#### 3 - Физика полупроводников и диэлектриков (включая наносистемы)

Абрамов Александр Сергеевич, 4 курс

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики, физический Локальное переключение поляризации в керамике феррита висмута легированной Sm

e-mail: alexander.abramov@urfu.ru ctp. 143

Аликин Юрий Михайлович, магистрант 1 года обучения

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики, физический **Исследование обратного переключения поляризации в неоднородном поле зонда сканирующего зондового микроскопа на неполярных поверхностях ниобата лития легированного оксидом магния** Аликин Денис Олегович, к.ф.-м.н.

e-mail: alikin.jurij@gmail.com стр. 144

Ахметшин Евгений Романович, 6 курс

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики, физический Влияние напряжения смещения на неомичность контакта образец-электрод при изучении электрических свойств материала с высокой диэлектрической проницаемостью CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>

Мельникова Нина Владимировна, к.ф.-м.н.

e-mail: evgeny.akhmetshin@yandex.ru crp. 145

Батыров Ринат Яхьяевич, 2 курс

Уфа, Башкирский государственный педагогический университет имени М. Акмуллы, физико-математический **АСМ исследования модифицированного электрода в структуре метал/полимер/электролит** 

Корнилов Виктор Михайлович, д.ф.-м.н.

e-mail: <u>batyrov r y@mail.ru</u> crp. 145

Васильев Никита Николаевич, 3 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, Институт физики полупроводников А.В. Ржанова СО РАН, Физический

Температурная эволюция спектров поглощения терагерцового излучения трехмерным топологическим изолятором на основе пленки HgTe

Савченко Максим Леонидович,

e-mail: <u>n.vasilev@g.nsu.ru</u> crp. 147

Власов Евгений Олегович, 4 курс

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, Институт естественных наук и математики

Исследование формирования доменной структуры в монокристаллах ниобата лития, легированного MgO, под действием ионного пучка

Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н.

e-mail: <u>evgeny.vlasov@urfu.ru</u> стр. 148

Гимадеева Любовь Вячеславовна, магистрант 2 года обучения

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики, физический **Регулярные доменные структуры, сформированные ионным пучком в кристаллах конгруэнтного** танталата лития

Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н.

e-mail: <u>lv.gimadeeva@urfu.ru</u> ctp. 150

Зарубин Виктор Юрьевич, 4 курс

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики, физический Микротвёрдость стеклообразных  $AgGe1+xAs1-xS_3$  и композитов на их основе с содержанием углеродных нанотрубок

Мельникова Нина Владимировна, к.ф.-м.н.

e-mail: <u>Rus29081994@ya.ru</u> стр. 151

Исламов Дамир Ревинирович, с.н.с.

Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, "лаб. 10"

Новая элементная база для нейроморфных вычислений

e-mail: damir@isp.nsc.ru

стр. 152

Леган Дмитрий Михайлович, аспирант

Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, -

Поиск оптимальной толщины слоя  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$  в трехкаскадном  $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$  солнечном элементе в зависимости от времени жизни неосновных носителей заряда в этом слое

Пчеляков Олег Петрович, д.ф.-м.н.

e-mail: dmlegan@isp.nsc.ru

стр. 154

Нураева Алла Сергеевна, аспирант 3 года обучения

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики, физический **Определение пьезокоэффициентов микротрубок** дифенилаланина локальными и интегральными

**методами** Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н.

e-mail: alla.nuraeva@urfu.ru

стр. 155

Осинных Игорь Васильевич, инженер

Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, физический

Разработка твердотельных источников излучения в зеленом спектральном диапазоне на основе сильно легированных кремнием слоев AlGaN с содержанием алюминия выше 0.5

e-mail: igor-osinnykh@isp.nsc.ru

стр. 156

Скорынина Алина Александровна, магистрант 1 года обучения

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, МИЦ 'Интеллектуальные материалы'

Метод расчета равновесной формы отрицательного кристалла

Гершанов Владимир Юрьевич, к.ф.-м.н.

e-mail: alinaskorynina@rambler.ru

стр. 158

Смирнов Александр Вячеславович, инженер

Чебоксары, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, математики, физики и информационных технологий

Электрофизические, оптические и газочувствительные свойства тонкопленочных структур на основе оксида никеля

e-mail: fizteh21@yandex.ru

стр. 159

Федоровых Вячеслав Викторович, 4 курс

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики, физический **Формирование регулярных доменных структур в монокристаллах ниобата бария-стронция под действием электронного пучка** 

Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н.

e-mail: vyacheslav.fedorovyh@mail.ru

стр. 160

Щетников Олег Павлович, аспирант

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики, физический Влияние температуры на величину термо-ЭДС в кристаллическом полупроводнике (GeSe)<sub>0,7</sub> (CuAsSe<sub>2</sub>)<sub>0,3</sub> Мельникова Нина Владимировна, к.ф.-м.н.

e-mail: futboler2008@yandex.ru ctp. 161

#### Локальное переключение поляризациив керамике феррита висмута легированной Sm Абрамов Александр Сергеевич

Аликин Денис Олегович, Турыгин Антон Павлович, Walker Julian, Rojac Tadej, Шур Владимир Яковлевич, Холкин Андрей Леонидович

Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н. Аликин Денис Олегович, к.ф.-м.н.

Аликин Денис Олегович, к.ф.-м. Alexander.abramov@urfu.ru

На сегодняшний день одной из важных экологический проблем при создании различного рода пьезоэлектрических устройств является использование свинец-содержащих материалов, таких как цирконаттитанат свинца (PZT). Несмотря на отличные электромеханические характеристики этой керамики, она обладает повышенной опасностью для окружающей среды при производстве и переработке. Одной из перспективных керамик-заменителей РZТ является бессвинцовый мультиферроик феррит висмута(BFO) [1]. Тем не менее, наличие больших токов утечки в BFO приводит к существенному снижению его электромеханических характеристик. Для снижения проводимости используют легирование различными редкоземельными элементами, такими как: Sm, La, Pr. Легирование также приводит к образованию области морфотропной фазовой границы (MPB), вблизи которой возможно сосуществование наноразмерных фаз. Исследование тонких пленок феррита висмута показали значительное увеличение пьезоэлектрических коэффициентов вблизи MPB.

В работе исследовались керамики BFO, легированных Sm с составом вблизи MPB. Синтез керамик производился как при помощи традиционного твердофазного синтеза, так и с применением дополнительной механохимической активации [2]. Проведенный анализ методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика и рентгеновской дифракции показал, что существует зависимость распределения структурных фаз от степени легирования Sm. Керамики, имеющие одинаковую степень легирования, но синтезированные различными способами имели существенные различия в фазовом распределении. Дополнительная активация керамик приводила к большему перемешиванию фаз с появлением сложных структурных состояний [3], а также к движению доменных стенок при переключении поляризации за пределы границ зерен (рис.1). Экспериментально продемонстрирована возможность локальной трансформации антиполярной фазы BFO в полярную под действием электрического поля зонда сканирующего зондового микроскопа. Созданные индуцированные фазовые состояния частично релаксировали через несколько минут после приложения поля, далее сохраняясь в течение времени более суток.

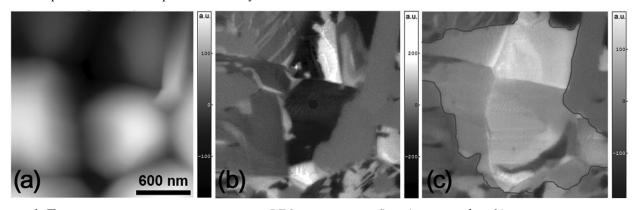


рис.1. Переключение поляризации в керамике BFO легированной Sm: a) топография, b) начальное состояние структуры, c) состояние доменной структуры после приложения импульса напряжения

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке РФФИ (Грант 16-32-60083-mol\_a\_dk).

#### Список публикаций:

- [1] J. Walker, P. Bryant, V. Kurusingal, et al., Acta Mater. 83, 149 (2015).
- [2] S. Fujino, M. Murakami, V. Anbusathaiah, et al., Appl. Phys. Lett. 92, 202904 (2008).
- [3] D.O. Alikin, A.T. Turygin, J. Walker, et al., Acta Mater. 125, 265 (2017).
- [4] E. Aksel, L.J. Jones, Sensors 10, 1935 (2010).

### Исследование обратного переключения поляризации в поле зонда сканирующего зондового микроскопа на неполярных поверхностях MgO:LN

#### Аликин Юрий Михайлович

Аликин Денис Олегович, Турыгин Антон Павлович, Шур Владимир Яковлевич
Институт естественных наук и математики УрФУ
Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н.
alikin.jurij@gmail.com

Исследование переключения поляризации имеет важное значение для улучшения характеристик устройств на базе сегнетоэлектриков: преобразователей частоты излучения и устройств хранения данных [1]. Локальное переключение на неполярной поверхности модельного одноосного кристалла ниобата лития (LN) позволяет исследовать закономерности прямого прорастания доменов, которые слабо изучены в связи с значительными экспериментальными трудностями [2].

В работе исследовался рост доменов при локальном переключении поляризации на X и Y неполярных поверхностях монокристаллов ниобата лития, легированных 5% оксида магния (MgO:LN). Визуализация доменов осуществлялась при помощи силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика. Для локального переключения к проводящему зонду сканирующего зондового микроскопа прикладывались импульсы электрического поля с различной амплитудой, длительностью и временем спада. Было использовано два режима переключения, при которых после окончания импульса (1) зонд оставался в контакте с поверхностью и (2) зонд отрывался от поверхности.

В случае, когда зонд оставался в контакте, наблюдалось значительное самопроизвольное обратное переключение, приводившее к уменьшению размеров домена вплоть до полного исчезновения и к росту домена с направлением поляризации, противоположным приложенному полю. При отрыве зонда от поверхности обратного переключения не наблюдалось.

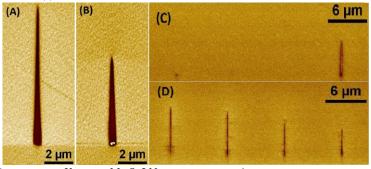


рис.1. PFM изображения доменов на Y-срезе MgO:LN, записанных одиночными импульсами (напряжение 90 B, длительность 500 мс): (а) зонд отрывается от поверхности, (b) зонд в контакте. Серия доменов, записанных одиночными импульсами - зонд в контакте: время спада импульса (c) 10 мс, (d) 100 мс.

Полученные результаты были отнесены за счет особенностей экранирования деполяризующего поля. В случае, когда зонд оставался в контакте, ток во внешней цепи обеспечивал эффективное экранирование деполяризующего поля при обратном переключении поляризации. При отрыве зонда от поверхности (разрыв цепи), остаточное деполяризующее поле препятствовало обратному переключению (уменьшению размеров домена). При медленном уменьшении поля деполяризующее поле при обратном переключении компенсировалось за счёт объемного экранирования.

Полученные результаты представляют значительный интерес для развития методов микро- и нанодоменной инженерии [3].

В работе использовано оборудование Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии»  $\mathsf{Ур}\Phi\mathsf{У}$ .

#### Список публикаций:

[1] J.F. Scott, Science 315, 954 (2007).

[2] A.V. Ievlev, D.O. Alikin, A.P. Turygin, A.I. Lobov, S.V. Kalinin, V.Ya. Shur, ACS Nano 9, 769 (2015).

[3] V.Ya. Shur, A.R. Akhmatkhanov, I.S. Baturin, Appl. Phys. Rev., 2, 040604 (2015).

# Влияние напряжения смещения на неомичность контакта образец-электрод при изучении электрических свойств материала с высокой диэлектрической проницаемостью $CaCu_3Ti_4O_{12}$

#### Ахметиин Евгений Романович

Мельникова Нина Владимировна, Мирзорахимов Абдулло Алимахмадович, Кадырова Надежда Ивановна, Зайнулин Юрий Галиулович Уральский федеральный университет Мельникова Нина Владимировна к.ф.-м.н. evgeny.akhmetshin@yandex.ru

Среди материалов, не относящихся к сегнетоэлектрикам, и обладающих аномально большими значениями диэлектрической проницаемости ( $10^4$  -  $10^5$ ), можно выделить кристаллизующийся в кубической сингонии материал CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (CCTO). Материал интересен тем, что диэлектрическая проницаемость (ДП) практически не меняется в широком диапазоне частот электрического поля в широком интервале температур [1]. На настоящий момент предложено несколько моделей, объясняющих причины проявления гигантской диэлектрической проницаемости [2, 3], но единая теория ее возникновения пока не разработана. Цель представляемой работы - исследовать влияние напряжения смещения ( $U_{\rm dc}$ ) на эффекты на границе электродобразец и на значения видимой диэлектрической проницаемости CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>.

Метод синтеза материала подробно описан в работе [4]. Рентгеноструктурные и рентгенофазовые исследования (Shimadzu XDR-7000) показали, что материал кристаллизуется в кубической симметрии и имеет перовскитоподобную структуру. Электрические характеристики исследовали методом импедансной спектроскопии в интервале частот от 1 Гц до 10 МГц (Solatron 1260A) при температурах 453 К-493 К. Образец помещали в ячейкеу ProboStat, температура поддерживалась с помощью контроллера, максимальное напряжение смещения составило 3,5 В.

При увеличении напряжения смещения радиусы полуокружностей (годографов импеданса) уменьшаются. Но при этом линейную зависимость обратного квадрата емкости  $\frac{1}{C^2}$  от напряжения смещения, характерную для барьера Мотта-Шоттки, не наблюдали. Емкость ячейки с образцом оценивали по формуле, где  $C = \frac{\text{Im}\,Y_{\text{max}}}{\omega}$ , где  $\text{Im}\,Y_{\text{max}}$  и  $\omega$  — значение мнимой части адмиттанса и круговая частота, соответствующие вершине полуокружности-годографа импеданса. Анализ полученных результатов подтверждает, что гигантские значения диэлектрической проницаемости наблюдаются не благодаря электродным эффектам, а главную роль в ее возникновении играют процессы объемно-зарядовой поляризации, процессы поляризации Максвелла-Вагнера и механизм прыжкового перемещения поляронов.

Работа выполнена при поддержке грантов (РФФИ №16-02-00857 и №15-03-00868).

#### Список публикаций:

- [1] Subramanian M.A., Li D., Duan N. et al. J. Solid State Chem. 151, 737 (2000).
- [2] Singh L., Rai U.S. et al. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 60 15-62 (2014).
- [3] Мирзорахимов А.А., Мельникова Н.В. и д.р. Физическое обр. в вузах. 22, 101С, (2016).
- [4] Kadyrova N.I., Zaynulin Yu.G. et al. Russian Journal of Inorganic Chemistry. 53, 1542 (2008).

# АСМ исследования модифицированного электрода в структуре метал/полимер/электролит *Батыров Ринат Яхьяевич*

Башкирский государственный педагогический университет имени М. Акмуллы Корнилов Виктор Михайлович, д.ф.-м.н. <u>batyrov\_r\_y@mail.ru</u>

Длительное время в электроаналитической химии существовало убеждение, что успех исследования и анализа связан со степенью чистоты поверхности электродов. Исследователи стремились достигнуть идеальной инертной поверхности, воспроизводимой от измерения к измерению. В 1978 г. появилась работа Миллера и Ван де Марка [1] по применению электрода, покрытого электропроводящей полимерной пленкой. Возникшее в связи с этим понятие "химически модифицированный электрод" (ХМЭ) можно трактовать более широко. Например, к ХМЭ можно отнести любой электрод, на молекулярную структуру поверхности которого было

оказано соответствующее воздействие (химическое или физическое), изменяющее характер электрохимического, в частности амперометрического отклика.

При модификации химическое соединение или полимерную пленку наносят специальным образом на поверхность электрода. При этом меняется его способность к вольтамперометрическому отклику в результате появления новых электрофизических свойств. Модифицирование электрода, может быть достигнуто при воздействии на его токопроводящую поверхность различными способами. Чаще всего на поверхность электрода наносят специальным образом химическое соединение - модификатор, который придает электроду новые электрофизические свойства. Наиболее простым способом модифицирования является адсорбция. Ее преимущество состоит в том, что она не требует специальных условий для нанесения; достаточно провести очистку поверхности электрода перед нанесением модификатора [2].

В качестве модификатора был выбран наиболее освоенный полимер из класса полиариленфталидов — полидифениленфталид (ПДФ). Для выполнения исследований изготавливались полимерные пленки на полированных подложках из нержавеющей стали размером 5х10 мм. На очищенные подложки наносился раствор полимера в циклогексаноне методом центрифугирования. Толщина пленок задавалась концентрацией полимера в растворителе. В эксперименте использовались растворы полимера концентрацией от 0,1 до 10 вес. %, что позволило получать полимерные пленки толщиной от 5 нм до 1,3 мкм [3]. Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяет исследовать изменения морфологии как исходной поверхности электрода, так и покрытой полимерным слоем.

Измерения проводились с помощью измерительной ячейки следующим образом: с помощью электропроводящего клея образец с полимером прикреплялся к плоскости измерительной ячейки, далее на образец наносилась капля электролита (в нашем случае 1% NaCl), после чего к капле подводилась игла зонда (Pt) и далее подавали нужное напряжение на источнике питания в диапазоне от 0,1 V до 15 V.

Морфология поверхности электрода без полимера на катоде после воздействия электролита представлена на *(рис.1)*. Видны ямочки травления на исходно полированной поверхности. Глубина ямки составляет 1,2 мкм; ширина ямки порядка 2 мкм.

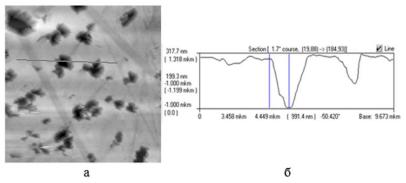


рис.1. ACM — изображение поверхности подложки размерами: [15 мкм ×15 мкм × 1.7 нм]. а - морфология поверхности, б — изображение профиля поверхности вдоль измерительной линии.

На *(рис.2)* представлена морфология поверхности электрода без полимера на аноде после воздействия электролита. Высота выбранного участка 1,1 мкм; ширина участка порядка 2,5 мкм.

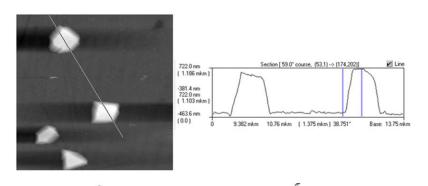


рис.2. ACM – изображение поверхности подложки размерами: [15 мкм ×15 мкм × 1.6 мкм]. а - морфология поверхности, б – изображение профиля поверхности вдоль измерительной линии.

Морфология поверхности электрода, порытого слоем полимера после воздействия электролита (рис.3). Виден край деформированной полимерной пленки, высота образовавшейся ступеньки составляет 62.34 нм, что соответствует толщине пленки.

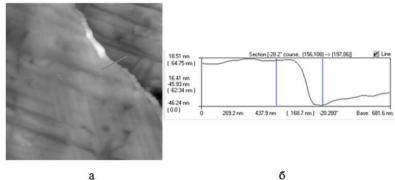


рис.3. ACM – изображение поверхности подложки с нанесенным полимером, размерами: [3.4 мкм ×3.7 мкм × 231.5 нм]. а - морфология поверхности, б – изображение профиля поверхности вдоль измерительной линии.

Таким образом, показано, что чистый электрод подвергается необратимым изменениям в структуре метал/электролит, независимо анодом он является или катодом, т.е., наблюдается эрозия в виде локального травления. При изучении электрода, модифицированного полимером (ПДФ), травления электрода не наблюдается, пленка полимера сохраняется, хотя и набухает в воде.

#### Список публикаций:

- [1] Miller L. L., Van De Mark M. R. // J. Amer. Chem. Soc. 1978. V. 100. N 1. P. 639.
- [2] Будников Г. К., Лабуда Я. Химически модифицированные электроды как амперометрические сенсоры в электроанолизаторе // Успехи химии. 1992. Т. 62. С. 1491.
- [3] Карамов Д. Д., Корнилов В. М., Лачинов А. Н., Крайкин В. А., Ионова И. А. Атомно-силовая микроскопия субмикронных пленок электроактивного полимера. // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. В. 7 С. 124.

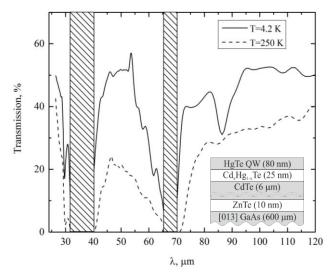
### Взаимодействие терагерцового излучения с трехмерным топологическим изолятором на основе HgTe квантовой ямы

#### Васильев Никита Николаевич

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН Новосибирский государственный университет Савченко Максим Леонидович n.vasilev@g.nsu.ru

В последнее время среди исследователей физики твердого тела широкую популярность получил новый класс материалов, называемых топологическими изоляторами. Одной из отличительных и наиболее интригующих особенностей трехмерных топологических изоляторов является наличие поляризованных по спину поверхностных проводящих состояний [1]. Квантовые ямы на основе пленок HgTe толщиной более 70 нм являются представителями трехмерных топологических изоляторов высокого качества. В недавних экспериментах был продемонстрирован транспортный и терагерцовый отклик поверхностных состояний в этой системе [2]. Недостатком тонких пленок HgTe является сильная связь поверхностных носителей, поэтому отклик топологических состояний на верхней и нижней поверхности оказывается перемешан, хотя актуальной задачей является выделение отклика от отдельной поверхности.

Одним из способов решения этой задачи является увеличение толщины пленки HgTe, что приводит к пространственному разделению топологических состояний на верхней и нижней поверхностях. В данной работе изучались спектры пропускания и отражения пленок HgTe толщиной 80 и 200 нм в диапазоне температур 4-300 К. Толстые пленки такого типа являются слабоизученным объектом с неизвестным электронным спектром. В тоже время различные оптические методы позволяют получить информацию как о законе дисперсии более толстой системы, так и о спиновой поляризации носителей тока в обеих структурах. Нами было обнаружено, что в спектрах пропускания обоих типов образцов наблюдается чувствительная к изменению температуры особенность в виде провала при длине волны около 85 мкм (рис. 1). Работа посвящена определению причин возникновения данного провала в спектрах пропускания пленок HgTe и его температурной эволюции.



! Спектры пропускания структуры с 80 нм пленкой HgTe, измеренные при температурах T = 4.2 (сплошная линия) и 250 K (пунктирная линия).

Измерение спектров отражения при тех же температурах показали отсутствие какой-либо особенности в окрестности 85 мкм. Спектры пропускания структур без слоя HgTe также показали отсутствие особенностей, следовательно, природа зависящего от температуры провала в спектрах пропускания связана с поглощением в пленках HgTe. На данный момент в литературе отсутствует информация о причинах наблюдаемого провала, однако известно, что ширина запрещенной зоны 80 нм пленки HgTe составляет 15 мэВ [2], что совпадает с положением особенности и может свидетельствовать о ее связи с межзонным поглощением.

#### Список публикаций:

[1] Ando Y. // J. Phys. Soc. Japan. 2013. V. 82, P. 10200.

[2] Dantscher K.-M., Kozlov D. A., Olbrich P., Zoth C., Faltermeier P., Lindner M., Budkin G. V., Tarasenko S. A., Bel'kov V. V., Kvon Z. D., Mikhailov N. N, Dvoretsky S. A., Weiss D., Jenichen B., Ganichev S. D. // Phys. Rev. 2015. V. 92, P. 165314.

## Исследование формирования доменной структуры в монокристаллах ниобата лития, легированного MgO, под действием ионного пучка

Власов Евгений Олегович

Чезганов Дмитрий Сергеевич, Гимадеева Любовь Вячеславовна, Ахматханов Андрей Ришатович, Чувакова Мария Артемовна, Аликин Денис Олегович, Михайловский Владимир Юрьевич, Петров Юрий Владимирович, Шур Владимир Яковлевич

Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета
Чезганов Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н.
Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н.
evgeny.vlasov@urfu.ru

Нами проведено комплексное (экспериментальное и с помощью компьютерного моделирования) исследование формирования доменной структуры при облучении сфокусированным ионным пучком полярной поверхности легированного MgO ниобата лития (MgOLN). Результаты объяснены с точки зрения кинетического подхода [1]. Полученные знания позволили сформировать регулярные доменные структуры (РДС) высокого качества с малыми периодами [2].

Исследуемые образцы представляли собой пластины MgOLN толщиной 1 мм, отполированные до оптического качества. Полярные  $Z^+$ -поверхности: (1) покрытая 500 нм слоем резиста и (2) свободная, облучались ионами  $Ga^+$  с энергией 30 кэВ при помощи рабочей станции Auriga CrossBeam (Carl Zeiss). Контроль положения пучка и времени экспонирования осуществлялся системой ионно-лучевой литографии Elphy Multibeam (Raith). На противоположную  $Z^-$  полярную поверхность наносился 100 нм Cu электрод, который заземлялся во время облучения. Статическая доменная структура после селективного химического травления была визуализирована при помощи оптической микроскопии (OM), сканирующей микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО), конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния и сканирующей электронной микроскопии (C9M). Измерение пространственного распределения поверхностного потенциала производилось с использованием микроскопии зонда Кельвина (M3K).

Изучено формирование изолированных доменов, созданных в результате точечного облучения. Измерены зависимости размеров доменов от дозы облучения. Линейный характер дозовых зависимостей, аналогичен полевой зависимости при локальном переключении с помощью проводящего зонда сканирующего зондового микроскопа. Стоит отметить, что размер доменов в образцах со слоем резиста был существенно больше, что обусловлено лучшей локализацией заряда. Зависимость размера доменов от периода между облучаемыми точками показала, что размер доменов изменяется не более чем на 5% в диапазоне периодов от 3 до 10 мкм. Выявлено изменение формы изолированных доменов с ростом дозы. В образцах со свободной поверхностью в исследуемом диапазоне доз форма доменов изменялась от неправильной шестиугольной к правильной, а со слоем резиста — от треугольной к шестиугольной. Экспериментальный факт был отнесен за счет локального удаления поверхностного слоя под действием ионного пучка и изменения условий экранирования деполяризующего поля. Полученное существенное скругление граней многоугольников было отнесено за счет сочетания детерминированного и стохастического зародышеобразования во время движения доменных стенок. МЗК измерения поверхностного потенциала показали, что время релаксации заряда существенно больше времени переключения [2]. Высказано предположение, что переключение поляризации происходит в постоянном поле, создаваемом зарядом, локализованным в слое резиста.

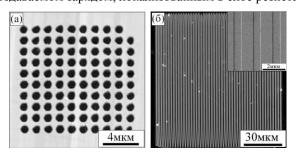


рис.1. Изображения регулярных доменных структур: (a) двумерной матрицы доменов с периодом 1 мкм, полученное методом СМПО (б) одномерной решетки полосовых доменов с периодом 2 мкм, полученное методами ОМ и СЭМ (на вставке).

Полученные данные позволили оптимизировать создание регулярных одномерных и двумерных доменных структур с требуемой однородностью и скважностью. Полученные знания позволили создать РДС с малыми периодами: (1) двумерную матрицу изолированных доменов радиусом около 300 нм, периодом 1 мкм, и глубиной 400 мкм (рис. 1a) и (2) одномерную регулярную структуру сквозных полосовых доменов с периодом 2 мкм в пластине толщиной 1 мм (рис. 1б).

Компьютерное моделирование распределения электрического поля при облучении поверхности ниобата лития ионным пучком позволило качественно объяснить полученные экспериментальные результаты. Показано, что величина полярной компоненты напряженности электрического поля в зоне инжекции ионов сравнима с пороговыми полями в ниобате лития. Это означает, что облучение образца ионным пучком приводит к накоплению заряда, поле которого способно инициировать процесс переключения поляризации.

Полученные экспериментальные и расчетные данные позволили сформулировать физическую модель переключения поляризации под действием сфокусированного ионного пучка. Переключение происходит в постоянном поле, создаваемом источником, локализованным в слое резиста, а время экспонирования заданной дозы пренебрежимо мало по сравнению со временем релаксации заряда. Формирование пространственного заряда происходит за счет захвата на ловушки первичных ионов, генерации дырок и вторичной электронной эмиссии, а переключение поляризации — за счет образования доменов в приповерхностном слое, а затем прямого прорастания и уширения доменов.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ и Междисциплинарного Ресурсного Центра по направлению "Нанотехнологии" СПбГУ, при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-8441.2016.2) и Правительства Российской федерации (постановление 211, контракт 02.A03.21.0006).

#### Список публикаций:

[1] V.Ya. Shur. J. Mater. Sci. 41, 199 (2006).

[2] D.S. Chezganov, V.Ya. Shur, et al. Appl. Phys. Lett. 110, 052708 (2017).

#### Регулярные доменные структуры, сформированные ионным пучком в кристаллах конгруэнтного танталата лития

Гимадеева Любовь Вячеславовна

Чезганов Дмитрий Сергеевич, Власов Евгений Олегович, Зеленовский Павел Сергеевич, Чувакова Мария Артёмовна, Шур Владимир Яковлевич

Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н. Чезганов Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н.

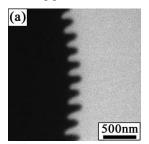
lv.gimadeeva@urfu.ru

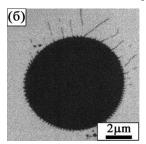
Танталат лития (LT) обладает большими значениями нелинейно-оптических, электрооптических и пироэлектрических коэффициентов. Кристаллы LT с регулярной доменной структурой (РДС) используют для преобразования частоты лазерного излучения и создания различных фотонных устройств.

Исследуемые образцы представляли собой пластины конгруэнтного LT толщиной 0.5 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси. Облучение ионами Ga<sup>+</sup> полярной поверхности, покрытой диэлектрическим слоем резиста, производилось с использованием рабочей станции Auriga Crossbeam (Carl Zeiss), оборудованной системой ионно-лучевой литографии. На противоположную поверхность образца был нанесен сплошной металлический электрод. Применялись различные способы облучения поверхности ионным лучом: точечное облучение – матрицы  $10 \times 10$ ; а также серии регулярных полос с различным периодом. Облучение производилось с использованием различных доз заряда. Сформированная доменная структура была визуализирована с помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО) и конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния (КМКР).

При точечном облучении на  $Z^+$ -полярной поверхности во всем диапазоне доз формировались домены круглой формы. В диапазоне от 10 до 100 пКл радиус доменов увеличивался пропорционально дозе. Подобная зависимость типична для локального переключения проводящим зондом. При дозах более 30 пКл возникала нестабильность формы доменных стенок: увеличение шероховатости, формирование волнистой доменной стенки (рис. 1a) и появление нанодоменных «стримеров», ориентированных в Y-кристаллографическом направлении (рис. 1б). При дозах более 30 пКл домены прорастали сквозь пластину. При этом на Z-полярной поверхности формировались домены в форме правильного треугольника со скругленным углами. При помощи КМКР изучено изменение формы домена с глубиной от круглой к треугольной. Обнаруженный эффект отнесен за счет экспериментально выявленной в кристаллах семейства LT зависимости формы доменов от эффективности экранирования деполяризующего поля [1, 2].

Оптимизацией процесса переключения была создана РДС с периодом 2 мкм на площади  $100 \times 100$  мкм $^2$ (рис. 1в). Использовано дискретное облучение с периодом точек 500 нм, выстроенных в ряд вдоль формируемой доменной полосы, при дозе 0,5 Кл, токе пучка 1 нА и диаметре пучка 400 нм. Исследование доменной структуры в объеме кристалла методом КМКР показало, что глубина полосовых доменов до распада на цепи изолированных доменов достигает 70 мкм. Создание РДС с рекордно малыми периодами позволит создавать новые высокоэффективные нелинейно-оптические и интегрально-оптические устройства.





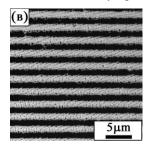


рис. 1 - СМПО изображения доменов, созданных облучением ионным пучком Z+ полярной поверхности: (а) волнистая доменная стенка; (б) изолированный домен (доза 60 пКл); (в) РДС с периодом 2 мкм (доза 0,5 пКл).

В работе использовано оборудование Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» УрФУ. Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-8441.2016.2.

#### Список публикаций:

- [1] V.Ya., Shur ed. J.W.P. Schmelzer. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 178-214 (2005).
- [2] V.Ya. Shur et al., Appl. Phys. Lett., 103., 24, 242903 (2013).
- [3] D.S. Chezganov, V.Ya. Shur, et al. Appl. Phys. Lett. 110, 082903 (2017).

### Микротвёрдость стеклообразных $AgGe_{1+x}As_{1-x}S_3$ и композитов на их основе с содержанием углеродных нанотрубок

#### Зарубин Виктор Юрьевич

Мельникова Нина Владимировна

Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета Мельникова Нина Владимировна, к.ф.-м.н.

Rus29081994@ya.ru

В последнее время большой практический интерес вызывают стеклообразные многокомпонентные халькогенидные материалы. Халькогенидные стекла обладают электронной и смешанной (электронно-ионной) проводимостью, прозрачностью в ИК-области спектра и другими интересными свойствами [1-3]. Отсутствие примесной проводимости, высокая фоточувствительность, химическая и радиационная стойкость обусловили широкое использование этих материалов в различных областях техники. Изучение атомной структуры стеклообразных халькогенидов и выявление связи структуры со свойствами позволит выбрать оптимальные условия их практического применения.

Один из методов исследования атомной структуры - изучение микротвёрдости. Цель данной работы - выявление влияния состава на микротвердость однородных стеклообразных ионных проводников  $AgGe_{1+x}As_{1-x}S_3$  и композитов на их основе с содержанием углеродных нанотрубок (УНТ или CNT — carbon nanotubes). Материалы являются практически стопроцентными ионными проводниками с проводимостью по ионам Ag+.

Микротвердость образцов определена с помощью микротвердомера HVS-1000A с автоматической турелью и цифровым дисплеем. Принцип его работы идентичен принципу работы твердомера по методу Виккерса. Измерения производятся путем вдавливания алмазного индентора пирамидальной формы с определенным усилием в поверхность образца для измерений. После определенного времени под нагрузкой индентор поднимается, величина твердости рассчитывается по длине диагонали отпечатка и отражается на ЖК дисплее.

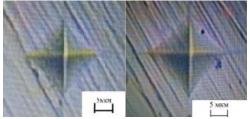


рис.1. Отпечатки индентора на поверхности образиов  $AgGe_{L_5}As_{0.5}(S+CNT)_3$  (слева) и  $AgGe_{L_5}As_{0.5}S_3$  (справа)

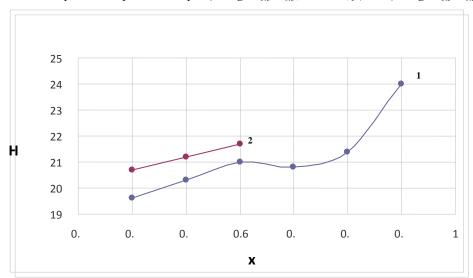


рис. 2. Зависимости микротвердости от содержания Ge и  $As \ Bar Ag Ge_{l+x} As_{l-x} S_3(1)$  и  $Ag Ge_{l+x} As_{l-x} (S + CNT)_3(2)$ 

Исследования показали, что с ростом концентрации германия, в материалах как с УНТ, так и без УНТ, микротвёрдость увеличивается. Это согласуется с наличием высокоэнергетических связей Ge-S и свидетельствует об увеличении числа этих связей [4,5] с возрастанием х. В материалах, содержащих нанотрубки, по сравнению с материалами без нанотрубок, также наблюдается рост микротвёрдости.

#### Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №. 16-02-00857

#### Список публикаций:

- [1] Борисова З.У. Халькогенидные полупроводниковые стекла. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1983. С. 344.
- [2] Борисова З.У. Химия стеклообразных полупроводников. Изд-во Ленинградского ун-та. 1972. С. 248.
- [3] Tanaka K., Shimakawa K. Amorph. Chalc. Semicond. And Related Mat. NY:Springer. 2011.
- [4] Мельникова Н. В., Курочка К. В., Хейфец О. Л., Кадырова Н. И., Волкова Я. Ю. Атомная структура и ионная проводимость стеклообразных материалов на основе сульфида серебра // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ. 2015. Т.79. № 6. С. 790–794.
- [5] Kurochka K.V., Melnikova N.V. Investigation of electrical properties of glassy AgGe1+xAs1-x(S+CNT)3 (x=0.4;0.5;0.6) at temperature range from 10 to 300 K // Solid State Ionics. 2017. V.300. P. 53-59.

#### Новая элементная база для нейроморфных вычислений Исламов Дамир Ревинирович

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН Новосибирский национальный исследовательский государственный университет damir@isp.nsc.ru

Улучшения литографии в технологическом процессе производства полупроводниковых микросхем позволяли увеличивать число транзисторов экспоненциальными темпами. Впервые это заметил директор по НИОКР в «Fairchild Semiconductor» Гордон Мур. В 1965 году (через шесть лет после изобретения интегральной схемы) он написал внутренний доклад «Будущее интегральной электроники» с графиком, соединяющим 5 точек и связывающим число компонентов интегральных схем и их минимальную цену для периода 1959-1964 гг., и предсказанием развития на следующие 10 лет. Последнее основывалось на том, что число компонентов на кристалле будет продолжать удваиваться каждый год. 19 апреля 1965 г. отредактированная версия появилась в виде статьи в журнале «Electronics». [1]. Это наблюдение получило название — закон Мура.

В 1975 году на ежегодной встрече Международной Организации Инженеров-Электронщиков (IEEE) Гордон Мур, будучи президентом и исполнительным директором «Intel» указал, что увеличение диаметра пластин, успехи в технологических процессах и «поумнение схем и устройств» позволило продолжиться прогнозу. Впрочем, Мур скорректировал свою закономерность до удвоения степени интеграции каждые 2 года. Предсказание оказалось самоподдерживающимся: теперь Гордон Мур уже не наносит на свой график очередные достижения, зато многочисленные фирмы (и, конечно, сама «Intel») до сих пор стараются идти в ногу с прогрессией. В 1995 году, ещё раз публично проверяя своё предсказание, Мур сделал вывод, что оно «не скоро остановится».

Рисунок 1 иллюстрирует экспоненциальный рост производительности выпускаемых логических микросхем, нормированных на их стоимость. Если прост продолжится, после 2020 года производительность микропроцессоров должна достичь уровня мозга живого объекта, а к 2045 году превысить ментальную производительность всего человечества на Земле. В связи с этим наиболее перспективным путём развития электроники видится внедрение новых физических принципов, например, нейроморфные вычисления.

Самый производительный суперкомпьютер в мире (по состоянию на июнь 2016 года) со скоростью вычислений 93 петафлопс Sunway TaihuLight в Национальном суперкомпьютерном центре города Уси (провинция Цзянсу, КНР) для работы требует 15,371 МВт электроэнергии (вместе с системой охлаждения —  $28~{\rm MBT}$ ). Для сравнения человеческий мозг содержит  $10^{11}$  нейронов ( $\sim 10^6$  нейронов/см²) и  $10^{15}$  синапсов ( $\sim 10^{10}$  синапсов/см²), в пике активности потребляет 20 Вт. Характерная частота работы мозга  $10~{\rm Гц}$ . За счёт параллелизма взаимодействия синапсов мозг совершает  $10^{15} \times 10~{\rm Гц} = 10^{16}$  операций в секунду. Энергетический выигрыш при работе биологического объекта — мозга — по сравнению с самым мощным суперкомпьютером  $\sim 10^5$ . Мозг может за доли секунды быстро выполнять задачи, на которые компьютеру потребуются дни или даже месяцы. Среди таких задач можно отметить распознавание графических или звуковых образов.

Секрет такой разницы заключается в архитектуре. Современные вычислительные машины построены по архитектуре фон Неймана, принципа совместного хранения команд и данных в памяти вычислительной системы. Сами же вычисления проводятся в вычислительном модуле. Данные и инструкции из памяти передаются в вычислитель через шину, быстродействие которой и ограничивает вычислительные мощности компьютера. Архитектура мозга драматически отличается от архитектуры фон Неймана. Память и вычислитель здесь являются одними и теми же объектами — синапсами, местом соединения нейронов, составляющих мозг. Для передачи данных и инструкций в синаптический вычислитель какая-либо шина не нужна [2].

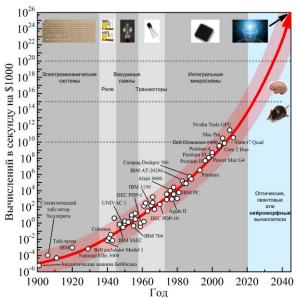


рис.1. Количество выполняемых логических операций в секунду, нормированное на стоимость микросхем, выпущенных в разные годы. Красная линия иллюстрирует закон Мура. Чёрная стрелка указывает на предел роста, соответствующий вычислительным мощностям мозга условного коллективного разума всего человечества

Несмотря на то, что проблемой искусственного интеллекта учёные занимаются достаточно давно, большинство современные реализации искусственных нейронов основаны на программном коде, выполняющимся на обычных фон Неймановских машинах. Для наибольшей эффективности нейронной сети естественно предположить, что реализовывать её надо не на программном уровне, а в виде специальной вычислительной машины. В 2011 году подразделением «IBM Research» был представлен научно-технической аудитории первый кристалл с одним нейросинаптическое ядром, 256 программируемых нейронов и 262144 программируемых синапсов. 7 августа 2014 года «IBM Research» продемонстрировали новый когнитивный процессор «TrueNorth» с архитектурой «SyNAPSE». Нейропроцессор содержал 4096 нейросинаптических ядер (в двухмерном массиве размером 64×64), включавших один миллион программируемых нейронов и 256 миллионов программируемых синапсов. Энергопотребление составило 63 мВт. Каждый нейрон каждого из ядер может посылать сигнал к каждому нейрону из другого ядра. После этого сигнал по программируемым синапсам разбегается и по прочим нейронам в этом ядре, в соответствии с установленными или установившимися там весовыми коэффициентами. В качестве примера работы когнитивного нейропроцессора сотрудники «IBM» продемонстрировали классификацию объектов (людей, велосипедистов, машины, грузовики и автобусы) в видеопотоке 400×240 пикселей с частотой 30 кадров в секунду [3]. Процессор TrueNorth был изготовлен по планарной полупроводниковой технологии с проектной нормой 28 нм на заводе «Samsung», содержит 5,4 миллиарда транзисторов, задействованных в эмуляции нейронов и синапсов, а также в хранении данных в ячейках СОЗУ памяти суммарным объёмом 400 Мбит. Синапсы имеют веса, выражающиеся как 9битные целые, и 4-битную временную задержку. В роли нейрона выступает стандартный сумматор на основе операционного усилителя с отрицательной обратной связью. Несмотря на все достоинства TrueNorth, он обладает одним ключевым недостатком - энергозависимостью. При выключении питания все инструкции и данные теряются безвозвратно.

Чтобы нейрокомпьютер избавить от энергозависимости, блоки для обработки и хранения данных необходимо проектировать на новой элементной базе. И такие элементы были найдены. Сначала теоретически, а после и экспериментально. На текущий момент синаптическая пластичность была продемонстрирована ячейками на основе мемристора (пассивного элемента, изменяющего свой сопротивление в зависимости от значения и направления протекающего тока) и сегнетоэлектрического элемента памяти. Принцип действия обоих этих приборов основан на перестройке атомной структуры. В мемристоре при переключении из высокоомного состояния ив низкоомное (и обратно) дефекты формируются в определённой пространственной конфигурации. В сегнетоэлектрическом элементе атомы перестраиваются с формированием сонаправленных электрических диполей.

Настоящая работа посвящена проблемам и задачам, стоящими перед разработчиками перспективной элементной базы для нейроморфных вычислений.

#### Список публикаций:

[1] G. E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics, 38(8), 114–117 (1965).

[2] M. Versace, B. Chandler. The brain of a new machine // IEEE Spectrum, 47(12), 30-37 (2010).

[3] P. A. Merolla, J. V. Arthur, R. Alvarez-Icaza, et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface // Science, 345(6197), 668–673 (2014).

# Поиск оптимальной толщины слоя $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ в трехкаскадном $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$ солнечном элементе в зависимости от величины времени жизни неосновных носителей заряда в этом слое

#### Леган Дмитрий Михайлович

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск Пчеляков Олег Петрович, д.ф.-м.н. dmlegan@isp.nsc.ru

Традиционно, в большинстве спутников и других космических аппаратов используются трехкаскадные  $Ge(подложка)/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$  солнечные элементы (СЭ) [1]. Однако у этих СЭ существует недостаток, который заключается в несогласованности ширины запрещенной зоны нижнего Ge каскада по отношению к остальным каскадам. Ширина запрещенной зоны германия в этом трехкаскадном СЭ является слишком маленькой, что приводит к тому, что ток неравновесных носителей заряда, вызванный поглощением фотонов в этом каскаде, получается слишком большим, а выходное напряжение слишком маленьким. Однако, общий ток многокаскадного СЭ определяется наименьшим током неравновесных носителей заряда в каком-либо из каскадов, поэтому в итоге получается, что общий ток СЭ не отличается от токов в GaAs и  $In_{0.5}Ga_{0.5}P$  каскадах, однако вклад в общее выходное напряжение от Ge каскада получается достаточно маленьким.

Хорошей альтернативой упомянутым выше СЭ являются трехкаскадные  $In_0 {}_3Ga_0 {}_7As/GaAs/In_0 {}_5Ga_0 {}_5P$ солнечные элементы [2]. За счет оптимально подобранной ширины запрещенной зоны нижнего In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As каскада ( $E_{\sigma} \approx 1 \text{ 9B}$ ), удается добиться согласованности по току неравновесных носителей заряда во всех трех каскадах и получить оптимальный вклад в выходное напряжение СЭ от нижнего  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$  каскада. Однако, создание эффективного трехкаскадного СЭ, основанного на этих трех соединениях является не простой задачей, поскольку постоянная решетки соединения  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$  отличается от постоянных решеток соединений GaAs и  $In_{0.5}Ga_{0.5}P$  (у последних двух постоянные решетки совпадают). Естественно, что из-за несогласованности постоянных решеток, при росте данного трехкаскадного СЭ, в структуре возникают прорастающие дислокации, которые в конечном итоге оказывают пагубное влияние на эффективность СЭ. Поэтому, во-первых, при росте данного трехкаскадного СЭ используется не прямой рост, а инвертированный. То есть, сначала выращивается каскад  $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ , затем каскад GaAs и только потом каскад  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ , чтобы дислокации возникали только в каскаде In03Ga07As, а не во всех трех каскадах, как это было бы при прямом росте. А во-вторых, необходимо подобрать оптимальную толщину поглощающего слоя  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ , ведь известно, что дислокации являются активными центрами рекомбинации, а значит, большая концентрация дислокаций приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ). Целью данной работы являлось вычисление оптимальной толщины поглощающего слоя  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$  в зависимости от величины времени жизни ННЗ. Увеличение толщины слоя In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As с одной стороны увеличивает долю поглощенных фотонов, а с другой приводит к увеличению рекомбинации неравновесных носителей заряда. Поэтому поиск оптимальной толщины In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As каскада является важной задачей для достижения максимального КПД данного многокаскадного СЭ. Конкретные значения времени жизни задавались в расчетную модель через рекомбинацию Шокли-Рида-Холла. Также в расчете учитывалась излучательная и Оже рекомбинация.

Моделирование работы In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As каскада трехкаскадного СЭ проводилось с помощью программного пакета Sentaurus TCAD. Для увеличения числа поглощенных фотонов, использовалось тройное просветляющее покрытие  $TiO_2/Si_3N_4/SiO_2$  с толщинами  $d(TiO_2)=25$  нм,  $d(Si_3N_4)=30$  нм,  $d(SiO_2)=75$  нм [3]. За основу спектра падающего излучения был взят стандартный солнечный спектр АМ 1.5d за вычетом тех фотонов, чьи энергии превышали значения энергии  $E_g(GaAs)=1.42$  эВ, то есть, предполагалось, что все фотоны с энергией, большей E<sub>e</sub>(GaAs)=1.42 эВ, поглощались в двух верхних каскадах: GaAs и In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>P. В данной модели нижний контакт был сделан золотым, а сверху был смоделирован прозрачный контакт, который не препятствовал прохождению света вглубь полупроводника. Время жизни ННЗ в слое In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As варьировалось в пределах от 0.1 до 160 нс. Для уменьшения рекомбинационных потерь, сверху и снизу каскада In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As были сделаны слои из широкозонного материала  $In_{0.25}Ga_{0.75}P$ , в которых не происходило поглощение света. Толщина этих слоев пирокозонного материала  $I_{0.25}Ga_{0.75}$ г, в которых то происледние петирования основной поглощающей области (базовой области)  $I_{0.3}Ga_{0.7}$ Аѕ каскада составляла  $5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . На рис. 1 представлена искомая зависимость оптимальной толщины поглощающего слоя  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$  от величины времени жизни неосновных носителей заряда в этом слое. Смысл данной работы заключается в том, что имея полученную зависимость и проделав опыт по экспериментальному измерению времени жизни ННЗ в In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As каскаде, можно говорить о том, какая толщина поглощающего слоя более всего подойдет для данного уровня технологии, иначе говоря, для данной плотности прорастающих дислокаций, появляющихся в данном каскаде. Как видно из графика полученной зависимости, оптимальная толщина поглощающего слоя In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As сильно отличается в зависимости от величины времени жизни ННЗ. При изменении времени жизни от 0.1 до 160 нс, оптимальная толщина изменяется в пределах от 0.9 до 7.5 мкм. Так же, судя по графику, можно сделать вывод, что при

величине времени жизни HH3 40 нс и более значение оптимальной толщины достигает величины 7.5 мкм и далее не увеличивается. Вероятно это связано с тем, что на этой толщине практически все фотоны успевают поглотиться в слое  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ: № 16-12-00023.

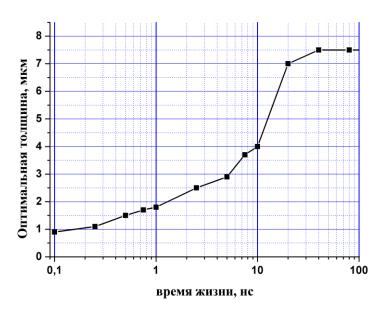


рис. 1. Зависимость оптимальной толщины поглощающего слоя  $In_{0.3}Ga_{0.7}As$  трехкаскадного  $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$  солнечного элемента от величины времени жизни ННЗ в этом слое

#### Список публикаций:

[1] King R. et al. Advanced Multijunction Solar Cells for Space // Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, Vol. 2, pp. 1757-1762

[2] J. F. Geisz et al., High-efficiency GaInP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cells grown inverted with a metamorphic bottom junction, Applied Physics Letters 91, 023502 (2007)

[3] В. М. Андреев и др., патент №2436191

### Определение пьезокоэффициентов микротрубок дифенилаланина локальными и интегральными методами

#### Нураева Алла Сергеевна

Васильев Семен, Светлана Копыл, Зеленовский Павел, Тофаил Саид, Холкин Андрей Леонидович Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н.

alla.nuraeva@urfu.ru

Самоорганизующиеся органические материалы могут быть использованы для изготовления функциональных нано- и микроустройств с заданными свойствами. Пептиды являются важными молекулярными «строительными блоками», благодаря их гибкости и большому разнообразию формирующихся структур. Такие структуры имеют широкий диапазон применений от остовов для клеточной инженерии [1] до светодиодов [2] и биосенсоров [3]. Широко исследуемый короткий дипептид дифенилаланин (ФФ) самоорганизуется в микротрубки, обладающие выраженными пьезоэлектрическими свойствами [4], что в сочетании с высокой жесткостью [5] открывает возможности использования в качестве «зеленых» электромеханических систем, а также различных биоприложений.

Сравнительно малые размеры микротрубок ФФ (МКТ-ФФ) позволяют использовать для исследования их пьезоэлектрических свойств только локальные методы [4]. При этом экспериментальные данные могут быть искажены электростатическим взаимодействием зонда с поверхностью образца, что затрудняет количественную оценку пьезоэлектрических коэффициентов [6]. Таким образом, возникла необходимость верификации локальных методов исследования пьезоэлектрических свойств.

В данной работе пьезоэлектрические свойства МКТ-ФФ исследовались одновременно интегральными и локальными методами. МКТ-ФФ с рекордными размерами: длиной до 5 мм и диаметром до 700 мкм были выращены в водно-спиртовом растворе в процессе длительной инкубации (рис.1). Такие размеры были достаточны для манипулирования и измерения интегральными методами.

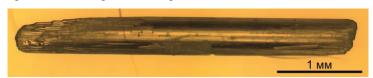


рис.1. Оптическое изображение исследованной микротрубки ФФ, выращенной в водно-спиртовом растворе.

В качестве локального метода использовалась силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика с помощью зондового микроскопа. Регистрировались локальные вертикальные и латеральные колебания поверхности МКТ-ФФ под действием приложенного напряжения между проводящим зондом (верхний электрод) и подложкой с проводящим напылением (нижний электрод). Были определены пьезоэлектрические коэффициенты  $d_{15}^{local} = 60$  пК/Н и  $d_{33}^{local} = 9$  пК/Н.

В качестве интегрального метода исследования диэлектрических свойств использовалась импедансная спектроскопия с помощью 4-зондового метода. По измеренным частотным зависимостям импеданса пучков МКТ-ФФ были определены два набора частот резонанс-антирезонанс. Зная значения плотности и диэлектрической проницаемости МКТ-ФФ, а также, учитывая длину образца, были вычислены  $d_{15}^{\text{int}} = 50$  пК/H и  $d_{33}^{\text{int}} = 6$  пК/H.

Значения пьезокоэффициентов МКТ- $\Phi\Phi$ , полученные локальным и интегральным методами хорошо согласуются между собой, что позволяет использовать быстрые локальные методы для исследования пьезоэлектрических свойств микро- и нанотрубок  $\Phi\Phi$ .

#### Список публикаций:

- [1] Y.L. Yang, U. Khoe, X.M. Wang, A. Horii, H. Yokoi, S.G. Zhang, Nano Today, 4, 193 (2009).
- [2] C. A.E. Hauser and S. Zhang, Nature, 468, 516 (2010).
- [3] V.L. Sedman, X. Chen, S. Allen, C.J. Roberts, V.V. Korolkov, and S.J.B. Tendler, J. Microsc., 249, pp. 165–172 (2013).
- [4] S. Vasilev, P. Zelenovskiy, D. Vasileva, A. Nuraeva, V.Ya. Shur, and A.L. Kholkin, J. Phys. Chem. Solids, 93, 68, (2016).
- [5] P. Zelenovskiy, I. Kornev, S. Vasilev, and A. Kholkin, Phys. Chem. Chem. Phys., 18, 29681 (2016).
- [6] N. Balke, P. Maksymovych, S. Jesse, I.I. Kravchenko, Q. Li, and S.V. Kalinin, ACS Nano, 8, 10229 (2014).

## Разработка твердотельных источников излучения в зеленом спектральном диапазоне на основе сильно легированных слоев AlGaN:Si с содержанием алюминия выше 0.5

Осинных Игорь Васильевич

Малин Тимур Валерьевич, Журавлев Константин Сергеевич 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. Это делает их перспективными для изготовления светоизлучающих приборов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Развитие технологии A<sub>3</sub>-нитридных полупроводников увенчалось присуждением Нобелевской премии по физике 2014 года японским ученым Исаму Акасаки, Хироси Амано, 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.

Зеленый диапазон спектра до сих пор освоен лишь частично. Создание мощных эффективных и долгоживущих твердотельных источников лазерного излучения зеленого диапазона спектра, в частности, инжекционных полупроводниковых лазеров и светодиодов спектрального диапазона 520–550 нм, соответствующего максимальной чувствительности человеческого глаза, является важной задачей. В настоящее время зеленые лазерные диоды прямого излучения не распространены. Создание полупроводниковых лазеров и светодиодов зеленого диапазона длин волн, однако, наталкивается на серьёзные затруднения фундаментального

характера. Для увеличения длины волны излучения лазерных InGaN/GaN-диодов нужно увеличивать содержание индия, что весьма проблематично из-за принципиальных трудностей формирования малодефектных квантовых ям. Первой проблемой являются сильные встроенные электрические поля, возникающие из-за пьезоэлектрического эффекта [1,2]. Эти поля приводят к уменьшению перекрытия волновых функций электронов и дырок в квантовых ямах, что снижает эффективность излучения. Вторая проблема состоит в том, что из-за низкой растворимости InN в GaN происходит разделение фаз *InGaN*, приводящее к деградации приборов [3,4]. На данный момент коммерчески доступны только зеленые лазерные диоды фирм Оsram и Nichia на длинах волн 510-520 нм и КПД порядка 5-6 %.

Одним из альтернативных путей является использование оптических переходов через уровни дефектов в широкозонных материалах. Недавно была обнаружена широкополосная сверхлюминесценция в диапазоне 460 -720 нм при возбуждении низкоэнергетическими электронными пучками, обусловленная оптическими переходами через уровни дефектов в слоях Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, сильно легированных кремнием [5]. Эти структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии из аммиака на (0001) ориентированных сапфировых подложках в лаборатории 37 ИФП СО РАН. Также было получено сверхизлучение при оптических переходах через уровни дефектов - признаками сверхизлучения были нелинейный рост интенсивности излучения при росте мощности выше порогового значения и модовая структура при воздействии возбуждающего пучка полоской. Это делает перспективным создание источников света от сине-зеленого до ближнего инфракрасного диапазона спектра (практически весь видимый диапазон) и лазеров с уникальными параметрами - с перестраиваемой длиной волны в широком диапазоне длин волн и частот (до 500ТГц). Более того, широкий спектр излучения дефектов в  $Al_xGa_{1-x}N$  дает основание для получения сверхбыстрых лазеров с длительностью световых импульсов порядка фемтосекунд. Были получены результаты по исследованию энергетической структуры центров, ответственных за сверхлюминесценцию в слоях Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N с широкими диапазонами параметров: содержанием алюминия  $x_{Al} = 0 - 1$  и концентрацией атомов кремния  $5 \times 10^{19} - 2.0 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup> [6, 7]. При х>0.46 появлялась интенсивная широкополосная ФЛ, энергетическое положение которой менялось от 600 нм при  $x_{Al} = 0.5$  до 405 нм при  $x_{Al} = 1$ , покрывая весь видимый диапазон. Эта люминесценция обусловлена суперпозицией донорно-акцепторного и зона-акцепторного механизмов рекомбинации. Глубина залегания акцепторной зоны составила 1.87 эВ от потолка валентной зоны для AlN и уменьшалась с уменьшением х<sub>аl</sub>. Донором является кремний на месте катиона ( $Si_{III}$ ). Предположительно акцептором является трехкратно заряженная катионная вакансия ( $V_{III}^{3-}$ ), которая также отвечает за компенсацию донора  $Si_{III}$ .

Исследование спектральных и поляризационных характеристик излучения слоёв  $Al_{0.5}Ga_{0.5}N$  и  $Al_{0.74}Ga_{0.26}N$  продемонстрировало расщепление широкой полосы излучения на равноудаленные друг относительно друга компоненты с приблизительно одинаковым интервалом волновых чисел, что характерно для сверхсветимости в планарном волноводе при распространении света под углом, близким к углу полного внутреннего отражения [8]. Совокупность полученных результатов свидетельствует о стимулированном характере излучения. Одним из важных моментов в создании новых лазерных источников являются исследования поведения усиления активной среды. Измеренные коэффициенты усиления на  $\lambda \approx 528$  нм для  $Al_{0.5}Ga_{0.5}N$  равны  $g \approx 70$  см $^{-1}$ , а для  $Al_{0.74}Ga_{0.26}N$  на  $\lambda \approx 468$  нм  $g \approx 20$  см $^{-1}$ , полученные значения демонстрируют перспективность их использования для создания широкополосных излучателей видимого спектрального диапазона. Дальнейшими направлениями работы в этом направлении являются уменьшение оптических утечек в AlGaN гетероструктурах, создание на их основе предложенных оптических схем для практической реализации широкополосной генерации в исследуемых средах.

Исследования проводились при поддержке РФФИ (гранты № 16-32-00773 и 17-52-04112)

#### Список публикаций:

- [1] S. F. Chichibu, A. C. Abare, M. P. Mack, M. S. Minsky, T. Deguchi, D. Cohen, P. Kozodoy, S. B. Fleischer, S. Keller, J. S. Speck, J. E. Bowers, E. Hu, U. K. Mishra, L. A. Coldren, S. P. DenBaars, K. Wada, T. Sota, S. Nakamura, Mater. Sci. Eng. B. 59, 298 (1999).
- [2] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakmura, Appl. Phys. Lett. 70, 981 (1997).
- [3] F. A. Ponce, S. Srinivasan, A. Bell, L. Geng, R. Liu, M. Stevens, J. Cai, H. Omiya, H. Marui, and S. Tanaka, Phys. Status Solidi B 240, 273 (2003).
- [4] I. H. Ho and G. B. Stringfellow, Appl. Phys. Lett. 69, 2701 (1996).
- [5] P. A. Bokhan, P. P. Gugin, Dm. E. Zakrevsky, K. S. Zhuravlev, T. V. Malin, I. V. Osinnykh, V. I. Solomonov, and A. V. Spirina, J. Appl. Phys. 116, 113103 (2014).
- [6] I.V. Osinnykh, T. V. Malin, V. F. Plyusnin, A. S. Suranov, A. M. Gilinski and K. S. Zhuravlev. Jpn. J. Appl. Phys., 55, 05FG09 (2016).
- [7] I.V. Osinnykh, T. V. Malin, V. F. Plyusnin, K. S. Zhuravlev. B. Ya. Ber and D. Yu. Kazantsev, J. Phys.: Conf. Ser. (in press).
- [8] П. А. Бохан, К.С. Журавлёв, Дм. Э. Закревский, Т. В. Малин, И. В. Осинных, Н. В. Фатеев, Письма в ЖТФ 43, 5 (2017).

### Метод расчета равновесной формы отрицательного кристалла

#### Скорынина Алина Александровна

Южный федеральный университет Гершанов Владимир Юрьевич alinaskorynina@rambler.ru

Предложен метод расчета равновесной формы отрицательного кристалла, под которым понимается жидкое включение в кристалле, форма и симметрия которого совпадают с симметрией самого кристалла [1].

В основе метода лежит расчет зависимости свободной межфазной энергии отрицательного кристалла от размеров плоских участков (фасет) с меньшей, зависящей от анизотропии, удельной межфазной энергией. Увеличение размеров фасет при постоянном объеме полости приводит к увеличению радиуса сферической части отрицательного кристалла и, следовательно, к увеличению площади межфазной границы и ее свободной энергии. Минимумы полученных зависимостей соответствуют размерам фасет для равновесной формы отрицательного кристалла.

Расчеты проводились с помощью программного пакета Maple. Достижение равновесной формы фиксировалось по достижению минимума энергии, что видно из зависимости межфазной свободной энергии от размера плоского участка (рис.1a).

На рисунке 1а показана зависимость изменения свободной межфазной энергии исходного сферического отрицательного кристалла радиусом 15 мкм от размеров и числа фасет при удельной межфазной энергии плоских граней равной 0.95 от удельной энергии сферической межфазной границы. Энергия системы нормирована на энергию исходной сферической межфазной границы.

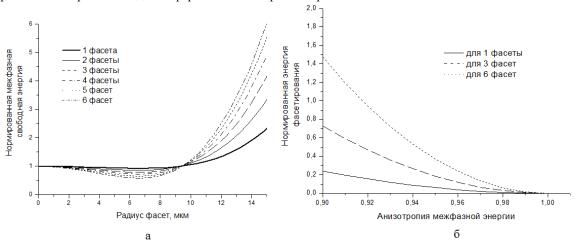


рис.1. (a) Зависимость межфазной свободной энергии от радиуса плоских граней, (б) зависимость энергии фасетирования от анизотропии свободной межфазной энергии

Переход от нефасетированной межфазной границы к равновесной форме отрицательного кристалла происходит за счет массопереноса в системе кристалл – раствор. Движущей силой массопереноса при фасетировании поверхности отрицательного кристалла является разность между свободной межфазной энергией исходной несингулярной поверхности отрицательного кристалла и свободной межфазной энергией поверхности равновесного кристалла, радиус несингулярной части которого будет больше радиуса исходной сферы. Зависимость понижения свободной межфазной энергии отрицательного кристалла при фасетировании в зависимости от степени анизотропии показана на рис 1б в процентных долях от общей свободной энергии для сферической нефасетированной поверхности.

#### Список публикаций:

[1] Шаскольская М.П. // Кристаллография: Учеб. Пособие для ВУЗов / Издание второе перераб.и дополн. М: Высшая школа. 1984.С. 376

### Электрофизические, оптические и газочувствительные свойства тонкопленочных структур на основе оксида никеля

Смирнов Александр Вячеславович<sup>1</sup>
Кочергин Артем Владимирович<sup>1</sup>, Анисимов Никита Евгеньевич<sup>1</sup>
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова
В.Д. Кочаков

fizteh21@yandex.ru

Полупроводниковые оксиды металлов на протяжении последних десятилетий интенсивно исследуются для газовой сенсорики благодаря относительной простоте их получения и химической стабильности в реактивных средах. Целью настоящей работы является исследование электрофизических и оптических свойств тонкопленочных полупроводниковых структур на основе оксида никеля (NiO); анализ практического применения таких материалов в качестве активных элементов газовых сенсоров при комнатной температуре.

Особенностью заявляемого в проекте материала является то обстоятельство, что NiO представляет собой полупроводник р-типа с шириной запрещенной зоны 3.5-4.0 эВ [1]. При взаимодействии активного слоя с газовыми компонентами, обладающими донорными свойствами, его сопротивление резко возрастает. Напротив, сорбция акцепторных газов, к которым относится, например, озон [2] ведет к снижению сопротивления чувствительного слоя, что позволяет уверенно регистрировать отклик сенсора. Газовые сенсоры на основе оксида никеля используются также при регистрации паров этанола, угарного газа, углеводородов [3].

Методика изготовления образцов.

На стеклянные подложки методом терморезистивного испарения в вакууме на вакуумной установке «УВР-3М» при давлении порядка  $10^{-2}$  Па осаждались пленки никеля, затем в печи МИМП-ВМ образцы отжигались в атмосфере воздуха при различных температурах и времени обжига.

Экспериментальные результаты.

Для измерения спектров пропускания применялся УФ-вид. спектрофотометр Lambda 25 (рис.1).

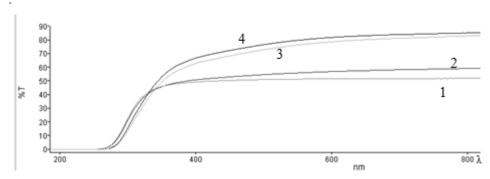


рис 1. Спектры пропускания оксида никеля при варьировании температуры и времени отжига: (1) -  $250^{0}C - 10$  мин; (2) -  $250^{0}C - 30$  мин; (3) - $400^{0}C - 10$  мин; (4) -  $400^{0}C - 20$  мин

Для определения ширины запрещенной зоны сняты спектры поглощения, построены графики зависимости квадрата произведения оптической плотности среды  $(D^* \, \hbar \omega)^2$  на энергию фотона от энергии фотона  $\hbar \omega$ , выделены линейные участки и экстраполированы до пересечения с осью абсцисс. Точка пересечения прямой с осью позволяет определить ширину запрещенной зоны.

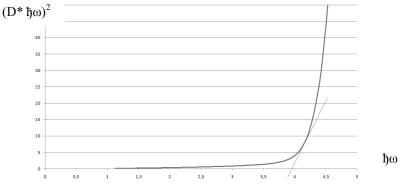


рис.2. Типичная зависимость оптической плотности  $(D^*\hbar\omega)^2$  от энергии фотона  $\hbar\omega$  для пленок NiO

Таблица 1. Ширина запрещенной зоны пленок NiO, полученных при различных условиях

Образец	Ширина запрещенной зоны
NiO, полученный термообработкой 250°C-10 мин	3,82 aB
NiO, полученный термообработкой 250°C-30 мин	3,80 3B
NiO, полученный термообработкой 400°C-10 мин	3,74 <sub>9</sub> B
NiO, полученный термообработкой 400°C-20 мин	3,71 aB

Для измерения электросопротивления пленок в среде угарного газа и без него использовался цифровой програмируемый мультиметр Kethley. Выбраны 2 образца, полученных при разных условиях. В качестве источника угарного газа использовалась тлеющая сигарета.

Таблица 2. Изменение электросопротивления пленок NiO в среде угарного газа

Образец	Сопротивление пленок в среде	Сопротивление пленок на
	угарного газа	воздухе
NiO (250 <sup>0</sup> C-30 мин)	64 Ом	55 Ом
NiO (400 <sup>0</sup> C-10 мин)	85 Ом	79 Ом

#### Выводы.

Получены пленки оксида никеля методом терморезистивного испарения в вакууме с последующим отжигом в печи в атмосфере воздуха. Измерены спектры пропускания поглощения, рассчитана ширина запрещенной зоны пленок, полученных при разных условиях, проведены испытания образцов на чувствительность к угарному газу.

#### Список публикаций.

- [1] A.V. Kadu, S.V. Jagtap, N.N. Gedam. Preparation and Gas Sensing Performance of Nanostructured Copper Doped Nickel Oxides // International Journal of Chemical and Physical Sciences, Vol. 4 Special Issue NCSC Jan-2015. pp.186-194
- [2] Демин В.С., Красовский А.Н., Людчик А.М., Покаташкин В.И., Григоришин И.Л., Измерительная озона в широком диапазоне концентраций с использованием полупроводниковых NiO газовых сенсоров // Журнал «Измерительная техника». 2008.№9.С.67-71
- [3] М.А. Гавриленко, Н.А. Филатова, М.С. Бурметьева. Сенсор на основе оксида никеля для определения углеводородов в воздухе // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 3. С.42-44

### Формирование регулярных доменных структур в монокристаллах ниобата бария-стронция под действием электронного пучка Федоровых Вячеслав Викторович

Чезганов Дмитрий Сергеевич, Власов Евгений Олегович, Васькина Екатерина Михайловна, Зеленовский Павел Сергеевич, Шихова Вера Анатольевна, Шур Владимир Яковлевич Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета

> Чезганов Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н. Шур Владимир Яковлевич, д.ф.-м.н. yyacheslav.fedorovyh@mail.ru

Монокристаллы ниобата бария-стронция  $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$  (SBNx) относятся к релаксорным сегнетоэлектрикам, особенностью которых являются наличие размытого фазового перехода, аномальная частотная зависимость диэлектрической проницаемости, неоднородность химического состава на наноуровне. В настоящее время рассматривается возможность использования релаксорных сегнетоэлектриков с регулярной доменной структурой (РДС) для преобразования частоты оптического излучения в режиме квазифазового синхронизма, генерации второй гармоники и оптического параметрического усиления [1].

Исследовано формирование доменных структур в результате облучения электронным пучком Z-полярной поверхности монокристаллов SBN61. Образцы представляли собой пластины толщиной 0,5 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси и отполированные до оптического качества. На  $Z^+$  поверхность нанесён сплошной Cr электрод толщиной 50 нм, который заземлялся во время облучения, а на  $Z^-$  поверхность слой фоторезиста толщиной 2,5 мкм. Для создания доменной структуры использовался сканирующий электронный микроскоп Auriga Crossbeam (Carl Zeiss) с системой электронно-лучевой литографии Elphy Multibeam (Raith). Применялись два режима облучения с различной дозой облучения: 1) точечное – двумерные

массивы точек (puc.1a), 2) полосовое – одномерные решетки регулярных полос ( $puc.1\delta$ ). Полученные доменные структуры визуализировалась на поверхности кристалла методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО) (puc.1a,  $\delta$ ), а в объеме – методом конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния (КМКР) (puc.1a).

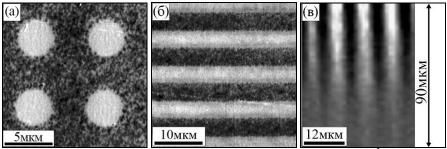


рис.1. Доменные структуры для разных доз облучения (а) 11 пКл, (б,в) 300 мкКл/см². (а,б) СМПО, (в) КМКР

Перед облучением образцы подвергались термической деполяризации, включающей нагрев выше температуры максимума диэлектрической проницаемости [2] и охлаждение без электрического поля, в результате чего в кристалле формировалась полидоменная структура. В результате точечного облучения формировались изолированные домены круглой формы. Изотропный рост доменов обусловлен слиянием нанодоменов с движущейся доменной стенкой. Было показано, что размер доменов нелинейно растет с увеличением дозы. Нелинейность отнесена за счет электростатического взаимодействия доменных стенок, растущих в двумерном массиве изолированных доменов. Полосовое облучение приводило к формированию регулярных цепей изолированных доменов при дозах ниже 100 мкКл/см² и полосовых доменов при более высоких дозах. Ширина доменов линейно увеличивалась с дозой, что было отнесено за счет переключения в постоянном поле, создаваемом инжектированными электронами. Методом КМКР показано, что при максимальной дозе домены достигали глубины около 80 мкм. Полученные данные могут быть использованы для формирования РДС для преобразования частоты лазерного излучения.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке Правительства Российской федерации (постановление 211, контракт 02.А03.21.0006), РФФИ (грант 16-02-00821 – а) и гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-8441.2016.2).

#### Список публикаций:

[1] J. J. Romero, C. Arago, J. A. Gonzalo, D. Jaque, J. Garcia Sole, J. Appl. Phys. 93, 3111 (2003)

[2] G.A. Samara. J. Phys.: Condens. Matter. 15, R367 (2003).

[3] J.B. Stark, W.H. Knox, and D.S. Chemla, Phys. Rev. B 46, 7919 (1992).

### Влияние температуры на величину термо-ЭДС в кристаллическом полупроводнике (GeSe)<sub>0.7</sub> (CuAsSe<sub>2</sub>)<sub>0.3</sub>

#### **Шетников Олег Павлович**

Мирзорахимов Абдулло Алимахмадович

Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета
Мельникова Нина Владимировна, к.ф.-м.н.
futboler2008@yandex.ru

Полупроводниковые многокомпонентные кристаллические и стеклообразные материалы из систем Ag(Cu)-Ge(Sn)-As(Sb)-S(Se) обладают перспективными электрическими, оптическими и термоэлектрическими свойствами [1-4], вследствие чего могут рассматриваться в качестве прогрессивных материалов для микроэлектроники.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния температуры внешней среды на величину термо-ЭДС и коэффициент Зеебека в кристаллическом (GeSe) $_{0,7}$  (CuAsSe $_{2}$ ) $_{0,3}$ , который был получен методом медленного охлаждения из расплава с выдержкой при температуре отжига для обеспечения однородности состава. Материал кристаллизуется в кубической сингонии с параметром элементарной ячейки а = 0.554 нм.

Измерения термо-ЭДС проводились в ячейке ProboStat, входящей в комплекс приборов ModulLab Solartron при контролируемых атмосфере и температурах. Температура внешней среды поддерживалась постоянной в интервале  $300 \div 400~\mathrm{K}$  при помощи контроллера температуры и печи Elite RS-232. Генерация

объемной термо-ЭДС производилась путём нагрева одного из контактов образца, зажатого между двумя электродами. Коэффициент Зеебека оценивался по формуле:

$$\alpha = \frac{\partial U}{\partial \tau},$$
 (1)

где U — разность потенциалов на контактах исследуемого образца, T — наведенный градиент температуры.

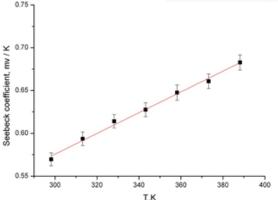


рис.1. График зависимости величины термо-ЭДС от температуры внешней среды в кристаллическом полупроводнике  $(GeSe)_{0.7}(CuAsSe_2)_{0.3}$ 

В результате эксперимента была получена линейно возрастающая зависимость коэффициент Зеебека, величина которого изменялась от 0,57 мВ/К до 0,68 мВ/К в интервале температур 300-400 К (рис. 1). Положительный знак термо-ЭДС указывает на дырочную проводимость в материале, согласно методу определения типа носителей заряда с помощью эффекта Зеебека. Наблюдаемые значения коэффициент Зеебека в исследуемом диапазоне температур характерны для многокомпонентных полупроводников, значительную долю которых составляют германий и селен, в частности аналогичные значения коэффициента Зеебека наблюдали в  $Sn_{1-x}Ge_xSe$  (x=0, 0.2, 0.3) [5]. Полученные результаты позволяют в дальнейшем ожидать интересных термоэлектрических свойств исследуемого соединения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-02-00857-а.

#### Список публикаций:

- [1] Мельникова Н.В., Хейфец О.Л. и др., АЭЭ. 49, № 5, С. 56-63 (2007).
- [2] Хейфец О.Л., Кобелев Л.Я. и др., ЖТФ. 77, №1, С. 90-95 (2007).
- [3] Мельникова Н.В., Алибеков А.Г. и др. ФТТ. 53, №12, с. 2352-2355 (2011).
- [4] Chalcogenide glasses, edited by: J-l Adam and X. Zhang. 2014. Woodh. Publ. 704 p.
- [5] Gharsallah, M. et al. Sci. Rep. 6, 26774 (2016).