

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО
Радиофизический факультет

Отчет по лабораторной работе №1

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

Выполнили студенты 440 группы
Карусевич А.А., Разова А.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 $U_k = 0, U_a = \text{const} > 0$.

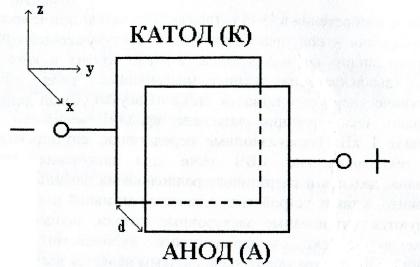


Рис. 1: Плоский диод

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_ρ 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_ρ 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 вычитаются, 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

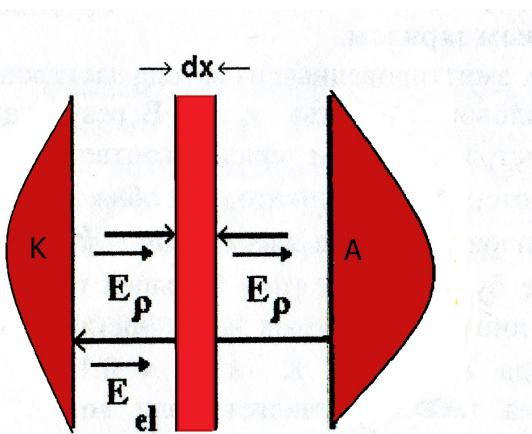
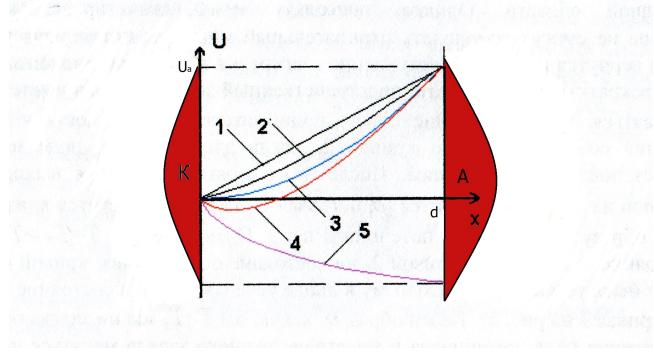


Рис. 3: Распределение поля и потенциала в диоде

ние, откуда следует, что анодный ток будет экспоненциально убывающей функцией $|U_a|$. 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.

$$J_a = P U_a^{3/2}. \quad (1)$$

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.

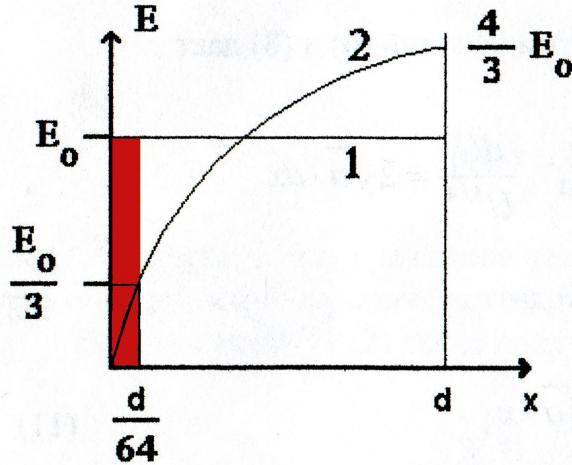


Рис. 4: Распределение электрического поля в холодном диоде (1) и в режиме ограничения тока пространственным зарядом (2). Заштрихована область быстрого изменения поля

1.3. Ток диода в режиме насыщения

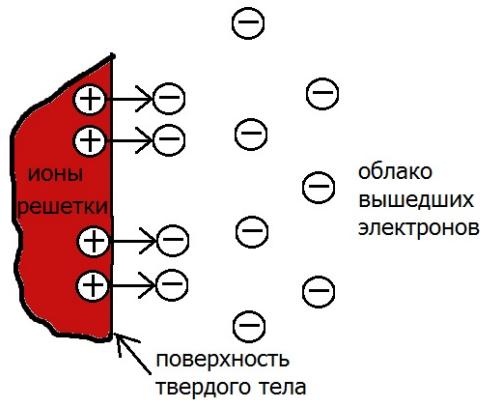


Рис. 5: Образование поля дипольного слоя на границе металла. Стрелками указано направление поля

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

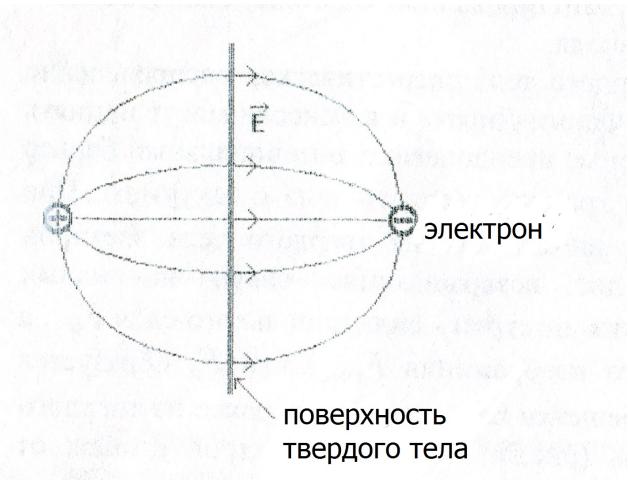


Рис. 6: Распределение электрического поля в холодном диоде (1) и в режиме ограничения тока пространственным зарядом (2). Заштрихована область быстрого изменения поля

можно пренебречь и считать, что электрон находится над плоской поверхностью идеального проводника. Ток термоэмиссии:

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

где A -эмиссионная константа, φ - эффективная работа выхода. Прологарифмируем:

$$\ln J_a - 2\ln T = \ln(s - a \cdot A) - \frac{e\varphi}{kT}. \quad (3)$$

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 φ .

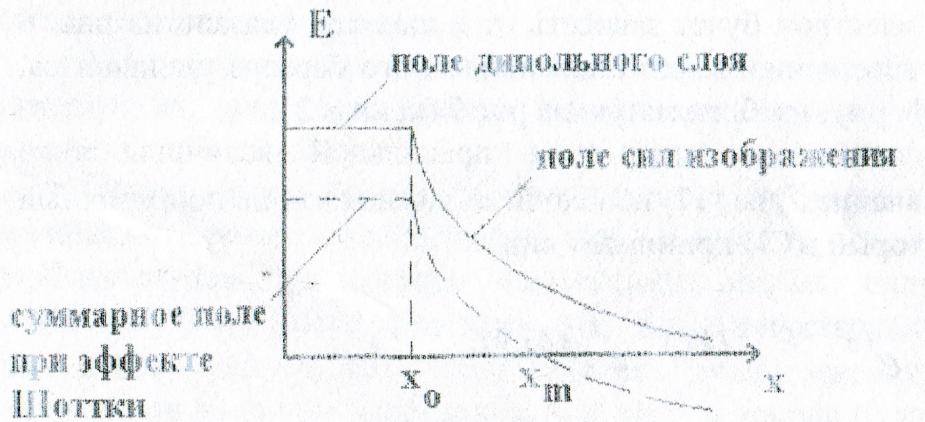


Рис. 7: Распределение суммарного электрического поля, действующего на выходящий из твердого тела электрон

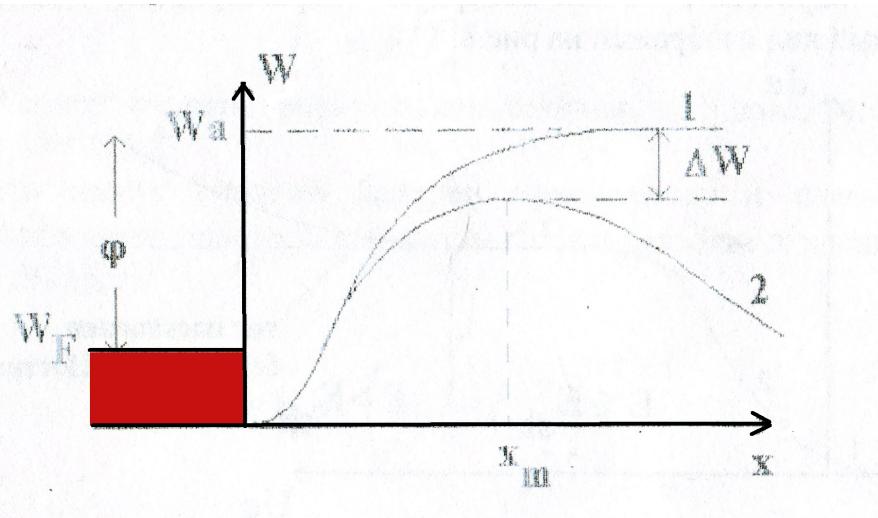


Рис. 8: Профиль потенциального барьера на границе твердого тела в случае слабого (1) и сильного (2) электрических полей на катоде

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:

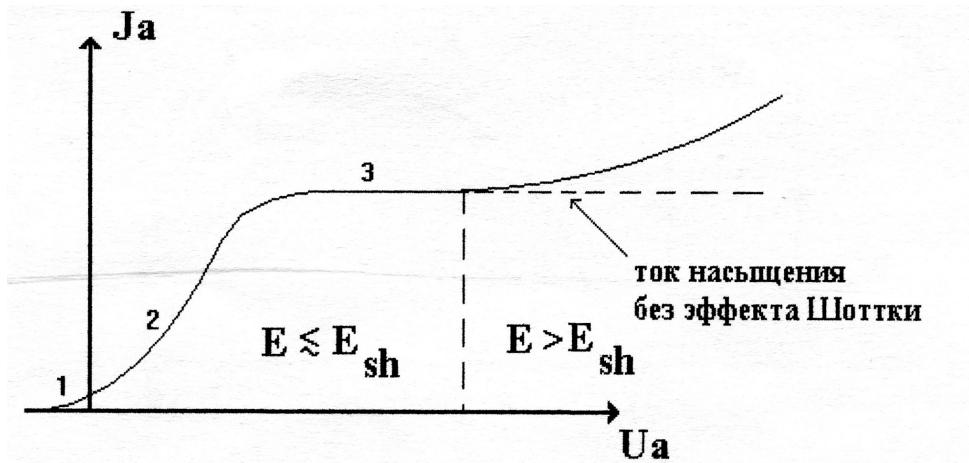


Рис. 9: Вольт-амперная характеристика диода. 1 - режим начальных токов, 2 - режим ограничения тока пространственным зарядом, 3 - режим температурного ограничения эмиссии

2. Экспериментальная часть

2.1. Экспериментальная установка

Схема установки:

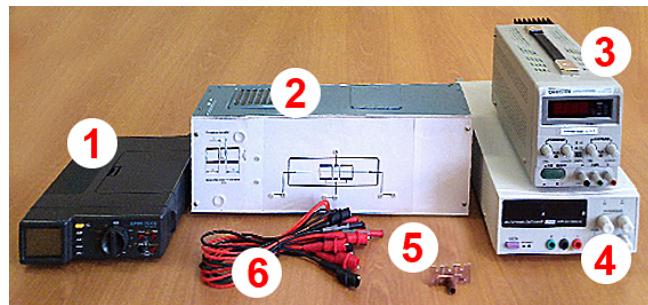


Рис. 10: Схема экспериментальной установки

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 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.

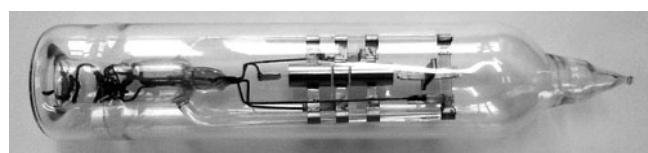


Рис. 11: Исследуемый диод

2.2. Задание 1

Установите ток накала 1.48 А, измерьте напряжение накала. Снимите ВАХ диода в диапазоне напряжений 0...120 В:

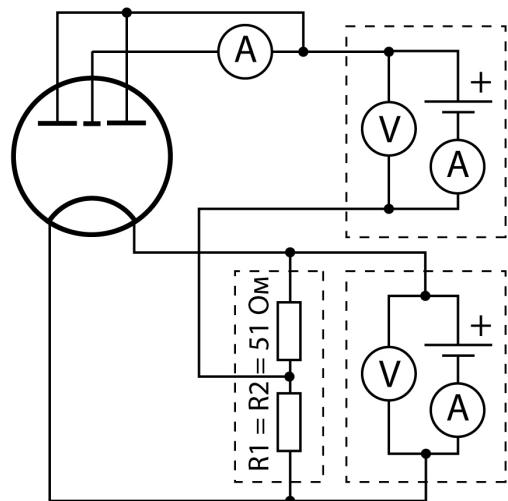


Рис. 12: К заданию 1

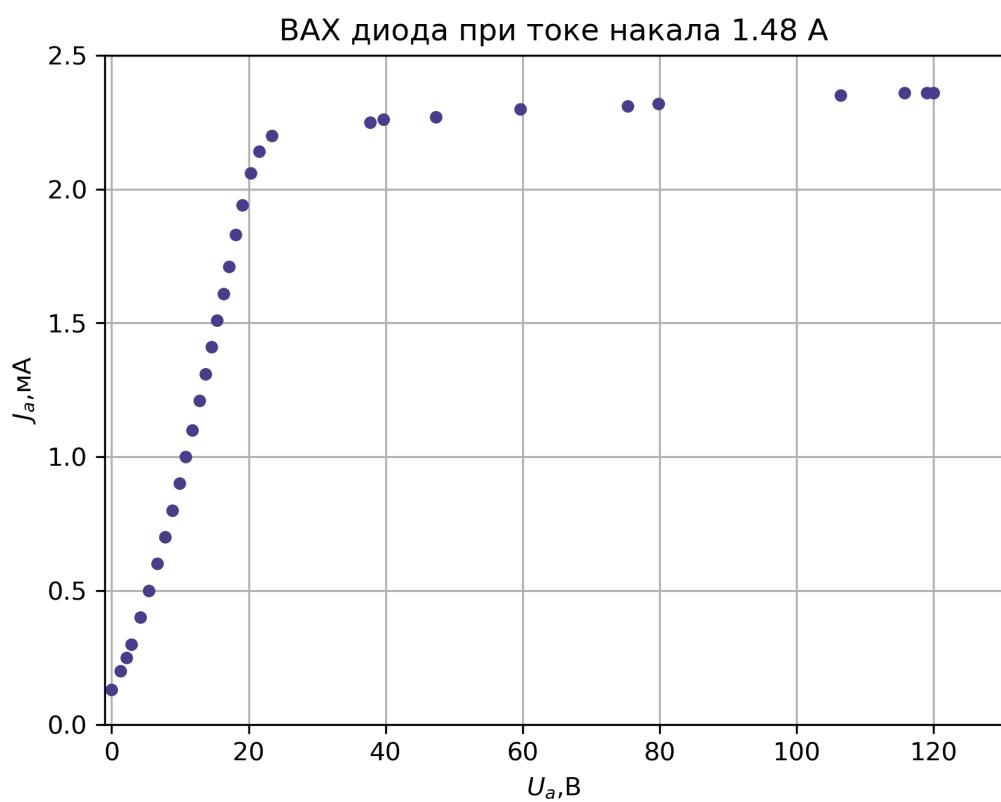


Рис. 13

2.3. Задание 2

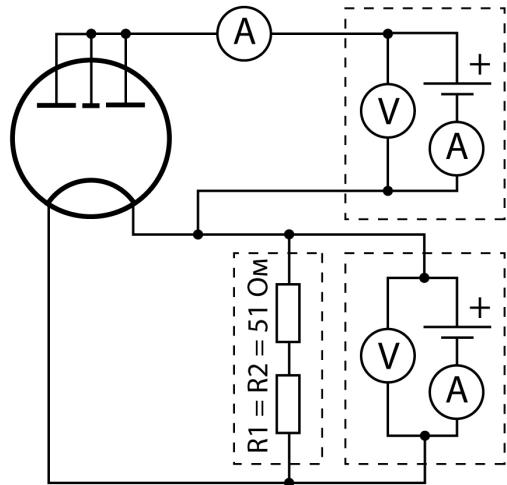


Рис. 14: К заданию 2

Установите ток накала 1.500 А, измерьте напряжение накала. Снимите ВАХ диода в диапазоне напряжений 0...120 В:

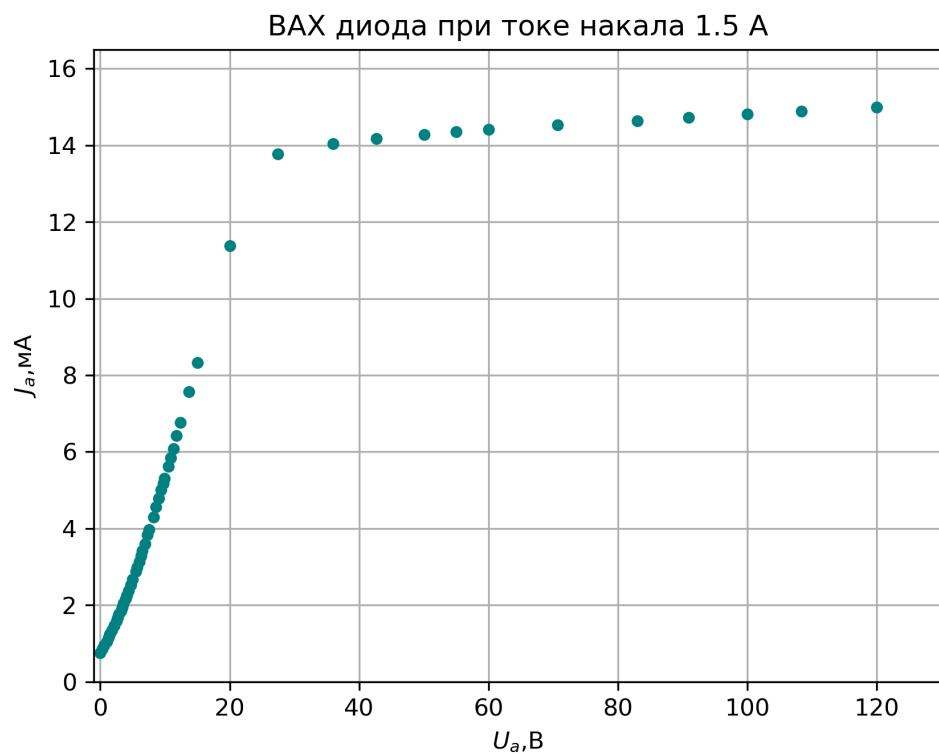


Рис. 15

2.4. Задание 3

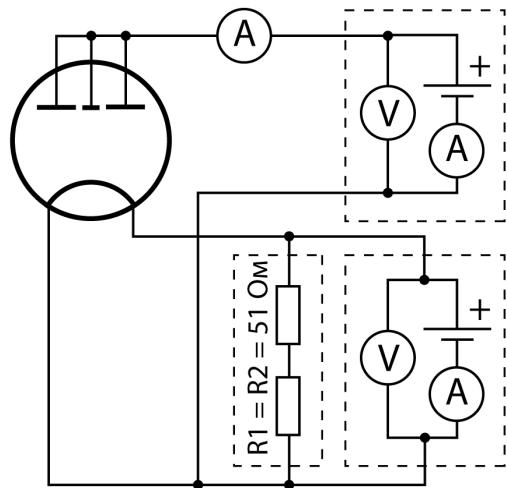


Рис. 16: К заданию 3

Установите ток накала 1.420 А, 1.460 А, 1.500 А измерьте напряжение накала. Снимите ВАХ диода в диапазоне напряжений 0...120 В:

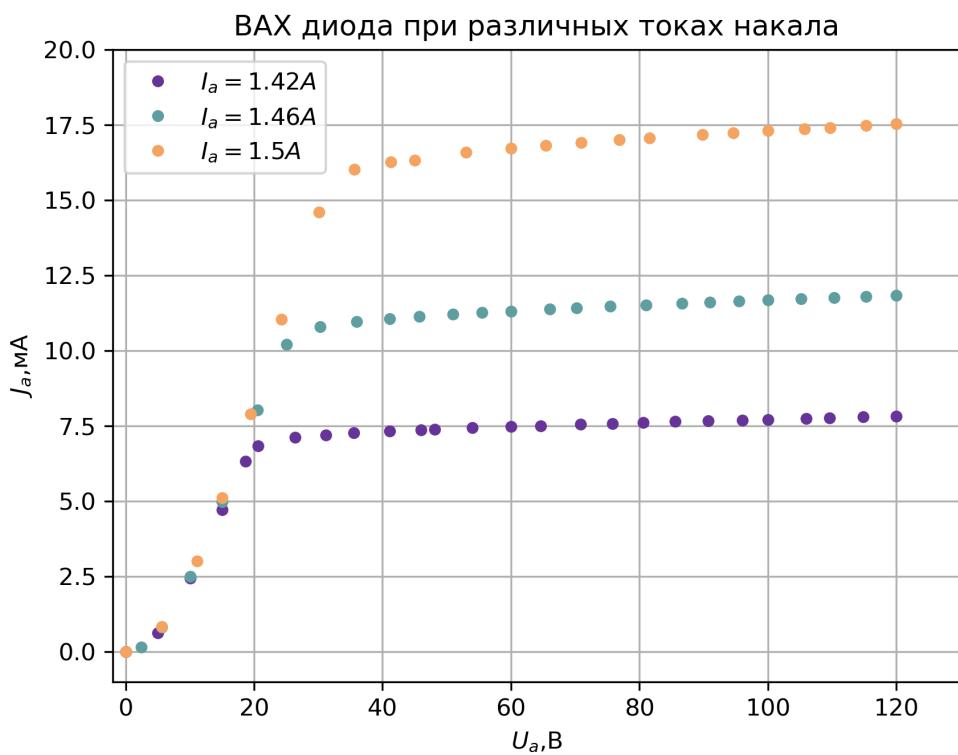


Рис. 17

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.

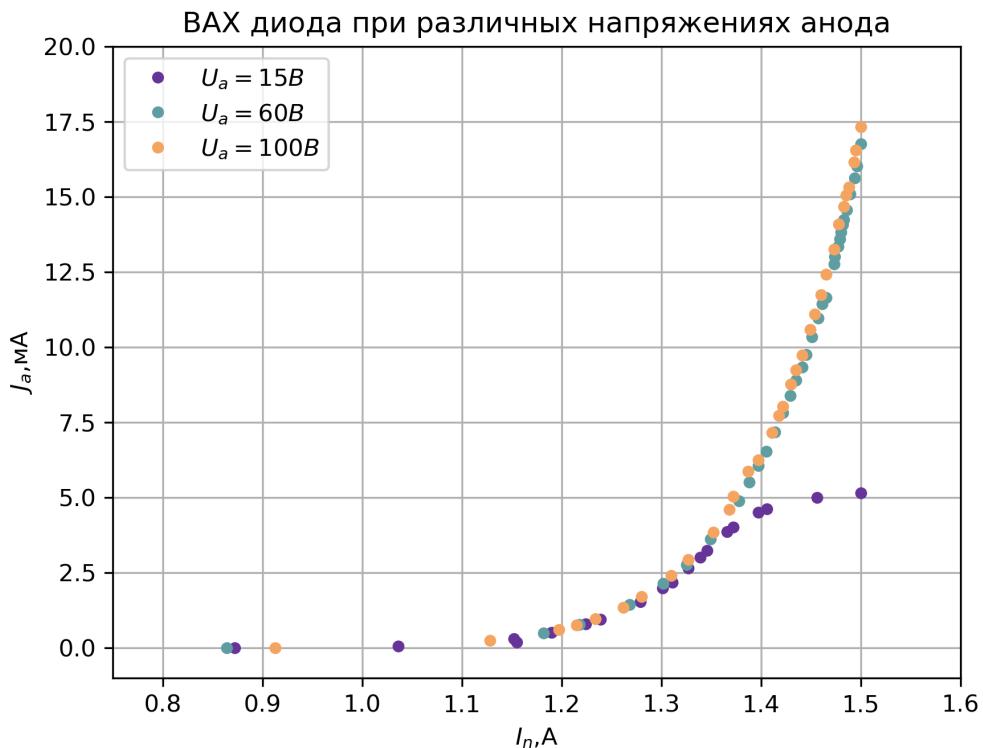


Рис. 18

2.6. Задание 5

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

Работа выхода ищется по тангенсу угла наклона прямой и оказывается равной 6.1 мВ.

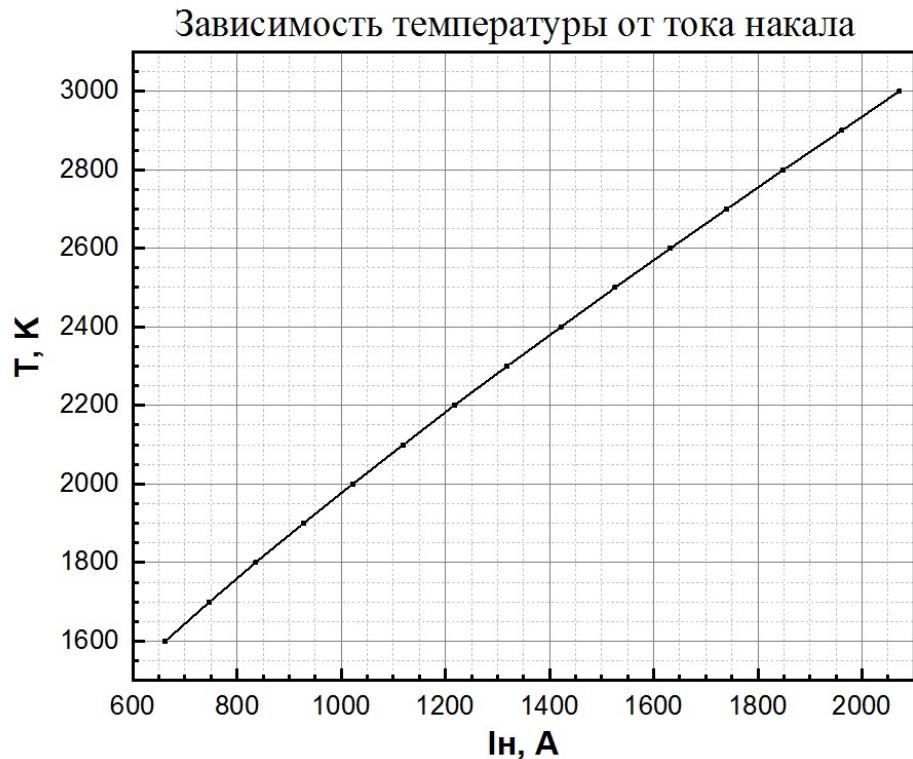


Рис. 19

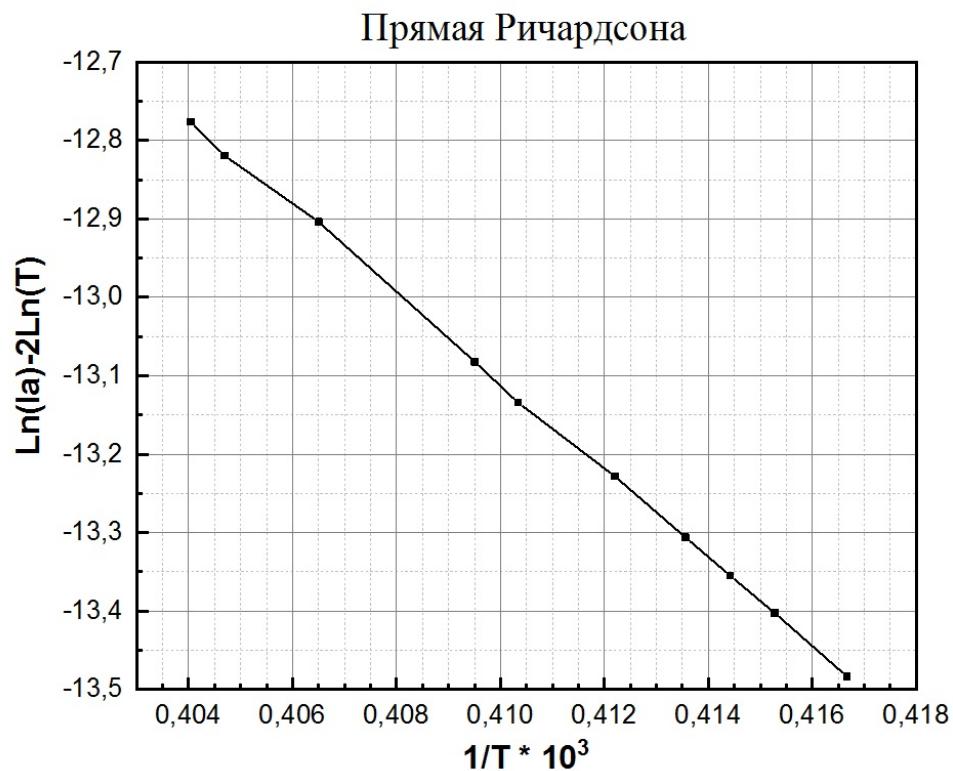


Рис. 20

2.7. Задание 6

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

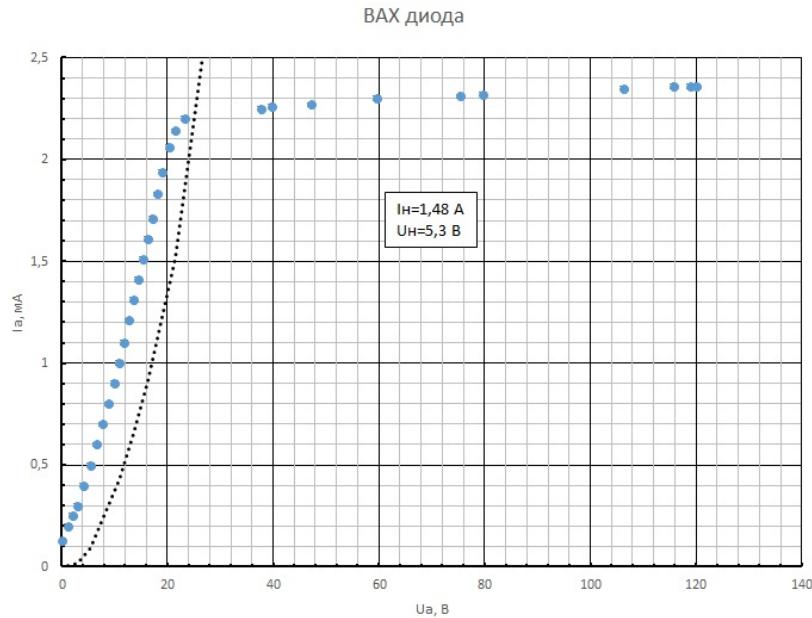


Рис. 21

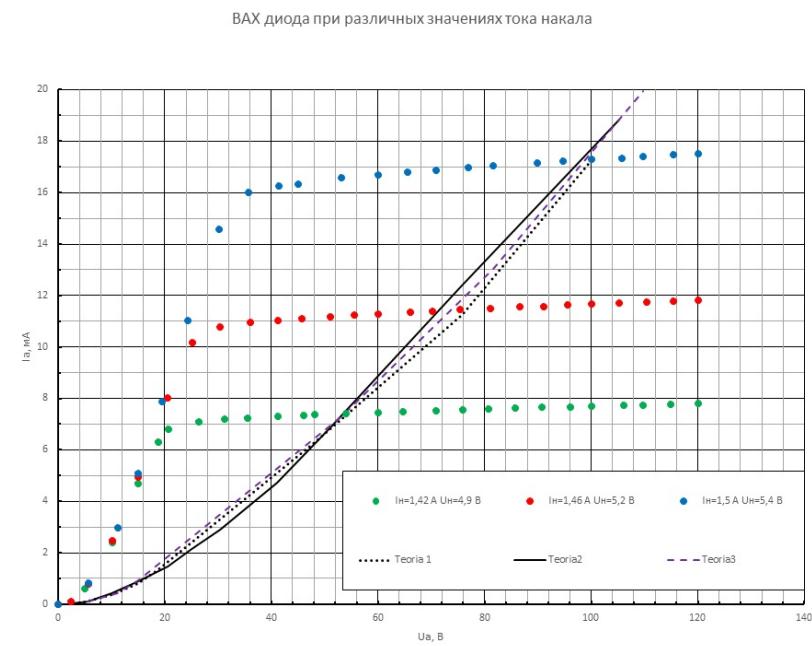


Рис. 22

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?

С учетом, что

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

$\beta^2 = (1 - \frac{r_k}{r_a})^2$, $r_a = 4$ мм, $r_k = 0.05$ мм, S_a - площадь анода, удельный заряд электрона равен $\eta = 4.1 \cdot 10^{11}$ кл/кг.