тория.

Науглероживание поверхности катода происходит в результате прокаливания его в атмосфере какого-либо углеводорода, например нафталина, бензола, ацетилен или водорода в присутствии угля. Углерод поглощается вольфрамом, образуя карбид вольфрама W_2C . Карбид вольфрама позволяет ускорить реакцию восстановления окиси тория на поверхности создать большой запас чистого тория.

5.2.3 Оксидные катоды

Большое распространение получили полупроводниковые катоды, выполненные из оксидов щелочноземельных металлов бария, стронция, кальция или тория – оксидные катоды.

При изготовлении оксидного катода на керн из никеля или вольфрама наносят углекислые слои бария, стронция и иногда кальция ($BaCO_3$, $SrCO_3$, $CaCO_3$), которые при прокаливании распадаются на оксиды BaO , SrO , CaO и углекислый газ CO_2 , который удаляется при откачке.

Оксидный катод обеспечивает большую плотность тока эмиссии в импульсном режиме (до 150 A/cm^2) при длительностях импульсов до 20 мкс.

Оксидно-ториевые катоды делают обычно прямонакальными на тугоплавких кернах из вольфрама, молибдена или тантала. Эффективная работа выхода Оксидно-ториевого катода составляет. Катод устойчив к высоким напряжениям и большим давлениям остаточных газов. Эти катоды нашли применение в СВЧ приборах.

5.2.4 Импрегнированные катоды

Импрегнированные катоды имеют на керне напеченную губку из никелевого или вольфрамового порошка. Активное вещество состоит из смеси нормального и основного алюминатов бария, распределенной в парах тела катода. Долговечность катода определяется скоростью испарения бария, которая зависит от рабочей температуры катода, содержания кальция и оксида кремния в активной пропитывающей смеси.

Покрытие катода пленкой осмия толщиной менее 1 мкм увеличивает ток эмиссии в 6 – 8 раз.

5.2.5 Прессованные катоды

Катоды изготовляют методом прессования. Они состоят из активных веществ в виде алюминатов или вольфраматов бария и кальция, и тугоплавкого металлического порошка (например вольфрама). Прессованные вольфрамовые катоды состоят на 90 % из вольфрамового порошка, 1 % порошка алюминия и 9 % вольфрамата бария, кальция. После запрессовки состава в керн катода производят спекание в атмосфере водорода, при котором образуется моноалюминат бария $BaAl_2O_4$ и трехбариевый алюминат $Ba_3Al_2O_6$, который обеспечивает максимальное количество свободного бария при работе катода.

5.2.6 Катоды на основе оксидов иттрия

Оксиды редкоземельных элементов (лантана, лютеция, гадолиния и других лантанидов) устойчивые при высоких температурах и не восстанавливаются при электронной бомбардировке, имеют маленькую рабочую температуру. Катоды из оксида иттрия, при рабочей температуре $\sim 1650 \text{ K}$ достигается плотность тока эмиссии $j_s \approx 1,1 \text{ A/cm}^2$.

5.2.7 Металлосплавные катоды

Вводимый в сплав металл может взаимодействовать с основным металлом, изменяя структуру последнего. Если диаметры атомов сплавляемых металлов отличаются менее чем на 15 %, то возможно образование неограниченного ряда твердых растворов.

Для вольфрама, молибдена тантала радиусы атомов соответственно равны 1,41; 1,4 и 1,46 Å, что позволяет получать непрерывный ряд растворов вольфрама с молибденом и танталом. Если количество тантала в сплаве меньше 25 %, то эффективная работа выхода снижается, достигая 3,8 эВ. Интересные сплавы с торием осмия и рения, палладии и платины с барием. Сплавы имеют коэффициент вторичной эмиссии $\sigma > 1$.

5.2.8 Металлокерамические катоды

Металлокерамические катоды (керметкатоды) по сравнению с губчатыми катодами имеют более гладкую поверхность, обладают большей теплопроводностью и поэтому меньше искрят. Кроме того, они имеют значительный запас активного вещества, распределенного на большой глубине, и поэтому имеют большой срок службы.

Катоды изготавливают путем прессования с оксидами (тория, иттрия редкоземельных элементов) и последующего спекания в атмосфере водорода.

Эмиссионные свойства керметкатодов в непрерывном и импульсном режимах не одинаковы. Для импульсного режима возможно получение плотности тока эмиссии до 15 А/см², а для непрерывного – 0,5 А/см².

Коэффициент вторичной эмиссии изменяется от 3,5 до 2,5 в процессе работы.

5.2.9 Гексаборидные катоды

В этих катодах используют соединения бора с редкоземельными элементами – гексаборидами.

Катоды с гексаборидом лантана (LaB₆) изготавливают путем нанесения на металлическую подложку или прессование.

При изготовлении губчатых катодов в качестве подложки используют тантал или молибден.

Прессованные катоды изготавливают из порошков LaB₆ и вольфрама.

Катоды изготавливают из расплавленного гексаборида, который расплавляют плазменным методом. Механическую обработку осуществляют электроискровым методом с последующей химической очисткой. Необходимый контакт между изготовленной таблеткой и металлической подложкой производят пайкой с добавкой дисилицида молибдена.

Эмиссионные свойства катода, содержащего 90 – 95 % LaB₆ лучше, чем у чистого гексаборида лантана.

Максимальные значения плотности тока, которые были получены у гексаборидных катодов в непрерывном режиме $j_{э \max} = 200$ А/см². Коэффициент вторичной эмиссии обычно равен единице.

У катодов, содержащих тантал, вольфрам, молибден и рений при ухудшении вакуума плотность тока эмиссии падает и восстанавливается при его улучшении без повышения температуры.

Гексаборидные катоды, содержащие осмий, иридий и платину, при малейшем ухудшении вакуума «отравляются» и не восстанавливают своих свойств.

6. Расчет прямонакальных катодов

К группе чисто металлических катодов в настоящее время относятся главным образом вольфрамовые катоды. Это катоды прямонакальные. Расчет вольфрамового катода должен состоять из следующих элементов:

- 1) Расчет идеального катода, т.е. катода, температура всех точек поверхности которого одинакова и равна температуре его среднего участка;
- 2) Расчет поправок на охлаждение концов катода или отдельных его участков держателями;
- 3) Расчет параметров реального катода.

Рассмотрим сначала расчет идеального катода. Взяв длину катода l_k , а диаметр d_k можно выразить мощность накала:

$$P = \eta \pi d_k l_k = P_1 d_k l_k, \quad (7.1)$$

сопротивление катода:

$$R = \rho \frac{4l_k}{\pi d_k^2} = R_1 \frac{l_k}{d_k^2}, \quad (7.2)$$

где $P_1 = \pi \eta$ и $R_1 = \rho \frac{4}{\pi}$ – соответственно мощность накала и сопротивление единичного катода, у которого длина равна 1 см, а η , ρ – соответственно удельная мощность излучения (Вт/см²) и удельное сопротивление (Ом·см).

Из уравнений (7.1) и (7.2) можно получить уравнения для тока и напряжения накала:

$$I_n = \sqrt{\frac{P_n}{R_n}} = I_{\kappa} \frac{3}{2}, \quad (7.3)$$

$$U_n = \sqrt{P_n R_n} = U_1 \frac{l_{\kappa}}{d_{\kappa}^{1/2}}, \quad (7.4)$$

где U_1, I_1 – соответственно ток и напряжение, являющиеся функциями только температуры катода.

Аналогично можно записать уравнение для значения электронной эмиссии идеального катода:

$$I_e = I_{e1} l_k d_k, \quad (7.5)$$

где $I_{e1} = \pi j_e$ эмиссия с поверхности идеального катода.

Величину испарения вольфрама с поверхности накаливаемой нити:

$$M = M_1 l_k d_k, \quad (7.6)$$

где $M = \pi m$ – скорость испарения вольфрама с поверхности единичного катода (г/с), m – удельная скорость испарения вольфрама (г/(с см²)).

Величины ρ , η , j_e , m , а также $R_1, P_1, I_1, U_1, I_{e1}, M$ можно найти в таблицах любого чистого металла.

Задав рабочую температуру катода (T_k), а следовательно, табличными значениями для единичного катода можно произвести расчет идеального катода на необходимое для расчета значение тока эмиссии I_e . Из таблицы можно определить меру накала, H_e – удельную эмиссию с поверхности идеального катода на единицу расходуемой на нагрев мощности:

$$H_e = \frac{I_e}{P_n} = f(T_k). \quad (7.7)$$

Зная I_e, H_e определяем требуемую мощность накала:

$$P_n = \frac{I_e}{H_e}, \quad (7.8)$$

а так как напряжение накала имеет стандартное значение (5 В, 6,3 В и т.д.), то находим величину тока накала катода:

$$I_n = \frac{P_n}{U_n}. \quad (7.9)$$

Полученные результаты расчета идеального катода требуют введение поправок на охлаждение концов нити вследствие отвода тепла держателями. Влияние охлажденных концов катода на любой его параметр, ранее вычисленный для идеального катода, определяется или в виде множества, или поправок к параметрам на каждый охлажденный конец катода. Значение параметра H для реального катода оказывается меньше его значения для идеального катода. Напряжение накала идеального катода превышает напряжение накала реального катода.

7. Расчет подогревных катодов

Подогревный катод представляет собой чаще всего металлический (никелевый, молибденовый или др. металлов) цилиндр, на торец которого наносится активное вещество. Подогрев до нужной температуры обеспечивается с помощью подогревателя, находящегося внутри цилиндра и изолированного от него. Подогреватели изготавливают из вольфрама или его сплавов с молибденом и изолируют слоем алунда, т.е. прокаленной окиси алюминия. Расчет подогревного катода состоит из определения активной поверхности катода, необходимой для получения заданного тока эмиссии, и теплового расчета мощности подогревателя, необходимой для достижения рабочей температуры катода.

Можно задаться экономичностью катода и вычислить мощность, необходимую для получения заданной эмиссии, а затем из теплового расчета определить размеры катода.

Мощность, излучаемая катодом, имеющим сложный активный слой (пленка, таблетка или губка), зависит от многих факторов, связанных с технологией его производства, со структурой и химическим составом слоя, материалом основания и примесями в нем, толщиной слоя. Однако с достаточной для практических целей точность можно использовать табличные значения параметров.

Температура катода обеспечивается подогревателем. Так как, помимо нормального режима работы, подогреватель должен выдерживать более высокую температуру, необходимую для активирования катода, то в качестве материала подогревателя применяют либо вольфрам, либо его сплавы с молибденом, содержащем 20 % или 50 % вольфрама. Молибден улучшает механические свойства вольфрама.

Для изолирующих покрытий подогревателей применяется прокаленная окись алюминия – алунд.

Для заданных значений напряжений и тока накала подогревателя, выбрав материал подогревателя можно найти диаметр и длину проволоки подогревателя по формулам:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{4\rho}{\pi^2\eta} \cdot I_n^2} \quad (8.1)$$

и

$$l_n = \frac{U_n I_n}{\pi \eta d_n}, \quad (8.2)$$

где ρ – удельное сопротивление подогревателя;

η – удельная мощность подогревателя.

Длина проволоки подогревателя должна быть больше на величину отрезка, необходимого для приварки его к держателям (обычно на 3 – 4 мм).

Необходимо посчитать баланс мощностей, с одной стороны подводимой к подогревателю, с другой уносимой с подогревателя.

Надо проанализировать какие из мощностей, уносимых с подогревателя, расходуются на нагрев активной поверхности катода. Если при найденной мощности накала, этих мощностей недостаточно для обеспечения нужной температуры активного слоя необходимо увеличивать температуру подогревателя.

8. Конструирование катодного узла

При конструировании катодного узла необходимо выполнить следующие требования:

- 1) учитывая, что катодный узел предназначен для работы в электронной пушке, которую вы будете конструировать на 4 курсе, катод должен быть торцевым;
- 2) все элементы катодного зла (катод, подогреватель, экраны) должны иметь электрически изолированные выводы;
- 3) поскольку катодный узел предназначен для электронных пушек, рассмотреть конструкцию высоковольтных электрических выводов;
- 4) конструкция катодного узла должна быть закреплена на вакуумном фланце;
- 5) все элементы катодного узла (катод, подогреватель, экраны) должны иметь вакуумно-плотные выводы;
- 6) рассмотреть вакуумно-плотное присоединение фланца к вакуумной системе;
- 7) выбрать и обосновать материалы вакуумных умножителей;
- 8) конструкция катодного узла должна быть рабочей;
- 9) при конструировании учесть температурный режим каждой детали катодного узла.

9. Способы увеличения эмиссии с катода

Уравнение Ричардсона – Дешмана определяет плотность тока термоэмиссии:

$$j = A_0 D T^2 e^{-\frac{U_{\text{эфф}}}{kT}} = A T^2 e^{-\frac{U_{\text{эфф}}}{kT}}, \quad (10.1)$$

где $A_0 = \frac{4\pi e m k^2}{h^3} = 120,4 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^2}$ является универсальной постоянной,

D – прозрачность потенциального барьера;

$U_{\text{эфф}}$ – работа выхода, выраженная в джоулях.

Уравнение Ричардсона – Дешмана показывает, что плотность тока термоэмиссии зависит от температуры катода и эффективной работы выхода материала катода.

При возрастании ускоряющегося электрического поля у поверхности катода поверхности его отобрать ток, больший тока термоэмиссии. Это происходит потому, что при возрастании ускоряющегося электрического поля у поверхности катода снижается потенциальный барьер и уменьшается эффективная работа выхода не величину:

$$\Delta U = \frac{e^{3/2}}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} \sqrt{E}, \quad (10.2)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

E – напряженность электрического поля.

Теперь можно определить плотность тока термоэлектронной эмиссии при наличии внешнего ускоряющего поля:

$$j_{\text{эп}} = A T^2 e^{-\frac{U_{\text{эфф}} - \Delta U}{kT}} = A T^2 e^{-\frac{U_{\text{эфф}}}{kT}} e^{\frac{\Delta U}{kT}}. \quad (10.3)$$

Обозначив символом j_e плотность тока эмиссии в отсутствии поля и заменив ΔU его значением, получим уравнение Шоттки:

$$j_{\text{эн}} = j_e \cdot e^{\frac{e^{3/2} \sqrt{E}}{\sqrt{4\pi\epsilon_0} KT}}. \quad (10.4)$$

На практике при сильных электрических полях ток эмиссии возрастает быстрее, чем это следует из уравнения Шоттки. Причина расхождения расчета и эксперимента состоит в том, что при выводе уравнения учитывается понижение потенциального барьера и не учитывали его сужение. Между тем, заметное сужение потенциального барьера приводит к тому, что проявляется туннельный эффект «просачивания» сквозь барьер (не совершая работы) электронов с энергией меньше $(U_{\text{эфф}} - \Delta U)$. Это, в свою очередь, приводит к дополнительному увеличению плотности тока эмиссии.

Список рекомендуемой литературы

1. Кацман, Ю. А. Электронные лампы / Ю. А. Кацман. – М.: Высшая школа, 1979. – 303 с.
2. Царев, Б. М. Расчет и конструирование электронных ламп / Б. М. Царев. – М.: Энергия, 1967. – 670 с.
3. Соболев, В. Д. Физические основы электронной техники : учебник для вузов / В. Д. Соболев. – М.: Высшая школа, 1979. – 448 с.
4. Добрецов, Л. Н. Эмиссионная электроника / Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова. – М.: Наука, 1966. – 564 с.