

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
Кафедра физики и техники низких температур  
Институт физических проблем РАН им. П.Л. Капицы

---

Исследование низкоразмерных висмутовых структур  
в плане их использования в качестве приемников  
электромагнитного излучения.

Студент  
Голоколенов И.А

Научный руководитель  
к.ф.-м.н., Завьялов В.В

Зав. кафедрой  
академик РАН Андреев А.Ф.

Москва 2015

# Оглавление

Введение . . . . .	2
<b>1 Теоретические предпосылки</b>	<b>4</b>
1.1 Основные характеристики болометра . . . . .	4
1.2 Эффекты, влияющие на ТКС . . . . .	5
<b>2 Эксперимент</b>	<b>7</b>
2.1 Схема установки . . . . .	7
2.2 Метод получения образцов . . . . .	8
2.3 Схема подключения образцов . . . . .	8
<b>3 Результаты</b>	<b>10</b>
3.1 Серия образцов 800Å . . . . .	10
3.2 Серия образцов 200Å . . . . .	11
<b>4 Практическая реализация болометра</b>	<b>15</b>
4.1 Устройство датчика . . . . .	15
4.2 Характеристики датчика . . . . .	16
Заключение . . . . .	18
Список литературы . . . . .	18
Приложения . . . . .	20

# Введение

Свойства одного и того же материала в виде плёнки и в массивном кристалле могут кардинально отличаться, тем самым определяя его практическое применение. С уменьшением толщины плёнок как правило снижается температура плавления, изменяется механическая плотность и электросопротивление, изменяются полупроводниковые свойства и кристаллическая структура, могут проявляться абсолютно новые эффекты, связанные с увеличением влияния поверхностной энергии. Так же могут серьёзно отличаться свойства монокристаллических и поликристаллических плёнок.

Наиболее ярким и широко известным примером тому является графен, так например сейчас широко ведутся исследования так называемых наноболометров на его основе [1]. Среди подобных материалов важное место также занимает висмут Bi. Висмут широко применяется в металлургии, химической промышленности, при изготовлении приборов для измерения сверхсильных магнитных полей и других сферах. В это же время, тонкие плёнки висмута на данный момент не получили широкого применения в промышленности, однако система висмут-сурьма может использоваться как преобразователь сигналов в различных низкоразмерных структурах в следствии её необычных физических свойств, как то: высокая чувствительность к температурным, механическим и магнитным изменениям. Эти свойства объясняются в первую очередь электронной структурой полуметалла.

Висмутовые структуры хорошо подходят на роль чувствительного элемента в болометрах за счёт их низкой теплоемкости на единицу массы (на порядок меньше чем у углерода) и резкой зависимости сопротивления от температуры. Кроме того, они могут хорошо поглощать излучение в диапазоне от инфракрасного до радиочастотного. Плазменная частота висмута при комнатной температуре составляет 10.7 ТГц(28μм), а при 5.7°K снижается до 3.6 ТГц(83μм) [2]. Из других работ известно, что зависимость сопротивления висмутовых плёнок от температуры с уменьшением их толщины становится более резкой [4].

В наших исследованиях была выбрана система  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ . Висмут и сурьма являются полностью взаимозамещаемыми в кристаллической решётке: они имеют очень близкие температуры возгонки и давления насыщенных паров. Таким образом можно считать, что в процессе термического испарения они напыляются одновременно и занимают ячейки в кристаллической решётке с вероятностью, равной их массовой концентрации в лодочке испарителя. По этой причине объёмная концентрация сурьмы остаётся постоянной во всём образце. Массовая доля сурьмы в 12% выбрана по той причине, что именно при такой концентрации наблюдается самая большая ширина запрещённой зоны [3].

Особую сложность в исследовании и применении любых тонких плёнок представляют трудности, связанные с повышенным браком образцов, нестабильностью их свойств по времени, а также плохой воспроизводимостью результатов и свойств. В столь тонких структурах могут сказаться дефекты упаковки, высокая плотность дислокаций и другие микродефекты, которые очень сложно проконтролировать. Особо сильно это сказывается в сверхтонких плёнках толщиной менее микрона. В виду указанных причин, исследования связанные с тонкими плёнками часто демонстрируют различные, сложно повторяемые аномалии, которые, в свою очередь, могут представлять практический интерес.

Целью данной работы является исследование термоэлектрических свойств сверхтонких плёнок системы висмут-сурьма  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  в диапазоне температур от жидкого гелия до комнатной, с последующим применением данных плёнок в виде чувствительного элемента бо-

лометрического типа для приёма электромагнитного сигнала в диапазоне от инфракрасного до радиочастотного. По результатам данной работы можно оценить характеристики такого датчика.

Для проведения измерений с большим количеством образцов было решено использовать метод низкотемпературной вставки, а сами измерения проводить в импульсном режиме, для обеспечения стабильности температурного состояния образцов. В работе описаны эксперименты, проведенные для исследования различных по толщине образцов висмут-сурьма  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  и представлены полученные результаты.

# Глава 1

## Теоретические предпосылки

### 1.1 Основные характеристики болометра

В основе работы болометра лежат свойства термочувствительного элемента, который меняет своё сопротивление при падении на него внешнего излучения из-за нагрева. В роли этого элемента могут выступать различные материалы (платина, никель, золото, окислы никеля, кобальта) и, как правило, они представляют собой тонкие пластины для повышения чувствительности. Нами было решено исследовать тонкие плёнки  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  на их пригодность в роли термочувствительного элемента для далёкого инфракрасного диапазона (субмиллиметрового).

Стандартный болометр устроен следующим образом: термочувствительный элемент соединён с базой (объектом с большой теплоёмкостью, температура которой считается постоянной) через слабую тепловую связь. Под воздействием падающего электромагнитного излучения температура чувствительного элемента повышается, его сопротивление меняется и это фиксируется. Схема простейшего болометра выглядит следующим образом (см. рис.1.1):

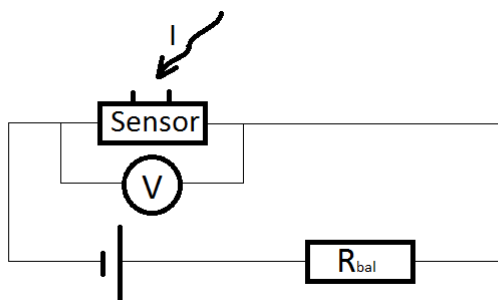


Рис. 1.1: Схема болометрического датчика

Внешний сигнал падает на датчик, тем самым нагревая и меняя его сопротивление, из-за чего изменятся показания вольтметра и фиксируется сигнал.

Качество болометра описывается следующими характеристиками:

1. Чувствительность
2. Постоянная времени
3. Эквивалент мощности шума (Noise-equivalent power, NEP)
4. Коэффициент поглощения

Поподробнее остановимся на этих характеристиках.

**Чувствительность** – это величина, определяющая, как сильно выходной сигнал датчика изменяется при выделении в нём единицы мощности. Она, в данном случае, определяется температурным коэффициентом электрического сопротивления (ТКС), который равен

относительному изменению электрического сопротивления при изменении температуры на единицу, т.е.  $\frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$  и измеряется в  $[K^{-1}]$ . В более общем случае чувствительность определяется изменением выходного напряжения датчика при выделении в нём единицы мощности излучения, т.е.  $\frac{dU}{dW}$  и измеряется в  $\left[\frac{В}{ВТ}\right]$ .

**Постоянная времени** – это время установления температуры датчика. Например, если под действием возникающего потока излучения система приходит в состояние равновесия, то есть температура чувствительного элемента становится постоянной, с учётом тепловой связи с базой, через некоторое время  $\tau$ , то это и будет постоянная времени (см. рис.1.2).

**Эквивалент мощности шума (NEP)** – это мощность падающего на приёмник излучения, при которой мощности сигнала и шума на выходе равны. NEP нормируется на полосу частот в 1Гц и выражается в единицах  $Вт/\sqrt{Гц}$ , он, в первую очередь, определяется собственным шумом сенсора, как то шум Найквиста, дробовой шум, шум  $1/f$  и другие. Для снижения шумов датчики, как правило, помещают в жидкий гелий, специально подбирают материалы для их изготовления и специальным образом проводят измерения. Как правило, NEP сильно зависит от частоты падающего излучения и таким образом именно его спектр определяет порог чувствительности датчика, то есть минимальную мощность сигнала, которую данный прибор способен зафиксировать, для разных частот.

**Коэффициент поглощения** – это величина, характеризующая способность приёмника поглощать падающее на него электромагнитное излучение, измеряемая как отношение поглощённой мощности к упавшей:  $A = \frac{W_{absor}}{W_{tot}}$

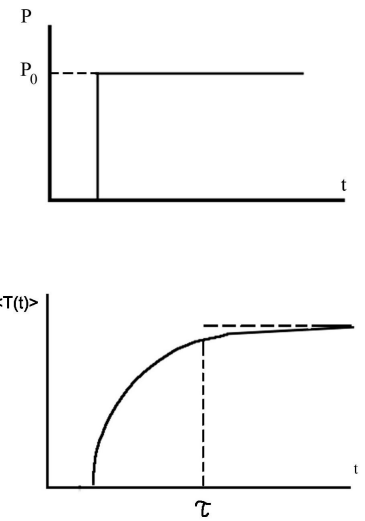


Рис. 1.2: Зависимость усредненной по поверхности температуры приёмника от времени ( $P$  – плотность потока падающего излучения)

## 1.2 Эффекты, влияющие на ТКС

Чтобы оценить пригодность данных плёнок  $Bi_{88}Sb_{12}$  как термочувствительных элементов болометра, нам необходимо исследовать их термоэлектрические свойства, и, в первую очередь, их ТКС. Однако кроме прямого изменения сопротивления вещества из-за изменения температуры, на результаты измерений могут влиять другие эффекты, которые также необходимо учесть. Например: тензоэффект, магнитосопротивление, перегрев образца (отсутствие температурного равновесия), контактные эффекты или недостаточная однородность образца. Рассмотрим перечисленные эффекты поподробнее и укажем способы их учёта.

**Тензоэффект** – это свойство материала изменять своё электрическое сопротивление при деформации. При описании тензоэффекта принято считать, что сопротивление проводника прямо пропорционально его длине. В нашем случае важно учесть, что тонкие плёнки не могут существовать сами по себе, они напыляются на некоторую подложку, в роли которой как правило выступает слюда или полиимид. Температурные коэффициенты линейного расширения слюды ( $(7.5-8.5) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) и полиимида ( $(30-50) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) отличаются от температурного коэффициента линейного расширения сплава  $Bi_{88}Sb_{12}$  ( $13 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ). Из-за этого, подложка может растягивать или сжимать плёнку, тем самым деформируя её и меняя её сопротивление. По результатам исследований [5], наибольшим по модулю ТКС обладает сплав  $Bi_{88}Sb_{12}$  на слюдяной подложке. В том же исследовании отмечается, что, так как слюда имеет совершенную кристаллическую структуру, она оказывает ориентирующее воздействие на структуру напыляемого сплава. Кроме того, если соотнести коэффициенты линейного расширения, то видно что на слюдяной подложке плёнка  $Bi_{88}Sb_{12}$  испытывает плоское растяжение при

температурах ниже температуры образования плёнки.

**Магнитосопротивление** – это свойство материала менять своё сопротивление в магнитном поле. Данный эффект может сказаться просто искажив результаты из-за случайных наводок магнитного поля. Дабы оценить влияние этого эффекта, нами предварительно был снят ВАХ образцов в отсутствии поля и в поле ниодимового магнита ( $\sim 1\text{T}$ ). Разницы (порядка точности измерений) обнаружено не было, поэтому данным эффектом было решено пренебречь. Кроме того, в работе [5] было показано, что сплав  $\text{V}_{18}\text{Sb}_{12}$  на слюде имеет довольно слабый эффект магнитосопротивления, а в работе [6] изменение сопротивления в поле  $\sim 1\text{T}$  составило менее 0.5%.

**Перегрев образца** – так как при измерениях необходимо пропускать через образец ток, то на нём в любом случае будет выделяться некоторая мощность, а следовательно он будет греться и не будет находиться в тепловом равновесии с окружающей средой. При снятии кривой ТКС перегрев образца можно уменьшать разными способами. Во-первых, можно проводить измерения при малых токах, проходящих через образец, используя высокоточные измерительные приборы. Кроме того, в данном случае совсем необязательно чтобы ток протекал через образец постоянно, достаточно чтобы он был лишь в моменты снятия данных. По этой причине в нашей работе был использован импульсный режим снятия сопротивления, о котором подробно будет сказано в описании экспериментальной установки.

**Контактные эффекты** – “плохие” контакты могут сильно менять результаты, однако их качество достаточно легко проконтролировать, проводя измерения изменяя полярность измерительного тока и сравнивая результаты, а также применяя четырёх-контактную методику измерения. Данная проверка была проведена в ходе работы.

**Неоднородность образцов** – образцы подобных размеров очень сложно контролировать и тем более получать серию одинаковых, однако это можно минимизировать. Для этого при одном напылении получалась серия образцов, тем самым обеспечивая их максимальную однотипность, однако каждый образец исследовался независимо.

# Глава 2

## Эксперимент

### 2.1 Схема установки

Для измерения ТКС мы использовали метод низкотемпературной вставки (рис.2.1), при котором измеряемый образец погружается в гелий или азот напрямую. Этот метод был нами выбран для ускорения процесса измерения и снятия большего количества образцов. Схема установки выглядит следующим образом (см. рис.2.2): набор образцов (Samples) соединён 8-ми жильным проводом через переключающий блок (ПБ), который позволяет коммутировать пары жил, подключая определённый образец в измеряющую сеть. Измерения проводились парой работающих совместно приборов: Keithley 6221 (DC and AC current source) и 2182A (nanovoltmeter), синхронизированных между собой. Управление обоих приборов осуществляется через модель 6221, которая взаимодействует с компьютером через программный пакет LabView. Весь процесс измерения контролировался написанными нами программами, которые приводятся в приложениях.

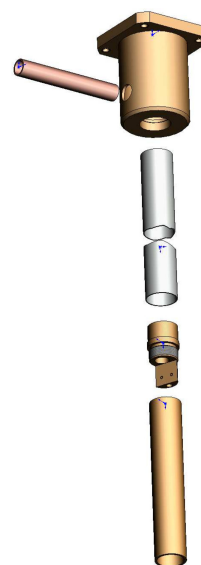


Рис. 2.1: Устройство вставки

На паре этих приборов остановимся поподробнее. Источник в этой связке позволяет подавать ток на образец импульсами регулируемой длины (от  $50\mu\text{s}$ ), в то время как нановольтметр измеряет напряжение три раза: в самом начале импульса, в середине и в самом конце, тем самым контролируя возможный перегрев образца и факт установления тока. Длительность импульсов подобрана так, чтобы ток успевал установиться и погрешность определения сопротивления была пренебрежимо малой, но в то же время образец не успевал перегреваться.

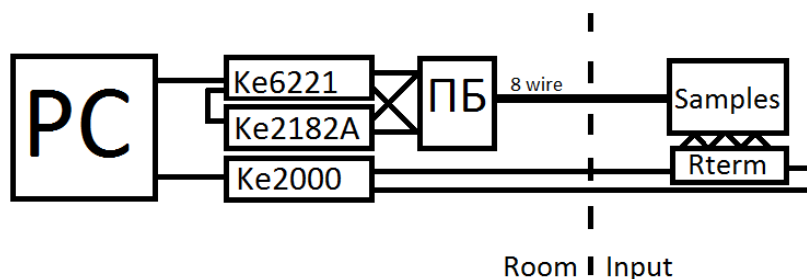


Рис. 2.2: Схема установки

Проверка отсутствия перегрева осуществлялась повторением измерений на разных длинах импульсов при токе  $I=1\mu\text{A}$ , и было обнаружено что для всех исследуемых образцов

результаты одинаковы при продолжительности импульсов от  $50\mu\text{с}$  до  $50000\mu\text{с}$ . При более длительных импульсах были обнаружены отклонения на отдельных образцах. В итоге измерения проводились на импульсах от  $50\mu\text{с}$  до  $5000\mu\text{с}$ .

Температура образцов контролируется платиновым термометром (РТ1000), приведённым с ними в тепловой контакт. Сопротивление термометра измеряется прибором Keithley 2000 (multimeter) и передаётся на компьютер. Для температур выше жидкого азота использовалась заводская калибровка, для более низких температур была проведена дополнительная калибровка по имеющемуся оксид-рутениевому ( $\text{RuO}_2$ ) резистору.

## 2.2 Метод получения образцов

Образцы были получены методом вакуумного напыления [8]. Происходил нагрев смеси порошков  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ , помещённой в “лодочку”, до температуры  $\sim 800^\circ\text{C}$ . Данное соотношение висмута и сурьмы выбрано по той причине, что при таком количестве сурьмы в висмуте, он становится диэлектриком в массивном образце. На расстоянии  $\sim 15\text{см}$  от “лодочки” расположен нагреватель с подложкой, температура которой составляет  $95^\circ\text{C}$ . На подложку установлена маска, регулирующая форму напыляемых плёнок. За счёт нагрева смеси в лодочки, происходит испарение, и  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  напыляется на подложку.

Температура нагревателя с подложкой регулируется термометром, а температура “лодочки” контролируется по её цвету (см. [7]). Толщина образцов контролировалась по массе распыляемого висмута, которая измерялась радиовесами.

В результате получились пластинки слюды с напылёнными на неё полосками  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  толщиной от  $\sim 200\text{Å}$  до  $\sim 800\text{Å}$ . Были получены как широкие единичные полосы, так и серии узких, расположенных рядом друг с другом, полос. Так во всех полученных образцах длина полос составляет  $\sim 6\text{мм}$ , а ширина варьируется от  $0.2\text{мм}$  до  $3\text{мм}$ .

Далее по краям полос было напылено золото. Это было сделано для обеспечения электрического контакта с образцами без механического воздействия на них. Итоговый результат представлен на рис. 2.3:

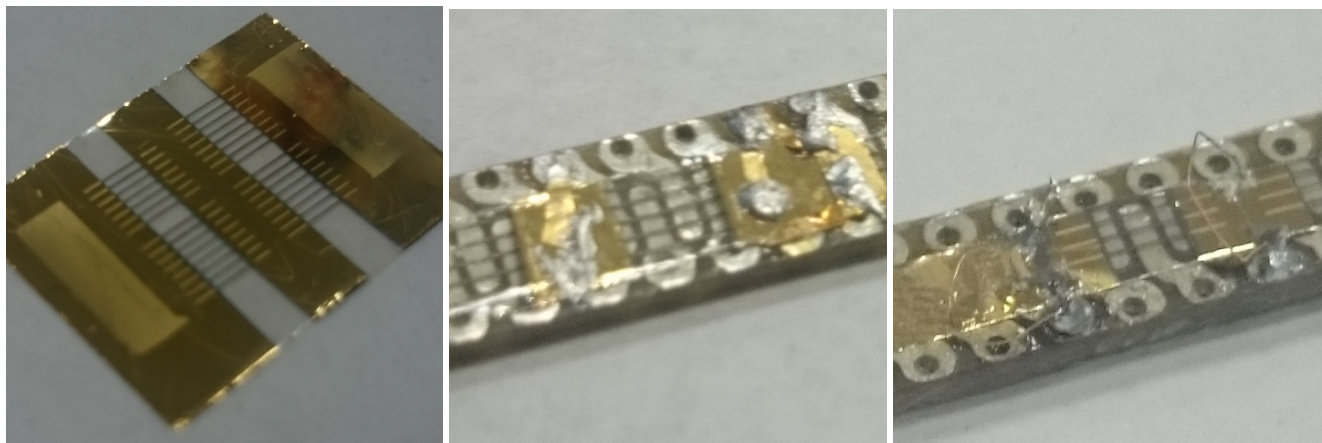


Рис. 2.3: Внешний вид полученных образцов

Рис. 2.4: Первый способ крепления

Рис. 2.5: Второй способ крепления

## 2.3 Схема подключения образцов

Подключение образцов толщиной  $\sim 200\text{Å}$  к измерительной схеме задача совсем не простая. В ходе эксперимента нами были опробованы различные способы, однако наиболее удачными оказались следующие.

Слюда с образцами нарезалась и выкладывалась на двойную металлизированную стеклотекстолитовую пластину, со сквозными металлизированными отверстиями вдоль краёв.

Тонкие полоски золота припаивались мягким сплавом индий-олово InSn к напылённому на образцы золоту одним концом, а другим к металлизации сквозного отверстия в стеклотекстолитовой пластине. С другой стороны пластины к тому же сквозному отверстию уже обычным припоем к металлизации крепились подводящие провода.

Во втором способе тонкие золотые полоски были заменены медными изогнутыми проводами ( $d \sim 0.01\text{mm}$ ), дабы избежать натяжения (и возможного разрыва) при понижении температуры, что было недостатком первого способа. Однако медь хуже припаивалась, потому в итоге были использованы оба способа, но часть образцов испортилась в процессе измерения. Внешний вид первого и второго способов представлен на рис. 2.4 и рис. 2.5 соответственно.

# Глава 3

## Результаты

Всего было измерено 5 серий, в каждую из которых входило от 3-х до 5-и образцов. В первой и четвёртой серии измерялись образцы толщиной  $\sim 800\text{\AA}$ , в остальных -  $\sim 200\text{\AA}$ . Наиболее удачными оказались измерения первых двух серий. Измерения 3-ей, 4-ой и 5-ой серий оказались в целом аналогичными 1-ой и 2-ой серии. Таким образом мы считаем достаточным приведение и обсуждение результатов только первых двух серий измерений.

### 3.1 Серия образцов $800\text{\AA}$

Эта серия образцов проявила наибольшую стабильность при измерениях и наилучшую повторяемость результатов, кроме того результаты оказались в хорошем соответствии (характер кривых идентичен) с результатами схожих измерений, полученных для подобных образцов толщиной  $2\ \mu\text{m}$  в более ранних работах, проводимых в нашей лаборатории. ВАХ этих образцов в измеренном диапазоне ( $\pm 2\text{mA}$ ), оказался линейным с высокой точностью, потому эти результаты нет смысла приводить, и рассмотрим только ТКС этих образцов. Для удобства сравнения  $R(T)$  разных образцов, данные по сопротивлению были отнормированы на сопротивление при комнатной температуре ( $R_0$ ). Графики ТКС строились по аппроксимациям кривых  $R(T)$  полиномами 5-ой степени.

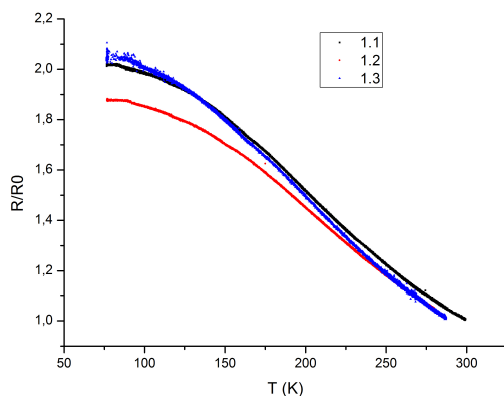


Рис. 3.1:  $R(T)$  первой серии образцов

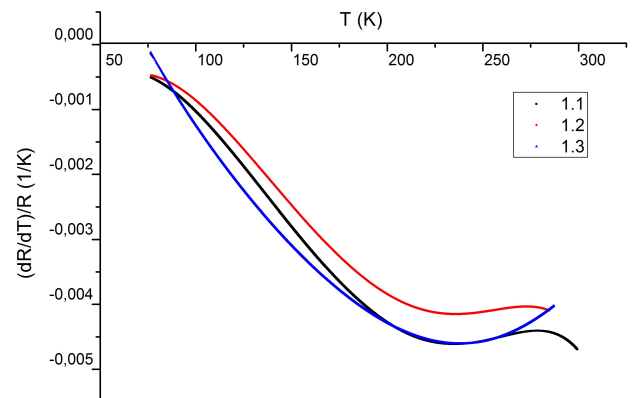
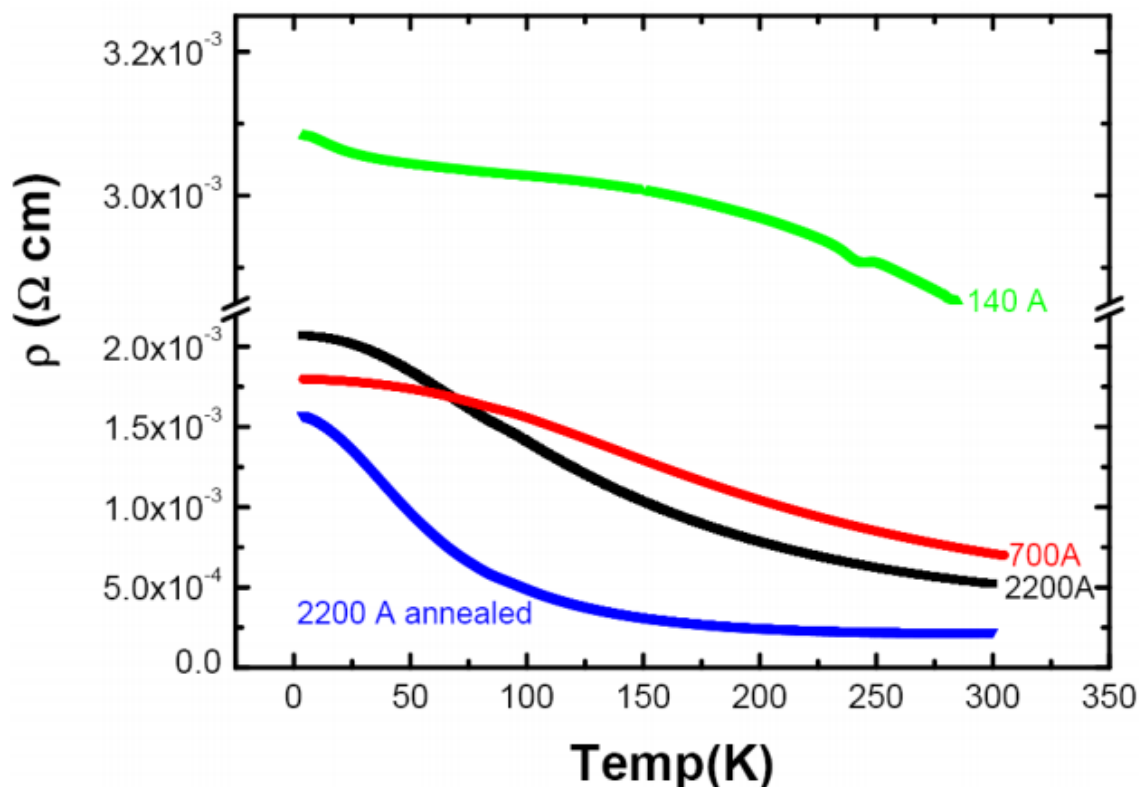


Рис. 3.2: Аппроксимация температурной зависимости ТКС первой серии образцов

При измерении других партий образцов с толщиной  $800\text{\AA}$  были получены аналогичные результаты.

Имеется множество аналогичных работ по исследованию висмутовых образцов, схожих с нашими [9], [10]. Полученные результаты находятся в соответствии со сторонними работами. Для сравнения приведу результаты из работы [10] на рис.3.3:



**Figure 4.** Combined resistivity vs. temperature for bismuth samples. Bismuth 3 (140 Å) shows the highest overall resistivity, while Bismuth 1 (2200 Å) initially shows a higher resistivity than Bismuth 2 (700 Å) at lower temperatures. The annealed 2200 Å sample has the lowest overall resistivity.

Рис. 3.3:  $R(T)$  для плёнок чистого  $Bi$  разной толщины из работы Chun Yang

### 3.2 Серия образцов 200 Å

Эти образцы оказались гораздо менее стабильными в своих свойствах, и даже свойства образцов из одной серии кардинально отличались. По этой причине приведем данные наиболее интересных образцов, как например образцы второй серии. Все они имеют нелинейные ВАХ, однако наиболее ярко это было выражено в образце №2.2. Его ВАХ проявил стабильную нелинейность, которая с понижением температуры становится более ярко выраженной (см. 3.8), в связи с этим для такого образца нельзя ввести нормальное понятие электрического сопротивления, однако можно формально рассмотреть зависимость сопротивления от температуры при постоянном токе (либо напряжении), в нашем случае мы выбрали ток  $I=1\mu A$  для измерения ТКС. Измерения проводились на импульсах шириной 5ms с задержкой от начала импульса в 1ms. На графиках отдельно представлены участки вблизи комнатной температуры и от гелиевой до азотной. Графики ТКС получены тем же способом, что и для образцов первой серии.

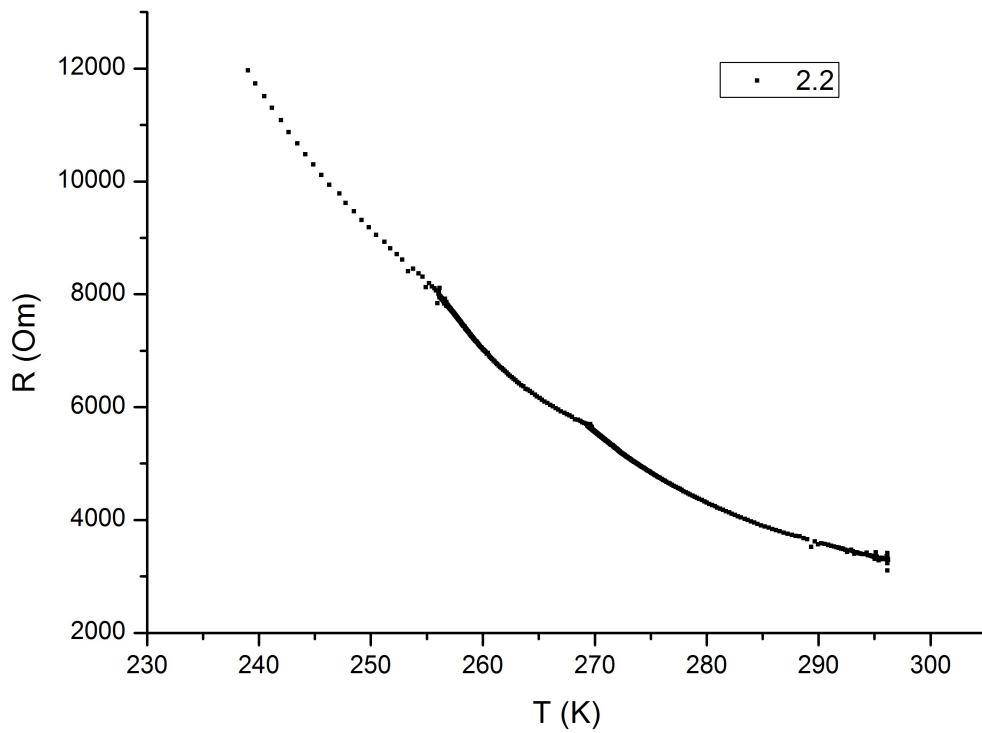


Рис. 3.4:  $R(T)$  образца №2.2 в диапазоне температур [240;300]К

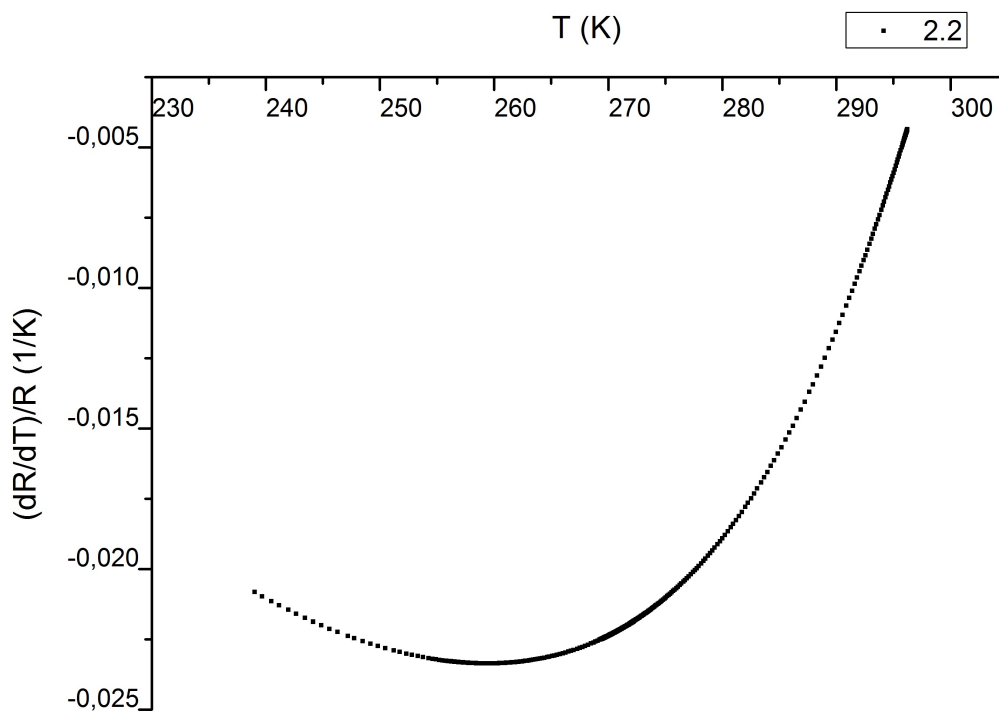


Рис. 3.5: Апроксимация ТКС образца №2.2 в диапазоне температур [240;300]К

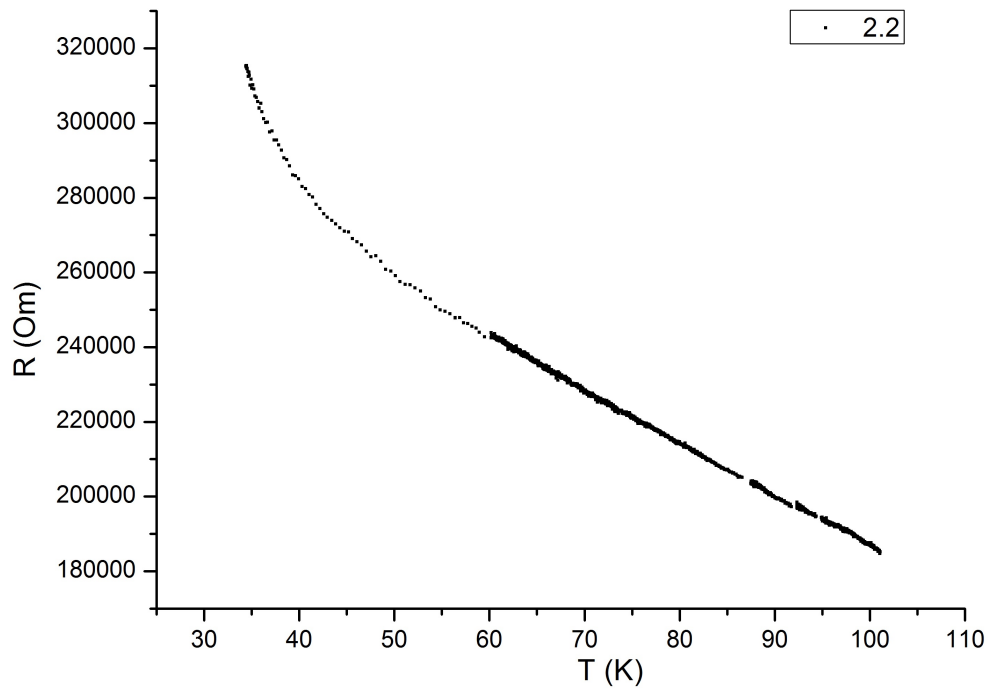


Рис. 3.6:  $R(T)$  образца №2.2 в диапазоне температур [30;100]K

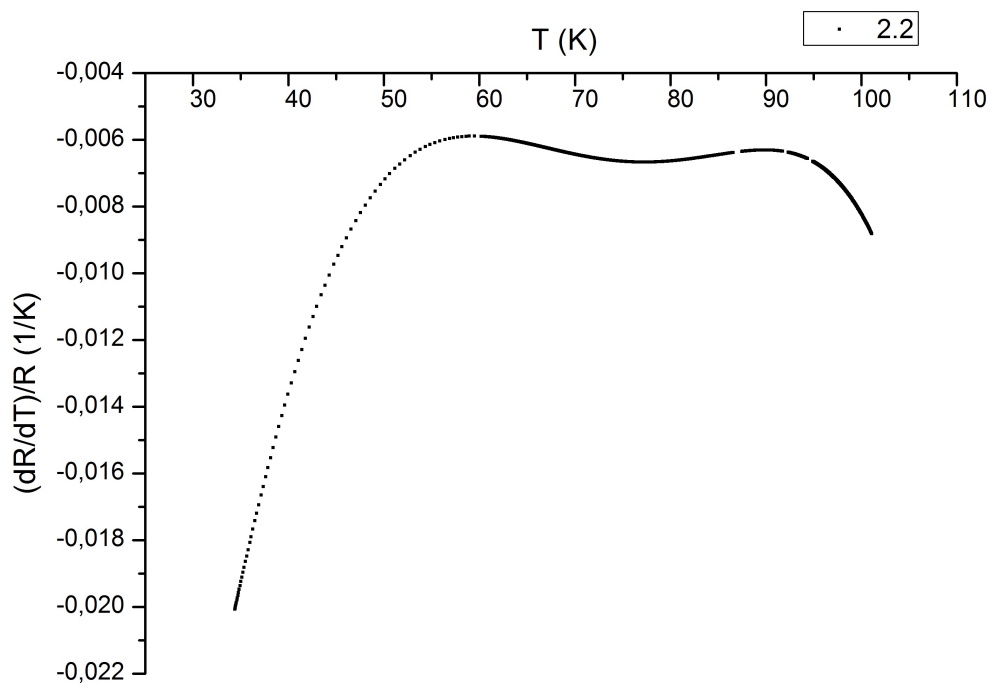


Рис. 3.7: Аппроксимация ТКС образца №2.2 в диапазоне температур [30;100]K

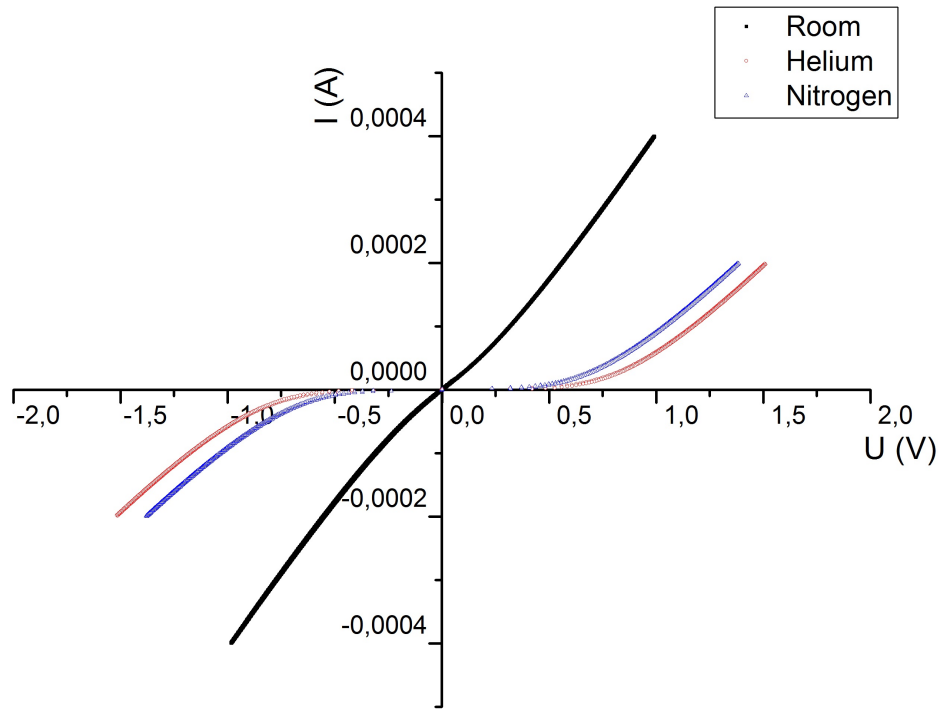


Рис. 3.8: ВАХ образца №2.2 при различных температурах

Полученные зависимости ТКС от температуры позволяют утверждать, что плёнки  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  подходят на роль чувствительного элемента болометрического типа. Образец №2.2 продемонстрировал феноменальный ТКС и представляет собой идеального кандидата на роль чувствительного элемента, однако ввиду слабой повторяемости и низкой надёжности было решено сделать датчик на основе плёнок толщиной  $1000\text{\AA}$ , так как они демонстрируют высокую воспроизводимость результатов и надёжность при эксплуатации.

Таким образом результатом данной работы является изготовление датчика болометрического типа, который ещё предстоит исследовать.

# Глава 4

## Практическая реализация болометра

### 4.1 Устройство датчика

На основе данных исследований был сделан датчик следующей конструкции(см.4.1, 4.2):

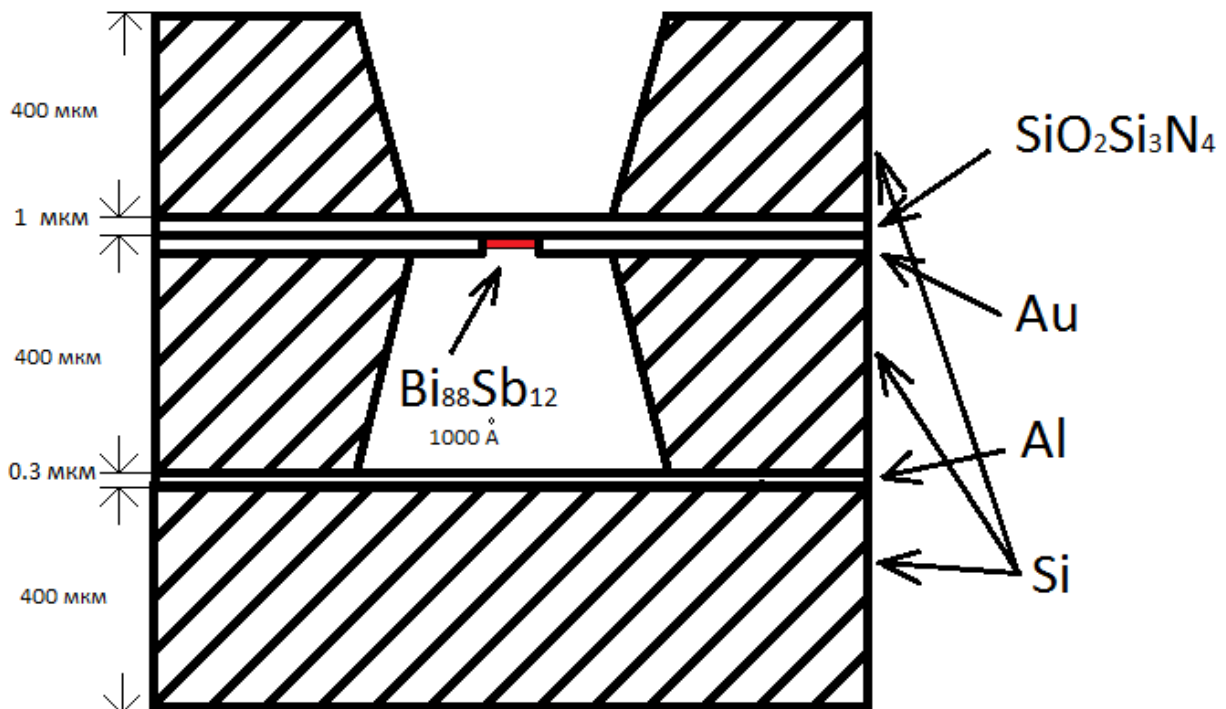


Рис. 4.1: Устройство датчика

Приёмный элемент(в данном случае плёнка  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  толщиной  $1000 \text{ \AA}$ ) детектора, обладающий высокой температуропроводностью  $\chi$ , помещен на диэлектрик с низкой теплопроводностью  $\kappa$  (в данном случае четырёхслойный “пирог”  $\text{SiO}_2\text{Si}_3\text{N}_4$ , получаемый на пластине кремния в виде мембраны), что обеспечивает быстрый прогрев при поглощении и тем самым малую постоянную времени  $\tau$ . Приёмный элемент в данном случае совмещает в себе две функции: поглотитель внешнего излучения(спектры поглощения, отражения и поглощения висмутовых плёнок приведены в приложениях) и регистратор изменения температуры. С измеряющей схемой он соединён через напылённое золото. Эта чувствительная часть зажата

между двумя пластинами кремния Si толщиной  $\sim 400\mu\text{м}$ , которые имеют пирамидоидальные отверстия для приёмного элемента. Описанная система помещается на третью, цельную пластину кремния Si, на которую предварительно напылён алюминий Al толщиной  $\sim 0.3\mu\text{м}$ , имеющий очень высокий коэффициент отражения и выступающий в роли зеркала, чтобы доля излучения прошедшего через приёмный элемент отразилась и прошла через него ещё раз. Наличие зеркала повышает долю поглощённого излучения, тем самым улучшая коэффициент поглощения.

Толщины пластин кремния стараются подбирать так, чтобы они были больше  $\frac{\lambda}{4}$  принимаемого излучения. Пирамидоидальные отверстия в них получаются за счёт травления кремния по кристаллической оси раствором КОН с водой при температуре  $353^\circ\text{К}$  [11].

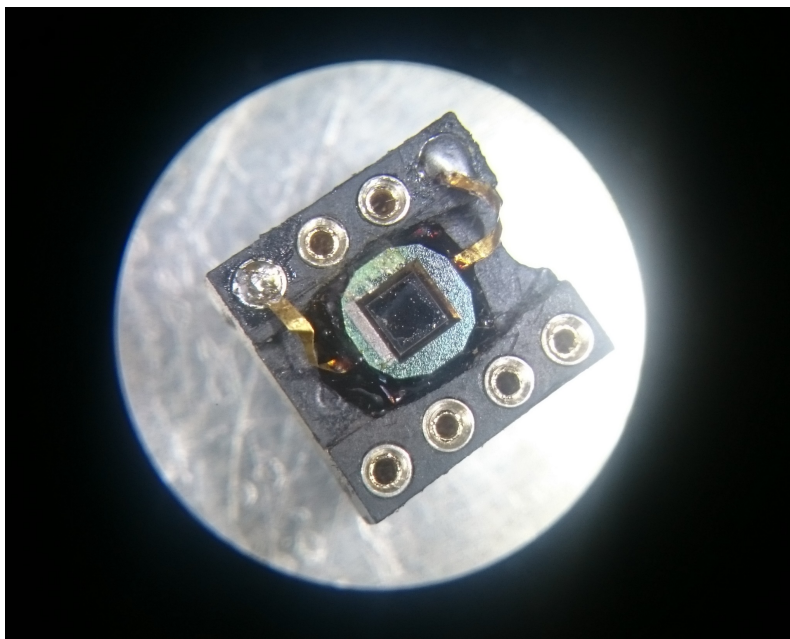


Рис. 4.2: Фотография датчика через оптический микроскоп

## 4.2 Характеристики датчика

На основе проведённых исследований и справочных данных мы можем оценить характеристики полученного датчика:

**Постоянная времени:**

$\tau \sim \frac{L^2}{\chi}$ , где  $L$  - толщина сенсора, а  $\chi$  - температуропроводность. Для оценки положим

$L=1000\text{Å}$ , а  $\chi = 1\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ , как типичная температуропроводность металла.

Таким образом  $\tau \sim \frac{(10^{-5})^2}{1} = 10^{-10}\text{с}$ , что говорит об очень высоком собственном быстродействии болометрического элемента датчика.

**Коэффициент поглощения:**

На длине волны  $\sim 30\mu\text{м}$  висмут имеет максимум поглощения. Оценивая итоговый коэффициент поглощения датчика, считаем длину волны соответствующую максимуму поглощения, а значит  $A=50\%$ ,  $T=25\%$ ,  $R=25\%$ , получим, с учётом наличия алюминиевого зеркала,  $A_{\text{sensor}}=67\%$ .

Такой коэффициент поглощения обеспечивает достаточно высокую чувствительность, так как большая часть падающего излучения идёт на нагрев сенсора.

**Чувствительность:**

В данном случае, чувствительность датчика определяется ТКС, который для нашего сенсора составляет  $\sim 4 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , что фиксируется за счёт хорошего поглощения в интересующем нас диапазоне стандартной измерительной схемой.

Однако итоговую чувствительность прибора можно узнать только испытав этот прибор на практике, что нам ещё предстоит сделать. Тогда же можно будет говорить и о такой характеристике как NEP, которая зависит не только от самого датчика, но и от измерительной схемы в целом. Однако его можно оценить для комнатной температуры:

$$\text{NEP} = \sqrt{4k_B T^2 G_{e-ph}} \sim 10^{-15} \text{Вт}/\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}} [1], [12]$$

Однако эта оценка скорее всего является завышенной.

# Заключение

В ходе работы была разработана методика исследования термоэлектрических свойств тонких плёнок  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  в диапазоне температур от  $4.2^\circ\text{K}$  до комнатной ( $\sim 300^\circ\text{K}$ ), с учётом особенностей материала и возможных сторонних эффектов. Данная методика позволяет производить быстрые измерения большого количества образцов с высокой точностью. С её помощью были получены зависимости ТКС от температуры различных образцов,

# Литература

- [1] Boris S. Karasik, Christopher B. McKitterick, Daniel E. Prober, “Monolayer graphene bolometer as a sensitive far-IR detector Proc.SPIE Int.Soc.Opt.Eng. 9153, 2014.
- [2] Julien Levallois, Piotr Chudziński, Jason N. Hancock, Alexey B. Kuzmenko, and Dirk van der Marel, “Magnetoplasmon resonances in polycrystalline bismuth as seen via time-domain terahertz spectroscopy Phys. Rev. B 89, 155123, 17 April 2014.
- [3] Ю.Ф. Комник, “Физика металлических плёнок Атомиздат, 1979.
- [4] S.Chaudhuri and A.K.Pal, “In situ measurement of Hall effect, magnetoresistance, resistivity and TCR of bismuth films”, J. Appl. Phys. 48, 3455, 1977.
- [5] N. Kablukova, V. Komarov, E. Demidov, E. Khristich, “The Influence of Thermal Expansion of the Substrate Material on the Transport Phenomena in Block and Single-crystal Films of Bismuth-Antimony”, Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, стр. 13-19, 2012.
- [6] K. Das Gupta, G. Sambandamurthy, N. Chandrasekhar, “Magnetoresistance and conductivity exponents of quench-condensed ultra-thin films of Bi”, PHYSICA B, 284,2000, pp. 1976-1977.
- [7] “Цвета каления”, Большой энциклопедический политехнический словарь, 2004.
- [8] Лев Самойлович Палатник, Игорь Исаакович Папилов, “Эпитаксиальные плёнки”, “Наука”, 1971.
- [9] Jayachandran K., “Electrical, Optical and Structural Studies in Bismuth, Antimony, Bismuth Oxide and Antimony Oxide Thin Films”, 1997.
- [10] Chun Yang, “A Study of Electrical Properties in Bismuth Thin Films”, Physics REU, summer 2008
- [11] Зенон Юрьевич Готра, “Технология микроэлектронных устройств”, справочник, “Радио и связь”, 1991.
- [12] Karasik, B.S., McKitterick, C.B., and Prober, D.E., “Prospective Performance of Graphene NEB for Ultrasensitive Detection of Sub-mm Radiation”, J. Low Temp. Phys., 2014.

# Приложения

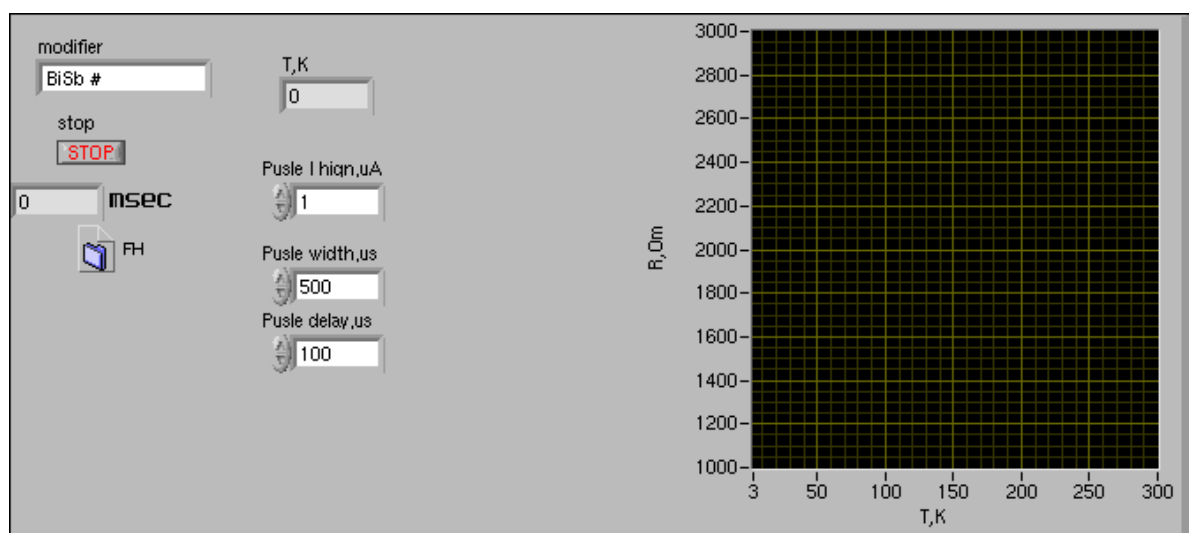


Рис. 4.3: Программа для измерения зависимости сопротивления от температуры. Передняя панель

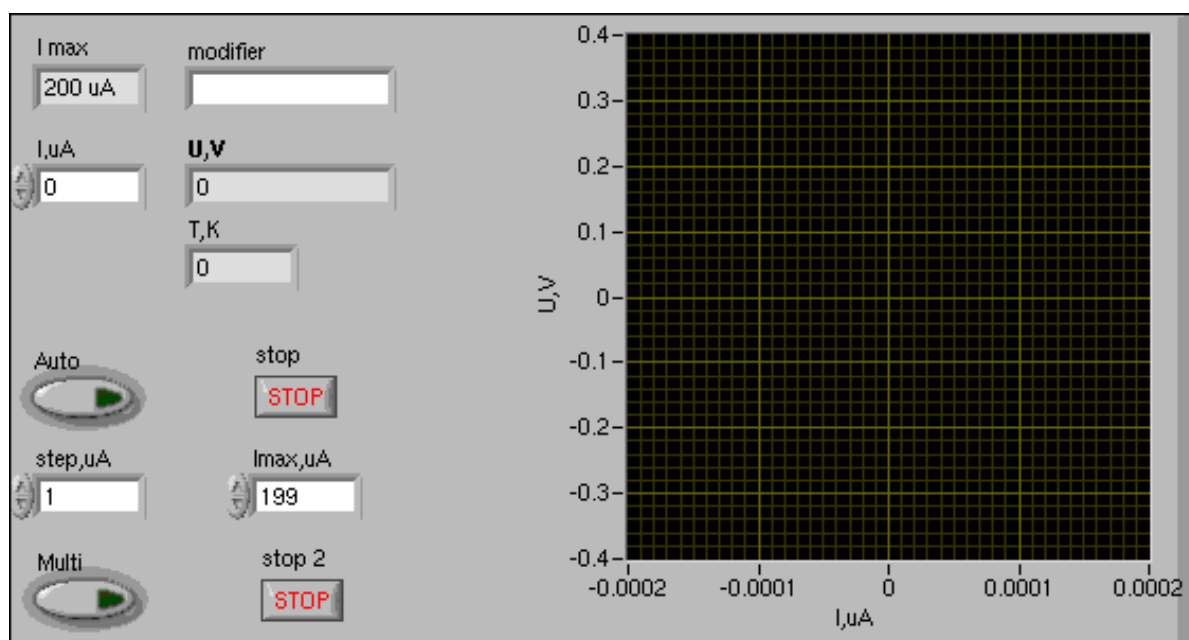


Рис. 4.4: Программа для измерения ВАХ с контролем температуры. Передняя панель



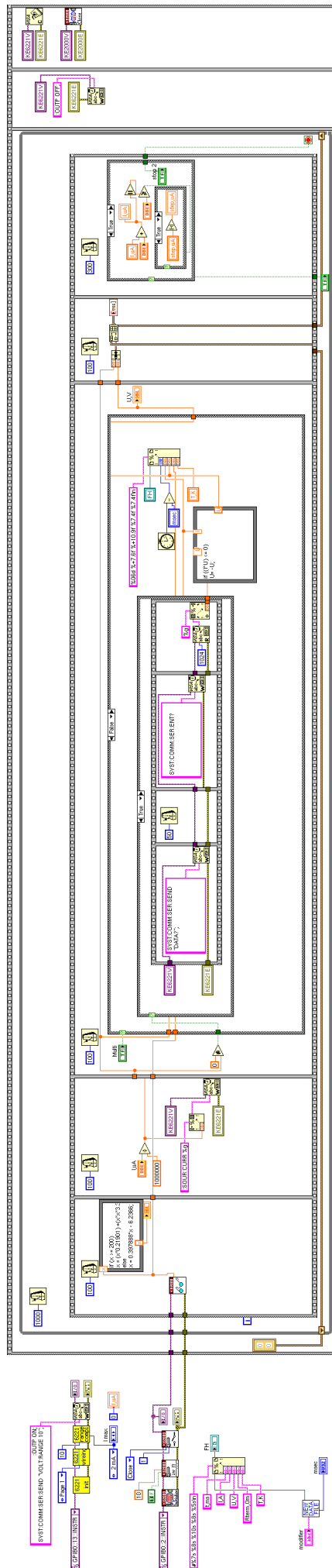


Рис. 4.6: Программа для измерения ВАХ с контролем температуры. Блок-схема

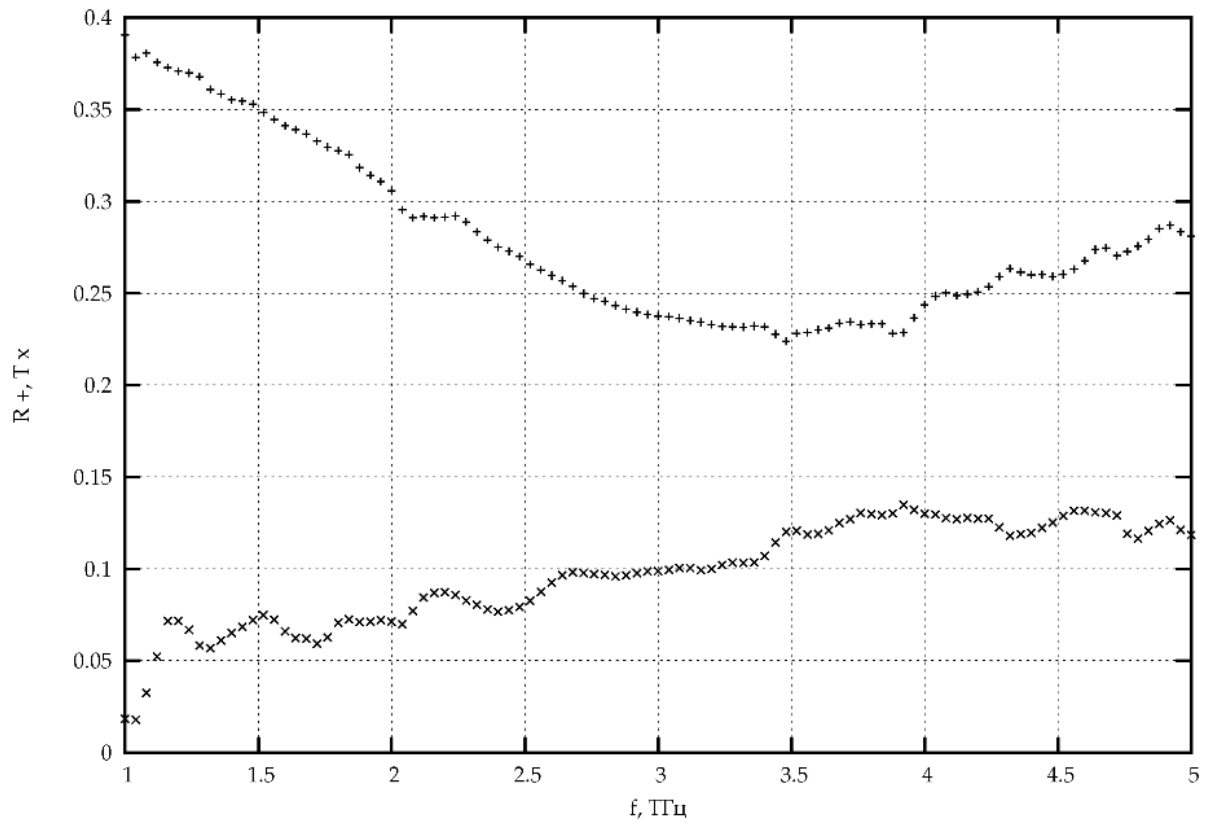


Рис.4. Спектр пропускания – x и спектр отражения -- + плёнки Bi толщиной 900 Å на 12 мкм полиимидной подложке, излучение падает со стороны полиимида

# Благодарности

Автор благодарен А.Ф.Андрееву за предоставленную возможность выполнить эту работу в ИФП РАН. Я глубоко признателен своему научному руководителю, Завьялову Виталию Вадимовичу, за неоценимую помощь и наставления. Спасибо Шиляеву А.А., Кику М. и Шампарову Е. за помощь и содержательные дискуссии. Также благодарю всех сотрудников ИФП РАН и кафедры физики и техники низких температур МФТИ.