

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ГАММА-РАДИАЦИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, ЛЕГИРОВАННЫХ АКЦЕПТОРНОЙ ПРИМЕСЬЮ СВИНЦА

© 2024 г. М. М. Тагиев^{1, 2, *}, И. А. Абдуллаева³, Г. Д. Абдинова²

¹Азербайджанский государственный экономический университет,
ул. Истиглалият, 6, Баку, AZ 1001 Азербайджан

²Институт физики им. Г.М. Абдуллаева Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,
пр. Г. Джавида, 131, Баку, AZ 1141 Азербайджан

³Институт радиационных проблем Министерства науки и образования Азербайджанской республики,
пр. Б. Вагабзаде, 9, Баку, AZ 1143 Азербайджан
*e-mail: mail_tagiyev@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2023 г.

После доработки 15.01.2024 г.

Принята к публикации 16.01.2024 г.

Исследовано влияние гамма-радиации на электрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированных 0.001–0.05 ат. % свинца, в интервале $\sim 77\text{--}300$ К. Высказано предположение, что в нелегированных образцах γ -облучение дозой ~ 1 Мрад создает дефекты донорного типа, приводит к росту концентрации носителей тока и электропроводности σ . В образцах с 0.001 ат. % Pb радиационные донорные дефекты, компенсируя акцепторные центры свинца, уменьшают σ . Для образцов с концентрацией Pb ≥ 0.005 ат. % компенсация электронов проводимости осуществляется акцепторными центрами свинца, поэтому созданные γ -облучением новые электроны приводят к росту σ . Наблюдается удовлетворительная корреляция в зависимостях электропроводности σ , коэффициентов термо-эдс α и Холла R_x от содержания Pb и дозы γ -облучения.

Ключевые слова: экструзия, твердый раствор, термоэлектрический материал, γ -облучение, электропроводность

DOI: 10.31857/S0002337X24030029, EDN: LLQYHG

ВВЕДЕНИЕ

Высокопрочные экструдированные материалы на основе системы Bi–Sb эффективны для создания низкотемпературных термо- и магнитотермоэлектрических преобразователей энергии [1–8]. При этом, с точки зрения перекрытия температурной области $\sim 150\text{--}250$ К, в которой известные полупроводниковые сплавы не сохраняют высоких значений термоэлектрической добротности, представляют интерес сплавы Bi–Sb с добавками примесей акцепторного типа, например олова, свинца и т.д. [9, 10].

Радиационные термоэлементы являются структурной единицей сенсоров, используемых при измерении энергетических параметров различного излучения в диапазоне длин волн от 0.1 до 100 мкм [11–15].

Под воздействием гамма-радиации происходит изменение спектра локализованных состояний, связанных структурными дефектами, которые приводят к изменению электрических свойств материала.

Выяснено, что эффективность дефектообразования и тип радиационных дефектов (РД) в сильной степени зависят от электронных параметров исходного материала, положения уровня Ферми. Показано, что при концентрации РД, превышающей концентрацию химических примесей (условия “сильного” облучения), имеет место закрепление уровня Ферми в стационарном положении F_{lim} , характерном для каждого материала [12, 16, 17].

Образование РД в полупроводниковом материале можно рассматривать как процесс мо-

дифицирования материала [18–20]. Модифицирование электрических свойств и смещение уровня Ферми в состоянии F_{lim} при облучении гамма-квантами относятся к процессам самокомпенсации.

В работе [21] по результатам холловских измерений выявлено, что гамма-облучение кристаллов кремния n -типа проводимости при температуре жидкого азота (77.4 К) приводит к росту подвижности носителей тока. Эффект был объяснен введением при облучении акцепторных центров, частично нейтрализующих заряд ионных остовов.

Электронные преобразователи на основе твердых растворов системы Bi–Sb часто используются в условиях радиации. РД, созданные при γ -облучении, влияя на электрические и тепловые свойства полупроводниковых материалов, существенно изменяют и параметры приборов [10, 12, 14]. Поэтому исследование влияния РД на термоэлектрические свойства твердых растворов системы Bi–Sb актуально.

С целью изучения влияния γ -радиации на электрические свойства твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированного акцепторными примесями, получены экструдированные образцы этого состава с 0.001–0.05 ат. % свинца, исследованы зависимости их электрических свойств от дозы γ -излучения в интервале ~ 77 –300 К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Технология получения экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ состоит из нескольких операций.

Синтез. Поскольку термоэлектрические свойства низкотемпературных материалов существенно зависят от чистоты компонентов, висмут ВИ-0000 и сурьма СУ-0000 предварительно очищали от возможного поверхностного оксидного слоя в специальных ампулах. Синтез проводили прямым сплавлением компонентов в кварцевой ампуле, предварительно протравленной в растворе хромпика и промытой бидистиллированной водой. Ампула откачивалась до остаточного давления $\sim 10^{-4}$ Па и отпайвалась. Синтез проводили при ~ 675 К в течение 5 ч. Для улучшения гомогенности сплава ампулу с веществом в процессе синтеза постоянно подвергали качанию с помощью специального устройства.

Измельчение (дробление) проводилось в фарфоровой чашке со ступкой. С использованием специального сита отбиралась фракция с раз-

мерами зерен ≤ 630 мкм. Эксперименты показали, что дальнейшее уменьшение размеров зерен ухудшает термоэлектрические свойства материала [8].

Прессование брикетов велось при комнатной температуре и давлении ~ 400 МПа; диаметр брикетов ~ 30 мм.

Формирование ветвей термоэлементов осуществлялось методом экструзии. Технологические условия экструзии существенно влияют на свойства и однородность материала, а также механизм и кинетику процессов, протекающих в материале при послеэкструзионном отжиге. При благоприятном сочетании технологических параметров экструзии обеспечивает получение прутков, не содержащих макроскопических дефектов, с высокими механическими свойствами. При горячей экструзии за счет пластической деформации в образцах наряду с образованием текстуры одновременно возникают различные структурные дефекты, уменьшающие подвижность носителей заряда [6, 8, 22].

Экструзия проводилась на гидравлическом прессе марки МС-1000. Степень вытяжки ~ 25 . Диаметр экструдированных прутков составлял 6 мм.

Оптимальные технологические параметры экструзии установлены нами экспериментально: температура экструзии $T_{экс} = 473$ К, давление экструзии $P_{экс} = 350$ МПа, скорость пресса $v = 0.2$ см/мин.

Послеэкструзионный отжиг. В зависимости от состава образца и условий экструзии оптимальная температура послеэкструзионного отжига может быть как ниже, так и выше температуры экструзии, но всегда выше максимальной температуры нагрева материала в ходе технологических воздействий. Длительность отжига в откачанных до давления 10^{-3} Па кварцевых ампулах составляла 2 ч при ~ 503 К.

Образцы твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированного свинцом, модифицировали γ -квантами источника ^{60}Co дозами 1.0, 10 и 50 Мрад. Поглощенную образцом дозу определяли методом, описанным в [23]. Образцы для измерения размерами $0.2 \times 0.4 \times 1.5$ см вырезались из экструдированных прутков на электроискровой установке А207.40М. В процессе резки на поверхности образца образуется нарушенный слой, для удаления которого использовали раствор $KOH + C_4H_6O_6 + H_2O$ [24].

Точечные контакты наносились сплавом Вуда с использованием флюса ФСКГЛ ($CH_3ON_3 +$

+ HCl + C₃H₈O₃) и имели размер ~0.5 мм. Электрические параметры σ , R_{χ} и α измеряли в направлении экструзии по длине образца на постоянном токе зондовым методом [25, 26].

Для устранения паразитных ЭДС на зондах в случае определения σ измерения проводились в двух противоположных направлениях тока, а для устранения влияния асимметричности холловских контактов и других паразитных ЭДС, обусловленных гальваномагнитными и термомагнитными эффектами, измерения холловского напряжения U_{χ} проводились в двух противоположных направлениях тока и магнитного поля. При этом поворотом криостата в магнитном поле достигалась максимальная величина холловского напряжения на образце. Магнитное поле изменялось с шагом 0.5 кЭ. Электропроводность и гальваномагнитные эффекты измерялись в изотермических условиях, а термо-ЭДС – в адиабатических условиях.

Для регистрации использовались измерительный цифровой универсальный измерительный прибор, цифровой вольтметр В7-21 и амперметр SM3D.

Исследовались необлученные и облученные образцы с различными дозами: 1, 10 и 50 Мрад. Исследованы удельная электропроводность (σ), коэффициенты термо-ЭДС (α) и Холла (R_{χ}) в интервале ~77–300 К.

Погрешность при измерении электрических параметров не превышала $\sim \pm 3\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты о влиянии примесей свинца и γ -радиации на электрические параметры экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ представлены на рис. 1 и 2. Видно, что γ -облучение по-разному влияет на электропроводность образцов с различными концентрациями свинца. При этом основное изменение σ образцов под действием облучения происходит при дозах до ~10 Мрад. Так, при ~77 К под действием γ -облучения дозой 1 Мрад σ нелегированного образца растет от 5230 до 8431 См/см, с ростом дозы облучения до 10 Мрад уменьшается до 4240 См/см, а при дозе до 50 Мрад, несколько возрастая, доходит до 4552 См/см. Легирование образца $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ 0.001 ат. % Pb приводит к увеличению σ до 7353 См/см. В этом образце под действием γ -облучения дозой 1 Мрад σ , существенно (в ~3.5 раза) уменьшаясь, при дальнейшем росте дозы облучения до 10 Мрад в ~2.2 раза возрас-

тает, а затем при росте дозы до 50 Мрад медленно увеличивается (~50%). Зависимости электропроводности образцов, легированных 0.005, 0.01 и 0.05 ат. % Pb, от дозы облучения почти идентичны: при малых дозах (до 10 Мрад) σ несколько растет, а с ростом дозы облучения существенно не меняется. Изменения σ под действием γ -облучения удовлетворительно коррелируют с изменениями коэффициентов термо-ЭДС и Холла. В необлученном образце, легированном 0.05 ат. % Pb, ниже температуры ~130 К (до ~77 К) знаки коэффициентов α и R_{χ} положительные, т.е. образец имеет p -тип проводимости. При всех дозах облучения образцы твердых растворов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированные до 0.05 ат. % Pb, в интервале ~77–300 К имеют n -тип проводимости, т.е. знаки коэффициентов α и R_{χ} отрицательные.

Зависимости электрических параметров от дозы γ -облучения объясняются следующим образом. Предполагается, что γ -облучение создает в образцах твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ РД донорного типа. Поэтому при дозе 1 Мрад в нелегированном образце концентрация свободных электронов n и электропроводность σ растут. С увеличением дозы γ -облучения количество РД в нелегированном образце $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ существенно повышается и эти дефекты, объединяясь, создают более крупные электрически нейтральные дефекты. В результате концентрация электронов, созданных малыми дозами (до 1 Мрад), уменьшается. При этом за счет рассеяния носителей тока на крупных дефектах падает и их подвижность. Эти факторы приводят к уменьшению электропроводности в нелегированном образце $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, облученном γ -квантами при больших дозах.

Результаты изучения влияния γ -облучения на электрические свойства образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\langle\text{Pb}\rangle$ показывают, что сильно облученный образец имеет низкую концентрацию свободных носителей заряда, высокую концентрацию (плотность) связанного на дефектах заряда и степень компенсации радиационных доноров и акцепторов, приближающуюся к единице.

Примеси свинца в $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ образуют акцепторные центры. При концентрациях до 0.001 ат. % Pb эти центры, создавая определенное количество дырок, увеличивают суммарную концентрацию носителей тока и σ образцов. При концентрациях свинца ≥ 0.005 ат. % акцепторные центры компенсируют часть свободных электронов. В связи с этим при введении Pb в $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ электропроводность падает, и при концентраци-

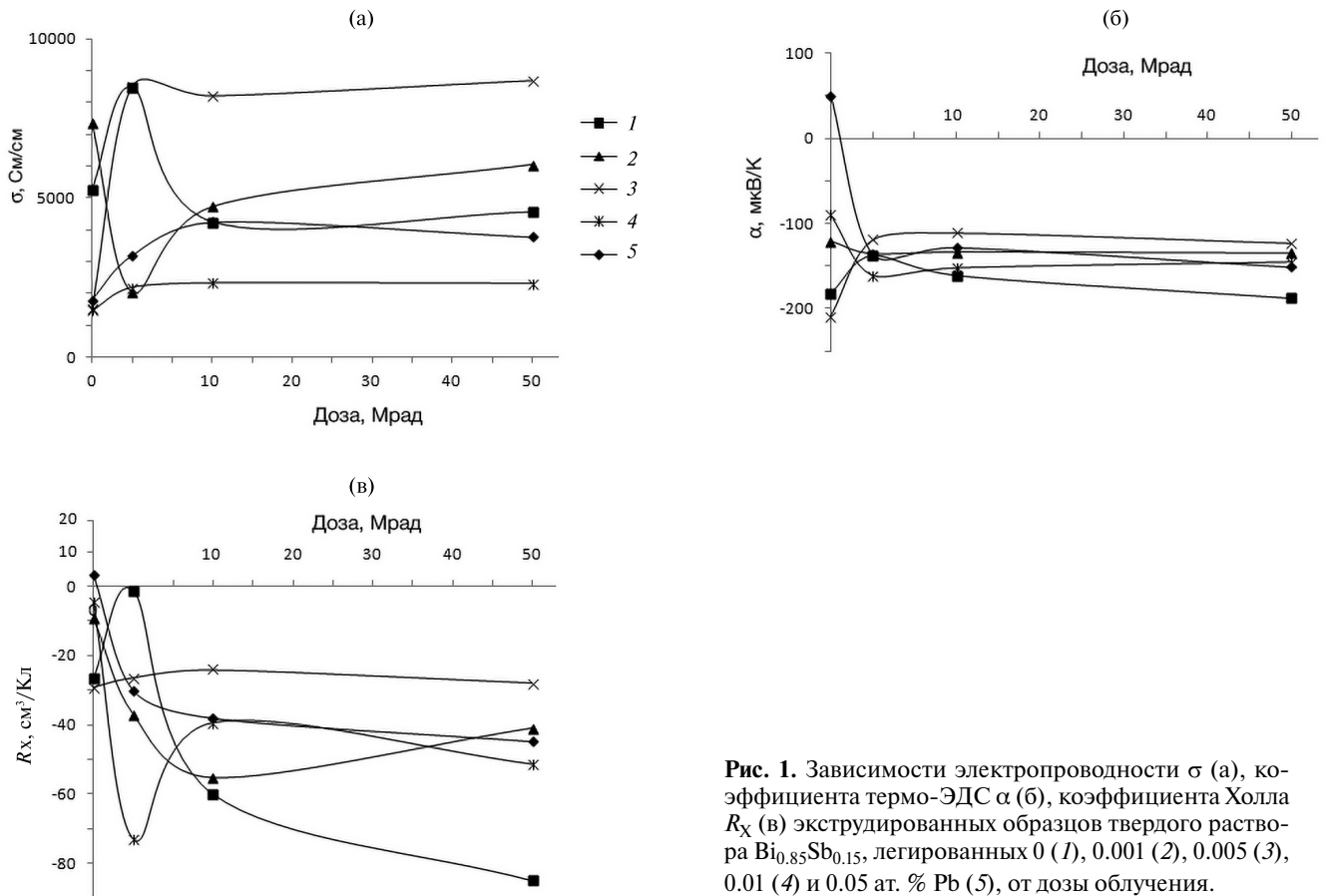


Рис. 1. Зависимости электропроводности σ (а), коэффициента термо-ЭДС α (б), коэффициента Холла R_H (в) экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированных 0 (1), 0.001 (2), 0.005 (3), 0.01 (4) и 0.05 ат. % Pb (5), от дозы облучения.

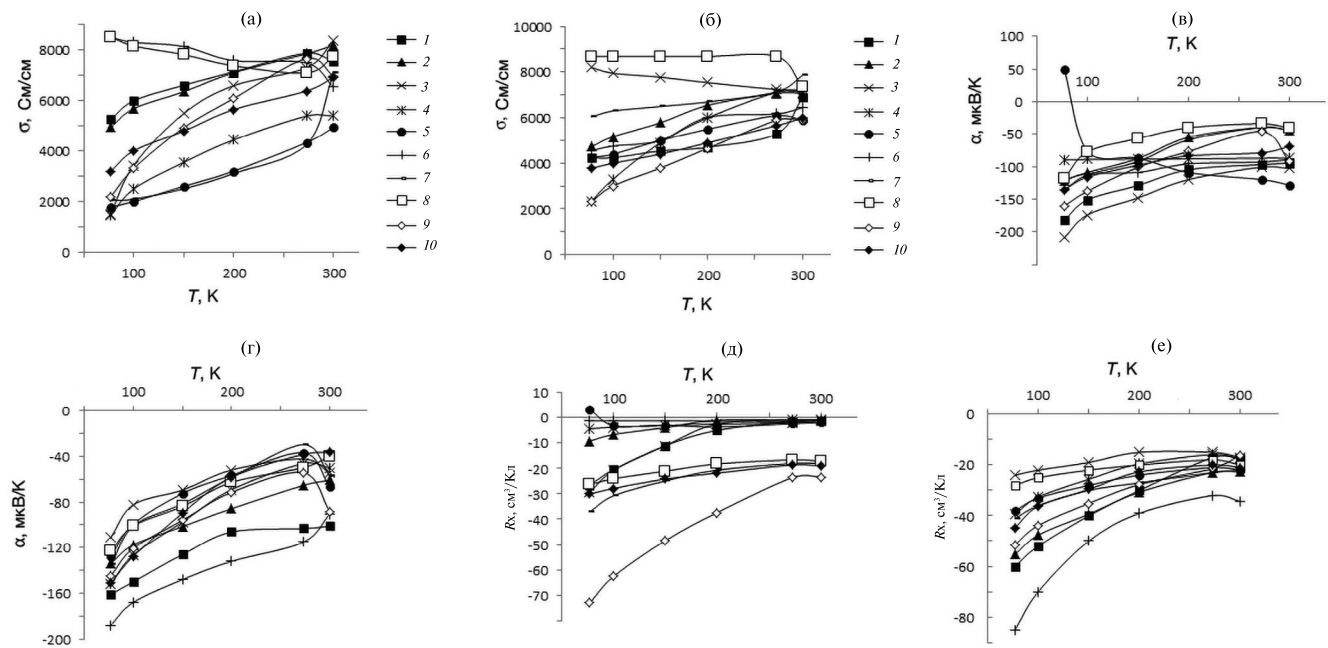


Рис. 2. Температурные зависимости электропроводности σ (а, б), коэффициентов термо-ЭДС α (в, г) и Холла R_H (д, е) экструдированных образцов $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$, легированных 0 (1, 6), 0.001 (2, 7), 0.005 (3, 8), 0.01 (4, 9), 0.05 ат. % Pb (5, 10): а, в, д – до (1–5) и после облучения дозой 1 Mrad (6–10); б, г, е – после облучения дозой 10 (1–5), 50 Mrad (6–10).

ях свинца ≥ 0.05 ат. % α и R_X образцов при ~ 77 К имеют отрицательный знак.

Для образца с 0.001 ат. % Pb РД, созданные γ -квантами с дозой 1 Mrad, компенсируя акцепторные центры свинца, уменьшают концентрацию дырок, суммарную концентрацию носителей тока и электропроводность. Увеличение удельного сопротивления в образцах $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15} < 0.001$ ат. % Pb, облученных гамма-квантами при дозе в 1 Mrad, указывает на смещение уровня Ферми при облучении на, примерно $\sim E_g/2$ за счет захвата свободных дырок на уровне РД. При больших концентрациях свинца (≥ 0.005 ат. % Pb) компенсация электронов осуществляется акцепторными центрами Pb, что приводит к уменьшению σ необлученного образца при ~ 77 К до 1780 См/см. Созданные γ -облучением новые электроны проводимости приводят к росту σ образцов.

Облучение изменяет свойства материала аналогично легированию.

Полученные данные по влиянию γ -облучения на электрические параметры твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ с примесями свинца хорошо согласуются с результатами [8, 9, 11, 12, 20, 27–29].

Таким образом, зависимости электрических параметров экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, содержащих акцепторные примеси свинца, от дозы γ -облучения удовлетворительно объясняются предположением донорного характера дефектов, созданных в образцах γ -облучением, и компенсацией акцепторных центров свинца этими дефектами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При низких дозах гамма-облучения твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15} < \text{Pb} >$ возникают РД, которые приводят к росту концентрации свободных электронов n , электропроводности σ и уменьшению коэффициентов термо-ЭДС α и R_X . С ростом дозы облучения концентрация количество РД растет, что приводит к их объединению, уменьшению концентрацию носителей тока и соответствующему изменению σ , α и R_X .

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

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. 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.
3. Koyano M., Yamanouchi M. Electronic Properties of Inhomogeneous Bi–Sb–Ni Composite Alloys // J. Phys.: Conf. Ser. 2009. V. 150. P. 052128. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/150/5/052128/meta>
4. 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. <https://doi.org/10.21883/FTR.2019.05.47565.23>
5. Агаев З.Ф., Тагиев М.М., Абдинова Г.Д., Багиева Г.З., Абдинов Д.Ш. Теплопроводность экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ с примесями Gd и Pb // Неорган. материалы. 2008. Т. 44. № 2. С. 137–139.
6. Тагиев М.М. Гальваномагнитные свойства легированных твердых растворов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, модифицированных ZrO_2 // Неорган. материалы. 1999. Т. 35. № 9. С. 1042–1044.
7. Desai C.F., Maunick J., Soni P.H. et al. Vicker's 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. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3470-3>
8. Тагиев М.М. Влияние размеров зерен и примеси свинца на термоэлектрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ // Неорган. материалы. 2021. Т. 57. № 2. С. 119–124. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21020135>
9. Abdullayeva I.A., Tagiyev M.M., Abdinova G.D. Magnetothermoelectric Properties $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ Solid Solution Doped with Lead and Tellurium Impurities // Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng. 2021. V. 13. № 3. P. 110–114.
10. Иванова Л.Д. Термоэлектрические материалы для различных температурных уровней // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 7. С. 948–951.
11. Тагиев М.М., Абдуллаева И.А., Абдинова Г.Д. Влияние гамма-радиации на магнитотермоэлектрические свойства экструдированных образцов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, модифицированных ZrO_2 // Неорган. материалы. 2022. Т. 58. № 6. С. 589–595. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22060148>
12. Шупенев А.Е., Коршунов И.С., Ильин А.С. и др. Радиационные термоэлементы на основе теллурида висмута, получаемого методом импульсного ла-

- зерного охлаждения // ФТП. 2019. Т. 53. Вып. 6. С. 756–760.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2019.06.47722.31>
13. *Paulescu M., Vizman D., Lascu M., Negrila R., Stef M.* Experimental Study of Proton Irradiation Effect on Silicon Solar Cells // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1796.
<https://doi.org/10.1063/1.4972388>
14. *Park S., Bourgoin J.C., Sim H., Baur C., Khorenko V., Cavani O., Bouerois J., Picard S., Boizot B.* Space Degradation of 3J Solar Cells: I—Proton Irradiation // Progr. Photovot. Res. Appl. 2018. V. 26. № 10. P. 778–788.
<https://doi.org/10.1002/pip.3016>
15. *Иванова М.М., Кечемцев А.Н., Михайлов А.Н., Филатов Д.О., Горшкова П., Волкова Н.С., Чалков В.Ю., Шенгуров В.Г.* Влияние импульсного и гамма-нейтронного облучения на фоточувствительность фотодиодов на базе Si с наноструктурами GeSi и эпитаксиальными слоями Ge // ФТП. 2018. Т. 52. Вып. 6. С. 651–655.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2018.06.45931.8670>
16. *Брудный В.Н., Пешев В.В.* Влияние электронного (зарядового) состояния E-ловушек на эффективность их накопления в *n*-GaAs при облучении // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 1. С. 22–28.
17. *Козюхин С.А.* Химическое модифицирование материалов фазовой памяти на основе сложных халькогенидов // Журн. неорган. химии. 2021. Т. 66. № 2. С. 291–297.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X21020100>
18. *Брудный В.Н., Потанов А.И.* Электрические свойства твердых растворов $A^{III}V^V-A^{IV}C_2^V$, облученных ионами H // ФТТ. 1983. С. 1347–1348.
19. *Козловский В.В.* Модифицирование полупроводников пучками протонов. СПб.: Наука, 2003. 268 с.
20. *Tagiyev M.M., Abdullayeva I.A.* Effect of γ -radiation on Magneto-Thermoelectric Properties of the Extruded Samples of $Bi_{85}Sb_{15}^{(Te)}$ Solid Solution // Int. J. Mod. Phys. B. 2021. V. 35. № 7. P. 2150099–2150108.
<https://doi.org/10.1142/S0217979221500995>
21. *Видалько Е. Н., Гайдар Г.П., Гирый В.А.* Подвижность носителей тока в γ -облученных кристаллах кремния // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1986. Т. 22. № 4. С. 533–536.
22. *Zhi-Lei Wang, Takehiro Araki, Tetsuhiko Onda, Zhong-Chun Chen.* Effect of Annealing on Microstructure and Thermoelectric Properties of Hot-Extruded Bi–Sb–Te Bulk Materials // J. Mater. Sci. 2018. V. 53. № 12. P. 9117–9130.
23. *Pikayev A.K.* Dosimetry in Radiation Chemistry. М.: Nauka, 1975. 232 p.
24. *Алиева Т.Д., Абдинов Д.Ш., Салаев Э.Ю.* Влияние обработки поверхностей термоэлектрических материалов на свойства термоэлементов, изготовленных из твердых растворов систем Bi_2Te_3 – Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 – Sb_2Te_3 // Изв. АН. СССР. Неорган. материалы. 1981. Т. 17. № 10. С. 1773–1776.
25. *Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровикова Р.П., Смирнов В.А.* Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. М.: Наука, 1974. 168 с.
26. *Бархалов Б.Ш., Тагиев М.М., Багиева Г.З., Абдинова Г.Д., Алиев Р.Ю., Магеррамова К.И.* Влияние размеров зерен на термоэлектрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 4. С. 94–101.
<https://doi.org/10.17223/00213411/62/4/94>
27. *Tagiyev M.M., Abdullayeva I.A.* Influence of Gamma Radiation on Magnetolectric Properties of Extruded Samples of Solid Solution $Bi_{85}Sb_{15}<Te>$ Modified ZrO_2 // Int. J. Mod. Phys. B. 2022. V. 36. № 18. P. 2250103–2250112.
<https://doi.org/10.1142/S021797922250103X>
28. *Суслов М.В., Грабов В.М., Комаров В.А., Демидов Е.В., Сенкевич С.В., Суслов А.В.* Термоэдс тонких пленок $Bi_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0,15$) на подложках из слюды и полиимида в температурном интервале 77–300К // ФТП. 2019. Т. 53. № 5. С. 593–596.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2019.05.47544.02>
29. *Грабов В.М., Урюпин О.Н.* Влияние дендритной неоднородности на термоэлектрические свойства кристаллов $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ // ФТП. 2022. Т. 56. Вып. 2. С. 145–148.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2022.02.51951.18>