

УДК 621.315.592

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ УПОРЯДОЧЕНИЯ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ

**А. Д. Баринов**, к.т.н., доцент кафедры ЭиН НИУ МЭИ, Москва, Россия;  
orcid.org/0000-0002-0325-508X, e-mail: BarinovAD@mpei.ru

**В. Г. Литвинов**, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

**И. Н. Мирошникова**, д.т.н., профессор кафедры ЭиН НИУ МЭИ, Москва, Россия;  
orcid.org/0000-0001-5745-4087, e-mail: MiroshnikovaIN@mpei.ru

**А. И. Попов**, д.т.н., профессор кафедры ЭиН НИУ МЭИ, Москва, Россия;  
orcid.org/0000-0002-4078-5303, e-mail: popovai2009@gmail.com

*Эффективность управления свойствами полупроводниковых материалов зависит от степени упорядочения их атомной структуры. Отсутствие трансляционной симметрии приводит к потере возможности управления физическими свойствами полупроводника методом легирования примесями замещения, успешно используемым в случае кристаллов. Описаны возможности управления свойствами полупроводников, в которых отсутствует дальний порядок в расположении атомов, методами химической и структурной модификаций, а также достигнутые диапазоны изменения свойств при их использовании. Показано, что для корректной количественной оценки величины изменения свойств необходим учет эффектов структурно-химической модификации. Рассмотрен метод фазовой модификации физических свойств.*

**Ключевые слова:** трансляционная симметрия, управление свойствами, химическая модификация, структурная модификация, фазовая модификация, структурно-химическая модификация, диапазоны изменений свойств, комплексное воздействие.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2025-94-166-176

### Введение

Современное развитие твердотельной электроники стало возможным благодаря разработке зонной теории полупроводников [1, 2]. Эта теория не только объяснила свойства полупроводников, но и показала возможность эффективного управления этими свойствами путем легирования материала примесями замещения. При этом примесные (донорные или акцепторные) атомы практически не влияют на атомную структуру полупроводника (строение кристаллической решетки), но изменяют его электронную структуру, что обеспечивает получение необходимых физических свойств материала. Именно возможность эффективного и контролируемого управления свойствами четко определенных областей полупроводникового материала открыла возможность создания активных полупроводниковых приборов, интегральных схем и дальнейшего развития микро- и наноэлектроники. Поскольку основой зонной теории является наличие трансляционной симметрии, то есть приближение идеального монокристалла, то генеральным направлением развития твердотельной электроники с материала-вежеской точки зрения стало получение совершенных монокристаллов больших размеров. Более того, в середине прошлого столетия сложилось мнение, что полупроводниковыми свойствами может обладать только кристаллический материал. Однако в 1955 году Б. Коломийц и Н. Горюнова установили [3], что ряд халькогенидных стеклообразных материалов также обладают свойствами полупроводников, несмотря на то, что являются некристаллическими материалами. Эти материалы, названные халькогенидными стеклообразными полупроводниками (ХСП), показали, что наличие трансляционной симметрии (дальнего порядка в расположении атомов) не является обязательным условием существования полупроводни-

ковых свойств. Однако уменьшение степени упорядочения атомной структуры этих материалов, выразившееся в отсутствии дальнего порядка в расположении атомов и в повышении плотности локализованных состояний в запрещенной зоне, привело к потере чувствительности их свойств к примесям замещения [4]. В результате метод управления свойствами полупроводника легированием примесями замещения оказался неприменим для некристаллических полупроводников. Это потребовало создания эффективных методов управления свойствами полупроводниковых материалов, у которых отсутствует дальний порядок в расположении атомов.

### **Методы химической модификации свойств некристаллических полупроводников**

Первой группой методов управления свойствами полупроводниковых материалов с отсутствием дальнего порядка в расположении атомов (отсутствием трансляционной симметрии) явились методы химической модификации свойств. В отличие от легирования примесями замещения, рассмотренного выше и обеспечивающего необходимый результат при концентрации примесных атомов  $10^{16} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , в случае химической модификации необходимо введение примеси в количестве десятых долей и единиц атомных процентов.

Существует ряд различных подходов к реализации химической модификации. Первый подход заключается во введении примесных атомов при условиях, когда релаксация атомной структуры материала отсутствует. Благодаря этому примесные атомы создают донорные или акцепторные уровни в запрещенной зоне, которые определяют положение уровня Ферми и электрофизические свойства материала. Такой подход реализован для халькогенидных стеклообразных полупроводников. Так, например, в [5] получены пленки ХСП состава  $\text{Ge}_{32}\text{Te}_{32}\text{Se}_{32}\text{As}_4$ , модифицированные никелем путем совместного ионно-плазменного осаждения на холодную подложку ХСП и металла. Метод позволил получить пленки с содержанием никеля до 11,4 ат. % в некристаллическом состоянии, в то время как введение такого же количества металла в расплав приводит к кристаллизации материала при охлаждении. Кроме того, исследования спектральных зависимостей коэффициента оптического поглощения (рисунок 1, *a*) показали, что введение и рост содержания никеля в основном увеличивает поглощение при энергиях фотонов менее 1,4 эВ. Поскольку ширина запрещенной зоны немодифицированного материала составляет около 1,6 эВ, то область спектральной зависимости коэффициента поглощения ниже 1,4 эВ соответствует хвосту Урбаха, связанному с наличием локализованных состояний в запрещенной зоне. Из этого следует, что на величину запрещенной зоны введение никеля данным способом влияет незначительно [5]. В то же время электрические свойства пленок при введении никеля изменяются кардинальным образом. На температурных зависимостях электропроводности (рисунок 1, *б*) при введении никеля появляется участок примесной проводимости. Причем с увеличением концентрации металла наклон участка примесной проводимости уменьшается, что свидетельствует о снижении энергии активации проводимости от 0,74 эВ для немодифицированных пленок до 0,18 эВ при концентрации никеля 11 ат. %. При этом абсолютные значения электропроводности возрастают на 7 – 8 порядков величины.

Совместный анализ результатов исследований оптических и электрофизических свойств показывает, что рост концентрации никеля приводит к сдвигу уровня Ферми в модифицированных пленках, то есть к эффекту, аналогичному происходящему при легировании кристаллов. В [5] отмечено, что аналогичные результаты наблюдались как при модификации пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников других составов, так и при использовании других переходных металлов для модификации.

Вторая возможность управления свойствами полупроводника при отсутствии трансляционной симметрии путем химической модификации заключается во введении примеси, изменяющей электронную структуру материала. Классическим примером такого подхода является введение значительного количества водорода (единицы атомных процентов) в пленки аморфного кремния, то есть создание гидрогенизированного аморфного кремния a-Si:H [6, 7].

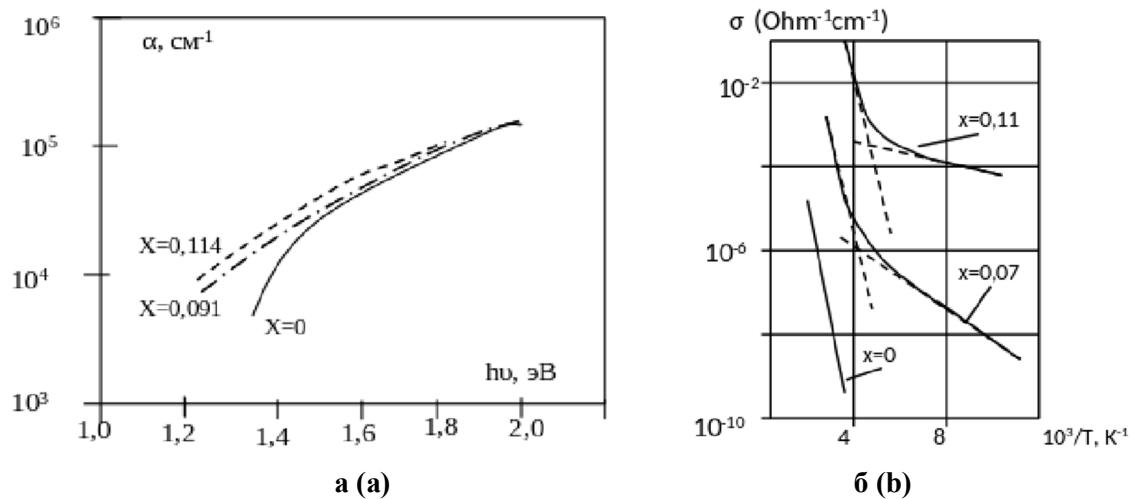


Рисунок 1 – Спектральные зависимости коэффициента оптического поглощения (а) и температурные зависимости электропроводимости пленок  $(\text{Ge}_{32}\text{Te}_{32}\text{Se}_{32}\text{As}_4)_{1-x}\text{Ni}_x$  (б) при разных уровнях модификации

Figure 1 – Spectral dependences of optical absorption coefficient (a) and temperature dependences of electrical conductivity of  $(\text{Ge}_{32}\text{Te}_{32}\text{Se}_{32}\text{As}_4)_{1-x}\text{Ni}_x$  films (b) at different modification levels

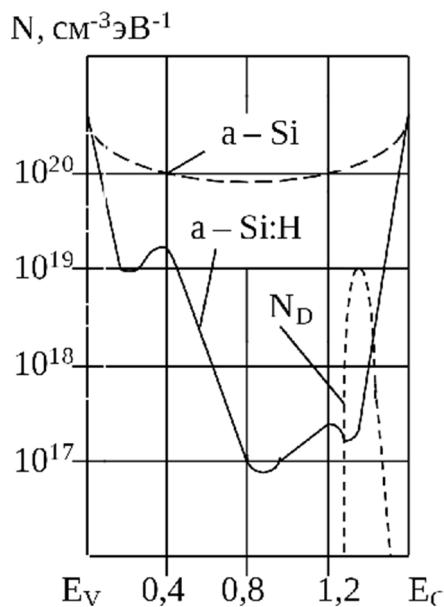


Рисунок 2 – Распределение плотности локализованных состояний в запрещенной зоне аморфного кремния (а – Si) и гидрогенизированного аморфного кремния (а – Si:H):  $N_D$  – плотность донорных уровней

Figure 2 – Distribution of localized states density in band gap of amorphous silicon (a – Si) and hydrogenated amorphous silicon (a – Si:H):  $N_D$  – donor level density

В этом случае электроны на оборванных связях атомов кремния (концентрация которых в а-Si велика) вступают во взаимодействие с электронами атомов водорода, в результате чего локализованное состояние в запрещенной зоне преобразуется в связывающее состояние в валентной зоне и антисвязывающее состояние в зоне проводимости. Это приводит к резкому снижению плотности локализованных состояний в запрещенной зоне, что обеспечивает возможность управления свойствами полупроводника введением примесей замещения (рисунок 2).

Зависимости электропроводности гидрогенизированного аморфного кремния при комнатной температуре и энергии активации электропроводности от концентрации донорной (фосфор) и акцепторной (бор) примесей в газовой смеси при осаждении пленок представлены на рисунке 3 [7]. Как видно из рисунка, введение примесей замещения в данном случае

позволяет изменять как тип, так и абсолютные значения проводимости материала на 10 порядков величины. При этом энергия активации электропроводности нелегированного материала составляет 0,6 эВ. Введение и рост концентрации донорной примеси приводят к её плавному уменьшению до 0,2 эВ. Однако при увеличении концентрации акцепторной примеси энергия активации сначала возрастает до 0,75 эВ и лишь после этого начинает уменьшаться. Данный факт свидетельствует о том, что нелегированный гидрогенизированный аморфный кремний не является собственным полупроводником, а обладает слабой проводимостью п-типа. Вид температурной зависимости электропроводности подтверждает данное заключение.

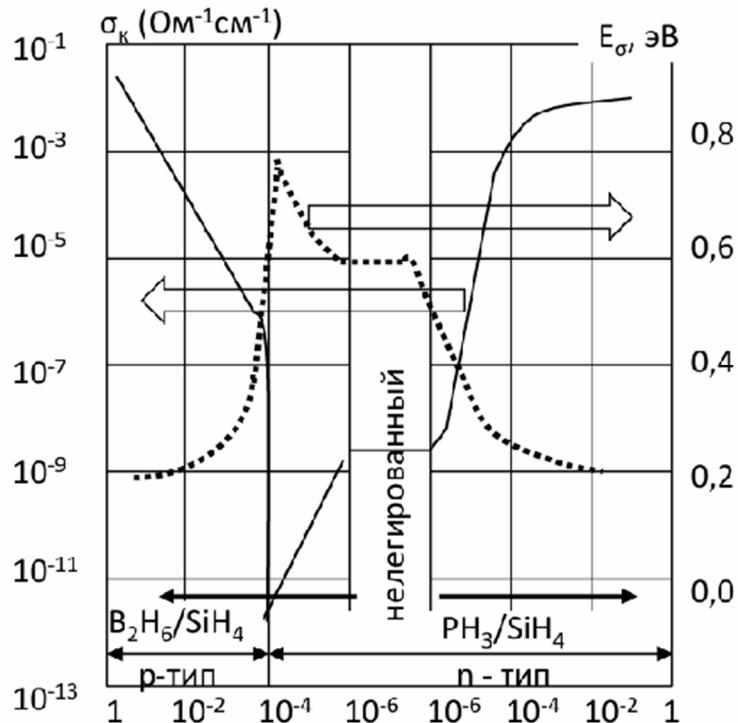


Рисунок 3 – Зависимости электропроводности при комнатной температуре и энергии активации электропроводности гидрогенизированного аморфного кремния от концентрации донорных и акцепторных атомов в исходной газовой смеси

Figure 3 – Dependences of electrical conductivity at room temperature and electrical conductivity activation energy of hydrogenated amorphous silicon on the concentration of donor and acceptor atoms in initial gas mixture

Ещё один вариант химической модификации свойств путем изменения электронной структуры материала обусловлен наличием у кремния непрерывного ряда твердых растворов с другими элементами четвертой группы Периодической таблицы ( $A^{IV}B^{IV}$ ). Поэтому введение в газовую смесь силана с водородом при синтезе пленок а – Si:H азота или газов, содержащих азот (например,  $NH_3$ ), приводит к формированию пленок а– $Si_xN_{1-x}H$  с большей, чем у а – Si:H шириной запрещенной зоны. Зависимость ширины запрещенной зоны материала а– $Si_xN_{1-x}H$  от содержания азота показана на рисунке 4 [8].

Введение углерода также приводит к увеличению ширины запрещенной зоны. Добавление же германия (Ge) в пленку приводит к её уменьшению [9]. Таким образом, удается изменять ширину запрещенной зоны в диапазоне от 1,2 до 2,5 эВ, что широко используется для создания эффективных преобразователей солнечной энергии.

Обратим внимание, что, как правило, описанные методы химической модификации свойств представляют собой разработку путей, обеспечивающих эффективность использования известного метода легирования примесями замещения для некристаллических полупроводников. Однако потеря дальнего порядка в расположении атомов дает принципиально новые возможности управления свойствами материала, которые рассматриваются далее.

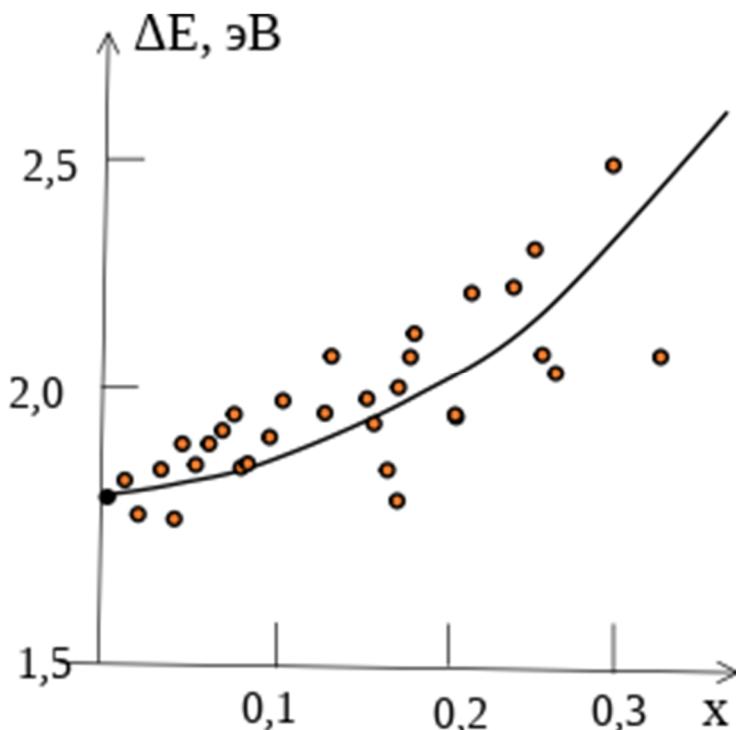


Рисунок 4 – Зависимость ширины запрещенной зоны некристаллического полупроводника состава  $a\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$  от содержания азота

Figure 4 – Band gap width dependence of non-crystalline semiconductor  $a\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$  on nitrogen content

### Методы структурной и структурно-химической модификации свойств

Потеря трансляционной симметрии в некристаллических полупроводниках открывает возможность управлять свойствами, изменяя структуру материала при постоянном химическом составе [10]. В отсутствие дальнего порядка становятся допустимыми целенаправленные изменения среднего порядка в расположении атомов, кроме того, в ряде случаев возможно изменение ближнего порядка как у всех, так и у части атомов материала. К структурным характеристикам, которые можно изменять в некристаллических полупроводниках, также относятся вид и концентрация дефектов (определяющие распределение и плотность локализованных состояний) и морфология материала. Исходя из этого, существуют четыре уровня модификации свойств некристаллических полупроводников, отличающиеся различными изменениями структуры [11], а именно изменениями:

- в ближнем порядке в расположении атомов (1 уровень);
- в среднем порядке в расположении атомов (2 уровень);
- в морфологии (3 уровень);
- в подсистеме дефектов (4 уровень).

Естественно, что изменения структуры на разных уровнях приводят к модификации различных свойств полупроводника. Модификация структуры на уровне ближнего порядка (изменения соотношения атомов с различной гибридизацией электронных орбиталей) вызывает существенные изменения фундаментальных свойств материала. В качестве примера на рисунке 5 представлены зависимости удельного сопротивления пленок гидрогенизированного аморфного углерода, изготовленного методом высокочастотного ионно-плазменного распыления, от параметров технологического процесса, определяющих соотношение атомов с  $sp^3$  и  $sp^2$  гибридизацией (температура подложки  $T_s$  и мощность ВЧ-разряда  $P$ ) [11].

Из рисунка следует, что вариация указанных параметров привела к изменению удельного сопротивления материала на 10 порядков величины (от  $0,15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  до  $5\cdot10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ). Воздействие на средний порядок в расположении атомов практически не влияет на электронную структуру материала, но приводит к изменению таких свойств, как микротвердость, модуль

Юнга, вязкость, энергии активации фазовых переходов. Изменения морфологии влияют на оптические свойства, электропроводность на переменном токе и другие свойства, чувствительные к макронеоднородностям, а воздействия на подсистему дефектов вызывают изменения в спектре локализованных состояний в запрещенной зоне материала и в положении уровня Ферми.

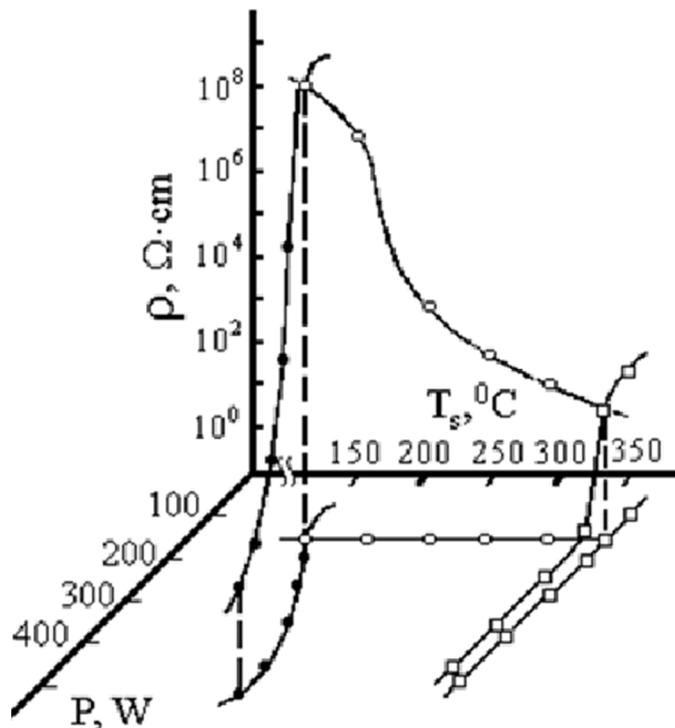


Рисунок 5 – Зависимость удельного сопротивления пленок а – С:Н от режимов их изготовления (см. текст)

Figure 5 – Dependence of specific resistance of a – C:H films on the conditions of their production (see text)

Приведенные данные свидетельствуют, что методы химической и структурной модификации позволяют эффективно управлять свойствами полупроводников с отсутствием трансляционной симметрии. В качестве примера на рисунке 6 приведены значения электропроводности некристаллических кремний-углеродных пленок (С – Si – H – О), полученные в результате структурной и химической модификации материала [12]. Структурная модификация осуществлялась в процессе осаждения путем бомбардировки растущих пленок ионами аргона с различной энергией и концентрацией. Энергия ионов определялась величиной напряжения смещения на подложкодержателе (от 150 до 400 В), а их концентрация – парциальным давлением аргона в рабочей камере (от 0 до  $7 \cdot 10^{-4}$  Торр). Химическая модификация осуществлялась введением атомов тантала (от 0 до 19 ат. %).

Как видно из рисунка, структурная модификация позволила реализовать изменения электропроводности материала на восемь порядков величины от  $10^{-13}$  до  $10^{-5}$   $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . При этом изменения на два порядка величины осуществлены за счет вариации напряжения смещения на подложкодержателе, а изменения на шесть порядков величины – за счет вариации парциального давления аргона. В свою очередь, химическая модификация дала возможность изменить электропроводность на четыре порядка величины (от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$   $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ). Таким образом, суммарные изменения электропроводности составили двенадцать порядков величины.

Вместе с тем следует отметить, что имеется ряд экспериментальных результатов, которые не удается количественно описать в рамках рассмотренных представлений. К ним, например, относятся изменение электропроводности некристаллического селена при введении в него изоэлектронной примеси – кислорода в концентрациях до  $5 \cdot 10^{-3}$  ат. % [13] или концентрационные зависимости электрических и механических свойств кремний-

углеродных пленок, модифицированных переходными металлами [14]. Анализ этих и аналогичных результатов показал, что в ряде случаев вводимые при химической модификации примеси кроме прямого воздействия на физические свойства могут изменять атомную структуру материала, что приводит к дополнительному изменению свойств [15]. Эти дополнительные изменения могут как увеличивать, так и уменьшать результирующее изменение свойств материала. Данный эффект, названный структурно-химической модификацией свойств, необходимо учитывать для правильной количественной оценки результатов химической и структурной модификации.

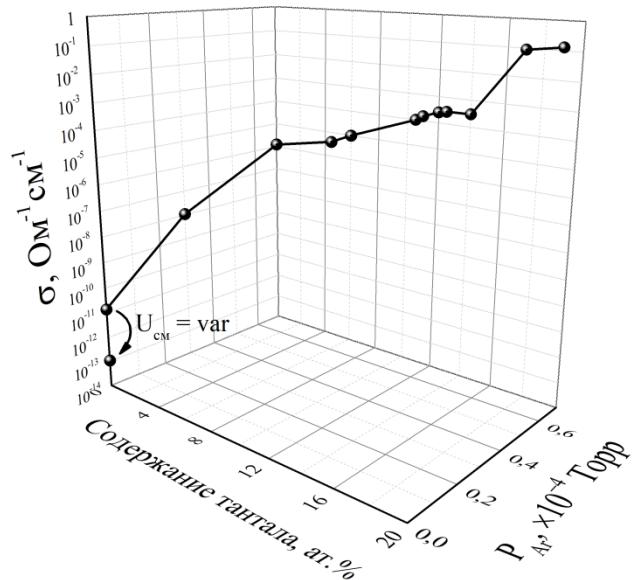


Рисунок 6 – Зависимость электропроводности кремний-углеродных пленок от напряжения смещения на подложкодержателе ( $U_{bias}$ ), парциального давления аргона ( $P_{Ar}$ ) и концентрации атомов тантала ( $N_{Ta}$ )

**Figure 6 – Dependence of electrical conductivity of silicon-carbon films on bias voltage on substrate holder ( $U_{bias}$ ), partial pressure of argon ( $P_{Ar}$ ) and the concentration of tantalum atoms ( $N_{Ta}$ )**

## Метод фазовой модификации свойств

Фазовая модификация свойств заключается в формировании в определенных областях однофазного материала новой фазы с отличными свойствами и в изменении соотношения этих фаз. Наибольшее распространение фазовая модификация получила в устройствах записи и хранения информации на основе халькогенидных материалов системы Ge – Sb – Te (GST). Значительное различие оптических свойств (коэффициента отражения) кристаллической и аморфной фаз GST обеспечило реализацию перезаписываемых оптических дисков для записи и хранения информации, а большая (на порядки величины) разница в электропроводности этих фаз позволила создать интегральные схемы энергонезависимой памяти на фазовых переходах [16].

В описанных выше устройствах запись и считывание информации основаны на свойствах двух фаз (кристаллической и аморфной), отличающихся значительным оптическим и электрическим контрастом. В этом случае в каждой ячейке записывается один бит информации. Вместе с тем, изменение соотношения объемов этих фаз в ячейке позволяет осуществлять многоуровневую запись информации. Так в [17] путем изменения величины тока записи информации удалось создать интегральные схемы, в каждой ячейке которых возможна запись до трех бит информации. Кроме того, разработка материалов, позволяющих создать с помощью низкоэнергетических воздействий ряд промежуточных метастабильных фаз, открывает возможность получения эффективных устройств нанофотоники и оптоэлектроники для многоуровневого управления процессами [18].

## Заключение

Уровень упорядочения атомной структуры полупроводника оказывает определяющее влияние на возможность и эффективность управления его свойствами. Методы управления свойствами в случае наличия или отсутствия в материале трансляционной симметрии представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Методы управления свойствами при разных уровнях упорядочения структуры**  
**Table 1 – Methods of properties control at different levels of structure ordering**

Уровень упорядочения	Наличие дальнего порядка	Наличие только ближнего и среднего порядка
Методы управления свойствами	Легирование примесями замещения	Химическая модификация
		Структурная модификация
	Фазовая модификация	Структурно-химическая модификация
		Фазовая модификация

Снижение степени упорядоченности атомной структуры некристаллических полупроводников вследствие отсутствия дальнего порядка в расположении атомов приводит к потере возможности управления их свойствами универсальным для кристаллических полупроводников методом легирования примесями замещения, но предоставляет другие способы модификации для управления их свойствами. Для управления свойствами материалов с отсутствием трансляционной симметрии при создании приборов разработан ряд методов модификации свойств:

– химическая модификация основана на изменении электронной структуры материала, благодаря чему становится возможным управление его свойствами путем введения примесей замещения, либо путем изменения ширины запрещенной зоны. Это обеспечивает значительные изменения электрических и фотоэлектрических свойств некристаллического полупроводника, а также типа его проводимости;

– в структурной модификации существует четыре уровня, отличающиеся различными изменениями структуры материала. Воздействие на атомную структуру на уровне ближнего порядка в расположении атомов вызывает кардинальные изменения электронной структуры, а следовательно, практически всех физических свойств полупроводника. Однако количество материалов, в которых в настоящее время реализована модификация на этом уровне, весьма ограничено. Модификация на уровне среднего порядка позволяет изменять механические свойства и характеристики фазовых переходов материала, а модификация на уровне подсистемы дефектов используется для совершенствования параметров электронных приборов;

– структурно-химическая модификация в настоящее время не используется как самостоятельный метод управления свойствами некристаллических полупроводников. Однако учет влияния примесных атомов на атомную структуру материала необходим для корректной оценки величины изменения свойств при химической модификации;

– метод фазовой модификации свойств нашел широкое применение в устройствах записи и хранения информации, таких как оптические диски и интегральные схемы энергонезависимой памяти на фазовых переходах. Данный метод применим как для некристаллических, так и для кристаллических материалов.

Следует отметить, что в реальных условиях, как правило, осуществляется одновременное влияние нескольких из упомянутых выше факторов на свойства получаемого материала. Так, например, при химической модификации некристаллических кремний-углеродных покрытий переходными металлами, атомы последних образуют нанокристаллическую фазу карбидов металла. Для создания этой фазы необходимы атомы углерода, которые забираются из исходной кремний-углеродной структурной сетки. Благодаря этому происходит изменение не только химического состава, но и атомной структуры последней. В результате изменения свойств материала происходят не только за счет введения атомов металла (химическая мо-

дификация) и образования новой нанокристаллической фазы (фазовая модификация), но и за счет структурно-химической модификации исходной кремний-углеродной структурной сетки. Только учет всех перечисленных составляющих процесса позволяет правильно рассчитать зависимости свойств получаемых материалов от концентрации вводимого металла [14].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-07-00021).*

#### Библиографический список

1. Wilson A. The Theory of Electronic Semiconductors. Proc. Roy. Soc. 1931. V. 133. No. 822. Pp. 458-491.
2. Wilson A. The Theory of Electronic Semiconductors II. Proc. Roy. Soc. 1931. V. 134. No. 823. Pp. 277-287.
3. Коломиец Б.Т., Горюнова Н.А. Полупроводниковые свойства халькогенидных стекол. Государственный реестр открытий СССР. Открытие № 68 с приоритетом от января 1955 г.
4. Попов А.И. Аморфные полупроводники в микро- и наноэлектронике // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 4. Приложение. С. 72-80.
5. Flasck R., Izu M., Sapru K., Anderson T., Ovshinsky S., Fritzsche H. Optical and electronic properties of modified amorphous materials. Proceeding of the XVII-th Intern. Conf. on Amorphous and Liquid Semiconductors, Edinburgh. 1977. p. 524-528.
6. Spear W., Le Comber P. Substitutional doping of amorphous silicon. Solid State Communication, 1975. V. 17. Pp. 1193-1196.
7. Spear W., Le Comber P. Electronic properties of substitutionally doped amorphous Si and Ge. Philos. Mag. 1976. Vol. 33. Pp. 935-940.
8. Stotzel H. Properties of a – SiN<sub>x</sub>:H films. Journal of Non-Crystalline Solids. 1986. 90. Pp. 267-274.
9. Bauer G. H. Amorphous hydrogenated silicon-germanium alloys. Solid State Phenomena. 1995. Vol. 44-46. Pp. 365-384.
10. Popov A., Michalev N., Shemetova V. Structural modification of some glassy chalcogenides. Philosophical Magazine B. 1983, v. 47, № 1, p. 73-81.
11. Попов А., Воронцов В., Попов И. Уровни структурной модификации свойств некристаллических полупроводников и области их применимости. Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 6. С. 665-670.
12. Popov A.I., Barinov A.D., Presniakov M.Y. Modification of properties of silicon-carbon nanocomposites. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. 2014. V. 9. No. 6, Pp. 787-791.
13. Lacourse W.C., Twaddell V.A. and Mackenzie J.D. Effects of impurities on the electrical conductivity of glassy selenium. J. Non-Cryst. Sol. 1970. V. 3. Pp. 234-236.
14. Попов А.И., Баринов А.Д., Емец В.М., Чуканова Т.С., Шупегин М.Л. Управление свойствами алмазоподобных кремнийуглеродных пленок. Физика твердого тела. 2020. Том 62. Вып. 10. С. 1612-1617.
15. Баринов А.Д., Попов АИ., Мирошникова И. Н., Чуканова Т.С. Методы управления свойствами нанокомпозитных систем на основе аморфных кремний-углеродных пленок. Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. Междунар. конф. СПб. 2021. С. 29-30.
16. Popov A. Disordered Semiconductors: Physics and Applications (2<sup>nd</sup> Edition). Pan Stanford Publ. 2018, 328 p.
17. Athmanathan A., Stanisavljevic M., Papandreou N., Pozidis H., Eleftheriou E. Multilevel-cell phase-change memory: a viable technology, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst. 2016. V. 6. Pp. 87-100.
18. Козюхин С.А., Лазаренко П.И. Попов А.И., Еременко И.Л. Материалы фазовой памяти и их применение // Успехи химии. 2022. 91 (9) RCR 5033.

UDC 621.315.592

## EFFICIENCY OF METHODS TO CONTROL PROPERTIES OF SEMICONDUCTORS WITH VARIOUS DEGREE OF ATOMIC STRUCTURE ORDERING

**A. D. Barinov**, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, Department of Electronics and Nanoelectronics, National Research University MPEI, Moscow, Russia;  
 orcid.org/0000-0002-0325-508X, e-mail: [BarinovAD@mpei.ru](mailto:BarinovAD@mpei.ru)

**V. G. Litvinov**, Dr. in physics and mathematical sciences, head of department, RSREU, Ryazan, Russia;  
 orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: [vglit@yandex.ru](mailto:vglit@yandex.ru)

**I. N. Miroshnikova**, Dr. in technical sciences, full professor, Department of Electronics and Nanoelectronics, National Research University MPEI, Moscow, Russia;  
 orcid.org/0000-0001-5745-4087 e-mail: [MiroshnikovaIN@mpei.ru](mailto:MiroshnikovaIN@mpei.ru)

**A. I. Popov**, Dr. in technical sciences, full professor, Department of Electronics and Nanoelectronics, National Research University MPEI, Moscow, Russia;  
 orcid.org/0000-0002-4078-5303, e-mail: [popovai2009@gmail.com](mailto:popovai2009@gmail.com)

*The efficiency of semiconductor materials properties control depends on the degree of their atomic structure ordering. The lack of translational symmetry leads to the loss of the ability to control semiconductor physical properties by substitution doping, which is successfully used in crystals. The possibilities to control the properties of semiconductors lacking long-range order in their atomic arrangement using chemical and structural modification methods are described, as well as the ranges of property changes achieved with these methods. It is shown that for an accurate quantitative assessment of the magnitude of property change, the effect of structural-chemical modification must be taken into account. A method for phase modification of physical properties is also considered.*

**Keywords:** translational symmetry, property control, chemical modification, structural modification, phase modification, structural-chemical modification, ranges of property changes, complex effect.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2025-94-166-176

### References

1. **Wilson A.** The Theory of Electronic Semionductors. *Proc. Roy. Soc.* 1931, v. 133, no. 822, pp. 458-491.
2. **Wilson A.** The Theory of Electronic Semiconductors II. *Proc. Roy. Soc.* 1931, v.134, no. 823, p. 277-287.
3. **Kolomiyets B.T., Goryunova N.A.** *Poluprovodnikovyye svoystva khal'kogenidnykh stekol*. Gosudarstvennyy reyestr otkrytyi SSSR. Otkrytiye no. 68 s prioritetom ot yanvarya 1955 g (in Russian).
4. **Popov A.I.** Amorfnyye poluprovodniki v mikro- i nanoelektronike. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2009, no. 4. Prilozhenie. Pp. 72-80. (in Russian)/
5. **Flasck R., Izu M., Sapru K., Anderson T., Ovshinsky S., Fritzsche H.** Optical and electronic properties of modified amorphous materials. *Proceeding of the XVII-th Intern. Conf. on Amorthous and Liquid Semiconductors*. Edinburgh. 1977, pp. 524-528.
6. **Spear W., Le Comber P.** Substitutional doping of amorphous silicon. *Solid State Communication*. 1975, vol. 17, pp. 1193-1196.
7. **Spear W., Le Comber P.** Electronic properties of substitutionally doped amorphous Si and Ge. *Philos. Mag.* 1976, vol. 33, pp. 935-940.
8. **Stotzel H.** Properties of a – SiN<sub>x</sub>:H films. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1986, 90, pp. 267-274.
9. **Bauer G.H.** Amorphous hydrogenated silicon-germanium alloys. *Solid State Phenomena*. 1995, vol. 44-46, pp. 365-384.
10. **Popov A., Michalev N., Shemetova V.** Structural modification of some glassy chalcogenides. *Philosophical Magazine B*. 1983, vol. 47, no. 1, pp. 73-81.

11. **Popov A.I., Vorontsov V.A., Popov I.A.** Levels of structural modification of noncrystalline semiconductors and limits of their applicability. *Semiconductors*. 2001, vol. 35, no. 6, pp. 637-642.
12. **Popov A.I., Barinov A.D., Presniakov M.Y.** Modification of properties of silicon-carbon nanocomposites. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2014, vol. 9, no. 6, pp. 787-791.
13. **Lacourse W.C., Twaddell V.A. and Mackenzie J.D.** Effects of impurities on the electrical conductivity of glassy selenium. *J. Non-Cryst. Sol.* 1970, vol. 3, pp. 234-236.
14. **Popov A.I., Barinov A.D., Emets V.M., Chukanova T.S. and Shupegin M.L.** Control of Properties of Diamond-Like Silicon-Carbon Films. *Physics of the Solid State*. 2020, vol. 62, no. 10, pp. 1780-1786.
15. **Barinov A.D., Popov A.I., Miroshnikova I.N., Chukanova T.S.** Metody upravleniya svoystvami nanokompozitnykh sistem na osnove amorfnykh kremniy-uglerodnykh plenok. *Amorfnyye i mikrokristallicheskiye poluprovodniki: sb. tr. Mezhdun. konf.* SPb. 2021, pp. 29-30. (in Russian).
16. **Popov A.** *Disordered Semiconductors: Physics and Applications (2<sup>nd</sup> Edition)*. Pan Stanford Publ. 2018, 328 p.
17. **Athmanathan A., Stanisavljevic M., Papandreou N., Pozidis H., Eleftheriou E.** Multilevel-cell phase-change memory: a viable technology. *IEEE J. Emarg. Sel. Topics Circuits Syst.* 2016, vol. 6, pp. 87-100.
18. **Kozyukhin S.A., Lazarenko P.I., Popov A.I., Eremenko I.L.** Phase-change materials and their applications. *RUSS CHEM REV.* 2022, 91, RCR5033.