

НАБЛЮДЕНИЕ МАГНИТНОГО КВАНТОВАНИЯ В
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ СИСТЕМЫ ВИСМУТ-
СУРЬМА

Демидов Е.В., Комаров В.А., Каблукова Н.С., Крушельницкий А.Н.,
Шварц О.А.

Российский государственный педагогический университет
им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия
nik_1983@mail.ru

Введение

В предыдущей статье «Методика получения и структура монокристаллических пленок твердого раствора висмут – сурьма» описана методика получения монокристаллических пленок сплава висмут-сурьма на подложках из слюды и полиимида. Монокристалличность и однородность распределением сурьмы по объему получаемых пленок подтверждена комплексом экспериментальных методов: рентгеноструктурный анализ, металлографический метод, метод сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским анализатором.

Одним из критериев высокого совершенства структуры полуметаллов и узкозонных полупроводников, является наблюдение в них осцилляций гальваномангнитных коэффициентов в сильных магнитных полях вблизи гелиевых температур.

Наиболее распространенный метод изучения квантовых осцилляций в проводящих системах — наблюдение осцилляций проводимости (сопротивления) в магнитном поле. Это явление — эффект Шубникова - де Гааза — впервые было обнаружено в 1930 году при исследовании магнетосопротивления монокристаллов Bi в области температур около 10 К. Была обнаружена осциллирующая зависимость холловского сопротивления от магнитного поля, при азотных температурах осцилляции не наблюдались.

В объемном образце с вырожденным электронным газом при низкой температуре в магнитном поле происходит квантование энергетического спектра носителей заряда в плоскости, перпендикулярной направлению поля. В случае простой зоны проводимости энергия электрона, находящегося на n -ом уровне Ландау и обладающего в направлении поля импульсом p_z , имеет вид

$$E_{n,p_z} = \hbar\omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right) + \frac{p_z^2}{2m}, \quad (1)$$

где \hbar - постоянная Планка, $\omega_c = \frac{eH}{mc}$ циклотронная частота, H — величина напряженности магнитного поля (предполагается, что поле направлено по оси z), m и e — соответственно эффективная масса и заряд электрона, c — скорость света. Образование подзон Ландау приводит к появлению осцилляций в плотности электронных состояний $N(E)$, максимумы $N(E)$ находятся вблизи $E = \hbar\omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right)$. Для наблюдения данных эффектов очень важной является монокристаллическая структура образцов.

Кинетические параметры (в том числе и проводимость) в структурах с вырожденным электронным газом определяются электронами, находящимися на поверхности Ферми, т.е. с энергией $E_{n,p} = \mu$. Поэтому и значение плотности состояний на поверхности Ферми $N(\mu)$ влияет на эти параметры. При увеличении магнитного поля интервалы между уровнями Ландау расширяются, максимумы и минимумы плотности состояний последовательно проходят через уровень Ферми, что и приводит к появлению осцилляций проводимости. Кроме того, с ростом магнитного поля увеличивается параметр $\omega_c \tau$ (τ - характерное время релаксации носителей заряда), что приводит к нарастанию амплитуды осцилляций.

Частота осцилляций в обратном поле пропорциональна μ . Это позволяет использовать эффект Шубникова - де Гааза для определения концентрации носителей заряда. Эффект Шубникова - де Гааза в объемных материалах широко изучен экспериментально и теоретически и является надежным инструментом исследования как энергетического спектра, так и кинетических параметров носителей заряда.

Исследованию эффекта Шубникова - де Гааза в низкоразмерных структурах висмута посвящено единичное число работ [1-3]. В литературе отсутствуют указания по экспериментальному наблюдению данного эффекта в пленках сплава висмут-сурьма, вероятно, по причине сложности получения тонкопленочных образцов твердого раствора висмут-сурьма с высоким совершенством структуры.

Методика эксперимента:

Монокристаллические пленки системы висмут-сурьма получены методом зонной перекристаллизации под покрытием. В качестве подложек использовались слюда (мусковит) и полиимид. Исследованы пленки Bi и $Bi_{0,97}Sb_3$, толщиной 300 нм и 1 мкм. Исследование магнитных осцилляций магнетосопротивления и Холловского напряжения проводилось вблизи гелиевых температур в интервале полей от 0 до 14 Тл в постоянном магнитном поле с использованием безжидкостной гелиевой криомагнитной системы CryoFree404 лаборатории полуметаллов РГПУ им.

А. И. Герцена и оборудования Международной Лаборатории Сильных Магнитных Полей и Низких Температур, Вроцлав, Польша.

Экспериментальные результаты и их обсуждение:

Обнаружены осцилляции магнетосопротивления и Холловского напряжения в монокристаллических пленках сплава висмут-сурьма на подложках из слюды и полиимида.

На рисунке 1 представлены осцилляции продольного магнетосопротивления пленки $\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_3$ толщиной 300 нм.

Период осцилляций связан с фактической площадью поперечного сечения поверхности Ферми. Лифшицем и Онзагером было показано, что для произвольного закона дисперсии и формы поверхности Ферми (ПФ) частота осцилляций $F=P^{-1}$ связана с экстремальным сечением ПФ плоскостью, перпендикулярной магнитному полю, соотношением:

$$P = \frac{e\hbar}{cS}, \text{ где } S - \text{ площадь экстремального сечения ПФ}$$

плоскостью, перпендикулярной магнитному полю.

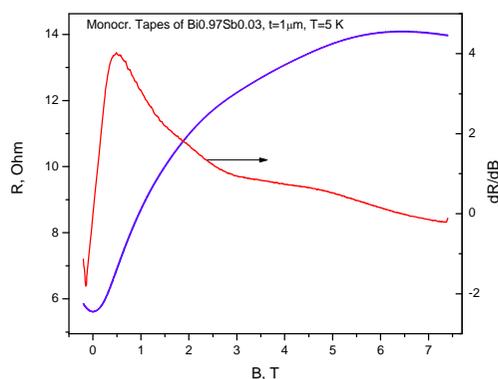


Рис. 1. Продольное магнетосопротивление и его производная по полю в пленке $\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_3$ толщиной 300 нм на полиимиде при 5К.

Так как на пленках висмут-сурьма амплитуда осцилляций магнетосопротивления мала, было проведено исследование осцилляций на сигнале Холловского напряжения. Такие осцилляции имеют большую амплитуду по сравнению с магнетосопротивлением, что позволяет с большей точностью определять период осцилляций. На рисунках 2 и 3 представлены графики осцилляций Холловского напряжения.

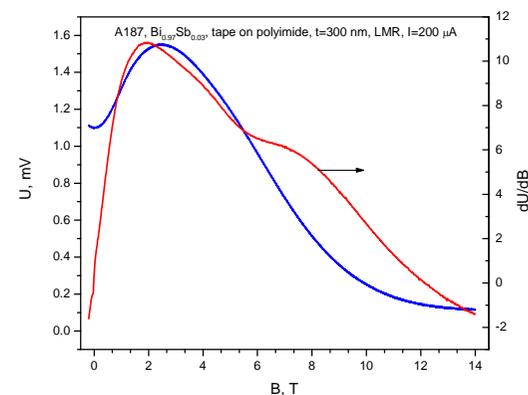


Рис. 2 Холловское напряжение и его производная по полю пленке $\text{Bi}_{0.97}\text{Sb}_3$ толщиной 300 нм при 5К на полиимиде.

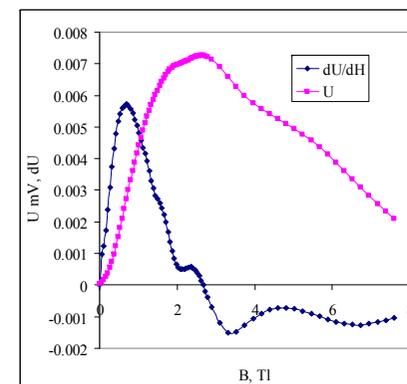


Рис 3 Холловское напряжение и его производная по полю в пленке Bi толщиной 1 мкм при 5К на слюде.

Совокупность полученных экспериментальных данных приведена в таблице 1. Период осцилляций для чистого висмута в массивном состоянии приблизительно около $2 \cdot 10^{-5} \text{ Э}^{-1}$. Из оценки периода осцилляций для пленок $\text{Bi}_{97}\text{Sb}_3$ толщиной 1 мкм, видим, что площадь перпендикулярного сечений поверхности Ферми в пленке на слюде близка к поверхности Ферми в массивном висмуте. В пленке на полиимиде судить о характере изменения сечения сложно, так как вектор магнитной индукции в эксперименте был перпендикулярен нормали к пленке.

Таблица 1

	Bi толщиной 1 мкм на слоде	Bi ₉₇ Sb ₃ толщиной 1 мкм на полиимиде	Bi ₉₇ Sb ₃ толщиной 0.3 мкм на полиимиде
Период осцилляций	$2 \cdot 10^{-3} \text{ Ое}^{-1}$	$2.05 \cdot 10^{-3} \text{ Ое}^{-1}$	$1.25 \cdot 10^{-5} \text{ Ое}^{-1}$
Интервал магнитного поля, где наблюдаются осцилляции	1.5 – 8 Тл	1.5 – 8 Тл	4 – 14 Тл
Направление поля	$B \parallel C3$, осцилляции на холловской ЭДС	$B \perp C3$, осцилляции на магнето- сопротивлении	$B \perp C3$, осцилляции на магнетосопротивлении
Площадь экстремального сечения, (кг·м/сек) ²	$5.3 \cdot 10^{-52}$	$5.17 \cdot 10^{-52}$	$8.48 \cdot 10^{-52}$

Вывод: Наблюдение магнитных осцилляций магнетосопротивления и Холловского напряжения в монокристаллических пленках сплава висмут-сурьма, полученных методом зонной перекристаллизации под покрытием, показывает высокое совершенство их структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания №2014/376 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности, проект № 59.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang, F.Y., Liu, K., Hong, K., Reich, D.H., Searson, P.C., Chien, C.L., Leprince-Wang, Y., Yu-Zhang, K., Han, K. Shubnikov-de Haas oscillations in electrodeposited single-crystal bismuth films // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics. V 61, №10, 2000, P. 6631-6636.

2. Shim, W., Ham, J., Kim, J., Lee, W. Shubnikov-de Haas oscillations in an individual single-crystalline bismuth nanowire grown by on-film formation of nanowires// Applied Physics Letters 2009. 95 (23), art. no. 232107.

3. Kim, J., Ham, J., Shim, W., Lee, K.-I., Jeon, K.J., Jeung, W.Y., Lee, W. Shubnikov-de Haas oscillations in an individual single-crystalline semimetal bismuth nanowire// Korean Journal of Materials Research. 2008. 18 (2) , P. 103-106.