

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИС-
СЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Микаева Анастасия Сергеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение характеристик пленок теллурида
свинца-олова**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18309

Научный руководитель:

м.н.с. Голяшов В. А.

Оценка научного руководителя

«_____» декабря _____ 2019г.

Преподаватель практикума:

доцент Костюрина А. Г.

Оценка преподавателя практикума

«_____» декабря _____ 2019г.

Куратор практикума:

к. т. н., доцент Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«_____» декабря _____ 2019г.

Новосибирск 2019

Аннотация

Целью работы являлось изучение влияния легирования индием на электрофизические свойства пленок теллурида свинца-олова $Pb_{1-x}Sn_xTe$ вблизи состава $x \sim 0.32$. Были изготовлены два образца в виде Холловских мостиков на основе эпитаксиальных пленок $Pb_{0.69}Sn_{0.31}Te$ и $Pb_{0.67}Sn_{0.32}In_{0.01}Te$. Измерены зависимости электрического сопротивления образцов от температуры и вольт-амперные характеристики, магнетополевые зависимости ЭДС Холла и магнетосопротивления образцов при температуре $T = 4.2$ К. Исходя из измерений, были рассчитаны удельное сопротивление материала, концентрация и подвижность носителей заряда. Обнаружено, что введение примеси индия в пленки $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с $x \sim 0.32$ приводит к увеличению удельного сопротивления пленок с $0,0005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до $2,2 \text{ МОм} \cdot \text{см}$. Полученные значения хорошо согласуются с уже известными из литературы данными. Результаты работы можно применить для оптимизации данных материалов для использования в фотоприемниках.

Ключевые слова: легирование индием, теллурид свинца-олова, Холловский мостик, магнетосопротивление, фотоприемники.

Содержание

1. Введение	4
2. Методика измерений и расчетов	5
3. Экспериментальная часть	7
4. Экспериментальные данные и их обработка	9
5. Основные результаты	13
6. Список литературы	13

1. Введение

Полупроводники – широкий класс веществ, у которых концентрация подвижных носителей заряда значительно ниже концентрации атомов, и может изменяться под влиянием температуры, освещения или присутствия примесей. Большая, чем у металлов, и меньшая, чем у диэлектриков, величина удельного сопротивления ρ является характерным признаком полупроводников.

Важной характеристикой полупроводников, которая определяет их электрические и оптические свойства, является величина ширины запрещённой зоны ε_g , разделяющей валентную зону и зону проводимости. При температуре, равной 0 К, состояния в валентной зоне полностью заняты электронами, а в зоне проводимости электроны отсутствуют. При температуре отличной от 0 К полупроводники приобретают электропроводность, так как часть электронов из валентной зоны из-за теплового движения переходит в зону проводимости, и в валентной зоне появляются свободные дырки, а в зоне проводимости – свободные электроны.

Примеси и дефекты структуры приводят к появлению состояний в запрещённой зоне, но таких состояний сравнительно мало, так что понятие запрещённой зоны сохраняет смысл. При небольшом значении ε_g нагревание даже до небольшой температуры приведет к разрыву значительного числа электронных связей и появлению большого числа свободных носителей. Кристалл приобретает способность проводить электрический ток [1].

Помимо использования в элементах электронных устройств и светоизлучающих приборов, полупроводники нашли широкое применение в фотоприемных устройствах. Например, на основе кремниевых структур создана большая часть приемников видимого и ближнего инфракрасного диапазона излучения ($\lambda \sim 200\text{--}1000$ мкм): КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) и ПЗС (прибор с зарядовой связью) матрицы видео и фотокамер, фотодиоды. Сейчас большой интерес представляет создание высокочувствительных приемников

для дальнего инфракрасного и терагерцового диапазона излучений. Длинноволновый край чувствительности полупроводниковых фотоприемников (ФП) определяется фундаментальным краем поглощения – шириной запрещенной зоны. В соединении $Pb_{1-x}Sn_xTe$ при $T = 4.2K$ при увеличении x ширина запрещенной зоны уменьшается от 0,2 эВ для $PbTe$ до 0 эВ при $x \sim 0.35$ эВ и затем растет до 0,3 эВ для $SnTe$ (рис. 1).

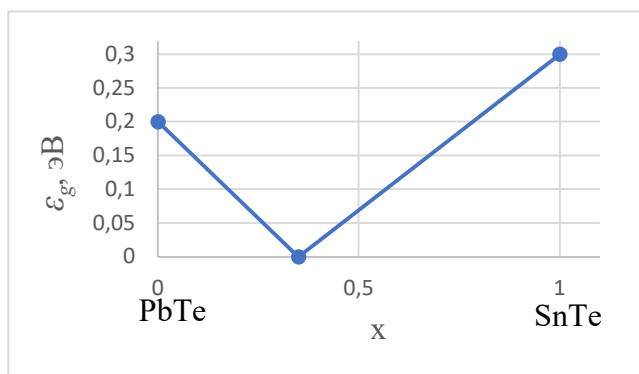


Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны ϵ_g от состава $Pb_{1-x}Sn_xTe$

На основе этого материала можно было бы создавать фотоприемники – фотосопротивления на практически любую длину волны. Но, поскольку для данного материала характерна высокая плотность электрически активных собственных дефектов, то значение темновой проводимости обычно оказывается

высоким и такие фотоприемники обладают низкой чувствительностью. Но известно, что при легировании индием возможно значительное снижение проводимости $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с составами $x \sim 0.3$ при криогенных температурах [2].

Целью работы является изучение влияния легирования индием на электрофизические свойства пленок теллурида свинца-олова $Pb_{1-x}Sn_xTe$ вблизи состава $x=0.32$ с шириной запрещенной зоны ~ 20 мэВ.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Провести измерение зависимости электрического сопротивления образцов от температуры и их вольт-амперные характеристики;
- 2) Измерить зависимости ЭДС Холла и величины магнетосопротивления образцов от магнитного поля.

2. Методика измерений и расчетов

Удельное сопротивление ρ (или проводимость σ), концентрация n и подвижность μ свободных заряженных частиц являются главными внутренними свойствами материала и не зависят от конкретной геометрии образца. Удельное сопротивление можно вычислить по формуле:

$$\rho = Rdh/l, \quad (1)$$

где R – электрическое сопротивление образца, d – ширина, h – толщина, l – длина.

Концентрацию и подвижность свободных носителей можно вычислить, измерив ЭДС Холла в образце. Эффект Холла был открыт в 1874 году Э. Х. Холлом. Электрический ток пропускается через полупроводниковый образец через контакты на обоих концах, в то время как магнитное поле $\mathbf{B}$ направлено перпендикулярно как к поверхности, так и к электрическому току, как показано на рисунке 2. Напряжение Холла перпендикулярно направлению протекания тока [3].

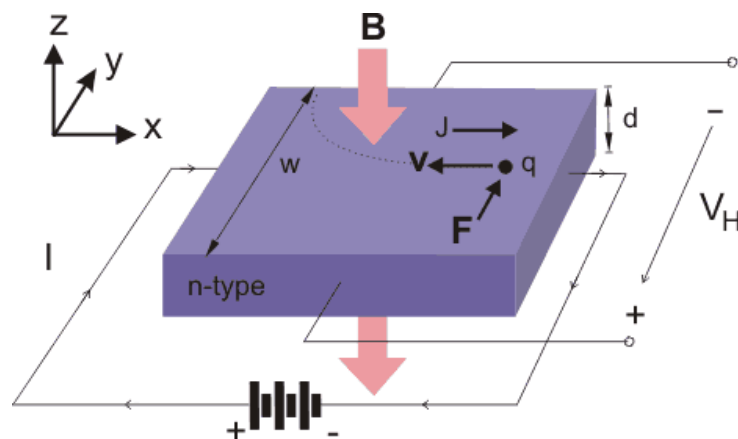


Рис. 2. Принципиальная схема эффекта Холла

Сила, действующая на движущиеся носители заряда в магнитном поле, (сила Лоренца) является комбинацией двух отдельных сил: электрической и магнитной. Когда электрон движется вдоль направления электрического поля, перпендикулярного приложенному магнитному полю, он испытывает влияние магнитной силы $q [\mathbf{B} \times \mathbf{V}]$, действующей перпендикулярно к обоим направлениям. Таким образом, результирующая сила Лоренца $\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}])$, где q – элементарный заряд, $\mathbf{E}$ – напряженность электрического поля, $\mathbf{V}$ – скорость частицы, а $\mathbf{B}$ – индуктивность магнитного поля.

Для полупроводника n-типа, носителями являются преимущественно электроны с объемной плотностью n . Мы предполагаем, что постоянный ток I течет вдоль оси x слева направо в присутствии z -направленного магнитного поля. Электроны, на которые действует сила Лоренца, вначале смещаются от направления тока к отрицательной оси y , что приводит к избыточному электрическому

заряду отрицательной поверхности на этой стороне образца. Этот заряд приводит к появлению напряжения Холла U_H , величина которого равна IB/qnd , где d - толщина образца. В некоторых случаях удобно использовать плотность слоя или листа ($n_s = nd$) вместо объемной плотности. Получается уравнение:

$$n_s = IB / q|U_H|. \quad (2)$$

Таким образом, измеряя напряжение Холла U_H и по известным значениям I , B и q , можно определить плотность n_s носителей заряда в полупроводниках. Напряжение Холла является отрицательным для полупроводников n-типа и положительным для полупроводников p-типа. Сопротивление R_s листа полупроводника можно определить с помощью метода измерения удельного сопротивления Ван-дер-Пау. Поскольку сопротивление листа включает в себя как плотность листа, так и подвижность, можно определить подвижность Холла из уравнения:

$$\mu = |U_H| / R_s IB = 1 / (qn_s R_s). \quad (3)$$

Толщина проводящего слоя d известна, можно определить удельную проводимость:

$$\sigma = 1/(R_s d), \quad (4)$$

и объемную плотность:

$$n = n_s/d. \quad (5)$$

3. Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента были выбраны два состава пленок теллурида свинца-олова $Pb_{1-x}Sn_xTe$, 345 ($x=31.4\%$) и 404 ($x=32\%$ и $1\% In$). Исследуемые пленки были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках BaF_2 с ориентацией (111). Образцы прямоугольной формы были отколоты от подложки с пленкой с помощью скрайбера, и по краям образцов были напаяны индиевые контакты таким образом, чтобы получилась структура в виде Холловского мостика. Схематическое изображение образцов показано на рисунке 3.

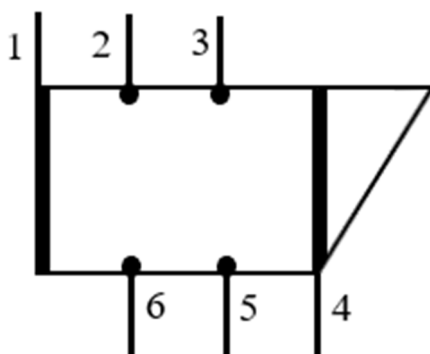


Рис. 3. Холловская структура подключения для проведения измерений

При помощи микроскопа, оснащенного мерной шкалой, было проведено измерение линейных размеров образцов. Толщина образцов задавалась в процессе роста пленок и была известна. Размеры образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Размеры образцов №345 и №404

№ образца	345	404
d, мкм	1,4	1,4
l_{14} , мм	4,6	5
l_{23} , мм	1,6	1,6
l_{26} , мм	1,52	1,4

Образцы закреплялись на специальный держатель, который помещался внутри сверхпроводящего соленоида таким образом, чтобы плоскость образца была перпендикулярна оси соленоида и создаваемому в нем магнитному полю. Вся конструкция опускалась в сосуд Дьюара с жидким гелием для дальнейшего охлаждения до температуры $\approx 4,2$ К. Схема экспериментальной установки изображена на рисунке 4.

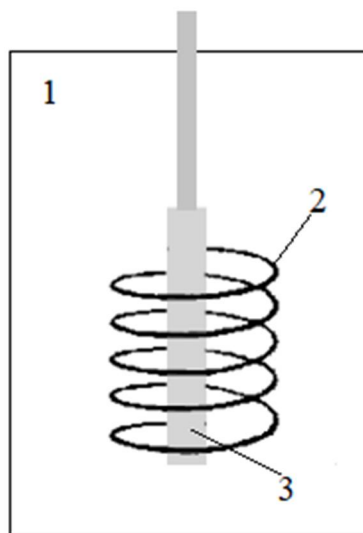


Рис. 4. Экспериментальная установка: 1 – сосуд с жидким гелием; 2 – магнитная катушка; 3 – держатель с образцом

Для измерения сопротивления между контактами 1 и 4 пропусклся постоянный ток и измерялось падение напряжения на них с помощью источника-измерителя Keithley 2450, также измерялось падение напряжения между контактами 2 и 3 с помощью вольтметра Keithley 2000.

При опускании образца в соленоиде в сосуд Дьюара одновременно регистрировались сопротивление и температура образца при помощи термометра-сопротивления, и таким образом измерялась зависимость сопротивления от температуры. При достижении температуры жидкого гелия с помощью источника-измерителя Keithley 2450 регистрировалась вольт-амперная характеристика образца на контактах 1-4. Для измерения зависимости магнетосопротивления и эффекта Холла от магнитного поля между контактами 1 и 4 с помощью источника-измерителя Keithley 2450 пропусклся постоянный ток и с помощью вольтметра Keithley 2000 измерялось падение напряжения между контактами 2 и 3 либо 2 и 6 соответственно. Магнитное поле задавалось программируемым биполярным источником тока. После окончания эксперимента с образцом $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$ такие же измерения проводятся для $\text{Pb}_{0,67}\text{Sn}_{0,32}\text{In}_{0,01}\text{Te}$, ожидая, что полученные характеристики для двух образцов будут отличаться.

4. Экспериментальные данные и их обработка

При проведении эксперимента были исследованы два различающихся состава пленок теллурида свинца-олова ($\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$ и $\text{Pb}_{0,67}\text{Sn}_{0,32}\text{In}_{0,01}\text{Te}$). Для сравнения двух образцов были получены зависимости удельного сопротивления от температуры и вольт-амперные характеристики для каждого. По полученным

данным построены графики (рис. 5 и рис. 6), которые показывают интересные зависимости наглядно.

Сопротивления $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$ с понижением температуры от комнатной до 40 К уменьшалось, то есть проявлялись металлические свойства. При уменьшении температуры образца ниже 40 К характер изменения сопротивления становился полупроводниковым и сопротивление начинало незначительно расти (рис. 5, а). Для образца $\text{Pb}_{0,67}\text{Sn}_{0,32}\text{In}_{0,01}\text{Te}$ сопротивление изначально при охлаждении постепенно увеличивалось, а затем стало резко возрастать при температуре ниже 50К, достигая значения 2,2 МОм·см при температуре жидкого гелия (рис. 5, б). Таким образом при легировании индием удельное сопротивление пленок $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$ увеличилось с 0,0005 Ом·см до 2,2 МОм·см при $T = 4,2$ К. Уменьшение проводимости пленок $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$ при легировании индием можно объяснить снижением концентрации свободных носителей в пленке из-за захвата их на примесные центры In [2].

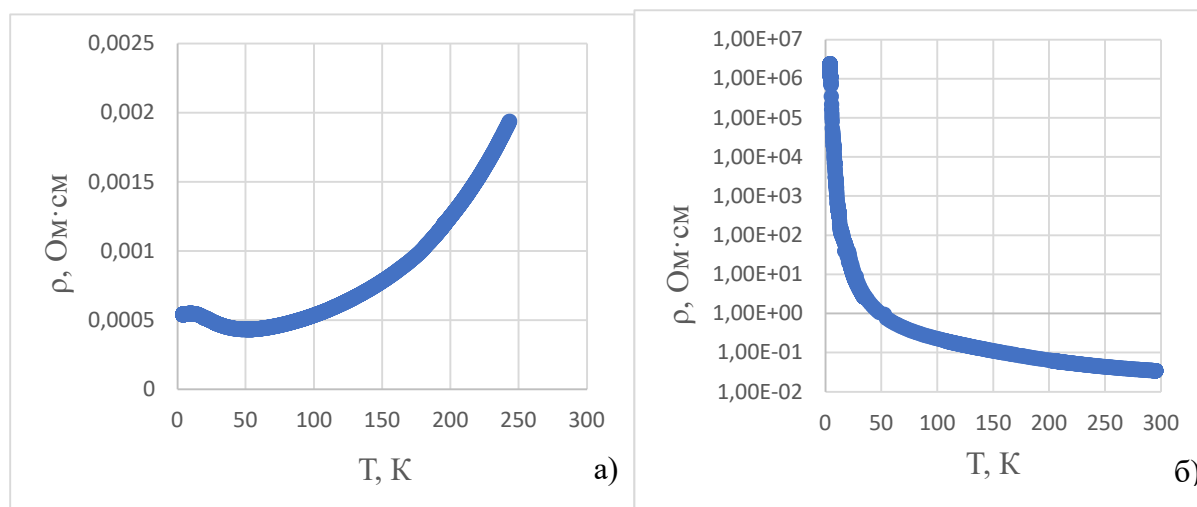


Рис. 5. Зависимость сопротивления от температуры а) образец $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$, б) образец $\text{Pb}_{0,67}\text{Sn}_{0,32}\text{In}_{0,01}\text{Te}$

Вольт-амперная характеристика при $T = 4,2$ К для образца $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$ является линейной (рис. 6, а), когда как для образца $\text{Pb}_{0,67}\text{Sn}_{0,32}\text{In}_{0,01}\text{Te}$ наблюдается ее сильная нелинейность (рис. 6, б). В полупроводниках с очень низкой собственной концентрацией носителей проводимость обычно описывается в рамках тео-

рии токов, ограниченных пространственным зарядом, и определяется носителями, инжектируемыми из контактов. Для данного режима протекания тока ожидалась квадратичная зависимость тока от приложенной разности потенциалов. В эксперименте наблюдается, что при напряжениях до 20 В ток через образец практически не меняется и составляет менее 200 пА. Эта область определяется, по-видимому, собственной проводимостью образца, инжектируемые из контактов носители полностью захватываются на примесные центры In. В области напряжений от 20 до 100 наблюдается близкая к ожидаемой квадратичной зависимость тока от напряжения. При увеличении напряжения более 100 В рост тока с напряжением ускоряется, что может означать уровень инжекции, при котором все примесные центры оказываются заполненными носителями.

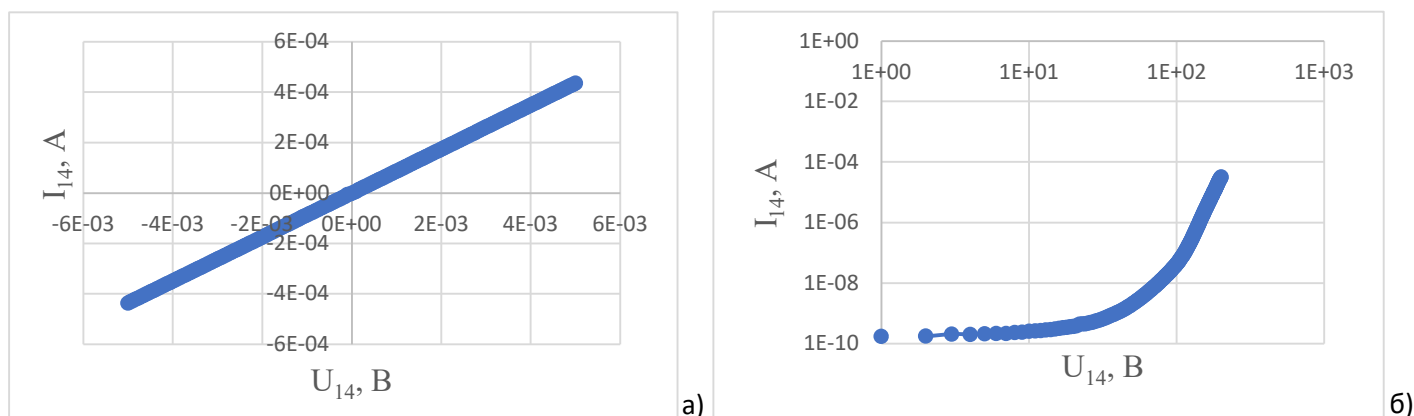


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика а) образец $Pb_{0,69}Sn_{0,31}Te$, б) образец $Pb_{0,67}Sn_{0,32}In_{0,01}Te$

ЭДС Холла в $Pb_{0,69}Sn_{0,31}Te$ зависит от магнитного поля линейно (рис. 7), и составляет $\sim 10^{-5}$ В при 0,1 Тл. Угол наклона графика зависимости ЭДС Холла положителен, из этого следует, что знак свободных носителей заряда положительный. То есть в данном образце основным типом носителей заряда являются дырки. На графике видно, что при нулевой величине магнитного поля наблюдается ненулевое значение измеренного на контактах 2-3 напряжения, что связано с не идеальностью расположения контактов 2 и 3 относительно друг друга и, соответственно, появлением вклада сигнала магнетосопротивления.

На основе измеренного ЭДС Холла можем вычислить необходимые данные для образца $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$. Концентрация n_s , рассчитанная по формуле (2), получилась равна $3,241\text{E}+14\text{ см}^{-2}$. Тогда концентрация n , пересчитанная по формуле (5), равна $2,3\text{E}+18\text{ см}^{-3}$. Подвижность μ , которую мы находим, используя формулу (3), имеет значение $9,9\text{E}+04\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Удельная проводимость σ , рассчитанная с использованием формулы (4), равна $1,11\text{E}+05\text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$.

Величина магнетосопротивления для $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$ оказалась $\sim 10\text{ Ом}$, причем из графика (рис. 8) видно, что при увеличении наведенного магнитного поля, магнетосопротивление увеличивается. Для данной зависимости ожидался квадратичный вид. Исходя из полученного графика можно утверждать, что положительная и отрицательные ветви практически симметричны. Наличие магнетосопротивления может означать присутствие неоднородностей в исследуемом образце.

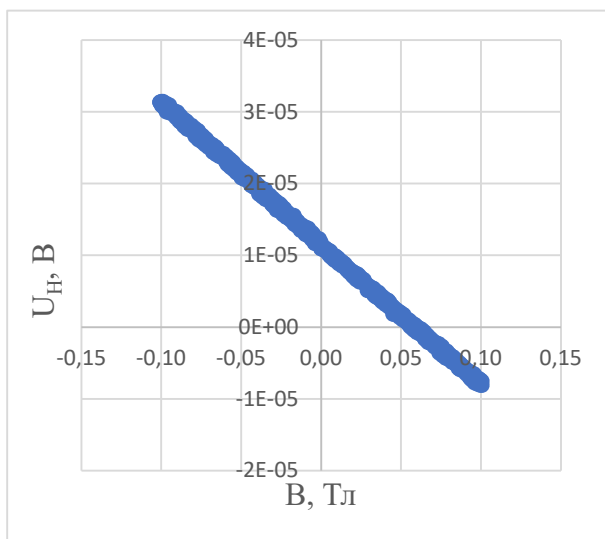


Рис. 7. Зависимость ЭДС Холла от наведенного магнитного поля для образца $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$

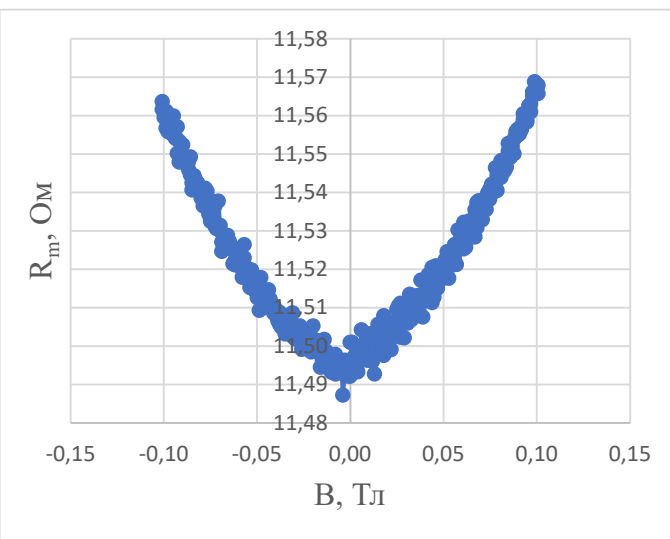


Рис. 8. Зависимость магнитного сопротивления от наведенного магнитного поля для $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$

Для образца $\text{Pb}_{0,67}\text{Sn}_{0,32}\text{In}_{0,01}\text{Te}$ ЭДС Холла и магнетосопротивление измерить оказалось невозможно, так как при низких температурах значение сопротивления образца гораздо выше, чем входное сопротивление используемых измерительных приборов.

5. Основные результаты

В ходе работы было исследовано влияния легирования индием на электрофизические свойства пленок теллурида свинца-олова $Pb_{1-x}Sn_xTe$ вблизи состава $x \sim 0.32$. Были изучены методы измерения ЭДС Холла и магнетосопротивления. Измерены и представлены наглядно зависимости удельного сопротивления от температуры, ЭДС Холла от подаваемого напряжения, магнетосопротивления от наведенного магнитного поля, а также вольт-амперные характеристики. Измерения проведены для двух образцов $Pb_{0.69}Sn_{0.31}Te$ и $Pb_{0.67}Sn_{0.32}In_{0.01}Te$. Наглядно продемонстрированы различия характеристик для образца без примеси и с примесью индия. Рассчитаны значения концентрации свободных носителей, подвижности и удельной проводимости для теллурида свинца-олова при температуре жидкого гелия. Полученные значения хорошо согласуются с уже известными из литературы данными [2], [4]. Результаты работы можно применить для оптимизации использования данных материалов в устройстве фотоприемников.

6. Список используемой литературы

1. Левинштейн М. Е., Симин Г. С. Барьеры (От кристалла до интегральной схемы). М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 320 с. (Б-чка «Квант», вып. 65), с. 12-16.
2. Sadao Takaoka, Takashi Itoga and Kazuo Murase. Investigation of Transport Properties in $Pb_{1-x}Sn_xTe$ Doped with Indium. Department of Physics, Faculty of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, 1983. 560 pages.
3. URL: <http://britneyspears.ac/physics/halleffect/hall.htm> (дата обращения: 30.11.2019)
4. Su-Yang Xu, Chang Liu, N. Alidoust, M. Neupane, D. Qian, I. Belopolski, J. D. Denlinger, Y. J. Wang, H. Lin, L. A. Wray, G. Landolt, B. Slomski, J. H. Dil, A. Marcinkova, E. Morosan, Q. Gibson, R. Sankar, F.C. Chou, R.J. Cava, A. Bansil and M.Z. Hasan. Observation of a topological crystalline insulator phase and topological phase transition in $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Nature Communications, Vol. 3, 2012, 1192.