

УДК 621.039.586

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$

© 2021 г. И. А. Абдуллаева^{1,3}, Г. Д. Абдинова³, М. М. Тагиев^{2,3,*}, Б. Ш. Бархалов³

¹Институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана,
пр. Б. Вагабзаде, 9, Баку, AZ1143 Азербайджан

²Азербайджанский государственный экономический университет, ул. Истиглалият, 6, Баку, AZ1001 Азербайджан

³Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, пр. Г. Джавида, 131, Баку, AZ1148 Азербайджан
*e-mail: mail_tagiyev@mail.ru

Поступила в редакцию 27.11.2020 г.

После доработки 13.03.2021 г.

Принята к публикации 30.03.2021 г.

Исследованы электропроводность (σ), коэффициенты термо-ЭДС (α) и Холла (R_H) образцов, не облученных и облученных гамма-квантами при различных дозах в температурном интервале $\sim 77\text{--}300\text{ K}$. Выяснено, что при малых дозах облучения в образцах $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ возникают радиационные дефекты, играющие роль донорных центров, в результате чего концентрация свободных электронов n и, следовательно, σ растут, а α падает. Эти дефекты, рассеивая носители тока, уменьшают их подвижность μ . С ростом дозы облучения растет и концентрация дефектов, происходит захват свободных носителей на уровень радиационных дефектов, что приводит к падению n и σ образца, смещению уровня Ферми в глубину запрещенной зоны, росту α и μ . Температурные зависимости электрических параметров экструдированных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$, облученных гамма-квантами, объясняются на основании температурных зависимостей подвижности и концентрации носителей заряда.

Ключевые слова: экструзия, гамма-излучение, электропроводность, текстура

DOI: 10.31857/S0002337X21090013

ВВЕДЕНИЕ

Твердые растворы системы Bi-Sb являются перспективными материалами для создания термо- и магнитотермоэлектрических преобразователей на уровень температур ниже $\sim 200\text{ K}$. Однако низкая механическая прочность, обусловленная слоистостью структуры, ограничивает их применение [1–6]. Особенно перспективны в этом направлении высокопрочные экструдированные материалы на основе этой системы [7–10]. Метод экструзии имеет большую производительность, отличается высокой технологичностью, открывает широкие возможности для профилирования ветвей термоэлементов и позволяет получать ветви термоэлементов с хорошо воспроизводимыми свойствами [11, 12].

Особый интерес с точки зрения перекрытия более широкой температурной области ($\sim 150\text{--}250\text{ K}$) представляет легирование акцепторными и донорными примесями [13–15].

Термоэлектрические приборы часто применяются и в условиях радиации. Образование радиационных дефектов влияет на физические свойства полупроводников и изменяет параметры прибора на их основе. Обеспечение работо-

способности преобразователей энергии в условиях воздействия ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения становится все более актуальной проблемой вследствие расширения области их применения в промышленных, специальных и космических объектах [16–23]. Поэтому изучение влияния радиационных дефектов на электрические свойства твердых растворов системы Bi-Sb приобретает определенный научно-практический интерес.

При $\sim 77\text{ K}$ термоэлектрическая добротность (Z) экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ с размерами зерен $\sim 630\text{ мкм}$ достигает $\sim 5.8 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ [8], что близко к значению Z для монокристаллических образцов [1]. Кроме этого, экструдированные образцы $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ с размерами зерен $\sim 630\text{ мкм}$, легированные $0.0005\text{ ат. \% Te}$ при $\sim 77\text{ K}$, имеют максимальные термо- и магнитотермоэлектрическую добротности: $\sim 6.2 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ и $\sim 7.2 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ соответственно [24]. Этот материал перспективен для применения в низкотемпературных термоэлектрических преобразователях.

С целью выяснения особенностей влияния радиационных дефектов (РД) на электрические свойства твердых растворов системы Bi-Sb полу-

чены экструдированные образцы $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$, легированные 0.0005 ат. % Te, и исследованы их электрические свойства в зависимости от дозы гамма-излучения в интервале температур $\sim 77\text{--}300\text{ K}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экструдированные образцы $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ получены в следующей технологической последовательности: синтез из исходных компонентов; измельчение сплава в фарфоровой ступке и отбирание фракций с размерами частиц 0.05; 0.1; 0.16; 0.2; 0.315; 0.630; 1.0 мм; изготовление методом холодного прессования при комнатной температуре и давлении $\sim 350\text{ МПа}$ брикетов диаметром $\sim 30\text{ мм}$ для процесса экструзии; экструзия мелкодисперсных заготовок.

Исходными компонентами служили висмут ВИ-0000 и сурьма СУ-0000. В качестве легирующих примесей использовали теллур Т-сЧ дистиллированный (либо после 2-кратной возгонки). Примеси и исходные компоненты взвешивали с точностью $\pm 0.0001\text{ г}$.

Синтез проводился прямым сплавлением компонентов. Исходные вещества в стехиометрическом соотношении помещались в кварцевую ампулу, предварительно протравленную в растворе хромпика ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) и промытую дистиллированной водой. Синтез проводили в вакууммированных до $\sim 10^{-2}\text{ Па}$ кварцевых ампулах при $\sim 673\text{ K}$ в течение 2 ч. В процессе синтеза ампулу с веществом постоянно подвергали качанию. Ампулу с синтезированным веществом резко охлаждали до комнатной температуры, опуская в воду. Технологические параметры экструзии ($T_{\text{экстр}} = 475 \pm 3\text{ K}$, $p_{\text{экстр}} = 480\text{ МПа}$) выбирали такими, чтобы формирование экструдированных образцов проходило в условиях сверхпластичности, без макро- и микронарушений. Прочность на изгиб полученных экструдированных образцов в ~ 3 раза превышает прочность монокристаллических образцов аналогичного состава.

Экструзия проводилась на гидравлическом прессе марки МС-1000 с диаметра $\sim 30\text{ мм}$ на диаметр $\sim 6\text{ мм}$ с применением специальной оснастки.

На рентгеновской установке XRD8 ADVANCE (Bruker, Germany) была исследована текстура экструдированных образцов методом, описанным в [25]. Рентгеновские дифрактограммы регистрировали при комнатной температуре с помощью дифрактометра D2 Phaser (Bruker) с использованием излучения CuK_α в диапазоне 2θ от 5° до 80° . Плоскость образца и счетчик устанавливали в положении рефлекса 0015. Анализировалась самая интенсивная линия 110, во всех экструдированных образцах ось [110] располагалась вдоль направления экструзии [133]. На основе полученных дифрактограмм с использованием програм-

мы TOPAS-4.2 подтверждено, что исследованные порошки представляют собой гексагональный твердый раствор $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$.

Межплоскостные расстояния в структурах висмута, сурьмы и их соединений близки друг к другу, поэтому фазовый состав определяли с использованием эталона – висмута марки ВИ-0000.

На дебаеграммах и лауэграммах исследуемых образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ наблюдаются сильно уширенные симметричные пики для всех кристаллографических направлений, что свидетельствует о большой величине микронапряжений.

Данные, полученные с помощью рентгенофазового анализа, подтверждены электронно-микроскопическими исследованиями, проведенными на растровом электронном микроскопе [26], по сечению и боковой поверхности образцов после травления в течение 25 с в 50%-ном растворе HNO_3 и на шлифах, приготовленных по обычной методике с помощью алмазных паст.

После экструзии образцы подвергались отжигу при температуре $\sim 503\text{ K}$ в кварцевых ампулах, откачанных до $\sim 10^{-1}\text{ Па}$.

Образцы облучали гамма-квантами (гамма-радиация) в источнике ^{60}Co различными дозами (1, 10 и 50 Мрад).

С помощью программ TOPAS-4.2 и EVA уточнялись параметры элементарной ячейки и размеры кристаллитов необлученных (исходных) и облученных различными дозами образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$.

Исследованы электропроводность (σ), коэффициенты термо-ЭДС (α) и Холла (R_H) экструдированных образцов после отжига при $\sim 503\text{ K}$ в течение 2 ч, не облученных и облученных гамма-квантами при различных дозах в интервале $\sim 77\text{--}300\text{ K}$.

Образцы для измерения вырезались из экструдированных прутков с помощью установки электроискровой резки марки А.207.40М. При электроискровой резке за счет плавления полупроводникового материала и закалки жидкой фазы, образования термических напряжений и т.д. на поверхности образцов образуется нарушенный поликристаллический слой, сильно загрязненный продуктами электрода и диэлектрической среды. Термоэлектрические параметры такого слоя будут сильно отличаться от параметров исходного материала. Поэтому после резки поверхности образцов обрабатывались электрохимическим травлением в растворе $\text{KOH} + \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O}$ при температуре $\sim 25^\circ\text{C}$. Время электрохимического травления – 20–25 с, плотность тока, проходящего через образец, составляла 0.5 А/см^2 [27].

Контактное сопротивление существенно зависит как от технологии получения термоэлектрических материалов, так и от технологии формирования контактов [28]. Исследованные образцы

имели форму параллелепипеда с размерами $0.2 \times 0.4 \times 1.5$ см. Нанесение контактов на образцы проводилось сплавом Вуда (мас. %: 25 Bi + 50 Pb + 12.5 Sn + 12.5 Cd) с температурой плавления ~ 343 К с использованием флюса ФСкГЛ ($\text{CH}_3\text{ON}_3 + \text{HCl} + \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$). Контакты были точечными и имели диаметр ~ 0.5 мм.

Электрические параметры образцов измеряли методом, описанным в работе [29], вдоль длины образца (прутка), т.е. в направлении экструзии. Погрешность при измерении электрических параметров составляла $\approx 3\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и в табл. 1 представлены результаты рентгенофазового анализа образца $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ до и после облучения. Как видно из табл. 1, облучение привело к ухудшению совершенства кристаллов, так как размеры кристаллитов постепенно уменьшались. Это хорошо видно на дифрактограмме 4 (рис. 1), где интенсивность дифракционных линий уменьшилась, а ширина увеличилась. Однако параметры элементарной ячейки практически остались неизменными (табл. 1).

Из табл. 2 видно, что в легированных и нелегированных образцах с ростом дозы облучения концентрация носителей уменьшается, а подвижность растет во всем исследуемом интервале температур. Эти изменения n и μ хорошо коррелируют с изменениями σ и α . Из рис. 2 видно, что характер зависимостей $\sigma(T)$, $\alpha(T)$ и $R_{\chi}(T)$ необлученных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ до и после легирования отличается от температурных зависимостей облученных образцов.

Оптимальным направлением роста монокристаллов Bi–Sb является кристаллографическое направление $[110]$ ромбоэдрической ячейки. Однако наибольшее значение параметра термоэлектрической добротности, а также электропроводности наблюдается в кристаллографическом направлении $[111]$, которое перпендикулярно оптимальному направлению роста монокристалла. Наиболее совершенной является плоскость (111) , по которой всегда происходит раскол [30].

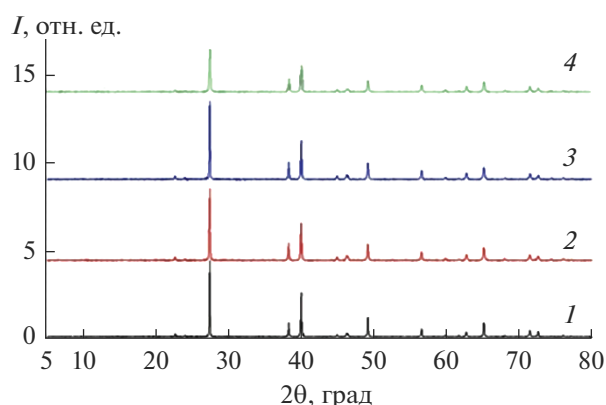


Рис 1. Дифрактограммы экструдированных образцов (см. табл. 1) $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ до (1) и после облучения 1 (2), 10 (3), 50 Мрад (4).

При экструзии за счет пластической деформации часть зерен поликристалла ориентируется так, что их тригональная ось становится параллельной оси экструзии, т.е. образуется текстура. Одновременно, в результате пластической деформации, возникают различные дефекты кристаллической решетки в отдельно взятых зернах. Эти дефекты являются центрами рассеяния для носителей тока и уменьшают их подвижность. При этом структурные дефекты преимущественно сосредотачиваются между плоскостями спайности (111) . Степень текстуры зависит от технологических параметров процесса экструзии, от размера зерен и послеекструзионной термообработки. При термообработке может возникнуть разориентация зерен за счет тепловой энергии, т.е. изменение степени текстуры экструдированного образца [31, 32]. Наиболее сильное уменьшение степени текстуры при отжиге происходит в образцах с наименьшими размерами зерен. С ростом размеров частиц влияние отжига на степень текстуры ослабляется. Можно предположить, что при минимальных размерах зерен в образцах из-за малой энергии, требуемой для ориентации зерен, появляется максимальная текстура при деформации. Образцы с минимальными размерами зерен обладают и высокой кон-

Таблица 1. Параметры элементарной ячейки и размеры кристаллитов экструдированных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$, облученных различными дозами

Образец	Доза, Мрад	a , нм	c , нм	Размер кристаллитов, нм
1	0	4.5076	11.778	96
2	1	4.5104	11.780	88
3	10	4.5078	11.781	81
4	50	4.5125	11.788	65

Примечание. Пр. гр. $R3$.

Таблица 2. Электрические параметры экструдированных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$, облученных различными дозами

Доза, Мрад	Образец	σ , См/см	α , мкВ/К	$R_X \times 10^{-8}$, см ³ /Кл	μ , см ² /(В с)	$n \times 10^{-18}$, см ⁻³	σ , См/см	α , мкВ/К	$R_X \times 10^{-8}$, см ³ /Кл	μ , см ² /(В с)	$n \times 10^{-18}$, см ⁻³
		77 К					300 К				
0	$\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$	5250	−182	−26.5	139125	0.24	7520	−95	−1.43	10754	4.4
	$\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$	7574	−161	−23.97	181549	0.3	9079	−95	−1.15	10441	5.4
1	$\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$	8481	−121	−1.26	10686	4.96	6524	−89	−1.26	8220	5
	$\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$	15477	−50	−1.08	16715	5.79	7035	−80	−1.08	7598	5.8
10	$\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$	4240	−161	−60	254400	0.1	6890	−101	−17.4	119886	0.36
	$\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$	12084	−56	−11.6	140174	0.54	6101	−66	−21.1	128731	0.3
50	$\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$	4552	−188	−85	386920	0.07	6448	−90	−34.3	221166	0.18
	$\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$	15371	−47	−16.2	249010	0.39	7233	−79	−30.1	154381	0.21

центрацией носителей тока. Дефекты, созданные границами зерен, являются центрами рассеяния для носителей тока и уменьшают их подвижность. Отжиг образцов приводит к уменьшению концентрации дефектов внутри зерен и высоты межзеренных потенциальных барьеров за счет рекристаллизации.

Результаты рентгеновских исследований зависимости степени текстуры в неотожженных и отожженных экструдированных образцах $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ от размеров зерен представлены в работе [33].

Атомы теллура в образцах $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ создают донорные центры. В необлученных образцах легирование 0.0005 ат. % теллура не изменяет ход температурной зависимости, однако значительно увеличивает электропроводность образца в интервале $\sim 77\text{--}300$ К. Для необлученного нелегированного образца и легированного 0.0005 ат. % Те образцов температурная зависимость электропроводности до ~ 275 К (полупроводниковый ход) определяется ростом концентрации носителей тока с температурой. Выше ~ 275 К (металличе-

ский ход) зависимость $\sigma(T)$ определяется в основном изменением подвижности носителей заряда. В этих образцах коэффициент Холла монотонно падает с ростом температуры. У образцов, легированных теллуром и облученных различными дозами гамма-квантов, при низких температурах сильно увеличивается электропроводность. При этом изменяется характер температурной зависимости. Для всех легированных образцов, облученных гамма-квантами, характерны типичные для области примесной проводимости температурные зависимости σ , μ и n .

Для необлученных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ сильное изменение коэффициента Холла и, следовательно, концентрации носителей заряда приходится на область температур $77\text{--}270$ К. В области $270\text{--}300$ К изменение коэффициента Холла с ростом температуры сильно замедляется. Для образцов, легированных теллуром и облученных 10 и 50 Мрад, коэффициент Холла монотонно падает с температурой, при этом наибольшее изменение R_X наблюдается для образцов, облученных

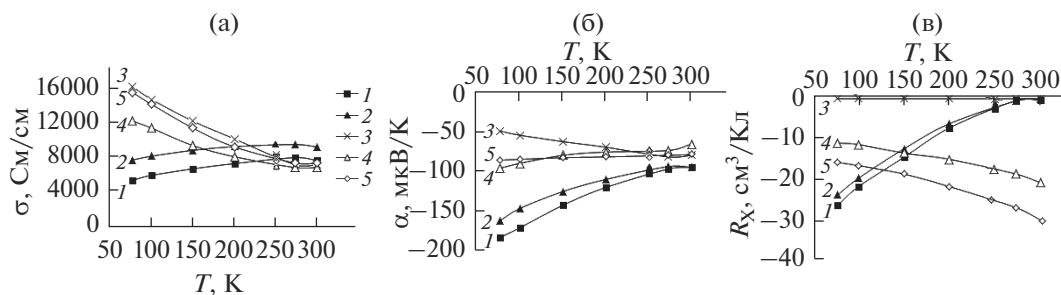


Рис. 2. Температурные зависимости электропроводности (σ) (а), коэффициентов термо-ЭДС (α) (б) и Холла (R_X) (в) экструдированных образцов: необлученных $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ (1), $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ (2); $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$, облученных 1 (3), 10 (4), 50 Мрад (5).

50 Мрад. Для образцов, легированных теллуром и облученных дозой 1 Мрад, которые имеют максимальную концентрацию носителей заряда, R_X почти не зависит от температур.

Холловская подвижность носителей заряда вычислена из соотношения $\mu = R_X \sigma$. Для всех образцов μ во всем интервале исследованных температур с ростом температуры падает. Легирование теллуром и облучение гамма-квантами приводят к уменьшению абсолютного значения подвижности. С ростом дозы облучения также изменяется степень n в зависимости $\mu \sim T^{-n}$, а температурная зависимость подвижности в области $T > 200$ К ослабляется.

В нелегированных и легированных теллуром образцах до облучения коэффициент термо-ЭДС α с ростом температуры монотонно уменьшается. Облучение гамма-квантами уменьшает абсолютную величину α в интервале исследованных температур. При этом в облученных образцах ход температурной зависимости меняется. Такое поведение α хорошо коррелирует с температурной зависимостью электропроводности.

Для образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$, облученных гамма-квантами, ход температурной зависимости α приобретает вид, характерный для примесной области проводимости.

В нелегированных образцах незначительное влияние гамма-радиации (кроме облученных дозой 1 Мрад) на α при существенном изменении σ показывает, что при облучении главным образом меняется подвижность носителей заряда, обусловленная уменьшением концентрации центров рассеяния. При облучении происходит “залечивание” структурных дефектов, что приводит к росту подвижности носителей тока. Существенное влияние гамма-радиации на α и σ в образцах, легированных 0.0005 ат. % Те, показывает, что радиационные дефекты, играющие роль донорных центров, увеличивают концентрацию носителей заряда.

Введение РД в кристаллическую решетку полупроводника приводит к изменению его электрофизических и структурных характеристик. Эффективность дефектообразования и тип вводимых РД сильно зависят от электронных параметров исходного материала (положения уровня (квазиуровня) Ферми). Особое внимание было уделено изучению явления закрепления уровня Ферми в облученных полупроводниках. Было показано, что при концентрации РД, превышающей концентрацию легирующих химических примесей (условие “сильного” облучения), имеет место закрепление (пиннинг) уровня Ферми в предельном

(стационарном) положении F_{lim} , характерном для каждого полупроводника [34, 35]. Облучение является процессом скорее “обратным” (противоположным) легированию материала примесями. При введении в полупроводник химической примеси химический потенциал материала “отклоняется” в положение, задаваемое уровнем легирования. При этом всегда достигается предельный уровень равновесного легирования — предельное положение уровня Ферми. Ограничение по уровню легирования полупроводника связывают с различными процессами самокомпенсации материала, в результате облучения легированного материала происходит “возврат” уровня Ферми из положения, задаваемого уровнем легирования, в положение F_{lim} [36, 37].

Облученный полупроводник является материалом с высокой степенью компенсации.

Влияние радиации на электрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ показывает, что сильно облученный полупроводник всегда является материалом с низкой концентрацией свободных носителей заряда, высокой концентрацией связанного на дефектах заряда и степенью компенсации радиационных доноров и акцепторов, близкой к единице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При малых дозах облучения (1 Мрад) в образцах $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}\langle\text{Te}\rangle$ возникают РД, играющие роль донорных центров, в результате чего концентрация свободных электронов n и, следовательно, электропроводность σ растут, а коэффициент термо-ЭДС α падает. Эти дефекты, рассеивая носители тока, уменьшают их подвижность μ . С ростом дозы облучения растет концентрация дефектов, происходит захват свободных носителей на уровень РД. В связи с этим концентрация носителей n и, следовательно, σ образца падают, уровень Ферми смещается к глубине запрещенной зоны, а коэффициент термо-ЭДС и подвижность растут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земсков В.С., Белая А.Д., Рослов С.А. и др. Термоэлектрические свойства твердых растворов Bi–Sb // Изв. АН СССР. Металлы. 1978. № 1. С. 73–76.
2. Иванова Л.Д. Термоэлектрические материалы для различных температурных уровней // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 7. С. 948–951.
3. Куликов В.А., Парахин А.С. Гальваномагнитные эффекты в кристаллах Bi–Sb, легированных теллуром // Термоэлектрики и их применения. СПб. 2000. С. 111–115.

4. *Stepanov N.P.* Electron-Plasmon Interaction in Bismuth with an Acceptor Dopant // *Russ. Phys. J.* 2004. V. 47. № 3. P. 262–271.
<https://doi.org/10.1023/B:RUPJ.0000038743.50158.a7>
5. *Марков О.И.* Градиентно-варизонные сплавы висмут–сурьма // *Успехи прикл. физики.* 2014. Т. 2. № 5. С. 447–452.
6. *Грабов В.М., Комаров В.А., Каблукова Н.С.* Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута и сплавов висмут–сурьма на подложках с различным температурным расширением // *ФТТ.* 2016. Т. 58. Вып. 3. С. 605–611.
7. *Банага М.П., Соколов О.Б., Бендерская Т.Э., Дудкин Л.Д., Иванова А.Б., Фридман И.И.* Особенности структуры и термоэлектрических свойств экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ // *Изв. АН СССР. Неорганические материалы.* 1986. Т. 22. № 4. С. 619–622.
8. *Тагиев М.М., Агаев З.Ф., Абдинов Д.Ш.* Термоэлектрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ // *Неорганические материалы.* 1994. Т. 30. № 3. С. 375–378.
9. *Tagiyev M.M.* Electrical Anisotropy in Extruded Specimens of $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ Solid Solution // *Russ. Phys. J.* 2018. V. 60. № 10. P. 1795–1796.
<https://doi.org/10.1007/s11182-018-1283-z>
10. *Сидоренко Н.А., Дашевский З.М.* Эффективные кристаллы Bi–Sb для термоэлектрического охлаждения при температурах $T \leq 180$ К // *ФТП.* 2019. Т. 53. Вып. 5. С. 693–697.
11. *Иванова Л.Д., Петрова Л.И., Гранаткина Ю.В. и др.* Экструдированные материалы твердых растворов висмут–сурьмы // *Термоэлектрики и их применения.* СПб.: РАН, 2008. С. 246–251.
12. *Иванова Л.Д., Петрова Л.И., Гранаткина Ю.В., Земсков В.С., Соколов О.Б., Скипидаров С.Я., Дуванков В.И.* Экструдированные материалы для термоэлектрических охладителей // *Неорганические материалы.* 2008. Т. 44. № 7. С. 789–793.
13. *Свечникова Т.Е., Земсков В.С., Житинская М.К., Немов С.А. и др.* Свойства монокристаллов твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_3-x\text{Se}_x$, легированных Sn // *Неорганические материалы.* 2006. Т. 42. № 2. С. 135–142.
14. *Shelimova L.E., Konstantinov P.P., Kretova M.A. et al.* Thermoelectric Properties of Cation-Substituted Solid Solutions Based on Layered Tetradymite-Like Compounds // *Inorg. Mater.* 2004. V. 40. № 5. P. 461–467.
15. *Desai C.F., Maunick J., Soni P.H. et al.* Vickers microhardness of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.05-0.30$) Crystals // *J. Mater. Sci.* 2009. V. 44. № 13. P. 3504–3507.
16. *Paulescu M., Vizman D., Lasca M., Negrila R., Stef M.* Experimental Study of Proton Irradiation Effect on Silicon Solar Cells // *Physics Conference TIM 15–16. Timisoara.* 2017. V. 1796(1).
<https://doi.org/10.1063/1.4972388>
17. *Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Коваленко А.И., Коваленко М.С., Колоколов Ф.А., Лунин Л.С.* Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами при температуре 83 К, на характеристики кремниевых фотоэлектрических структур // *ФТП.* 2020. Т. 54. Вып. 2. С. 144–148.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2020.02.48909.9255>
18. *Volkov A.G., Dyugaeva N.A., Kuvyrkin G.N. et al.* Studying the Change in Characteristics of Optical Surfaces of a Spacecraft // *Cosmic. Res.* 2017. V. 55. P. 124–127.
<https://doi.org/10.1134/S0010952517020071>
19. *Protasov Y.Y.* A Generator of Intense Shock Waves // *Prib. Tekh. Eksp.* 2002. V. 45. № 6. P. 795–797.
<https://doi.org/10.1023/A:1021435223174>
20. *Ryzhkov V.V.* Thermoelectric Properties Determination of Multilayered Semiconductor Materials at Harmonic Single-Frequency Excitation of Temperature Field // *Mater. Today: Pros.* 2018. V. 5. № 4. P. 10371–10379.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.285>
21. *Шупенев А.Е., Коршунов И.С., Ильин А.С., Осипов А.С., Григорянц А.Г.* Радиационные термоэлементы на основе теллурида висмута, получаемые методом импульсного лазерного осаждения // *ФТП.* 2019. Т. 53. Вып. 6. С. 756–760.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2019.06.47722.31>
22. *Брудный В.Н.* Радиационные дефекты в полупроводниках II–IV–V₂ (обзор) // *Изв. вузов. Физика.* 1986. № 8. С. 84–97.
23. *Винецкий В.Л., Смирнов Л.С.* О компенсации проводимости радиационными дефектами в полупроводниках // *ФТП.* 1971. Т. 5. № 1. С. 176–180.
24. *Тагиев М.М., Абдинов Д.Ш.* Термоэлектрический экструдированный материал на основе твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ // *Материалы для термоэлектрических преобразователей.* СПб.: РАН, 1995. С. 77–78.
25. *Хейкер Д.М., Зевин Л.С.* Рентгеновская дифрактометрия. М.: Физматгиз, 1963. 380 с.
26. *Тагиев М.М.* Влияние размеров зерен и термообработки на магнитотермоэлектрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ // *Термоэлектрики и их применения.* СПб. 2000. С. 137–141.
27. *Драбкин И.А., Освенский В.Б., Сорокин А.И., Панченко О.Е., Нарожная О.Е.* Контактное сопротивление в составных термоэлектрических ветвях // *ФТП.* 2017. Т. 51. Вып. 8. С. 1038–1040.
28. *Алиева Т.Д., Абдинов Д.Ш., Салаев Э.Ю.* Влияние обработки поверхностей термоэлектрических материалов на свойства термоэлементов, изготовленных из твердых растворов систем $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{–Bi}_2\text{Se}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{–Sb}_2\text{Te}_3$ // *Изв. АН. СССР. Неорганические материалы.* 1981. Т. 17. № 10. С. 1773–1776.
29. *Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровиков Р.П., Сибиных В.А.* Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. М.: Наука, 1974. 168 с.
30. *Земсков В.С., Белая А.Д.* Исследование влияния условий выращивания монокристаллов из расплавов на структуру и свойства твердых растворов на основе висмута с сурьмой. М.: ИМЕТ, 1981. 20 с.
31. *Тагиев М.М., Самедов Ф.С., Абдинов Д.Ш.* Влияние термической обработки на свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легиро-

- ванного свинцом // Неорган. материалы. 1998. Т. 34. № 7. С. 196–199.
32. *Тагиев М.М., Самедов Ф.С., Абдинов Д.Ш.* Влияние отжига на электрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ // Неорган. материалы. 1997. Т. 33. № 12. С. 191–193.
33. *Тагиев М.М., Самедов Ф.С., Абдинов Д.Ш.* Анизотропия электрических свойств экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированных свинцом и теллуром // Неорган. материалы. 1999. Т. 35. № 3. С. 296–299.
34. *Брудный В.Н., Пешев В.В., Суржигов А.П.* Радиационное дефектообразование в электрических полях: арсенид галлия, фосфид индия. Новосибирск: Наука, 2001. 136 с.
35. *Брудный В.Н., Пешев В.В.* Влияние электронного (зарядового) состояния Е-ловушек на эффективность их накопления в n-GaAs при облучении // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 1. С. 22–28.
36. *Агринская Н.В., Машовец Т.В.* Самокомпенсация в полупроводниках // ФТП. 1994. Т. 28. Вып. 9. С. 1505–1534.
37. *Винецкий В.Л., Холодарь Г.А.* Радиационная физика полупроводников. Киев. 1979. 332 с.