

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Соломин Михаил Геннадьевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение диапазона напряжений на вакуумном диоде от зоны
ограничения тока катодом до зоны «закона 3/2»**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа № 19305

Научный руководитель:

к.ф-м.н. И. А. Иванов

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 2020 г.

Преподаватель практикума:

аспирант А. С. Матвеев

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 2020 г.

Куратор практикума:

к.т.н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 2020 г.

Новосибирск, 2020 г.

Аннотация

Целью данной работы является определение диапазона напряжений на вакуумном диоде от зоны ограничения тока катодом до зоны "закона $3/2$ ". Чтобы определить этот диапазон напряжений, была изучена вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода 2ДЗБ. На графике полученной ВАХ определены два участка: закона "трех вторых" и зона насыщения эмиссионного тока. Диапазон напряжений области между этими участками был найден и представлен в данной работе.

Ключевые слова: закон "трех вторых", ВАХ диода.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теория	5
2.1. Влияние пространственного заряда	5
2.2. Вывод закона $3/2$	6
2.3. Область применения	7
3. Эксперимент	7
3.1. Установка	7
3.2. Анализ вольт-амперных характеристик диода	8
4. Заключение	10
5. Список литературы	12

1. Введение

При определенных высоких температурах на границе раздела металла и вакуума возникает явление термоэлектронной эмиссии, когда нагретый катод испускает определенное количество электронов с единицы поверхности за единицу времени, причем при увеличении температуры катода термоэмиссия усиливается.

Чтобы покинуть металл, электронам нужно совершить работу выхода. Силы, действующие на электрон, можно объяснить в рамках классической модели Шоттки, суть которой заключается в следующем. Из-за теплового движения, электроны способны покинуть поверхность металла, но на расстояния порядка атомарных. Таким образом образуется некоторое электронное облако, плотность которого падает с расстоянием от поверхности металла. Со стороны металла образуется слой положительных ионов. В результате образуется «двойной слой», эквивалентный плоскому конденсатору. Во внешнем пространстве он поля не создает, однако для преодоления электрического поля внутри него требуется совершение работы.

В работе использовался вакуумный диод 2ДЗБ. Катодом лампы служит проволока (нить) из тугоплавкого металла (вольфрам), накаливаемая электрическим током. Анод имеет форму металлического цилиндра, окружающего накаливаемый катод. Если поддерживать температуру катода постоянной и изменять напряжение U между анодом и катодом, то изменение термоэлектронного тока будет нелинейным (см. рис. 1.), так что для вакуумного диода закон Ома не выполняется.

Если поддерживать температуру катода постоянной, менять напряжение U между анодом и катодом, то термоэлектронный ток будет нелинейно меняться рис. 2., так что для вакуумного диода закон Ома не выполняется. По достижении определенного напряжения U рост термоэлектронного тока почти прекращается и он достигает своего предельного значения I_s .

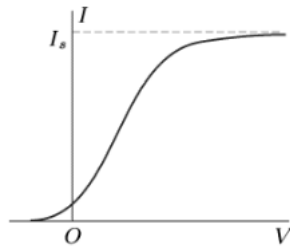


Рис. 1. Зависимость тока от напряжения внутри вакуумного диода.

Его величина определяется количеством электронов, которое в состоянии покинуть поверхности катода в единицу времени. Если электрическое поле настолько сильное, что оно отводит все электроны, испаряющиеся с поверхности катода, то дальнейшее увеличение напряженности поля уже не может привести к увеличению термоэлектронного тока. С этим и связано явление насыщения тока.

2. Теория

2.1. Влияние пространственного заряда

При низких температурах катод не способен испускать электроны. В этом режиме вакуумный диод представляет собой обычный конденсатор. Электрическое поле внутри такого конденсатора практически постоянно, а потенциал между катодом и анодом в плоско-параллельной конфигурации изменяется по линейному закону, кривая j на рис. 2. Электрон, попавший в такое поле, движется с постоянным ускорением, которое прямо пропорционально ускоряющему полю и напряжению на диоде.

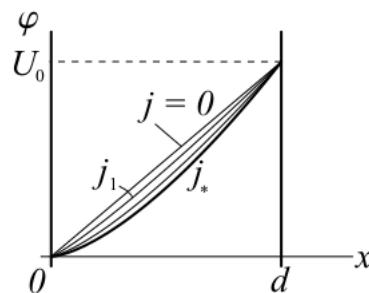


Рис. 2. Зависимость потенциала от расстояния от катода.

Продолжим нагревать катод, чтобы он начал испускать электроны. При подаче на анод достаточно большого положительного напряжения все испущенные электроны испытывают ускорение в межэлектродном пространстве и движутся к аноду. Электроны, находящиеся в межэлектродном пространстве,

образуют пространственный заряд, искажающий электрическое поле в вакуумном зазоре. При малых токах эмиссии и малой концентрации электронов в межэлектродном вакууме влияние пространственного заряда незначительно: потенциал всех точек межэлектродного пространства снижается, но поле во всех точках остаётся ускоряющим, поэтому почти все испущенные катодом электроны достигают анода, кривая j_1 на рис. 2. Ток анода равен току эмиссии катода и не зависит от анодного напряжения.

При увеличении анодного напряжения пространственный заряд увеличивается в вакуумном зазоре настолько, что вблизи катода возникает область с потенциалом ниже, чем потенциал катода (потенциальная яма). Электроны, испущенные катодом испытывают отталкивание от области пространственного заряда и попадают в тормозящее поле. Электроны, покинувшие катод с достаточно большой скоростью, преодолевают потенциальную яму и продолжают путь к аноду, кривая j_* на рис. 2. Другие, медленные, электроны возвращаются назад, на катод, поэтому ток анода оказывается существенно ниже тока эмиссии катода.

Количественная зависимость тока, ограниченного пространственным зарядом, от анодного напряжения и описывается законом "трёх вторых".

2.2. Вывод закона 3/2

Потенциал электрического поля удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta\varphi = 4\pi ne \quad (1)$$

Считаем, что внутри диода достаточно высокий вакуум и справедливо уравнение $\frac{mv^2}{2} = e\varphi$. Ссылаясь на данные уравнения можно вывести искомый закон:

$$j = CU^{3/2}, \quad (2)$$

где постоянная C определяется выражением:

$$C = \frac{\sqrt{2}}{9\pi r_a r_k \beta^2} \sqrt{\frac{e}{m}}, \quad (3)$$

где r_a и r_k - радиусы анода и катода соответственно. β - нормирующий коэффициент. Подробный вывод в источнике литературы (2) (см. стр. 440).

2.3. Область применения

Закон трёх вторых не применим в области отрицательных и малых положительных анодных напряжений. Из закона следует, что при нулевом напряжении ток анода должен быть равен нулю, а при отрицательном напряжении формула трёх вторых вообще не определена. В реальных диодах при нулевом анодном напряжении уже течёт ненулевой ток.

При анодных напряжениях порядка нескольких вольт и более (но до перехода в режим насыщения) закон достаточно точно описывает свойства реальных диодов.

3. Эксперимент

3.1. Установка

Для изучения вольт-амперных характеристик между анодом и катодом диода 2ДЗБ используется следующая схема (см. источник литературы 5, рис. 8):

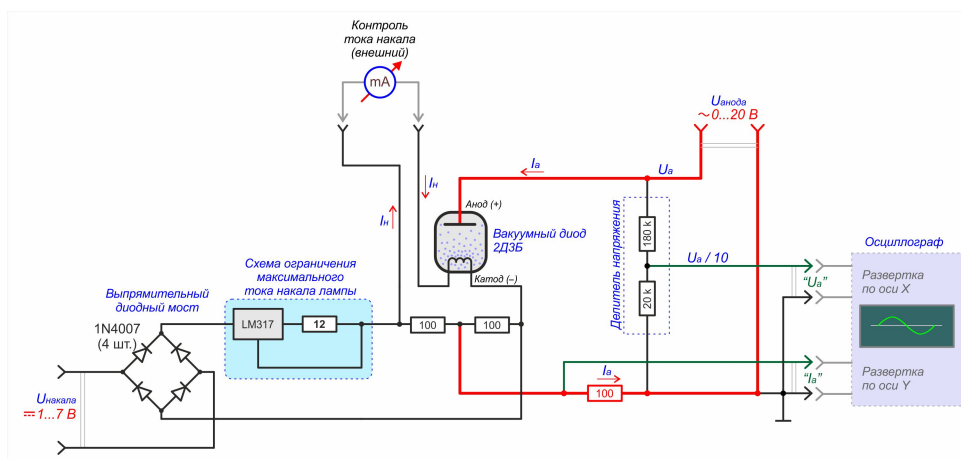


Рис. 3. Схема установки.

На диод 2ДЗБ подаётся напряжение с высоковольтного выхода генератора сигналов низкочастотный ГЗ-109 (с напряжением до 150 В). Катод диода имеет непосредственный накал и запитывается от цифрового источника питания АТН-1443.

Переменное анодное напряжение позволяет в автоматическом режиме записывать вольтамперную характеристику диода, для этого сигналы, характеризующие напряжение и протекающий ток подаются на вход осциллографа АКПП-72205А. Для работы используется программа PicoScore 6. Для уменьшения погрешности, связанной с неэквипотенциальностью катода, в схеме используется так называемая «искусственная средняя точка катода» — подклю-

чение измерительной цепи к катоду с помощью двух одинаковых по величине сопротивлений, параллельных накалу диода.

Анодный ток вакуумного диода измеряется осциллографом и пересчитывается из падения напряжения на сопротивлении, включенном в цепь.

3.2. Анализ вольт-амперных характеристик диода

На генераторе переменного анодного напряжения была установлена амплитуда 60 В, с частотой 50 Гц. Значения тока катода были измерены из падения напряжения на резисторе в 100 Ом. Для 5 различных токов накала были построены вольт-амперные характеристики диода, рис. 4.

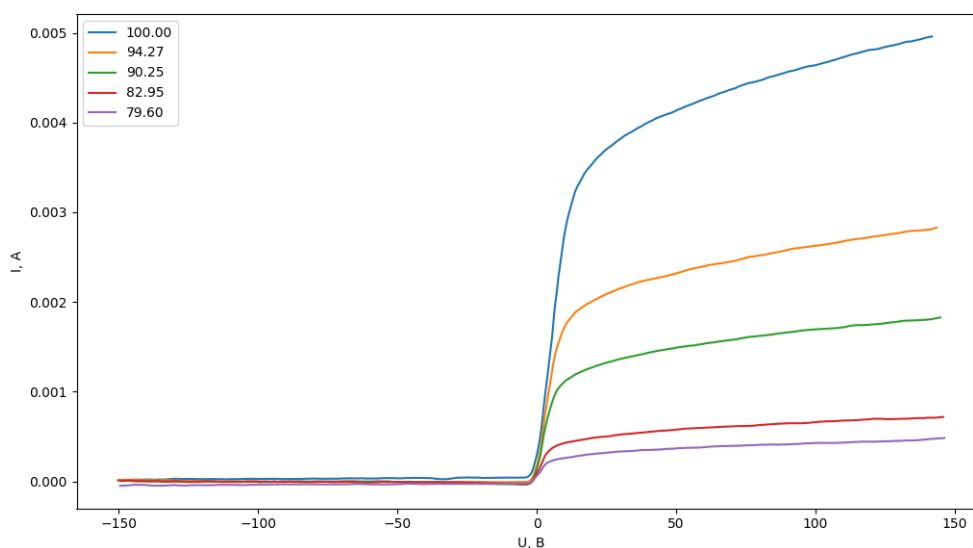


Рис. 4. ВАХ диода.

Первым действием, найдем границу левой зоны, то есть границу зоны закона "трех вторых". Как известно, закон "трех вторых" в общем виде определяется уравнением: $I_a = A \cdot U_a^{3/2}$. Если продифференцировать данное выражение по U_a , получаем: $\frac{dI_a}{dU_a} = \frac{3}{2} \cdot A \cdot U_a^{1/2}$. Граница закона "трех вторых" определяется местом, где производная принимает максимальное значение, так как на вольт-амперной характеристике (ВАХ) именно в этой точке скорость роста функции начинает убывать и наклон становится меньше $3/2$. Один из способов найти границу, это построить график в масштабе $\log(I_a)$ от $\log(U_a)$. Затем построить прямую с наклоном $3/2$ и посмотреть, где примерно наклоны прямой и функции совпадают. Точка, где различие между наклонами прямой и функции совпадают, является границей закона "трех вторых".

На рис. 5 построены ВАХ диода в соответствующем масштабе и прямая с наклоном $3/2$. Вертикальные прямые имеют идентичный цвет, что и ВАХ при конкретных токах анода. Они указывают на те значения напряжений, где перестает действовать закон "трех вторых".

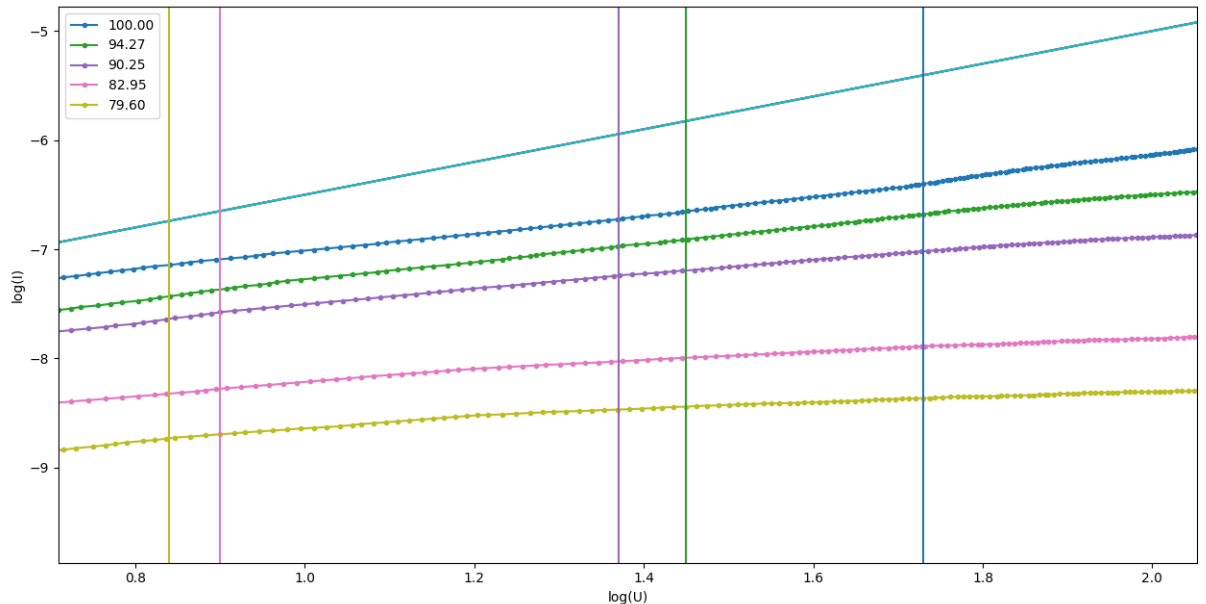


Рис. 5. Зависимость тока анода $\log(I)$ от $\log(U)$.

Теперь найдем правую границу, она же левая граница эффекта Шоттки. В области токов насыщения величина анодного тока зависит от эффекта Шоттки: $j_{an} = j_e \exp \frac{\sqrt{e^3 E_k}}{kT}$, где $E_k = \frac{U_a}{r_k \ln \frac{r_a}{r_k}}$. Если построить график зависимости $\log(I)$ от \sqrt{U} и линейную прямую, то можно найти границу эффекта Шоттки аналогично предыдущему шагу. Точка, где наклон графика зависимости значительно отклоняется от линейной зависимости - и есть искомая граница. На рис. 6 построены ВАХ диода в соответствующем масштабе и прямая с линейным наклоном. Вертикальные прямые имеют идентичный цвет, что и ВАХ при конкретных токах анода. Они указывают на те значения напряжений, где начинает действовать эффект Шоттки.

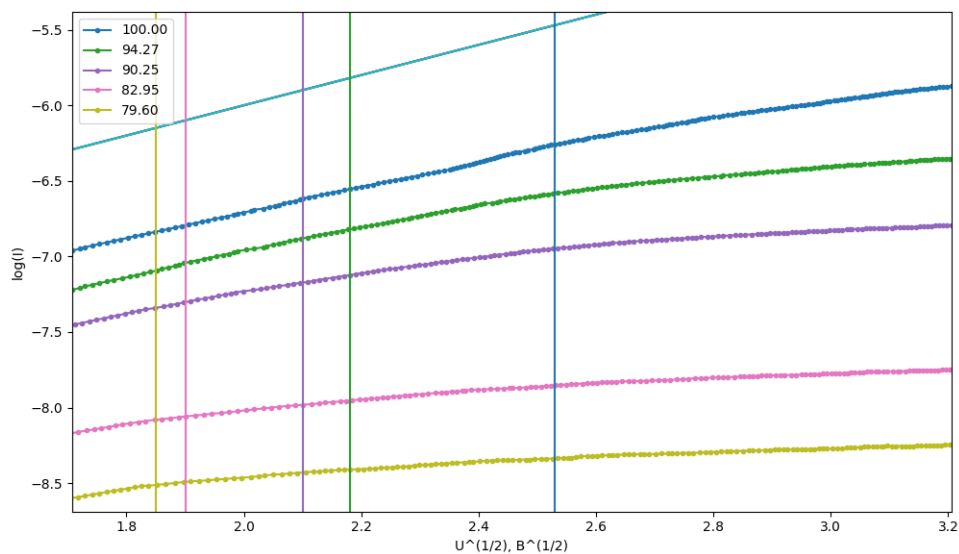


Рис. 6. Зависимость тока анода $\log(I)$ от $U^{1/2}$.

Получились следующие диапазоны напряжений для различных токов накала, они представлены в таблице 1:

Граница закона трех вторых, В.	Граница эффекта Шотки, В.
5,64	6,41
4,26	4,78
3,93	4,41
2,48	3,62
2,33	3,6

Таблица 1. Полученные диапазоны напряжений.

Данная методика измерений позволяет уменьшить ошибки. Экспериментальное различие напряжений обосновывается также тем, что присутствуют условия, которые не вписываются в допущения, положенные в основу теоретической модели.

- В лампах прямого накала наибольший вклад вносит неэквипотенциальность катода, к концам которого приложено постоянное или переменное напряжение накала;
- Катод нагревается неравномерно. Относительно холодные концы катода переходят в режим насыщения раньше, чем его горячая средняя часть;

4. Заключение

В данной работе был найден диапазон напряжений на вакуумном диоде от зоны ограничения тока катодом до зоны закона "трех вторых". Из-за геомет-

рических особенностей диода не получилось точно измерить диапазон, однако используемый метод уменьшил ошибки в поиске диапазона. Результаты были предоставлены в таблице 1.

5. Список литературы

- 1) Яковлев В. И. Классическая электродинамика. Новосибирск: НГУ, 2003. Ч.1.
- 2) Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. Т.3. М.: Физматлит, 2005
- 3) Van der Bijl, H. The Thermionic Vacuum Tube-Physics and Electronics. — McGraw-Hill, 1920.
- 4) Рейх, Г. Дж. Теория и применение электронных приборов. — Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 940 с. — 7,000 экз.
- 5) В.Т. Астрелин, П.П. Дейчули, А.А. Краснов Физические явления в вакуумном диоде. Новосибирск: НГУ, 2008.