

3 - Физика полупроводников и диэлектриков

Буглова Яна Олеговна, 2 курс
Воронеж, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, автомобильный
Фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур на основе CdZnS.

Майорова Татьяна Львовна, к.ф.-м.н.
e-mail: iana.sher.03@bk.ru стр. 64

Герасимов Роман Геннадьевич, магистрант 1 года обучения
Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, радиоинжендерский
Влияние температуры окружающей среды на колориметрические характеристики светодиодной матрицы белого цвета свечения

Солдаткин Василий Сергеевич, к.т.н.
e-mail: roman.gerasimov.1999@list.ru стр. 65

Исламов Дамир Ревинирович, с.н.с.
Новосибирск, Институт физики полупроводников СО РАН, лаб.10
Какие проблемы необходимо решить для производства FRAM на основе оксида гафния
e-mail: damir.islamov@gmail.com стр. 67

Краснова Ирина Андреевна, аспирант 1 года обучения
Новосибирск, Институт физики полупроводников СО РАН
Пассивирующие свойства пленок HfO_2 в зависимости от температуры осаждения на поверхность CdHgTe

Сидоров Георгий Юрьевич, к.ф.-м.н.
e-mail: krasnovaia@isp.nsc.ru стр. 68

Курасова Анна Сергеевна, аспирант 1 года обучения
Томск, Томский государственный университет, радиофизический
Эпитаксиально-диффузионная технология получения компенсированных слоев для лавинных S-диодов

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н.
e-mail: anuyutakurasova@mail.ru стр. 69

Трофимов Михаил Сергеевич, Магистрант 2 года обучения
Томск, Томский государственный университет, радиофизический
Транспорт неравновесных носителей заряда в детекторных структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н.
e-mail: mihant1999@yandex.ru стр. 70

Чехова Анастасия Сергеевна, 1 курс
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический
Фазообразование и диэлектрические характеристики твердых растворов на основе $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ и $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$

Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.
e-mail: tchehova.anastasia@yandex.ru стр. 72

Шишкин Максим Александрович, 3 курс
Екатеринбург, Уральский федеральный университет, департамент фундаментальной и прикладной физики
Квантовые интерференционные вклады в проводимость в структурах InGaAs/GaAs

Гудина Светлана Викторовна, к.ф.-м.н.
e-mail: M-a-k-s225@bk.ru стр. 74

Фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных структур на основе CdZnS

Буглова Яна Олеговна

Воронежский государственный лесотехнический университет

Майорова Татьяна Львовна, к.ф.-м.н.

iana.sher.03@bk.ru

В настоящее время большую популярность стали набирать полупроводники на основе наноструктурированных материалов, которые могут быть широко использованы в автомобильном и железнодорожном транспорте, для изготовления твердотельных лазеров, сцилляторов и других элементов оптоэлектроники. Объектом нашего исследования являются твердые растворы CdZnS. Исследуемые структуры являются прямозонным полупроводником, ширина запрещенной зоны варьируется в диапазоне 2,4 – 3,1 эВ в зависимости от соотношения Cd и Zn. При облучении светом проводимость таких материалов увеличивается, что дает возможность использовать их в качестве фоторезистора [1].

Еще одним из преимуществ использования сульфидов кадмия и цинка является многообразие способов получения: химическим осаждением с применением тиокарбамида в качестве источника сульфидных анионов; пульверизацией с последующим пиролизом; методом молекулярно-пучковой эпитаксии, при которой происходит выращивание кристаллов в условиях вакуума; в результате золь-гель процесса; способом ионного распыления; анодированием и электрофорезом; методом трафаретной печати. При этом наиболее перспективным в промышленных масштабах можно считать метод осаждения пленок из раствора, поскольку с точки зрения структурных, электрических и оптических характеристик пленки сульфидов кадмия и цинка, полученные этим методом, не уступают по качеству пленкам, полученным другими методами, а оборудование, которое используется, является более доступным и простым, не требует больших материальных затрат в отличии, например, от методов эпитаксиального осаждения или вакуумного испарения. При этом в зависимости от условий процесса синтеза можно получить поликристаллические или гладкие плотные пленки [2].

В работах [3 – 4] проведен комплекс исследований фотоэлектрических свойств пиролитических пленок CdZnS. Для таких материалов наблюдается ряд особенностей поведения неравновесных носителей заряда. В работе [5] представлена модель, объясняющая эти особенности в рамках поверхностно-барьерного механизма токопереноса. Модель демонстрирует влияние различных параметров на поведение носителей заряда в поверхностно-барьерных структурах и как следствие характер кинетики их фотопроводимости. Поведение носителей заряда существенно сказывается на технические характеристики элементов оптоэлектроники. В связи с этим задача исследования кинетики в частности возбуждения фотопроводимости в поверхностно-барьерных структурах является актуальной.

В данной работе представлены результаты исследования пленочных структур CdZnS, полученных методом пиролиза растворов солей металлов и тиомочевины на нагретую до 400 °С ситалловую подложку. В качестве реагентов применяли соли CdBr₂·2H₂O и ZnBr₂ марки «х.ч.» и тиомочевину N₂H₄CS марки «ос.ч.». Соотношение солей и тиомочевины составляло 1:4.

Измерения фототока проводились при комнатной температуре на установке, регистрирующей токи 10⁻¹¹ А и выше в режиме заданного напряжения 10 В с временным разрешением 5 мкс. Магнетронным напылением на образцы наносились пленочные алюминиевые контакты, ширина щели между контактами составляла 2 мм. Электрический контакт образца с измерительной схемой обеспечивала прижимная пластина, закреплённая на держателе. Темновой ток всех исследуемых структур составлял порядка 0,15 нА. Исследование кинетики фотопроводимости образцов осуществлялось при возбуждении светодиодом HPL-H77V1BA-V2 с длиной волны $\lambda = 380$ нм (3,26 эВ). При этом варьируя ток на светодиоде, его сила света менялась в диапазоне 7 – 10 кд.

Оптическая ширина запрещенной зоны E_g исследуемых пленок определена по краю собственного поглощения из спектральной зависимости $D=f(h\nu)$ (D – оптическая плотность) в допущении прямых разрешенных переходов из спектров поглощения образцов, осажденных на кварце, зарегистрированных на спектрофотометре СФ-2000-02 относительно чистой подложки в диапазоне 190 – 900 нм. Ширина запрещенной зоны пленок Cd_{1-x}Zn_xS при $x = 0$ равна 2,5 эВ, а при $x = 0,5 - 3,1$ эВ [6].

Получена зависимость силы стационарного фототока образцов CdZnS от освещенности (рис.1). Данная зависимость носит нелинейный характер и аппроксимируется степенной функцией с переменным показателем степени. Для пиролитических пленок CdS чистых и легированных щелочными металлами в работах [3, 7] наблюдались аналогичные особенности люксамперных характеристик, которые могут быть объяснены влиянием центров локализации носителей заряда или оптической модуляцией поверхностного потенциального барьера.

В работе [5] в результате моделирования, были получены кривые временной зависимости концентрации свободных носителей заряда, которые согласуются с экспериментальными для пленок CdZnS различного состава. При этом экспериментальным кривым кинетики фототока для структур с большей долей Zn соответствуют кривые, полученные при моделировании с большим значением количества поверхностных центров локализации носителей заряда N_s . Возможно, это говорит о том, что в структурах тройных соединений число поверхностных уровней локализации носителей заряда больше, чем в пленках CdS.

Полученный для пленок CdZnS характер зависимости стационарного фототока от интенсивности фотовозбуждения также подтверждает такое предположение.

Подробно результаты исследования фотопроводимости наноструктурированных пленок CdZnS будут представлены на конференции.

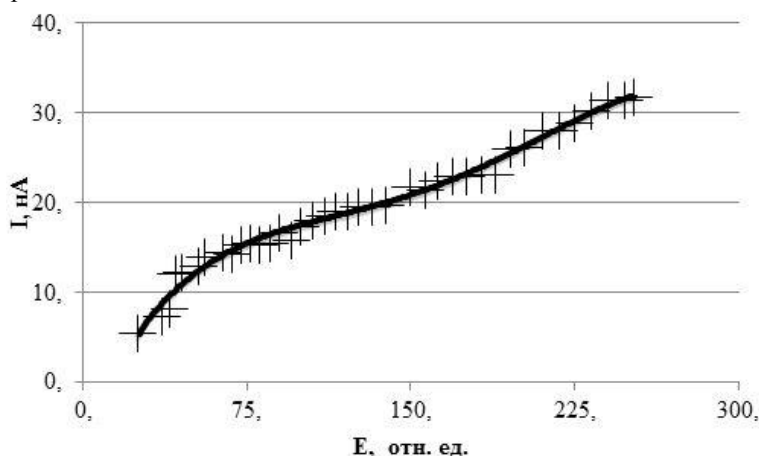


рис.1. Зависимость стационарного фототока пленок CdZnS от освещенности.

Список публикаций:

- [1] Роках А.Г. // Известия Саратовского университета Нов. Сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15. № 2. С. 53 - 58.
- [2] Гринь Г.И., Козуб П.А., Панчева А.М. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2008. Т. 35. № 5/2. С. 50..
- [3] Mayorova T.L., Klyuev V.G., Zuyagin A.I. // The European Physical Journal D. 2017. V. 71. Issue 2, February. article 43, 71: 43
- [4] Майорова Т.Л., Клюев В.Г. Звягин А.И. // Известия ран. серия физическая. 2020. Т. 84. № 7. С. 998 – 1003.
- [5] Майорова Т.Л., Клюев В.Г. // Известия ран. серия физическая. 2022. Т. 86. № 10. С. 1505 – 1512.
- [6] Nituta A.N., Bezdetko Ju.S., Artyomova E.S., Semenov V.N., Klyuev V.G. // "From nanostructures, nanomaterials and nanotechnologies to nanoindustry" Proc. of the V Int. Conf. (Izhevsk). 2015. P. 78.
- [7] Майорова Т.Л., Клюев В.Г. // Сборник научных статей по материалам докладов Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения», г. Воронеж, 20-21 ноября 201.с.62-67

Влияние температуры окружающей среды на колориметрические характеристики светодиодной матрицы белого цвета свечения

Герасимов Роман Геннадьевич

Афанасьев Максим Александрович

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Солдаткин Василий Сергеевич

roman.gerasimov.1999@list.ru

Согласно [1], на электростанциях, в котельных (освещённость не менее 100 лк), машинных залах (освещённость не менее 200 лк), электрощитовых внутри здания (освещённость не менее 200 лк) рекомендуется коррелированная цветовая температуры источников света от 4 000 К до 6 500 К. Известно, что светодиодные источники света обладают высокой энергоэффективностью и надёжностью в сравнении с другими искусственными источниками света [2]. Для изготовления промышленных светодиодных светильников применяются светодиоды или светодиодные матрицы белого цвета свечения. Известно [3], что прямое напряжение, освещённость и световая отдача светодиодов снижаются с ростом температуры. Так же с ростом температуры изменяется спектр излучения светодиода, что в свою очередь приводит к изменению колориметрических характеристик. Как правило производители светодиодов не приводят в описании данные по изменению колориметрических характеристик изделий с ростом температуры окружающей среды. А эта информация необходима при проектировании осветительных приборов для электростанций, так как в таких помещениях температуры окружающей среды может быть существенно повышена в связи с производственной

деятельностью. Именно по этой причине исследование влияния температуры окружающей среды на колориметрические характеристики светодиодной матрицы белого цвета свечения является актуальной задачей для разработчиков светодиодных осветительных приборов для электростанций. Целью работы является исследование влияния температуры окружающей среды в диапазоне от 25 °С до 85 °С на колориметрические характеристики (цветовых координат и коррелированной цветовой температуры) светодиодной матрицы белого цвета свечения для промышленных светильников. Задачи исследований: проведение аналитического обзора научной литературы; анализ и выбор методик исследований влияния температуры окружающей среды на светотехнические и колориметрические характеристики светодиодов; проведение экспериментальных исследований по влиянию повышенной температуры окружающей среды на колориметрические характеристики светодиодной матрицы белого цвета свечения.

Известны светодиодные светильники промышленные Diora Craft 150 [4] со световым потоком до 19 000 лм, с потребляемой мощностью 150 Вт, световой отдачей порядка 125 лм/Вт и коррелированной цветовой температурой 4 000 К и 5 000 К. В таких светодиодных светильниках в корпусе-отражателе установлены алюминиевые печатные платы с множеством светодиодов, корпус-отражатель так же является радиатором. В качестве объекта исследований выбраны светодиодные матрицы EPSTAR XA-20WWJC-10S2P [5]. Значение прямого напряжения в диапазоне 32-34 В, световой поток в диапазоне 2200-2400 лм, коррелированная цветовая температура 3000 К при значении прямого тока 600 мА, индекс цветопередачи не менее 70. Для электропитания и измерений значений прямого тока и напряжения использовался источник-измеритель Keithley 2410, для установки температурного режима использовалась электропечь SNOL 58/350, для измерения колориметрических характеристик использовался спектрометр UPRtek MK350N Premium.

На рис. 1 приведены значения цветовых координат в зависимости от значения температуры окружающей среды.

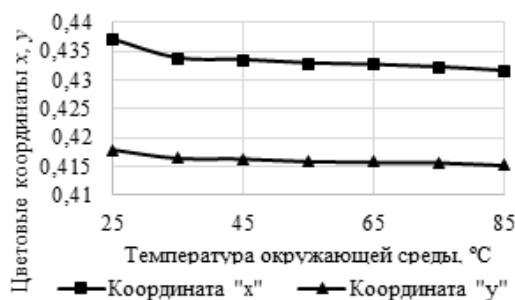


рис.1. Зависимость цветовых координат от температуры окружающей среды

На рис. 2 приведены значения коррелированной цветовой температуры в зависимости от значения температуры окружающей среды.

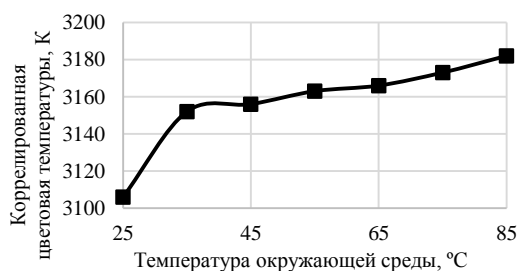


рис.2. Зависимость коррелированной цветовой температуры от температуры окружающей среды

На рис. 3 приведены значения индекса цветопередачи в зависимости от значения температуры окружающей среды.

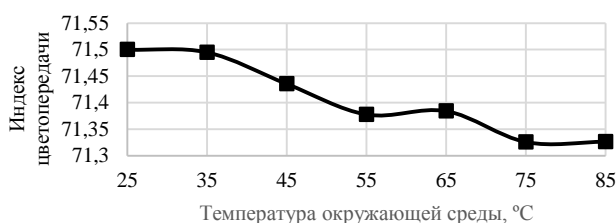


рис.3. Зависимость индекса цветопередачи от температуры окружающей среды

Заключение

В ходе выполнения работы путем проведения эксперимента было исследовано влияние температуры окружающей среды в диапазоне температур от 25 °С до 85 °С на колориметрические характеристики (цветовых координат и коррелированной цветовой температуры) светодиодной матрицы белого цвета свечения для промышленных светильников. Также был проведен аналитический анализ научной литературы, проведён анализ и выбор методик исследований влияния температуры окружающей среды на светотехнические и колориметрические характеристики светодиодов. Установлено, что значения цветовых координат снижаются с ростом температуры окружающей среды при 85 °С x на 0,006, y на 0,002. Значение коррелированной цветовой температуры повышается с ростом температуры окружающей среды при 85 °С на 76 К. Значение индекса цветопередачи снижается с ростом температуры окружающей среды при 85 °С на 0,2. Данные зависимости можно объяснить тем, что оптическая мощность излучения светодиодного кристалла в следствие нагрева снижается и люминофорной композиции становится недостаточно этой оптической мощностью для возбуждения частиц люминофора, что в свою очередь приводит к снижению интенсивности фотолюминесценции.

Список публикаций:

- [1] ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/554/55477.pdf> (дата обращения: 15.03.2023).
- [2] Солдаткин В.С. Обзор современных светодиодов: для общего освещения, для садоводческого освещения, УФ-диоды для дезинфекции // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. 2022. № 1. С. 239-241.
- [3] Солдаткин В.С., Афонин К.Н., Каменкова В.С., Ганская Е.С., Туев В.И. Определение температурной зависимости электрических и световых параметров светодиодных элементов в лампе общего назначения // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 3. С. 148-151.
- [4] Официальный сайт АО «Физтех-Энерго». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://diora.pro/models/diora_craft_11013000_5k/ (дата обращения: 15.03.2023).
- [5] Официальный сайт «Epistar». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.epistar.com (дата обращения: 15.03.2023).

Какие проблемы необходимо решить для производства FRAM на основе оксида гафния

Исламов Дамир Ревинирович

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

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

damir@isp.nsc.ru

Открытие сегнетоэлектрического эффекта в нанометровых слоях HfO_2 вызвало взрывной интерес к изучению физических свойств этих материалов, в связи с перспективой разработки памяти на основе сегнетоэлектрического переключения (Ferroelectric Random Access Memory, FRAM) терабитного масштаба. Сегнетоэлектрические свойства тонких легированных плёнок HfO_2 были обнаружены в 2007 году научной группой в компании Qimonda совместно с RWTH Aachen при поиске материалов с высокой диэлектрической проницаемостью для использования в конденсаторах ДОЗУ. Авторами была обнаружена ранее не наблюдавшаяся в нормальных условиях нецентросимметричная (полярная) орторомбическая фаза (о-фаза) между моноклинной (m-) и тетрагональной (t-) фазами в легированных слоях HfO_2 толщиной от 5 до 50 нм [1, 2]. Для более толстых плёнок доля m- фазы увеличивается по отношению к о- фазе, что приводит к снижению сегнетоэлектрических свойств. Поляризация плёнки происходит внутри элементарных ячеек о- фазы, перемещая четыре атома кислорода между двумя зеркально-симметричными положениями, определяемыми двумя локальными минимумами, разделёнными энергетическим барьером.

Была выдвинута гипотеза, что факторами, влияющими на образование сегнетоэлектрической фазы, помимо уровня легирования, могут являться: концентрация вакансии кислорода (V_O), механические напряжения, поверхностная и межфазная энергия зёрен. Кроме того, был обнаружен индуцированный полем фазовый переход полярная-неполярная фазы при циклировании [3-6]. При разделённом рассмотрении этих факторов было установлено, что одной из основных причин существования сегнетоэлектрических свойств HfO_2 является легирование. При переборе легирующих примесей выявлено, что окно уровня легирования для формирования сегнетоэлектрической фазы увеличивается с атомным радиусом примеси. До сих пор неясно, что больше влияет на формирование сегнетоэлектрической фазы легированного слоя HfO_2 : ионный радиус примеси или связанная с ней повышенная концентрация V_O в HfO_2 . Для разных концентраций V_O была обнаружена прямая корреляция с долей фазы беспримесного HfO_2 в структуре легированной плёнки [7, 8]. Повышение парциального давления кислорода при PVD-осаждении HfO_2 уменьшает концентрацию V_O , а также долю

сегнетоэлектрической о-фазы с замещением её на неполярную m-фазу. Соответственно, V_0 однозначно стабилизируют сегнетоэлектрические свойства. Было установлено увеличение остаточной поляризации при повышенных механических напряжениях, создаваемых более толстым верхним TiN электродом [9]. Поскольку осаждение верхнего электрода может изменить стехиометрию HfO_2 путём вытягивания O из слоя оксида, эффект механического напряжения также может быть связан с наличием кислородных вакансий.

Проблема нестабильности о-фазы, а значит и сегнетоэлектрического отклика и окна памяти, во время перезаписи информации, является одной из ключевых, которая стоит на пути внедрения FRAM в массовое производство. Для решения этой задачи предлагаются различные методики, такие как вариация примеси легирования и её концентрация [5, 10], подбор металлических электродов [11], а также предварительная подготовка поверхности металла перед осаждением сегнетоэлектрической плёнки [12]. Вариация этих подходов позволяет получить структуры на основе сегнетоэлектрических слоёв HfO_2 , выдерживающих до 10^{12} циклов перезаписи, что, в свою очередь, выдвигает FRAM на роль универсальной памяти.

Список публикаций:

- [1] T. Böске et al., *Appl. Phys. Lett.* 99, 10, 102903 (2011) and 99, 112904 (2011).
- [2] X. Sang et al., *Appl. Phys. Lett.* 106, 162905 (2015).
- [3] M. Pešić et al., *Adv. Funct. Mater.* 26, 4601 (2016).
- [4] E. Grimley et al., *Adv. Electron. Mat.* 2, 1600173 (2016).
- [5] U. Schroeder et al., *Jap. J. of Appl. Phys.* 53, 08LE02 (2014)
- [6] M.H. Park, U. Schroeder, *Root causes for Ferroelectricity in Doped HfO₂ in "Ferroelectricity in Doped HfO₂", Elsevier (2019).*
- [7] A. Pal et al., *Appl. Phys. Lett.* 110, 022903 (2017)
- [8] T. Mittmann et al., *Adv. Mater. Interfaces* 6, 1900042 (2019).
- [9] S. Kim et al., *Appl. Phys. Lett.* 111, 242901 (2017).
- [10] T.M. Zalyalov, D.R. Islamov, 2022 *IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 48.
- [11] D. Islamov, T. Zalyalov, (under review).
- [12] S. Shi et al., *Nature Comm.* (under review).

Пассивирующие свойства пленок HfO_2 в зависимости от температуры осаждения на поверхность CdHgTe

Краснова Ирина Андреевна

Гориков Дмитрий Витальевич

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

Сидоров Георгий Юрьевич, к.ф.-м.н.

krasnovaia@isp.nsc.ru

Твердый раствор кадмий-ртуть-теллур CdHgTe (КРТ) широко применяется в науке и технике при исследовании топологических изоляторов, двумерного электронного газа, создании фотоприемных матриц ИК области спектра. Для любого применения необходимо пассивирующее покрытие. Известно [1], что оксид алюминия (Al_2O_3), выращенный методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (ПАСО) при 120°C , является хорошим пассивирующим покрытием для КРТ. Но в литературе по пассивации узкозонных полупроводников группы A_3B_5 показано, что диэлектрик HfO_2 обладает лучшими пассивирующими свойствами, чем Al_2O_3 . Стандартное температурное окно осаждения HfO_2 , при котором скорость роста за один цикл не зависит от температуры, лежит в диапазоне $160\text{--}340^\circ\text{C}$ и превышает допустимую для КРТ температуру нагрева в вакууме [2]. Однако, в литературе [3] показана возможность роста HfO_2 при более низких температурах, что позволяет использовать HfO_2 для пассивации поверхности КРТ. Но для этого необходимо подобрать оптимальную температуру роста HfO_2 . Таким образом, целью работы является определение оптимальной температуры нанесения на КРТ HfO_2 , методом ПАСО.

Эксперименты проводились на образцах КРТ р-типа, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с молярным составом $\text{Cd } x=0.22$. Образцы представляют собой кусочки одной пластины. Это позволило минимизировать разброс объемных параметров образцов (таких как состав, концентрация дефектов) с точностью до неоднородности пленки КРТ по площади пластины. Диэлектрик HfO_2 наносился методом ПАСО в камере FlexAl (Oxford Instruments). В качестве прекурсора использовался тетракис(этилметиламин) гафния (ТЕМАН), в качестве окислителя – удаленная кислородная плазма. Температуры роста составляли 80, 100, 120, 140 и 160°C . Количество циклов нанесения HfO_2 на всех образцах было одинаковым и составляло 200. Затем на полученных образцах изготавливались МДП-структуры, на которых измерялись вольт-фарадные характеристики (ВФХ) при температуре жидкого азота 77K . Измерения ВФХ осуществлялись при помощи прибора B1500A фирмы Agilent. Из измеренных ВФХ определились ёмкость диэлектрика, смещение положения

плоских зон, изменение положения плоских зон при измерении в прямом (от отрицательных до положительных напряжений) и обратном направлениях (от положительных до отрицательных напряжений).

В области большого отрицательного напряжения (-3В) измеренная ёмкость становится постоянной. Это напряжение соответствует режиму сильного обогащения, значит, измеренная ёмкость равна ёмкости диэлектрика. Из измеренных данных наблюдается увеличение ёмкости диэлектрика при увеличении температуры роста HfO_2 . Данное различие связано с различием толщины пленок и величины диэлектрической проницаемости в HfO_2 . Наблюдаемая зависимость ёмкости диэлектрика от температуры роста схожа с зависимостью для пленок Al_2O_3 [1]. Наибольший разброс ёмкости диэлектрика наблюдается у образца, выращенного при 100°C . При увеличении температуры нанесения диэлектрика наблюдается уменьшение разброса ёмкости. Данный разброс может обуславливаться неоднородностью диэлектрической проницаемости и/или неоднородностью структуры пленки HfO_2 .

У ВФХ, измеренных в прямом и обратном направлении, наблюдается разница в положении напряжения плоских зон («гистерезис» ВФХ). Такое поведение связано с зарядкой медленных ловушек на границе раздела. На всех образцах наблюдалось увеличение «гистерезиса» ВФХ при увеличении диапазона напряжений. Наибольшая разница в положении напряжения плоских зон для прямой (от -3В до $+3\text{В}$) и обратной (от $+3\text{В}$ до -3В) развертки наблюдается у образца, на котором HfO_2 наносился при 160°C . У остальных образцов ширина «гистерезиса» близка в пределах разброса. Также при увеличении диапазона напряжений наблюдалось увеличение ёмкости в минимуме ВФХ, свидетельствующее об ионизации дефектов акцепторного типа вблизи границы раздела $\text{CdHgTe}/\text{HfO}_2$. При отрицательном напряжении электроны с дефектных центров в переходном слое захватываются акцепторными состояниями, и происходит ионизация акцепторов.

На всех образцах наблюдается влияние встроенного заряда в диэлектрик, который приводит к смещению ВФХ как целого вдоль оси напряжений. О величине встроенного заряда можно судить по смещению положения плоских зон. Но как было сказано выше, на положение плоских зон также влияет заряд, захваченный медленными ловушками на границе раздела. Для минимизации влияния медленных состояний рассматривались ВФХ, измеренные в обратном направлении. Наблюдается, что при увеличении температуры нанесения HfO_2 уменьшается смещение положения плоских зон, свидетельствующее об уменьшении встроенного заряда в диэлектрик. Наибольшее смещение положения плоских зон наблюдается у образцов, на которых диэлектрик наносился при 80 и 140°C . Наименьшее смещение положения плоских зон наблюдается у образца, на котором HfO_2 наносился при 160°C . Наименьший разброс смещения положения плоских зон наблюдается у образца с температурой роста диэлектрика 160°C . Наибольшая ширина ВФХ наблюдается у образца, на котором HfO_2 наносился при 160°C . Это может свидетельствовать о наибольшей плотности поверхностных состояний. А наименьшая ширина ВФХ наблюдается у образца с температурой роста HfO_2 140°C .

Из рассмотренных параметров установлено, что оптимальное значение температуры нанесения HfO_2 на КРТ, методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения, лежит в диапазоне $120\text{-}140^\circ\text{C}$.

Список публикаций:

- [1] Gorshkov D. V., et al. // *Tech. Phys. Lett.* 2020. Vol. 46, No. 8, PP. 741–744.
- [2] Zakirov E. R., et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 2019. Vol. 34, P. 065007.
- [3] Горшков Д. В., и др. // *Письма в ЖТФ.* 2022. Т. 48, №19. С. 16.

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

Курасова 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 дальнометров, сверхширокополосных радаров и лидаров. S-диод содержит глубокую примесь (Fe, Cr), которая вводится для увеличения динамического напряжения его переключения. 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.

Структуры получали в две стадии. Вначале проводили рост эпитаксиальных слоев n-GaAs хлорид-гидридным методом из газовой фазы. Рост проводился на подложках АГЧТ с направлением (100), в качестве легирующей примеси использовалась сера. В ходе роста формировались профили легирования (рис.1).

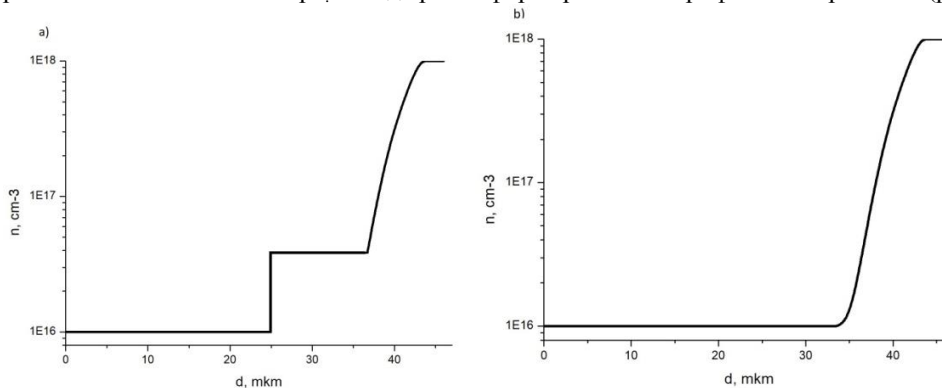


рис.1. Профили легирования: а) первый тип структур б) второй тип структур

На второй стадии проводилась диффузия Fe в «открытой» системе в потоке аргона. Эффективные профили (рис.2) электронов, измеренные с помощью электролитического профилометра «Бриг» на частотах 10 кГц и 500 кГц после диффузионного отжига эпитаксиальных структур. 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 (рис.2, а). Высокие коэффициенты диффузии железа не позволяют контролируемо изготавливать подобные S-диоды из структур второго типа, активная область содержит один слой p-типа проводимости (рис.2, б).

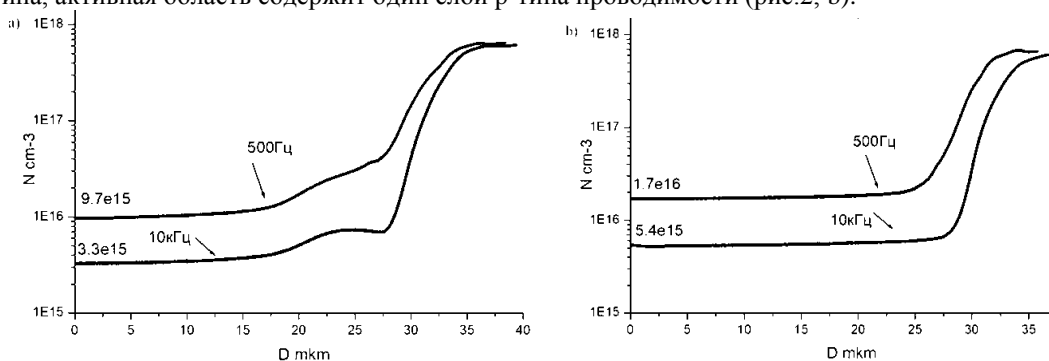


рис.2. Профили легирования: а) первый тип структур б) второй тип структур

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, что S-диоды, изготовленные из структур второго типа, проявляют работоспособность лишь при низких частотах переключения. Для них, повышение частоты приводит к исчезновению генерации. Максимальные частоты переключения структур первого типа превышают 200кГц.

Транспорт неравновесных носителей заряда в детекторных структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом

Трофимов Михаил Сергеевич

Щербаков Иван Дмитриевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Прудаев Илья Анатольевич к.ф.-м.н.

mihant1999@yandex.ru

В настоящее время арсенид галлия, компенсированный хромом (HR-GaAs:Cr, где HR-high resistivity), широко используется для производства детекторов ионизирующих излучений. Высокотемпературное диффузионное легирование арсенида галлия глубоким акцептором (хромом) позволяет получать полуизолирующий материал с удельным сопротивлением порядка $10^9 \text{ Ом} \times \text{см}$, в результате чего детекторы на

его основе обладают высоким соотношением сигнал-шум. По сравнению с кремниевыми детекторами, детекторы на основе компенсированного арсенида галлия обладают существенно лучшей эффективностью регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий (15-60) кэВ и являются более радиационно-стойкими.

Одним из важнейших электрофизических параметров полупроводниковых материалов, определяющих быстродействие приборов микроэлектроники, в том числе и полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений, является дрейфовая подвижность носителей заряда. На сегодняшний день известно два основных экспериментальных метода, позволяющих её рассчитать: метод переходного тока (в зарубежной литературе именуемый, как “Transient current technique”), который был разработан сравнительно недавно и метод Ван дер Пау, применяемый для измерения физических параметров полупроводников ещё с начала 60-х годов.

Ранее считалась, что результаты подвижности, полученные ТСТ-методом, являются наиболее достоверными и имеют минимальную погрешность, поскольку данный метод относится к прямым. Метод же Ван дер Пау является расчетным и полученные с помощью него результаты дрейфовой подвижности имеют высокую погрешность. Для расчета дрейфовой подвижности в обоих методах пользуются идеализированными приближениями. В методе Ван дер Пау значение холл-фактора берут за единицу, поскольку его расчет аналитическим путем является затруднительным. В ТСТ-методе для построения зависимости дрейфовой скорости от напряженности электрического поля полагают, что оно распределено однородно по всей структуре.

На рисунке 1 представлены, измеренные нами импульсы напряжения, образованные в результате облучения HR-GaAs:Cr детектора инфракрасным излучением с длиной волны 830 нм. Анализ данных импульсов показывает, что их форма существенно отличается от идеальной (прямоугольной). Кроме того, амплитуды импульсов имеют близкие значения, что абсолютно противоречит выражению для плотности тока, согласно которому, она пропорциональна концентрациям носителей заряда и их дрейфовым скоростям. При одинаковых концентрациях фотоносителей (генерация происходила по типу “зона-зона”) плотности тока, соответственно и амплитуды импульсов, должны различаться во столько, во сколько различаются дрейфовые скорости носителей заряда (в исследуемом нами материале они различаются, примерно в 15 раз). Поскольку дрейфовая скорость пропорциональна подвижности и напряженности электрического поля, то это указывает на сложный вид распределения поля вблизи облученного контакта.

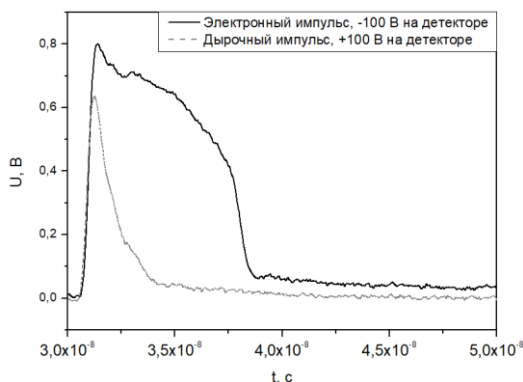


рис.1 Электронный и дырочный импульсы HR-GaAs:Cr - детектора;

В данной работе было проведено численное моделирование импульсных характеристик детектора в среде приборно-технологического проектирования TCAD Sentaurus. В ходе проведения моделирования решалась система дифференциальных уравнений во временной области, состоящая из уравнений непрерывности, Пуассона и Кирхгофа. В качестве модели переноса тока использовалась диффузионно-дрейфовая модель. Рекомбинация носителей заряда описывалась при помощи модели Шокли-Рида-Холла. Моделируемая электрическая цепь детектора состояла из последовательно включенного источника питания постоянного тока, детекторной HR-GaAs:Cr структуры с барьерными металлическими контактами, разделительной емкостью номиналом 200 пФ и сопротивления нагрузки номиналом 50 Ом, являющимся входным сопротивлением усилителя в эксперименте.

На рис.2а представлены расчетные импульсы HR-GaAs:Cr детектора при напряжении $\pm 100 В$. Видно, что характер изменения импульсов во времени, их длительность и амплитуда с высокой точностью согласуется с экспериментом. На рис.2б представлены профили напряженности электрического поля в HR-GaAs:Cr структуре при различном расстоянии от металлических контактов. Наблюдается неоднородный характер распределения поля по всей толщине активной области структуры. Причем чем ближе точка поглощения излучения к контакту, тем меньшую подвижность имеют носители заряда на начальном участке дрейфа, поскольку в данном материале при полях более 5 кВ/см наблюдается участок отрицательно дифференциальной проводимости.

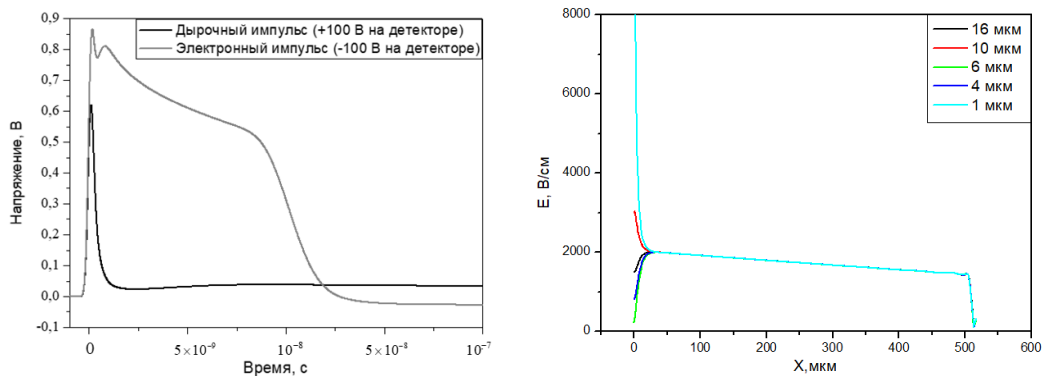


рис.2 а) Расчетные импульсы детектора; б) Профили напряженности электрического поля в HR-GaAs:Cr структуре при различном расстоянии от боковых контактов

Таким образом, при помощи численного моделирования в среде приборно-технологического проектирования TCAD Sentaurus было показано, что для определения физических параметров полупроводника, в частности дрейфовой подвижности, недостаточно пользоваться идеализированным аналитическим приближением, требуется численный расчёт. По результатам численных расчетов было показано, что поле в исследуемых HR-GaAs:Cr структурах распределено неоднородно, из чего следует изменчивость подвижности носителей заряда в процессе дрейфа. Подвижность электронов при их дрейфе от катода к аноду может варьироваться в пределах (400 – 4000) см²/(В⁻¹ × с⁻¹), подвижность же дырок меняется в пределах (40 – 320) см²/(В⁻¹ × с⁻¹). Так же в ходе расчетов было установлено, что всплеск амплитуды напряжения при регистрации дырочных импульсов связан с приповерхностным дрейфом электронов к контактам, что в корне меняет ранее установившееся представление о принципе регистрации дырочной компоненты ТСТ-методом.

Фазообразование и диэлектрические характеристики твердых растворов на основе



Чехова Анастасия Сергеевна

Глазунова Екатерина Викторовна

Южный федеральный университет

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

tchehova.anastasia@yandex.ru

Введение

Для материаловедения, химии и физики перспективными являются материалы, обладающие сегнетоэлектрическими свойствами. Стремительное развитие электроники привело к тому, что в современных технологиях востребованы диэлектрики с большой плотностью накопления энергии, низкими потерями и хорошей температурной стабильностью. Поэтому материалы с высокой поляризацией, меньшей остаточной поляризацией и более высоким электрическим полем пробоя стали надежными кандидатами для применения в новой технике [1]. Также существует потребность в создании материалов, способных работать при повышенных температурах. По этой причине популярностью пользуются вещества на основе системы цирконата-титаната свинца (ЦТС). ЦТС обладает отличными электрофизическими параметрами, а модификация путем легирования помогает изменять свойства материала в зависимости от потребностей и области применения. ЦТС-19 считается высокотехнологичным, характеризуется средними значениями диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик, высокой температурой Кюри и широким диапазоном рабочих температур (~до 150 °С) [2].

Одним из главных недостатков свинец-содержащих материалов является их неэкологичность и токсичность. Поэтому интересующим многих ученых направлением является создание бессвинцовых аналогов ЦТС-материалов, которые не будут наносить вред окружающему миру и экологии в целом.

Наибольший интерес представляют материалы, обладающие высокой диэлектрической проницаемостью и повышенной прочностью на пробой. С этой целью активно используются керамические конденсаторы на основе титанатов и ниобатов щелочных и щелочноземельных металлов [3].

В связи с этим целью работы является установление закономерностей между фазообразованием, структурой и диэлектрическими свойствами твердых растворов (ТР) системы на основе Na_{0,5}Bi_{0,5}TiO₃ и Na_{0,5}K_{0,5}NbO₃.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали ТР системы $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$, где $x=0.00; 0.10; 0.50; 0.90$. Данные ТР получали путем двухстадийного твердофазного синтеза из следующего исходного сырья: NaHCO_3 , Bi_2O_3 , TiO_2 , Nb_2O_5 . Синтез сопровождался выбором оптимальных технологических режимов. Для данной задачи изготавливали серию экспериментальных образцов, а главными критериями для установления оптимальных условий синтеза и спекания были результаты рентгенофазового анализа (РФА) и значения относительной плотности образцов ($\rho_{\text{отн}}$). Установлено, что получение необходимых составов возможно при: $T_{\text{синт1}}=(850-950)^\circ\text{C}$, $T_{\text{синт2}}=(850-970)^\circ\text{C}$. $\tau_{\text{синт1}}=\tau_{\text{синт2}}=4$ часа. $T_{\text{сп}} = (1125-1150)^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{сп}} = 2$ часа. Точные значения температур и времени синтеза и спекания зависят от состава ТР. Механическую активацию (МА) синтезированных компонентов проводили на этапе получения пресс-порошков, предназначенных для спекания. МА выполняли в шаровой планетарной мельнице АГО-2 в этиловом спирте 20 минут при частоте вращения 1820 оборотов в минуту. Полученные составы исследовали с помощью РФА на дифрактометре ДРОН 3.0 (СоКа-излучение, фокусировка по Брэггу-Брентано). Петли диэлектрического гистерезиса получали с использованием измерительного стенда, собранного по схеме Сойера-Тауэра, при комнатной температуре, частоте 50 Гц и величине электрического поля 700÷1900 В. Диаметр образцов составляет 12 мм при толщине 1-2 мм. Плотность энергии была получена из кривых зависимости поляризации от электрического поля (P-E) путем интегрирования площади между осью поляризации и кривой P-E [4]. С помощью интегрирования были вычислены значения эффективной энергии и КПД.

Плотность энергии W_{eff} рассчитывали по формуле (1).

$$W_{\text{eff}} = \int_{P_r}^{P_{\text{max}}} E dP, \quad (1)$$

где P_{max} – значение поляризации при максимуме E , P_r – значение при $E = 0$.

Экспериментальные результаты

Рентгенофазовый анализ показал, что ТР системы $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$ не содержат примесей. $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ имеет ромбоэдрическую симметрию, судя по дифрактограмме, а при введении 10% $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$ симметрия системы меняется на кубическую, что сохраняется и на $x=0.5$ (но с возникновением двух кубических фаз).

Эксперимент показал, что в $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ максимальное значение плотности энергии $W_{\text{eff}} = 20.74$ Дж/см³ наблюдается при 1900 В, при этом КПД = 51.88%. При увеличении x до 0.9 КПД и плотность запасенной энергии возрастают: $W_{\text{eff}} = 28,00$ Дж/см³, КПД = 76.68%. На рис.1. представлены петли диэлектрического гистерезиса образца $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$ при $x=0.90$. При $x=0.50$ петли диэлектрического гистерезиса получить не удалось, т.к. указанный ТР обладает высокой проводимостью.

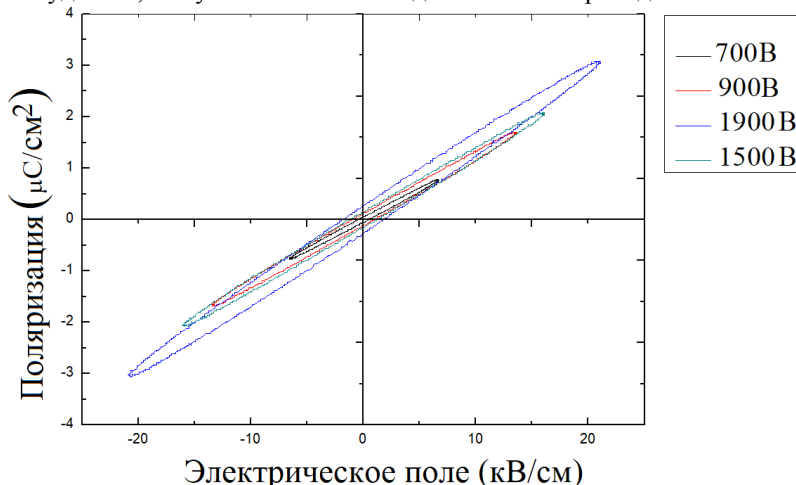


рис.1. Петли диэлектрического гистерезиса образца $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$ при различных значениях напряжения

Выводы

В работе были получены беспримесные ТР системы $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$ с ожидаемыми показателями относительной плотности: $\rho_{\text{отн}}(\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3) = 96\%$, $\rho_{\text{отн}}(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3) = 84\%$. Установлено, что наивысшее значение плотности энергии среди полученных показывает ТР с $x=0,9$ при 1900 В, КПД при этом имеет достаточно высокое значение – 76.68%. Экспериментальные данные показали, что при увеличении значения x КПД и плотность энергии ТР возрастают.

Данные будут использованы при разработке новых сегнетоэлектрических материалов для устройств накопления энергии.

Выражаем благодарность за помощь в проведении исследовательской работы с.н.с. Шилкиной Л.А.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ)» при использовании оборудования ЦКП НИИ физики ЮФУ.

Список публикаций:

[1] Xihong H. A review on the dielectric materials for high energy-storage application // Journal Article, 2013

[2] Малыхин А. Ю., Скрылёв А. В., Панич А. Е., Свирская С. Н., Кретова Е. И., Медведева Е. С. / Пути оптимизации свойств пьезокерамического материала ЦТС-19 // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №4 (153).

[3] J.C. Niepce, D. Hugentobler // Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials. 1991.

[4] M.-H. Zhang, L. Fulanović, C. Zhao, J. Koruza / Review on field-induced phase transitions in lead-free NaNbO_3 -based antiferroelectric perovskite oxides for energy storage // Journal of Materiomics, V. 9, Issue 1, 2023, P. 1-18.

Квантовые интерференционные вклады в проводимость в структурах InGaAs/GaAs

Шишкин Максим Александрович¹

С.В. Гудина², В.Н. Неверов²

¹Уральский федеральный университет

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уро РАН

m-a-k-s225@bk.ru

Существующие квантовые интерференционные поправки к проводимости от невзаимодействующих электронов (эффекты слабой локализации, $\Delta\sigma^{\text{WL}}$) и за счет модифицированного беспорядком электрон-электронного взаимодействия, $\Delta\sigma^{\text{ee}}$, можно выделить, благодаря их зависимости от температуры T , и магнитного поля, B . Разные виды функциональной зависимости проявляются в зависимости от степени беспорядка: разделяются предел чистого металла или рассеяние на одиночной примеси (баллистический режим $k_B T \tau / h > 1$, где k_B – постоянная Больцмана, τ – время свободного пробега электрона, h – постоянная Планка) и «грязный» предел, где проявляется логарифмическая зависимость от температуры (диффузионный режим $k_B T \tau / h \ll 1$).

Кроме того, чтобы разделить вклады от этих эффектов необходимо приложить магнитное поле, т.к. характеристический интервал магнитных полей B является разным у каждого вклада. Поле $B_\phi = h(4eD\tau_\phi)^{-1}$ (D – коэффициент диффузии, e – заряд электрона) является характеристикой эффекта слабой локализации и определяется временем сбоя фазы электронной волны τ_ϕ .

Исследованы квантовые интерференционные вклады в проводимость структур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs в широком интервале температур в диффузионном и баллистическом режимах.

Приложение магнитного поля $B > B_\phi$, когда вклад от слабой локализации уже подавлен, позволило рассматривать исключительно вклад от электрон-электронного взаимодействия. Построение температурной зависимости σ_{xx} при $B = 0$ позволило судить о присутствии вкладов квантовых поправок. Анализ зависимости сопротивления ρ_{xx} от B^2 при фиксированных температурах показал расхождение с теорией, утверждающей существование точки, сопротивление в которой не зависит от температуры. Причины расхождения рассматриваются.