



ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЯ

Зиётдинов Жахонгир Норбоевич¹,

Андижанский госуниверситет, Узбекистан
(преподаватель)¹,

Таджибаева Назирахон Хушнудбек кизи²,
Андижанский госуниверситет, Узбекистан
(магистрант)²,

Каримбердиев Улугбек Расулжон угли³
Андижанский госуниверситет, Узбекистан
(магистрант)³.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7269587>

ARTICLE INFO

Received: 11st October 2022

Accepted: 20th October 2022

Online: 31st October 2022

KEY WORDS

Кремний, носители заряда, концентрация, коэффициент диффузии, подвижность, времени жизни, электрическая проводимость, ширины запрещенной зоны

В мире постепенный рост потребности на дополнительные энергетические ресурсы и обострение глобальных экологических проблем требуют интенсивного расширения использования источников возобновляемых видов энергии. При этом важными задачами исследований являются повышение эффективности, экологически чистых возобновляемых источников энергии - полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей энергии, эффективное обеспечение поглощения светового потока, падающего на поверхность фотопреобразователя, уменьшение поверхностной и объемной рекомбинаций фотогенерируемых носителей заряда, получение новых

ABSTRACT

В работе рассматривается влияние температуры на кинетические параметры носителей заряда в монокристаллическом кремния: концентрации, коэффициента диффузии, подвижности, времени жизни и электрической проводимости, изменение ширины запрещенной зоны. Приводятся результаты расчетов

перспективных моно- и поликристаллических структур для высоко эффективных фотоэлектрических энергетических устройств, изучение их электрофизических и фотоэлектрических свойств, а также исследование собственных возможностей использования источников энергии. За последние годы появились новые современные программные системы, которые могут быть использованы для моделирования свойств кремния и созданных на них СЭ типа "PVLighthouse" [1], также система приборно-технологического моделирования полупроводниковых структур и



приборов типа Sentaurs, основанные на использовании представлений и уравнений классической и квантовой теории физики полупроводников [2].

Программная система "PVLighthouse" позволяет вычислять кинетические параметры носителей заряда в монокристаллическом кремнии: концентрации, коэффициента диффузии, подвижности, времени жизни и электрической проводимости, изменение ширины запрещенной зоны [1]. Причем, такие вычисления могут быть выполнены для различных температур. Сопоставив такие данные, можно заключить о физических причинах изменения основных свойств кремния при различных температурах. Следовательно, для полупроводниковых приборов, в том числе, фотоэлектрических преобразователей энергии можно целенаправленно вычислить зависимости основных фотоэлектрических параметров от вариации температуры.

Материалы и методы

Для выбора исходных параметров полупроводникового кремния основывались на критерии требования параметров, подходящих для изготовления эффективных СЭ. Уровень легирования выбрана в диапазоне ($10^{14} \div 10^{18}$) см^{-3} , а температура варьировалась в диапазоне (250 \div 350) град. К.

В качестве первичных результатов получены зависимости кинетических параметров НЗ в монокристаллическом кремния такие, как концентрации, коэффициента диффузии, подвижности, времени жизни основных и неосновных НЗ, а также электрической

проводимости, изменение ширины запрещенной зоны от уровня легирования или от концентрации основных НЗ.

На рис. 1 приведены семейства кривых зависимости коэффициента диффузии $D(T)$ для носителей заряда (электронов и дырок) в кремнии p -типа (акцептор-бор) от температуры для различных уровней легирования в диапазоне ($10^{14} \div 10^{18}$) см^{-3} .

Важность исследования изменении коэффициента диффузии (D) НЗ от температуры связана с тем, что, во-первых, в соответствии соотношения Эйнштейна определяется величинами абсолютной температуры T и подвижности НЗ μ :

$$D = (kT/q)\mu, \quad (1)$$

во-вторых, согласно известной формуле между D и диффузионной длиной L и временой жизни НЗ τ , они непосредственно взаимосвязаны:

$$L = (D\tau)^{1/2}, \quad (2)$$

Согласно формулам (1) и (2) изменение любых из входящих в них параметров при изменении температуры могут вызвать изменение проводимости основного полупроводникового материала - кремния, на основе которой создан СЭ.

Результаты и обсуждения

Все кривые, полученные расчетным путем (рис. 1) имеют одинаковый ход изменения с увеличением температуры. В то же время можно отметить некоторые особенности:

- 1) Уменьшение значений коэффициента диффузии для основных НЗ в p -типном кремнии является более существенным, чем неосновные НЗ;
- 2) Уменьшение значений коэффициента диффузии для неосновных НЗ в n -



типном кремнии является более существенным, чем основные НЗ;

3) С увеличением концентрации НЗ в кремнии наблюдается темп

4) .

уменьшения значений коэффициента диффузии как для основных, так и для неосновных НЗ ослабляется

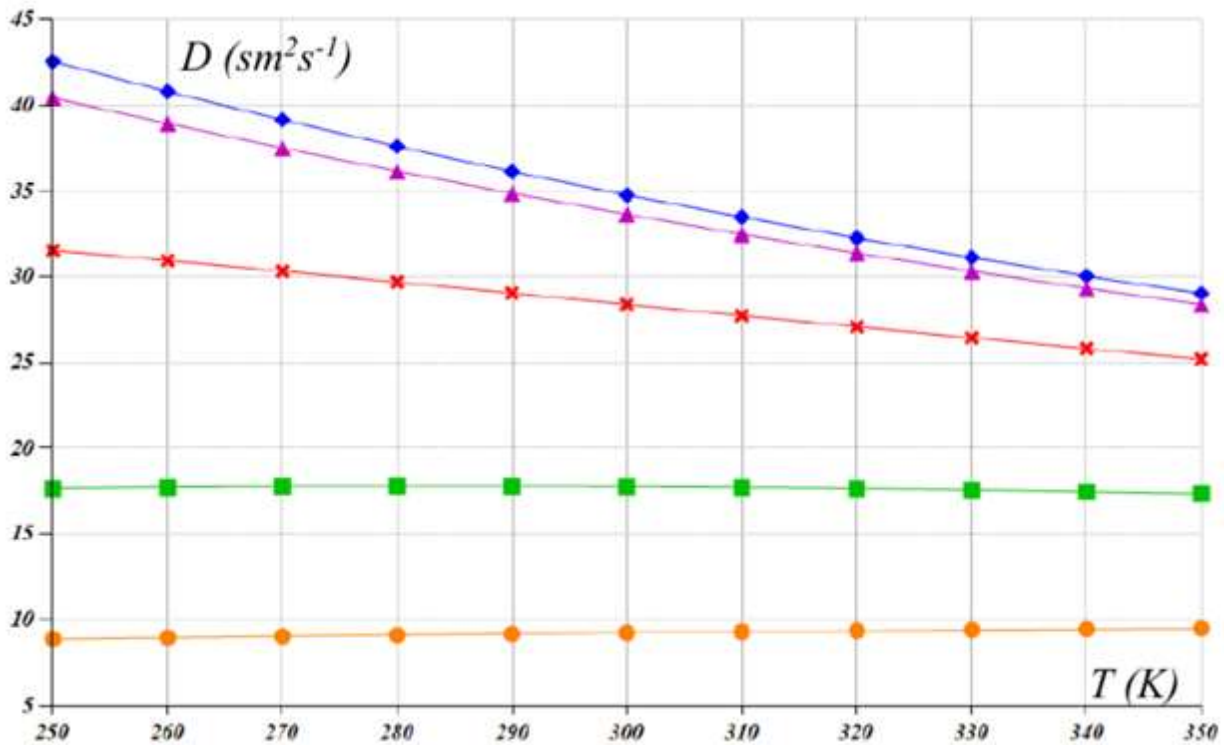


Рис. 1. Изменение коэффициента диффузии для носителей заряда (электронов) в кремнии *p*-типа (акцептор-бор) от температуры.

Эти результаты позволяют предполагать, что если учитывать изменения с температурой только коэффициента диффузии НЗ, то СЭ на основе *p*-типного кремния должны быть более устойчивыми к изменению температуры, чем *n*-типного кремния.

Выполнен расчет хода изменения диффузионной длины для основных и неосновных НЗ в кремнии *p*- и *n*-типа. Результаты расчета представлены в виде семейства кривых на рис. 2. Анализ результатов расчета, приведенные на рис. 2 свидетельствует о том, что если учитывать изменения с температурой только диффузионной длины НЗ, то СЭ на основе *p*-типного кремния должны быть более устойчивыми к изменению температуры, чем *n*-типного кремния.

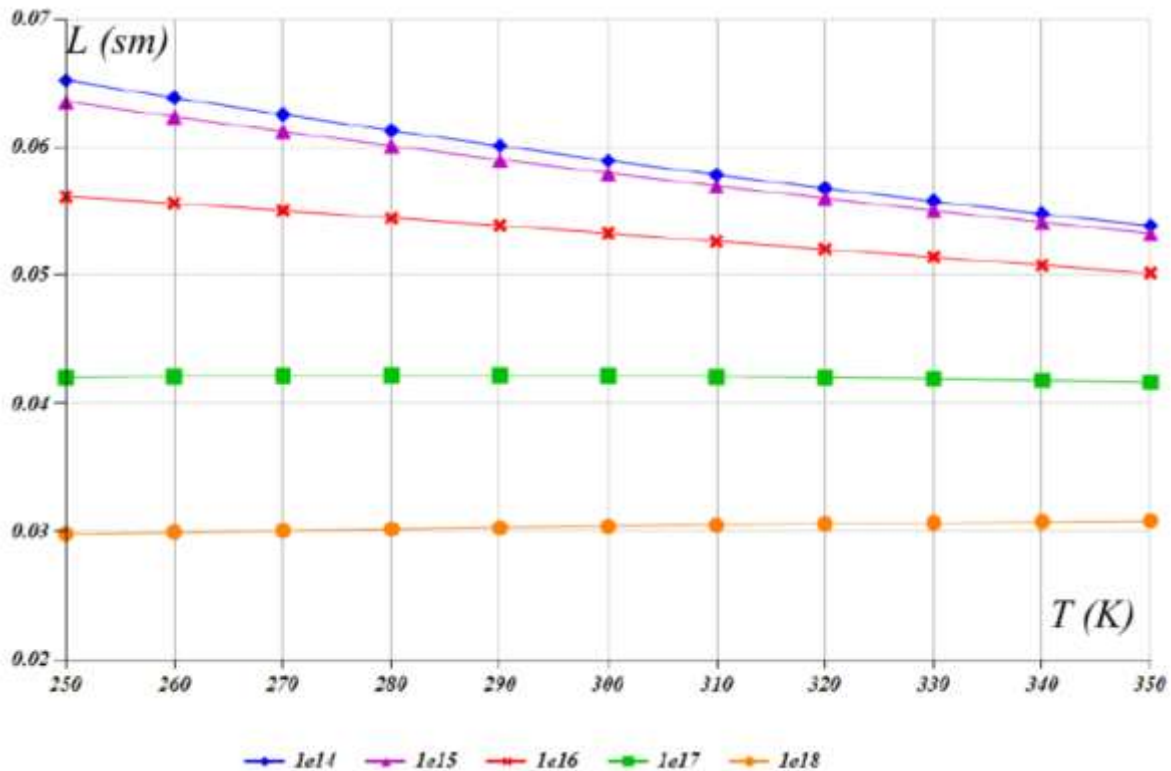


Рис. 2. Изменение диффузионной длины для носителей заряда (электронов) в кремнии *p*-типа (акцептор-бор) от температуры.

Согласно формулам (1) и (2) из-за изменения кинетических параметров НЗ должна изменяться основной и важный параметр кремния -удельная проводимость или удельное сопротивление. Поэтому выполнен расчет изменения удельного сопротивления (при расчете и для электронов и для дырок) в кремнии как *p*-типа (акцептор-бор), так и *n*-типа проводимости от температуры. Полученные результаты для кремния как *p*-типа, так и *n*-типа проводимости от температуры, идентичные.

С целью более детального анализа причины изменения кинетических параметров НЗ в кремнии выполнен расчет температурной зависимости изменений подвижности носителей

заряда основных и неосновных НЗ. На рис. 3 приведены семейство изменений подвижности носителей заряда основных и неосновных НЗ в кремнии *p*- и *n*- типа от температуры.

Необходимо отметить, что ход кривых на рис. 3, полученных расчетным путем, отличается тем, что при низких концентрациях основных НЗ кривая отклоняется от прямолинейности. Это, по-видимому связано со сложным характером изменения подвижности НЗ с увеличением температуры. По физике полупроводников можно вспомнить, что подвижность НЗ может уменьшаться за счет их рассеяния на примесных или дефектных центрах.

Авторами работы [3, 7] исследовано влияние степени легирования на проявление эффекта температурной бистабильности в кремниевой пластине при радиационном теплообмене пластины с элементами тепловой

системы. Построены теоретические передаточные характеристики для кремниевой пластины, легированной донорной и акцепторной примесью. Проведено их сравнение с

передаточными характеристиками, полученными при нагреве и охлаждении пластин дырочного (концентрация легирующей примеси 10^{15}),

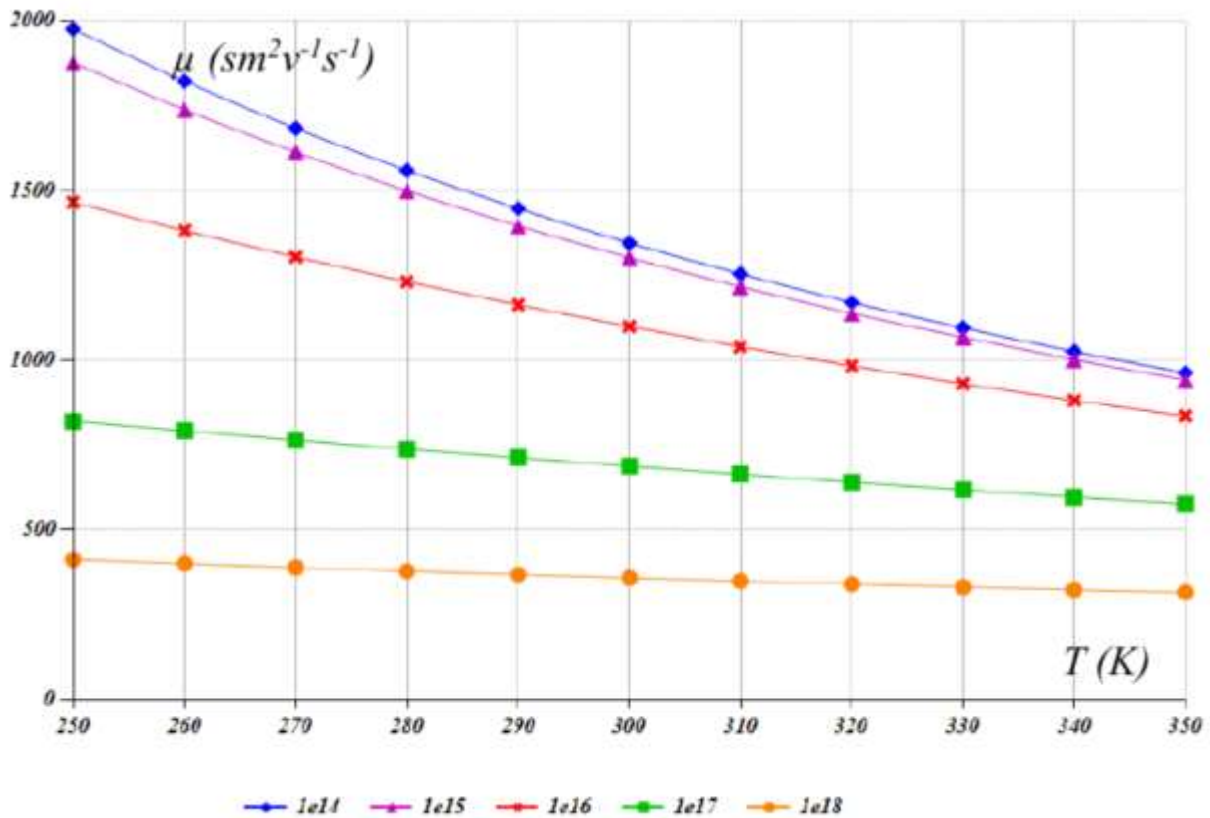


Рис. 3. Изменение подвижности носителей заряда (электронов) в кремнии *p*-типа (акцептор-бор) от температуры.

2×10^{16} , 3×10^{17} см⁻³) электронного (концентрация примеси 10^{15} и 8×10^{18} см⁻³) типов проводимости в термическом реакторе установки быстрого термического отжига. Установлено, что ширина и высота петли гистерезиса уменьшаются с увеличением концентрации легирующей примеси и практически не зависят от типа проводимости кремниевой пластины. Критическое значение концентрации примеси обоих

типов составило $1,4 \times 10^{17}$ см⁻³. При этой концентрации ширина петли обращается в нуль, а высота соответствует минимальному значению скачка температуры ~ 200 К. Обсужден механизм температурной бистабильности в кремниевой пластине при радиационном теплообмене. В работе [4, 8] представлены результаты исследований подвижности электронов в тонком слое кремния системы металл-диэлектрик-полупроводник-диэлектрик-металл в зависимости от величины продольного и поперечного электрических полей (в широком диапазоне их значений), температуры (в диапазоне от 1,7 до 400



К) и изменения условий γ -облучения. Показано, что в интервале температур от 400 до ~ 100 К подвижность электронов увеличивается в соответствии с механизмом рассеяния на акустических фононах, тогда как при дальнейшем снижении температуры вплоть до температур жидкого гелия подвижность падает вследствие того, что превалирующим становится кулоновское рассеяние электронов на заряженных поверхностных центрах. Показано также, что в результате γ -облучения подвижность электронов уменьшается, причем степень этого уменьшения сильно зависит от электрического режима датчика в процессе облучения.

В интервале температур от 400 до примерно 100 К подвижность электронов увеличивается в соответствии с механизмом рассеяния на акустических фононах, тогда как при дальнейшем снижении температуры вплоть до 2 К подвижность падает вследствие того, что превалирующим становится кулоновское рассеяние электронов на заряженных поверхностных центрах. Экспериментально показано, что в полевом датчике Холла на основе КНИ-структуры в результате γ -облучения уменьшается подвижность электронов, причем степень этого уменьшения сильно зависит от

электрического режима датчика в процессе облучения.

Путем сопоставительного анализа кривых на рис. 3 можно прийти к общему заключению:

1) Подвижность электронов как для n -типного, так и p -типного кремния в 2,8 - 3 раза выше, чем дырок;

2) Подвижность основных и неосновных НЗ уменьшается с увеличением температуры как для n -типного, так и p -типного кремния;

3) С увеличением концентрации основных НЗ уменьшается чувствительность их подвижностей к изменениям температуры.

Согласно формулам (1) и (2) из-за изменения кинетических параметров НЗ должна изменяться основной и важный параметр кремния - удельная проводимость или удельное сопротивление. Поэтому выполнен расчет изменения удельного сопротивления (при расчете и для электронов и для дырок) в кремнии как p -типа (акцептор-бор), так и n -типа проводимости от температуры. Полученные результаты для кремния как p -типа, так и n -типа проводимости от температуры, идентичные.

Далее выполнен расчет изменения ширины запрещенной зоны (при расчете и для электронов, и для дырок) в кремнии p -типа (акцептор-бор) от температуры.

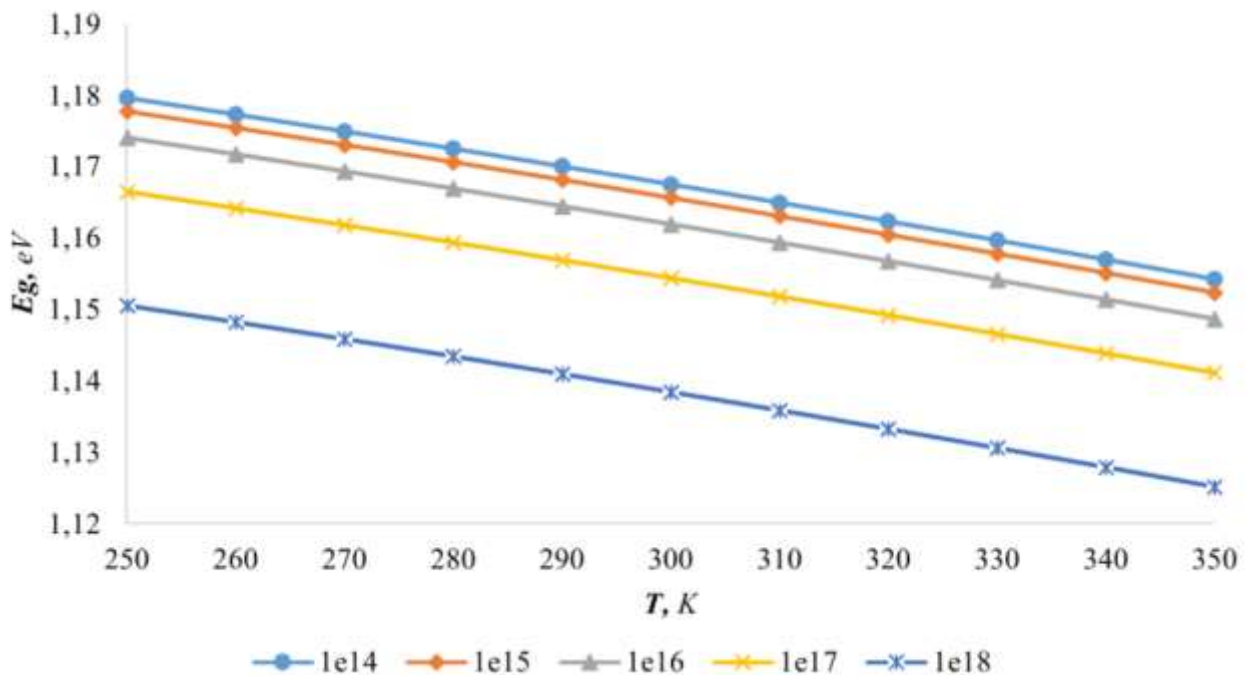


Рис. 4. Изменение ширины запрещенной зоны (расчет для электронов и дырок) в кремнии р-типа (акцептор-бор) от температуры.

По данным рис. 4 можно увидеть, что изменение ширины запрещенной зоны кремния от вариации температуры идентичны как при расчете для электронов, так и дырок.

По физике полупроводников известно, что графическая зависимость $\ln(n_i T^{-3/2}) = \text{const} - (E_g/2kT)$ от $1/T$ прямой линией $\text{tg}\theta = (E_g/2kT)$ [5, 9]. Но, в реальности полученное таким образом значение энергии активации не соответствует истинному значению ширины запрещенной зоны, определенное, например из спектра оптического поглощения. Такое расхождение связано с изменением ширины запрещенной зоны с температурой. С повышением температуры наблюдается рост амплитуды колебания атомов решетки и, следовательно уменьшается ширины запрещенной зоны. Помимо

этого с ростом температуры изменяются и межатомное расстояние, которое также оказывает влияние на ширину запрещенной зоны. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны выражается эмпирическим линейным законом:

$$E_g(T) = E_{g0} - \alpha T, \quad (3)$$

где E_{g0} - экстраполированная ширина запрещенной зоны при $T=0$ К, α - температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны. По современным данным температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны для кремния равен $2,4 \times 10^{-4}$ эВ/К [5]. Как следует из результатов наших расчетов ширина запрещенной зоны полупроводника, в частности кремния линейно зависит от температуры. Истинное значение ширины запрещенной зоны полупроводника при рассмотренной температуре определяется эмпирической формулой [6, 10].



Заклучение

Таким образом, в данной работе выявлены особенности изменения кинетических параметров (скорости, подвижности, диффузионной длины, времени жизни и темпа объемных и поверхностных рекомбинационных потерь) и концентрации собственных и примесных носителей заряда, электрофизических параметров кремния (электропроводности, фотопроводимости, ширины

запрещенной зоны, геометрических размеров, отражения, поглощения и пропускания света), механизмов переноса заряда через *p-n*-переход и уровня собирания омическими контактами в определении характера поведения основных фотоэлектрических параметров кремниевых фотоэлектрических преобразователей в условиях вариации температуры.

References:

1. Overview of PV simulation programs [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.PVLighthouse.com.au/simulation-programs> [01.06. 2020].
2. Sentauros™ Device User Guide O-2018.06. 2018. -1530.
3. Овчаров В.В., Рудаков В.И., Пригара В.П., Куреня А.Л. Влияние степени легирования на температурную бистабильность в кремниевой пластине. // Журнал технической физики, 2014, том 84, вып. 8, С. 67-76.
4. Леонов А.В., Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М. Особенности подвижности электронов в тонком слое кремния в структуре диэлектрик-кремний-диэлектрик. // Физика и техника полупроводников, 2012, том 46, вып. 4, С. 494-499.
5. Планкина С.М., Кудрин А.В. Определение параметров полупроводника из температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 17 с.
6. Бонч-Бруевич В. Ш., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990, -678 с.
7. Алиев Р., Зиётдинов Ж., Гуломов Ж., Абдувохидов М., Урманов Б. Влияние температуры на фотоэлектрические процессы в кремниевых солнечных элементах // Научный вестник Андижанского государственного университета, том 3, вып. 2, 2021, С. 18-24.
8. Gulomov J., Aliev R., Nasirov M., and Ziyoitdinov J. Modeling metal nanoparticles influence to properties of silicon solar cells. // International journal of Advanced Research (IJAR) 2020, 8(11) pp. 336-345.
9. Алиев Р., Зиётдинов Ж., Носиров М. Влияние температуры на фотоэлектрические процессы в кремниевых солнечных элементах с наночастицами. // Мат. Межд. Конф. «Роль передовых инновационных технологий и образования в решении задач автоматизации и энергетики, направленная на повышение энергоэффективности производств и социальной сферы» 24-25 июня, 2021 г, НамМТИ, Наманган, С. 387-389.
10. Абдувохидов М.К., Гуломов Ж.Ж., Алиев Р., Зияитдинов Ж., Муйдинова М. Цифровое моделирование температурных свойств кремниевых солнечных элементов. // Сборник тезисов “Международной научной конференции “Наноструктурные



полупроводниковые материалы в фотоэнергетике”, 9-10 окт., 2020, ТГТУ, Ташкент, С. 108-110.