

Исследование процессов токопереноса в электролюминесцентных структурах пористого кремния, допированного ионами эрбия

Э.Х. Хамзин
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
Elkhan.k.khamzin@gmail.com

Д.А. Нестеров
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
nesand2606@mail.ru

Н.В. Латухина
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
natalat@yandex.ru

О.Ф. Халметов
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
omar.khalmetov@gmail.com

Аннотация — Предлагаются гипотезы механизмов токопереноса в электролюминесцентных структурах пористого кремния с ионами эрбия, описываемые теорией дискретного туннелирования. Возбуждение предпробойной электролюминесценции в порах происходит при пролете носителей заряда через систему нанокристал кремния-кластер эрбия - оксидный слой. Проведен численный расчет распределения электрического поля в пористой среде и токопереноса по цепочке нанокристаллов кремния. Результаты расчета вольтамперной характеристики качественно согласуются с экспериментальными данными и являются практически применимыми к описанию теории электролюминесценции в системах с пористым кремнием.

Ключевые слова — светоизлучающий диод (СИД), пористый кремний (ПК), нанокристаллы, эрбий, электролюминесценция, дискретное туннелирование

1. ВВЕДЕНИЕ

Пористый кремний (ПК) — один из ярких представителей наноматериалов [1]. Он имеет прикладное значение в биологии, медицине и технологии создания электронных устройств [2,3]. Легированный редкоземельными элементами ПК приобретает способность люминесцировать при комнатной температуре за счет изменения энергетической структуры. Светодиод на основе этой системы, излучающий в ИК-диапазоне на длине волны 1555 нм, имеет высокую интенсивность излучения при комнатной температуре [4]. Эта структура перспективна для дальнейшего развития оптических интегральных схем на кремниевой подложке. Основная цель данной работы — представить модели токопереноса в электролюминесцентных структурах ПК-эрбий.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Использовались кремниевые пластины р-типа с удельным сопротивлением $1,37 \text{ Ом/см}^2$ с текстурированной и полированной поверхностями, ориентированной вдоль кристаллографической плоскости (100). Изготовление образцов пористого кремния с ионами эрбия включало следующие этапы: электрохимическое травление кремниевых пластин для образования пористого слоя, насыщение эрбием

пористого слоя из водно-спиртового раствора соли эрбия состава $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1$ в 7% концентрации, высокотемпературный отжиг на воздухе при температуре 950 градусов в течении 30 минут и нанесение омических контактов методом термического испарения.

На основании наблюдаемой пористой структуры изображения растровой микроскопии (рис. 1) была предложена модель переноса тока (рис. 2) и описания электролюминесценции в системе ПК-эрбий. Первоначально заряд накапливается на поверхности неоднородностей рельефа стенки поры и наночастиц кремния. После достижения некоторого критического значения напряженности электрического поля происходит пробой диэлектрического слоя.

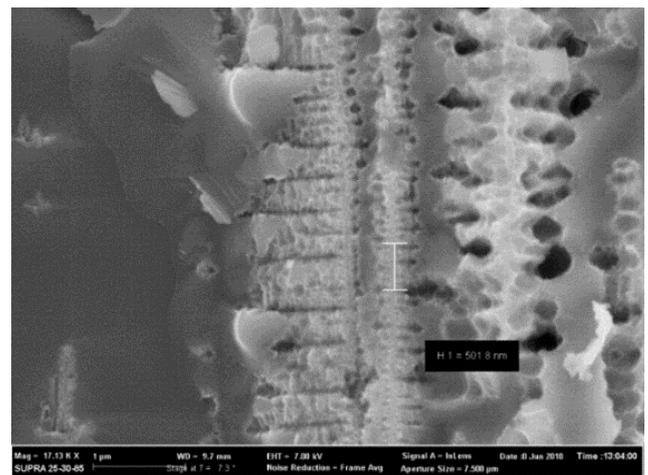


Рис. 1. Изображение поперечного сечения пористого кремния

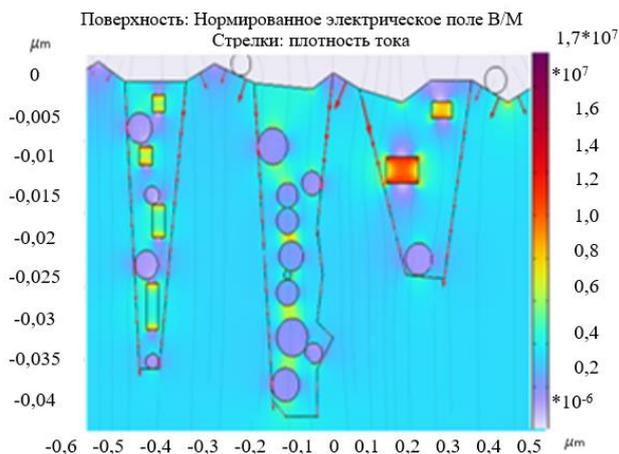


Рис. 2. Компьютерная модель пористого кремния с ионами эрбия

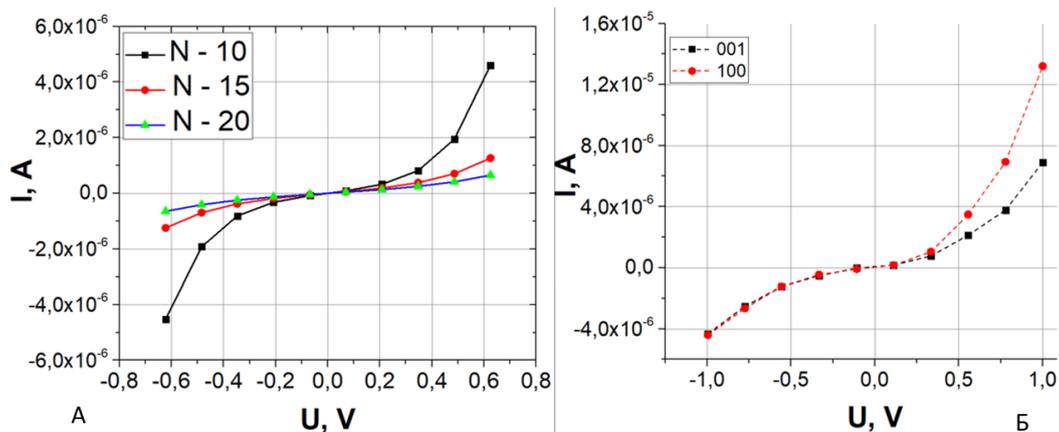


Рис. 3. Вольтамперные характеристики А) полученные численным моделированием для цепочек из $N=10, 15$ и 20 гранул Б) экспериментальных образцов при горизонтальном -001 и вертикальном 100 приложении разности потенциалов между контактами

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ВАХ показывает, что большинство образцов имеют нелинейную зависимость тока от напряжения, что свидетельствует о наличии потенциального барьера на границе металл–пористый кремний. Величины тока теоретически рассчитанных вольтамперных зависимостей, основанные на модели туннельного протекания тока, и экспериментальных кривых ВАХ хорошо совпадают по порядку тока.

Таким образом можно сделать вывод, что теория дискретного туннелирования согласуется с экспериментальными данными вольтамперной зависимости, а рассчитанные модели распределения электрического поля и плотности тока соответствуют данным микроструктуры, полученным растровой электронной микроскопией, и является применимой к описанию механизма электролюминесценции в системе ПК- эрбий.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Моделирование стационарного распределения напряженности поля ПК в воздухе и на границе раздела кремний-пористый слой выполнялось методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics с использованием физических модулей electric currents и electrostatics. Расчет проводился в соответствии с основными уравнениями электростатики с граничными условиями напряжения «на земле» и электрической изоляции, где электростатические поля вычислялись по теореме Гаусса.

Экспериментальное исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) проводилось на приборе Keithley серии 2450. Измерение проводилось в диапазоне напряжении от -1 до 1 В с шагом $0,2$ вольт при прямом и обратном токе. Предполагая модель дискретного туннелирования (ДТ) тока, описываемого в [5, 6] при малых подающих напряжениях на образцы, теоретически рассчитывались ВАХ при разном количестве токопроводящих гранул (рис. 3).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Смирнов, В.И. Физические основы нанотехнологий и наноматериалы: учебное пособие / В.И. Смирнов. – Ульяновск: Издательство Инфра-Инженерия, 2017. – 217 с.
- [2] Спивак, Ю.М. Пористый кремний как наноматериал для дисперсных транспортных систем направленной лекарственной доставки ко внутреннему уху / Ю.М. Спивак, А.О. Белорус, А.А. Паневин, С.Г. Журавский, В.А. Мошников, К. Беспалова, П.А. Сомов, Ю.М. Жуков, А.С. Комолов, Л.В. Чистякова, Н.Ю. Григорьева // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88, № 9. – С. 1394-1404. DOI: 10.21883/JTF.2018.09.46427.57-18.
- [3] Ксенофонтова, О.И. Пористый кремний и его применение в биологии и медицине / О.И. Ксенофонтова, А.В. Васин, В.В. Егоров, А.В. Бобыль, Ф.Ю. Солдатенков, Е.И. Теруков, В.П. Улин, Н.В. Улин, О.И. Киселев // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 1. – С. 67-78.
- [4] Латухина, Н. В. Многослойные наноструктуры на базе пористого кремния для оптоэлектроники / Н. В. Латухина, Д. А. Лизункова, Г. А. Рогожина, И. М. Жильцов, М. В. Степихова, В. И. Чепурнов // Фотоника. – 2018. – Т. 12, № 5(73). – С. 508-513. DOI: 10.22184/1993-7296.2018.12.5.508.513
- [5] Демидов, Е.С. Дискретное туннелирование в электронных транспортных свойствах наногранулированного пористого кремния и подобных гетерофазных систем / Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова, В.В. Карзанов, К.А. Марков, В.В. Сдобняков // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, № 10. – С. 1894-1899.
- [6] Чугров, И.А. Дискретное туннелирование в многослойных нанопериодических структурах $nc\text{-Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ / И.А. Чугров, Е.С. Демидов, А.В. Ершов // Физика твёрдого тела. – 2011. – Т. 3, №1. – С. 44-49.