



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке, инновациям и  
цифровизации  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
университет»,

доктор химических наук, доцент

О.А. Козадеров

«30» мая 2022 г.

### Отзыв

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» на диссертацию Кааби Сабаха Абеда Давуда «Электрические, оптические и фотоэлектрические свойства легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

В последние годы у разработчиков электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники наблюдается значительный интерес к материалам, проявляющим ярко выраженные анизотропные свойства. К этим материалам относятся, в частности, слоистые соединения класса  $A^3B^3C^6$ , которые проявляют одновременно полупроводниковые и сегнетоэлектрические свойства.

Среди кристаллов типа сегнетоэлектрик-полупроводник можно выделить кристаллы  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ . Эти кристаллы обладают свойствами сегнетоэлектриков, которые характеризуются большой диэлектрической проницаемостью, высоким пьезомодулем, наличием петли диэлектрического гистерезиса, уникальными электрооптическими свойствами, и поэтому широко применяется во многих областях современной техники: радиотехнике, электроакустике, квантовой электронике и измерительной технике. Сочетание сегнетоэлектрических и полупроводниковых свойств в одном кристалле может дать неоспоримые преимущества при разработке принципиально новых элементов сенсорики, вычислительной техники, оптоэлектроники и ряда других отраслей современной науки и техники.

В связи с этим тема диссертационной работы Кааби Сабаха Абеда Давуда, посвященной установлению особенностей электрических, оптических и фотоэлектрических свойств легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ , является *актуальной задачей* для разработчиков электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 166 страницах, содержит 90 рисунков и список литературы из 133 наименований. Работа по структуре и объему соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, решаемые задачи, новизна исследований и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

Критический анализ современного состояния исследования легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$  проведен *в первом разделе* диссертации. На основе проведенного анализа сформулированы задачи диссертационного исследования.



Автором сделан вывод, что данные о температурных фазовых переходах в  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  весьма противоречивы, недостаточно сведений о влиянии примесей на структурные, электрические и оптические характеристики  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ .

Делается вывод, что полупроводниковые свойства сегнетоэлектриков-полупроводников  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  в сравнении с диэлектрическими описаны в литературе недостаточно подробно. В частности, это касается электрических, оптических и фотоэлектрических характеристик  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ .

**Во втором разделе** приведены данные по методике выращивания кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ , и морфологических особенностях выращенных кристаллов, которые были определены из результатов сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа и оптической микроскопии, а также обзор методов исследований, используемых в настоящей работе.

Исследуемые кристаллы были выращены вертикальным методом Бриджмена-Стокбаргера из твердой фазы. Показано, что кристаллы  $\text{TlGaSe}_2$  имеют явно выраженный слоистый характер, причем видимые слои совпадают с плоскостями скола.

Исследования показали наличие на поверхностях скола значительного количества крупномасштабных дефектов, форма и химический состав которых различался на поверхностях, полученных сколом вдоль слабо связанных слоев либо перпендикулярно им.

На торцевых сколах кристаллов слои имеют включения в виде единичных дендритов, или в виде их игольчатых скоплений неправильной формы. Сканирование вдоль этих включений при проведении рентгено-спектрального анализа показало, что игольчатые полосы и дендриты образованы селеном

На поверхности плоскостей слоев  $\text{TlGaSe}_2$  также можно различить множество отдельных включений или фрагментов различной формы и размера, большинство которых расположено на ступеньках скола. Определение элементного состава по поверхности слоев, выполненное вдоль нескольких линий, пересекавших указанные включения, показали наличие двух типов включений. В одних включениях наблюдается увеличенное содержание Se и уменьшенное содержание Ga по сравнению со средним составом кристалла, тогда как в других имеется избыток Se и недостаток Tl при практически однородном содержании Ga.

У кристаллов  $\text{TlInS}_2$ , выращенных тем же методом Бриджмена-Стокбаргера, другой вид поверхности. Кристаллы, легированные серебром, бором, эрбием и тербием имели относительно чистые слои, без наростов и включений. Образцы с бором и серебром, в отличие от остальных, имели еще специфические дефекты. На поверхности кристаллов, легированных серебром, наблюдались ямки в виде практически правильных кругов.

В кристаллах, легированных бором, наблюдались ямки прямоугольной формы размерами в несколько десятков микрон.

Основными методиками исследования, используемыми в данной работе, являлись:

Измерение температурных зависимостей полной (комплексной) проводимости образцов. Измерения проводились с помощью измерительной системы на базе рефрижератора замкнутого цикла HFMS компании Cryogenic Ltd, позволявших с высокой точностью и стабильностью измерять проводимость на постоянном и переменном токе, вольт-амперные характеристики, магнитосопротивление, эффект Холла в интервале температуры 1,9-305 К и в постоянном магнитном поле с индукцией до  $B = 8$  Тл.

Измерение спектров пропускания и отражения. Измерения осуществлялись с использованием спектрофотометра MC 122 (Proscan Special Instruments - Беларусь). Спектральный диапазон прибора 200 – 1100 нм, спектральное разрешение – не хуже 3,3 нм.

Спектры комбинационного рассеяния света измерялись с помощью конфокального спектрометра Nanofinder High End (Lotis III, Беларусь – Япония). В качестве источников



возбуждения используется твердотельный лазер, работающий на длине волны 532 нм. Мощность излучения, падающего на образец, ослаблялась до уровня 600 мкВт – 2 мВт для минимизации теплового воздействия на исследуемые объекты. Размер светового пучка на образце около 1 мкм. Обратнорассеянный свет диспергировался дифракционной решеткой 1800 штрихов/мм и детектировался глубоко охлаждаемой ПЗС-матрицей с разрешением не ниже  $1 \text{ см}^{-1}$ . Поляризаторы в канале детектирования не устанавливались. Спектральная калибровка выполнялась автоматически по линиям встроенной газоразрядной лампы и обеспечивала точность не ниже  $1 \text{ см}^{-1}$ .

Измерение времени жизни неравновесных носителей. Для возбуждения неравновесных носителей заряда использовался импульсный лазер с длиной волны 580 нм и длительностью импульса 2,5 нс. Время жизни определялось по кинетике спада фотопроводимости бесконтактным способом.

Для исследования структуры образцов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  использовался сканирующий электронный микроскоп типа LEO1455-VP с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа. Для визуализации поверхности образцов использовался также оптический микроскоп типа Olympus UIS-2 и оптическая система с цифровой регистрацией изображения комплекса Nanofinder.

**В третьем разделе** представлены результаты исследований фазовых превращений в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$ .

В кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  легированных железом (0,1-0,2 %), при охлаждении кристаллов в области температур 240-250 К при пропускании тока вдоль плоскостей наилучшего скола наблюдается особенность в виде максимума на температурных зависимостях электросопротивления  $R_{||}(T)$ , что можно приписать наличию структурного фазового перехода соразмерная – несоизмеримая фазы (СФ-НСФ) при температуре  $T_i$  (рис. 1)

В кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  легированных железом (0,1-0,2 %), тербием (0,1 %), серебром (0,1-0,2 %), бором ( $< 1$  %) при охлаждении кристаллов в области низких температур 105-120 К наблюдаются особенности (осцилляции  $R_{||}(T)$  либо максимум  $R_{\perp}(T)$ ) (см. рис. 2),  $\text{Re}G_{||}(T)$  и  $\text{Im}G_{||}(T)$  температурных зависимостей электросопротивления и импеданса, что можно приписать наличию структурного фазового перехода несоизмеримая – соразмерная фазы (НСФ-СФ) при температуре  $T_C$ .

Зависимости  $R(T)$  для  $\text{TlInS}_2$  не имеют явных особенностей в виде скачков  $R$ , указывающих на фазовый переход в диапазоне температур 210-300 К. Однако можно отметить, что в случае легирования этого типа кристаллов эрбием и тербием на кривой  $R_{||}(T)$  имеются два участка с изломом при  $T= 210$  К, указывающие на изменение энергии активации.

Легирование кристаллов  $\text{TlInS}_2$  примесями бора с концентрациями 3 % подавляет все структурные фазовые переходы.

Отмечено также, что у легированных образцов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  положение высокотемпературного фазового перехода СФ-НСФ на шкале температур (ступенька на кривых  $R(T)$  в диапазоне 220 – 245 К) зависит от режима измерения: при охлаждении образцов  $T_i$  лежит ниже, а при нагреве - выше.

В целом, совместный анализ температурных зависимостей проводимости кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  на постоянном и переменном токе разного легирования указывает на то, что у обеих серий образцов наблюдается высокотемпературный фазовый переход (в диапазоне 220 – 245 К). В обоих случаях эти аномалии можно связать с фазовым переходом СФ-НСФ около температуры  $T_i$ . В то же время низкотемпературные ФП в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  либо не наблюдались, либо ширина температурного интервала существования несоизмеримой фазы сильно уменьшалась, что приводило к сближению критических температур  $T_i$  и  $T_C$ .



**В четвертом разделе** приведены результаты исследований электрических и диэлектрических свойств кристаллов  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ .

Экспериментально исследовались кристаллы  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ , легированные Fe, Ag, V, Tb, Er и Al.

Было установлено, что проводимость на постоянном токе вдоль плоскостей наилучшего скола в области существования соизмеримых фаз (ниже  $T_C$  и выше  $T_i$ ) у легированных кристаллов  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$  имеет активационный характер с энергиями активации порядка 250 мэВ в низкотемпературной соизмеримой фазе и 40-50 мэВ для высокотемпературной соизмеримой фазы.

Для получения информации о механизмах переноса в легированных кристаллах  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$  были измерены частотные зависимости действительной части адмиттанса  $G_{\perp}$  и угла сдвига фаз  $\theta_{\perp}$  между током и напряжением кристаллов в области температур 80 – 300 К для ориентации тока перпендикулярно плоскости скола образцов.

Измеренные частотные зависимости действительной части адмиттанса показали:

1. При промежуточных частотах зависимость  $ReG_{\perp}(f)$  описывается моделью Мотта, что указывает на прыжковый характер переноса носителей заряда.
2. В области температур 80 – 300 К угол фазового сдвига между током и напряжением в диапазоне частот 1-10 МГц достигает значений  $+60^{\circ} \div +80^{\circ}$ . Это указывает на наблюдение так называемого эффекта «отрицательной емкости», т.е. преобладание индуктивной составляющей в реактивной части адмиттанса.

Исследование прыжковой проводимости на переменном токе в области температур ниже комнатной показало, что при температурах ниже 200 К в ряде исследованных образцов наблюдалась линейаризация кривых  $G_{\perp}(T)$  в координатах Мотта.

Исследования показали, что в случае электропереноса поперек слоев при понижении температуры происходит переход от прыжковой проводимости с постоянной длиной прыжка к проводимости с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям в окрестности уровня Ферми.

**В пятом разделе** приведены результаты оптических и фотоэлектрических исследований легированных кристаллов  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ .

Анализ спектров пропускания показал, что край поглощения составляет:  $2,105 \pm 0,025$  эВ для  $TlGaSe_2$ ,  $2,348 \pm 0,014$  эВ для  $TlInS_2$ .

Вне зависимости от геометрии эксперимента, максимальная интенсивность фотолюминесценции монокристаллов  $TlInS_2$  наблюдается для кристаллов, легированных редкоземельным элементом – эрбием. Из представленных спектров фотолюминесценции нелегированного кристалла  $TlInS_2$  следует, что уменьшение температуры приводит к монотонному смещению сигнала в область больших энергий.

В спектрах  $TlInS_2$  присутствуют узкие линии 2.553 эВ и 2.549 эВ, при этом линия 2.553 эВ соответствует излучательной рекомбинации свободного экситона в  $TlInS_2$ , узкая линия 2.549 эВ соответствует связанному экситону, а широкое низкоэнергетичное плечо, простирающееся в область энергий приблизительно до 2,45 эВ, соответствует её фонным повторениям.

Исследования комбинационного рассеяния света (КРС) кристаллами  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$  проводились в диапазоне температур от комнатной до 22 К.

Рамановские измерения были проведены на наборе образцов  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ , легированных различными примесями.

Эксперименты показали, что спектры КРС всех легированных образцов в основном совпадают со спектрами КРС образцов  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ , известными из литературы.

В спектрах КРС кристаллов  $TlGaSe_2$ , легированных бором (1 %), при возбуждении с торцевой стороны при комнатной температуре впервые обнаружена полоса



$160 \text{ см}^{-1}$ , относительная интенсивность которой определяется поляризацией возбуждающего излучения.

Измерения кинетики спада фотопроводимости показало, что, легирование кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  различными примесями приводит к образованию примесных каналов рекомбинации, описываемых моделью Шокли-Рида-Холла, через примеси: эрбий, тербий, железо; в кристаллах, легированных бором, возникают центры прилипания носителей заряда; в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$ , легированных железом 0,1 %, возникает дополнительный канал рекомбинации Шокли-Рида-Холла через глубокие центры, образованные примесью железа, что приводит к уменьшению время жизни неравновесных носителей заряда до 0,65 мс при 70 К и до 2 мкс при 295 К.

**В заключении** приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

Не вызывает сомнения научная новизна, обоснованность и значимость полученных диссертантом результатов. К наиболее **значимым новым научным результатам**, полученным автором, можно отнести:

1. Обнаружение в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  низкотемпературной осциллирующей зависимости электросопротивления на постоянном токе, связанной с фазовым переходом из соразмерной сегнетоэлектрической в несоразмерную фазу через температуру Кюри  $T_C$ , и высокотемпературной аномалии электросопротивления на постоянном токе в виде максимума либо скачка, а также минимума на температурной зависимости действительной части адмиттанса связанных с фазовым переходом из несоразмерной в соразмерную фазу при  $T = T_i$ .

2. Описание проводимости на переменном токе высоко-температурной соизмеримой фазы (выше 250 К) поперек плоскости наилучшего скола легированных кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  прыжковым механизмом, с частотной зависимостью типа степенного закона Мотта, отличающимся от классического механизма Мотта, но с показателем степени  $\alpha$ , зависящим от частоты и меняющимся в диапазоне  $0,2 < \alpha < 1,2$ .

3. Установление, что реактивная часть адмиттанса  $\text{Im}G_{\perp}(f)$ , измеренного поперек плоскостей наилучшего скола в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$ , характеризуется преобладанием индуктивного вклада над емкостным для высокотемпературной соизмеримой фазы (выше 250 К) при частотах 1 – 10 МГц, что проявляется в виде эффекта отрицательной ёмкости.

4. Установление, что поляризационно зависимая фотолуминесценция с максимумом на длине волны 605 нм в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$ , характерная для нелегированных кристаллов, сохраняется в кристаллах, легированных алюминием (0,1 %), неодимом (0,1 %) и бором (1 %), и гасится в кристаллах, легированных другими примесями. Подавление фотолуминесценции связывается с появлением эффективного канала безызлучательной рекомбинации через атомы примесей.

5. Обнаружение не описанной ранее в литературе полосы  $160 \text{ см}^{-1}$  в спектрах КРС кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$ , легированных атомами бора (1 %), относительная интенсивность которой определяется геометрией опыта и поляризацией возбуждающего излучения.

6. Обнаружение уменьшения время жизни носителей заряда до 0,65 мс при 70 К и до 2 мкс при 295 К в образцах  $\text{TlGaSe}_2$ , легированных железом 0,1 %, вследствие возникновения дополнительного канала рекомбинации Шокли-Рида-Холла через глубокие центры, образованные примесью железа.

Результаты работы имеют несомненную **ценность для практики**.

1. Впервые установлено возникновение в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  эффекта отрицательной емкости для высокотемпературной соизмеримой фазы (выше 250 К) при частотах 1 – 10 МГц, что открывает возможность разработки планарных (безвитковых) индуктивных элементов для микроэлектроники.



2. Установление прыжкового механизма переноса носителей заряда с показателем степени частотной зависимости электропроводности, зависящим от частоты, в высокотемпературной соизмеримой фазе (выше 250 К) легированных кристаллов  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ , позволяют осуществить разработку микроэлектронных сенсоров, чувствительных к изменениям температуры кристаллов и частоты переменного сигнала.
3. Впервые показано, что легирование кристаллов  $TlGaSe_2$  атомами бора (1 %) приводит к возникновению полосы  $160 \text{ см}^{-1}$  в спектрах КРС этих кристаллов. При этом относительная интенсивность возникающей полосы в спектрах КРС определяется геометрией опыта и поляризацией возбуждающего излучения.
4. Впервые установлено, что легирование образцов  $TlGaSe_2$  железом 0,1 % позволяет на порядок уменьшить время жизни носителей заряда до 0,65 мс при 70 К и до 2 мкс при 295 К.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательской работы в ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» 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».

*Обоснованность и достоверность* полученных диссертантом результатов обеспечивается использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов измерений при выполнении экспериментальных исследований, обоснованностью выбранного метода описания экспериментальных результатов, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов, качественным и количественным соответствием полученных результатов данным из известных литературных источников.

Можно утверждать, что научные положения и выводы сформулированные Кааби Сабахом Абедом Давудом представляются обоснованными и достоверными.

Диссертация содержит хорошо оформленный иллюстративный материал.

Отмечая несомненную научную и практическую ценность диссертационной работы, необходимо сделать ряд **замечаний**:

1. В выводах раздела 3 обнаруженные автором особенности на температурных зависимостях электросопротивления на постоянном токе и действительной части адмитанса на переменном токе автор связываются с фазовым переходом из соразмерной сегнетоэлектрической в несоразмерную фазу в низкотемпературной области и переходом из несоразмерной фазы в соразмерную нормальную фазу в высокотемпературной области. Однако в тексте раздела 3 на стр. 84 автор использует фразу «Исследования температурных зависимостей действительной части адмитанса подтвердили наличие фазовых переходов, наблюдавшихся при изучении электросопротивления на постоянном токе». Наличие фазовых переходов было установлено ранее, а автор связал обнаруженные им особенности с наличием фазовых переходов.

2. В разделе 4 приводятся температурные зависимости сопротивления образца  $TlInS_2<Tb>$  в аррениусовых координатах при измерении образца вблизи высокотемпературного фазового перехода из несоразмерной сегнетоэлектрической фазы в соразмерную и обратно (в режимах охлаждения и нагрева), которые несколько отличаются друг от друга. Можно ли сделать вывод о наличии гистерезиса вблизи высокотемпературного фазового перехода?

3. В разделе 4 для интерпретации частотных и температурных зависимостей проводимости на переменном токе и преобладания в реактивной части адмитанса



индуктивного вклада над емкостным для высокотемпературной соизмеримой фазы приводится модель прыжкового механизма переноса носителей заряда с частотной зависимостью типа степенного закона Мотта. Следует ли учитывать при интерпретации экспериментальных результатов наличие омической составляющей проводимости исследуемых кристаллов?

4. В разделе 5 автором не уточняется как влияет на кинетику релаксации фотопроводимости в легированных кристаллах  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$  низкотемпературный и высокотемпературный фазовые переходы?

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера, поэтому не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Защищаемые положения сформулированы в результате выполнения большого объема всесторонних экспериментальных исследований с использованием современной измерительной аппаратуры и обработки экспериментальных данных с использованием стандартных методов, что придает им высокий уровень обоснованности.

Диссертация написана грамотным и профессиональным языком.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Материалы диссертации изложены в 10 работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях и изданиях, входящих в международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science), в трудах международных и всероссийской конференциях – 8th International Conference NEET 2013 “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation”, Zakopane, Poland, June 18-21, 2013, 5th International Workshop on Teaching in Photovoltaics, Prague, 25th – 26th March 2010, седьмая Всероссийская научной школы-семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», Саратов, 2020–2021.

#### ***Соответствие содержания научной специальности.***

Диссертация Кааби Сабаха Абеда Давуда посвящена установлению особенностей электрических, оптических и фотоэлектрических свойств легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ . Она соответствует, согласно приказу Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118 «Об утверждении номенклатуры специальностей, по которым присуждаются ученые степени, ...», научной специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств (п.1 – Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин, п.2 – Исследование и разработка физических и математических моделей изделий по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования и п.4 – . Исследование, моделирование и разработка технологических процессов и маршрутов изготовления, методов измерения характеристик и совершенствования изделий по п. 1).

Результаты представленных в диссертации исследований могут быть рекомендованы 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 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: 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.

Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить, что работа Кааби Сабаха Абеда Давуда является законченным научным исследованием. Совокупность научных результатов, изложенных в диссертации, можно квалифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение для научного направления в области разработки электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, связанной с установлением особенностей электрических, оптических и фотоэлектрических свойств легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ .

**Заключение.** Считаю, что диссертационная работа Кааби Сабаха Абеда Давуда «Электрические, оптические и фотоэлектрические свойства легированных кристаллов сегнетоэлектриков-полупроводников  $TlGaSe_2$  и  $TlInS_2$ », 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 Кааби Сабах Абеда Давуд заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

**Отзыв составил:**

Заведующий кафедрой электроники  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
университет», д.ф.-м.н, профессор



Бобрешов Анатолий Михайлович

Отзыв заслушан и одобрен на заседании кафедры электроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» протокол № 3 от 24 мая 2022 г.

Почтовый адрес: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1;

Телефоны: +7 (473) 228-11-60 (1800); +7 (473) 220-83-94;

e-mail: [bobreshov@phys.vsu.ru](mailto:bobreshov@phys.vsu.ru)

Бобрешов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук (научная специальность 01.04.03 – Радиофизика), профессор, заведующий кафедрой электроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1.

