

---

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО  
РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

---

Кафедра общей физики

Отчет по лабораторной работе №1

**Исследование влияния пространственного заряда на  
прохождение тока в диоде**

Выполнили студенты 440 группы  
Войтович Д.А., Понур К.А.

Нижний Новгород, 2020

## 1. Теоретическая часть

### 1.1. Основные режимы работы диода

Пусть поперечные размеры анода и катода  $L_y, L_z \gg d$  - расстояния между катодом и анодом. Тогда зависимостью всех величин от  $x, z$  можно пренебречь и считать, что потенциал, электрическое поле, скорость зависят только от координаты  $x$ , отсчитываемой от катода к аноду. Будем полагать  $U_k = 0, U_a = \text{const} > 0$ .

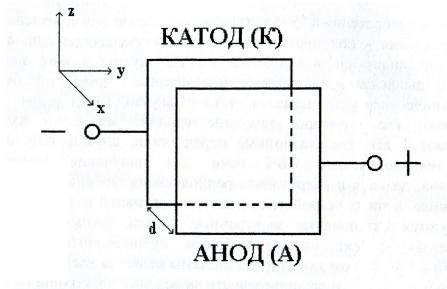


Рис. 1: Плоский диод

Предположим, эмиссионная способность катода может неограниченно расти при увеличении  $T$ , начальная скорость электронов  $V_0 = 0$ .

Если температура невелика, то пространственный заряд в диоде и его поле  $E_\rho$  малы, поэтому и электрическое поле  $E_x = E$  для электрона на всем промежутке анод-катод остается ускоряющим. Все электроны с катода доходят до анода - это режим насыщения (режим температурного ограничения эмиссии), поскольку в этом случае ток через диод полностью определяются температурой катода.

Рассмотрим распределение потенциала. Выделим из потока электронов плоский слой толщиной  $dx$ . Электроны заряжены отрицательно, собственное кулоновское поле слоя  $E_\rho$  направлено к слою. Поле зарядов на электродах  $E_{el}$  - от анода к катоду. В результате слева от слоя эти поля направлены в противоположные стороны и вычитываются, а справа - в одну сторону и складываются.

При увеличении температуры кривая начинает провисать, и после достижения некоторого значения распределение поля, потенциала и пространственного заряда перестает меняться. Не будет меняться и ток через диод, а будет определяться только потенциалом анода. Такой режим работы называется режимом ограничения тока пространственным зарядом.

При  $U_a < 0$  между катодом и анодом возникает тормозящее поле. Если бы электроны не обладали начальными тепловыми скоростями, то они не смогли бы преодолеть барьер, и ток анода был бы равен нулю. Скорости электронов имеют максвелловское распределение, откуда следует, что анодный ток будет экспоненциально убывающей функцией  $|U_a|$ .

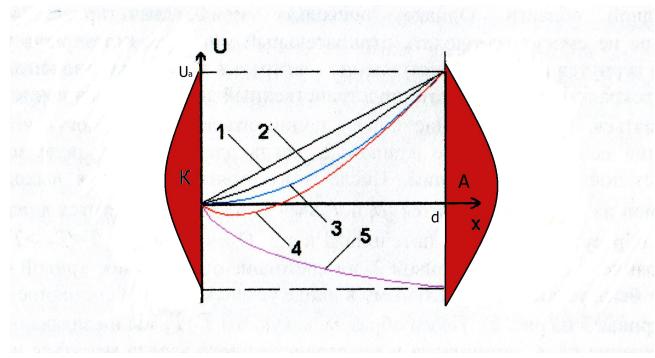


Рис. 2: Распределение потенциала в плоском диоде при различной температуре катода  $T$ :  
1- $T=0$ , 2- $T=T_1$ , 3- $T=T_3$ , 4- $T=T_4$ , 5-случай  $U_a < 0$

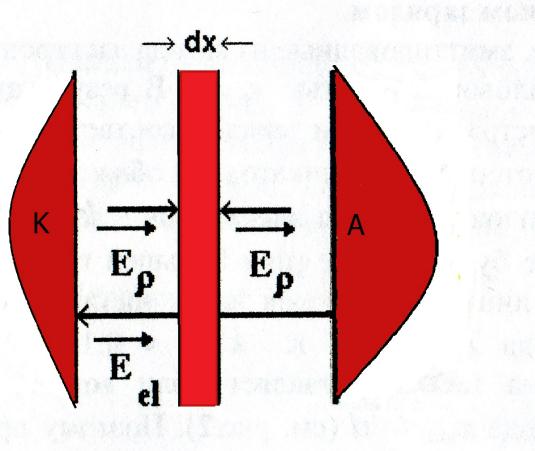


Рис. 3: Распределение поля и потенциала в диоде

Режим работы при  $U_a < 0$  получил название режима начальных токов.

## 1.2. Режим ограничения тока пространственным зарядом

Изучим зависимость анодного тока  $J_a$  от анодного напряжения  $U_a$  для плоского диода в стационарном режиме, когда все переходные процессы, возникающие при включении диода, уже завершены.

$$J_a = PU_a^{3/2}.$$

Это закон "трех-вторых". Величина  $P$  - преверанс диода. Независимо от геометрии диодов качественное поведение этих систем при изменении температуры катода должно быть сходным с плоским диодом, поскольку основное влияние на величину тока оказывает узкая прикатодная область, где скорости электронов малы, а плотность объемного заряда велика. В этом случае кривизна катода слабо сказывается на распределении потенциала в прикатодной области.

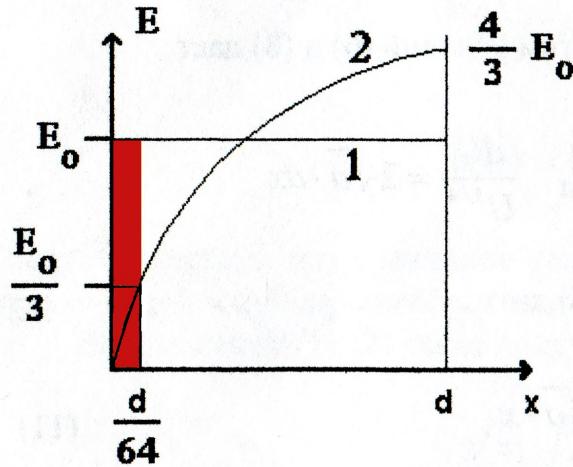


Рис. 4: Распределение электрического поля в холодном диоде (1) и в режиме ограничения тока пространственным зарядом (2). Заштрихована область быстрого изменения поля

### 1.3. Ток диода в режиме насыщения

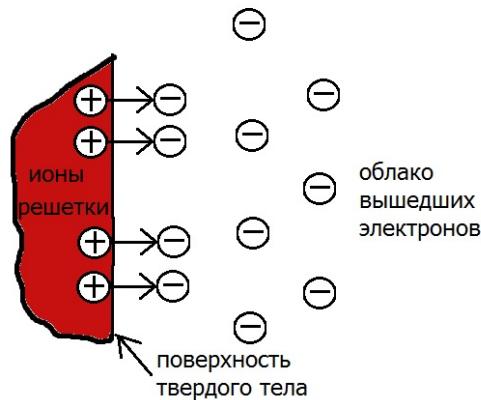


Рис. 5: Образование поля дипольного слоя на границе металла. Стрелками указано направление поля

Все электроны, эмитированные с катода, оказываются в ускоряющем поле и доходят до анода. При малых напряженностях на выходящий из твердого тела электрон последовательно действуют две возвращающие силы: сила дипольного слоя (на малых расстояниях) и сила зеркального изображения (на больших). Если электрон отошел от поверхности на расстояние, много большее межатомного расстояния, то неоднородностью поверхности можно пренебречь и считать, что электрон находится над плоской поверхностью идеального проводника. Ток термоэмиссии:

$$J_a = S_a A T^2 e^{-e\varphi/kT},$$

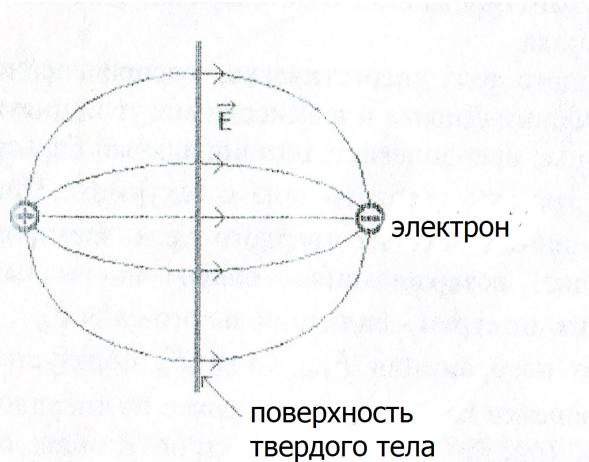


Рис. 6: Распределение электрического поля в холодном диоде (1) и в режиме ограничения тока пространственным зарядом (2). Заштрихована область быстрого изменения поля

где  $A$ -эмиссионная константа,  $\varphi$  - эффективная работа выхода. Прологарифмируем:

$$\ln J_a - 2\ln T = \ln(s - a \cdot A) - \frac{e\varphi}{kT}.$$

Если менять температуру и изменять анодный ток  $J_s$ , то, откладывая по осям  $\ln J_a - 2\ln T$  и  $1/T$ , получим прямую Ричардсона по наклону которой определяется  $\varphi$ .

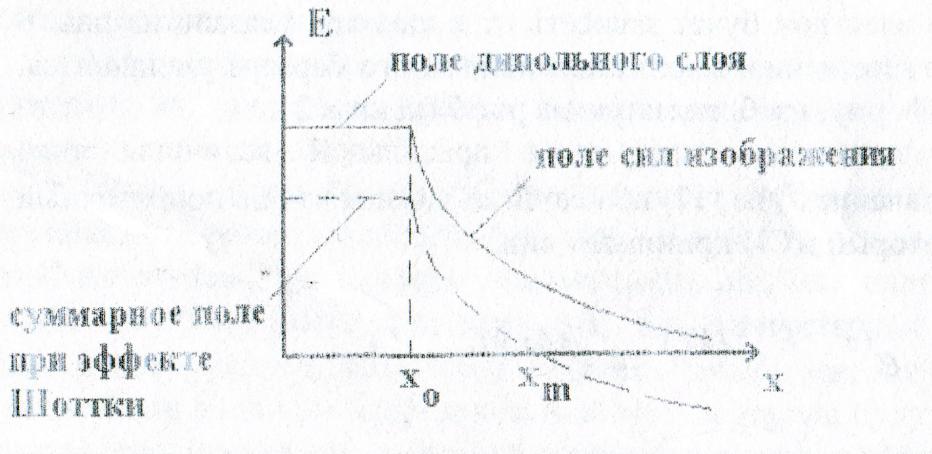


Рис. 7: Распределение суммарного электрического поля, действующего на выходящий из твердого тела электрон

Однако такая формула для тока анода справедлива при малых величинах напряженности поля на катоде. Выше некоторого значения на величину и профиль потенциального барьера начинает оказывать влияние существующее в прикатодной области электрическое поле электродов - проявляется эффект Шоттки.

Вольт-амперная характеристика диода:

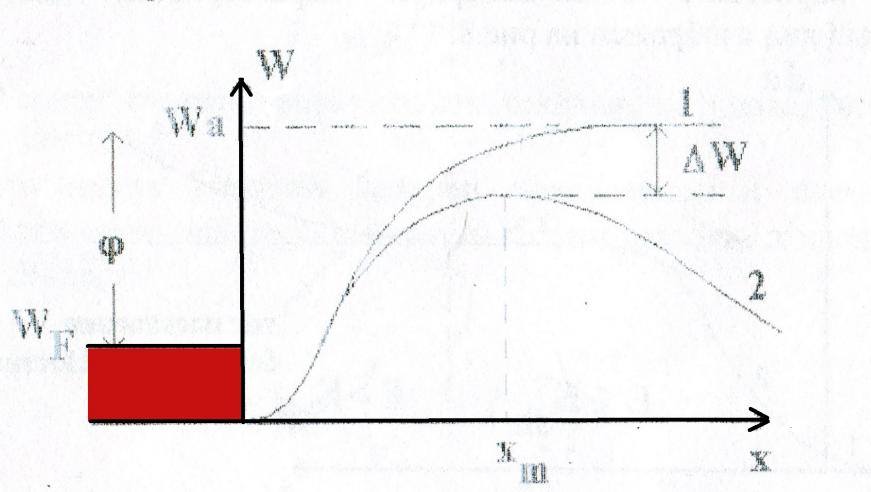


Рис. 8: Профиль потенциального барьера на границе твердого тела в случае слабого (1) и сильного (2) электрических полей на катоде

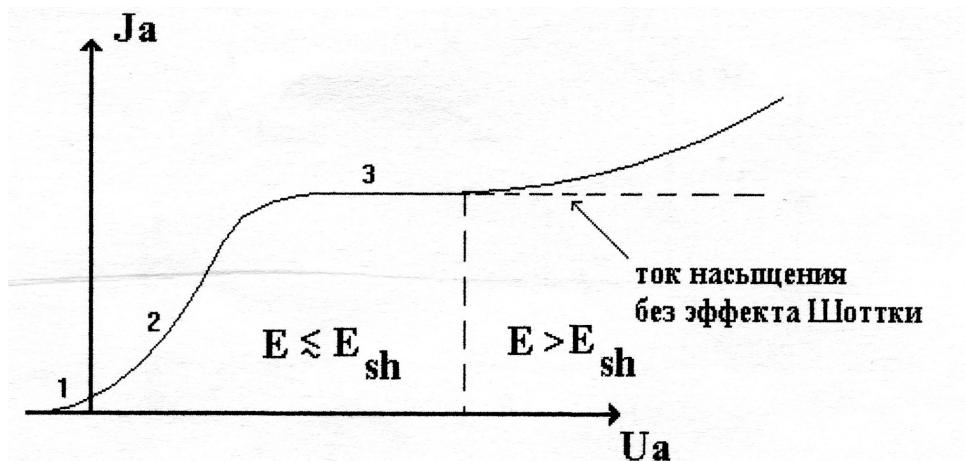


Рис. 9: Вольт-амперная характеристика диода. 1 - режим начальных токов, 2 - режим ограничения тока пространственным зарядом, 3 - режим температурного ограничения эмиссии

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Экспериментальная установка

Схема установки:

Исследуемый трёханодный диод с прямонакальным катодом помещён в защитный корпус (2). Питание накала диода осуществляется источником постоянного тока (3), анодные цепи запитываются от источника постоянного напряжения (4). Для изменения анодного тока диода используется миллиамперметр (1), анодное напряжение индицируется вольтметром, встроенным в источник питания (4), ток и напряжение накала катодной цепи

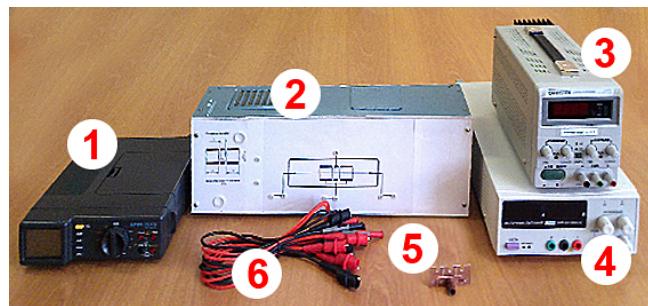


Рис. 10: Схема экспериментальной установки

измеряются внутренним прибором источника (3). Для сборки экспериментальных схем используются соединительные провода (6). Блок симметрирующих резисторов (5) позволяет эмулировать подключение минуса анодного питания к середине катода диода.

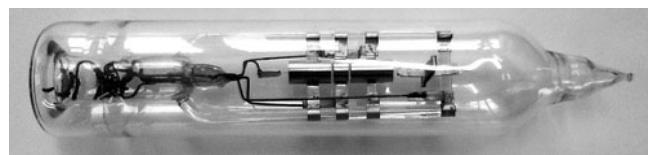


Рис. 11: Исследуемый диод

## 2.2. Задание 1

Установите ток накала  $1.48 A$ , измерьте напряжение накала. Снимите ВАХ диода в диапазоне напряжений  $0...120 V$ .

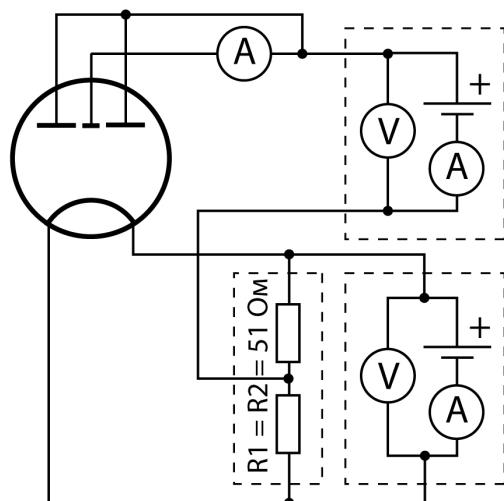


Рис. 12: К заданию 1

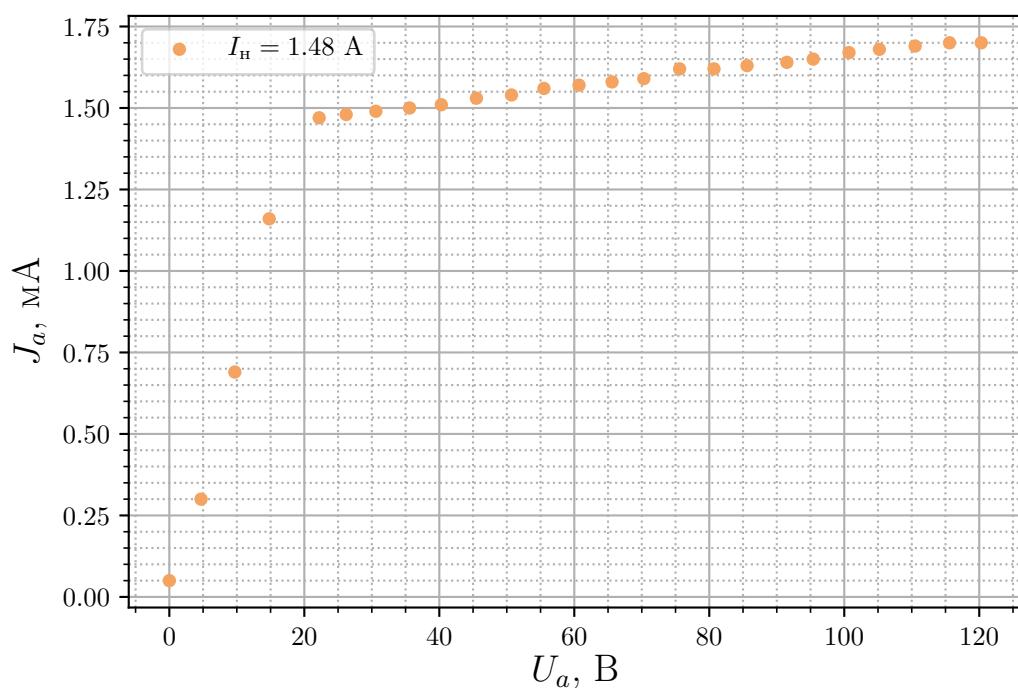


Рис. 13: Вольт-амперная характеристика диода при токе накала 1.48 А

### 2.3. Задание 2

Установите ток накала  $1.5 \text{ A}$ , измерьте напряжение накала. Снимите ВАХ диода в диапазоне напряжений  $0\dots120 \text{ V}$ .

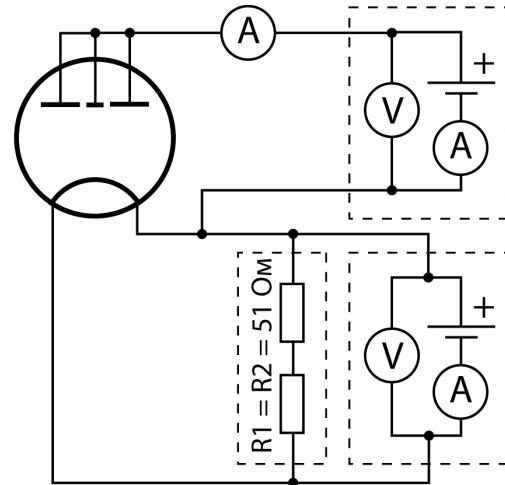


Рис. 14: К заданию 2

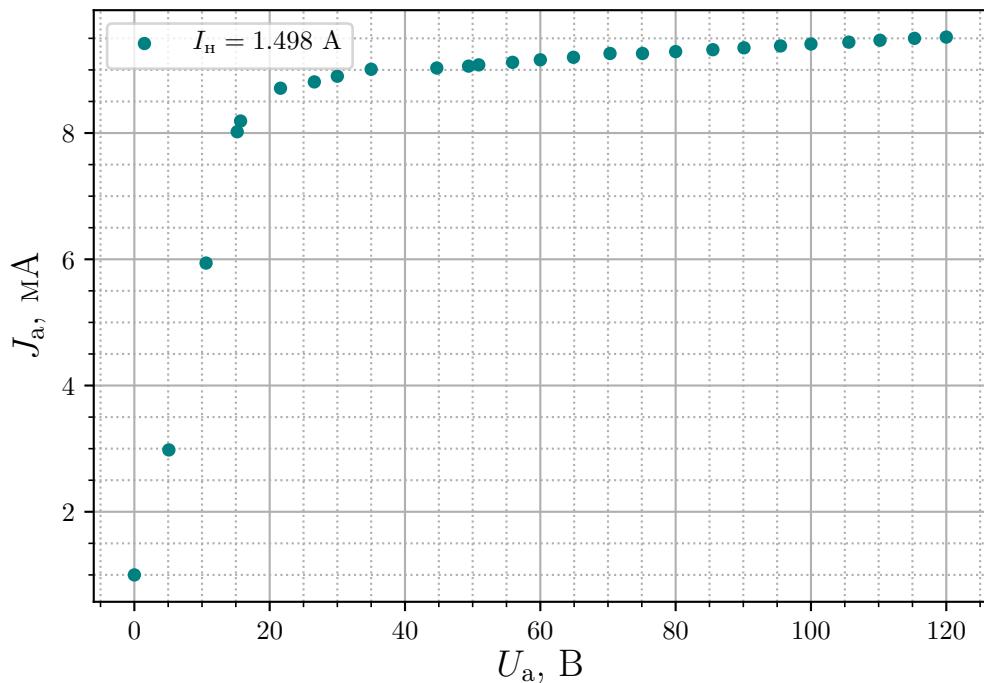


Рис. 15: Вольт-амперная характеристика диода при токе накала  $1.5 \text{ A}$

### 2.4. Задание 3

Установите ток накала  $1.500 \text{ A}$  измерьте напряжение накала. Снимите ВАХ диода в диапазоне напряжений  $0\dots120 \text{ V}$ .

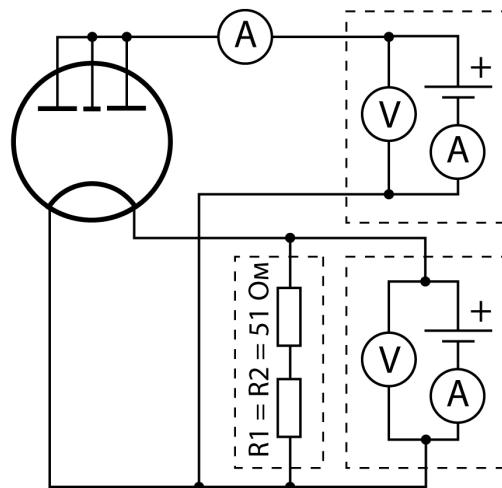


Рис. 16: К заданию 3

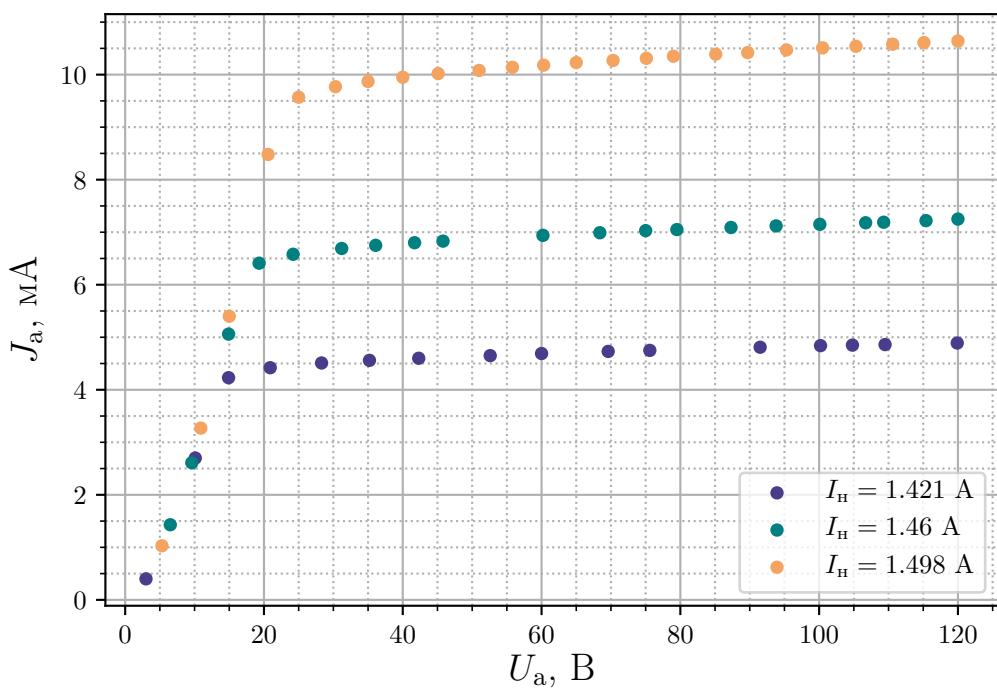


Рис. 17: Вольт-амперная характеристика диода при токе различных токах накала

При увеличении тока накала увеличивается температура катода, в следствии чего явление термоэлектронной эмиссии усиливается, что приводит к возрастанию анодного тока в режиме насыщения, так как в этом режиме ток через диод полностью определяется температурой катода.

## 2.5. Задание 4

Схема та же. Снимите зависимость анодного тока от тока накала при постоянном анодном напряжении (схема рис. 16). Измерения проделать для анодного напряжения 15 В, 60 В, и 100 В.

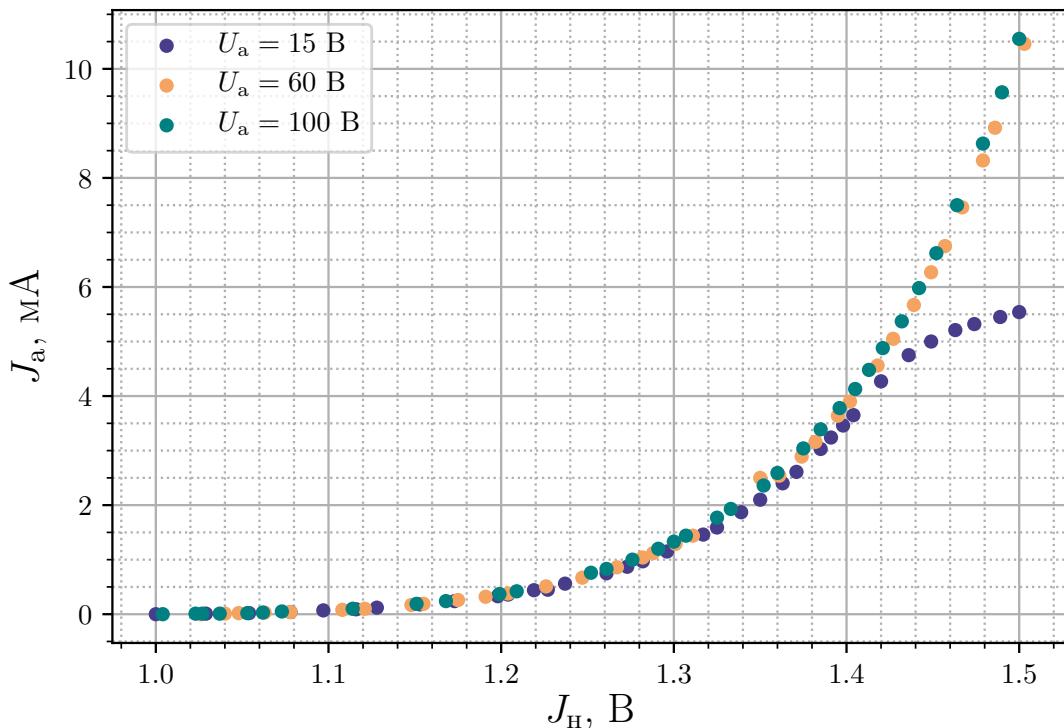


Рис. 18

Из графика видно, что при меньшем анодном напряжении анодный ток при некотором значении тока накала выходит на константу, это значит, что ток диода перестает зависеть от температуры катода. Такой режим работы диода называется режимом ограничения тока пространственным зарядом. В этом режиме электроны ускоряются только в области между пространственным зарядом и анодом, тогда как поле в прикатодной области нулевое, так как оно представляет собой суперпозицию поля зарядов на электродах и поля пространственного заряда. Это объясняет факт, почему при больших значениях анодного напряжения анодный ток продолжает расти. Для них поле пространственного заряда при данном токе накала не компенсирует поле электродов, поэтому в прикатодной области поле также будет являться ускоряющим.

## 2.6. Задание 5

По полученным данным постройте прямую Ричардсона (температуру определить по таблице Ленгмюра). По прямой Ричардсона вычислите работу выхода катода.

С помощью таблицы Ленгмюра [Приложение А] была построена зависимость температуры от тока накала для вольфрамовой нити длиной  $l = \text{см}$  и диаметром  $d = \text{см}$  (см. рис. 19). Для упрощения вычислений, из таблицы Ленгмюра была аппроксимирована линейной функцией  $T(J_{\text{н}}) = \alpha J_{\text{н}} + \beta$  с коэффициентами:

$$\alpha = 0.987 \quad \beta = 980$$

Тогда формулу для построения прямой Ричардсона можно привести к виду

$$\ln J_s - 2 \ln(\alpha J_s + \beta) = \ln(S_a A) - \frac{e\varphi}{kT}$$

С помощью этой зависимости была построена прямая Ричардсона (см. рис 20). Аппроксимируя эту прямую линейной функцией, находим значение тангенса угла наклона этой прямой

$$-\frac{e\varphi}{k} = -120595.5,$$

где  $e = 1.16 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж · К. Отсюда не сложно получить значение эффективной работы выхода  $\varphi$

$$\varphi = 9.847 \text{ В}$$

В дальнейшем, нам также пригодится второй коэффициент аппроксимации

$$\ln(S_a A) = 110.33,$$

с помощью него можно оценить площадь анода.

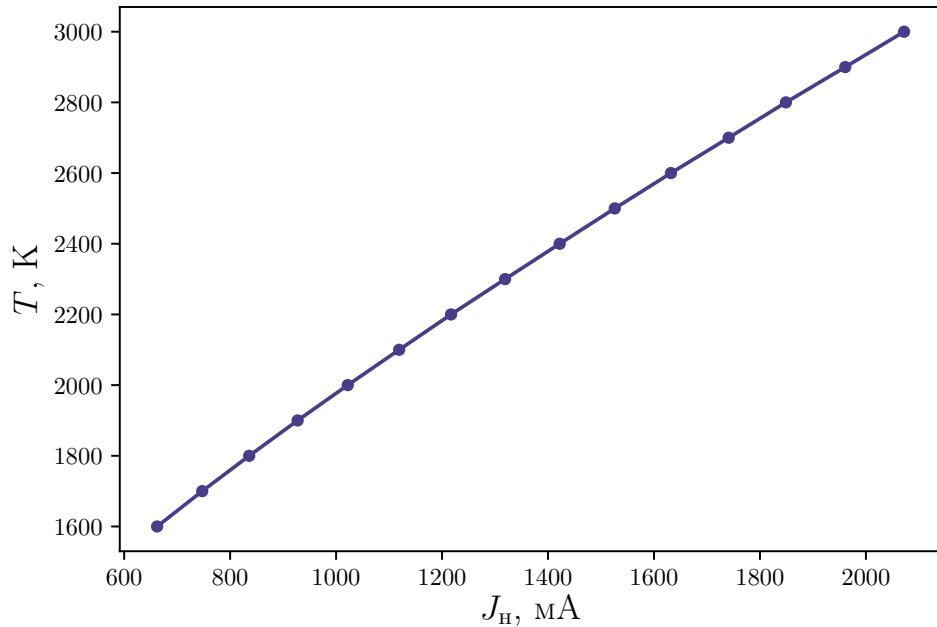


Рис. 19: Зависимость температуры  $T$  от тока накала  $J_{\text{н}}$

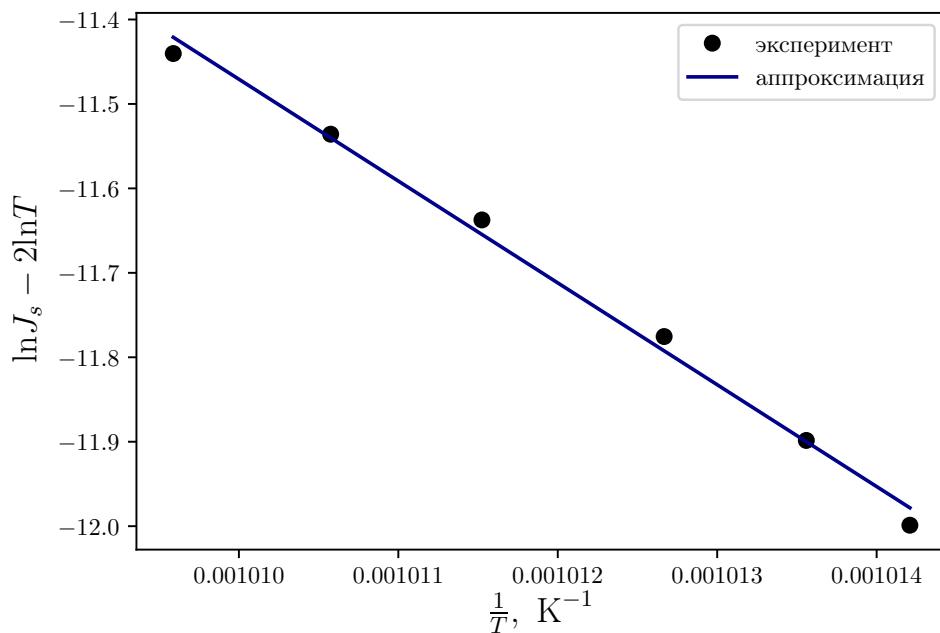


Рис. 20: Линейный участок прямой Ричардсона

## 2.7. Задание 6

Постройте теоретические ВАХ для задания 1 по закону «3/2» для эквипотенциального катода и задания 3, используя таблицу значений  $F(U_a/U_f)$ :

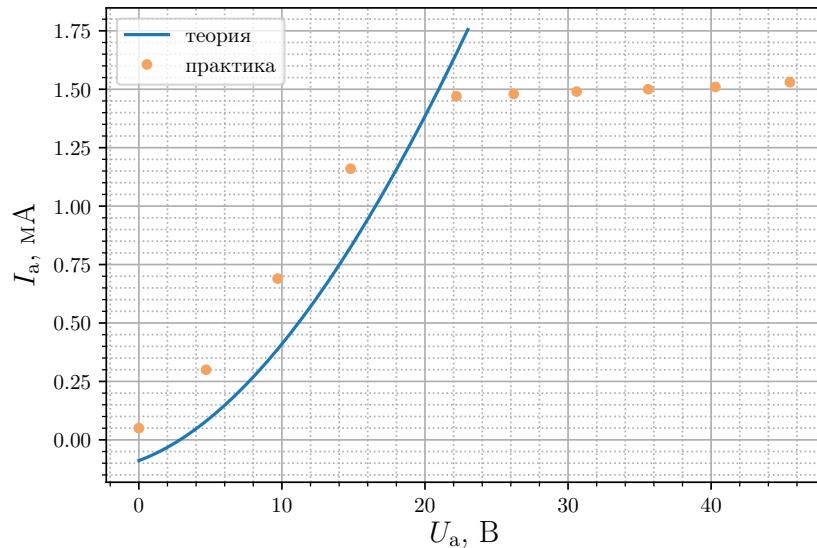


Рис. 21: Сравнение теоретической ВАХ диода с практической. Условия эксперимента такие же, как в задании 1

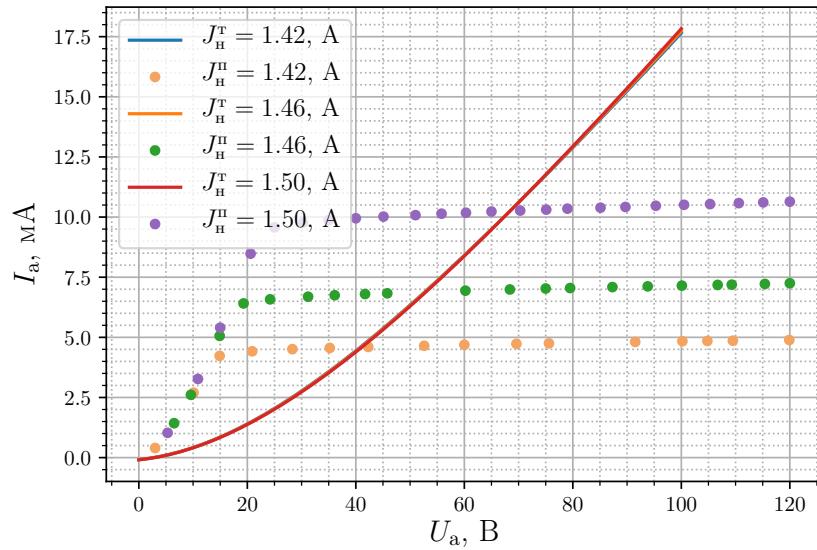


Рис. 22: Сравнение теоретической ВАХ диода с практической. Условия эксперимента такие же, как в задании 3

## 2.8. Задание 7

Для задания 1 вычислите по точкам на экспериментальной кривой удельный заряд электрона. На каком участке ВАХ надо выбирать точки для расчета?

Распишем закон «3/2»

$$J_a = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{2\eta} \frac{S_a}{r_a^2 \beta^2} U^{3/2},$$

$$\beta^2 = \left(1 - \frac{r_k}{r_a}\right)^2, r_a = 4 \text{ мм}, r_k = 0.05 \text{ мм}.$$

Для расчета необходимо брать участок быстрого нарастания ВАХ, то есть значения анодного напряжения  $U_a < 20$  В (см. рис. 13).

Осталось посчитать по формуле выше значения  $\eta$  для нескольких значений напряжения и усреднить. Тогда, удельный заряд электрона равен  $\eta = 4.1 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

## A. Таблица Ленгмюра

При практических расчетах температуры  $T$  вольфрамового катода по току накала  $J_h$  удобно пользоваться таблицей, составленной Ленгмюром.

**Следует обратить внимание, что в таблице дана зависимость  $T$  от  $J'_h$  ( $\frac{\text{А}}{\text{см}^3}$ ) – приведенного тока накала для проволочного вольфрамового катода, длина которого 1 см и диаметр 1 см.**

Для того чтобы от табличных данных перейти к катоду длины  $l$  и диаметру  $d$ , надо воспользоваться соотношением

$$J_h = J'_h d^{3/2} \quad (1)$$

Выражение (1) выводится из условия, что мощность рассеиваемая с 1 см<sup>2</sup> при одинаковых рабочих температурах остается постоянной

$$\frac{W}{\pi dl} = \frac{J_{\text{h}}^2 R}{\pi dl} = \frac{J_{\text{h}}^2 \rho \frac{4l}{\pi d^2}}{\pi dl} = \frac{J_{\text{h}}^2 4\rho}{\pi^2 d^3} = \frac{(J'_{\text{h}})^2 4\rho}{\pi^2}$$

Таблица 1: Таблица Ленгмюра

$J'_{\text{h}}$	662.2	747.3	836	927.4	1022	1119	1217	1319	1422	1526	1632	1741	1849	1961	2072
$T$	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000