

1–2 ТэВ, что приводит к РП в сечении процесса, не превосходящей несколько процентов.

Таким образом, использование аппарата ренормализационной группы позволяет с высокой точностью вычислить радиационную поправку, обусловленную многофотонным излучением, как мягким, так и жестким, тем самым более полно учесть радиационные эффекты в процессах взаимодействия элементарных частиц, в том числе поляризованных.

1. Schwinger J. // Phys. Rev. 1949. Vol. 76. P. 790.
2. Mo L. W., Tsai Y. S. // Rev. Mod. Phys. 1969. Vol. 41. P. 205.
3. Tsai Y. S. Radiative corrections to electron scattering. SLAC: PUB-848. Stanford, 1971.
4. Yennie D. R., Frautschi S. C., Suura H. // Ann. Phys. 1961. Vol. 13. P. 379.
5. Yennie D. R., Suura H. // Phys. Rev. 1957. Vol. 105. P. 1378.
6. Шумейко Н. М. // ЯФ. 1979. Т. 29. С. 1571.
7. Kukhto (Shishkina) T. V., Shumeiko N. M. // Nucl. Phys. 1983. Vol. B129. P. 419.
8. Kukhto (Shishkina) T. V., Panov S. N., Kuraev E. A., Sazonov A. A. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl.). 1992. Vol. A29. P. 123.
9. Kukhto (Shishkina) T. V., Panov S. N., Kuraev E. A., Sazonov A. A. The scattering of electron on the quark and nucleon in the case of polarized particles. JINR E2-92-556. Dubna, 1992.
10. Altarelli G., Parizi G. // Nucl. Phys. 1977. Vol. B126. P. 298.
11. Altarelli G. // Phys. Rev. 1982. Vol. B81. P. 1.

Поступила в редакцию 30.12.2003.

*Татьяна Викентьевна Шишкина* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики.

УДК 537.311.33:669.76

А. В. ДЕМИДЧИК, В. Г. ШЕПЕЛЕВИЧ

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕЙ ФОЛЬГИ ТРОЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ВИСМУТ – СУРЬМА И ЕЕ СТАБИЛЬНОСТЬ ПРИ ОТЖИГЕ

The electrical properties of bismuth-antimony system alloyed by In, Ga, S, Te in the temperature interval 77–220 K are presented. It is established that alloys Bi – Sb – In and Bi – Sb – Ga are low-temperature semiconductors of *p*-type, but Bi – Sb – Te and Bi – Sb – S are low-temperature semiconductors of *n*-type.

Сплавы висмут – сурьма, содержащие 8–12 ат. % Sb, относятся к термоэлектрическим материалам, электрические свойства которых существенно зависят как от содержания в них сурьмы, так и от концентрации дополнительных легирующих элементов [1]. Сверхбыстрая закалка из расплава, благодаря которой была получена быстрозатвердевшая фольга, позволяет повысить растворимость легирующих элементов и добиться однородного распределения компонентов в сплаве [2]. В последнее время актуальным является поиск материалов, которые можно использовать в качестве *p*-ветви для термоэлектрических устройств, в частности материалов на основе бинарной системы Bi – Sb. В литературе имеются противоречивые данные о влиянии легирования третьим компонентом на свойства сплава [3, 4]. Поэтому актуальным является исследование влияния легирующих элементов различных групп периодической системы на электрические свойства указанных сплавов, а также стабильности этих свойств при термической обработке фольги.

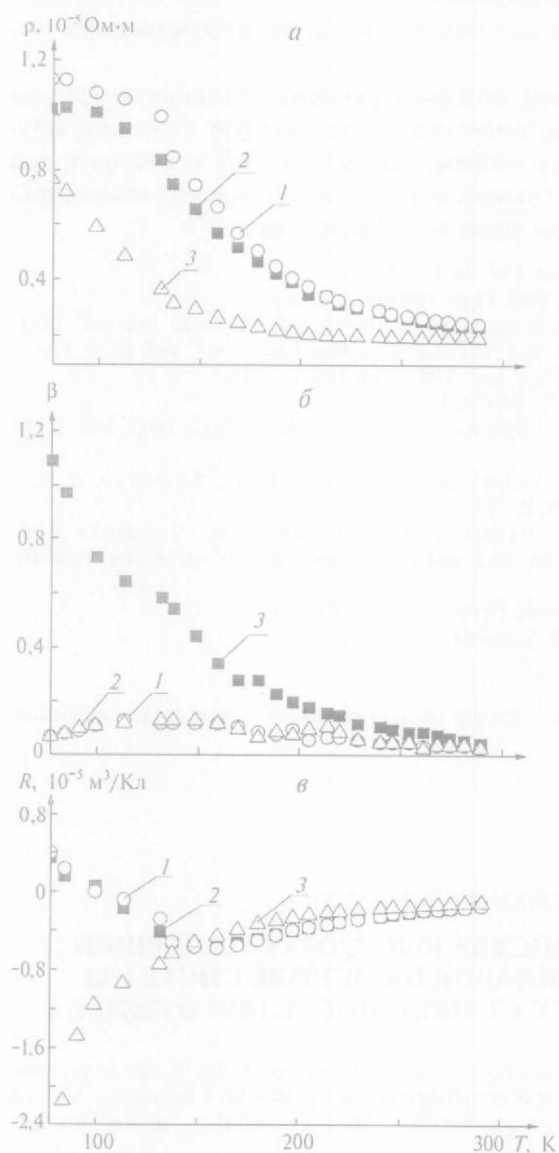


Рис. 1. Температурная зависимость удельного электро- сопротивления  $\rho(T)$  – а, магнетосопротивления  $\beta(T)$  – б и коэффициента Холла  $R(T)$  – в исходной и отожженной фольги сплава Bi – Sb – Ga: 1 – исходное состояние, 2 – отжиг при температуре 110 °С в течение 30 мин, 3 – отжиг при температуре 210 °С в течение 90 мин

ва Bi – Sb. Для бинарных сплавов значения  $\rho$ ,  $\beta$ ,  $|R|$  и  $|\alpha|$  монотонно уменьшались в заданном температурном интервале [5]. Легирование галлием и индием привело к увеличению удельного электро- сопротивления при температуре жидкого азота: для сплавов Bi – 10 ат. % Sb  $\rho = 7,7$  мкОм·м и Bi – 12 ат. % Sb  $\rho = 7,9$  мкОм·м, в то время как для Bi – Sb – In и Bi – Sb – Ga указанные величины равны 14 и 10,2 мкОм·м [6] соответственно. С увеличением температуры наблюдается монотонное уменьшение  $\rho$  (рис. 1 а). При комнатной температуре для Bi – Sb – In  $\rho = 4$  мкОм·м, для бинарной системы на основе которой был получен данный тройной сплав,  $\rho = 2,4$  мкОм·м [7].

Быстрозатвердевшую фольгу получали инжектированием капли расплава между двумя соприкасающимися вращающимися отполированными медными цилиндрами разного диаметра. Удельно электро- сопротивление  $\rho$ , магнетосопротивление  $\beta$ , коэффициент Холла  $R$  и термоэдс  $\alpha$  измерялись в интервале температур 77–290 К. Сила проходящего через образец тока составляла 100 мА, индукция магнитного поля – 0,2 Тл. Изохронный отжиг фольги проводился в интервале температур 20–230 °С выдержкой по 10 мин через каждые 20 °С, изотермический – при различных температурах в течение нескольких часов. Отожженную фольгу охлаждали, а затем проводили измерения электрических свойств. Исследовалась фольга сплавов Bi – 12 ат. % Sb – 0,6 ат. % In (Bi – Sb – In), Bi – 12 ат. % Sb – 1 ат. % S (Bi – Sb – S), Bi – 12 ат. % Sb – 1 ат. % Te (Bi – Sb – Te) и Bi – 10 ат. % Sb – 0,4 ат. % Ga (Bi – Sb – Ga). Погрешность измерения  $\rho$  составляет не более 5 %,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $R$  – не более 15 %.

Рассмотрим сначала влияние элементов III группы периодической системы на электрические свойства спла-

Магнетосопротивление фольги тройных сплавов Bi – Sb – In и Bi – Sb – Ga (рис. 1 б) на порядок ниже, чем бинарных (при 77 К для сплава Bi – 12 ат. % Sb  $\beta=0,79$ , а для Bi – Sb – Ga  $\beta=0,09$ ), и практически не изменяется в интервале 77–290 К. Коэффициент Холла и термо-эдс до температуры 100 К положительны (рис. 1 в). Кинетические свойства в области низких температур определяются преимущественно дырками, что позволяет сделать вывод об акцепторном действии индия (вопреки результатам работы [3]) и галлия в сплавах Bi – Sb. Дальнейший рост температуры приводит к увеличению концентрации электронов в зоне проводимости, и вблизи 110 К термо-эдс и коэффициент Холла меняют знак.

Как видно из рис. 2 а, зависимость  $\rho(T)$  для фольги сплавов Bi – Sb, легированных серой, носит «металлический» характер: с увеличением температуры удельное электросопротивление увеличивается. Магнетосопротивление изменяется незначительно, коэффициент Холла постоянен (рис. 2 б, в),  $\alpha$  и  $R$  отрицательны. Независимость коэффициента Холла от температуры означает, что процессы электропереноса определяются преимущественно электронами, концентрация которых неизменна (при 77 К  $n = 6,4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ ,

в то время как для бинарного сплава  $n = 0,09 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ ). Анализ указанных фактов позволяет сделать вывод о том, что в сплавах системы висмут – сурьма сера является донором. Аналогичные зависимости исследуемых электрических свойств прослеживаются и для фольги сплава Bi – Sb – Te. В сплавах Bi – Sb, как было указано в [1], донором является теллур.

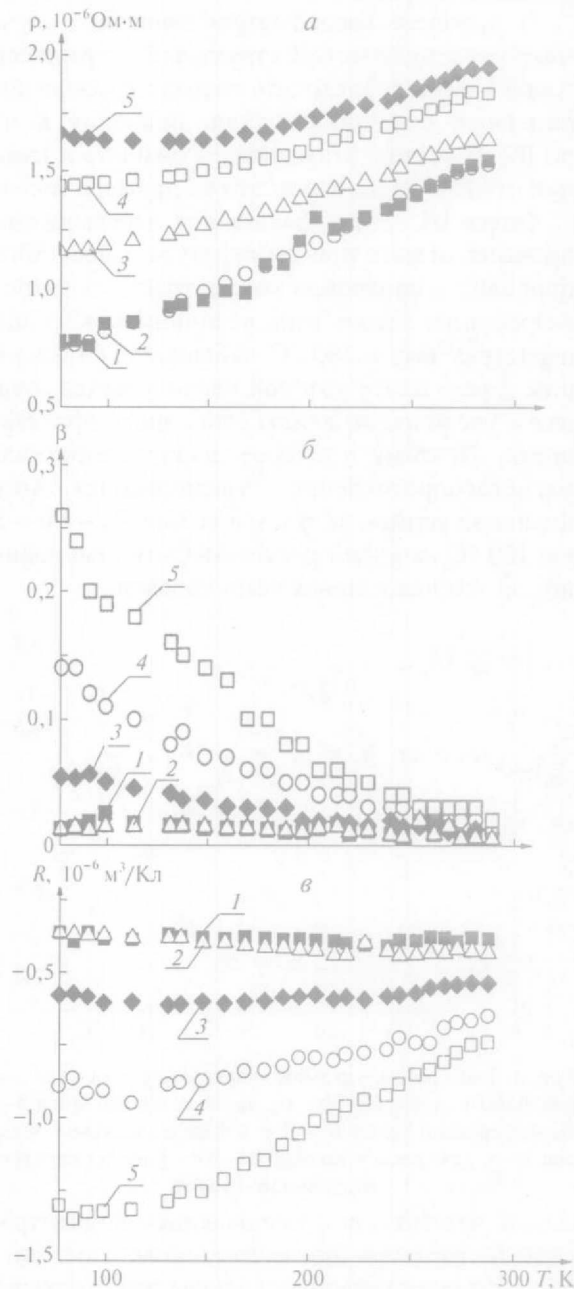


Рис. 2. Температурная зависимость удельного электросопротивления  $\rho(T)$  – а, магнетосопротивления  $\beta(T)$  – б и коэффициента Холла  $R(T)$  – в исходной и отожженной фольги сплава Bi – Sb – S:

1 – исходное состояние, 2 – отжиг при температуре 130 °С в течение 30 мин, 3 – отжиг при температуре 200 °С в течение 30 мин, 4 – в течение 90 мин, 5 – в течение 180 мин



В процессе сверхбыстрой закалки получается фольга с неустойчивой микрокристаллической структурой: термическая обработка, в процессе которой может происходить распад пересыщенного твердого раствора и собирательная рекристаллизация, приводит к изменению зеренной структуры [8]. В связи с этим следует ожидать и изменения электрических свойств при отжиге. Рассмотрим это на примере фольги сплава Bi – Sb – S.

Сплав Bi – Sb – S является пересыщенным твердым раствором [9]. В процессе отжига при температуре выше 180 °C происходит его распад, что приводит к снижению концентрации электронов. Об этом свидетельствует возрастание абсолютной величины коэффициента Холла (рис. 3). При температурах выше 200 °C наблюдается также собирательная рекристаллизация, в результате которой увеличивается средний размер зерна. Это приводит к увеличению длины свободного пробега носителей тока и их подвижности. Поэтому удельное электросопротивление фольги уменьшается, магнетосопротивление – увеличивается. Абсолютная величина дифференциальной термо-эдс фольги сплава Bi – Sb – S при температуре отжига выше 180 °C начинает расти. Аналогичные зависимости были получены и для других исследованных нами сплавов.

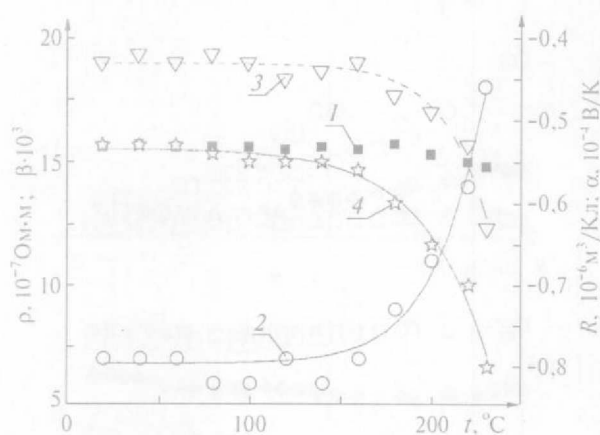


Рис. 3. Зависимость удельного электросопротивления  $\rho$  – 1 для фольги сплава Bi – Sb – In, магнетосопротивления  $\beta$  – 2, коэффициента Холла  $R$  – 3 и дифференциальной термо-эдс  $\alpha$  – 4 для фольги сплава Bi – Sb – S от температуры изохронного отжига

Температуры изотермического отжига подбирались на основании результатов изохронного отжига. Как видно из рис. 1 и 2, отжиг фольги при 100–140 °C незначительно влияет на исследуемые свойства, при 200–220 °C эти свойства изменяются, причем степень изменения определяется длительностью термообработки. Для сплава Bi – Sb – S, например, увеличение времени отжига ведет к росту (особенно значительно при температуре жидкого азота), что связано с уменьшением концентрации электронов при «выходе серы из раствора (после трехчасового отжига при 200 °C  $n = 0,77 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ ). Магнетосопротивление в случае низких температур увеличивается с временем отжига.  $\beta$  отожженной при 200 °C в течение 1,5 ч фольги монотонно убывает во всем температурном интервале. Коэффициент Холла отрицателен, его абсолютная величина при 77 К возрастает с увеличением времени отжига. Термо-эдс также отрицательна, ее абсолютная величина по мере увеличения времени отжига увеличивается.

Для сплавов Bi – Sb – In и Bi – Sb – Ga удельное электросопротивление отожженной при 210 °C фольги уменьшается с увеличением времени отжига. Индий или галлий «уходят» из твердого раствора на основе сплава Bi – Sb, уменьшая тем самым концентрацию дырок, и вклад электронов становится преобладающим. Поэтому  $\alpha$  и  $R$  во всем температурном интервале отрицательны.

Таким образом, индий и галлий обнаруживают в сплаве висмут – сурьма акцепторное действие, а сера и теллур – донорное. Термическая обработка фольги при температуре ниже 180 °С не приводит к каким-либо существенным изменениям электрических свойств. Степень изменения свойств при температуре выше указанной зависит от длительности термической обработки.

1. Гицу Д.В., Голбан Т.М., Канцер В.Г., Мунтяну Ф.М. Явления переноса в висмуте и его сплавах с сурьмой. Кишинев, 1983.

2. Гусакова С.В., Демидчик А.В., Шепелевич В.Г. // Тезисы докладов XIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черноголовка, 2003. С. 127.

3. Иванов Г.А., Сараев Ю.Н., Коришев В.И. // ФТТ. 1972. Т. 14. № 2. С. 630.

4. Шепелевич В.Г., Гречанников Э.Е. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2000. № 4. С. 99.

5. Демидчик А.В., Шепелевич В.Г. // Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии: Сб. междунар. науч.-метод. конф. Брест, 2003. С. 22.

6. Демидчик А.В., Гуикинг Л. // НИРС-2003: Тез. докл. VIII Респ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 2 ч. Мн., 2003. Ч. 2. С. 179.

7. Демидчик А.В., Шепелевич В.Г. // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий. Обнинск, 2003. С. 11.

8. Демидчик А.В., Шепелевич В.Г. // Машиностроение: Респ. межвед. сб. науч. тр. Мн., 2003. № 19. С. 644.

9. Хансен М., Андерко К. Структуры сплавов: В 2 т. / Под ред. И.И. Новикова и И.Я. Рогельберга. М., 1962. Т. 1, 2.

Поступила в редакцию 18.02.2004.

*Александр Владимирович Демидчик* – аспирант кафедры физики твердого тела. Научный руководитель – В.Г. Шепелевич.

*Василий Григорьевич Шепелевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела.

УДК 621.793.7

А.Ф. КОМАРОВ

## ИОННО-АССИСТИРУЕМОЕ ОСАЖДЕНИЕ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ В ПРОЦЕССЕ РАСПЫЛЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ ИОННЫМ ПУЧКОМ

The featured and easy-to-use IBAD technique was proposed in order to realise in situ ion implantation and different material layer deposition on metals by the same ion beam. The developed simulation software enabled us to describe IBAD process as well as to calculate the radial and depth distributions of deposited/implanted atoms. These programs are especially effective ones to describe and control a procedure for ion beam assisted sputter coating of the inner walls of tubes. There is a reasonable agreement of theoretical predictions and experimental results for the deposition efficiency coefficient.

Ассистируемое ионным облучением осаждение (АИОО) слоев различных материалов последние годы широко используется для модификации механических, электрических, оптических, трибологических, барьерных, коррозионных и каталитических свойств приповерхностных слоев [1–3]. Основное отличие АИОО от обычной ионной имплантации заключается в том, что одновременно с ионным облучением имеет место осаждение дополнительной атомной или молекулярной компоненты из магнетронного, ионно-плазменного, дугового или иного источника, а также из остаточной атмосферы в приемной камере имплантатора ионов.