

**Yarimo'tkazgichli materiallar asosida konvertorlar parametrlarini
o'zgartirish xususiyatlarini o'rganish.**

Kuchqarov Behzod Xoshimjanovich¹.

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD).Dotsent

Ergashev Murodjon A'zamjon o'g'li¹.

Talaba.

¹*Namangan muxandislik-texnologiya institute.*

Yusufjonov Akmalxon Abdumajid o'g'li².

²*Namangan davlat universiteti fizika fa'kulteti magistranti.*

[Tel:+998977054042](tel:+998977054042)

E-mail: e.murodjon4042@gmail.com

bxquchqarov@mail.ru

Annotatsiya: Yarimo'tkazgich moddalariga asoslangan konvertorlarni ishlab chiqishda III-Sb birikmalari (AlSb, GaSb, GaInAsSb) asosidagi, elektr parametrlarini saqlab qolgan holda, issiqlik tasirlarini uzatishni sezilarli darajada o'rganish, eng muhim xisoblanadi. Bu holda eng muvofiq ko'rinishdagi yuqori hajmli konsentratsiyaga ega bo'lgan nanokristallar termojuftlikning asosiy matritsasi xisoblanadi. Bunday tuzilmalarni shakllantirish uchun mos materiallardan biri galyum antimonid. Ushbu birikma to'g'ridan-to'g'ri kavakli yarimo'tkazgich xisoblanadi. Tarmoq oralig'i 0,72 eV va yuqori tashuvchining harakatchanligi bilan ($5000 \text{ sm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ C}^{-1}$ bilan 300K da), material yuqori elektron harakatchanligi bo'lgan tranzistorlarda va infira qizil spektriga yaqin optik qurilmalarda qo'llaniladi. Bundan tashqari, ommaviy GaSb yuqori Seebek ko'effitsienti va 700-900 K mintaqasida nisbatan past issiqlik o'tkazuvchanligiga ega ekanligi ko'rsatdi, bu holat esa materialni termoelektrik nuqtai nazardan istiqbolli xisoblanadi. Qoida tariqasida, birikma qalin plyonkalar (>100 nm) yoki turli stexiometrik nisbatlarga ega III-Sb birikmalari (AlSb, GaSb, GaInAsSb) asosidagi super panjaralar shaklida hosil bo'ladi.

Kalit so'zlar: vismut, surma, selen, tellur, konvertor, termojuftlik, detector, termofotovoltai, stexiometrik, planar, fotolitografiya, silisid, seebek, galyum, antimonid, heterostruktura, konvertorlar, termal, termofotovoltai, gradiend, skutteruditlar, fotolitografiya, nanoblada, metall kontaktlar, antifaza, substrat, antimonid, substratlar, silikon.

**Изучение особенностей изменения параметров преобразователей на
основе полупроводниковых материалов.**

Кучқаров Бехзод Хошимжанович¹.

Доктор философских наук по физике и математике доцент(PhD), Доцент.

Эргашев Муроджон Абзамжон угли¹.

Студент.

¹*Наманганский инженерно-технологический институт*

Юсуфжонов Акмал Абумажид угли²

²*Магистрант Наманганского государственного университета, физический факультет. Тел: +998972177447*

E-mail: e.murodjon4042@gmail.com

bxquchqarov@mail.ru

Аннотация: При разработке преобразователей на основе полупроводниковых материалов наиболее важным считается существенное изучение переноса тепловых эффектов на основе соединений III-Sb (AlSb, GaSb, GaInAsSb) при сохранении электрических параметров. При этом основной матрицей термопары считаются нанокристаллы с высокой объемной концентрацией самого бескомпромиссного вида. Одним из материалов, пригодных для формирования таких структур, является антимонид галлия. Это соединение считается прямым пористым полупроводником. Имея ширину запрещенной зоны 0,72 эВ и высокую подвижность носителей ($5000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ С}^{-1}$ при 300 К), этот материал используется в транзисторах с высокой подвижностью электронов и оптических устройствах ближнего инфракрасного диапазона. Кроме того, показано, что объемный GaSb имеет высокий коэффициент Зеебека и относительно низкую теплопроводность в области 700-900 К, что делает материал перспективным с термоэлектрической точки зрения. Как правило, соединение формируется в виде толстых пленок (>100 нм) или сверхрешеток на основе соединений III-Sb (AlSb, GaSb, GaInAsSb) с различным стехиометрическим соотношением.

Ключевое слово: висмут, сурьма, селен, теллур, преобразователь, термопара, детектор, термофотоэлектрический, стехиометрический, планарный, фотолитография, силицид, зеебек, галлий, антимонид, гетероструктура, преобразователи, тепловые, термофотоэлектрические, градиент, скуттерудиты, фотолитография, нанолезвия, металлические контакты, противифаза, подложка, антимонид, подложки, кремний.

Studying the properties of change of converter parameters based on semiconductor materials.

Kuchkarov Bekhzod Khoshimjanovich¹.

Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and Mathematical Sciences, Docent.

Ergashev Murodjon A'zamjon o'g'li¹.

Student.

¹*Namangan Engineering and Technology Institute.*

Yusufjonov Akmal Khan Abdumajid o'g'li²

²Master student, Namangan State University, Faculty of Physics.

[Tel:+998972177447](tel:+998972177447)

E-mail: e.murodjon4042@gmail.com

bxquchqarov@mail.ru

Annotation: In the development of converters based on semiconductor materials, it is considered the most important to significantly study the transfer of heat effects based on III-Sb compounds (AlSb, GaSb, GaInAsSb), while maintaining electrical parameters. In this case, the main matrix of the thermocouple is considered to be nanocrystals with a high volume concentration of the most uncompromising appearance. One of the materials suitable for forming such structures is gallium antimonide. This compound is considered a direct porous semiconductor. With a band gap of 0,72 eV and high carrier mobility (with 5000 cm² V⁻¹C⁻¹ at 300 K), the material is used in transistors with high electron mobility and near-infrared optical devices. Also showed that bulk GaSb has a high Seebeck coefficient and a relatively low thermal conductivity in the region of 700-900 K, which makes the material promising from a thermoelectric point of view. As a rule, the compound is formed in the form of thick films (>100 nm) or superlattices based on III-Sb compounds (AlSb, GaSb, GaInAsSb) with different stoichiometric ratios.

Keyword: bismuth, antimony, selenium, tellurium, converter, thermocouple, detector, thermophotovoltaic, stoichiometric, planar, photolithography, silicide, seebeck, gallium, antimonide, heterostructure, converters, thermal, thermophotovoltaic, gradient, skutterudites, photolithography, nanoblades, metal contacts, antiphase, substrate, antimonide, substrates, silicon.

Входить:

Для низкотемпературных термопар сегодня предлагаются соединения на основе висмута, сурьмы, селена и теллура (соединения BST и BTS). Несмотря на высокие термоэлектрические температурные характеристики, широкое коммерческое использование модулей на основе такого соединения осложнено высокой стоимостью и токсичностью элементов. Кремний лишен таких недостатков, а также экономически эффективен и широко используется во многих электронных устройствах. Однако низкий термоэлектрический показатель из-за высокой теплопроводности препятствует его широкому использованию. Работа термоэлектрического генератора напрямую зависит от электрических свойств и имеет обратную теплопроводность. Кремний демонстрирует конкурентоспособные характеристики по электрическим

параметрам в широком диапазоне температур. Однако высокая теплопроводность кремния препятствует его широкому использованию.

Цель работы.

При разработке преобразователей на основе полупроводниковых материалов кремний, сохраняя свои исходные электрические параметры, главное, значительно усложняет теплообмен. При этом нанокристаллы с высокой объемной концентрацией в наиболее бескомпромиссной форме являются основной матрицей термопары. Одним из материалов, пригодных для формирования таких структур, является антимонид галлия [1]. Это соединение представляет собой прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 0,72 эВ и высокой подвижностью носителей заряда (300 К при $5000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{дюйм}$), материал используется в транзисторах с высокой подвижностью электронов и оптических устройствах вблизи к инфракрасному (ИК) спектру: лазерные диоды, детекторы, фото- и термофотоэлектрические элементы. Кроме того, показано, что объемный GaSb имеет высокий коэффициент Зеебека и низкую теплопроводность в области 700-900 К, что делает материал перспективным с термоэлектрической точки зрения. Как правило, соединение формируется в виде толстых пленок ($d > 100 \text{ нм}$) или сверхрешеток на основе соединений III-Sb (AlSb, GaSb, GaInAsSb) с различным стехиометрическим соотношением. Несоответствие постоянных решеток кремния и GaSb составляет 12 %, что препятствует образованию пленок нанометровой толщины, но способствует росту нанокристаллов даже на поликристаллических поверхностях кремния [2]. Эта особенность открывает возможности для монолитной интеграции нанокристаллов кремния и GaSb с высокой объемной концентрацией. Оба материала удовлетворяют условию, выдвигаемому термоэлектрическими материалами-ширина запрещенной зоны ($\geq 10 \text{ кВ}$). Формирование антимонида галлия на кремнии подробно рассмотрено с точки зрения толстых пленок и многослойных сборок на основе открытых подложек. В то же время были хорошо освещены особенности монолитной интеграции нанокристаллов GaSb с кремнием. Гетероструктуры Si/NC и GaSb/Si перспективны в области кремниевых микротермоэлектрических гетероструктур. Преобразователи на основе таких материалов можно комбинировать с термонагруженными фото и термофотовольтаиками. Термоэлектрические эффекты представляют собой совокупность явлений, устанавливающих связь между градиентом температуры и электрическим током, проходящим через твердое тело. Эффект Зеебека (появление разности потенциалов под действием градиента температуры, рисунок 1а), эффект Пельтье (противоположное эффекту Зеебека: появление градиента температуры при проведении электрического тока, рисунок 1б) и эффект Томпсона (право выделения или поглощение

тепла в неравномерно нагретом проводнике при прохождении через него постоянного тока).

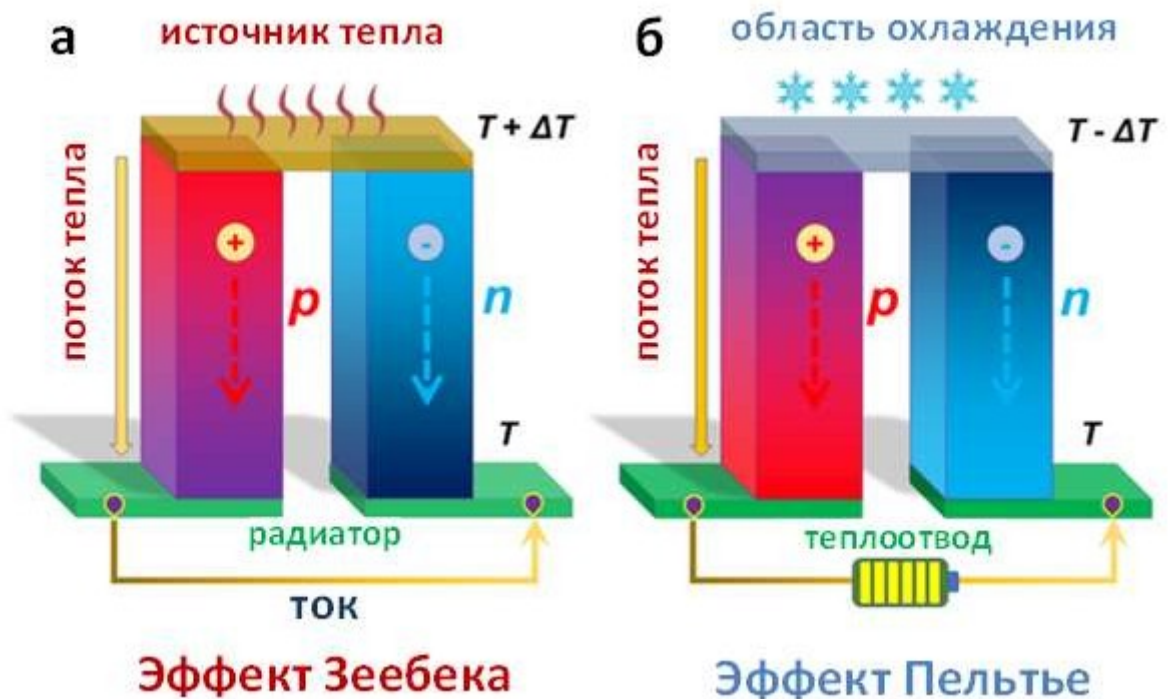


Рисунок 1. Иллюстрация термоэлектрических эффектов Зеебека (а) и Пельтье (б)

С практической точки зрения интересны эффекты Зеебека и Пельтье [3-4]. В таких режимах производительность преобразователей довольно низкая, отличные материалы имеют КПД $\sim 10\%$. Охладители Пельтье в настоящее время активно используются на узкоспециализированных предприятиях в области микроэлектроники и оптической техники. Коммерческое распространение широких генераторов Зеебека и охладителей Пельтье затруднено из-за низкой эффективности и высокой стоимости используемых материалов.

КПД термопары в генераторном режиме (эффект Зеебека) определяется следующим выражением:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \times \frac{\sqrt{1 + Z T_{ay}} - 1}{\sqrt{1 + Z T_{ay}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (1).$$

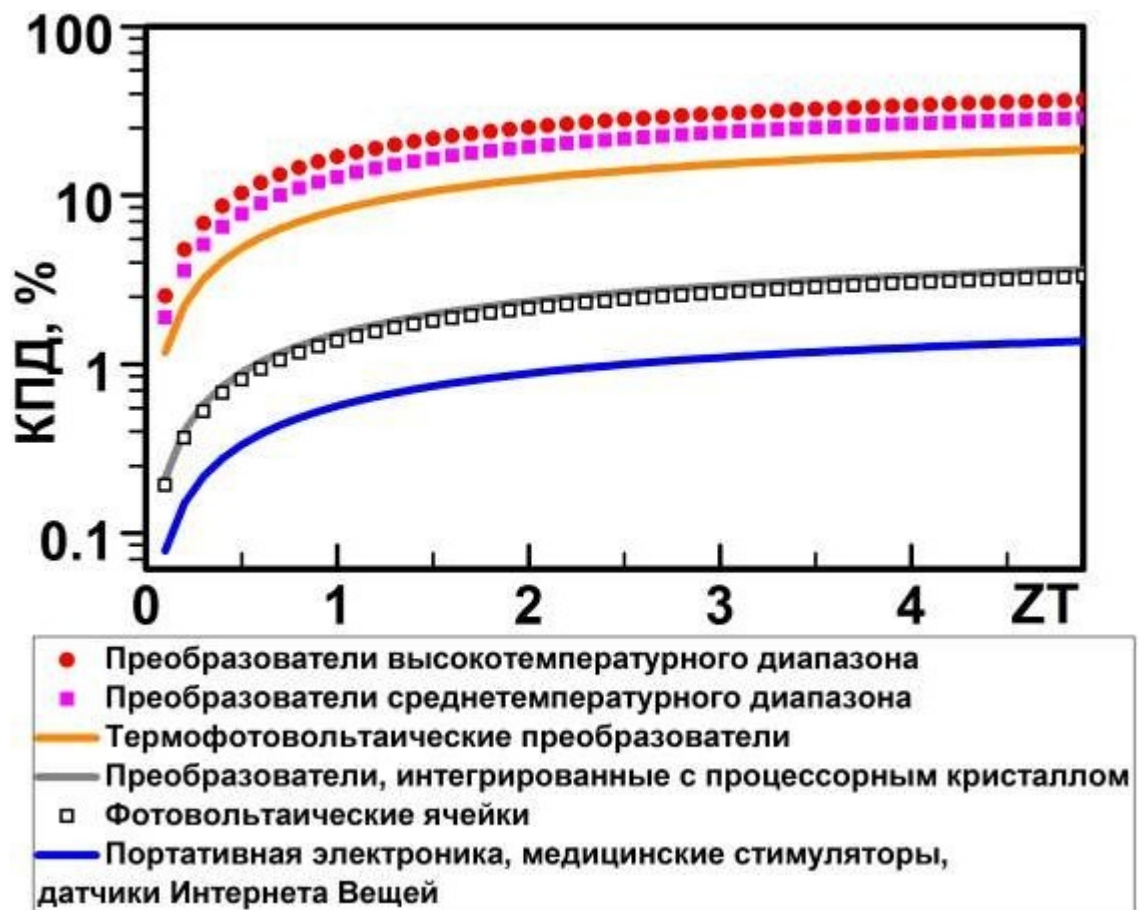


Рисунок 2. Зависимость КПД термоэлектрического преобразователя от добротности. Сплошные линии показывают зависимость от низкотемпературных преобразователей (до 500 K).

На (рисунок 1) представлена зависимость КПД преобразователя от его добротности (формула 1). По диапазону температур отходящего тепла ТЭП можно разделить на низкотемпературные (<500 K), среднетемпературные (500-930 K) и высокотемпературные (>930 K) преобразователи. К источникам тепла в среднетемпературном диапазоне относятся системы отвода продуктов сгорания, контуры охлаждения топки [5-6]. Высокотемпературные преобразователи приводятся в непосредственный контакт с печами и камерами сгорания. Так, при тепловой температуре 700 K и градиенте 400 K КПД генератора с преобразователем средней температуры с добротностью 1 оценивается в 10 %. Для широкого коммерческого использования добротность должна достигать 4 при КПД 20%. За последнее десятилетие добротность увеличилась на 2,8 % редких материалов, имеющих $ZT > 1,7$ (таблица 1). Параметры перспективных термоэлектрических систем. Максимальная термоэлектрическая величина (ZT), регистрируемые параметры: диапазон температур (T), удельная электропроводность (s), коэффициент Зеебека (S), рассчитанные по ним коэффициент мощности (PF), теплопроводность (k) и концентрация носителей заряда (n) [7-8].

Таблица 1

Классификация	ЗТ	T, К	$\sigma, \Omega^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	$S, \sigma, \Omega^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$S^2\sigma, \text{мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^2$	$k, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}$	$n \times 10^{19}, \text{см}^{-3}$
$\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ (BST)	1.8–1.9	270-320	340-650	242-271	2,5-3,8	0,4-0,65	1.2
Cu_{2-x}Se	2.6	1030	250	250	1.6	0,6	20
$\text{Ag}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{1+x}$	2.6	~570	150	~300	1.4	~0,4	2
GeTe	1.8–2.4	600-800	~360	~270	2.6	0,75-1	15
SnSe	1.7–2.8	773-873	41-75	-477/+345	0.9	0.25-0.55	0.5
PbTe	1.7–2.5	750-923	~230	~295	1,6-2,7	~0,8	16
Скуттерудиты	1.8	850	1200	- 210	5.3	2.55	57
SnTe	1.9	929	~890	160	2.3	1.16	40
Фазы Цинтля	1.9	723	~220	- 305	2.1	0,8	3.5

Из анализа формулы (2) можно проследить стратегию повышения эффективности теплоэлектростанций: увеличение коэффициента мощности и уменьшение теплопроводности [9]. Важным параметром, влияющим на коэффициент мощности и теплопроводность носителей, который легко изменить на технологическом этапе, является концентрация носителей. Концентрационная зависимость основных термоэлектрических параметров представлена на Рисунок 3. Влияние концентрации носителя РР нелинейно, что усложняет выбор оптимального значения. Оптимальным обычно является некоторая область высокой концентрации, где ЗТ максимален.

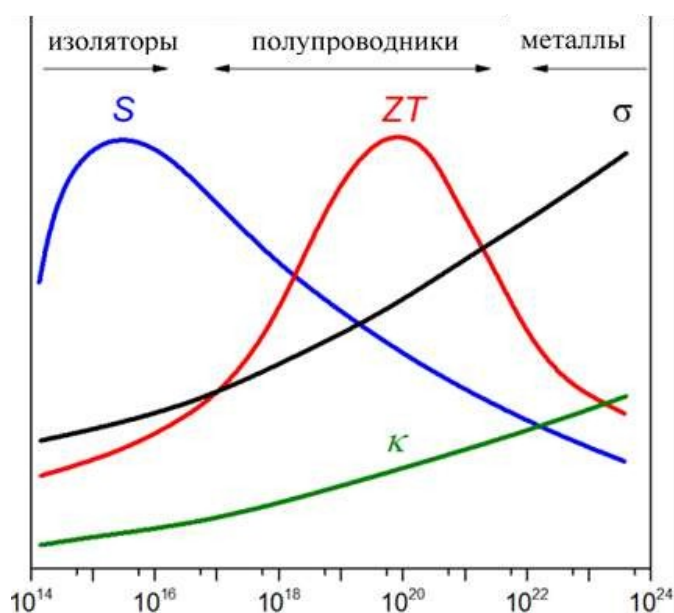


Рисунок 3. Зависимость основных термоэлектрических параметров, определяющих показатель термоЭДС (ЗТ) (S-коэффициент Зеебека, s-удельная электропроводность, k - теплопроводность) от концентрации носителей (см⁻³)

Еще одним параметром, определяющим добротность, является полосовая структура соединения. Изменяя стехиометрию многокомпонентного раствора, можно изменять ширину запрещенной зоны в широких пределах [10-11]. Ширина полосы важна для подавления биполярной проводимости, сопровождающейся компенсацией и оптимизацией концентрации основных носителей, ее избыточное значение подавляет термоэлектрик ЕМФ и увеличивает теплопроводность носителей [12-13]. Изменение стехиометрии в некоторых соединениях влияет на температурную зависимость взаимного расположения энергетических карманов, что вносит дополнительный вклад в электротранспорт носителей, увеличивает коэффициент мощности и ЗТ. Правильный подбор состава матрицы и смесей позволяет изменять плотность состояний за счет гибридизации [14-15]. Это более очевидно в ядрах элементов со многими орбиталями. Наиболее очевидный вклад в электрический транспорт вносят состояния, расположенные вблизи уровня Ферми [16-17]. Помимо примесей, резонансные уровни могут создаваться вакансиями.

$$\Gamma_p = \frac{P_{max}}{A \cdot (T)^2} \quad (2).$$

Еще одной сложной задачей повышения добротности является снижение теплопроводности без существенного ущерба для электротранспорта. Дефекты можно классифицировать по размеру и влиянию на фоновый спектр [18-19]. Точки (нульмерные) включают примесные атомы (междоузлия и замещения), вакансии, квантовые точки и изотопный состав матрицы.

С инженерной точки зрения наиболее удобным способом создания точечных дефектов является введение примесных атомов замещения, так как энергия их образования значительно ниже [20]. Рассеяние фононов на смешанных атомах особенно заметно, если легкие и тяжелые элементы присутствуют вместе в атомной цепочке. Этот обмен вносит ангармонизм в колебания и создает поле напряжений вокруг тяжелых атомов, изменяя деформационный потенциал. Межузельные атомы могут служить точечными источниками носителей заряда и напряжения в сети. Снижение теплопроводности и оптимизация электрических параметров могут быть достигнуты за счет введения полостей [21]. Исследование термоэлектрических свойств пленочных структур на основе кремния,

монокристаллических пленок кремния нанометровой толщины, поликристаллического кремния, кремний-германий, силицидов и некоторых перспективных термоэлектрических соединений. В перечисленной литературе рассмотрены методы синтеза, пригодные для кремниевой технологии [22-23]. Несмотря на простоту синтеза и интеграции, использование пленочных микроТЭГ ограничено тем, что они используют для работы продольный градиент температуры. Альтернативным подходом к структуре кремния является вставка наноразмерных кристаллов в ядро матрицы для снижения теплопроводности [24-25]. Исследования показали значительное снижение теплопроводности кремния до $6,3 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К}^{-1}$. Несмотря на низкие электрические параметры (подвижность $15 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ и коэффициент Зеебека $70 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$) и соответствующие термоэлектрические характеристики (при 300 К) за счет добавления порошка нитрида бора в кремний и кремний- матрица германия $\sim 0,02$), показали эти результаты.

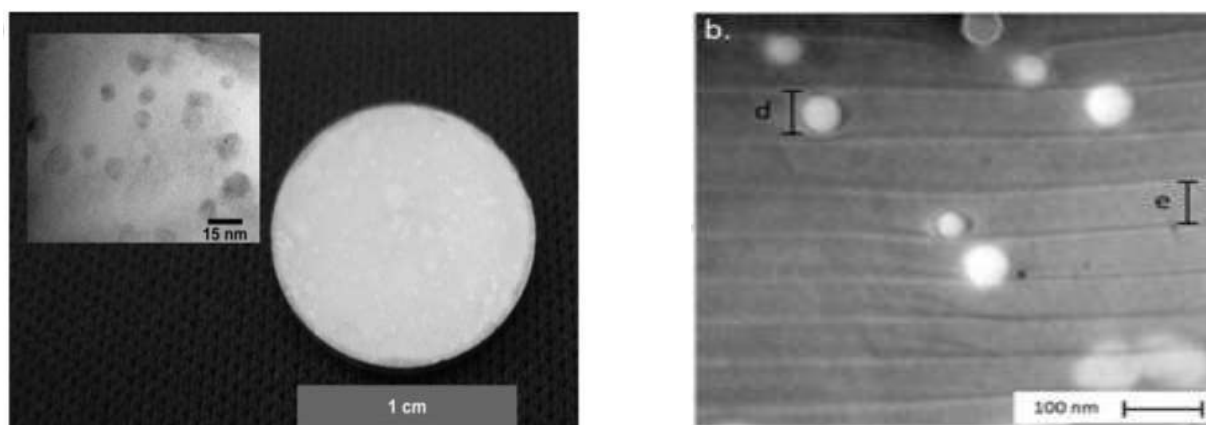


Рисунок 4. Изображения поперечного сечения образцов на основе кремния с внедренными нанокристаллическими наноструктурами а) BN-нитрид бора и б) дисилицид титана.

В заключение можно сказать следующее.

Методом твердофазной эпитаксии был сформирован массив высококонцентрированных нанокристаллов GaSb на кремнии из стехиометрической смеси галлия и сурьмы с общим покрытием 1,5 и 2,6 монослоя. Исследована термическая стабильность нанокристаллов GaSb. Установление эпитаксиальных контактов между кремниевой матрицей и нанокристаллами GaSb, а также свойства интерфейса нанокристаллов Si/GaSb. Исследовать термоэлектрические свойства полученных гетероструктур: удельную электропроводность, коэффициент Зеебека, теплопроводность, и было замечено, что она пригодна для экспериментальной работы путем изучения эффектов.

Использованная литература:

1. O.O. Mamatkarimov, B.H. Kuchkarov, N.Yu. Sharibaev, A.A. Abdulkhayev “Influence Of The Ultrasonic Irradiation On Characteristic Of The Structures Metal-Glass-Semiconductor” European Journal of Molecular & Clinical Medicine 2021/1/1 8/01 str 610-618.
2. B.Kh.Kuchkarov, O.O.Mamatkarimov. “Influence of ultrasonic action on the rate of charge formation of the inversion layer in metal-glass-semiconductor structures” Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki 2019 y 29/4 str 125-134.
3. S.I. Vlasov, A.V. Ovsyannikov, B. Kh. Kuchkarov “Influence of thermo cyclic treatments on SiO₂-Si interface properties in Al-SiO₂-n-Si structures” Uzbekiston Fizika Zhurnali 2012 y 14/1 str 20-22.
4. Б.Х. Кучкаров “Влияние ультразвукового воздействия на скорость формирования заряда инверсионного слоя в структурах метал-стекло-полупроводник Вестник КРАУНЦ” Физико-математические науки 2019y 29/4 стр 125-134.
5. B.Kh. Kuchkarov, O.O Mamatkarimov, A.A. Abdulkhayev “Relaxation dependence of the capacity of a three-layer structure in the process of charge formation of an inversion layer” Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology 2019 y 1/6 str 26-33.
6. S. Zaynobiddinov, B.Kuchqarov “Development of effective methods of teaching theoretical electrotechnics Web of Scientist” International Scientific Research Journal 14/4/2022 y 3/4 str 431-437.
7. B. Kuchkarov, A. Abdulkhayev “Factors providing the efficiency of semiconductor lasers” Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology 2022 y 3/5 str 48-52.
8. SI Vlasov, FA Saparov, B Kh Kuchkarov “ Effect of the semiconductor-insulator interface on the characteristics of the metal-insulator-semiconductor structures ” Uzbekiston Fizika Zhurnali 2009 y 11/3 str 203-206.
9. B.H. Kuchkarov, O.O. Mamatkarimov, A.A. Abdulkarimov, A. Khalmirzayev, and D.M. Mirtojdiyeva “Influence of All-Round Compression on Formation of the Mobile Charge in Lead-Borosilicate Glass Structure” AIP Conference Proceedings 2432, 030039 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0089980> 2432, 030039 © 2022 Author(s)..
10. Б.Х. Кучкаров, М. Кахаров “МДП-структура и ультразвук” Экономика и социум 2019 г. 12/ (67) стр 623-626.
11. D.E. Nazirov, S.I. Vlasov, B. Kh. Kuchkarov, K.U. Bobokhuzhaev “Influence of gadolinium on the electric properties on the interphase boundary of silicon–silicon oxide” Science and world 9/2013y 12/88 str 26-28.
12. O.O. Mamatkarimov, P.X. Хамидов, Р.Г. Жабборов, У.А. Туйчиев, Б.Х. Кучкаров “Релаксационные изменения подвижности и концентрации носителей заряда в Si с глубокими примесными уровнями при воздействии импульсного давления” Физическая инженерия поверхности 2012.
13. B. X. Qo'chqarov, A. Nishonov, X.O. Qo'chqarov “The effect of tunneling current on the speed surface generation of charge carriers” Scientific Bulletin of Namangan State University 2019y 1/7 str 3-6.
14. B.Kuchkarov. O. Mamatkarimov, A. Abdulkhayev, ICECAE IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 012027 “Influence of the ultrasonic irradiation on characteristic of the structures metal-glass-semiconductor”, (2020) y. Paper ID 116.
15. B.X. Qo'chqarov, A.Nishonov, X.O. Qochqarov, Scientific bulletin of Namangan State University, “The effect of tunneling gurrent on the speedd surface generation of charge garries”, (2020)y. 1(7), 3-6.
16. S. I. Vlasov, D. N. Nazirov, B.K. Kuchkarov, K.U. Bobokhujayev, “Influence of all-round compression on formation of the mobile charg in Iead-borosilicate qlass structure”. “Uzbekiston Fizika Zhurnali”, (2014) y. 3(16), 231-233.

17. B.Kh. Kuchkarov, O.O. Mamatkarimov, "Influence of ultrasonic action on the rate of charge formation of the inversion layer in metal-glass-semiconductor structures" Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki, (2019) y. 4(29), 125-134.
18. S.I. Vlasov, A.V. Ovsiyannikov, B.K. Ismailov, B.H. Kuchkarov, Effect of pressure on the properties of Al-SiO₂-n-Si<Ni> structures. "Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics", (2012) y. 2(15), 166-169.
19. S.I. Vlasov, D.E. Nazirov, B. Kh. Kuchkarov, K.U. Bobokhujayev "Influence of all-round compression on formation of the mobile charge in lead-borosilicate glass structure" Uzbekiston Fizika Zhurnali 16/3 стр 231-233.
20. S.I. Vlasov, F.A. Saparov, B. Kh. Kuchkarov "Effect of the semiconductor-insulator interface on the characteristics of the metal-insulator-semiconductor structures" Uzbekiston Fizika Zhurnali 2009 y. 11/3 str. 203-206.
21. B.T.Abdulazizov, G.Gulyamov, P. J. Baymatov, Sh. T. Inoyatov, M. S. Tokhirjonov and Kh. N. Juraev// Peculiarities of the Temperature Dependence of the Chemical Potential of a Two-dimensional Electron Gas in Magnetic Field// SPIN Vol. 13, No. 1 (2022) .pp (2-7), <https://doi.org/10.1142/S2010324722500023>.
22. B.T. Abdulazizov/Cyclotron mass of an electron in strong magnetic fields in a wide InAs quantum well/ *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials* (2022), 6(1), pp 32-37, doi.org/10.32523/ejpfm.2022060103.
23. G.Gulyamov, B.T.Abdulazizov, P.J.Baymatov. Three-band simulation of the g-factor of an electron in an InAs quantum well in strong magnetic fields .Journal of Nanomaterials ,Volume (2021), Article ID pp (559-563), <https://doi.org/10.1155/2021/5542559>.
24. P.J. Baymatov, B.T. Abdulazizov. Concentration dependences of the electron effective mass , Fermi energy, and filling of subbands in doped InAs/AlSb quantum wells. Украинский Физический Журнал. Ukr. J. Phys. 2017. Vol. 62, No. 1, стр 46-50 , <https://doi.org/10.15407/ujpe62.01.0046>.
25. G Gulyamov, BT Abdulazizov. On the thermodynamics of a two-dimensional electron gas with non-parabolic dispersion. World Journal of Condensed Matter Physics. pp 294-299. doi: [10.4236/wjcmp.2016.64028](https://doi.org/10.4236/wjcmp.2016.64028).