

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО», МИНОБРНАУКИ РОССИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 23 июня 2022 г. № 18

О присуждении Кааби Сабаху Абеду Давуду, гражданину Ирака, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Электрические, оптические и фотоэлектрические свойства легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ » по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств принята к защите 08.04.2022 (протокол заседания №14) диссертационным советом 24.2.392.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки России, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013, № 75-нк; приказы об изменении состава совета от 15.12.2015 №1598/нк-9; от 28.09.2016 № 1180/нк-52; от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк-50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 № 301/нк-66, от 24.09.2019 №873/нк-26; приказ об установлении полномочий совета от 03.06.2021 №561-нк (Приложение 1/597); приказ об изменении состава совета от 15.10.2021 №1046/нк-33.

Соискатель Кааби Сабах Абед Давуд, 1961 года рождения, в 2003 г. окончил Технологический университет (University of Technology), г. Багдад, Ирак, (прежнее название – Военный инженерный колледж, Military College of Engineering) и получил степень магистра по специальности «Лазерная технология» (Laser Technology).

В 2021 г. соискатель освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» по направлению подготовки кадров высшей квалификации 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи, направленность «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Диссертация выполнена на кафедре физики твердого тела ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки РФ.

*Научный руководитель:* Скрипаль Александр Владимирович, д. ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», кафедра физики твердого тела, заведующий кафедрой.

*Официальные оппоненты:*

1. Коротков Леонид Николаевич, д.ф.-м.н. (01.04.07), профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, кафедра физики твердого тела, профессор,

2. Быков Виктор Александрович – д. т. н. (05.27.01, 01.04.01), Группа компаний НТ-МДТ Спектрум Инструментс (НТ-МДТ СИ), г. Москва, г. Зеленоград, Почетный президент,

дали положительные отзывы на диссертацию.

*Ведущая организация* ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, в своем положительном заключении, подписанном Бобрешовым Анатолием Михайловичем, д.ф.-м.н. (01.04.03), профессором, заведующим кафедрой электроники, указала, что в диссертационной работе Кааби Сабаха Абеда Давуда решена задача, имеющая существенное значение для научного направления в области разработки электронной компонентной базы микро- и наноэлектроники, квантовых устройств, связанная с установлением особенностей электрических, оптических и фотоэлектрических свойств легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ . Диссертация Кааби Сабаха Абеда Давуда соответствует критериям п. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ общим объемом 6.1 п.л. (авторский вклад 1.5 п.л.), все – по теме диссертации; в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях и изданиях, входящих в международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science). В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Korolik O.V., Kaabi S.A.D., Gulbinas K., Mazanik N.V., Drozdov N.A., Grivickas V. Band edge photoluminescence of undoped and doped TlInS<sub>2</sub> layered crystals// Journal of Luminescence. 2017. Volume 187. July. P. 507-512.

2. Kaabi Dawood S.A., Fedotov A.K., Mammadov T.G., Zukowski P., Koltunowicz T.N., Saad A.M., Drozdov N.A. Admittance and Permittivity in Doped Layered TlGaSe<sub>2</sub> Single Crystals // Acta Physica Polonica A. 2014. Vol. 125. No. 6. P. 1267–1270.

3. Кааби С. А., Дроздов Н. А., Королик О. В. Оптическое поглощение и комбинационное рассеяние света в легированных кристаллах TlGaSe<sub>2</sub> и TlInS<sub>2</sub> // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 112-122. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-112-122

На автореферат поступило 5 положительных отзывов: из ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: 1) от д.т.н. **Носкова В. Я.** (05.12.17) и 2) от д.ф.-м.н. **Шура В. Я.** (01.04.10); из ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара, от д.ф.-м.н. **Арефьева А. С.** (01.04.03) и д.ф.-м.н. **Клюева Д. С.** (01.04.03); из Инженерно-технологической академии Южного федерального университета, г. Таганрог, от к.т.н. **Малышева И. В.** (05.27.01) и к.т.н. **Смирнова В. А.** (05.27.01); из ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» к.т.н. **Насыбуллина А. Р.** (05.12.07);

В отзывах на автореферат содержатся замечания: по формулировке первого положения, выносимого на защиту; *об отсутствии*: а) указания на возможность унификации полученных результатов, б) данных об использованных вычислительных ресурсах при обработке полученных результатов; в) результатов исследования частотных зависимостей адмитансов для образцов кристаллов с примесями вдоль плоскости скола; г) «внимания релаксационным процессам для неравновесных носителей заряда и методикам их анализа»; д) объяснения о качественном различии свойств одного и того же материала с различными примесями; е)

данных о температуре, при которой производились измерения оптической ширины запрещенной зоны исследуемых материалов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается близким соответствием проводимых исследований официальными оппонентами и сотрудниками ведущей организации тематике диссертации, высокой квалификацией и компетентностью оппонентов, известностью и общепринятыми достижениями организации в микро- и нанoeлектронике, квантовых устройствах, а также в смежных областях; отсутствием совместных печатных работ с соискателем и способностью определить научную и практическую ценность диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработана** новая методика выявления фазового перехода кристаллов из соразмерной сегнетоэлектрической в несоразмерную фазу в низкотемпературной области и перехода из несоразмерной фазы в соразмерную нормальную фазу в высокотемпературной области по особенностям на температурных зависимостях электросопротивления на постоянном токе и действительной части адмитанса на переменном токе;

**предложен** новый подход к характеристике механизма электропереноса на постоянном и переменном токе в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  вдоль плоскостей наилучшего скола;

**доказано** преобладание индуктивного вклада над емкостным для высокотемпературной соразмерной фазы (выше 250 К) при частотах 1 – 10 МГц в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$ , что проявляется в виде эффекта отрицательной ёмкости;

**введены** новые подходы к интерпретации частотных зависимостей действительной и мнимой частей адмитанса легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ .

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**доказано**, что проводимость на переменном токе в высокотемпературной соразмерной фазе (выше 250 К) поперек плоскости наилучшего скола легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  определяется прыжковым механизмом, отличающимся от классического механизма Мотта, согласно которому адмиттанс  $\text{Re}$

$G_{\perp}(f) \sim f^{\alpha}$  с  $\alpha = 0,8$ , тем, что показатель степени  $\alpha$  сам зависит от частоты и меняется в диапазоне  $0,2 < \alpha < 1,2$ .

Применительно к проблематике диссертации эффективно, с получением обладающих новизной результатов, использован комплекс стандартных методов измерения параметров структуры материалов и их электрических, диэлектрических, оптических и фотоэлектрических характеристик в широком температурном диапазоне, охватывающем фазовые переходы соразмерная-несоразмерная и несоразмерная-соразмерная фазы, и включающий метрологически обоснованные методы обработки данных;

**изложены** доказательства возникновения при частотах 1 – 10 МГц в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  эффекта отрицательной ёмкости;

**раскрыто** противоречие, связанное с уменьшением времени жизни носителей заряда до 0,65 нс при 70 К и до 2 пс при 295 К в образцах  $\text{TlGaSe}_2$ , легированных железом 0,1 %;

**изучены** температурные изменения спектров комбинационного рассеяния света в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  с целью однозначного установления наличия и положения фазовых переходов в исследуемых материалах;

**установлен** активационный характер механизма переноса тока вдоль плоскостей наилучшего скола у легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  с энергиями активации порядка 250 мэВ в низкотемпературной соразмерной фазе и 40-50 мэВ в высокотемпературной соразмерной фазе.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**показана** возможность разработки планарных (безвитковых) индуктивных элементов для микроэлектроники на основе использования эффекта отрицательной емкости в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  в высокотемпературной соразмерной фазе при частотах 1 – 10 МГц;

**открыта** возможность создания фотоприемников, работающих в диапазоне температур от 70 К до 295 К, с заданными временными характеристиками на основе использования легированных железом 0,1 % кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$ ;

**выявлена** независимость оптической ширины запрещенной зоны кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  при легировании примесями (Al – 0,1 %; В – 1 %; Tb – 0,1 %; Er – 0,1 % для  $\text{TlGaSe}_2$  и В – 3 %; Ag – 0,1 и 0,2 %; Nd – 0,1 %; Tb – 0,1% для  $\text{TlInS}_2$ );

**обнаружена** в спектрах КРС кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$ , легированных атомами бора (1 %) полоса  $160 \text{ см}^{-1}$ , относительная интенсивность которой определяется геометрией опыта и поляризацией возбуждающего излучения;

**исследования выполнялись** в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации по теме «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами» №16.1575.2014/К, шифр: «Наноскоп-2».

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**для экспериментальных работ** достоверность результатов обеспечена применением для получения монокристаллов соединений  $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}^6$  метода направленной кристаллизации по Бриджмену-Стокбаргеру; применением современной измерительной аппаратуры (сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) типа LEO1455-VP с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа, измерительная система на базе рефрижератора замкнутого цикла HFMS компании Cryogenic Ltd., мультиметр (Sub-Femtoamp Remote SourceMeter 6430) фирмы Keithley, нановольтметр 2182A фирмы Keithley, LCR-метры Agilent 4980A RCR и 42841A, спектрофотометр MC 122 («PROSCAN SPECIAL INSTRUMENTS»), конфокальный спектрометр Nanofinder High End (Lotis ТП, Беларусь – Япония);

**использованы** специализированные программные пакеты, входящие в состав применяемой измерительной аппаратуры и позволяющие с высокой точностью и надежностью контролировать процесс сбора данных и их обработки для получения достоверной информации о характеристиках исследуемых кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  с заданной погрешностью;

**теория** построена с использованием подхода, базирующегося на прыжковом механизме переноса тока поперек плоскости наилучшего скола легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ , отличающемся от классического механизма Мотта, согласно которому адмиттанс  $\text{Re } G_{\perp}(f) \sim f^{\alpha}$  с  $\alpha = 0,8$ , тем, что показатель степени  $\alpha$  сам зависит от частоты и меняется в диапазоне  $0,2 < \alpha < 1,2$ ;

**использована идея**, базирующаяся на активационном характере механизма переноса тока вдоль плоскостей наилучшего скола у легированных кристаллов

TlGaSe<sub>2</sub> и TlInS<sub>2</sub> с энергиями активации порядка 250 мэВ в низкотемпературной соразмерой фазе и 40-50 мэВ в высокотемпературной соразмерой фазе;

**установлено** качественное и количественное соответствие полученных результатов данным из известных литературных источников.

**Личный вклад соискателя** выразился в проведении экспериментальных исследований, обработке результатов измерений, в применении моделей, адекватно описывающих результаты экспериментов, и анализе полученных результатов.

Результаты представленных в диссертации исследований рекомендуются к использованию на предприятиях и в организациях электронной промышленности: АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов, АО «НПП «Исток» им. Шокина» г. Фрязино, Московская область, институтах Российской Академии Наук: СФ ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» г. Саратов, Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» г. Фрязино, Московская область; в высших учебных заведениях Минобрнауки РФ – ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»», г. Зеленоград, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» г. Самара, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», ФГБОУ «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ», Инженерно-технологическая академия (ТРТИ), Южный федеральный университет, г. Таганрог.

Содержание диссертации удовлетворяет требованиям пп. 9-11,13,14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: 1) о необходимости пояснения используемых в диссертации терминов: со-

размерная и несоизмерная фазы; 2) о необходимости пояснения установлена ли связь индуктивного характера импеданса в  $\text{TlGaSe}_2$  с отрицательным дифференциальным сопротивлением и каков механизм отрицательной ёмкости в этих образцах; 3) о необходимости пояснения причины зависимости результатов измерений параметров легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  от геометрии опыта; 4) о необходимости пояснения причины зависимости интенсивности фотолюминесценции в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$ , легированных Al, от поляризации возбуждающего света; 5) о необходимости пояснения причины отличия энергии активации проводимости в низкотемпературной и высокотемпературной соразмерных фазах; 6) о необходимости пояснения механизмов переноса тока вдоль и поперек плоскостей наилучшего скола легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ ; 7) о необходимости пояснения причины существования длинновременного спада фотопроводимости в кристаллах  $\text{TlInS}_2$ , легированных бором; 8) о необходимости пояснения областей применения результатов диссертационной работы.

Соискатель Кааби Сабах Абед Давуд ответил на замечания, содержащиеся в отзывах ведущей организации и официальных оппонентом, и на заданные ему в ходе заседания вопросы и дал необходимые пояснения: 1) пояснил, что при фазовом переходе атомы смещаются из симметричных положений. Смещенные атомы при фазовом переходе образуют сверхрешётку. Если отношение периода сверхрешётки к периоду основной кристаллической решётки равно целому числу, то новая низкосимметричная фаза является соразмерной. Если отношение является иррациональным числом, то новая низкосимметричная фаза является несоизмерной фазой. Несоразмерная фаза является неупорядоченной фазой, то есть в кристалле отсутствует дальний порядок; 2) пояснил, что связь индуктивного характера импеданса в  $\text{TlGaSe}_2$  с отрицательным дифференциальным сопротивлением не была установлена, а механизм отрицательной ёмкости связан с пролётным эффектом при прыжковом механизме переноса тока в  $\text{TlGaSe}_2$ ; 3) пояснил, что причинами зависимости результатов измерений параметров легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  от геометрии опыта является с анизотропия кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ ; 4) пояснил, что причина зависимости интенсивности фотолюминесценции в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$ , легированных Al, от поляризации возбуждающего света связана с ориентацией вектора электрического поля световой волны относительно направления дипольного момента примесного центра; 5) пояснил, что причиной отличия энергии активации проводимости в низкотемпературной и вы-

сокотемпературной соразмерных фазах является изменение положения примесного уровня; б) пояснил, что вдоль плоскостей наилучшего скола у легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  наблюдается активационный механизм переноса тока, а поперек плоскости наилучшего скола наблюдается прыжковый механизм, отличный от классического механизма Мотта; 7) пояснил, что основной причиной медленного спада фотопроводимости является наличие в кристаллах  $\text{TlInS}_2$ , легированных бором, центров прилипания носителей заряда; 8) пояснил, что результаты диссертационной работы могут применены в микро-и наноэлектронике при разработке планарных (безвитковых) индуктивных элементов, в оптоэлектронике для создания фотоприемников и сенсоров.

Диссертация Кааби Сабаха Абеда Давуда содержит решение актуальной задачи в области разработки электронной компонентной базы микро- и наноэлектроники, квантовых устройств, связанной с установлением особенностей электрических, оптических и фотоэлектрических свойств легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ .

На заседании 23 июня 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Кааби Сабаху Абеду Давуду ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 25 человек (22 человека находились в месте проведения заседания, 3 человека участвовали в заседании Совета в удаленном интерактивном режиме), из них 9 докторов наук по специальности 2.2.2., участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 25, против – НЕТ, недействительных бюллетеней – НЕТ.

Председатель  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета

  
Аникин Валерий Михайлович

  
Сысоев Илья Вячеславович



23 июня 2022 г.