

Гальваномагнитные свойства тонких пленок $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ на различных подложках

© В.А. Комаров, А.В. Суслов, М.В. Суслов

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
191186 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: va-komar@yandex.ru

(Получена 12 декабря 2016 г. Принята к печати 19 декабря 2016 г.)

Представлены результаты исследования гальваномагнитных свойств тонких блочных пленок $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ на подложках с различным коэффициентом температурного расширения. Выявлено большое влияние различия температурного расширения материала пленки и подложки на гальваномагнитные свойства пленок. Анализ свойств пленок в рамках двухзонной модели показал, что различие свойств пленок на различных подложках связано с изменением концентрации и подвижности носителей заряда. Показано, что для исследованного состава пленок уменьшение коэффициента температурного расширения материала подложки приводит к уменьшению концентрации носителей заряда, что указывает на значительное отличие в изменении зонной структуры пленок по сравнению с изменениями, происходящими при увеличении концентрации сурьмы.

DOI: 10.21883/FTP.2017.06.44546.05

1. Введение

В работах, выполненных в нашей лаборатории, неоднократно отмечалось, что температурные зависимости гальваномагнитных и термоэлектрических свойств пленок полуметаллов в значительной степени формируются вследствие различия температурного расширения материала пленки и подложки [1,2]. Это различие температурного расширения приводит к значительной плоскостной деформации пленки, которая сопровождается изменением зонной структуры материала пленки. Если для пленок висмута влияние деформации рассмотрено достаточно подробно, то для пленок висмут–сурьма оно носит фрагментарный характер и в основном для концентраций сурьмы меньше 12 ат%.

В настоящей работе представлены результаты исследования гальваномагнитных свойств тонких пленок $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ на подложках с различным коэффициентом температурного расширения.

2. Методика эксперимента

Тонкие пленки $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ получены методом дискретного термического напыления в вакууме 10^{-5} Торр. Исходным веществом для напыления являлись кусочки кристалла твердого раствора.

Все образцы тонких пленок $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ были получены при одинаковых технологических режимах: температура подложки 410 К, температура отжига 540 К, время отжига 30 мин.

Коэффициенты температурного расширения материалов подложки

Подложка	Si	СТ-32	СТ-50	Стекло	CaF ₂	NaCl
$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$	1.1	3.2	5.0	8	18	39

В качестве подложек были выбраны окисленный кремний, ситалл марок СТ-32 и СТ-50, стекло покровное, скол монокристалла CaF₂, скол монокристалла NaCl. Выбранные материалы подложек имеют различный коэффициент температурного расширения (КТР), значения которого представлены в таблице.

КТР висмута в тригональной плоскости составляет $10.5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ и несколько уменьшается при введении сурьмы. Таким образом, среди использованных подложек есть подложки как с большим, так и с меньшим температурным расширением, чем материал пленки.

Структура полученных пленок исследовалась с помощью методов рентгеноструктурного анализа и атомно-силовой микроскопии с использованием химического травления.

Контроль состава исходного вещества и полученной пленки проводился методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Гальваномагнитные свойства, а именно удельное сопротивление, магнетосопротивление и коэффициент Холла были исследованы в диапазоне температур 77–300 К и магнитном поле до 0.7 Тл.

3. Экспериментальные результаты

Исследование структуры полученных пленок показало, что они имеют блочную структуру с преимущественной ориентацией оси C_3 перпендикулярно плоскости подложки. Размеры блоков составляют от 1–2 мкм на аморфных подложках и ситаллах и до 5 мкм на кристаллических подложках.

Результаты исследования гальваномагнитных свойств на примере пленок толщиной 0.75 мкм представлены на рис. 1–3.

Как видно из рис. 1, температурные зависимости удельного сопротивления пленок на всех используемых подложках имеют полупроводниковый характер. Наблюдается тенденция уменьшения удельного сопротивления

пленок с увеличением КТР подложки. Следует отметить увеличение различия удельного сопротивления пленок на различных подложках с уменьшением температуры. Так, при 77 К удельное сопротивление пленки на кремнии больше, чем на NaCl, примерно в 5 раз.

Магнетосопротивление пленок на всех подложках возрастает с понижением температуры, однако его значение при 77 К уменьшается с ростом КТР подложки (рис. 2). Отклонения от четкой взаимосвязи с КТР подложки связаны с различной структурой пленок на разных подложках. Учитывая то, что магнетосопротивление связано с подвижностью свободных носителей заряда, можно ожидать, что в пленках на подложках с большим КТР она имеет меньшую величину.

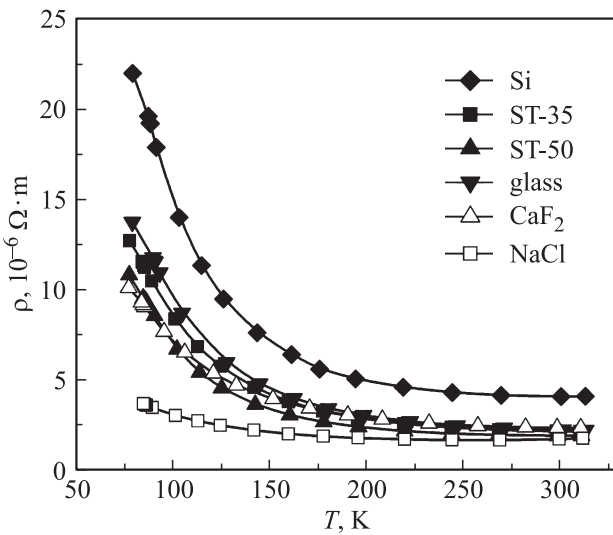


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления пленок $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ толщиной 0.75 мкм на различных подложках.

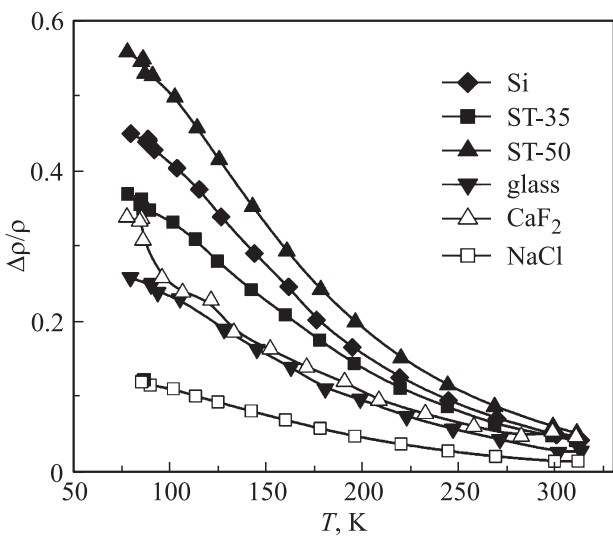


Рис. 2. Температурные зависимости относительного магнетосопротивления пленок $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ толщиной 0.75 мкм на различных подложках ($B = 0.35$ Тл).

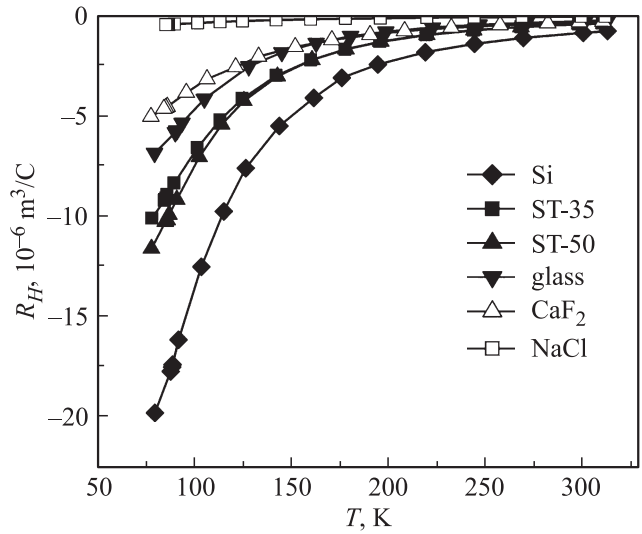


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента Холла пленок $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ толщиной 0.75 мкм на различных подложках.

Коэффициент Холла всех пленок (рис. 3) имеет отрицательный знак во всем исследованном интервале температур, как и соответствующая компонента для монокристалла того же состава. При уменьшении температуры коэффициент Холла увеличивается по абсолютной величине. Значение коэффициента Холла пленки при 77 К зависит от КТР подложки: чем меньше КТР подложки, тем больше коэффициент Холла по абсолютной величине.

Такое большое различие коэффициента Холла может указывать на изменение соотношения между подвижностями электронов и дырок в пленках на различных подложках или на различную концентрацию носителей заряда в этих пленках. Аналогичные зависимости получены при исследовании пленок другой толщины: 0.5 и 1 мкм.

Используя полученные экспериментальные результаты, был проведен расчет концентрации и подвижности носителей заряда в двухзонном приближении и условия равенства концентрации свободных электронов и дырок. Учитывая кристаллографическую ориентацию пленок, удельное сопротивление, магнетосопротивление и коэффициент Холла, измеряемые в пленках $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$, соответствуют компонентам удельного сопротивления (ρ_{11}), магнетосопротивления ($\rho_{11,33}$) и коэффициента Холла ($R_{12,3}$) монокристалла и могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{1}{\rho_{11}} = e p u^+ + \frac{1}{2} e n [\bar{u}_1 + \bar{u}_2],$$

$$\rho_{11,33} = -\rho_{11}^2 \left[e p \bar{u}^{+3} + \frac{1}{2} e n \bar{u}_1 \bar{u}_2 (\bar{u}_1 + \bar{u}_2) \right] - \frac{R_{12,3}^2}{\rho_{11}},$$

$$R_{12,3} = -\rho_{11}^2 [e p \bar{u}^{+2} - e n \bar{u}_1 \bar{u}_2],$$

где e — заряд электрона, n и p — концентрации электронов и дырок, \bar{u}_1 , \bar{u}_2 и u^+ — компоненты подвижности

электронов и дырок. Результаты расчета представлены на рис. 4–6.

Как видно из представленных результатов, концентрация носителей заряда в пленках $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ на различных подложках зависит от КТР материала подложки. При одинаковой температуре меньшему значению КТР подложки соответствует меньшее значение концентрации носителей заряда в пленке $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$.

Некоторый разброс в зависимости концентрации носителей заряда от КТР подложки для пленок на ситаллах может быть связан с большей разориентацией кристаллитов в этих пленках. Разброс в зависимости может быть вызван частичным снятием деформаций в пленках при большом различии КТР материала пленки и подложки.

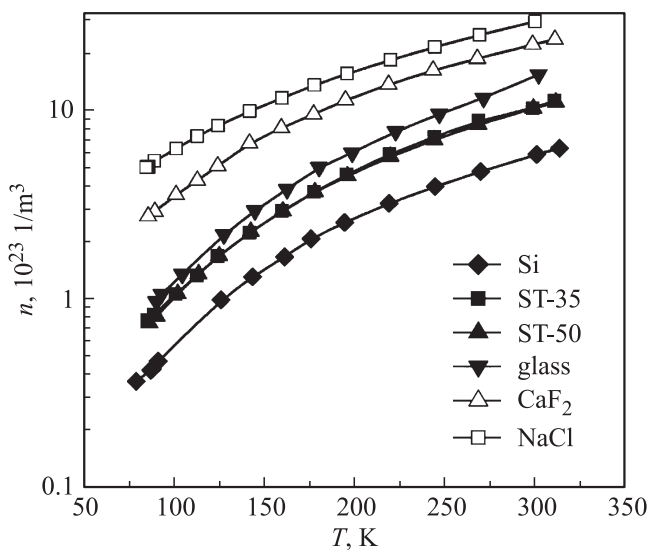


Рис. 4. Температурные зависимости концентрации носителей заряда в пленках $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ толщиной 0.75 мкм на различных подложках.

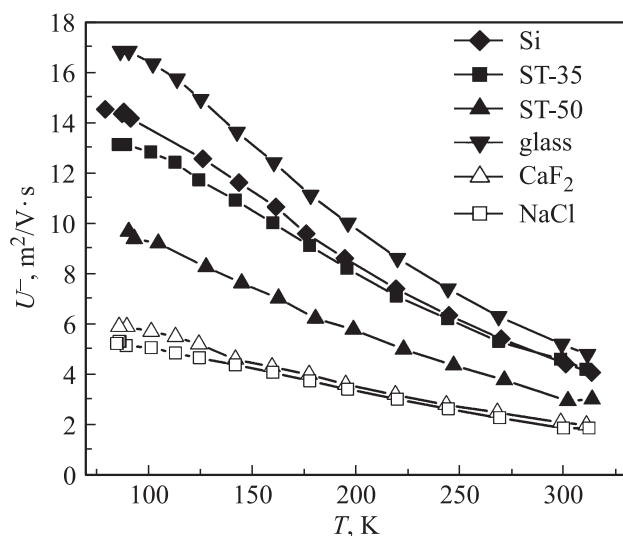


Рис. 5. Температурные зависимости подвижности электронов в пленках $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ толщиной 0.75 мкм на различных подложках.

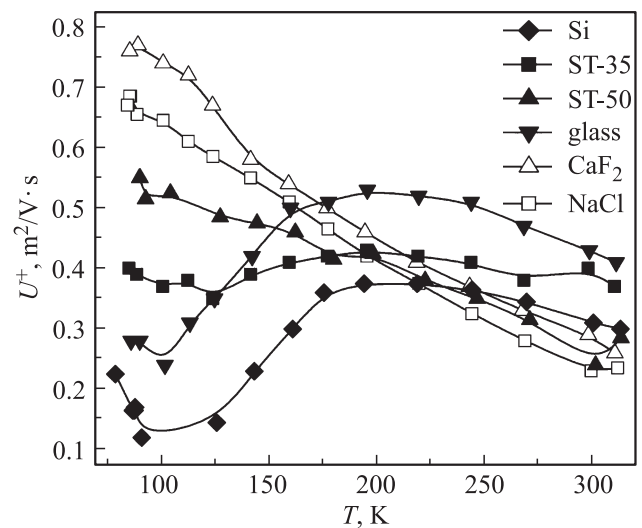


Рис. 6. Температурные зависимости подвижности дырок в пленках $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ толщиной 0.75 мкм на различных подложках.

Подвижности электронов возрастают при понижении температуры, при этом наблюдается соответствие между КТР подложки и значениями подвижности электронов в пленке: меньшему значению КТР подложки соответствует большее значение подвижности. Некоторое отклонение от такого соответствия связано с различием блочной структуры пленок.

Зависимости подвижности дырок от температуры имеют сложный немономонный характер. Можно выделить некоторую закономерность изменения этой зависимости от КТР подложки. Моновольное увеличение подвижности дырок наблюдается только в пленках на подложках с КТР примерно равным или большим, чем у материала пленки. На подложках с КТР с меньшим, чем у пленки, понижением температуры подвижность дырок сначала возрастает, достигает максимума и начинает уменьшаться. На подложках с самым маленьким КТР (Si) формируется минимум, после чего подвижность дырок начинает возрастать.

4. Заключение

Как показано в целом ряде работ [1–3], выполненных в нашей лаборатории, такое сильное влияние КТР подложки на свойства пленки Bi и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ обусловлено плоскостной деформацией в системе пленка–подложка, возникающей из-за различия КТР материала пленки и подложки. Учитывая кристаллографическую ориентацию пленки, эту деформацию можно представить как плоскостное растяжение или сжатие в тригональной плоскости. Такая деформация эквивалентна одноосной деформации вдоль оси C_3 . Как показано в работах по исследованию монокристаллов висмута и системы висмут–сурьма, при одноосных деформациях вдоль оси C_3 происходит изменение перекрытия или зазора между валентной зоной и зоной проводимости в актуальных

точках зоны Бриллюэна, сопровождающееся изменением концентрации носителей заряда [4]. Для составов с концентрацией сурьмы менее 12 ат% деформация, эквивалентная одноосному сжатию вдоль C_3 , приводит к уменьшению концентрации свободных носителей заряда. Такую деформацию испытывают пленки на подложках с малым КТР при температуре меньше температуры формирования пленки. На подложках с КТР, большим, чем у материала пленки, она испытывает деформацию, эквивалентную одноосному растяжению вдоль оси C_3 , которая приводит к увеличению перекрытия валентной зоны и зоны проводимости. Оно сопровождается увеличением концентрации носителей заряда.

Учитывая особенности зонной структуры состава с содержанием 15 ат% сурьмы, следовало ожидать увеличение концентрации носителей заряда при одноосном сжатии, т.е. в пленке на подложке с малым КТР. Однако полученные экспериментальные результаты дают уменьшение концентрации носителей заряда в пленках на подложках с малым КТР. Это указывает на то, что происходят более сложные изменения зонной структуры не совпадающие с изменениями происходящими при увеличении концентрации сурьмы в материале пленки. На данном этапе работы дать ответ о происходящих изменениях в зонной структуре пленки не представляется возможным. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания на выполнение работ в сфере научной деятельности.

Список литературы

- [1] В.А. Комаров. В сб.: *Термоэлектрики и их применения. Докл. VIII Межгос. семинара* (ноябрь 2002 г.). (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб., 2002) с. 237.
- [2] Н.С. Каблукова, В.А. Комаров, Е.В. Демидов, Е.Е. Христич. *Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А.И. Герцена*, **153** (2), 13(2012).
- [3] В.М. Грабов, В.А. Комаров, Н.С. Каблукова. *ФТТ*, **58** (3), 605 (2016).
- [4] Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский, Н.Я. Минина. *Письма ЖЭТФ*, **26** (3), 162 (1977).

Редактор А.Н. Смирнов

Galvanomagnetic properties of thin films of $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ on different substrates

V.A. Komarov, A.V. Suslov, M.V. Suslov

Herzen Russian State Pedagogical University,
191186 St. Petersburg, Russia

Abstract The paper presents results of investigation of galvanomagnetic properties of $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ thin block films on substrates with different coefficient of thermal expansion. We found that differences in thermal expansion of the film material and the substrate have pronounced effect of on the galvanomagnetic properties of the films. Analysis of the experimental data on the film properties within the two band model revealed that differences in the film properties on various substrates are associated with changes in the concentration and mobility of charge carriers. It was shown that reduction of thermal expansion coefficient of the substrate material leads to decrease of concentration of charge carriers. We conclude therefore that effect of thermal expansion of the substrate material on the band structure of bismuth-antimony films is essentially different from the band structure modification related to change in bismuth to antimony ratio.