

УДК 621.315.592

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ p -GaSe(PЗЭ)

© 2019 г. А. Ш. Абдинов¹, Р. Ф. Бабаева², *

¹Бакинский государственный университет, Азербайджан, AZ 1145 Баку, ул. З. Халилова, 23

²Азербайджанский государственный экономический университет (UNEC), Азербайджан, AZ 1000 Баку, ул. Истиглалият, 6

*e-mail: Rena_Babayeva@unec.edu.az

Поступила в редакцию 20.03.2018 г.

После доработки 28.09.2018 г.

Принята к публикации 31.10.2018 г.

Исследованы электролюминесцентные (ЭЛ) свойства монокристаллов p -GaSe(PЗЭ) с содержанием введенной примеси $N \leq 10^{-1}$ ат. % при наличии эффекта переключения (ЭП). Установлено, что при таких значениях N параметры и характеристики ЭЛ и ЭП не зависят от химической природы введенной примеси (гадолия и диспрозия), и при содержании PЗЭ $N \approx 10^{-2} - 10^{-1}$ ат. % обеспечивается их высокая стабильность и воспроизводимость. Рассмотрена возможность применения изучаемых монокристаллов для создания высококачественных переключателей и источников света с S -образной ВАХ.

Ключевые слова: эффект переключения, электролюминесценция, локальные уровни, введенная примесь, редкоземельный элемент

DOI: 10.1134/S0002337X19040018

ВВЕДЕНИЕ

Динамичное развитие оптоэлектроники требует изучения электронных свойств и выявления возможностей практического применения полупроводниковых материалов с электролюминесцентными свойствами в видимой области оптического диапазона электромагнитного излучения. В связи с этим актуально исследование электролюминесценции, особенно инжекционной, в различных полупроводниках. В последние годы особый интерес вызывают наноматериалы (например, пористый кремний [1–5]), физические свойства которых можно варьировать в широком диапазоне путем изменения их геометрических параметров при постоянном химическом составе. Но при этом существуют определенные трудности создания источников видимого излучения на этих материалах, которые прежде всего связаны с их низким квантовым выходом, нестабильностью излучения, неоднородностью распределения интенсивности по площади, большой инерционностью, малыми сроками службы. Кроме того, подобные структуры (электролюминесцентные элементы), как правило, изготавливаются на основе различного типа электрических контактов ($p-i$, $n-i$, $p-n$, $p-p$, $n-n$ гомо- и гетеропереходов). Однако создание таких структур в большинстве случаев ограничивается технологическими трудностями, по-

этому круг материалов, применяемых для этой цели, а также диапазон излучения ограничены.

Появление новых возможностей практического применения вызывает значительный интерес к изучению особенностей электролюминесценции в давно известных полупроводниках. Одним из таких полупроводников является принадлежащий к классу слоистых соединений $A^{III}B^{VI}$ монокристаллический p -GaSe. Этот полупроводник перспективен для создания различного типа оптоэлектронных устройств [6–8], в том числе электролюминесцентных источников света видимого диапазона, а также низкоразмерных структур с уникальными свойствами [9–15]. В частности, имеющие форму дисков толщиной в один тетраслой квантовые точки этого соединения обладают хорошей фотостабильностью и высоким квантовым выходом люминесценции. В слоях монокристаллов p -GaSe наблюдаются инжекционная электролюминесценция (ЭЛ) [16], эффекты переключения (ЭП) различного типа (пороговый и бистабильный) [17] и возможность их совмещения в одном образце [18]. Последнее делает этот полупроводник перспективным материалом для создания переключателя и источника света с S -образной ВАХ. Однако наличие различных случайных дефектов (СД), в том числе макроскопических (МД) [19], влияет на стабильность и воспроизводимость электролюминесцентных свойств чистых (нелегированных специ-

ально) монокристаллов p -GaSe, что препятствует их успешному практическому применению.

Для уменьшения влияния дефектов на электронные свойства монокристаллов p -GaSe применялись различные методы. Было установлено, что, помимо термообработки, радиационного облучения и т.д., его можно уменьшать также слабым (при содержаниях введенной примеси $N \leq 10^{-1}$ ат. %) легированием некоторыми РЗЭ. Предполагается, что это происходит вследствие “сплочения” МД. Исходя из этого и результатов работ [20, 21] возникла идея о возможности повышения стабильности и воспроизводимости электролюминесцентных параметров монокристаллов p -GaSe путем их легирования РЗЭ.

Целью данной работы является получение высокоэффективного (со стабильными и воспроизводимыми параметрами) материала для создания переключателя и источника света с S -образной ВАХ на основе монокристаллов p -GaSe(РЗЭ) путем изучения ЭП и ЭЛ в одном образце, а также выяснения механизма влияния слабого легирования РЗЭ на эти эффекты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединение GaSe было синтезировано совместным сплавлением компонентов с чистотой 99.999%. Легирование осуществляли путем введения в шихту РЗЭ – гадолия (Gd) и диспрозия (Dy). Выбор в качестве примеси именно этих РЗЭ был обусловлен рядом причин. Во-первых, существует достаточное количество работ (см., например, [20, 21]) по получению и исследованию различных физических свойств легированных Gd и Dy монокристаллов p -GaSe, которые позволяют объяснить полученные нами экспериментальные результаты. Во-вторых, эти РЗЭ по своей электронной конфигурации, химической активности, устойчивости в сухом воздухе, электрохимическому подобию с Ga, а также значениям температуры плавления, атомного и ионного радиусов [22–24] являются эффективными для легирования GaSe. Использование же в качестве легирующих примесей двух разных РЗЭ объяснялось необходимостью выявления влияния химической природы введенной примеси на ЭЛ в исследуемом полупроводнике. Если влияние легирования на ЭЛ вызвано не процессами, непосредственно связанными с созданными введенными примесями локальными энергетическими уровнями (центрами), а изменением структуры основной матрицы исследуемого полупроводника, то не будет обнаруживаться зависимость ЭЛ от химической природы введенной примеси.

Монокристаллы, выращенные из синтезированного вещества методом Бриджмена [25], имели p -тип проводимости. Структура, фазовый и

элементный состав полученных слитков, состояние поверхности по плоскости естественных сколов были определены путем проведения комплексных исследований с помощью установок: ДСК-910, ADVNCE-8D, SINTECP 21, ДРОН-4-07 (CuK_α -излучение, шаг 0.05° , диапазон углов 8° – 135°), СЭМ фирмы Zeiss с энергодисперсионным анализатором.

Имеющие форму прямоугольного параллелепипеда образцы были сколоты из разных слитков, а также из различных участков одного и того же крупного монокристаллического слитка. Значение темнового удельного электрического сопротивления при 77 К (ρ_0) чистых образцов менялось в пределах $\sim 5 \times 10^4$ – 10^8 Ом см, а значения N и ρ_0 в легированных образцах составляли 10^{-5} – 10^{-1} ат. % и $\sim 5 \times 10^3$ – 10^9 Ом см соответственно. В легированных монокристаллах максимальное ($\sim 10^9$ Ом см) и минимальное ($\sim 5 \times 10^3$ Ом см) значения ρ_0 наблюдаются при $N \approx 5 \times 10^{-4}$ и $N \approx 10^{-1}$ ат. % соответственно.

Электрические контакты были созданы путем припаивания индия, олова, а также нанесением серебряной пасты на свежесколотые поверхности образцов на воздухе.

Измерения проводились в области $77 \leq T \leq 300$ К при напряженности электрического поля до $\sim 3.5 \times 10^3$ В/см в диапазоне длин волн 0.30–2.00 мкм при помощи экспериментальной установки, собранной на базе видоизмененного комплекса типа КСВУ-23. Для всех исследуемых образцов в режиме генератора напряжения снимались статическая ВАХ, а также спектральное распределение и зависимости яркости электролюминесцентного свечения от напряженности электрического поля (E), силы тока (i), протекающего через исследуемый образец, температуры (T) при питании электрической цепи от источников постоянного тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В монокристаллах p -GaSe(РЗЭ) с $N = 10^{-5}$ – 10^{-1} ат. %, так же как и в чистых кристаллах, при $T \leq 200$ К, начиная с определенного значения напряженности электрического поля E_3 (напряженности зажигания электролюминесценции), наблюдается ЭЛ. Значение E_3 соответствует области ВАХ, где имеет место заметная инжекция, увеличивается с ростом T и ρ_0 , а также зависит от материала электрических контактов. Наиболее низкая E_3 и высокая яркость свечения (B_λ) наблюдаются в образцах с индиевыми контактами.

ЭЛ начинается в приконтактной области “отрицательного” контакта и с дальнейшим ростом E постепенно расширяется в сторону “положительного”. Установлено, что параметры и характеристики ЭЛ (значения E_3 и B_λ , а также зависи-

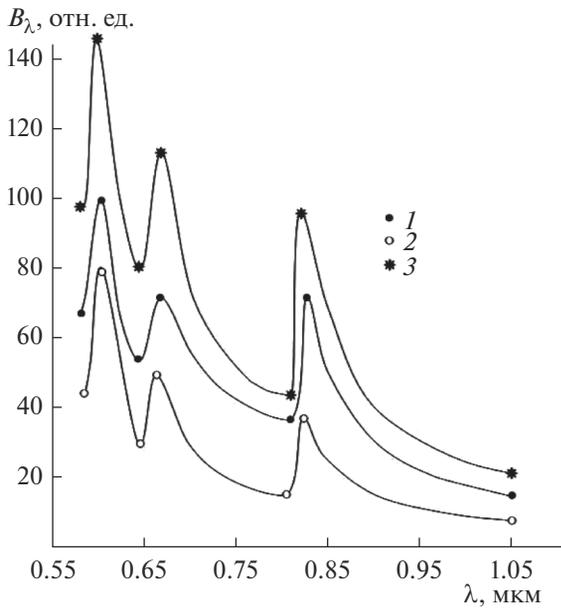


Рис. 1. Спектры ЭЛ в чистых (1) и легированных РЗЭ (2, 3) монокристаллах *p*-GaSe: $T = 77$ К; $E = 4E_3$; $i = 30$ мА; $N = 10^{-3}$ (2), 10^{-1} ат. % (3).

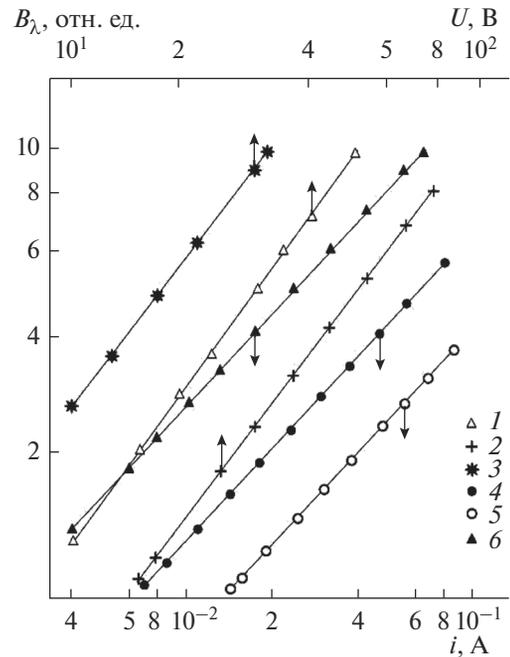


Рис. 2. Зависимости яркости ЭЛ от напряжения (1–3) и силы тока (4–6) в монокристаллах *p*-GaSe(РЗЭ): $T = 77$ К; $\lambda = 0.60$ мкм; $N = 0$ (1, 4), 10^{-3} (2, 5), 10^{-1} ат. % (3, 6).

мости B_λ от λ , T , U и i) в монокристаллах *p*-GaSe(РЗЭ) при рассмотренных значениях N от химической природы введенной примеси не зависят. Диапазон ($0.58 \leq \lambda \leq 1.10$ мкм), положения основного ($\lambda \approx 0.60$ мкм) и дополнительных ($\lambda_1 \approx 0.67$ и $\lambda_2 \approx 0.82$ мкм) максимумов спектра зависимости B_λ от λ ЭЛ в монокристаллах *p*-GaSe(РЗЭ) совпадают с таковыми для чистых монокристаллов (рис. 1). Резкий коротковолновый спад спектра ЭЛ соответствует значению ширины запрещенной зоны ~ 2.04 эВ [18], а основная и дополнительные полосы излучения — рекомбинационным центрам $\epsilon_{r1} \approx \epsilon_v + 0.20$ эВ и $\epsilon_{r2} \approx \epsilon_v + 0.54$ эВ соответственно. При этом яркость ЭЛ возрастает с U по степенному, а с i — по линейному законам (рис. 2). В зависимости от N меняются лишь яркость отдельных полос излучения и значение E_3 ; обе эти зависимости имеют немонотонный характер.

С ростом содержания РЗЭ значение E_3 сначала увеличивается (при $N \leq 10^{-4}$ ат. %) на ~ 25 –30% по сравнению со значением для самого низкоомного чистого кристалла (E_{30}), а затем (при $10^{-4} < N \leq 10^{-1}$ ат. %), постепенно уменьшаясь, при $N \approx 10^{-1}$ ат. % становится меньше, чем E_{30} (рис. 3, кривая 1). Значение же B_λ с ростом N сначала (при $N \leq 10^{-4}$ ат. %) на ~ 30 –40% уменьшается по сравнению со значением в самом низкоомном чистом кристалле ($\rho_0 \approx 5 \times 10^4$ Ом см), а далее (при $10^{-4} < N \leq 10^{-1}$ ат. %), резко увеличивается,

при $N \approx 10^{-1}$ ат. % в 1.5–2.5 раза превышает его (рис. 3, кривая 2). С повышением температуры сначала (в области $T \approx 160$ –170 К) B_λ почти не меняется, а далее происходит температурное тушение ЭЛ. Температура, при которой происходит полное тушение ЭЛ, для всех исследуемых образцов *p*-GaSe(РЗЭ) равна ~ 200 К (рис. 4).

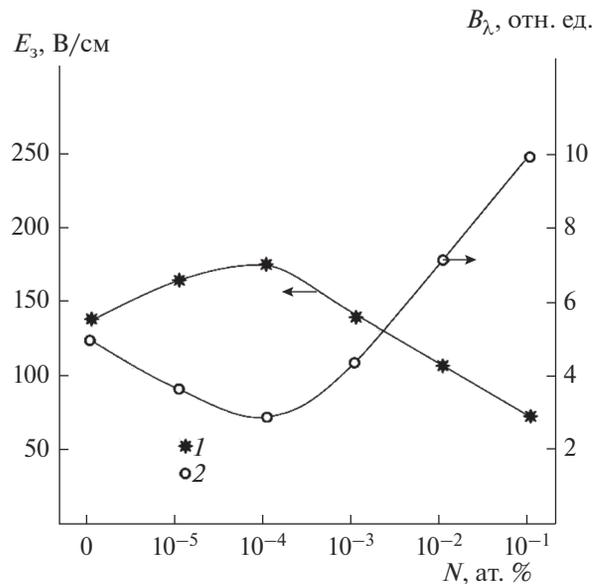


Рис. 3. Зависимости напряженности зажигания (1) и яркости ЭЛ (2) от содержания введенной примеси в монокристаллах *p*-GaSe(РЗЭ): $T = 77$ К, $\lambda = 0.60$ мкм.

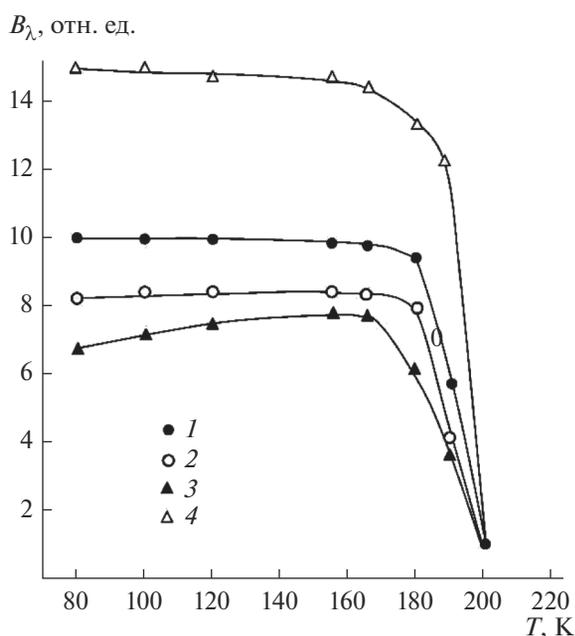


Рис. 4. Температурные зависимости яркости ЭЛ в монокристаллах p -GaSe(РЗЭ): $E = 4E_3$; $i = 30$ мА; $\lambda = 0.60$ мкм; $N = 0$ (1), 10^{-5} (2), 10^{-4} (3), 10^{-1} ат. % (4).

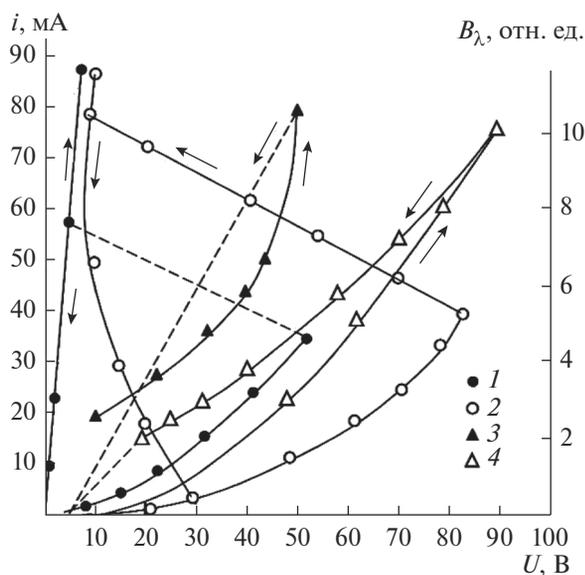


Рис. 5. ВАХ (1, 2) и зависимости яркости ЭЛ от напряжения (3, 4) в монокристаллах p -GaSe(РЗЭ) при бистабильном (1, 3) и пороговом (2, 4) ЭП: $T = 77$ К, $N = 10^{-1}$ ат. %, $\lambda = 0.60$ мкм.

При достижении электрического напряжения, равного напряжению ЭП ($U \approx U_{\text{пер}}$) [17, 18], помимо перехода образца в низкоомное состояние (рис. 5, кривые 1, 2), происходит скачкообразное тушение ЭЛ (рис. 5, кривые 3, 4). При этом до

$U \approx U_{\text{пер}}$, помимо ВАХ, идентичными являются также зависимости $B_\lambda(U)$ для образцов с поперечными и продольными контактами. При $U = U_{\text{пер}}$ яркость ЭЛ для них достигает своего максимального значения, а с момента начала ЭП ситуация резко меняется. В образцах с поперечными контактами (рис. 5, кривые 1, 3) за время $\tau \leq 10^{-8}$ с образец переходит из высокоомного состояния в низкоомное, а B_λ с такой же скоростью падает до нуля. В образцах с продольными электрическими контактами в области ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением в течение процесса переключения (рис. 5, кривая 3) B_λ сначала плавно уменьшается на ~ 30 – 40% по сравнению со значением при $U \approx U_{\text{пер}}$, а далее скачком падает до нуля – ЭЛ гаснет (рис. 5, кривая 4). В обоих случаях, пока образец находится в низкоомном состоянии, ЭЛ не наблюдается.

С ростом N напряженность электрического поля сначала (при $N \leq 10^{-4}$ ат. %) на ~ 20 – 25% увеличивается по сравнению со значением в чистых кристаллах $E_{\text{пер}}^0$, а далее (при $10^{-4} < N \leq 10^{-1}$ ат. %) уменьшается и становится на ~ 10 – 15% меньше, чем $E_{\text{пер}}^0$. Во всех образцах p -GaSe(РЗЭ) с $N \approx 10^{-2}$ – 10^{-1} ат. % параметры и характеристики ЭП являются почти одинаковыми, стабильными и воспроизводимыми.

Степень стабильности параметров и характеристик ЭП и ЭЛ проверялась путем более чем 200-кратных испытаний одного и того же образца, а их воспроизводимость – сравнением результатов для 100 различных образцов p -GaSe(РЗЭ) с $N \approx 10^{-1}$ ат. %.

Полученные результаты удовлетворительно объясняются на основе рекомбинации инжектированных неосновных носителей заряда (электронов) через r -центры рекомбинации [26] и резким уменьшением падения напряжения на исследуемом образце при ЭП [17].

Что же касается обнаруженного расхождения параметров и характеристик ЭЛ для разных образцов, их зависимости от предыстории исследуемого образца и содержания введенной примеси, то, скорее всего, это связано с наличием в p -GaSe случайных МД [19]. При легировании РЗЭ ионы введенной примеси, скапливаясь под действием внутреннего электрического поля на СД, увеличивают их размеры. Вследствие чего сначала (при $N \leq 10^{-4}$ ат. %) с ростом содержания РЗЭ пространственная неоднородность и, соответственно, влияние МД на инжекцию и генерационно-рекомбинационные процессы неравновесных носителей заряда усиливаются. Далее (при $10^{-4} < N \leq 10^{-1}$ ат. %) из-за “укрупнения” СД расстояния между соседними МД становятся сравнимы с длиной диффузии, а следовательно, и длиной

свободного пробега носителей заряда. При этом МД “сплачиваются”, и, подобно сильнолегированным полупроводникам, монокристаллы p -GaSe(РЗЭ) постепенно приближаются к квазиупорядоченному состоянию [27].

Помимо этого, из-за роста доли ковалентной связи между размещенными в соседних слоях ионами РЗЭ усиливается также межслойная связь в кристалле. Оба эти процесса в свою очередь приводят к росту V_λ , а также повышению стабильности и воспроизводимости параметров и характеристик ЭЛ в p -GaSe(РЗЭ). Независимость параметров и характеристик ЭЛ и ЭП от химической природы введенной примеси свидетельствует о том, что введенные при $N \leq 10^{-1}$ ат. % атомы РЗЭ, скапливаясь на СД, меняют лишь окружающую их область пространственного заряда (ОПЗ) и не создают примесные уровни. Поэтому влияние легирования РЗЭ на ЭЛ при таких содержаниях обусловлено изменением случайного электронного потенциала в исследуемом образце. В частности, при малых содержаниях введенной примеси ОПЗ соседних СД не перекрываются и случайный потенциал велик. При больших значениях N вследствие перекрытия ОПЗ соседних СД уменьшается и пространственная неоднородность структуры основной матрицы исследуемого образца [27]. В рамках этой модели внутрицентровые процессы, непосредственно связанные с электронной конфигурацией или химической природой примесного атома, а также с взаимодействием инжектированных носителей заряда с примесными центрами должны проявляться при более высоких содержаниях введенной примеси, что подтверждается и результатами [28].

Температурное тушение ЭЛ в исследуемом полупроводнике, очевидно, вызвано термическим опустошением r -центров, в результате чего уменьшается скорость рекомбинации и, соответственно, V_λ .

Тушение ЭЛ при ЭП объясняется резким уменьшением падения напряжения на образце и шнурованием тока, протекающего через него.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В легированных Gd и (или) Dy с $N \leq 10^{-1}$ ат. % монокристаллах p -GaSe, так же как в чистых кристаллах этого полупроводника, в области $T \leq 200$ К наблюдаются ЭЛ и ЭП.

Возможность совмещения в одном образце p -GaSe(РЗЭ) ЭП и ЭЛ позволяет создать на основе монокристаллов этого полупроводника переключатели и источники света с S -образной ВАХ с помощью простой технологии.

Параметры и характеристики ЭЛ, а также их стабильность и воспроизводимость в p -GaSe(РЗЭ) при $N \leq 10^{-1}$ ат. % не зависят от химической природы

РЗЭ и могут целенаправленно изменяться путем варьирования их количества.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят профессора С.Р. Фигарову за обсуждение полученных результатов, а также за ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cullis A.G., Canham L.T., Calcott P.D.J.* The Structural and Luminescence Properties of Porous Silicon // *J. Appl. Phys.* 1997. V.82. № 3. P. 909–965.
2. *Bisi O., Ossicini S., Pavese L.* Porous Silicon: a Quantum Sponge Structure for Silicon Based Optoelectronics // *Surf. Sci. Rep.* 2000. V. 38. № 1–3. P. 1–126.
3. *Koshida N., Matsumoto N.* Fabrication and Quantum Properties of Nanostructured Silicon // *Mater. Sci. Eng.: R: Reports.* 2003. V. 40. № 5. P. 169–205.
4. *Kanemitsu Y.* Light Emission from Porous Silicon and Related Materials // *Phys. Rep.* 1995. V. 263. № 1. P. 1–91.
5. *Евтух А.А., Каганович Э.Б., Манойлов Э.Г., Семеновко Н.А.* Механизм токопрохождения в электролюминесцентных структурах пористый кремний/монокристаллический кремний // *ФТП.* 2006. Т. 40. Вып. 2. С. 180–184.
6. *Драпак С.И., Ковалюк З.Д.* Эффект усиления фототока в гетероструктуре In_2O_3 -GaSe // *Письма ЖТФ.* 2001. Т. 27. № 18. С. 1–7.
7. *Manasson V.A., Kovalyuk Z.D., Drapak S.I., Katerinchuk V.N.* Polarisation-Sensitive Photodiode for the 632.8 nm Spectral Region // *Electron. Lett.* 1990. V. 26. № 10. P. 664.
8. *Драпак С.И., Ковалюк З.Д.* Влияние буферного слоя собственного окисла селенида галлия нанометровых размеров на электрические, фотоэлектрические и излучательные свойства гетероструктур ИТО-GaSe // *ФТП.* 2007. Т. 41. Вып. 3. С. 312–317.
9. *Cote M., Cohen M.L., Chadi D.J.* Theoretical Study of the Structural and Electronic Properties of GaSe Nanotubes // *Phys. Rev. B.* 1998. V. 58. № 8. P. R4277–R4280.
10. *Gautam U.K., Vivekchand S.R.C., Govindaraj A., Kulkarni G.U., Selvi N.R., Rao C.N.R.* Generation of Onions and Nanotubes of GaS and GaSe through Laser and Thermally Induced Exfoliation // *J. Am. Chem. Soc.* 2005. V. 127. № 11. P. 3658–3659.
11. *Gautam U.K., Vivekchand S.R.C., Govindaraj A., Rao C.N.R.* GaS and GaSe Nanowalls and Their Transformation to Ga_2O_3 and GaN Nanowalls // *Chem. Commun.* 2005. № 31. P. 3995–3997.
12. *Baliiskii O.A.* Self-Organised Nanostructures, Obtained by Oxidation of III–VI Compounds // *Mater. Lett.* 2006. V. 60. № 5. P. 594–599.
13. *Бахтинов А.П., Водопьянов В.Н., Слынько Е.И., Ковалюк З.Д., Литвин О.С.* Самоорганизация наноструктур теллуридов свинца и олова на Ван-дер-Ваальсовой поверхности селенида галлия (0001) // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33. Вып. 2. С. 80–88.

14. *Rybkovskiy D.V., Vorobyev I.V., Osadchy A.V., Obraztsova E.D.* Ab Initio Electronic Band Structure Calculation of Two Dimensional Nanoparticles of Gallium Selenide // *J. Nanoelectronics Optoelectronics*. 2012. № 7. P. 65–67.
15. *Rybkovskiy D.V., Osadchy A.V., Obraztsova E.D.* Electronic Structure of GaSe Quantum Dots // *J. Nanoelectronics Optoelectronics*. 2013. № 8. P. 110–113.
16. *Ахундов Г.А.* Электролюминесценция монокристаллов GaSe // *Оптика и спектроскопия*. 1965. Т. 18. № 4. С. 743–745.
17. *Ахундов Г.А., Абдинов А.Ш., Мехтиев Н.М., Кязымзаде А.Г.* Об эффекте переключения в *p*-GaSe // *ФТП*. 1973. Т. 7. № 9. С. 1830–1833.
18. *Ахундов Г.А., Абдинов А.Ш., Кязымзаде А.Г., Мехтиев Н.М.* Электро-люминесцентный переключатель из слоистого полупроводника GaSe // *ФТП*. 1975. Т. 9. № 5. С. 980–982.
19. *Шик А.Я.* Фотопроводимость случайно-неоднородных полупроводников // *ЖЭТФ*. 1975. Т. 68. С. 1859–1867.
20. *Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Джафаров М.А., Рзаев Р.М., Рагимова Н.А.* Влияние легирования диспрозием на фотоэлектрические свойства монокристаллов селенида галлия // *Неорган. материалы*. 1999. Т. 35. № 4. С. 410–412.
21. *Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф.* К вопросу о механизме влияния легирования редкоземельными элементами на фотолюминесценцию монокристаллов соединений A_3B_6 со слоистой структурой // *Прикладная физика*. 2004. № 5. С. 75–78.
22. *Свойства элементов / Под ред. Дрица М.Н.* Справочное издание. М.: Металлургия, 1985. 672 с.
23. *Угай Я.А.* Общая и неорганическая химия. М.: Высш. школа, 1997. 527 с.
24. *Хенней Н.* Химия твердого тела. М.: Мир, 1971. 223 с.
25. *Kokh A., Atuchin V.V., Gavrilova T.A., Kozhukhov A., Maximovskiy E.A., Pokrovsky L.D., Tsygankova A.R., Saprykin A.I.* Defects in GaSe Grown by Bridgman Method // *J. Microscopy*. 2014. V. 256. № 3. P. 208–212.
26. *Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Зегря Г.Г., Фирсов Д.А., Шальгин В.А., Ясиевич И.И., Берегулин Н.В.* Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах. Санкт Петербург: Наука, 2001. 248 с.
27. *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.
28. *Hsu Yu-Kuei, Chang Chen-Shiung, Huang Wen-Chang.* Electrical Properties of GaSe Doped with Er // *J. Appl. Phys.* 2004. V. 96. № 3. P. 1563–1567.