

Министерство образования и науки Российской Федерации  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(государственный университет)  
ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИИ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи  
УДК 53.043

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА НА РЕЗОНАНСНОЕ  
ТУННЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Магистерская диссертация

Направление подготовки 010900 «Прикладные математика и физика»

Магистерская программа 010943 «Физика и технология нанoeлектронных приборов»

Заведующий кафедрой, чл.-корр. РАН:

Аристов В. В.

Научный руководитель, к.ф.-м.н.,

Попов В. Г.

Студент

Мирхайдаров Б. М.

г. Черноголовка

2011

Содержание

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Введение.....</b>                                     | <b>3</b>  |
| 1.1. Актуальность и цель работы.....                        | 3         |
| 1.2. Литературный обзор.....                                | 4         |
| <br>                                                        |           |
| <b>2. Постановка эксперимента.....</b>                      | <b>11</b> |
| 2.1. Описание технологии и параметров образцов.....         | 11        |
| 2.2. Схема установки.....                                   | 13        |
| 2.3. Калибровка терморезистора.....                         | 16        |
| <br>                                                        |           |
| <b>3. Экспериментальные результаты и их обсуждения.....</b> | <b>17</b> |
| 3.1. Сравнение экспериментальных данных.....                | 17        |
| 3.2. Обсуждения результатов.....                            | 27        |
| 3.3. Зависимость сопротивления спейсера от температуры..... | 30        |
| <br>                                                        |           |
| <b>4. Заключение.....</b>                                   | <b>32</b> |
| <br>                                                        |           |
| <b>5. Выводы.....</b>                                       | <b>33</b> |
| <br>                                                        |           |
| <b>Список литературы.....</b>                               | <b>35</b> |

# 1. Введение.

## 1.1. Актуальность и цель работы.

Научные исследования и технические разработки, посвященные быстродействующим электронным приборам, принцип работы которых основан на туннелировании поперек квантово-размерных слоев, не перестают быть актуальными уже более 20 лет. Для создания таких приборов нужно уметь получать тонкие и качественные полупроводниковые пленки. Молекулярно-лучевая эпитаксия, достигшая высокого уровня развития в наши дни, позволяет получать многослойные тонкопленочные структуры.

Быстродействие приборов основано на туннелировании электронов сквозь тонкие потенциальные барьеры и их взаимодействия с энергетическими уровнями размерного квантования в потенциальных ямах, разделяющих барьеры. Одной разновидностью таких приборов, является резонансно-туннельный диод (РТД) на основе двухбарьерной гетероструктуры ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ). Если энергия электронов, налетающих на двухбарьерную структуру, совпадает с энергией одного из энергетических уровней в яме, образованной барьерами, то их поток на выходе принимает максимальное значение. Происходит так называемое резонансное туннелирование. Благодаря этому, вольт-амперная характеристика РТД имеет последовательность пиков (их количество зависит от количества уровней в потенциальной яме) на фоне нерезонансного тока. Та часть пика, где ток падает с ростом напряжения, называется областью отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС). Но форма резонансного пика часто бывает искажена, а именно, происходит наклон пика. Этот наклон на ВАХ мы можем обнаружить в виде гистерезиса при развертке по возрастающему и убывающему напряжению. Такое поведение ВАХ может быть вызвано эффектом последовательного сопротивления, из-за

вспомогательных слоев в структуре, или эффектом накопления заряда в потенциальной яме образованной барьерами. Таким образом, два этих эффекта сложно различить.

Цель данной работы заключается в том, чтобы отличить эффект последовательного сопротивления от эффекта накопления заряда, при помощи анализа ВАХ при различных температурах в широком диапазоне от температуры жидкого гелия до комнатной температуры.

## 1.2. Литературный обзор.

Туннелирование является одним из самых ярких квантовых явлений в физике. В полупроводниках его первым наблюдал Эсаки (Esaki) [1] в 1958 году. С тех пор туннелирование стало предметом исследования для многих направлений в физике твердого тела.

В 1960х годах для физиков всего мира были интересны тонкопленочные транзисторы. Над численными квантово-механическими расчетами структур из систем барьеров работал Иогансен [2,3]. В работах Иогансена впервые появился такой термин, как *резонансное туннелирование*. Необходимо отметить, что этот термин со времен Иогансена разделился на два понятия: *резонансное когерентное* и *резонансное последовательное туннелирование*.

В модели когерентного туннелирования РТД рассматривается как резонатор Фабри-Перо [2,3] для волновой функции электрона, причем ток определяется туннельной прозрачностью двухбарьерной структуры и энергией электрона, налетающего на систему барьеров, что успешно наблюдалось в первой экспериментальной работе [4].

Модель последовательного туннелирования впервые предложил Лурьи (S. Luryi) в работе [5]. В этой модели электрон сначала туннелирует через

барьер эмиттера в яму, образованную двумя барьерами, а уже из нее он туннелирует через барьер коллектора. Эта модель имеет место в образцах, где происходит сбой фазы волновой функции электрона в яме, т. е. некогерентность. Сам сбой фазы вызывают разного вида неупругие рассеяния, время взаимодействия которых меньше времени жизни электрона в яме.

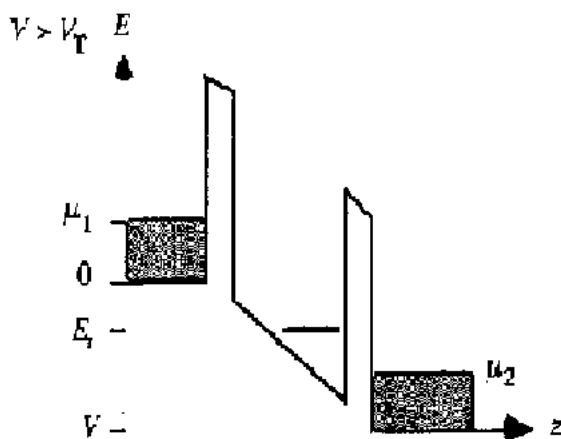
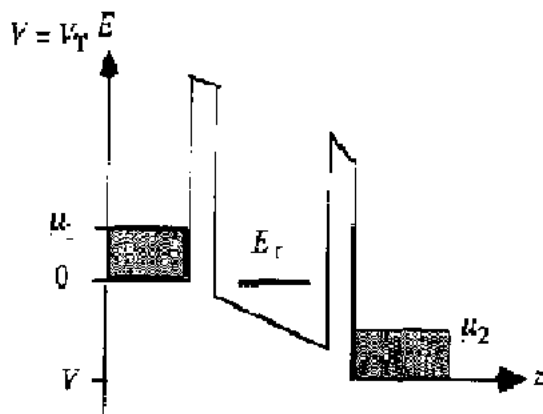
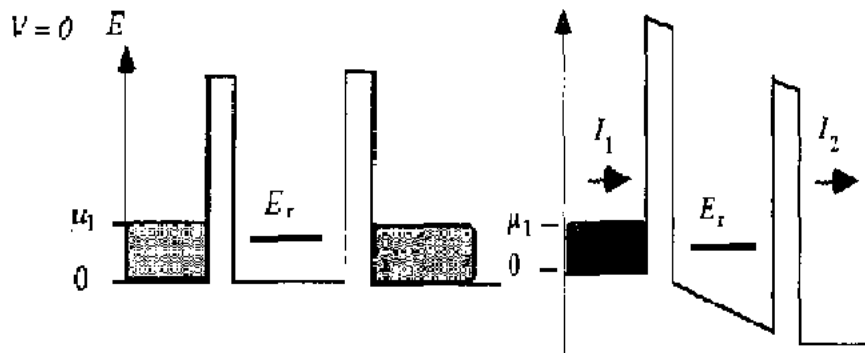


Рис. 1Л.

Самое удивительное, что выражение для тока в обеих моделях одинаковое при постоянном напряжении, т.е. сбой фазы во время туннелирования не вносит большого вклада [6,7]. Для большей наглядности, мы приведем тут упрощенные аналитические выражения показывающие это.

На рисунке 1Л схематично изображена система из двух барьеров. Начнем мы с описания когерентной модели туннелирования. Напишем из общих соображений выражение для тока следующим образом:  $I = \frac{2e}{h} \int \bar{T}(E)[f_1(E) - f_2(E)]dE$ , где  $f(E)$  - функция распределения Ферми,  $\bar{T}(E)$  - туннельная прозрачность системы,  $h$  - постоянная Планка и  $e$  - заряд электрона. Туннельную прозрачность удобнее считать в лоренцевском приближении как:

$$\bar{T}(E) = \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2} \sum_m A(E - E_m),$$

где  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  (если их поделить на  $h$ ) являются

скоростями туннелирования из ямы в зоны 1 и 2 соответственно, а именно  $\Gamma_1 = \frac{dE}{dk} T_1$ ,  $\Gamma_2 = \frac{dE}{dk} T_2$ .  $A(E - E_m)$  - спектральная функция. Подставим выражение для туннельной прозрачности в выражение для тока, причем пределы интегрирования будут от  $E_m$  до  $\mu_1$ . Более того будем считать, что температура достаточно низка, чтобы распределение Ферми приняло ступенчатый вид. Тогда выражение для  $m$ -й моды будет следующим:

$$I_m = \frac{2e}{h} \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2} \int_{E_m}^{\mu_1} A(E - E_m) dE.$$

Если не нулевые крылья спектральной функции

полностью попадают в область от  $E_m$  до  $\mu_1$ , и если учесть что по всем энергиями она нормирована на  $2\pi$ , то максимальное значение тока для одиночной рассматриваемой моды примет выражение:  $I_p = \frac{2e}{h} \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2}$ . (\*)

Теперь давайте рассмотрим модель последовательного туннелирования. Для этого надо воспользоваться уравнением баланса токов,

поскольку в этой модели происходит туннелирование через барьеры по очереди независимым образом.

$$I_1 = 2e \frac{\Gamma_1}{h} [f_1(1-f_r) - f_r(1-f_1)], \quad I_2 = 2e \frac{\Gamma_2}{h} [f_2(1-f_r) - f_r(1-f_2)], \quad \text{где } f_r - \text{ вероятность}$$

заполнения уровня в яме. Как и в предыдущем рассмотрении будем считать, что температура низкая, а приложенное напряжение смещения велико, тогда можно принять, что  $f_1 = 1$ , а  $f_2 = 0$ . С учетом закона сохранения тока

получаем, что  $f_r = \frac{\Gamma_1}{\Gamma_1 + \Gamma_2}$ . Таким образом, мы получаем такое же выражение

для тока, как и в выражении (\*), в когерентной модели туннелирования:

$$I_p = \frac{2e}{h} \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2}. \quad (**)$$

Однако, при последовательном туннелировании происходит накопление заряда в яме, что приводит к наклону пика на вольт-амперной характеристике, что было показано в работе [8] на примере асимметричной структуры. Было показано, что в случае, когда барьер эмиттера уже барьера коллектора (обратное подключение) происходит накопление заряда, т.к. вероятность остаться в яме становится больше вероятности выхода из ямы. В случае, когда эмиттер находится на стороне широкого барьера а коллектор рядом с узким барьером (прямое подключение), накопления заряда и соответственно наклона пика не наблюдаются. В этой работе, доказательством того, что наличие гистерезиса не вызвано паразитными генерациями, свойственные многим приборам с отрицательным дифференциальным сопротивлением [9], и последовательным сопротивлением, были данные измерений в магнитном поле перпендикулярном барьерам. Работа [8] интересна тем, что один из исследуемых образцов в данной дипломной работе, был объектом для измерений в этой статье.

Теоретически, накопление заряда было посчитано Шердом и Тумбсом в работе [10]. В модели последовательного туннелирования они решили

кинетические уравнения и учетом сохранения планарной компоненты квазиимпульса для симметричной структуры. Они вывели формулу для максимального заряда, который может накопиться в яме:  $Q_m = \frac{ek_F}{2\pi} \frac{T_e}{T_e + T_c}$ , где  $T_e$  и  $T_c$  туннельные прозрачности эмиттера и коллектора,  $k_F$  - волновой вектор Ферми. Заряд, накопившийся в яме, можно рассчитать через максимальный следующим образом:  $Q = \frac{Q_m e}{2E_F} \frac{V - V_{th}}{1 + \alpha}$ , где  $V_{th}$  - пороговое напряжение,  $\alpha$  - мера электростатического экранирования. Эту мера считается по формуле:  $\alpha = \frac{2b + w + 2\lambda_s}{a_0} \frac{T_e}{T_e + T_c}$ , где  $b$  - ширина барьеров,  $w$  - ширина ямы,  $\lambda_s$  - длина экранирования в  $n^+$ -электродах,  $a_0$  - борковский радиус. В этой работе было показано, что наклон пика, который вызывает бистабильность (гистерезис), равен величине  $2\alpha E_F = Q/C$ , если представить пик в осях плотности тока против энергии в электрон-вольтах. То есть, по ширине гистерезиса, которая соответствует наклону пика, можно определить количество накопленного заряда, что прямо пропорционально отношению туннельной прозрачности эмиттера к сумме туннельных прозрачностей эмиттера и коллектора, а так же зависит от ширин барьеров и ямы.

В работе [11] было описаны измерения кондактанса РТД в магнитных полях. Авторы объяснили осцилляции кондактанса в зависимости от напряжения при постоянном магнитном поле, и на оборот, осцилляции кондактанса в зависимости от магнитного поля при заданных напряжениях. Эти осцилляции наблюдались из-за образования уровней Ландау в сильных магнитных полях, приложенному перпендикулярно барьерам структуры. Так же были приведены оценки накопления заряда, как в яме, так и в эмиттере.

Но в работе [11] не было объяснено дополнительное плато, появляющееся в области отрицательного дифференциального сопротивления, которое приписывали как к накоплению заряда, так и к влиянию паразитных генераций. Однако, в статье [12] было показано, что эта особенность имеет



место только при паразитных генерациях. Устранить их можно подключением либо большой емкости, либо подключением малого резистора параллельно РТД.

Для того чтобы создать хорошие контакты к таким структурам, обычно крайние слои сильно легируются. Таким образом, большая концентрация доноров играет роль рассеивающих примесей. Для того чтобы уменьшить рассеяние на них, обычно добавляется еще один слой, который не легирован. Этот слой называют спейсером, влияние которого на формирование аккумуляционного перед барьерами описано в работе [13].

Влияние на положение токового пика в зависимости от размера спейсеров при неизменных параметрах барьеров и ямы было исследовано в работе [14]. Рассматривались образцы, в которых были одинаковые размеры спейсера в коллекторе, а размеры спейсера в эмиттере менялись. И в этом случае токовый пик смещался в сторону меньших напряжений на ВАХ, причем высота пика значительно уменьшалась. В противоположном случае пик смещался в сторону больших напряжений с небольшим увеличением тока. Также были исследованы вольт-фарадные зависимости. С ростом размера спейсера в эмиттере, при постоянном размере спейсера в коллекторе, емкость уменьшалась. При этом уменьшалось абсолютное значение кондактанса в области ОДП, что делает пик более резким. Смещение пика на вольт-фарадной характеристике имеет такой же характер как смещение пика на ВАХ по напряжению. То же самое можно сказать касательно вольт-фарадных характеристик и зависимости кондактанса от напряжения в противоположном случае.

В работе [15] исследовались спектры туннелирования между двумерными электронными системами при различных температурах. Измерения проводились на трех образцах, каждый из которых представлял собой две квантовые ямы, разделенные туннельным барьером. Технология и более подробное описание аналогичных образцов описано в работе [16]. Два

образца имели приблизительно одинаковую концентрацию электронов в ямах, но у них была разная степень статического беспорядка. Третий образец имел такую же степень беспорядка, как и второй образец, но концентрация электронов была в 2 раза меньше. Всем трем образцам было свойственно уширение токового пика с ростом температуры (от 0.74 К до 10 К) и уменьшение амплитуды. Простые температурные измерения помогли выяснить, что электрон-электронное рассеяние доминирует над электрон-фононным рассеянием при температуре выше 2 К в двумерных системах. Именно благодаря электрон-электронному рассеянию имело место уширение пика, а не благодаря электрон-фононному рассеянию, которое открыло бы новый канал туннелирования, чего не происходило, т.к. амплитуда токового пика уменьшалась. При температуре ниже 2 К параметры пика зависели исключительно от степени беспорядка в образце.

## 2. Постановка эксперимента.

### 2.1. Описание технологии и параметров образцов.

В этой работе исследовалось два образца на основе гетероструктуры типа  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Качество гетероструктуры является одним из самых важных вопросов. На сегодняшний день есть две технологии создания гетероструктур: метод химического осаждения из газовой фазы и молекулярно-пучковая эпитаксия (MBE Molecular Beam Epitaxy).

Молекулярно-пучковая эпитаксия является лучшей технологией для создания гетероструктур наивысшего качества. В данной технологии, в условиях сверхвысокого вакуума ( $10^{-7}$  Торр), реагенты осаждаются на подложку в форме молекулярных пучков, которые создаются путем нагревания исходного материала до испарения в ячейке с очень малым отверстием. Для роста эпитаксиальной пленки обычно на подложку направлено несколько пучков: компоненты образующие материал и легирующие примеси.

Основное требование к материалам для успешного роста гетероструктур с наименьшим количеством дефектов на границе раздела - это малое различие постоянной решетки двух полупроводников, образующих гетеропереход. GaAs и  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  отлично удовлетворяют этому условию. Различие между постоянными решеток менее чем 1%. В зависимости от молярной концентрации алюминия, определяется разрыв дна зоны проводимости.

Один из наших образцов - это РТД с симметричными барьерами, а другой – с асимметричными. На таблицах 1 и 2 расписаны оба образца послойно.

| № слоя                                                      | Концентрация доноров, $n_D, \text{см}^{-3}$ | Состав                                    | Толщина, нм      |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|
| 10                                                          | $2 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$            | GaAs                                      | $0.5 \cdot 10^3$ |
| 9                                                           | $1 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$            | GaAs                                      | 50               |
| 8                                                           | $1 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$            | GaAs                                      | 50               |
| 7                                                           | не легирован                                | GaAs                                      | 3.3              |
| 6                                                           | не легирован                                | $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ | 11.1             |
| 5                                                           | не легирован                                | GaAs                                      | 5.8              |
| 4                                                           | не легирован                                | $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ | 8.3              |
| 3                                                           | не легирован                                | GaAs                                      | 3.3              |
| 2                                                           | $1 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$            | GaAs                                      | 50               |
| 1                                                           | $1 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$            | GaAs                                      | 50               |
| Подложка: $n^+$ -GaAs, $n_D=2 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ |                                             |                                           |                  |

**Таблица 1. Параметры асимметричного РТД.**

| № слоя                                                      | Концентрация доноров, $n_D, \text{см}^{-3}$ | Состав                                    | Толщина, нм      |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|
| 8                                                           | $2 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$            | GaAs                                      | $0.5 \cdot 10^3$ |
| 7                                                           | $2 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$            | GaAs                                      | 50               |
| 6                                                           | не легирован                                | GaAs                                      | 50               |
| 5                                                           | не легирован                                | $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ | 8.0              |
| 4                                                           | не легирован                                | GaAs                                      | 6.0              |
| 3                                                           | не легирован                                | $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ | 8.0              |
| 2                                                           | не легирован                                | GaAs                                      | 50               |
| 1                                                           | $2 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$            | GaAs                                      | 50               |
| Подложка: $n^+$ -GaAs, $n_D=2 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ |                                             |                                           |                  |

**Таблица 2. Параметры симметричного РТД.**

Введем терминологию для асимметричного РТД, которой будем дальше пользоваться. Подключение диода, при котором барьер эмиттера шире барьера коллектора, будем называть прямым. В обратном случае, подключение будем называть обратным. Для симметричного образца введение этих терминов лишено смысла.

## 2.2. Схема установки.

На рисунке 2.2 схемы нашей экспериментальной установки. Источником тока в этой схеме служит цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) использовался в качестве вольтметра. Оба, как ЦАП, так и АЦП давали высокочастотные шумы (выше 0.5 МГц) большой амплитуды. Для устранения этих шумов использовались  $LC$ -фильтр ( $L = 20$  мГн,  $C_2 = 2.1$  мкФ) и  $RC$ -фильтр ( $R_1 = 223$  Ом,  $C_1 = 33$  нФ).  $LC$ -фильтр стоит на выходе первого канала ЦАП. Второй канал ЦАП заземлен. На первом канале АЦП стоит  $RC$ -фильтр, а второй канал заземлен. Уровень шумов в электрической цепи не превышал 1 мВ после установки фильтров.

Последовательно  $LC$ -фильтру подсоединен образец через длинную алюминиевую вставку с проводами внутри. На вставке есть по 12 контактов на каждом конце. Вставка нам нужна для погружения в дьюар с жидким гелием или жидким азотом. Меняя положение вставки с образцом над поверхностью жидкого гелия или жидкого азота можно менять температуру, при которой происходят измерения, в диапазоне от 4.2 К до 300 К. На этой же вставке близко к образцу расположено угольное сопротивление (терморезистор), сопротивление которого очень чувствительно к температуре. Угольное сопротивление подключено к тестеру и не подключено к электрической цепи образца.

Последовательно образцу подсоединено нагрузочное сопротивление  $R_{load}$ , величину которого мы меняли в зависимости от образца и способа его подключения. Падение напряжения на этом нагрузочном сопротивлении измерялось при помощи АЦП. В итоге определялись как ток в цепи  $I$ , так и падение напряжения  $V$  на образце.

Нагрузочное сопротивление  $R_{load}$  при измерении симметричного образца было 0.5 кОм, при измерении асимметричного образца в прямом подключении оно было 22 кОм, а при обратном подключении 2.2 кОм.

Время задержки при измерениях было 100 мкс с усреднением по трем точкам. Данные параметры были неким компромиссом между точностью измерения электрического сигнала и стабильностью температуры во время измерений. Т.к. измерения в основном происходят в парах гелия или азота, время измерения одной ВАХ становится одним из самых важных. За счет дополнительных LC и RC фильтров, которые были описаны выше, эффективное время задержки увеличивается. При малом значении времени задержки происходит смещение точек на ВАХ при возрастающей развертке по напряжению и по отношению к убывающей, в том же диапазоне напряжений. В результате при увеличении времени задержки, приходится уменьшать количество усредняемых точек, для того чтобы уменьшить время измерения ВАХ до среднего времени стабильности температуры. Данные параметры времени задержки и количества усредняемых точек были подобраны эмпирически.

Дьюар состоит из нескольких секций, полостей. Секция с жидким гелием окружена вакуумным пространством. Далее все это окружено секцией с жидким азотом, которая защищена от окружающей среды дополнительной вакуумной секцией. Дьюар с жидким гелием всегда подсоединен к гелиевой сети, за исключением моментов погружения образца в дьюар и его извлечения.

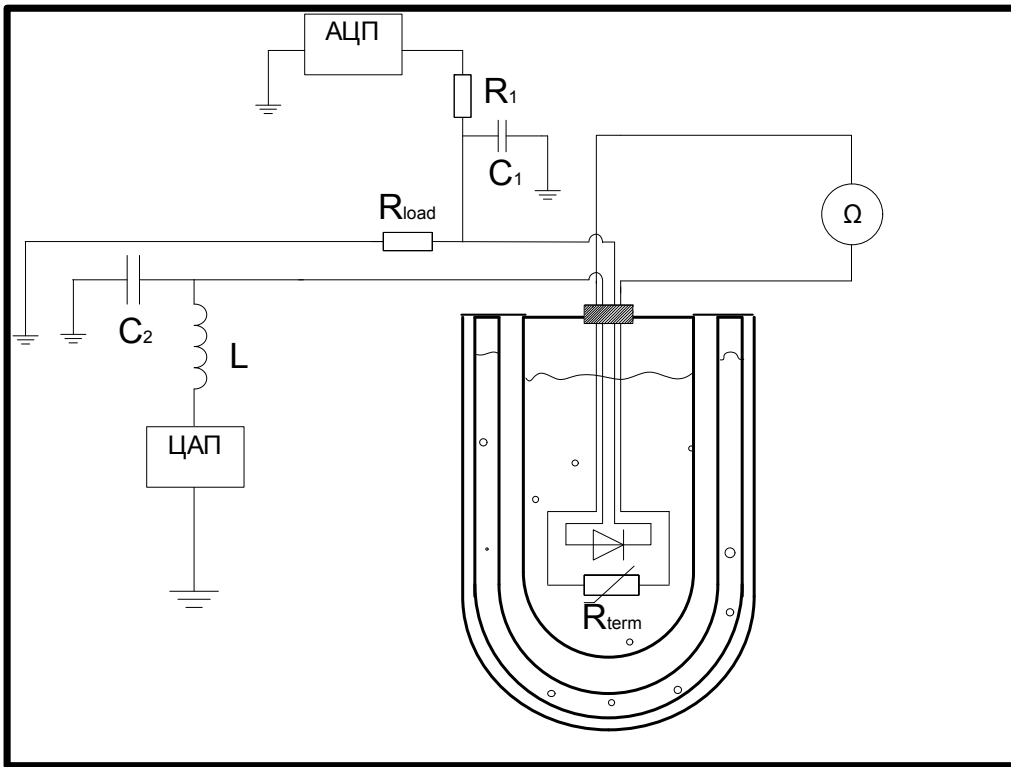


Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки.

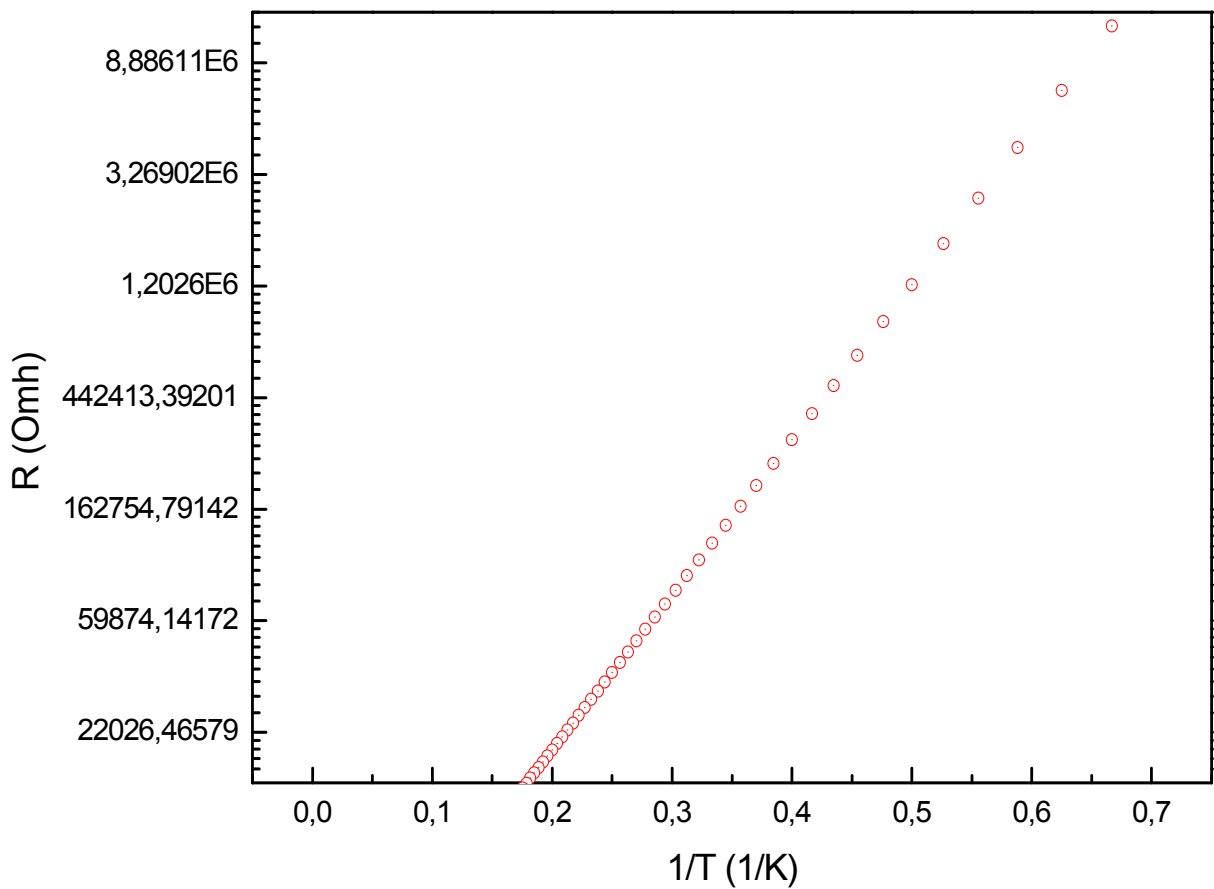


Рис. 2.3 Зависимость сопротивления терморезистора от температуры.

### 2.3. Калибровка терморезистора.

На рисунке 2.3 представлена зависимость сопротивления терморезистора от температуры в логарифмическом масштабе. Как известно, зависимость угольного терморезистора от температуры имеет вид:  $R = R_0 \exp\left(\frac{A}{T} - \frac{B}{T_0}\right)$ , где  $R_0$  - сопротивление при комнатной температуре  $T_0$ ,  $A$  и  $B$ - константы. Калибровка проводилась по трем точкам: сопротивление при температуре жидкого гелия ( $T = 4.2$  К), сопротивление при температуре жидкого азота ( $T = 77.4$  К) и сопротивление при комнатной температуре (на момент калибровки комнатная температура составляла  $T = 296$  К).



### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждения

#### 3.1. Сравнение экспериментальных данных.

В этой части дипломной работы сравним данные полученные с двух образцов в широком диапазоне температур Рассмотрим данные полученные при исследовании симметричного РТД.

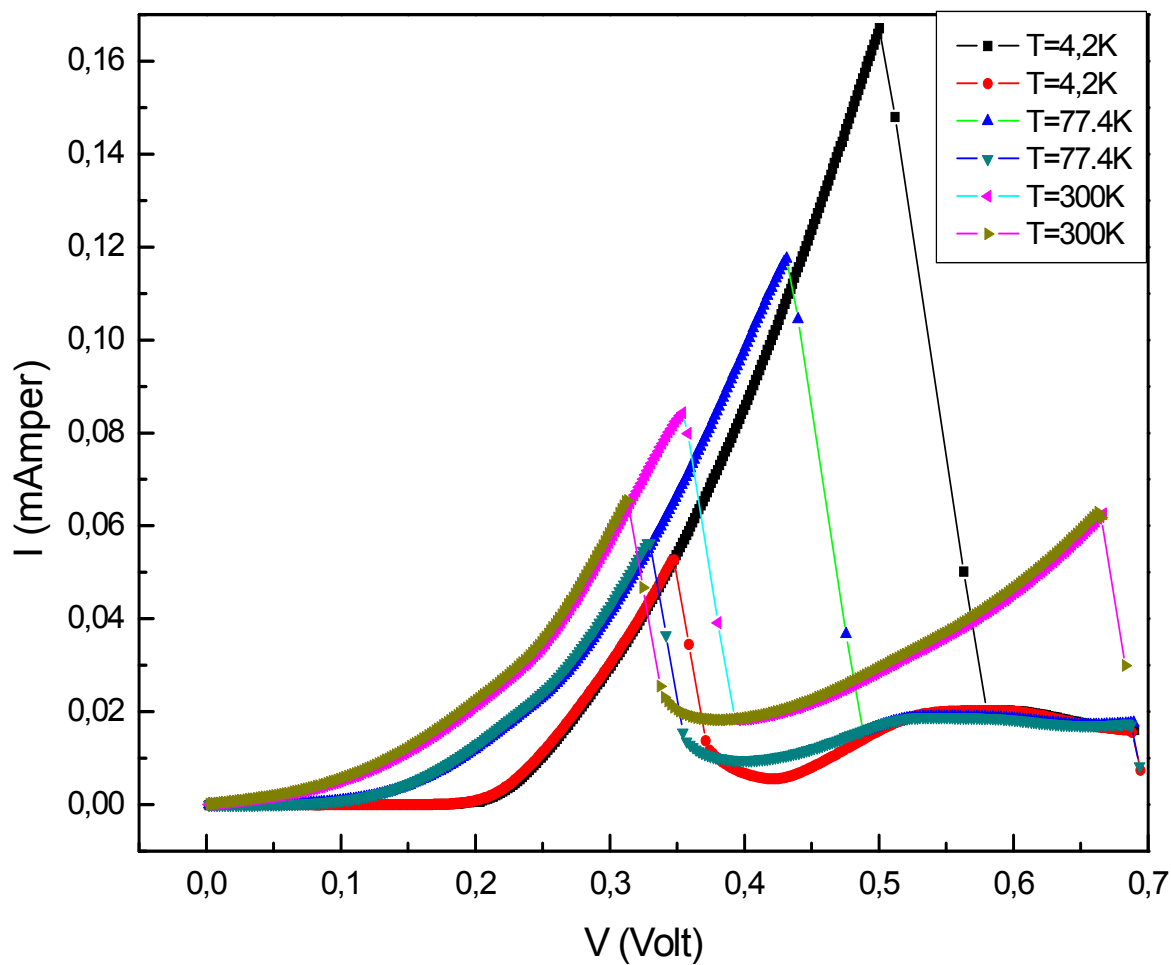
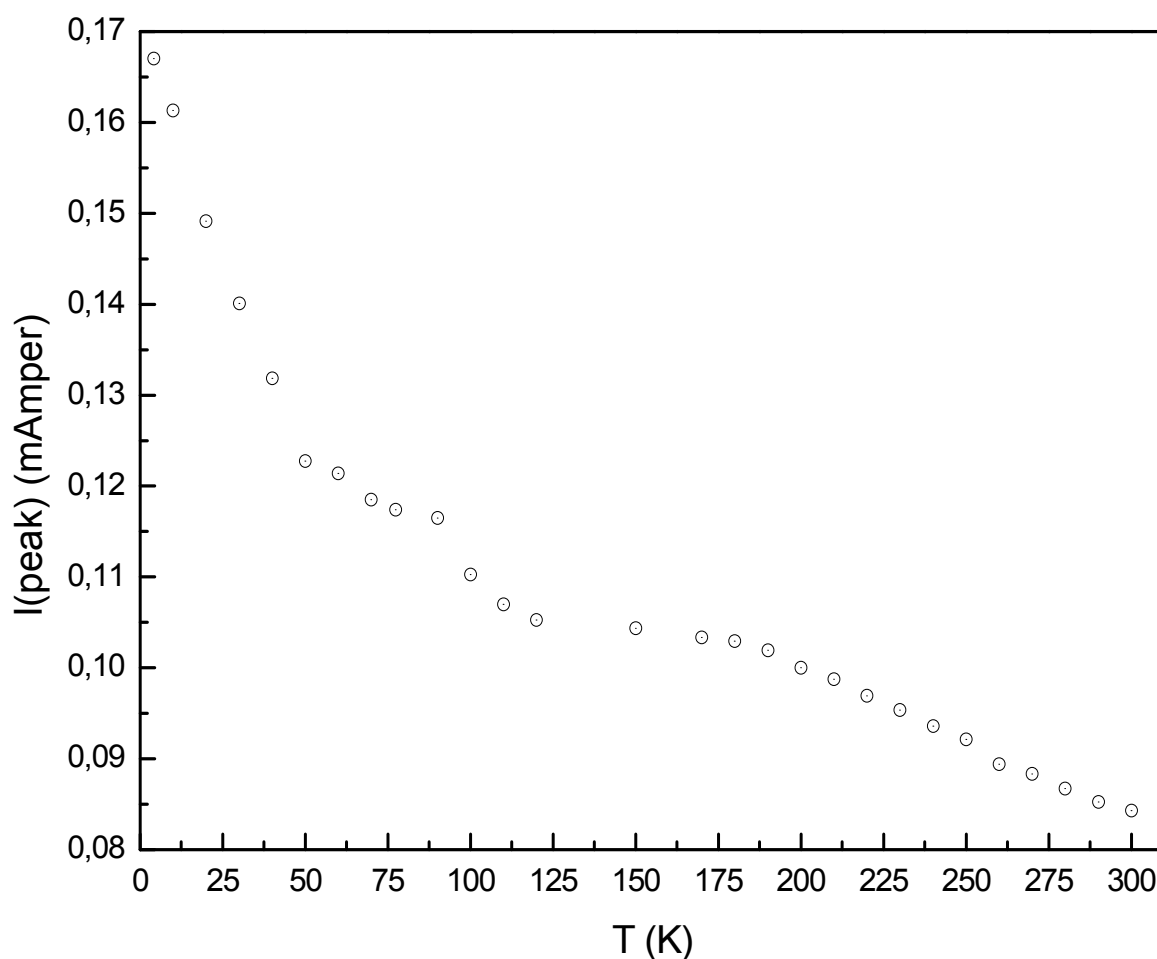
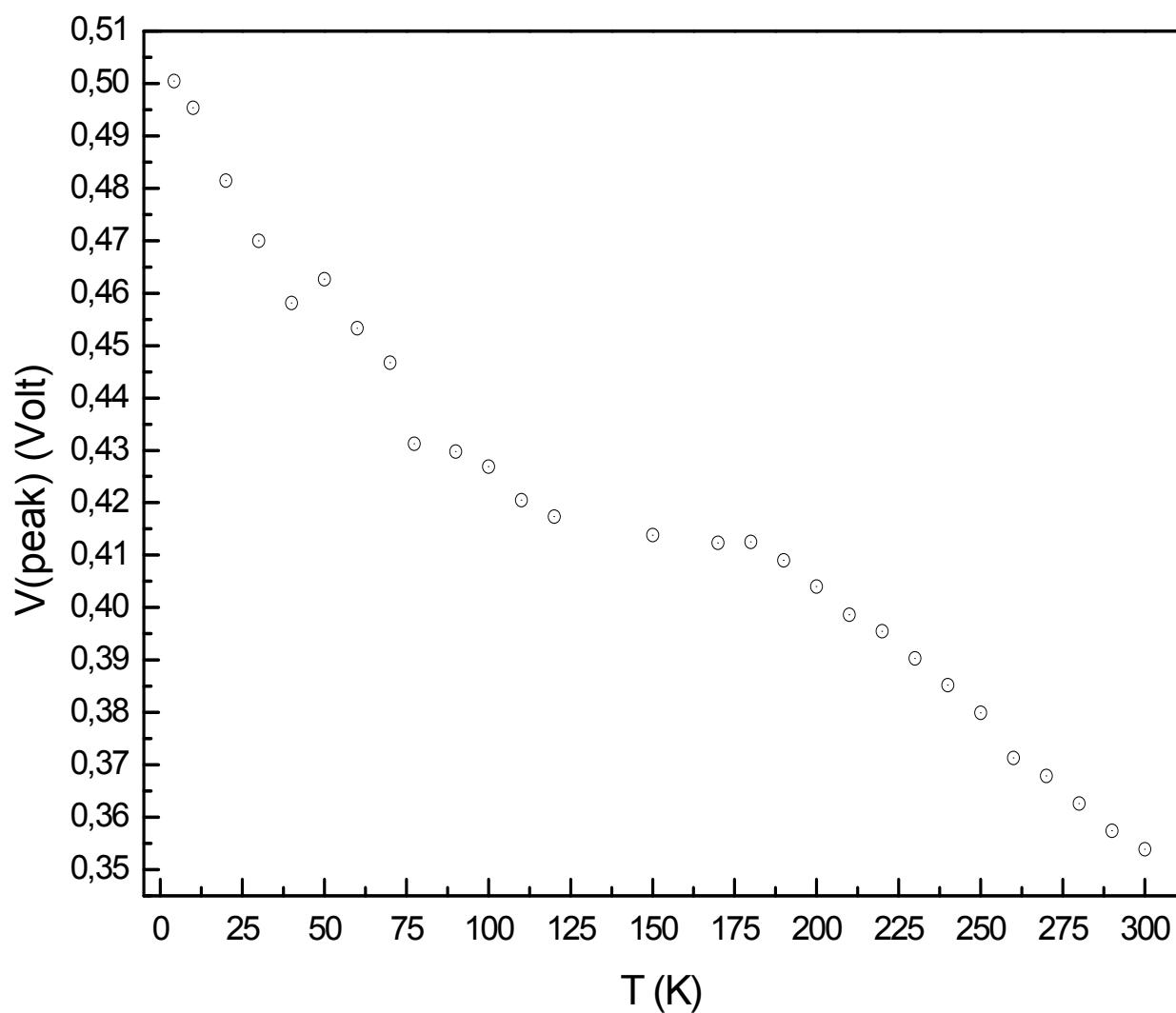


Рис. 3.1. Вольт-амперные характеристики симметричного РТД при T=4.2 К, T=77.4 К и T=300 К.

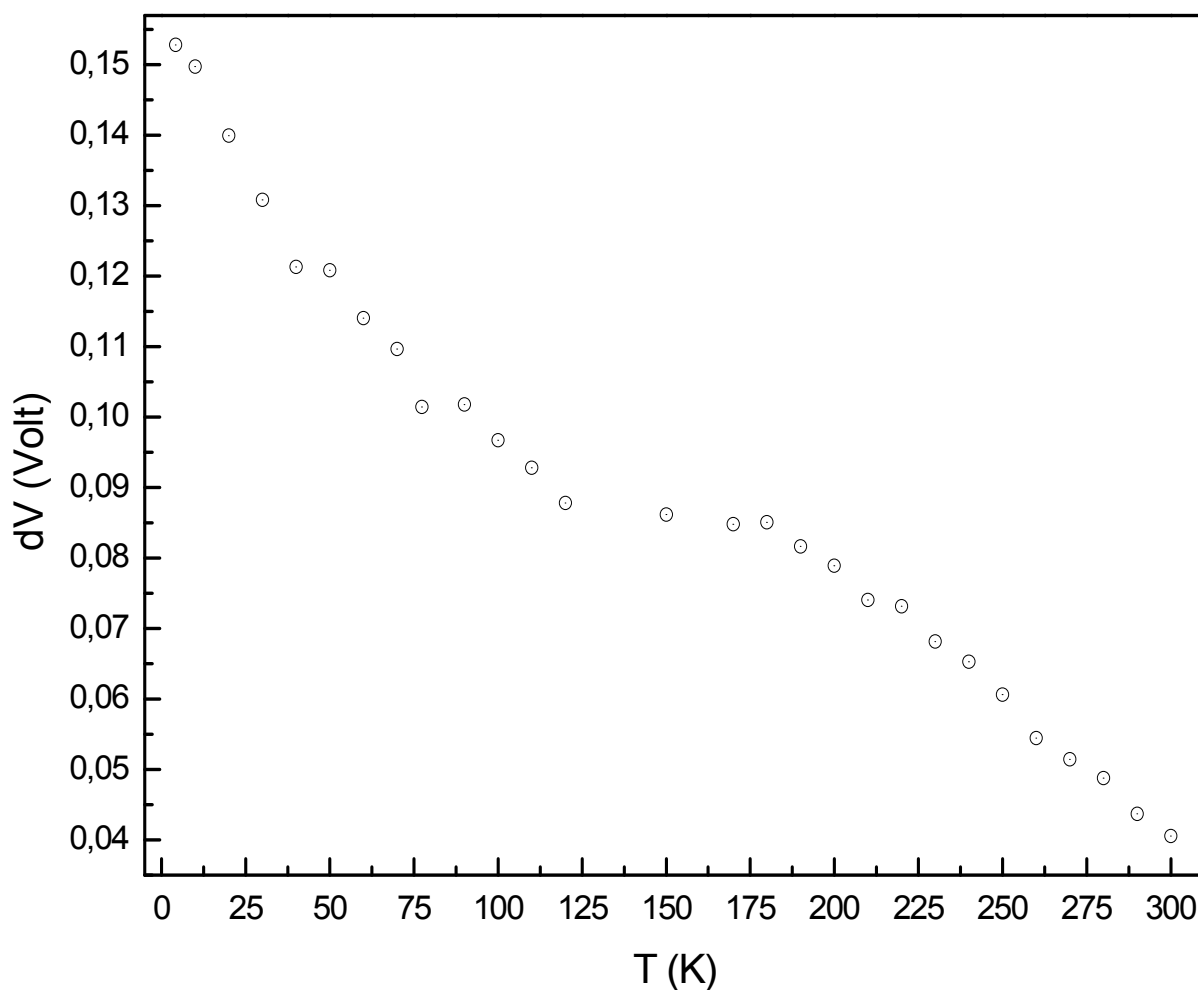
На рисунке 3.1 представлены графики ВАХ при трех температурах:  $T=4.2$  К,  $T=77.4$  К и  $T=300$  К. По наличию гистерезисов можно сделать вывод, что токовый пик наклонен. Причем уменьшение ширины гистерезиса говорит о том, что пик выпрямляется с ростом температуры. При этом сам пик смещается в сторону меньших напряжений с ростом температуры, на фоне падения пикового тока. Более подробную зависимость от температуры этих двух параметров можно увидеть на рисунках 3.2 и 3.3. Зависимость ширины гистерезиса от температуры представлена на рисунке 3.4.



**Рис. 3.2. Зависимость пикового тока от температуры симметричного РТД.**



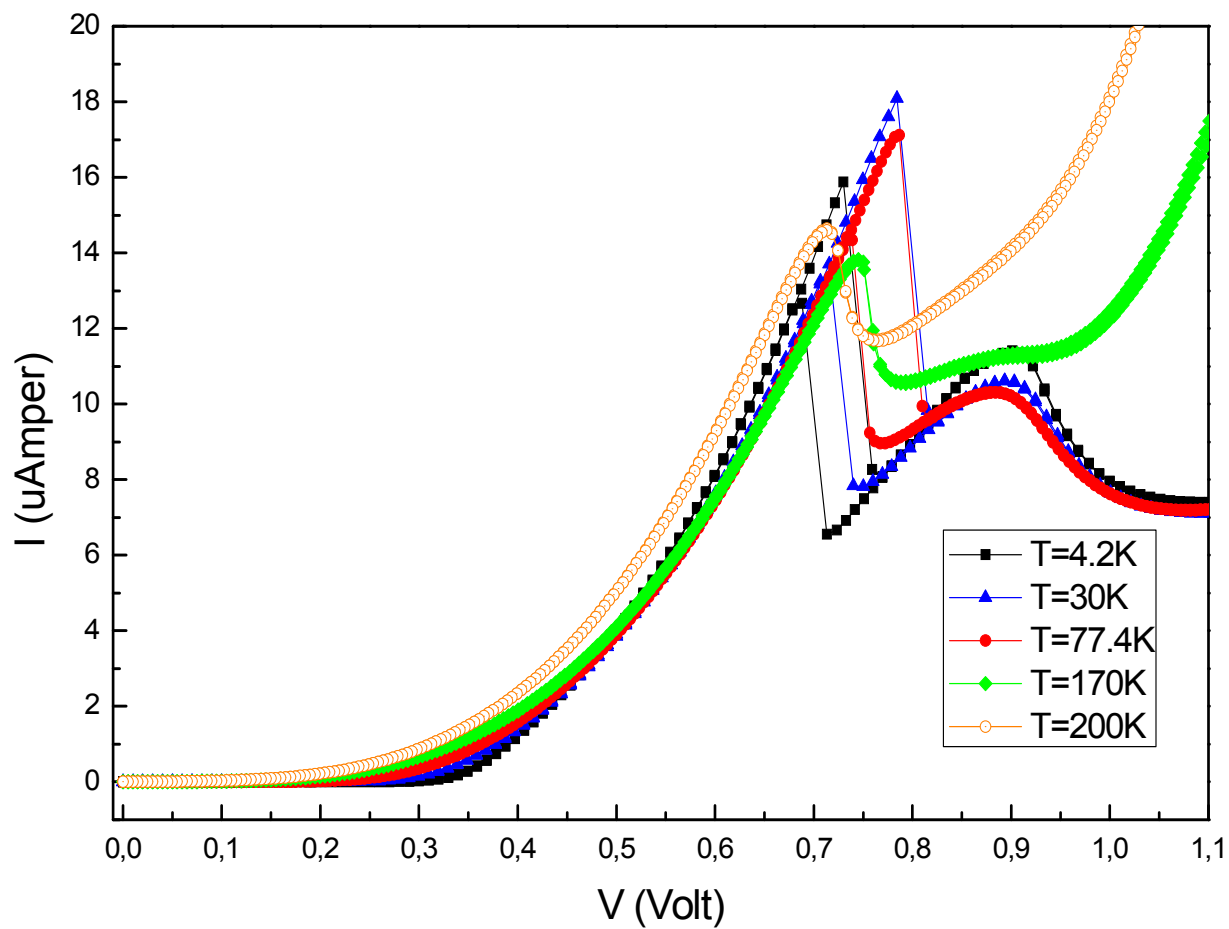
**Рис. 3.3. Зависимость напряжения пика от температуры симметричного РТД.**



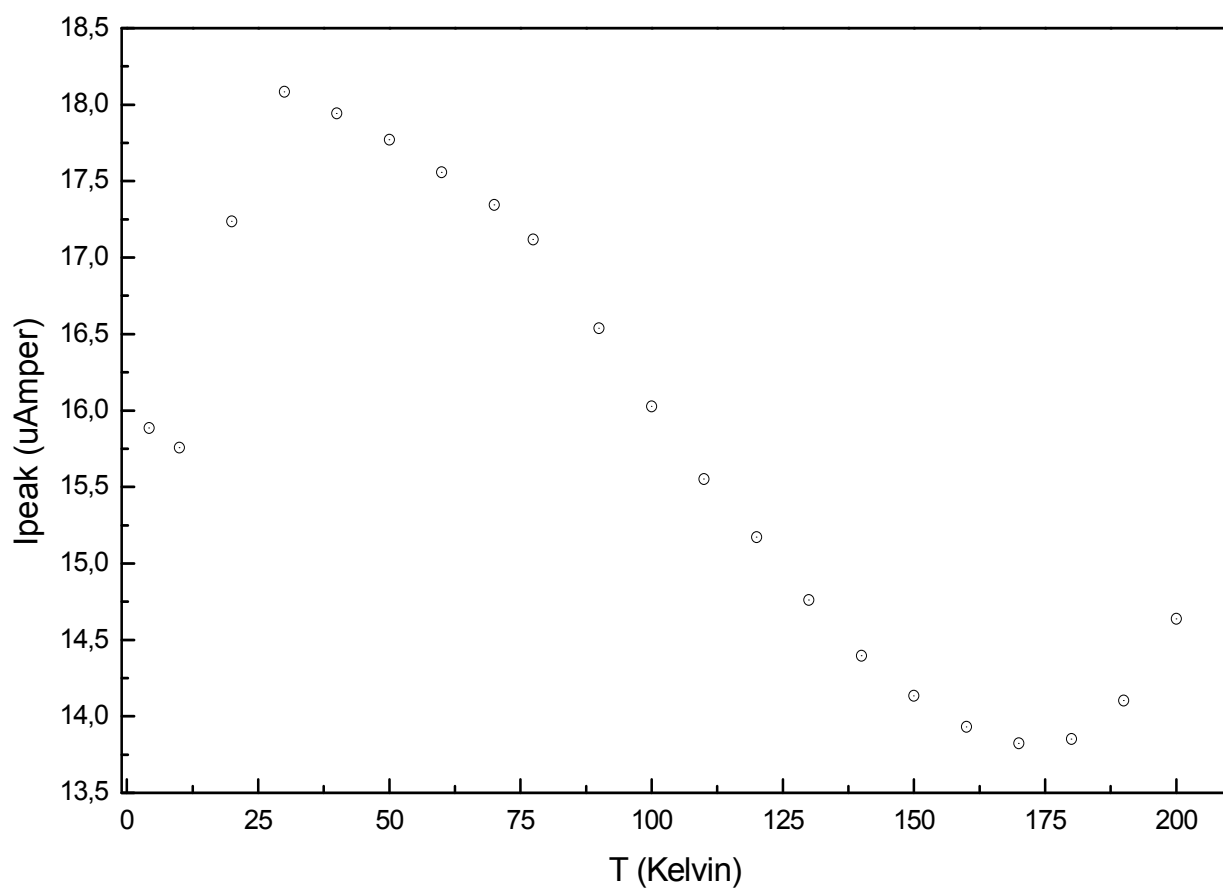
**Рис. 3.4. Зависимость ширины гистерезиса от температуры симметричного РТД.**

Видно, что на рисунках 3.2-3.4 до температуры  $T=180$  К зависимости на этих графиках убывают сильнее, чем при более высоких температурах.

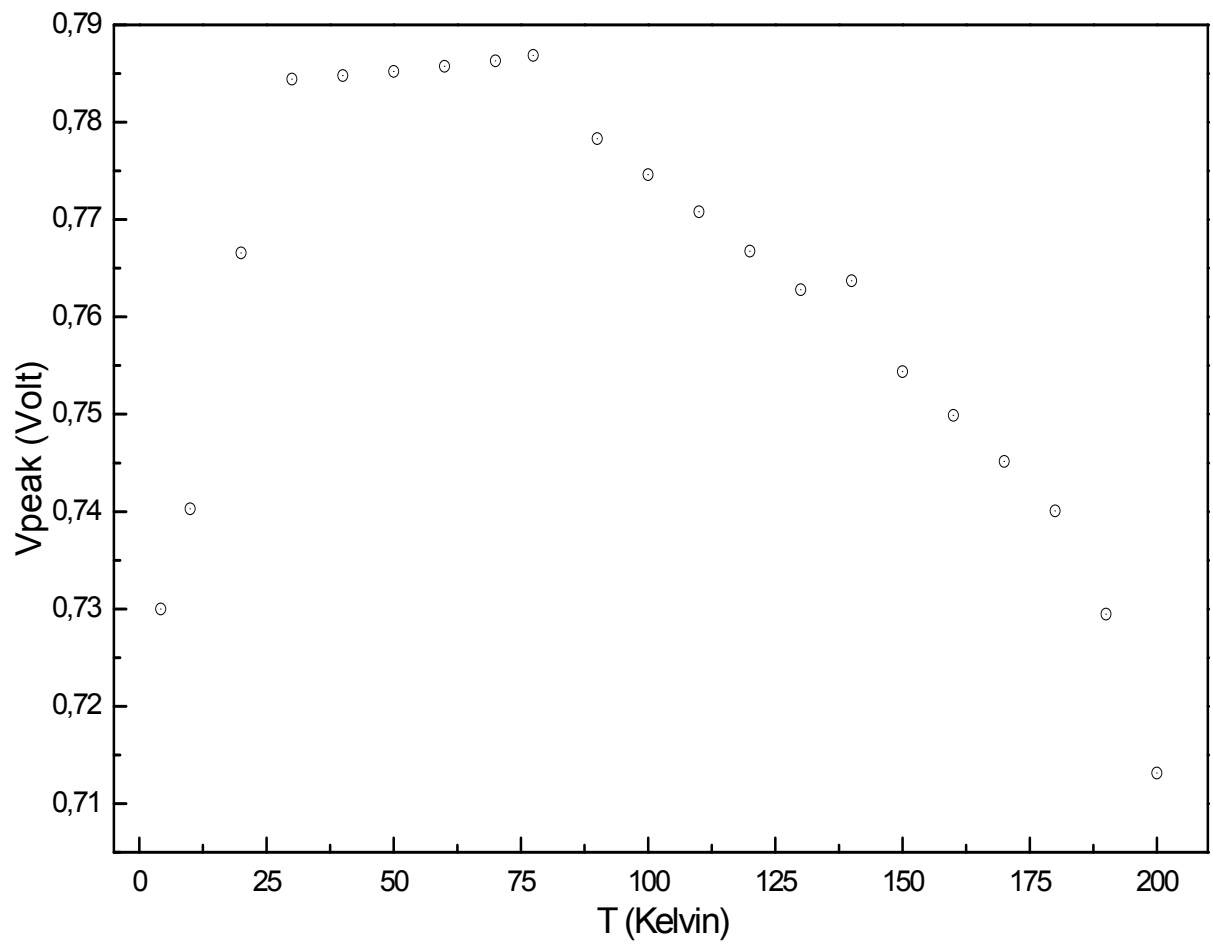
Теперь приступим к описанию данных асимметричного образца в обратном включении. На рисунке 3.5 представлены графики ВАХ при температурах  $T=4.2$  К,  $T=30$  К,  $T=77.4$  К,  $T=170$  К и  $T=200$  К. Видно, что в диапазоне от  $T=4.2$  К до  $T=30$  К увеличиваются пиковый ток, пиковое напряжение и ширина гистерезиса, затем идет спад всех этих трех величин, достигая своего минимума при температуре  $T=170$  К. Причем при  $T=200$  К гистерезис практически исчезает. Более подробное поведение пика описано на рисунках 3.6-3.8.



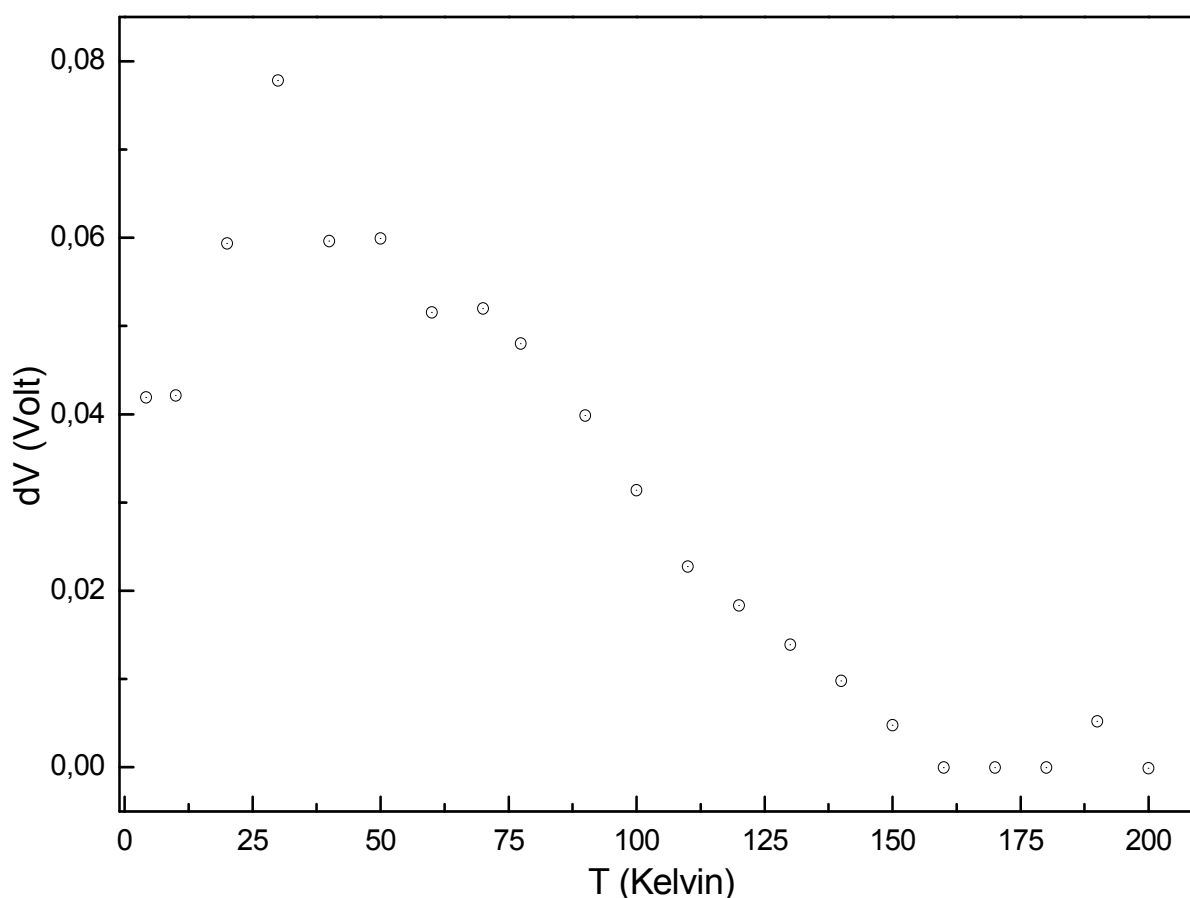
**Рис. 3.5.** Вольт-амперные характеристики асимметричного РТД под обратным включением при  $T=4.2\text{ K}$ ,  $T=30\text{ K}$ ,  $T=77.4\text{ K}$ ,  $T=170\text{ K}$ ,  $T=200\text{ K}$ .



**Рис. 3.6. Зависимость пикового тока от температуры асимметричного РТД при обратном включении.**



**Рис. 3.7. Зависимость пикового напряжения от температуры асимметричного РТД под обратным подключением.**



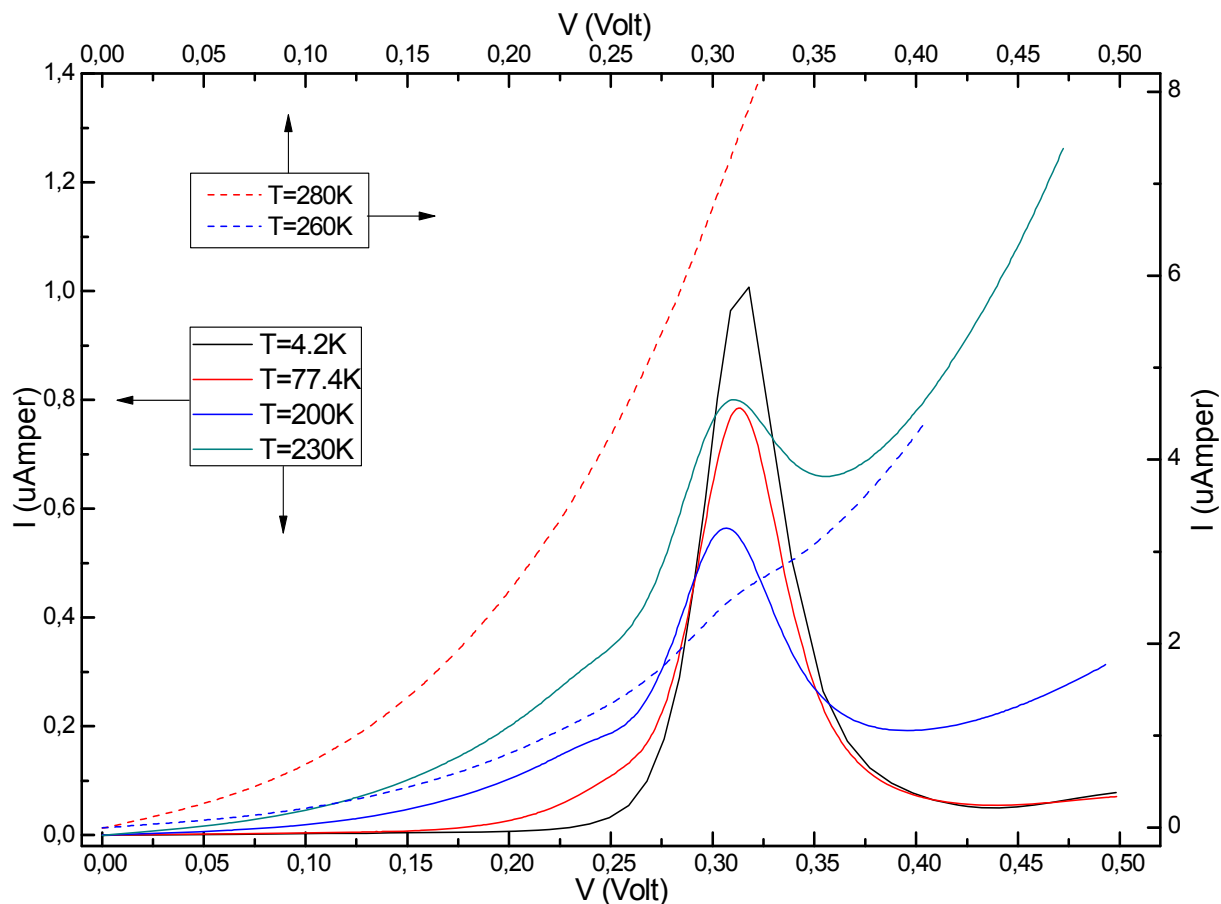
**Рис. 3.8. Зависимость ширины гистерезиса от температуры асимметричного РТД при обратном включении.**

Легко заметить, что зависимости на рисунках 3.6-3.8 отличаются по форме от зависимостей на рисунках 3.2-3.4 сильным возрастанием параметров пика при низких температурах до  $T=30\text{K}$ .

Теперь приступим к описанию данных асимметричного образца в прямом включении. На рисунке 3.9 представлены графики ВАХ при температурах  $T=4.2\text{ K}$ ,  $T=77.4\text{ K}$ ,  $T=200\text{ K}$ ,  $T=230\text{ K}$ ,  $T=260\text{ K}$  и  $T=280\text{ K}$ . Видно, что при этом включении не наблюдается гистерезиса на ВАХ. Форма пика не искажена за счет наклона. Смещение пика по напряжению не столь существенно. При температурах выше  $T=200\text{ K}$  начинает усиливаться нерезонансный ток, на фоне которого резонансный пик уменьшается и

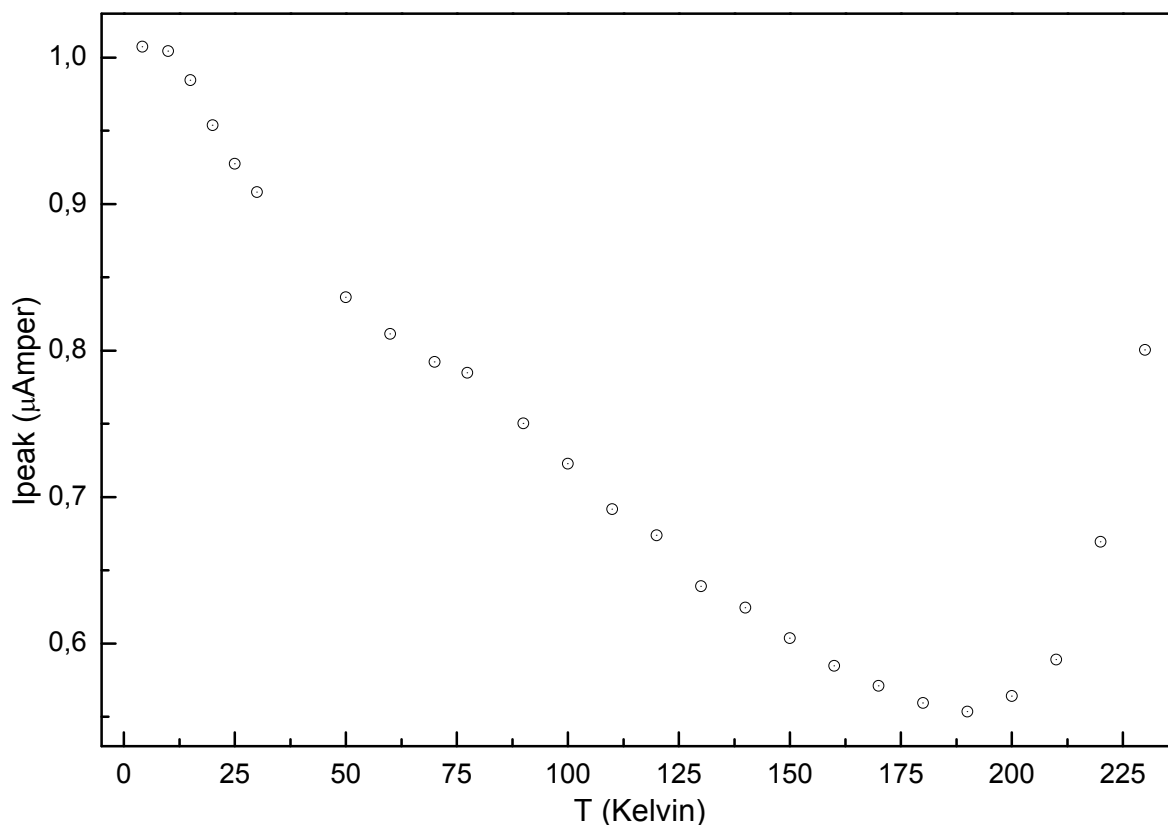


смещается в сторону меньших напряжений. Более подробное поведение пика описано на рисунках 3.10-3.11.



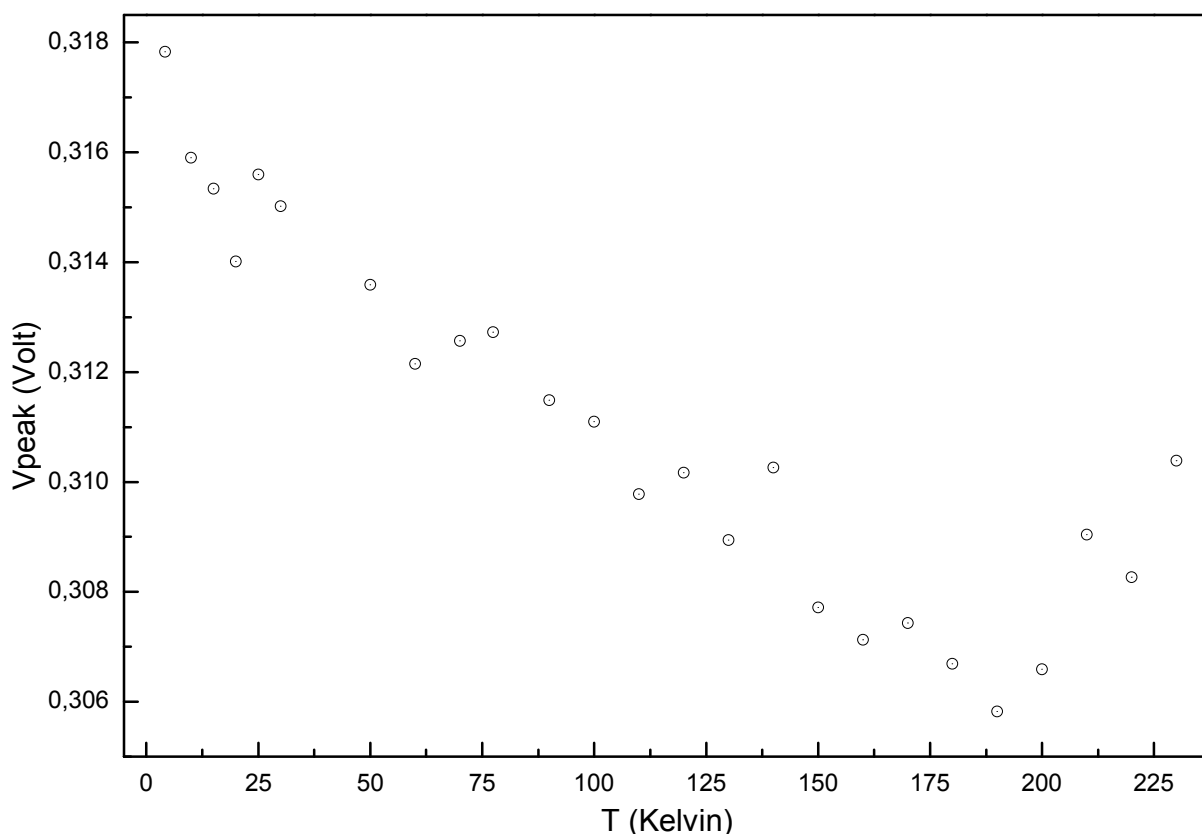
**Рис. 3.9.** Вольт-амперные характеристики асимметричного РТД под прямым включением при  $T=4.2$  К,  $T=77.4$  К,  $T=200$  К,  $T=230$  К,  $T=260$  К,  $T=280$  К.

ВАХи при  $T=260$  К и  $T=280$  К показаны в верхней и правой осях данного графика на рисунке 3.9. ВАХи при остальных температурах показаны в левой и нижней осях.



**Рис. 3.10. Зависимость пикового тока от температуры асимметричного РТД при прямом включении.**

Видно, что в прямом включении не наблюдается сильного роста пикового тока при низких температурах, как это наблюдается при обратном включении. Имеет место сильный рост пикового тока только при температурах выше 200 К благодаря увеличению фонового нерезонансного тока.



**Рис. 3.11. Зависимость пикового напряжения от температуры асимметричного РТД при прямом включении.**

Видно, что пиковое напряжение с температурой падает, не так значительно, как это имело место в симметричном образце и при обратном включении асимметричного образца. При прямом включении разница между наибольшим и наименьшим значениями пикового напряжения является величиной порядка 10 мВ, тогда как в других двух случаях эта разница была порядка 100 мВ. График на рисунке 3.11 немного зашумлен, т.к. шаг по напряжению стал сравним с остаточными шумами, величина которых не превышала 1 мВ.

### **3.2. Обсуждение результатов.**

Рассмотрим симметричный РТД. Наклон пика, который имеется на ВАХ, может быть вызван двумя причинами: накоплением заряда в яме или влиянием последовательного сопротивления спейсера. Однако в литературе

отмечено (например, в работе [7]), что туннельная прозрачность двухбарьерной симметричной системы при энергиях электрона вблизи резонансного уровня равна 1, тогда как для асимметричной системы эта величина всегда меньше единицы. Это означает, что предположение о влиянии последовательного сопротивления спейсера не лишено смысла.

У асимметричного РТД, толщины спейсерных слоев такие же как и у симметричного образца. Причем барьеры в обоих образцах имеют одинаковую высоту. Различия имеются только в ширине барьеров и ширине квантовых ям. Следовательно, если наша гипотеза, связанная с симметричным РТД не верна, и наклон пика происходит из-за накопления заряда в квантовой яме, то температурные зависимости должны отличаться радикальным образом, т.к. в работе [8] было экспериментально показано, что при обратном включении происходит накопление заряда в квантовой яме.

То самое радикальное отличие в температурных зависимостях пикового тока, пикового напряжения и ширины гистерезиса ярко выражено при температурах от 4.2 К до 30 К. В этом диапазоне температур зависимости для симметричного РТД убывают в отличие от зависимостей для обратного включения асимметричного РТД.

В работе [10] показано, что величина накапливаемого заряда в яме пропорциональна отношению туннельной прозрачности эмиттера к сумме туннельных прозрачностей эмиттера и коллектора. Поэтому, при обратном включении, когда эмиттерный барьер тоньше коллекторного, создается ситуация, когда вероятность остаться в яме превалирует над вероятностью туннелирования в коллектор. Накопленный заряд экранирует прикладываемое напряжение, смещая пик в сторону больших напряжений, и увеличивает величину пикового тока (вытекает из условий непрерывности тока:  $I = \frac{Q}{\tau_c}$ , где  $Q$  -плотность заряд накопленный в яме, а  $\tau_c$  - время жизни в яме). Таким образом смещение уровней в яме уже зависит не только от

прикладываемого напряжения, но и от тока:  $\Delta E : V + \frac{I\tau_c}{C}$ , где  $I$  -плотность тока, а  $C$  -емкость ямы. Т.к. наклон пика, а значит и ширина гистерезиса, пропорциональны  $\Delta E$ , то в диапазоне от 4.2 К до 30 К идет сильное накопления заряда в яме.

В работе [15] говорилось о доминировании электрон-электронного взаимодействия при низких температурах. Начиная с температуры 30 К эффект накопления заряда начинает спадать, наверно из-за усиления электрон-фонного рассеяния, которое открывает нерезонансные токовые каналы, что в свою очередь начинает уменьшать аккумуляцию заряда в яме.

Совершенно иная ситуация наблюдается при прямом включении асимметричного РТД, когда накопление заряда отсутствует [8]. Там нет сильного возрастания на температурных зависимостях пикового тока и пикового напряжения при низких температур. Гистерезис отсутствует во всем диапазоне измеренных температур, что говорит об отсутствии наклона пика. Незначительное смещение пика в сторону малых напряжений говорит о том, что сопротивление спейсера становится малым по сравнению с сопротивлением двухбарьерной системы, т.к. туннелирование сначала происходит через толстый барьер. Это делает пик слабее, чем при обратном включении и усиление нерезонансного тока при прямом включении больше всего.

Итак, мы нашли различие в температурных зависимостях, сравнив температурные зависимости двух образцов. Тем самым показали, что предположение о влиянии последовательного сопротивления спейсера были верны. (Тогда далее) Из наклона резонансного пика в симметричном РТД можно извлечь (показать) температурную зависимость сопротивления спейсера от температуры из экспериментальных ВАХ.

### 3.3. Зависимость сопротивления спейсера от температуры.

На рисунке 3.12. изображена эквивалентная схема симметричного РТД в виде последовательного соединения идеального РТД и последовательного сопротивления  $R_s$ , которое олицетворяет сопротивление спейсера. Зная величину ширины гистерезиса и пикового тока при данной температуре, можно вычислить сопротивление спейсера по формуле показанной на рисунке.

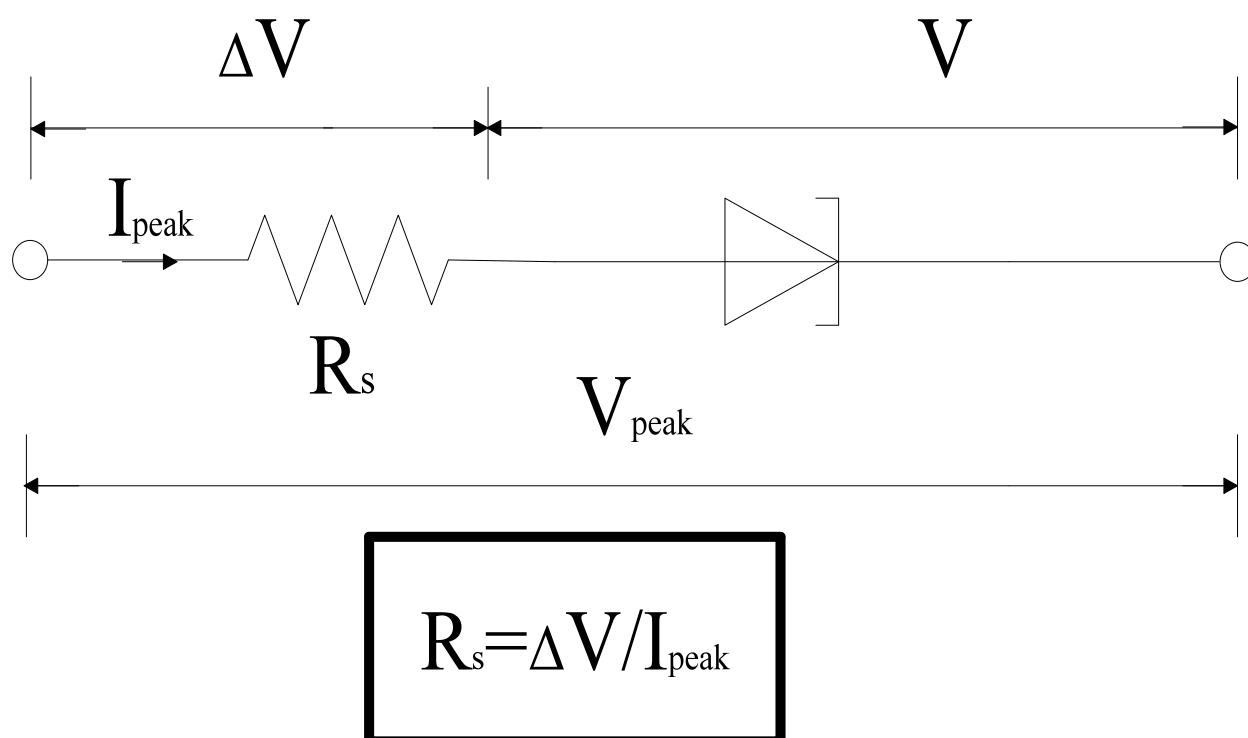
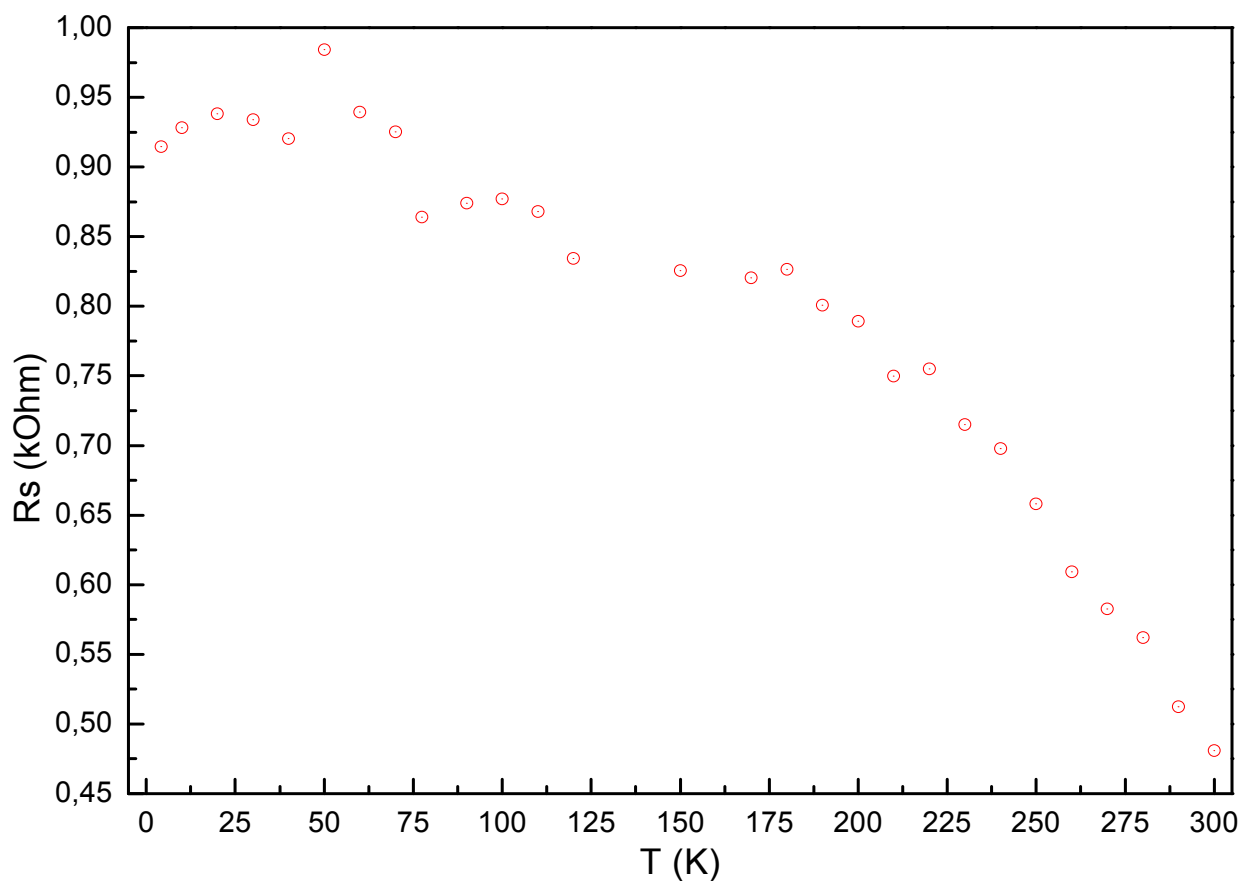


Рис. 3.12. Эквивалентная схема симметричного РТД.

Подставив имеющиеся данные в формулу для сопротивления спейсера, мы получили температурную зависимость спейсера, которая показана на рисунке 3.13.



**Рис.3.13. Температурная зависимость сопротивления спейсера.**

Видно, что при температуре  $T=180$  К происходит смена вида электронного транспорта через спейсер. При температурах выше  $T=180$  К зависимость убывает сильнее. Такое поведение может быть связано со сменой туннельной проводимости на активационную.

## 4. Заключение

В заключении стоит отметить, что можно было бы построить зависимость накапливаемого заряда от температуры при обратном включении асимметричного РТД, но эту зависимость лучше получать из магнето-емкостных измерений при различных температурах. В этих измерениях не будет вклада проводимости через спейсер, который больше проявляет себя при постоянном токе.

Имеет смысл померить вольт-фарадные и магнето-емкостные зависимости в симметричном РТД. Это необходимо сделать для исследования аккумуляционного заряда в псевдотреугольной яме, образованной спейсером и барьером. Экранировка заряда в псевдотреугольной яме скорее всего оказывает сильно влияние на туннельный транспорт через спейсер при низких температурах.



## **5. Выводы:**

- Было выявлено влияние последовательного сопротивления спейсера на форму резонансного пика ВАХ при помощи температурных измерений.
- Была показана разница влияния температуры на эффект накопления заряда и эффект последовательного сопротивления.
- Был рассмотрен случай, в котором почти отсутствуют оба эффекта.
- Предложены дальнейшие исследования.

## **Благодарности.**

Хочу выразить благодарность своему научному руководителю Попову Владимиру Геннадьевичу за постановку столь актуальной задачи в физике низко-размерных систем, терпение и энтузиазм в эти не легкие для всех времена. Также хочу выразить свою благодарность кафедре за предоставленную возможность проведения выше рассмотренных исследований, благодаря которым я научился новым навыкам и расширил свой кругозор как физик-экспериментатор.

## Список литературы

- [1] L. Esaki, *Phys. Rev.*, **109**, 603 (1958).
- [2] Иогансен, *ЖЭТФ*.-1963.-Т.45, вып. 2.-с 207-213
- [3] Иогансен, *УФН*.-1965.-Т.86, вып. 1.-с 175-179
- [4] L. L. Chang, L. Esaki, R. Tsui, *Appl. Phys. Lett.*, **24**, 593 (1974)
- [5] S. Luryi, *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 490 (1985)
- [6] T. Weil, B. Vinter, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1281 (1987)
- [7] M. Jonson, A. Grincwajg, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 1729 (1987)
- [8] M. L. Leadbeater, E. S. Alves, L. Eaves, et al, *Semicond. Sci. Technol.*, **3**, 1060 (1988)
- [9] Sollner, *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 1622 (1987)
- [10] F. W. Sheard, G.A. Toombs, *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1228 (1988)
- [11] V. J. Goldman, D. C. Tsui, *Phys. Rev. B*, **35**, 9387 (1987)
- [12] T. J. Foster, M. L. Leadbeater, L. Eaves et al, *Phys. Rev. B*, **39**, 6205 (1989)
- [13] C. J. Goodings, H. Mizuta, J. R. A. Cleaver, *J. Appl. Phys.*, **75**, 2291 (1994)
- [14] T. Wei, S. Stapleton, *J. Appl. Phys.*, **76**, 1287-1290 (1994)
- [15] S. Q. Murphy, J. P. Eisenstein, L. N. Pfeiffer, K. W. West, *Phys. Rev. B*, **52**, 14825 (1995)
- [16] J. P. Eisenstein, L. N. Pfeiffer, K. W. West, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2324 (1990)