

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский физико-технический
институт (государственный университет)»

Кафедра физики и техники низких температур
выпускная квалификационная работа бакалавра

**«Фотоэмиттер для исследования подвижности
электронов в газообразном и жидком гелии»**

Студент-дипломник _____ Пюрбеева Е.Д.Б.

Научный руководитель

к.ф.-м.н., с.н.с., _____ Завьялов В.В.

Москва 2016

Оглавление

1 Введение	2
1.1 Постановка задачи	2
1.2 Виды источников	2
1.3 Фотоэмиссия	3
1.4 Менее практическая часть	3
2 Теория	4
2.1 Обзор литературы	4
2.1.1 Эксперименты с фотоисточниками	4
2.1.2 Электроны в вакууме и газах	6
2.1.3 Электроны в жидком гелии	6
2.2 Физическая модель явления	8
2.2.1 В вакууме	8
2.2.2 В жидком гелии	8
3 Эксперимент	9
3.1 Экспериментальная установка	9
3.2 Методика измерения	10
3.3 LabView-программа измерений	12
3.4 Обработка результатов	12
3.5 Результаты измерений при различных условиях	13
3.5.1 В вакууме	13
3.5.2 В газообразном гелии	14
3.5.3 В сверхтекучем гелии	16
4 Заключение	18

Глава 1

Введение

1.1 Постановка задачи

Для проведения многих низкотемпературных экспериментов требуется источник электронов в жидком гелии или на его поверхности. Такой источник должен обладать следующими свойствами: он должен испускать необходимое и контролируемое количество электронов на поверхность, в объем гелия, или на другие структуры в его объеме. Энергия электронов должна быть известной, не слишком большой, чтобы избежать таких нежелательных эффектов, как преодоление потенциального барьера и вхождение электронов внутрь гелия, если требуется напускать их на поверхность, и ионизации атомов гелия, если наличие ионов может повлиять на ход эксперимента, и, желательно, легко изменяемой. Также процесс испускания электронов должен подводить минимально возможную мощность в низкотемпературную систему.

В данной работе исследуется возможность использования фотоэффекта в качестве метода получения электронов для низкотемпературных экспериментов, а также свойства такого фотоэммиттера.

1.2 Виды источников

Чтобы напускать электроны на различные поверхности чаще всего используются три метода - термоэлектронная эмиссия с острия, газовый разряд и радиоактивный источник. Ни один из этих методов не соответствует всем требованиям к идеальному источнику. Термоэлектронная эмиссия разогревает низкотемпературную систему, также, ток эмиссии очень резко зависит от поля вблизи острия, а следовательно и его радиуса кривизны, который может изменяться со временем из-за про-

горания иглы, поэтому его сложно контролировать и поддерживать постоянным. Газовый разряд производит высокоэнергетичные электроны, которые необходимо тормозить при помощи дополнительных электродов, также, для его поддержания необходимо достаточно высокое давление, а следовательно и достаточно высокая температура (1-2 К), что может ограничивать проведение экспериментов. Энергию вылета электронов из радиоактивного источника изменить, очевидно, невозможно, и такие источники также используются с дополнительными электродами.

1.3 Фотоэмиссия

В качестве метода получения электронов фотоэмиссия теоретически отвечает почти указанным выше свойствам – число эмиттируемых электронов определяется мощностью источника света, находящегося вне криостата, а энергия электрона определяется длиной волны источника и разгоняющим электрическим полем, то есть ей легко управлять и ее можно сделать сколь угодно малой. Под вопросом остается то, насколько вся система разогревается в результате облучения фотокатода.

Фотоэффект в вакууме и газах - легко наблюдаемое и хорошо описанное явление. Интересным представляется изготовление простого фотоэмиттера, способного давать наблюдаемый ток в жидком гелии, что и являлось целью этой работы, наряду с исследованием работы такого источника.

1.4 Менее практическая часть

Несмотря на кажущуюся простоту описания движения электрона в жидком гелии, в этой области до сих пор есть вопросы, требующие исследования и объяснения, например такие, как происхождение "быстрых" ионов. И, хотя эта работа не ставит своей целью описание подобных эффектов, в ней рассматривается возможность использования для их исследования метода, слегка отличающегося от использованных ранее.

Глава 2

Теория

2.1 Обзор литературы

2.1.1 Эксперименты с фотоисточниками

В разное время исследовался фотоэффект в жидком гелии и низкотемпературных экспериментах, но, несмотря на то, что первые такие попытки были более сорока лет назад [2], подобные источники не применяются в реальных экспериментах.

В эксперименте [2] исследовался спектральный отклик фотоумножителя в вакууме (с неповрежденной трубкой), газообразном и жидком гелии. Схема установки и результаты представлены на рисунках 2.1 и 2.2.

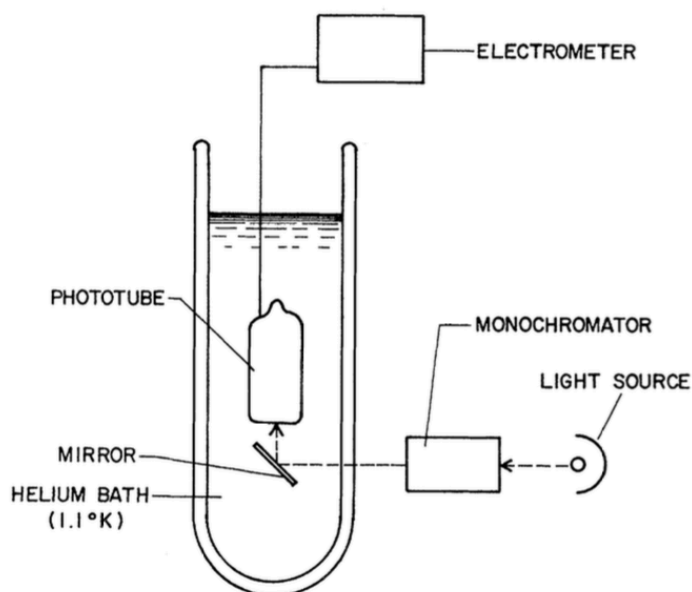


Рис. 2.1: Схема установки эксперимента с фотоумножителем

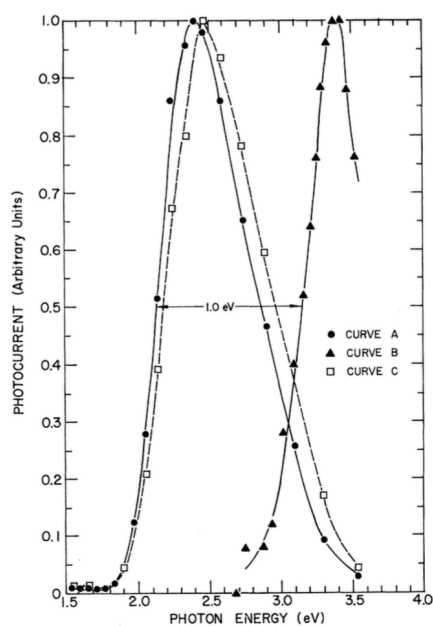


Рис. 2.2: Результаты эксперимента с фотоумножителем.
 Curve A - спектральный отклик неповрежденного фотоумножителя.
 Curve B - в атмосфере гелия
 Curve C - в жидком гелии
 Все кривые нормированы на единицу по максимальному току.

Более недавний эксперимент [1] исследует фотоэмиттер в качестве источника электронов на поверхности жидкого гелия и использует в качестве фотокатода цинковую пленку. В остальном, данная работа во многом повторяет схему этого эксперимента (рисунок 2.3), но использует ее в объеме жидкого гелия.

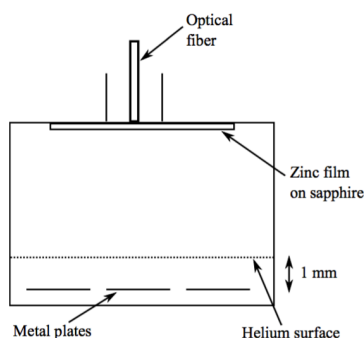


Рис. 2.3: Схема поверхностного фотоэмиттера с цинковым фотокатодом

2.1.2 Электроны в вакууме и газах

Как это ни удивительно, даже в самой простой модели электронов, вылетающих с начальной скоростью v с одной пластины плоского конденсатора с приложенным напряжением U , задача о зависимости тока от напряжения в вакууме решена только при $v = 0$ (классический "закон трех вторых").

При $v \neq 0$ существуют различные решения (и также очень различающиеся по времени) [3], [4], численные, или приближающие экспериментальные результаты.

Для тока в газе существует формула, связывающая фототок в газе с фототоком в вакууме в той же конфигурации [7] [8]:

$$\frac{i}{i_0} = \frac{\sqrt{6\pi\mu E}}{v + \sqrt{6\pi\mu E}} \quad (2.1)$$

где i_0

И тут в статье еще есть картинка, но для этого нужна статья, которая Wyatt в электронном виде.

А также существуют экспериментально измеренные зависимости подвижности от поля для некоторых газов [5] (рисунок ??):

2.1.3 Электроны в жидком гелии

Кажется, что поведение электрона в жидком гелии должно легко описываться. Так как у гелия заполнены все электронные оболочки, между нейтральным атомом и свободным электроном существует сильно отталкивание, что приводит к тому, что чтобы войти в жидкий гелий, электрону необходимо преодолеть потенциальный барьер порядка 1эВ. Наличие этого барьера, в совокупности с низким поверхностным натяжением гелия α ($0.375 \frac{erg}{cm^2}$) делает для электрона более энергетически выгодным создание небольшой полости в жидкости, чем свободное перемещение внутри нее.

Размер этой полости можно с достаточно хорошей точностью используя выражение для энергии полости:

$$E = \frac{h^2}{8mR^2} + 4\pi R^2\alpha + \frac{4\pi}{3}R^3P \quad (2.2)$$

где R - радиус пузырька, m - масса электрона, а последний член отвечает за энергию, которую нужно затратить на образование пузырька в жидкости, к которой прикладывается давление P .

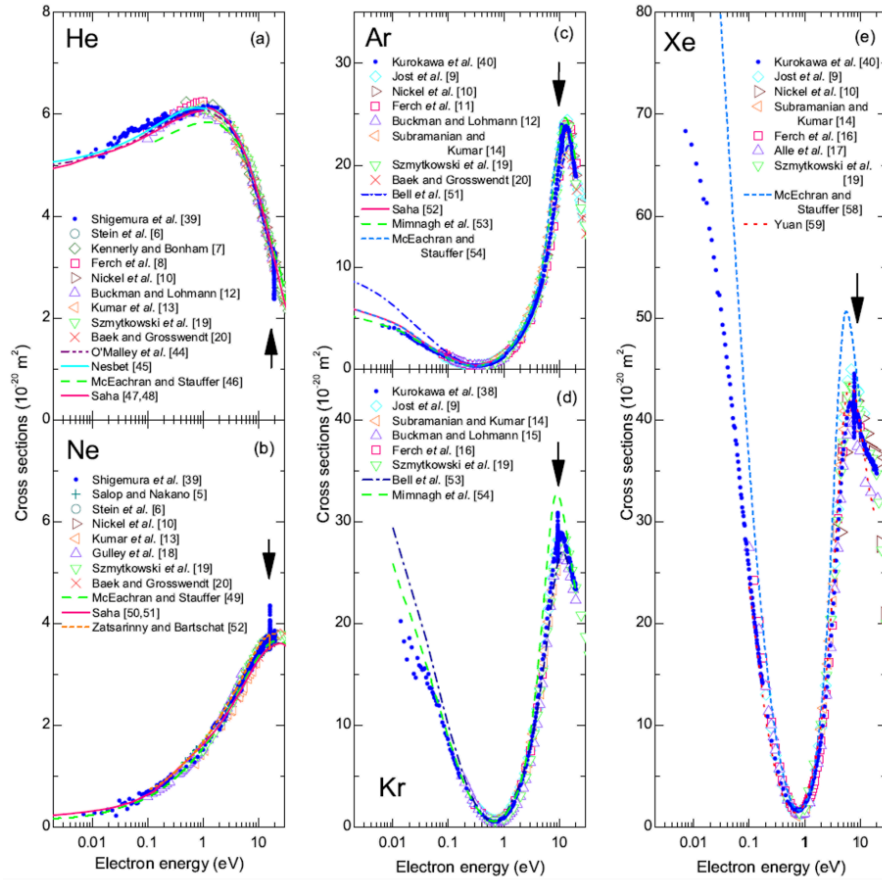


Рис. 2.4: Зависимость сечения рассеяния электрона на атомах газа от энергии электрона

При $P = 0$ минимум энергии достигается при

$$R_0 = \left(\frac{h^2}{32\pi m \alpha} \right)^{\frac{1}{4}} \approx 19 \text{ \AA} \quad (2.3)$$

Подвижность этих пузырьков определяется силой сопротивления со стороны фононов и ротонов. В сверхтекучем гелии-4 при температуре большую часть сопротивления оказывают ротоны и для подвижности

$$\mu \approx e \frac{\Delta}{kT} \quad (2.4)$$

где $\Delta = 0.743$ мэВ - ротонная щель.

Однако самой интересной частью подобных исследований является то, что при подаче одиночного импульса на источник регистрируется не один пик тока, как можно было бы ожидать, а несколько и непрерывный фон, как можно видеть на рисунке ??.

Также существуют экспериментальные зависимости установившейся скорости для пузырьков и быстрых ионов от электрического поля [тут](#) для картинки нужна в электронном виде статья Мариса

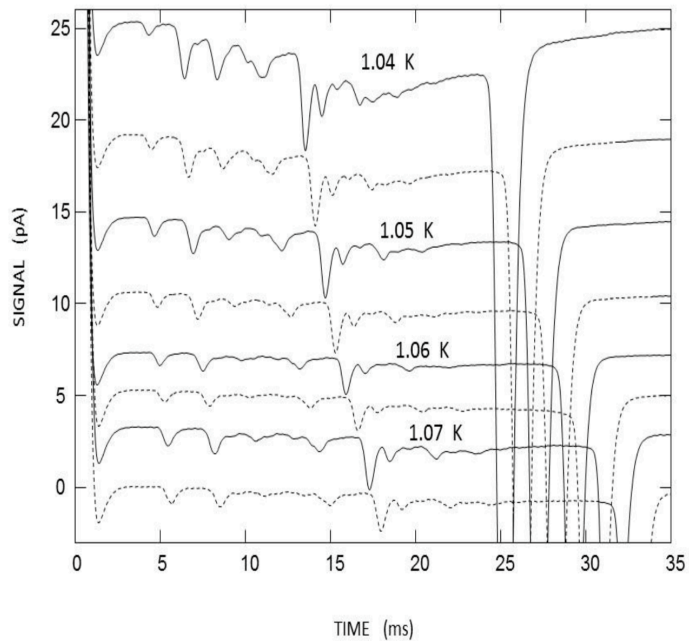


Рис. 2.5: Зависимость тока от времени для одного импульса источника

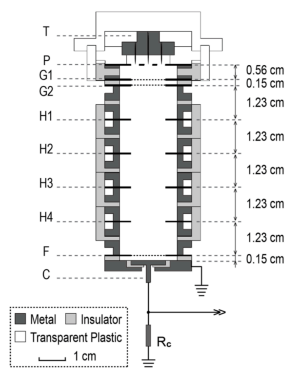


Рис. 2.6: Экспериментальная камера для наблюдения быстрых ионов

2.2 Физическая модель явления

2.2.1 В вакууме

2.2.2 В жидком гелии

Глава 3

Эксперимент

3.1 Экспериментальная установка

В качестве источника излучения использовалась ртутная лампа ПРК (ее спектр изображен на рисунке 3.3) . К ней, через объектив с переменным фокусным расстоянием, присоединен световод в металлической оболочке, пропускающий в ультрафиолетовой области интенсивных линий лампы. Второй конец световода отполирован и ведет в криостат через вакуумное уплотнение, где кончается в камере фотоэмиттера. Между лампой и объективом световода находится управляемая заслонка, позволяющая перекрывать поток света из лампы.

Вакуумное уплотнение световода было изготовлено из нескольких силиконовых трубок разного диаметра, но впоследствии оказалось не слишком удачным, зато достаточно мягким, чтобы компенсировать взаимное изменение длин световода и металлической вставки при охлаждении до гелиевых температур, и позволить жестко закреплять нижний конец световода в камере.

Как схематично изображено на рисунке 3.2, излучение, исходящее из конца световода проходит через никелевую сетку с шагом **я не знаю сколько** и попадает на фотокатод, в качестве которого используется капля индия на медной подложке плоской зачищенной верхней поверхностью. Электроны, выбитые из индия, утягиваются вверх электрическим полем, в результате приложенного напряжения между никелевой сеткой и подложкой. В процессе измерений выяснилось, что индий достаточно быстро окисляется, и необходимо заново зачищать его поверхность.

Так как световод покрыт проводящей оболочкой и может касаться как внутренней поверхности вставки, как и сетки, то в электрической схеме

измерений (**Она тут нужна, или нет?**) сетка была заземлена, а управляющее напряжение подавалось на анод коаксиальным кабелем, потенциал экрана которого, во избежание утечек тока, был равен потенциалу внутренней жилы. При этом ток измерялся между землей и фотокатодом прибором Keighley 6430 с чувствительностью 10^{-16} А. Тот же прибор задавал напряжение. При полностью собранной вставке без камеры уровень шума был 10^{-15} А, что приблизительно соответствует минимальному току, который можно измерить в данной установке.

Измерения проводились при комнатной температуре в вакууме и в атмосфере гелия, а также в сверхтекучем гелии, температура которого измерялась емкостным барометром по давлению насыщенных паров.

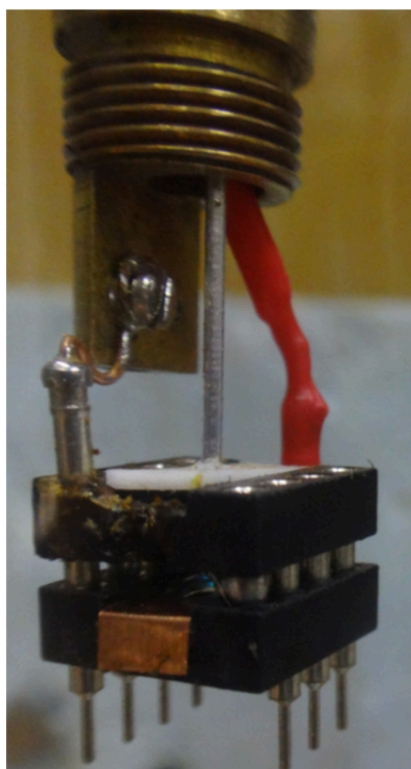


Рис. 3.1: Внешний вид камеры

3.2 Методика измерения

В предварительных измерениях было замечено, что фототок с индиевого фотокатода при постоянном напряжении меняется со временем, вероятно, из-за неких процессов, происходящих с индием при воздействии на него ультрафиолета.

Характерная зависимость тока от времени изображена на рисунке

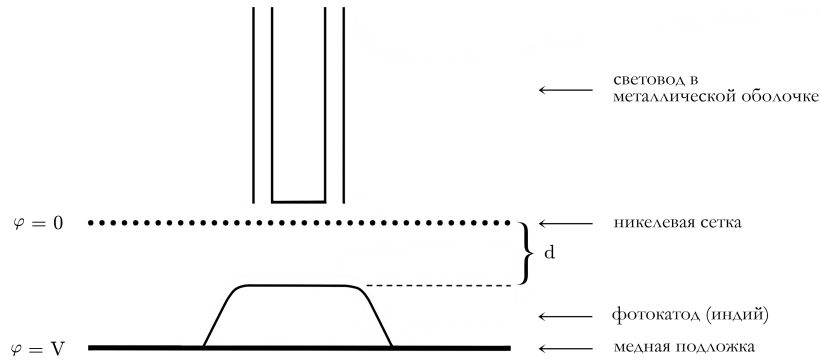


Рис. 3.2: Схема экспериментальной камеры

3.4. Все подобные зависимости хорошо аппроксимируются функциями вида:

$$I(t) = Ae^{\frac{t}{T}} + B \quad (3.1)$$

Для кривой на рисунке 3.4 $T = 898\text{с}$, но время установления также зависит от условий измерения, например, в вакууме или газе, но T лежит в пределах 500-1500 секунд.

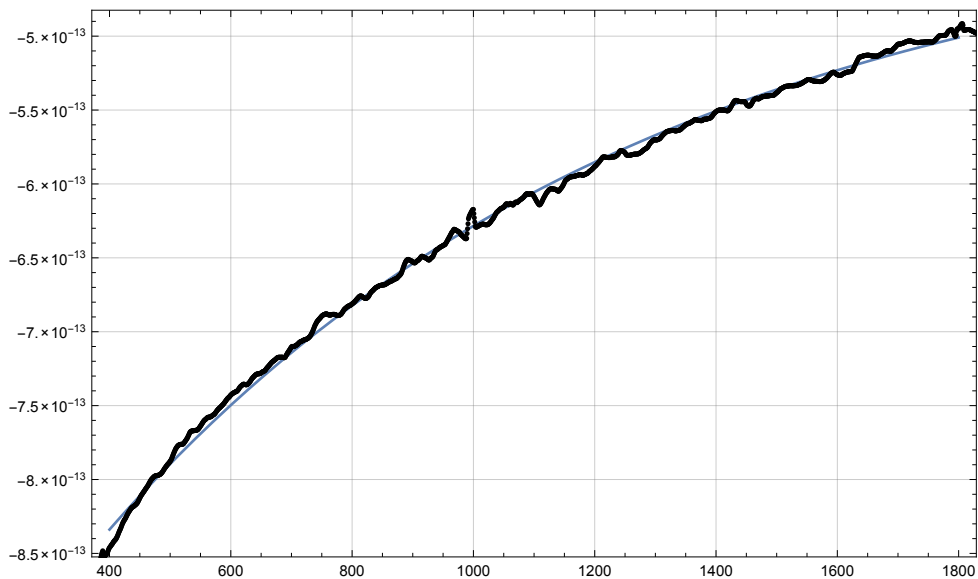


Рис. 3.4: Зависимость фототока в вакууме от времени при постоянном напряжении

Из-за описанного эффекта полное время измерения фототока не может быть слишком большим, поэтому было изготовлено устройство, перекрывающее поток света от лампы в светоход. При измерении вольт-амперных характеристик, при каждом напряжении после установлении "нулевого" тока после изменения напряжения на небольшое время

Persistent Lines of Neutral Mercury (Hg I)

Intensity	Wavelength (Å)	A_{ki} ($10^8 s^{-1}$)	Energy Levels (cm ⁻¹)	Configurations	Terms	J	Line Ref.	A_{ki} Ref.
1000	1849.499	7.46	0.000 54068.781	$5d^{10}(1s)6s^2$ $5d^{10}(1s)6s6p$	$1s$ $1p^{\circ}$	0 1	WA63	M00
1000	2536.517	0.080	0.000 39412.300	$5d^{10}(1s)6s^2$ $5d^{10}(1s)6s6p$	$1s$ $3p^{\circ}$	0 1	BAL50	FW96
250	2967.280	0.45	37645.080 71336.164	$5d^{10}(1s)6s6p$ $5d^{10}(1s)6s6d$	$3p^{\circ}$ $(^1/2, ^3/2)$	0 1	BAL50	FW96
600	3650.153	1.3	44042.977 71431.311	$5d^{10}(1s)6s6p$ $5d^{10}(1s)6s6d$	$3p^{\circ}$ $(^1/2, ^5/2)$	2 3	BAL50	FW96
400	4046.563	0.21	37645.080 62350.456	$5d^{10}(1s)6s6p$ $5d^{10}(1s)6s7s$	$3p^{\circ}$ $3s$	0 1	BAL50	FW96
1000	4358.328	0.557	39412.300 62350.456	$5d^{10}(1s)6s6p$ $5d^{10}(1s)6s7s$	$3p^{\circ}$ $3s$	1 1	BAL50	FW96
500	5460.735	0.487	44042.977 62350.456	$5d^{10}(1s)6s6p$ $5d^{10}(1s)6s7s$	$3p^{\circ}$ $3s$	2 1	BAL50	FW96
200	10139.76	0.271	54068.781 63928.243	$5d^{10}(1s)6s6p$ $5d^{10}(1s)6s7s$	$1p^{\circ}$ $1s$	1 0	BAL50	FW96

Рис. 3.3: Тут должен быть спектр ПРК, но его надо еще померить

открывалась заслонка и измерялся фототок, чтобы можно было пренебречь изменениями в индии.

3.3 LabView-программа измерений

А что тут должно быть? Просто screenshot с программой для измерений? А кому тогда нужно на это смотреть? Особенно если писали ее в основном вы.

3.4 Обработка результатов

Тот же вопрос. Тем более, что обрабатывались они по-разному. И тоже по большей части вами. А пример обработки - это куча-куча цифр из файла, программа и картинка? И зачем?

3.5 Результаты измерений при различных условиях

3.5.1 В вакууме

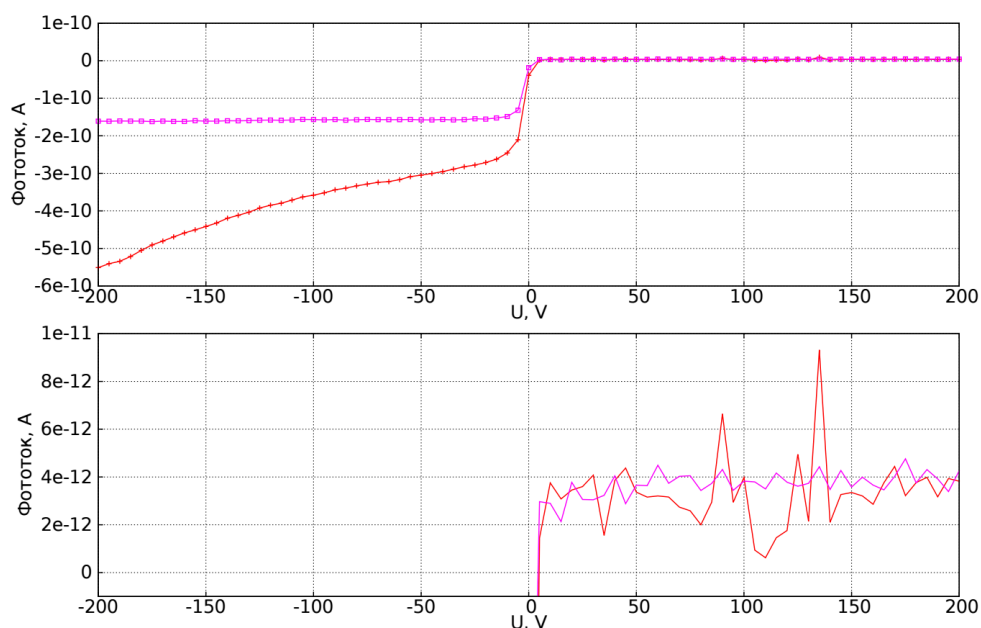


Рис. 3.5: Вольт-амперная характеристика фотоэмиттера при откачке форвакуумным насосом

Две разные кривые соответствуют первому (красная) и второму проходу по напряжению. Видно, что при втором проходе вольт-амперная характеристика оказывается ровно такой, как можно ожидать из теории. Уменьшение тока при втором проходе соответствует процессу установления, который происходит при воздействии ультрафиолета на поверхность индия.

Ненулевой фототок при положительных напряжениях, видимо, соответствует фотоэмиссии из никелевой сетки (работа выхода никеля - 4,5 эВ). Значение тока насыщения позволяет определить эффективный световой поток, который оказывается равным **тут надо вытащить значение из графика и посчитать, но нужно это сделать.**

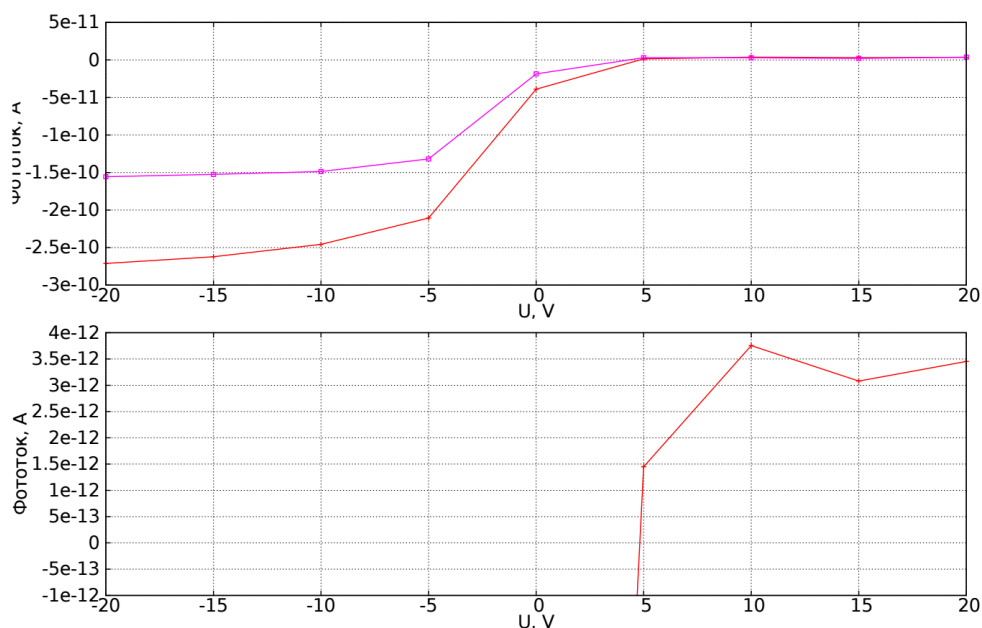


Рис. 3.6: Вольт-амперная характеристика для малых напряжениях. Я померила заново 16 числа, но надо вставить новый график

Характеристика фотоэмиттера при малых напряжениях, измеренная с малым шагом по напряжению, позволяет определить работу выхода для индия именно в данной конфигурации. Которая равна - **вытащить из этого графика**. Табличное значение работы выхода индия - 3.8 эВ.

3.5.2 В газообразном гелии

В отличие от вакуума, в газе фототок не выходит на насыщение, а экспоненциально растет, причем при обеих полярностях (но при положительных напряжениях коэффициент при экспоненте значительно меньше), что так же соответствует выбиванию фотоэлектронов как из индия, так и из сетки.

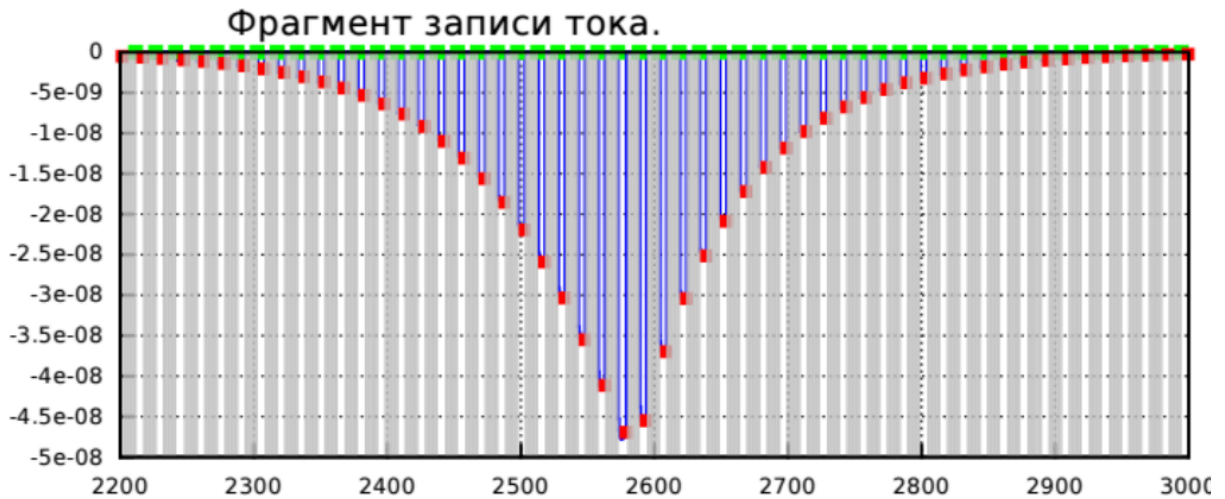


Рис. 3.7: Тут должна быть характеристика, которая экспонента, желательно при обеих полярностях

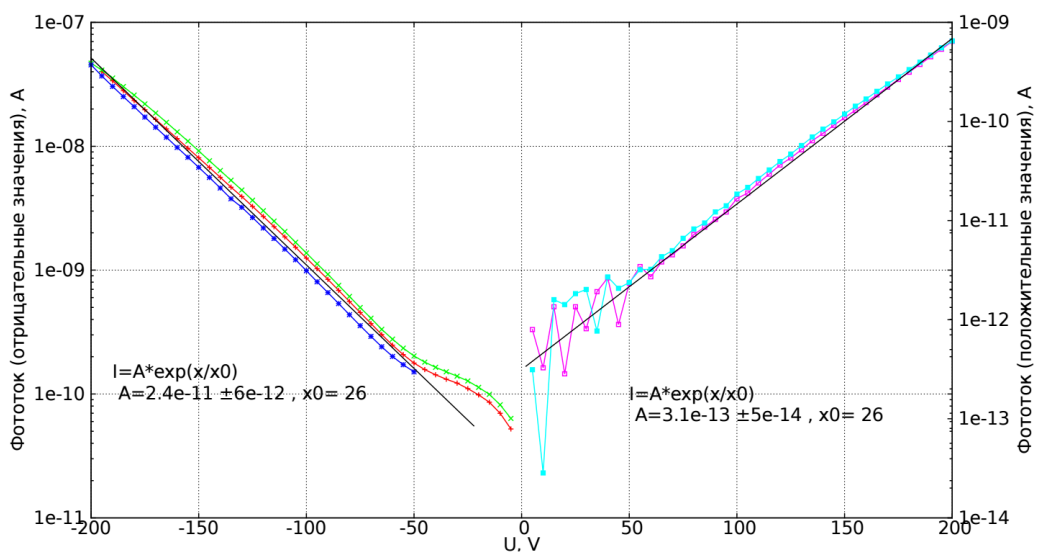


Рис. 3.8: Вольт-амперная характеристика фотоэмиттера в атмосфере гелия в логарифмических координатах

Экспоненциальный вид роста объясняется тем, что когда электроны в электрическом поле получают энергию, достаточную для ионизации атомов гелия, ток увеличивается за счет электронов, выбитых в резуль-

тате ионизации.

На рисунке 3.8 та же вольт-амперная характеристика перестроена в логарифмических координатах, что подтверждает не только экспоненциальный характер зависимости фототока от напряжения, но и равенство "энергий ионизации что подтверждает ионизационную теорию.

Кроме того, экспериментально полученная энергия ионизации равна 26 эВ, что хорошо соотносится с теоретическим значением в 24.5 эВ.

3.5.3 В сверхтекучем гелии

Нужно отметить, что при измерениях в нормальном гелии из-за его кипения шум слишком велик, поэтому все измерения проводились только в сверхтекучем гелии.

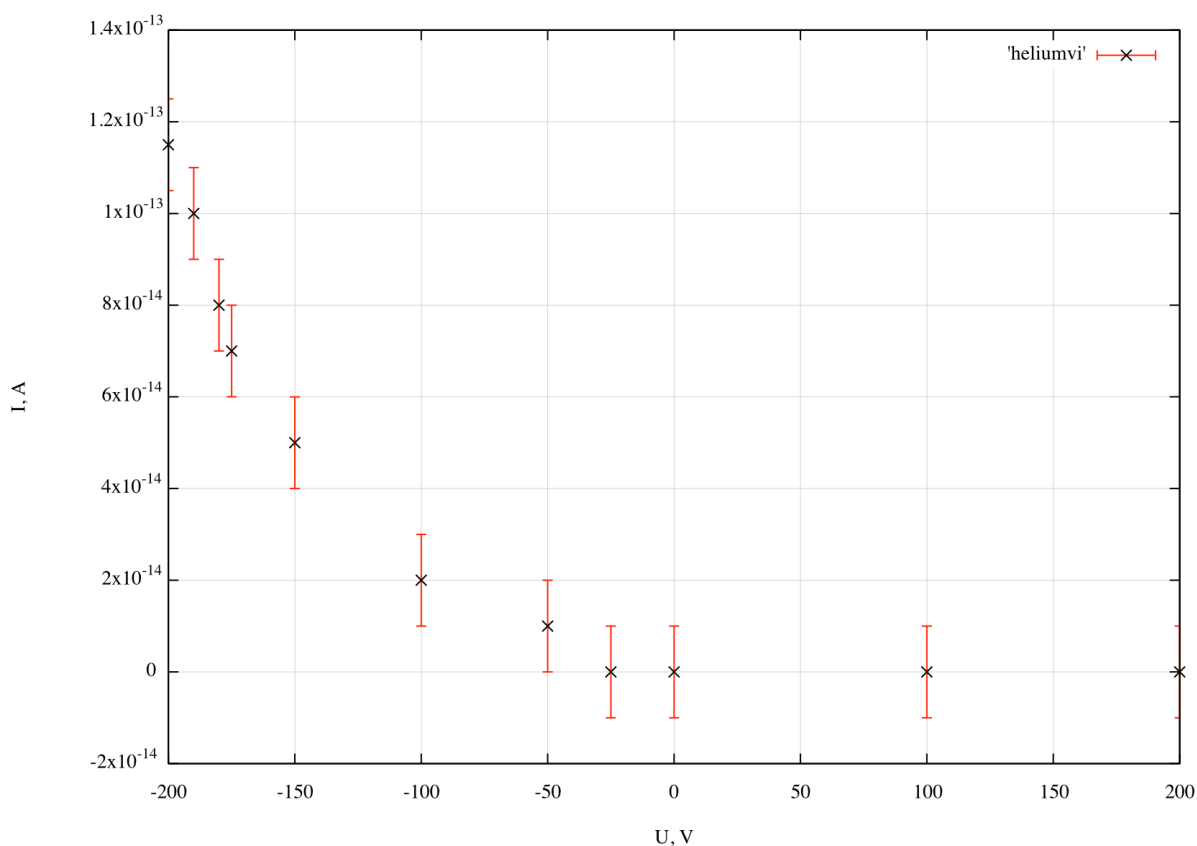


Рис. 3.9: Вольт-амперная характеристика фотоэмиттера в сверхтекучем гелии

Заметим, что экспоненциальный вид зависимости говорит о наличии активационного процесса (случайная зависимость подвижности от напряжения не может быть экспоненциальной в таких широких пределах, а при отсутствии сохранения числа зарядов, вычислить подвижность невозможно), поэтому единственная величина, о которой имеет смысл

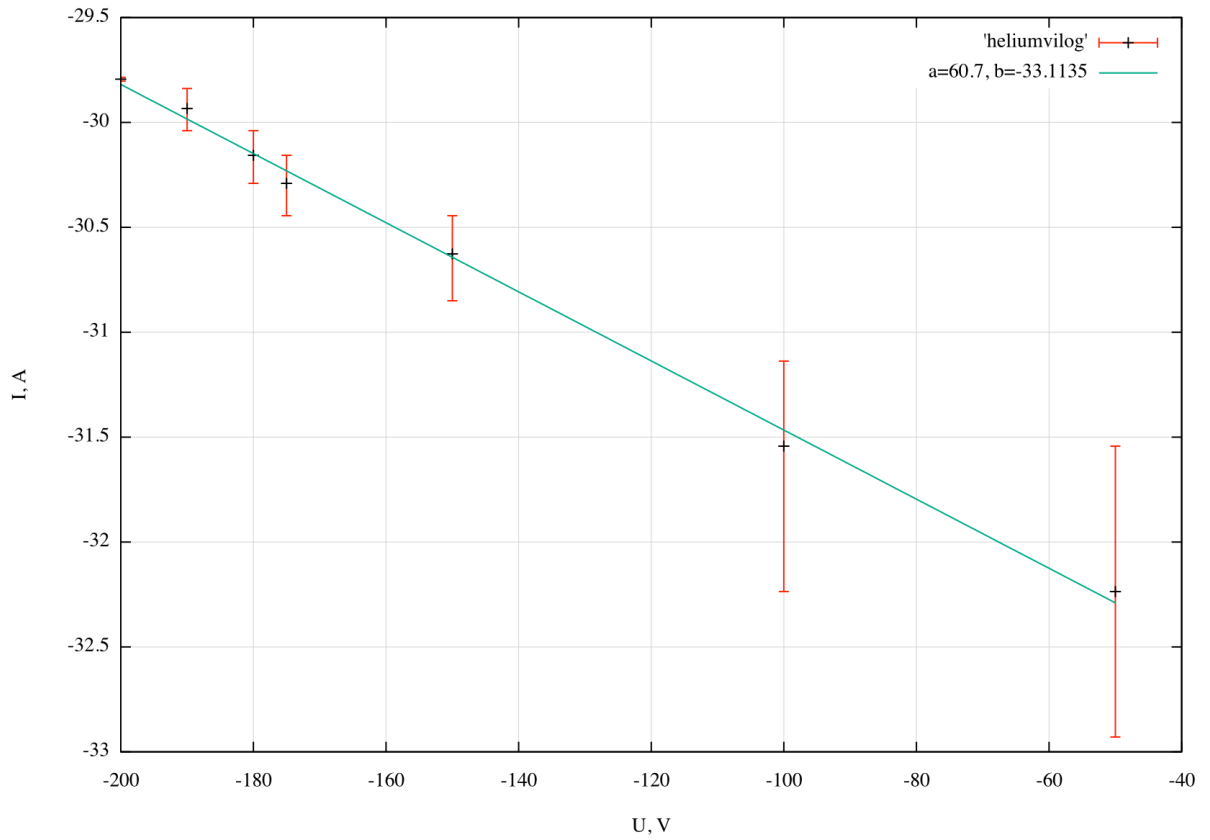


Рис. 3.10: Вольт-амперная характеристика фотоэммитера в сверхтекучем гелии в логарифмических координатах

говорить в данном эксперименте - это энергия активации, равная 60эВ, то есть примерно в два раза больше энергии ионизации атома гелия.

Глава 4

Заключение

Как нормальные люди делают нормальные ссылки?

Литература

- [1] S. Shankar, G. Sabouret, and S. A. Lyon, *A low power photoemission source for electrons on liquid helium*, Dept. of Electrical Engineering, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA, 2010
- [2] Michael A. Woolf, G. W. Hayfield, *Energy of negative ions in liquid helium by photoelectric injection*, July 1965
- [3] Irving Langmuir, *The effect of space charge and initial velocities on the potential distribution and thermionic current between parallel plane electrodes*, 1923
- [4] Shengyi Liu and Roger A. Dougal, *Initial velocity effect on spacecharge limited currents*
- [5] Kitajima, M.; Shigemura, K.; Hosaka, K.; Odagiri, T.; Hoshino, M. and Tanaka, H. *Total cross sections for electron scattering from noble-gas atoms in near- and below- thermal energy collisions*, Journal of Physics Conference Series, 2015, 635, 012030
- [6] W. Wei, Z. Xie, L.N. Cooper, G.M. Seidel, H.J. Maris, *Study of exotic ions in superfluid helium*
- [7] A.F.G. Wyatt, *Modelling photoelectron currents through gases*, 2007
- [8] J.J. Thomson, *Conduction of electricity through gases*