

**УДК 0.5**

## **Изучение свойства кремния в микро и наноструктурах**

Инь Хуавэй, Сюэ Юйхан, Инь Шаньшань  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
Научный руководитель: профессор, ф.п.н. Г.В. Ерофеева  
E-mail: [physhan@yandex.ru](mailto:physhan@yandex.ru)

Наноструктурный кремний, с хорошими управляемыми электрическими и фотоэлектрическими свойствами, является перспективным материалом благодаря многим свойствам. В данной работе мы рассмотрели кристаллические решетки кремния и их параметры, а также зону Бриллюэна. Указаны сравнительные свойства кремния в микро и наноструктурах. Кроме того, рассмотрено влияние размерных эффектов на свойства кремния, а также квантовые размерные эффекты нанокремния. У нанокремния много специальных свойств, включая хорошо управляемые электрические и фотоэлектрические свойства. Благодаря разным свойствам наноструктурного кремния, он в наноструктуре широко используется во многих областях: кремний в различных своих формах (кристаллический, поликристаллический, аморфный) является основой современной микроэлектроники и фоточувствительной оптоэлектроники. На конец, приведено несколько технологии получения нанокремния.

**Ключевые слова:** Кремния, микроструктуры, наноструктуры, размерный эффект, свойства, применение, технология получения

## **The study of the properties of silicon in the micro and nanostructures**

Yin Huawei, Xue Yuhang, Yin Shanshan  
Scientific Supervisor: Prof., Dr. G.V. Erofeeva  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin Avenue 30, 634050  
E-mail: [physhan@yandex.ru](mailto:physhan@yandex.ru)

Nanostructured silicon, with easily controllable electrical and photovoltaic properties, is a promising material in many fields. In this study, we consulted the crystal lattice of silicon and parameters, as well as the Brillouin zone. To better view the properties of the nanostructured silicon, we compared the properties of the microstructured and nanostructured silicon. Next, we checked the influence of the size effects on the properties of the silicon, and also the quantum size effects of the nanostructured silicon. Nanostructured silicon has many special features, including the well-controlled electrical and photovoltaic properties. In the end, we showed the application, and preparation technology of the nanostructured silicon.

**Keywords:** Silicon, microstructures, nanostructures, size effect, properties, application, preparation technology

Рассмотрим прямую и обратную решетки кремния, а так же параметры решеток.

Кристаллический кремний имеет такую же структуру, как и алмаз. Напомним, что пространственная решетка структуры алмаза - г.ц.к., а базис состоит из двух атомов с координатами 0,0,0 и 1/4,1/4,1/4 в примитивной г.ц.к. ячейке. Атомы в структуре кремния

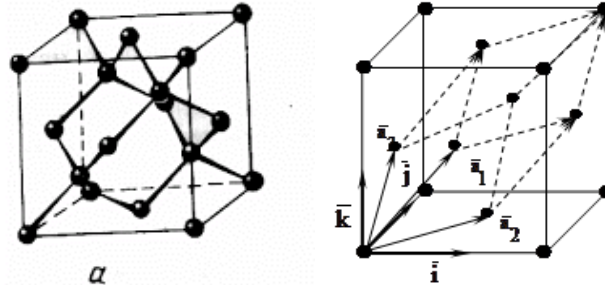


Рис. 1. Прямая (а) и обратная (б) решетки кремния [6].

имеют тетраэдрическую координацию: каждый атом имеет четыре ближайших соседа. Постоянная решетки равна 5,43 Å для кремния. Известно, что для примитивной кубической решетки обратная решетка тоже примитивная кубическая решетка, поэтому легко получить

обратную решетку кремния,  $a_2 = \frac{2\pi}{a_1} = \frac{2\pi}{5.43} \approx 1.16 \text{ \AA}$  [6]. На рис. 1 показана прямая и обратная

решетки кремния. Связь между атомами кремния является ковалентной.

Рассмотрим зону Бриллюэна и поверхность Ферми кремния.

На рис. 2 показан вид зоны Бриллюэна для гранецентрированного кубического кристалла (рис. 2. (б)), а рис. 2. (а) иллюстрирует положение границ энергетических зон для такого кристалла с указанием направлений и характерных точек внутри зоны Бриллюэна.

Здесь символом Г обозначен центр зоны Бриллюэна, а символами Δ, Λ, Σ, L, K, W – симметричные точки в зоне Бриллюэна для гранецентрированного кубического кристалла. Положение этих точек определяется с использованием методов теории групп. Направления Δ, Λ, Σ для ГЦК ячейки будут соответственно [100], [111], [110].

Поверхность Ферми кремния, который является непрямозонным полупроводником, состоит из шести эллипсоидов вращения в k-пространстве.



роль, когда размер области локализации свободных электронов становится соизмеримым с их

$$\text{длиной волны де Бройля } \lambda_{\delta} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}.$$

Для электрона в полупроводнике с  $m_{e^*} = (0.1-1) m_0$ , где  $m_{e^*}$  является эффективной массой электронов, и длина де Бройля лежит в промежутке  $3 \text{ нм} < \lambda_{\delta} < 30 \text{ нм}$ . В наноструктурах с минимальными размерами  $1 - 100 \text{ нм}$  электроны, дырки и другие квазичастицы будут испытывать ограничения при движении, что приводит к квантовому размерному эффекту. На рис. 3 показаны основные типы идеальных твердотельных наноструктур: квантовые пленки (2D), квантовые проволоки (1D), квантовые точки (0D). Квантовый размер  $d$  приближается к длине волны де Бройля, т.е.  $d \sim \lambda_{\delta} = h/p$ , где  $p$  – квазиимпульс электрона или дырки в кристалле.

Используя понятие эффективной массы, можно исследовать квантово-размерный

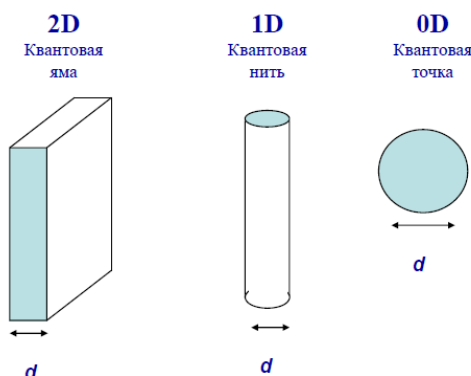


Рис. 3. Основные типы идеальных твердотельных наноструктур [3].

эффект, который для запрещенной зоны кремния усиливается при переходе от 2D к 0D (при понижении размерности наноструктуры), как показано на рис. 4.

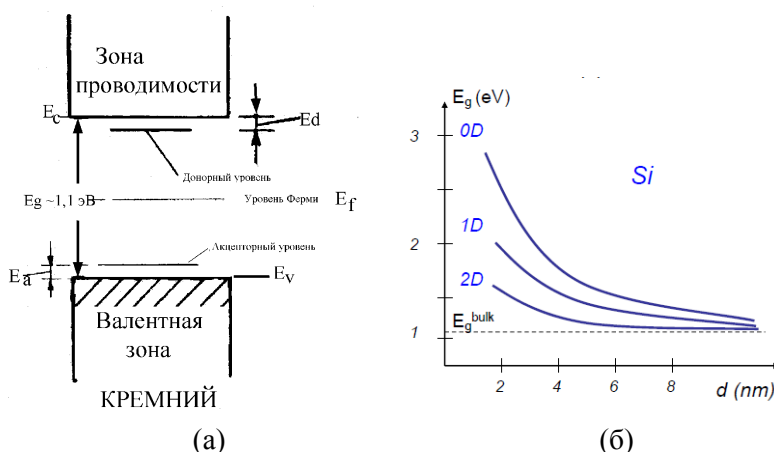


Рис. 4. (а) Схема зон кремния. (б) Квантово-размерный эффект для запрещенной зоны усиливается при переходе от 2D к 0D (при понижении размерности наноструктуры) [5].

У наноструктурного кремния много специальных свойств:

Кремний (с-Si) имеет кубическую решетку, ширину запрещенной зоны  $E_g = 1.17 \text{ эВ}$  ( $T = 4 \text{ К}$ ), хорошо изучены и управляемые электрические и фотоэлектрические свойства. На его

основе делаются основные компоненты микроэлектроники и фотовольтаики. Но эффективность излучательной рекомбинации в чистом c-Si очень низкая ввиду непрямозонной природы оптических переходов. Эффективность излучательной рекомбинации можно увеличить, формируя нанокристаллы с размерами 2-3 нм [7].

Сверхпроводящие свойства кремниевых сандвич-наноструктур на поверхности Si (100) n-типа, которые представляют собой сверх узкие кремниевые квантовые ямы p-типа, ограниченные  $\delta$ -барьерами, сильно легированными бором, проявляются в измерениях температурных и полевых зависимостей удельного сопротивления, термо-ЭДС, теплоемкости и статической магнитной восприимчивости [4].

Благодаря разным свойствам наноструктурного кремния, он в наноструктуре широко используется во многих областях:

Кремний (c-Si) в различных своих формах (кристаллический, поликристаллический, аморфный) является основой современной микроэлектроники и фоточувствительной оптоэлектроники (фотовольтаики).

Системы, содержащие кремниевые нанокристаллы в диэлектрической матрице, являются перспективными для создания светоизлучающих устройств, совместимых с технологией интегральных схем. Легирование структур кремниевых нанокристаллов ионами редкоземельных металлов позволяет реализоваться уникальному процессу практически полной передачи энергии экситонов на внутренние степени свободы ионов.

Искусственные среды с требуемыми оптическими свойствами могут быть сформированы путем наноструктурирования гомогенных изотропных материалов методом электрохимического травления. Высококачественные одномерные фотонные кристаллы на основе пористого кремния имеют ярко выраженную запрещенную зону в видимом или ближнем ИК диапазоне, что позволяет компенсировать дисперсию материала для достижения условий фазового согласования в процессах волнового смешения. Анизотропный пористый кремний является отрицательным одноосным кристаллом с огромной величиной двулучепреломления. Подобные слои могут использоваться в качестве сред для фазового согласования нелинейно-оптических взаимодействий. Анизотропное наноструктурирование полупроводников открывает широкие возможности для изготовления искусственных сред с новыми оптическими свойствами для различных приложений в фотонике (поляризаторы, фазокомпенсирующие пластины, дихроичные зеркала, плоские “окна Брюстера”) [1].

Существуют разные способы получения наноструктурного кремния.

Известен способ получения наноразмерных кластеров на плоской поверхности подложки с помощью туннельного атомного силового микроскопа. По этому способу на подложку окисленного кремния наносят тонкий слой титана. На поверхности напыленного

металлического слоя сорбируется тонкая пленка воды. В присутствии сильного электрического поля между подложкой и зондом микроскопа в результате электрохимических процессов происходит локальное окисление титана. В результате этого процесса формируется транзистор с толщиной базовой области в несколько десятков нанометров. Данный способ обеспечивает получение наноструктур различной конфигурации, однако их формирование происходит лишь на поверхности подложки и требует применения сложного оборудования [1].

Известен способ создания элементов проводящей структуры на диэлектрических слоях, включающий разрушение оксидного слоя на поверхности алюминия под действием мощного излучения и возбужденных частиц упрочняющего материала, который переносится с подложки на поверхность алюминия. При этом при помощи отклоняющего излучения устройства на обрабатываемой поверхности создается слоистая металлизированная структура с заданной геометрией рисунка. Но, данный способ имеет ограниченную область применения, так как он может быть использован только для алюминиевых подложек и не позволяет получать структуры с размерами отдельных элементов в несколько нанометров [1].

Известен способ получения кремниевых наноструктур, включающий воздействие потоков электронов с энергией 5-25 кэВ и плотностью электронов в потоке  $1-10^2$  мА/см<sup>2</sup> в течение не менее 50 с на пористую силикатную матрицу и последующее осаждение выделяющегося кремния в наноразмерных полостях силикатной матрицы.

Ещё есть способ получения кремниевых наноструктур, который относится к технологии получения нанoeлектронных структур с помощью потока заряженных частиц [8]. Подобные структуры используют для передачи, преобразования, хранения или генерации информационных сигналов. Данный способ включает воздействие на кремнийсодержащее вещество потоком заряженных частиц. Новым в способе является предварительное нанесение на поверхность кремнийсодержащего вещества металлического покрытия и воздействие ускоренными тяжелыми ионами, при этом длительность облучения кремнийсодержащего вещества ионами определяют из соотношения  $j \cdot t = N$ , 1/см<sup>2</sup>, где  $j$  – заданная плотность потока ионов, 1/см<sup>2</sup>·с;  $t$  – длительность облучения слоя ионами, с;  $N$  – заданная плотность кремниевых наноструктур, 1/см<sup>2</sup>. Металлическое покрытие может быть нанесено в виде сплошной пленки или в виде участков заданной геометрии, например нитей.

#### Список литературы:

- [1] А.А. Ищенко, Г.В. Фетисов, Л.А. Асланов. Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля. – 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 648 с. – ISBN 978-5-9211-1369-4.
- [2] А.А. Шкляев, М. Ичикава. Создание наноструктур германия и кремния с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа// Успехи физических наук. Том 176, №9.
- [3] А.Н. Михайлов, А.И. Белов, М.О. Марычев, В.А. Бурдов, Д.И. Тетельбаум. Физические основы ионно-лучевого формирования и свойства квантовых точек кремния в диэлектрике// ННГУ/ 2010.
- [4] Д.В. Кузнецов, С.И. Миляева, А.Г. Юдин, Д.С. Муратов, М.А. Костицын, С.Э. Кондаков, Е.А. Сопова, А.Ю. Годымчук, А.А. Гусев. Свойства нанопорошков кремния, полученных химико-термическим методом// Нано статьи/ УДК 546.06, 54.03.
- [5] И.Е. Тыщенко, В.А. Володин. Квантово-размерный эффект в пленках кремний-на-изоляторе, имплантированных большими дозами ионов водорода// Физика и техника полупроводников, 2012, том 46, вып. 10.
- [6] К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаямя. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. – 490 с.
- [7] Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.А. Кудрявцев, А.М. Маляренко, В.В. Романов. Сверхпроводящие свойства кремниевых наноструктур// Физика и техника полупроводников/ 2009, том 43, вып. 11.
- [8] <http://www.findpatent.ru/patent/219/2192689.html>// FindPatent.ru - патентный поиск, 2012-2016