

3 - Физика полупроводников и диэлектриков

Алмаев Дмитрий Александрович, магистрант 2 года обучения
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет
Фотоэлектрические характеристики гексагонального оксида галлия

Алмаев Алексей Викторович, к.ф.-м.н.
e-mail: almaev001@mail.ru стр. 79

Бобылев Вячеслав Александрович, магистрант 2 года обучения
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ Физики
Запасенная и эффективная энергия в твердом растворе $(1-x)\text{BaTi0.8Zr0.2O}_3 - x\text{AgNbO}_3$

Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.
e-mail: slava_bobelev@mail.ru стр. 80

Васильев Владислав, магистрант 2 года обучения
Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики
Электрофизические свойства блочных полиуретанов, модифицированных металлокомплексами

Болтакова Наталья Викторовна, к.ф.-м.н.
e-mail: vlad.v99@bk.ru стр. 81

Гисматулин Андрей Андреевич, м.н.с.
Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, лаборатория 10
Мемристорная память на основе оксидов и нитридов кремния

e-mail: aagismatulin@isp.nsc.ru стр. 82

Дирко Владимир Владиславович, с.н.с.
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет
Анализ сближения ступеней при росте Si на Si (001) методом ДБОЭ в условиях сверхвысокого вакуума

e-mail: vovenmir@gmail.com стр. 83

Есин Егор Сергеевич, 2 курс
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики
Диэлектрические характеристики твердых растворов тройной системы $(1-x-y)\text{VlFeO}_3 - y\text{BaTiO}_3 - x\text{PbTiO}_3$

Болдырев Никита Анатольевич, к.ф.-м.н.
e-mail: esin@sfnu.ru стр. 84

Исламов Дамир Ревинирович, с.н.с.
Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, лаборатория 10
Универсальная память: ожидания, реальность и перспективы

e-mail: damir@isp.nsc.ru стр. 85

Кукенов Олжас Игоревич, аспирант 1 года обучения
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Радиофизический
Механизмы роста двумерных слоёв Ge на Si(100) при МЛЭ

Коханенко Андрей Павлович, д.ф.-м.н.
e-mail: okukenov@mail.ru стр. 86

Латыпова Айназ Рамзиловна, 3 курс
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический
Зонная структура Cu_2S

Давлетшина Алиса Данисовна, к.ф.-м.н.
e-mail: ainazlatypova@gmail.com стр. 87

Ли Чжэн, 4 курс
Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики
Термическая устойчивость сегментированных полиуретанов, модифицированных координационными соединениями меди

Болтакова Наталья Викторовна, к.ф.-м.н.
e-mail: czenli01@gmail.com стр. 88

Мельников Семен Алексеевич, 6 курс, м.н.с.
Екатеринбург, Уральский федеральный университет, физический факультет
Влияние сегнетоэлектрических доменных стенок на анизотропию инжекции заряда в монокристаллах MgO:LiNbO₃
Кособоков Михаил Сергеевич, к.ф.-м.н.
e-mail: semen.melnikov@urfu.me стр. 89

Осинных Игорь Васильевич, м.н.с
Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Применение III-нитридов для создания светоизлучающих приборов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра и СВЧ-транзисторов
e-mail: igor-osinnykh@isp.nsc.ru стр. 90

Смирнова Ольга Олеговна, аспирант 3 года обучения
Санкт-Петербург, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, отделение физики твердого тела
Эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации экситонов в ансамбле коллоидных наноплателетов CdSe/CdS
Родина Анна Валерьевна, д.ф.-м.н.
e-mail: smirnova.olga248@gmail.com стр. 91

Соловьев Никита Николаевич, аспирант 1 года обучения
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, ИШФВП
Влияние механического измельчения исходных реагентов на структурные свойства LiFeO₂ керамики
Суржиков Анатолий Петрович, д.ф.-м.н.
e-mail: nns15@tpu.ru стр. 92

Сотникова Анна Сергеевна, 2 курс
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет
Эпитаксиально-диффузионная технология получения эпитаксиально-диффузионная технология получения компенсированных слоев для лавинных S-диодов компенсированных слоев для лавинных S-диодов
Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н.
e-mail: anyutakurasova@mail.ru стр. 93

Трофимов Михаил Сергеевич, аспирант 1 года обучения, м.н.с.
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет
Механизмы протекания тока в детекторных структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом при воздействии синхротронного излучения рентгеновского диапазона спектра
Толбанов Олег Петрович, д.ф.-м.н.
e-mail: mihant1999@yandex.ru стр. 94

Юшков Иван Дмитриевич, аспирант 2 года обучения
Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, аспирантура
Мемристоры на основе германосиликатных стёкл
Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.
e-mail: ivanjushkov@gmail.com стр. 95

Фотоэлектрические характеристики гексагонального оксида галлия

Алмаев Дмитрий Александрович

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Алмаев Алексей Викторович, к.ф.-м.н.

almaev001@mail.ru

Солнечно-слепые (длина волны $\lambda = 200\text{--}280$ нм) ультрафиолетовые (УФ) детекторы используются для беспроводной связи, обнаружения пламени, мониторинга озоновых дыр, химического и биологического анализа. Традиционные полупроводники не удовлетворяют современным требованиям и ведутся активные исследования перспективных материалов, таких как Ga_2O_3 , который подходит для высокотемпературных и высокоомощных применений. На сегодняшний день наиболее изученным является стабильный $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [1-3], в связи с этим, интерес вызывает исследование фотоэлектрических характеристик метастабильного $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

Пленки Ga_2O_3 были получены ООО «Совершенные кристаллы» методом хлоридной газовой эпитаксии (HVPE) на сапфировых подложках при температуре 500°C . Толщина пленок определена по изображению скола с использованием сканирующего электронного микроскопа КУКУ-EM6900 при ускоряющем напряжении 20 кВ и составила 3,5–3,7 мкм. Фазовый состав образцов исследовался методом рентгенодифракционного анализа, с использованием дифрактометра высокого разрешения (ДРОН-6) с источником CuK_α излучения ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) в режиме $\theta\text{--}2\theta$ сканирования. На полученных дифрактограммах были обнаружены пики от поликристаллического гексагонального $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и временных зависимостей тока (I) в темновых условиях и при облучении светом проводились при помощи микрондовой установки фирмы Nextron и источника-измерителя Keithley 2636A. В качестве источника монохроматического ($\lambda = 254$ нм) излучения была использована криптон-фторовая лампа с плотностью потока излучения 620 мкВт/см^2 . Методика измерения спектральных зависимостей внешней квантовой эффективности (EQE) и коэффициента пропускания (T) подробно описана в работе [4].

ВАХ (рис. 1) показали степенную зависимость I от напряженности (E), $I \sim E^m$, где m – показатель степени. Значения m для темнового тока (I_D) и тока при освещении (I_L) составили $0,92 \pm 0,02$ и $1,14 \pm 0,01$, соответственно. Воздействие УФ излучения с $\lambda = 254$ нм приводило к повышению m , за счет уменьшения потенциальных барьеров на границах зерен, характерных для поликристаллических структур. Быстродействие фотоприемников на основе $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$ можно оценить по временным зависимостям I при циклическом воздействии светом (рис. 1). Значения нарастания и спада фотопроводимости составили $1,05 \pm 0,03$ с и $1,04 \pm 0,06$ с, соответственно, что указывает на равенство между темпом генерации и рекомбинации. Анализ спектра оптического пропускания (рис. 2) показал, что для пленок $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$ характерны прямые оптические переходы, а значение оптической ширины запрещенной зоны (E_g^{opt}) составило $4,53 \pm 0,05$ эВ. На спектральной зависимости EQE (рис. 2) наблюдается максимум при $\lambda = 274$ нм, что соответствует E_g^{opt} . Значение EQE при $\lambda = 274$ нм и $E = 1 \text{ кВ/см}$ составило $1,7 \times 10^3 \%$.

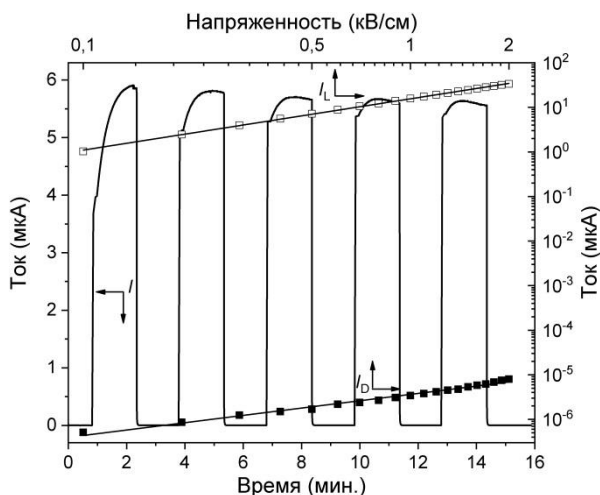


рис.1. ВАХ и временные зависимости тока

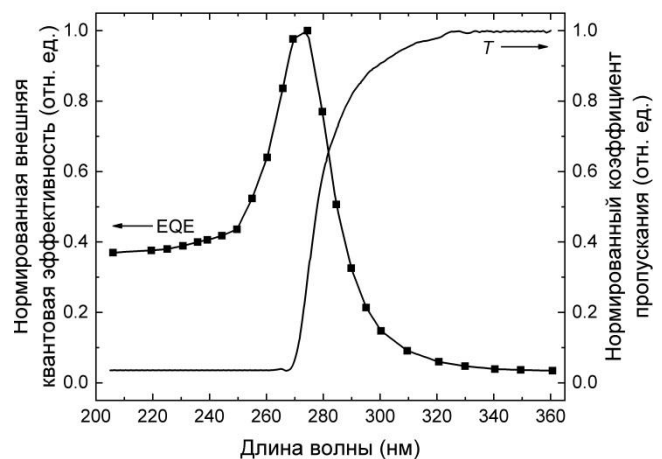


рис.2. Спектральные зависимости EQE и T

Значение EQE характеризует эффективность сбора фотоносителей [1-3], которую можно определить, как произведение внутренней квантовой эффективности (IQE) и коэффициента усиления (g). Высокая фоточувствительность пленок $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$ обусловлена самолокализацией дырок, что приводит к квазиоднополярной фотопроводимости и значение g определяется как отношение времени жизни электронов (τ_n) к времени их пролета между контактами. Большое τ_n позволяет электронам несколько раз проходить через электрическую цепь и играет ключевую роль в усилении фототока [3]. Если пренебречь механизмами рассеяния

и считать, что генерация фотоносителей в объеме много больше генерации на поверхности, то значения IQE можно принять равными нормированным EQE. В этом случае значение g составляет 17 отн. ед.

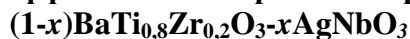
В данной работе были исследованы фотоэлектрические характеристики пленок $\epsilon(\kappa)$ -Ga₂O₃ толщиной 3,5-3,7 мкм, полученных методом HVPE на сапфировых подложках. ВАХ показали степенную зависимость, а по временным зависимостям тока оценено быстродействие фотоприемников. Анализ спектра оптического пропускания позволил определить характер оптических переходов и рассчитать значение оптической ширины запрещенной зоны, которое согласуется со спектральным максимумом фоточувствительности. Описан механизм внутреннего усиления фототока в таких структурах и оценен коэффициент усиления.

Исследования выполнены при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.).

Список публикаций:

- [1] Hou X., Zou Y., Ding M., Qin Y. [et al] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. P. 80.
- [2] Kaur D., Kumar M. // *Adv. Optical Mater.* 2021. P. 34.
- [3] Chen X., Ren F., Gu S., Ye J. // *Photonics Research*. 2019. P. 381-415.
- [4] Almaev A., Nikolaev V., Kopyev V., Shapenko S. [et al] // *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, № 17. P. 19245–19255.

Запасенная и эффективная энергия в твердом растворе



Бобылев Вячеслав Александрович

Волков Дмитрий Вячеславович

Южный федеральный университет

Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.

slava_bobelev@mail.ru

Пьезокерамики на основе свинцосодержащих соединений является широко используемыми материалами для применений в различных пьезоэлектрических устройствах, таких как: датчики деформации и давления [1-2], устройства для накопления энергии [2-4] и хранения информации [2]. В данной работе представлены результаты изучения поляризационных свойств твердых растворов квазибинарного сечения $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$ трехкомпонентной системы BaTiO_3 - BaZrO_3 - AgNbO_3 . Наибольший интерес для исследования и дальнейшего применения в качестве основы ёмкостных элементов, представляет интервал концентраций AgNbO_3 , $0,00 \leq x \leq 0,03$. Результаты ранее проведенных исследований [5] показали, что сосуществование фаз антисегнетоэлектрической (AFE) и сегнетоэлектрической (FE) в материале может повысить плотность запасаемой энергии.

Керамики $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$ ($x = 0,03; 0,06; 0,09$) были получены методом двухстадийного твердофазного синтеза, с использованием прекурсоров при $T_1 = 1593$ К, $t = 4$ ч. и $T_2 = 1623$ К, $t = 6$ ч. Прекурсоры $\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3$ и AgNbO_3 получали при $T_1 = 1593$ К, $t = 4$ ч., $T_2 = 1723$ К, $t = 6$ ч. и $T_1 = 1173$ К, $t = 4$ ч., соответственно. Перед спеканием выполняли процедуру механоактивации на протяжении 20 мин (1800 об/мин). Последующее спекание проводили при $T_{\text{сп}} = 1643$ К, $t = 2$ ч.

Петли диэлектрического гистерезиса для твердых растворов $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$ ($x = 0,03, 0,06, 0,09$), при напряженности электрического поля равной 35 кВ/см, для каждого исследуемого образца, не достигают насыщения, это видно из рисунка. Приложение более высокого поля неизбежно приводило к диэлектрическому пробою образца.

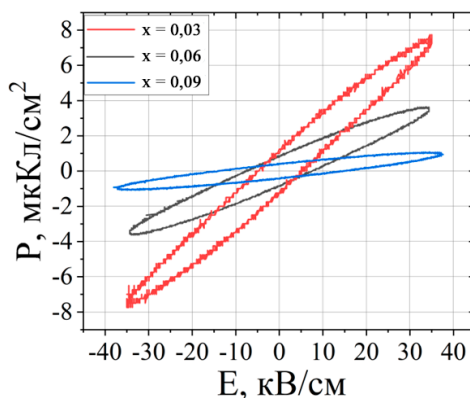


рис.1 Петли диэлектрического гистерезиса твердых растворов $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$ ($x = 0,03, x = 0,06, x = 0,09$)

Наибольшее значение КПД и эффективной энергии наблюдается у образца с $x = 0,03$. Самое малое значение КПД и эффективной энергии наблюдается у образца с $x = 0,09$. Наибольший интерес для исследования и дальнейшего применения в качестве основы нелинейных управляемых ёмкостных элементов представляют твердые растворы $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3 + x\text{AgNbO}_3$, с концентрациями $x \leq 0,03$. В этом диапазоне концентраций AgNbO_3 ожидается наибольшее значение запасенной энергии и КПД. В дальнейших исследованиях планируется улучшить электрическую прочность образцов, для достижения полей насыщения.

По полученным результатам можно установить, что при небольших концентрациях (меньше 0,03) AgNbO_3 , с AFE фазой, наблюдаются максимальные значения КПД и запасенной энергии. В дальнейшем планируется работа по улучшению электрической прочности материала, и исследование свойств в трехкомпонентной системе $\text{BaTiO}_3\text{-BaZrO}_3\text{-NaNbO}_3$ и сравнение полученных результатов с системой $\text{BaTiO}_3\text{-BaZrO}_3\text{-AgNbO}_3$, с небольшими концентрациями AFE фазы (NaNbO_3).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/Г30110/23-11-ИФ).

Список публикаций:

[1] Леманов В. В., Смирнова Е. П., Тараканов Е. А. // ФТТ. 1996. Т37. №8. С. 2476-2480.

[2] Яффе Б., Кук У., Яффе Г // Мир. 1974. С. 288.

[3] Ивлиев М.П., Раевский И.П., Резниченко Л.А. и др. // ФТТ. 2003. Т. 45. №10. С. 1886-1891.

[4] Раевский И.П., Ивлиев М.П., Резниченко Л.А. // ЖТФ. 2002. Т. 72. №6. С. 120-124.

[5] Zhiyong Liu, Jinshan Lu, Yuqing Mao, Pengrong Ren, Huiqing Fan // Journal of the European Ceramic Society. 2018. V. 38. P. 4939–4945.

Электрофизические свойства блочных полиуретанов, модифицированных металлокомплексами

Васильев Владислав

Ли Чжэн

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Болтакова Наталья Викторовна, к.ф.-м.н.

vlad.v99@bk.ru

Соединение нескольких полимерных блоков различной химической природы в единую макромолекулу позволяет получать блок-сополимеры, уникально сочетающие в себе свойства составляющих их мономеров. Блок-сополимеры достаточно перспективны для мембран, так как их свойства во многом определяются их морфологией, которая зависит от степени полимеризации каждого сегмента, молекулярной массы, полидисперсности (распределения частиц по размерам или массам в зависимости от способа измельчения) сополимера и взаимодействия между сегментами. БС состоят из гибкой цепной составляющей (состоящей из трех блоков), которая является амфифильной. Два крайних блока одинаковые, это – полиоксиэтиленгликоль (гидрофильный), а центральный блок гидрофобный. Это в свою очередь приводит к фазовой сегрегации. Жесткий блок является копланарным и образует структуры размерностью до 80–100 ангстрем. Такие блоки объединяются в структуры, в которых каркасом являются жесткие блоки, а гибкие блоки находятся как внутри, так и вне пустот, образованных жестким каркасом. В зависимости от расположения гибких блоков и размерности жесткого каркаса меняются свойства получаемых матриц. Модификаторы в виде металлокомплексов влияют на расположение жестких блоков и на процессы объединения гибкой составляющей.

Нами исследовались две серии пленочных материалов, относящихся к сегментированным полиуретанам, модифицированным координационными соединениями меди. Образцы синтезированы на кафедре технологии синтетического каучука КНИТУ (КХТИ). В качестве носителя ионов металла в одной серии использован Cu(II) -координированный полиоксиэтилензамещенный кремнезем ASiP-Cu-0,5 (с содержанием 0,5 % CuCl_2), а в другой – система CuCl_2 -диэтилгидроксиламин (Cu-ДЭГА) в отношении 1:1. Внутри каждой серии образцы отличаются количеством введенного модификатора, содержание которого изменялось от 0,01 до 2 масс. %. Также для сравнения проводились измерения для образцов, модифицированных хлоридом меди CuCl_2 , который используется при синтезе сложных металлокомплексов обеих серий.

Температурная зависимость электрических свойств образцов полимеров (толщиной 0,5-0,7 мм) регистрировалась в диапазоне температур от -160°C до 160°C на частоте 1 кГц, через каждые 2°C с помощью измерителя иммитанса E7-20. Подобные исследования позволяют определить температуру стеклования (α -перехода) полимера – по положению максимума диэлектрических потерь.

Полученные кривые температурной зависимости тангенса диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ позволяют сделать вывод о том, что у образцов нет явно выраженных пиков характеризующих сегментальную подвижность полимера в среднем диапазоне температур. Однако наблюдается характерный рост значений $\text{tg } \delta$ с увеличением концентрации модификатора. В это же время для серии с модификатором ASiP-Cu диэлектрические потери оказались выше, чем у серии с Cu-ДЭГА при сходных концентрациях.

Образцы с добавлением ASiP-Cu показывают значительно большее значение емкости, особенно с повышением концентрации данного модификатора в полимерной структуре.

Результаты температурной зависимости сопротивления показали, что образцы с Cu-ДЭГА проявляют более высокое электрическое сопротивление. При том с повышением концентрации модификаторов сопротивление падает, сохраняя преимущественный рост для Cu-ДЭГА.

Общей чертой данных образцов является низкая термическая устойчивость и пики в диапазонах низких температур. Исходя из этого, в данной работе было проведено сравнение результатов не только всей серии образцов с различными концентрациями, но также и сравнение электрических характеристик при повторных измерениях для подбора оптимальной температуры и исследования деградации свойств полимерной матрицы.

Мемристорная память на основе оксидов и нитридов кремния

Гисматулин Андрей Андреевич

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

aagismatulin@isp.nsc.ru

В настоящее время движущей силой в микроэлектронике является разработка универсальной памяти, которая сочетает в себе высокую скорость и бесконечное количество циклов перепрограммирования ОЗУ, энергонезависимость и высокую информационную емкость флэш-памяти, а также низкую стоимость жесткого диска. Одним из наиболее перспективных кандидатов на универсальное запоминающее устройство считается мемристор, основанный на обратимом переходе диэлектрической пленки из состояния с высоким сопротивлением в состояние с низким сопротивлением и обратно при подаче импульса тока. В настоящее время физика переключения резистивного элемента памяти из низкоомного состояния в высокоомное и обратно является предметом дискуссий и интенсивных исследований. Распространённой гипотезой является представление о том, что переключение резистивной памяти осуществляется за счет электродиффузии вакансий кислорода. Отсутствие ясного понимания физики механизмов транспорта заряда в мемристорах сдерживает разработку матриц памяти на их основе. Преимущество мемристоров на основе SiN_x и SiO_x перед другими диэлектриками заключается в том, что нитрид и оксид кремния совместимы с кремниевой технологией и широко используются в ней.

Изучались структуры $p^{++}\text{-Si/SiN}_x/\text{Ni}$ и $p^{++}\text{-Si/SiO}_x/\text{Ni}$. Толщина слоя SiN_x составляла 32 нм, а SiO_x – 40 нм. Нестехиометрический нитрид и оксид кремния получены с помощью плазмохимического метода. Никелевый электрод получался с помощью магнетронного распыления. Площадь Ni электрода составляла $0,5 \text{ мм}^2$ для измерения ВАХ, для определения максимально возможного количества циклов переключений мемристора был использован диаметр Ni электрода в 150 мкм.

Механизм переноса заряда мемристора на основе SiN_x и SiO_x во всех резистивных состояниях описывается током, ограниченным пространственным зарядом (ТОПЗ) [1-2].

На рис 1 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристора на основе $\text{SiO}_{1,1}$ в исходном (И), низкоомном (НО), промежуточном(П) и высокоомном (ВО) состояниях. На ВАХ во всех состояниях выделены линейные участки, характерные для омической проводимости и квадратичные участки ТОПЗ. Были проведены измерения температурных зависимостей тока для мемристоров на основе плазмохимических нестехиометрических SiO_x и SiN_x и произведено сравнение с теоретическими кривыми модели ТОПЗ. Из сравнения экспериментальных данных и ТОПЗ, определены концентрация и энергии ионизации ловушек для мемристоров на основе плазмохимических нестехиометрических SiO_x и SiN_x .

Рис 2 показывает максимальное возможное количество циклов переключений для мемристоров на основе плазмохимического нестехиометрического $\text{SiO}_{1,8}$. Для циклирование были выбраны следующие параметры: напряжение включения ($U_{\text{set}} = 5,4 \text{ В}$), напряжение выключения ($U_{\text{reset}} = -8,8 \text{ В}$), напряжение чтения ($U_{\text{read}} = 0,2 \text{ В}$), длительность импульса включения, выключения и чтения было принято за 10 мсек, задержка между импульсами 10 мсек.

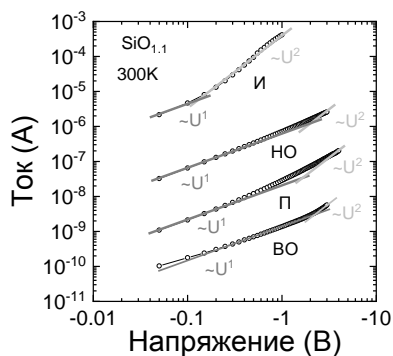


рис.1. ВАХ в разных состояниях (исходном, низкоомном, промежуточном и высокоомном) мемристора на основе $\text{SiO}_{1,1}$

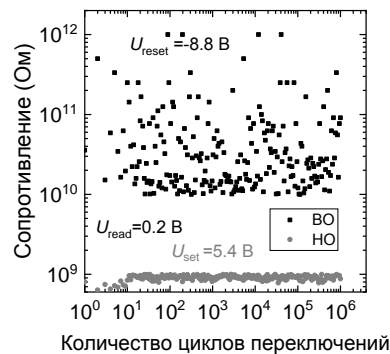


рис.2. Количество циклов переключений мемристора на основе $\text{SiO}_{1,8}$

Исследования выполнены при поддержке РФФ гранта №22-19-00369.

Список публикаций:

- [1] N. F. Mott, R. W. Gurney, *J. Phys. Chem.*, 45, 7, 1142–1142 (1941).
- [2] M. A. Lampert, P. Mark, *Current injection in solids*, Academic Press, NY, USA, (1970)

Анализ сближения ступеней при росте Si на Si (001) методом ДБОЭ в условиях сверхвысокого вакуума

Дирко Владимир Владиславович

Бурнашов Андрей Андреевич, Гнеушев Анатолий Владимирович

Национальный исследовательский Томский государственный университет
vovenmir@gmail.com

Развитие ростовых эпитаксиальных методов существенно расширило получение полупроводниковых структур с заданными параметрами. Доминирующая часть полупроводниковой промышленности создается на кремниевых подложках с кристаллографической плоскостью (001). Важным преимуществом эпитаксиального синтеза является возможность управлять ростовыми факторами и тем самым влиять на процессы протекания электрического тока, величину диэлектрической проницаемости, ширину запрещенной зоны, подвижность носителей заряда и спектр электронных состояний, благодаря чему улучшаются характеристики существующих традиционных полупроводниковых приборов и создаются новые приборы на основе квантово-размерных структур. Важным обстоятельством формирования эпитаксиальных структур является определение кинетических процессов и состояние поверхности подложки при выборе технологических параметров, таких как температура подложки и угол разориентации кристаллографической плоскости. [1–2]. Поэтому для получения качественных структур важна правильная предэпитаксиальная подготовка пластин и полное понимание состояния поверхности при заданных режимах роста. Данные условия хорошо контролируются в методе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в условиях сверхвысокого вакуума. В методе МЛЭ реализуется метод дифракции быстрых отраженных электронов (ДБОЭ), который позволяет получить информацию о морфологии поверхности «in situ» [3].

В работе проводились эксперименты по росту Si на Si (001)±0,05° со скоростью осаждения 0,09 МС/с в температурном интервале подложек от 200 до 800 °С. Предварительно пластины Si (001) проходили стандартную предэпитаксиальную подготовку и последующий высоковакуумного отжиг при температуре 1000 °С. Эпитаксиальный рост Si на Si (001) происходит с образованием чередующихся ступеней двух типов со сверхструктурами 1x2 и 2x1 [2]. Анализ поверхности методом ДБОЭ при росте Si в направлении [110] показал бимодальный характер колебаний интенсивности, зависящий от температуры подложки. Он заключается в том, что имеются два чередующихся максимума разной интенсивности, каждый из которых соответствует своему периоду колебаний.

Большой максимум интенсивности соответствует росту террасы T_B со сверхструктурной ориентацией 2x1, что соответствует расположению димерных рядов перпендикулярно краю ступеньки. Меньший максимум интенсивности соответствует росту T_A -террасы со сверхструктурной ориентацией 1x2, что соответствует расположению димерных рядов параллельно краю ступеньки [4]. При анализе поверхности в процессе роста методом ДБОЭ в направлении [100] наблюдались изменения интенсивности рефлексов от сверхструктур 1x2 и 2x1, лежащих в зоне Лауэ ~1/2, при изменении температуры роста.

Таким образом, в работе выявлена зависимость механизма роста Si на Si (001) от температуры. В интервале температур 200–500°C реализуется двумерный островковый механизм роста; при температурах роста 500 – 600°C наблюдается смешанный механизм роста; при температуре роста выше 600°C осуществляется рост по сдвигу ступеней. Полученные данные способствуют выбору параметров роста [5].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 23-62-10021.

Список публикаций:

- [1] Izhnin I. I. et al. // *Applied Nanoscience* 2020, V. 10, P. 4375–4383.
- [2] Izhnin I. I. et al. // *Opto-Electronics Review* 2018, V. 26, P. 195–200.
- [3] Hafez, M. A. et al. // *Micron* 2022, V. 159, P. 103286.
- [4] Esin M. Yu. et al. // *Semiconductors* 2018, V. 52, P. 390–393.
- [5] Dirko V.V. et al. // *Nanotechnology* 2022, V. 33, P. 115603 (1–8).

Диэлектрические характеристики твердых растворов тройной системы (1-x-y)BiFeO₃-yBaTiO₃-xPbTiO₃

Есин Егор Сергеевич

Болдырев Никита Анатольевич

Южный федеральный университет

Болдырев Никита Анатольевич, к.ф.-м.н.

esin@sfedu.ru

Одними из наиболее интенсивно изучаемых в последнее время материалов являются мультиферроики, в которых проявляется взаимодействие электрической и магнитной подсистем. Феррит висмута (BiFeO₃, BF) – один из представителей данного класса материалов и благодаря высоким температурам фазовых переходов (температура Кюри, T_C , = 1083 К, температура Нееля, T_N , = 583 К) [1] часто рассматривается как основа для новых многофункциональных сред. Однако, широкому применению BF препятствует ряд технологических факторов, таких как зависимость его фазового состава и характеристик от условий получения, высокая электропроводность и т.д. Одним из решений данной проблемы может быть создание многокомпонентных твердых растворов (ТР) на его основе, что и стало целью настоящей работы.

Объектами исследования явились керамические образцы ТР тройной системы (1-x-y)BiFeO₃-yBaTiO₃-xPbTiO₃ с концентрациями в интервале $0.05 \leq y \leq 0.15$ с шагом $\Delta y = 0.025$ при $x = 0.7$. Керамику получали методом твердофазных реакций с последующим спеканием по традиционной керамической технологии. Порошки смеси прокаливали при 1173 К в течение 10 часов, затем, после вторичного измельчения – при 1123 К тоже в течение 10 часов. Процедура спекания проводилась при 1443 К.

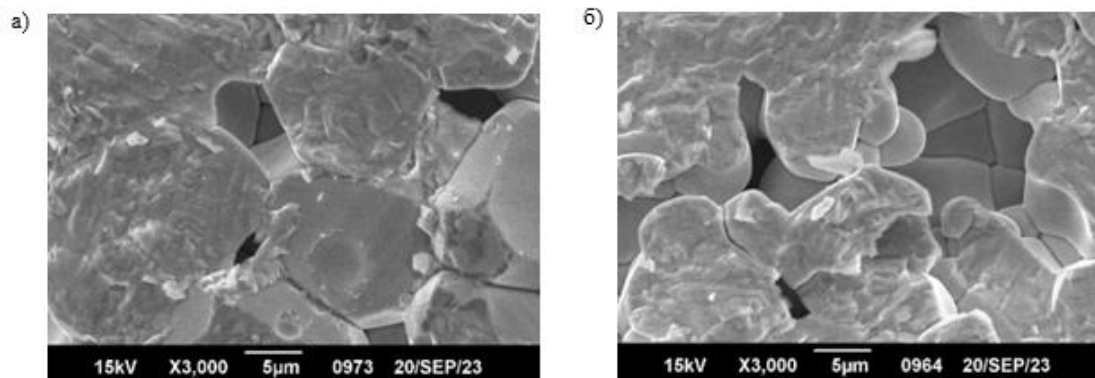


рис.1. Снимки микроструктуры для керамических образцов: а) 0.25BF-0.05BT-0.7PT и б) 0.15BF-0.15BT-0.7PT

На рис. 1 выведены микрофотографии зерновой структуры керамик: 0.25BF-0.05BT-0.7PT и 0.15BF-0.15BT-0.7PT. Во всех исследуемых керамиках формируется структура из кристаллитов, имеющих форму неправильных многогранников, а размер зерен при этом довольно сильно варьируется (5 – 15 мкм). Разрушения при скалывании керамики проходят при этом как по межзерненным границам, так и по самим зернам, что свидетельствует о близости их прочностей.

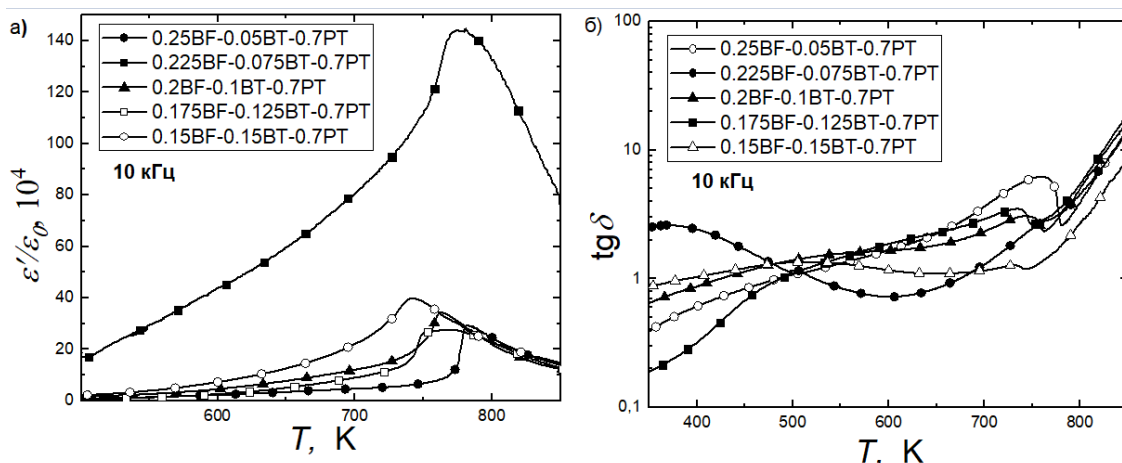


рис.2. Температурные зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) исследуемых образцов на частоте 10 кГц

На рис. 2 представлены температурные зависимости $\varepsilon'/\varepsilon_0$ и $\text{tg}\delta$. Из рисунка видно, что на зависимостях $\varepsilon'/\varepsilon_0(T)$ в температурном диапазоне (700÷800) К формируется максимум, соответствующий фазовому переходу из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу. Причем температура максимума уменьшается при увеличении концентрации титаната бария. Также значения диэлектрической проницаемости для образца 0.225BF-0.075BT-0.7PT значительно выше, чем в других образцах. Причина данной аномалии диэлектрических характеристик станет предметом дальнейших исследований.

Полученные результаты могут быть использованы в разработке новых многокомпонентных мультиферроидных материалов на основе феррита висмута с высокими электрофизическими характеристиками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/Г30110/23-11-ИФ). Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел».

Список публикаций:

[1] P. Fischer [et al.] // *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1980. Vol. 13 P.1931.

Универсальная память: ожидания, реальность и перспективы

Исламов Дамир Ревнирович

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

damir@isp.nsc.ru

В компьютерах, ноутбуках, планшетах, смартфонах и других электронных гаджетах используется множество типов памяти для различных целей. В 1950-х годах биполярные транзисторы заменили электронные лампы. Затем каждые двадцать лет внедрялась новая технология электронной памяти. В 1970-х годах были изобретены интегральные схемы на основе кремния. На смену магнитной памяти пришла полупроводниковая оперативная память, появились компактные персональные компьютеры. В 1990-х годах появилась энергонезависимая флэш-память, сохраняющая информацию при отключении питания. Флэш-память заменила дискеты, CD, DVD и Blu-ray диски, жесткие диски и теперь широко используются в компьютерах, смартфонах и других устройствах в качестве твердотельных накопителей.

В настоящее время силами учёных и инженеров микроэлектроники активно разрабатывается универсальная память [1]. Такая память сочетает в себе лучшие качества статической и динамической оперативной памяти (высокая производительность, почти неограниченное количество циклов перезаписи), жестких дисков и флэш (энергонезависимость, высокая информационная ёмкость, низкая цена). Универсальная память потребует радикальной переработки компьютерной архитектуры. Такой компьютер включится мгновенно и продолжит работать как будто его и не выключали. Универсальная память станет основой концепции «вычисления-в-памяти», что крайне востребовано системами искусственного интеллекта.

На текущий момент есть несколько технологий-претендентов на универсальную память [2]. Основными из них являются резистивная коммутационная память, память с фазовым переходом, сегнетоэлектрическая память и магниторезистивная память. Недавно была представлена весьма многообещающая технология ULTRARAM для кандидата на роль универсальной памяти [3]. Она основана на резонансном туннелировании электрона между тремя энергетическими барьерами в квантовых ямах InAs/AlSb. Процесс туннелирования (перезаписи) происходит при приложении к структуре напряжения до 2,6 В, тогда как в отсутствие напряжения барьеры препятствуют прохождению электронов и удерживают их в ячейке без электропитания, что позволяет хранить записанные данные даже при комнатной температуре. Ожидается, что ULTRARAM без деградации выдерживает более 10^7 циклов со сроком хранения данных 1000 лет. ULTRARAM получила награду Best of Show Memory Technology Awards на саммите Flash Memory Summit в августе 2023 года. Стартап Quinas Technology в 2024 году собирается создать тестовые матрицы ULTRARAM, совместимые с 20-нм КМОП процессом.

В докладе обсуждаются преимущества различных технологий энергонезависимой памяти и насколько они близки к универсальной памяти. Рассматриваются преимущества различных технологий и причины их неготовности стать универсальной памятью. Обсуждаются решения актуальных проблем[4].

Список публикаций:

[1] Åkerman J., *Science* 308, 508 (2005).

[2] Kryder M. H., Kim C. S., *IEEE Trans. Magn.* 45, 3406 (2009).

[3] Tizno O. et al., *Sci. Rep.* 9, 8950 (2019).

[4] Silva J. P. B. et al., *APL Mater.* 11, 089201 (2023).

Механизмы роста двумерных слоёв Ge на Si(100) при МЛЭ

Кукенов Олжас Игоревич

Ворсин Олег Игоревич, Дюков Илья Юрьевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Коханенко Андрей Павлович, д.ф.-м.н.

okukenov@mail.ru

Наноразмерные структуры за счёт проявления эффекта размерного квантования представляют большой интерес в области нанoeлектроники и нанофотоники. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет создавать наноструктуры с требуемыми размерами, резкими гетерограницами и минимальным количеством дефектов. При этом параметры наноструктур сильно зависят от условий роста и состояния поверхности. Поверхность Si(100) представляется в виде террас, которые неизбежно присутствуют на поверхности из-за разориентации плоскости среза с плоскостью [100] кристалла. Подложки Si(100) с малым углом разориентации ($<1^\circ$) имеют высоту ступеней в один атомный слой, а чередующиеся террасы двух типов имеют сверхструктуру 1×2 и 2×1 , с длинными димерными рядами на всю ширину или длину террасы [1]. Атомы германия, попадая на террасу стремятся достигнуть её края и встроиться в ступень. При достаточной кинетической энергии атомы встраиваются в изломы следующей ступени и, таким образом, рост происходит за счёт сдвига ступеней. Если же кинетической энергии атомам не будет хватать до достижения края ступени или на своём пути они встретят другие атомы, начнут формироваться двумерные островки, постепенно заполняющие всю поверхность террасы и образуя следующую. Рассогласование кристаллических решёток Ge и Si в 4,2% приводит к тому, что первый слой в точности повторяет кристаллическую структуру подложки кремния, а последующие слои за счёт упругих напряжений имеют сверхструктуру $2 \times N$. Такая поверхность имеет короткие димерные ряды, длина которых также зависит от температуры. Рост смачивающего слоя происходит до наступления 3D роста, при котором квантовые точки начинают своё формирование. Для создания квантовых точек заданных размеров и плотности необходимо тщательно подбирать параметры роста [2]. Помимо скорости роста, температура поверхности играет решающую роль в механизмах формирования двумерных островков германия смачивающего слоя на поверхности Si(100). Целью работы является изучение влияния температуры на механизмы роста двумерных слоёв.

Эксперименты проводились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100». Анализ состояния поверхности в процессе её формирования проводился методом дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ) в направлении [100] и [110] пучка электронов к подложке Si(100) (рис. 1). Исследования роста Ge со скоростью 0,02 МС/с проводились на подложках Si(100) с углом разориентации менее $0,5^\circ$.

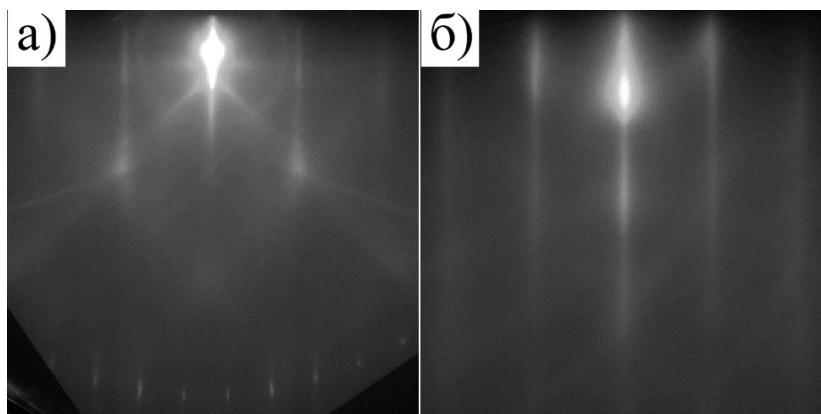


рис.1. Картины дифракции Si(100) в направлении а) [100] и б) [110]

В результате анализа картин ДБОЭ при синтезе Ge/Si(100) методом МЛЭ изучено влияние температуры на механизмы роста террас с параллельной и перпендикулярной ориентацией димерных рядов к ступени. Получены зависимости интенсивностей рефлексов 1x2 и 2x1 от температуры. Обнаружено, что при увеличении температуры происходит переход от двумерно-островкового роста к росту по механизму сдвигов ступеней.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 23-62-10021.

Список публикаций:

[1] Hervieu Yu. Yu. // *Russian Physics Journal*. 2020. V. 63. № 6. P.901–906.

[2] Арапкина Л. В., Юрьев В. А. // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180. № 3. С. 289–302.

Зонная структура Cu₂S
Латыпова Айназ Рамзиловна
 Уфимский университет науки и технологий
 Давлетшина Алиса Данисовна, к.ф.-м.н.
ainazlatypova@gmail.com

Халькогениды меди проявляют высокую ионную проводимость наряду с преобладающей электронной проводимостью, что обуславливает их широкое применение в качестве рабочих элементов различных полупроводниковых устройств (термогенераторы, катодные материалы и т.д.).

Расчет зонной структуры Cu₂S в тетрагональной фазе $I\bar{4}2d$ был выполнен с помощью программы BIOVIA Materials Studio DMol³, которая основана на применении теории функционала электронной плотности [1]. При расчете данные для кристаллической структуры были использованы из базы данных Materials Project [2].

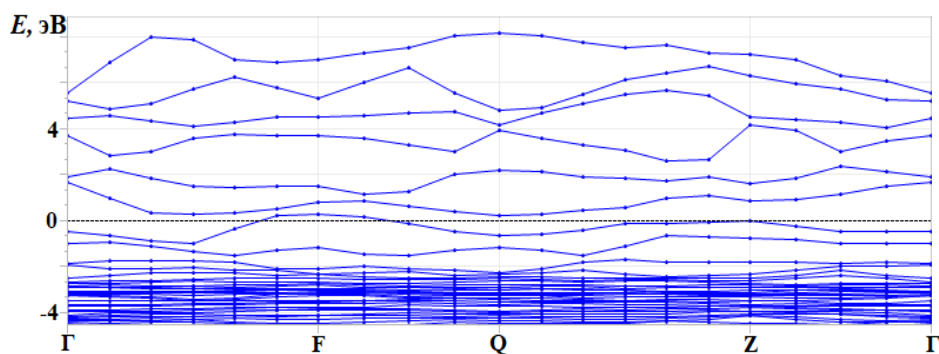


рис.1. Зонная структура Cu₂S

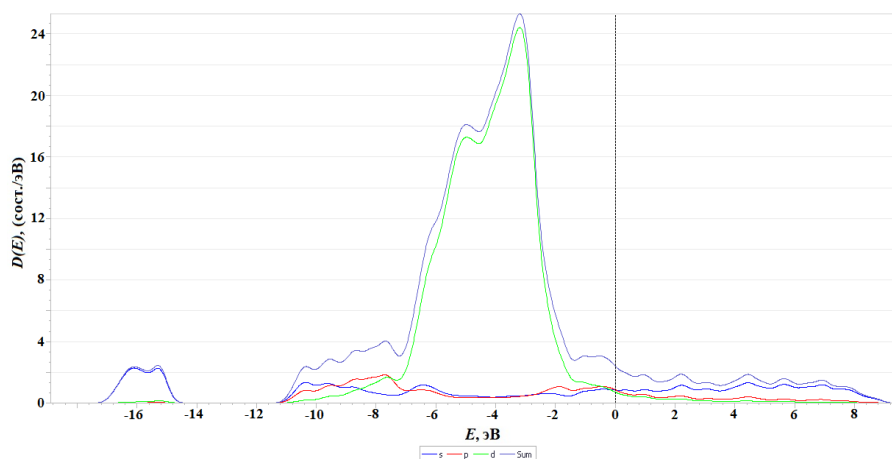


рис.2. Плотность электронных состояний Cu_2S

Анализ полученных результатов расчета зонной структуры (рис. 1) и плотности состояний (рис. 2) показывает сложный гибридный характер энергетических уровней. Уровень Ферми соответствует 0 эВ. Наибольшая плотность энергетических уровней наблюдается для интервала от -6,5 до -2 эВ, в которую преимущественный вклад оказывают d-состояния катионов меди. Около уровня Ферми с наибольшей вероятностью расположены p-электроны серы и d-электроны меди.

На основе расчета зонной структуры сульфида меди Cu_2S можно сделать вывод, что данное соединение имеет зонную структуру, характерную для металлов.

Список публикаций:

[1] <https://biovia-materials-studio-2017.updatestar.com/>

[2] <https://materialsproject.org/>

Термическая устойчивость сегментированных полиуретанов, модифицированных координационными соединениями меди

Ли Чжэн

Васильев Владислав

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Болтакова Наталья Викторовна, к.ф.-м.н.

czenli01@gmail.com

Полиуретаны (ПУ) представляют собой широкий класс соединений, позволяющих создавать материалы с улучшенными эксплуатационными свойствами, такими как прочность, твердость, упругость, стойкость к истиранию, растворителям, температурным перепадам и др. Изменяя химический состав и концентрацию исходных компонентов можно варьировать эти показатели в широком интервале и получать материалы с абсолютно противоположными свойствами. Одним из способов влияния на химическое строение и морфологию ПУ является использование в процессе их синтеза координационных соединений переходных металлов. Установлено, что такие соединения приводят к образованию стопочных структур, в которых возможен перенос электронов сквозь стопки. Причем возможно это только при использовании металлов, способных существовать в двух различных степенях окисления. Это могут быть ионы меди, железа, ванадия, молибдена. Путем подбора металла, типа металлокомплекса (МК) и полимерной группы, связывающей его в структуре ПУ, можно получать широкий по электрической проводимости ряд материалов – вплоть до полупроводниковых.

Нами исследовались две серии пленочных материалов, относящихся к сегментированным (обладающим некой пространственной структурой из жестко связанных блоков, соединённых между собой гибкими цепями) ПУ, модифицированным координационными соединениями меди. Образцы синтезированы на кафедре технологии синтетического каучука КНИТУ (КХТИ) на основе композиции политетрагидрофурана, метиленидифенилдиизоцианат и 1,4-бутандиола в соотношении 1:2:1 соответственно. В качестве носителя ионов металла (меди) в одной серии использован чистый CuCl_2 , а в другой – система CuCl_2 -диэтилгидроксиламин (Cu-ДЭГА) в отношении 1:1. Внутри серии образцы отличаются количеством введенного модификатора, содержание которого изменялось от 0,01 до 2 масс. %. Также для сравнения проводились измерения для образца, состоящего только из полиуретановой матрицы без добавления МК.

Основной проблемой металлоординированных ПУ (МКПУ) является их пониженная термостабильность. Нашей задачей было исследование влияния циклов нагревания-охлаждения (ЦНО) на электрофизические свойства исследуемых пленок. Температурная зависимость электрических свойств образцов полимеров (толщиной 0,5-0,7 мм) регистрировалась в диапазоне температур от -120 до 160°C на частоте 1 кГц. Измерения проводились с помощью измерителя иммитанса E7-20 на фоне снижения температуры образца, показания снимались через каждые 2°C . Для каждого образца проведено по два цикла измерения.

Проведенные исследования показали, что добавление МК значительно улучшает термостойкость полимерной основы. В то время как образцы с добавками модификаторов выдержали два цикла нагрева-охлаждения в диапазоне от -120 до 160°C , контрольный образец плавился при нагревании до столь высоких температур. Поэтому для него верхний предел температур был снижен до 60°C .

Анализ результатов позволяет сделать выводы о том, повторный ЦНО приводит к снижению диэлектрических потерь для контрольного образца и образца, модифицированного хлоридом меди. МКПУ со сложным модификатором Cu-ДЭГА наоборот – показали рост диэлектрических потерь при повторном ЦНО. Оба модифицированных образца показали смещение пика в сторону более высоких температур, положение пика контрольного образца не изменилось.

В целом величина диэлектрических потерь максимальная для образца, приготовленного с применением чистого CuCl_2 , что объясняется большей концентрацией ионов меди в полимере. Меньшая величина потерь в образце с Cu-ДЭГА по сравнению с контрольным может быть объяснена более сильными отличиями в морфологии внутренней структуры, обусловленные введением этого модификатора. В пользу данного предположения также говорят форма и положение пиков. Кривые для контрольного образца и с CuCl_2 имеют схожую форму, величину эффекта, положение, начало пиков приходится практически на одни и те же значения температуры ($18-22^{\circ}\text{C}$). Пик для образца с Cu-ДЭГА не такой выраженный, более пологий и смещен в область положительных значений температуры.

Исследования образцов рассматриваемых серий продолжаются и их данные требуют более тщательного анализа. Положение наблюдаемых пиков соответствует интервалам стеклования ПУ, но предстоит уточнить наличие пиков в более низкотемпературном интервале.

Влияние сегнетоэлектрических доменных стенок на анизотропию инжекции заряда в монокристаллах $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$

Мельников Семён Алексеевич

Кособоков Михаил Сергеевич, Мельников Семён Алексеевич, Турыгин Антон Павлович,

Шур Владимир Яковлевич, Аликин Денис Олегович

Институт естественных наук и математики

Уральский федеральный университет

Кособоков Михаил Сергеевич

semen.melnikov@urfu.me

Доменные стенки в сегнетоэлектриках обладают уникальными функциональными свойствами, существенно отличающимися от объемных свойств материала [1,2]. Например, они имеют на несколько порядков более высокую электропроводность и могут быть созданы или изменены в материале при помощи внешнего электрического поля. Электрические свойства доменных стенок определяются их топологией, зависят от свойств сегнетоэлектрика и материалов электродов, используемых для переключения поляризации [3-5]. В настоящее время фундаментальные исследования переходят на стадию разработки устройств на основе доменных стенок, однако до сих пор нет полного понимания свойств заряженных доменных стенок и механизмов их движения.

В данной работе экспериментально и теоретически исследовалась диффузия заряда по поверхности кристалла на неполярном Y-срезе монокристалла ниобата лития, легированного магнием ($\text{MgO}:\text{LN}$), в присутствии доменных стенок, сформированных при локальном переключении поляризации зондом сканирующего зондового микроскопа. Распределение и релаксация поверхностного потенциала вблизи доменов исследовалась при помощи метода зонда Кельвина в течение 12 часов после переключения поляризации (рис. 1). Полученные на эксперименте данные о распределении поверхностного потенциала были использованы для расчёта распределения поверхностного заряда при помощи численного решения обратной физической задачи и анализа параметров диффузии поверхностного заряда.

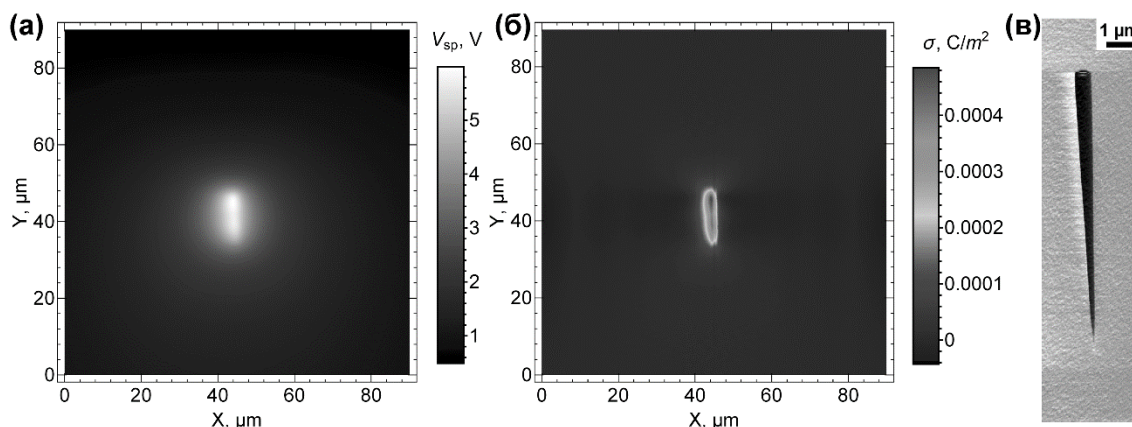


рис.1. а) Распределение поверхностного потенциала, измеренное методом зонда Кельвина по истечению 52 минут после приложения напряжения +100 В в течении 10 с, б) численно рассчитанное распределение плотности поверхностного заряда, в) типичная форма и размер домена, возникающего после приложения +100 В в течении 10 с. Неполярный срез кристалла MgO:LN.

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 23-72-01074) с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ (рег.№ 2968).

Список публикаций:

- [1] Eliseev E.A. et al. // *Phys. Rev. B*. 2011. T. 83. C. 235313.
- [2] Shur V.Y. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. T. 103. C. 102905.
- [3] Qian Y. et al. // *Phys. Rev. Appl.* 2022. T. 17. C. 044011.
- [4] Meier D. and Selbach S.M. // *Nat. Rev. Mater.* 2021. T. 7. C. 157-173.
- [5] McConville J.P. V. et al. // *Adv. Funct. Mater.* 2020. T. 30. C. 2000109.

Применение III-нитридов для создания светоизлучающих приборов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра и СВЧ-транзисторов

Осинных Игорь Васильевич

Институт физики полупроводников СО РАН

igor-osinnykh@isp.nsc.ru

Нитриды металлов III группы и их твердые растворы являются прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны, покрывающей широкий диапазон от 0.7 эВ для InN до 6.1 эВ для AlN, что соответствует диапазону длин волн 200-1770 нм. Поэтому эти материалы нашли своё воплощение на практике в создании светоизлучающих приборов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой областях спектра [1,2]. Развитие технологии A3-нитридных полупроводников увенчалось присуждением Нобелевской премии по физике 2014 года японским ученым Исаму Акасаки, Хироси Аmano, Суджи Накамура за разработку голубых оптических диодов на основе InGaN/GaN гетероструктур, позволивших внедрить яркие и энергосберегающие источники света, что подчеркивает важность данного материала. Дальнейшие перспективы нитридной оптоэлектроники связаны с продвижением в фиолетовую и зеленую области спектра, созданием высокоэффективных светодиодов и лазеров, источников одиночных фотонов, работающих при комнатной температуре.

Нитриды металлов III группы также востребованы на рынке мощной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники: в последние годы растет доля транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе AlGaIn/GaN гетероструктур с двумерным электронным газом (2DEG), которые вытесняют аналогичные приборы, созданные на основе Si и GaAs [3,4]. Большая ширина запрещенной зоны III-нитридов является основным преимуществом гетероструктур, поскольку это позволяет достигать высоких значений рабочих и пробивных напряжений в устройствах на основе III-нитридов. Помимо этого III-нитриды характеризуются спонтанной и пьезоэлектрической поляризациями, которые в свою очередь обеспечивают высокую концентрацию двумерного электронного газа (2DEG) возле гетерограницы $>10^{13} \text{ см}^{-2}$ в AlGaIn/GaN гетероструктурах. Высокая плотность носителей заряда в HEMT обеспечивает большие плотности тока, что в сочетании с высоким напряжением пробоя и высокой теплопроводностью позволяет достичь высокой плотности мощности.

В настоящем обзоре освещены результаты по применению III-нитридов в оптоэлектронике и СВЧ-электронике как на мировом, так и на российском уровне.

Список публикаций:

- [1] Jones K., Chow T., Wraback M., Shatalov M., Sitar Z., Shahedipour F., Udway K., and Tompa G. // *J. Mater. Sci.* 2015. V.50, P. 3267.
- [2] Tsao J. Y., Chowdhury S., Hollis M. A., Jena D., Johnson N. M., Jones K. A., Kaplar R. J., Rajan S., Van De Walle C. G., Bellotti E., Chua C. L., Collazo R., Coltrin M. E., Cooper J. A., Evans K. R., Graham S., Grotjohn T. A., Heller E. R., Higashiwaki M., Islam M. S., and Simmons J. A. // *Adv. Electron. Mater.* 2018. V. 4, P. 1600501.
- [3] Dalapati P., Urata S., Egawa T. // *Superlattices and Microstructures.* 2020. V. 147, P. 106709.
- [4] Chen K. J., Haberen O., Lidow A., Tsai C. lin, Ueda T., Uemoto Y., Wu Y. // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2017. V. 64. №. 3. P. 779.

Эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации экситонов в ансамбле коллоидных наноплателетов CdSe/CdS

Смирнова Ольга Олеговна

Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе

Родина Анна Валерьевна

Smirnova.olga@mail.ioffe.ru

Коллоидные полупроводниковые наноплателеты (квазидвумерные нанопластинки) — яркий пример объектов, свойства которых в значительной степени обуславливаются сильным размерным квантованием носителей заряда. Так, положение пиков в спектре фотолюминесценции (ФЛ) зависит от размеров нанокристаллов, их формы и состава. Благодаря относительной легкости синтеза и широким возможностям управления свойствами они находят применение в таких областях, как оптоэлектроника, спинтроника, фотовольтаика и биология [1]. В ансамбле наноплателетов с оболочкой CdSe/CdS впервые для таких объектов наблюдались эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации экситонов — появления линейной или циркулярной поляризации фотолюминесценции при облучении линейно или циркулярно поляризованным светом, соответственно [2].

В работе представлено теоретическое описание исследуемых эффектов в случае импульсного и постоянного возбуждения линейно или циркулярно поляризованным светом. При низкой температуре достаточно рассматривать пары нижних по энергии уровней светлого и темного экситона с проекциями полного момента ± 1 и ± 2 на ось квантования, соответственно. Внутренние анизотропные расщепления состояний светлого и темного экситона, характерные времена релаксации между состояниями и времена жизни спина можно оценить из зависимости эффектов оптического выстраивания и оптической ориентации от магнитного поля в геометрии Фарадея. Для определения диапазонов значений указанных параметров были также проанализированы зависимости асимптотической скорости распада интенсивности ФЛ от температуры и магнитного поля.

Временные зависимости эффектов оптического выстраивания и оптической ориентации на временах порядка нескольких нс определяются вкладом состояний светлого экситона в ФЛ. Вклад темного экситона должен проявляться на больших временах в эффекте оптической ориентации с ростом магнитного поля. Его вклад в эффект оптического выстраивания на больших временах может наблюдаться в случае передачи линейной поляризации между состояниями светлого и темного экситона, что может быть вызвано анизотропным механизмом взаимодействия между состояниями. Роль такого возмущения может играть статическая или динамическая деформация, отличающаяся по направлениям за счет наличия анизотропии формы наноплателетов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00300.

Список публикаций:

- [1] Efron Al. L., Brus L. E. // *ACS Nano.* 2021. V. 15(4). P. 6192.
- [2] Smirnova O. O. et al. // *Nanomaterials.* 2023. V. 13(15). P. 2402.

Влияние механического измельчения исходных реагентов на структурные свойства LiFeO_2 керамики

Соловьев Никита Николаевич

*Лысенко Елена Николаевна, Суржиков Анатолий Петрович, Власов Виталий Анатольевич,
Малышев Андрей Владимирович*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Суржиков Анатолий Петрович

nns15@tpu.ru

Литийсодержащие высокотемпературные сорбенты CO_2 вызвали значительный интерес благодаря их заметной способности улавливать CO_2 , низким температурам регенерации, относительно высокой стабильности и экономической целесообразности [1].

В этой категории внимание исследователей привлекли ферриты и оксиды металлов. Оксиды металлов обычно образуют карбонаты металлов при реакции с CO_2 , которые разлагаются при высоких температурах с образованием CO_2 в чистой форме, регенерируя исходный оксид металла. Среди многих оксидов металлов оксиды железа ведут себя как потенциальные адсорбенты CO_2 , которые можно несколько раз карбонизировать и регенерировать. Этот процесс становится намного более эффективным при разработке адсорбентов с большой площадью поверхности и микропор [2]. Микроструктура ферритов влияет на их адсорбционные свойства. Поэтому формирование оптимальной микроструктуры в процессе спекания имеет решающее значение для получения ферритов с желаемыми свойствами.

Методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии исследовано влияние предварительного механического измельчения смеси исходных реагентов $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{CO}_3$ на структурные свойства литиевой ферритовой керамики химического состава LiFeO_2 . Для этого исследовались два типа образцов: ферриты, синтезированные из порошковой смеси, предварительно смешанной в ступке (образцы №1) и механически измельченной в шаровой мельнице АГО-2С (стальные стаканы и шары) при скорости вращения стаканов 2220 об/мин и времени 60 мин (образцы №2). Синтез ферритовых образцов осуществлялся в лабораторной печи при 1050°C в течение 1 часа.

Рентгенофазовый анализ (РФА) был выполнен на дифрактометре ARL X'TRA. Для полнопрофильного анализа рентгенограмм использовалось программное обеспечение PowderCell 2.4. Идентификация фаз проводилась с использованием базы данных порошков PDF-4+ Международного центра дифракционных данных (ICDD). Микроструктуру керамических образцов исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi TM-3000.

Данные рентгенофазового анализа, показали основное содержание в синтезированных образцах фазы $\alpha\text{-LiFeO}_2$ (97.9% масс. и 93.9% масс. соответственно для образцов №1 и №2) с кубической решеткой. Анализ также показал наличие в обоих образцах небольшого количества фазы феррита лития LiFe_5O_8 (2.1% масс. и 6.1% масс. для образцов №1 и №2), которая могла образоваться в результате взаимодействия синтезированного феррита LiFeO_2 с оксидом железа. Большее количество данной фазы, наблюдаемой для образцов №2, предположительно связано с образованием во время синтеза избытков оксида железа за счет намола металлического железа во время механического измельчения и его окислением при нагреве.

Результаты СЭМ (рис. 1), показали существенное различие в плотности и пористости ферритовой керамики, полученной из порошков с различной предысторией. Более равномерная пористость по объему и высокая удельная поверхность наблюдаются для образцов, предварительно измельченных в мельнице. Полученная таким образом керамика представляет интерес для ее использования в качестве адсорбционного материала по оксидам углерода.

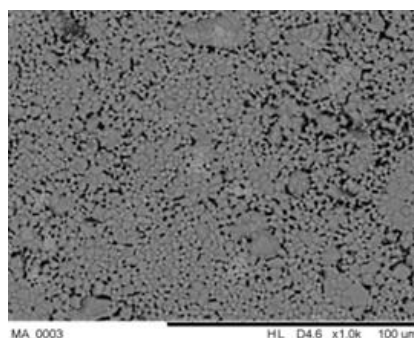
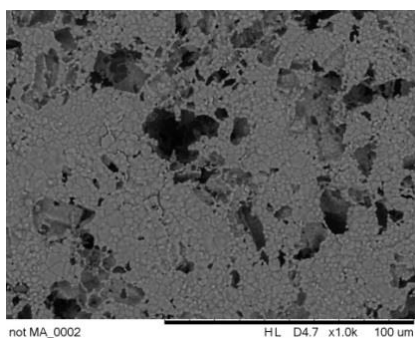


рис. 1 СЭМ изображения для ферритовых образцов №1 (а) и №2 (б)

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект FSWW-2023-0011).

Список публикаций:

[1] Zhang, X., Buthiyappan, A., Jewaratnam, J. Bifunctional materials for integrated CO₂ capture and conversion: review on adsorbent and catalyst types, recent advances, and challenges // *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, Vol. 28, 111799.

[2] Agarwal, S., Mudoi, M., Singhal, S., Khichi, A., Dhyani, A. Ferrites and Fe oxides as effective materials for the removal of CO₂ // *Ferrite Nanostructured Magnetic Materials: Technologies and Applications*, 2023, P. 831-851.

Эпитаксиально-диффузионная технология получения компенсированных слоев для лавинных S-диодов

Сотникова Анна Сергеевна

Томский государственный университет

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н.

anyutakurasova@mail.ru

Лавинный S-диод – полупроводниковый прибор, на вольт-амперной характеристике которого имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением S-типа. В настоящее время наиболее перспективными применениями S-диодов являются компактные генераторы коротких импульсов для оптических дальномеров, сверхширокополосных радаров и лидаров. В данной работе представлены результаты разработки и исследования эпитаксиально-диффузионной технологии изготовления структур для лавинных S-диодов. Целью исследования является определение оптимальной конструкции активной области прибора и определение условий ее изготовления.

Результаты технологических экспериментов показали, что диффузия в структуры первого типа позволяет, воспроизводимо изготавливать лавинные S-диоды, имеющие в составе активной области слои n- и p-типа проводимости. Высокие коэффициенты диффузии железа не позволяют контролируемо изготавливать подобные S-диоды из структур второго типа, активная область содержит один слой p-типа проводимости. Предварительные результаты исследования вольт-амперных характеристик лавинных S-диодов показали, что для обоих типов структур наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления S-типа. При этом статическое напряжение переключения составляет 40-60 В.

Измерения характеристик в схеме генерации импульсов тока (более 10 А) показали (рис.1), что S-диоды обоих типов имеют одинаковые напряжения переключения при низкой частоте 10кГц. При частоте 60кГц начинается снижение напряжения переключения, в 3 раза выше у S-диода с n- и p- типом проводимости, чем у диода с p-типом проводимости при этой частоте.

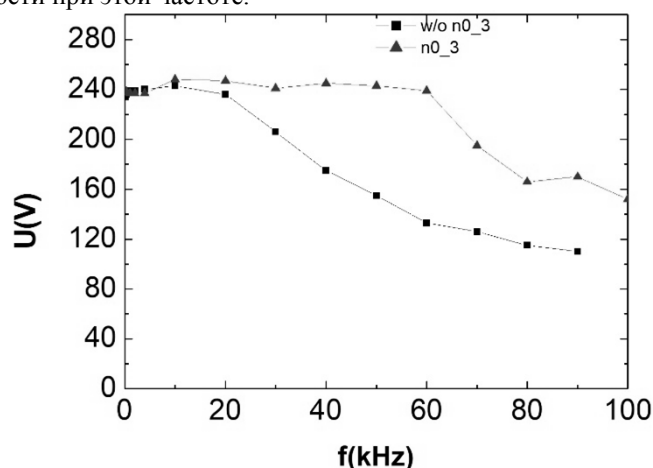


рис.1 – Частотная зависимость динамического напряжения переключения для S-диодов двух типов

Предварительные результаты исследования вольт-амперных характеристик лавинных S-диодов показали, что для обоих типов структур наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления S-типа. При этом статическое напряжение переключения составляет 40-60 В.

Механизмы протекания тока в детекторных структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом при воздействии синхротронного излучения рентгеновского диапазона спектра

Трофимов Михаил Сергеевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Голбанов Олег Петрович, д.ф.-м.н.

mihant1999@yandex.ru

В настоящее время источники синхротронного излучения постепенно вытесняют рентгеновские трубки из научно-исследовательского инструментария и занимают лидирующую позицию в развитии современной науки и техники. Благодаря своим уникальным электрофизическим свойствам, синхротронное излучение является многопрофильным инструментом для проведения фундаментальных исследований в области медицины, микробиологии, материаловедения, микро-и нанoeлектроники, а также физики быстропротекающих процессов.

Для регистрации синхротронного излучения широко применяются детекторы ионизирующих излучений на основе полупроводниковых материалов, обладающие значительно лучшими спектрометрическими характеристиками по сравнению с газовыми и сцинтилляционными счетчиками. На сегодняшний день в качестве детекторного материала хорошо зарекомендовал себя арсенид галлия, компенсированный хромом (HR-GaAs:Cr, где HR - high resistivity).

Разработанная учеными из Томска технология компенсации GaAs n-типа проводимости хромом в процессе высокотемпературной диффузии, позволяет получать радиационно-стойкие HR-GaAs:Cr (HR – high resistivity) структуры с удельным сопротивлением порядка 10^9 Ом·см и толщиной активной области до 1 мм [1 - 3]. Как показали исследования за последние 20 лет, детекторы на основе HR-GaAs:Cr являются высокоэффективными и перспективными в проведении экспериментов в области физики высоких энергий.

На данный момент в литературе отсутствуют сведения о механизмах протекания тока в детекторных HR-GaAs:Cr структурах при воздействии синхротронного излучения рентгеновского диапазона спектра, что послужило стимулом для изучения данного вопроса. В данной работе в качестве исследовательского инструмента использовалась система автоматизированного проектирования полупроводниковых устройств COMSOL, в которой проводилось моделирование транспорта неравновесных электронов в HR-GaAs:Cr структуре при воздействии единичного рентгеновского импульса с энергией квантов 20 кэВ. Длительность и интенсивность излучения соответствовали современным источникам синхротронного излучения и составляли 100 пс и 6000 Вт/см², соответственно.

Задача сводилась к решению системы уравнений, состоящей из уравнений непрерывности и Пуассона на конечно-элементной сетке во временной области. Для упрощения задачи была построена 2D – модель HR-GaAs:Cr сенсора с двумя барьерными контактами и одномерной сеткой с шагом 25 нм вдоль направления протекания тока. Толщина сенсора составляла 500 мкм. Распределение хрома и теллура (мелкая донорная примесь) задавалось однородным профилем по толщине структуры, с концентрациями 10^{17} см⁻³ и 10^{16} см⁻³, соответственно. В расчетах так же были заданы глубокие донорные E12-центры, распределенные однородным профилем с концентрацией 10^{15} см⁻³.

На *рис.1(а)* представлены расчетные профили концентрации неравновесных электронов в активной области HR-GaAs:Cr сенсора в моменты времени (2 – 20) нс после его облучения рентгеновским импульсом. Напряжение на аноде сенсора составляло 1000 В (облучение образца происходило со стороны катода). Можно заметить, что после оптической генерации происходит разделение пакета электронов на две составляющие, одна из которых (с наибольшей концентрацией) находится у катода и практически не перемещается, тогда как вторая (с меньшей концентрацией) движется в направлении анода, наводя ток во внешней цепи.

Для объяснения данного эффекта были построены профили напряженности электрического поля в разные моменты времени, рассчитанные в результате моделирования (*рис.1 (б)*). Видно, что вблизи катода ($x < 40$ мкм), сгенерированные носители заряда практически полностью экранируют внешнее электрическое поле ($E \approx 0$), вследствие чего их дрейф сводится к минимуму и движение в основном происходит только за счет диффузии. В области $x > 40$ мкм поле отлично от нуля и практически линейно возрастает до анода, вследствие чего часть электронов уносится из общего сгустка и дрейфует в направлении анода.

Важно отметить, что дрейф электронов до анода происходит в течении 20 нс, что в практически 3 раза превышает их “нормальное” время дрейфа в данном материале при напряжении 1000 В и толщине структуры 500 мкм. Из этого следует, что в HR-GaAs:Cr структуре при данных условиях численного эксперимента наблюдается плазменный эффект, который ранее не был обнаружен и количественно описан в данном материале.

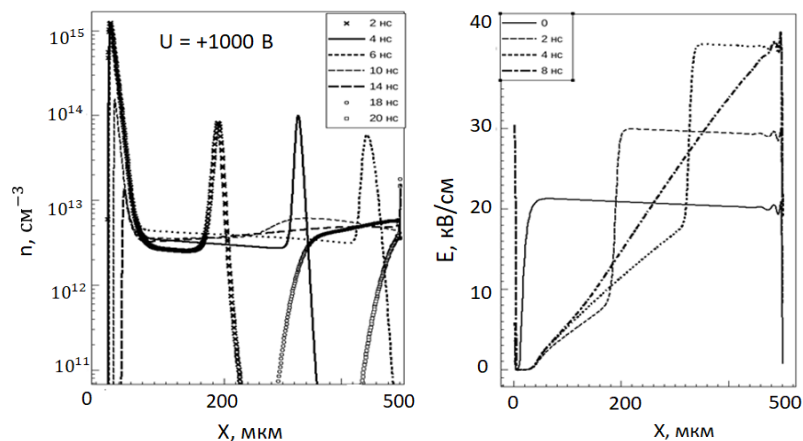


рис. 1. а) Профили распределения концентрации неравновесных электронов по толщине HR-GaAs:Cr структуры в разные моменты времени (анод справа); б) Профили распределения напряженности электрического поля по толщине HR-GaAs:Cr структуры в разные моменты времени.

Исследование выполнено при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.) в части моделирования распределения напряженности поля в HR GaAs:Cr сенсорах и Министерства науки высшего образования Российской Федерации (проект № ФCBM-2022-0018 «Исследование энергетического и пространственного разрешения EDX-детекторов на основе HR матричных сенсоров GaAs:Cr»).

Список публикаций:

- [1] A.V. Tyazhev et al., GaAs radiation imaging detectors with an active layer thickness up to 1 mm, Nucl. Instrum. Meth. A 509 (2003) 34.
 [2] D. Budnitsky et al., Chromium-compensated GaAs detector material and sensors, 2014 JINST 9 C07011.
 [3] S. Khudkov, L. Okaevich, A. Potapov and O. Tolbanov, GaAs structures with deep centres for ionizing radiation detection, Nucl. Instrum. Meth. A 395 (1997) 132.

Мемристоры на основе германосиликатных стёкол

Юшков Иван Дмитриевич

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.

ivanjushkov@gmail.com

Для развития цифровых технологий необходимо увеличение объёма памяти и повышения скорости записи и чтения данных. Современные типы памяти, такие как flash-память, уже достигли своих технологических пределов. Таким образом, создание принципиально новых типов универсальной энергонезависимой памяти является важной и актуальной задачей в современной нанoeлектронике. Так же, в последние годы большое внимание привлекают нейроморфные вычисления, предполагается, что благодаря возможности параллельной обработки сигналов они могут быть более эффективными, чем классические цифровые вычисления в архитектуре компьютеров фон Неймана [1]. При этом наиболее перспективными кандидатами на создание универсальной энергонезависимой памяти с возможностью использования в качестве электронных синапсов являются устройства на основе мемристоров [2]. Мемристор – это двухконтактная МДП или МДМ структура, обладающая двумя или более резистивными состояниями. Мемристоры обладающие более чем двумя резистивными состояниями, называются мультибитовыми мемристорами, а мемристоры обладающие непрерывным спектром резистивных состояний, называются аналоговыми.

Германосиликатные стёкла интересны тем, что они обладают несколькими типами ловушек от мелких – это включения SiO_x в SiO_2 , до глубоких, это кластеры германия в SiO_2 . Так же германосиликатные стекла могут обладать как стабильностью структуры, как SiO_x , так и низкой энтальпией связи как GeO_x [3].

Целью данной работы являлась реализация мультибитового мемристора на основе многослойных структур с содержанием германосиликатных стёкол.

Исследовалось 2 типа структур: $\text{GeO}[\text{SiO}_2]/\text{p}^+\text{-Si}$ (или n-Si); $\text{GeO}[\text{SiO}_2]/\text{Ge}/\text{SiO}_2/\text{p}^+\text{-Si}$ (или n-Si). Плёнки были получены методом высоковакуумного электронно-лучевого испарения и осаждения из газовой фазы при температуре подложки 300 К. В качестве верхнего электрода на плёнки $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$ был нанесён ИТО (оксид

олова и индия). Так же полученные образцы отжигались при температуре 500 °С в течении 30 минут в атмосфере воздуха.

Исследования структуры образцов проводились с использованием методов инфракрасной (ИК) спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеивания света (КРС) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС). Так же исследовались вольтамперные характеристики (ВАХ) до и после отжига и исследовалась выносливость мемристоров при многократных циклах перезаписи образцов до и после отжига.

В результате структурных исследований КРС и ИК методами было обнаружено, что отжиг приводит к увеличению содержания аморфного германия в образце ITO/GeO[SiO₂]/Ge/SiO₂/p⁺-Si. Это может говорить о том, что плёнка германия является преципитатом для избыточного германия, содержащегося в плёнках GeO[SiO₂]. Также после отжигов уменьшился пик от колебаний связей Ge-O-Si в спектрах ИК-поглощения. При помощи метода РФС была определена стехиометрия плёнки германосиликатного стекла - GeSi_{0,9}O_{2,8}.

В результате исследований ВАХ до и после отжига было обнаружено, что все образцы обладают мемристорным эффектом (обнаружены выключенное и включенное состояние), при этом все мемристоры не нуждаются в процессе формовки. Отжиг привёл к изменению характера переключения в обоих образцах. В исходном образце ITO/GeO[SiO₂]/p⁺-Si переключения между состояниями однократное, при этом чётко выражены 2 резистивных состояния, после отжига возникают многократные промежуточные переключения перед включением основных резистивных состояний. Так же отжиг в образце ITO/GeO[SiO₂]/p⁺-Si приводит к увеличению напряжений переключения с -2 и +1 В до -3 и +2 В [4]. В исходном образце ITO/GeO[SiO₂]/Ge/SiO₂/p⁺-Si переключения между состояниями происходит непрерывно, отжиг приводит к возникновению однократного скачка тока при переключении, при этом резистивные состояния становятся явно различимы. Так же после отжига в обоих образцах наблюдается уменьшение тока в выключенном состоянии примерно в 100 раз [4]. В результате исследования выносливости при многократных циклах перезаписи обнаружено, что разброс “окна памяти” (разность тока в выключенном и включенном состоянии) после отжигов уменьшился.

Для образца ITO/GeO[SiO₂]/Ge/SiO₂/p⁺-Si после отжига было обнаружено стабильное промежуточное состояние [4]. Данное промежуточное состояние может сохраняться на протяжении 250 циклов перезаписи [4]. При этом ток в промежуточном включенном состоянии отличается от тока в основном включенном состоянии в 100 раз. Так же в данном образце ток в выключенном промежуточном состоянии отличается от тока в выключенном основном состоянии в 4 раза. Таким образом, образец ITO/GeO[SiO₂]/Ge/SiO₂/p⁺-Si может быть использован в качестве двухбитового мемристора.

Автор выражает благодарность Володину Владимиру Алексеевичу, Камаеву Геннадии Николаевичу, Просвирину Игорю Петровичу и Michel Vergnat за помощь в исследованиях.

Список публикаций:

- [1] Chen F., Zhou Y., Zhu Y., et al. // *J. Mater. Chem. C. Mater.* 2021. V. 9, P. 8372–8394.
- [2] Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams, R. S. // *Nature.* 2008. V. 453. P. 80-83.
- [3] Chou K. I., Cheng C. H., Zheng Z. W., et al. // *IEEE Electron Device Letters.* 2013. Vol. 34. P. 505-507.
- [4] Volodin V. A., Yushkov I. D., Kamaev G. N., Vergnat. M. // *Russian Microelectronics.* 2023. V. 52. P. S30–S37.