

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по науке

ФТИ им. им. А.Ф. Иоффе

д.ф.-м.н. Брунков П.Н.



2023 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертацию Бутаева Марата Раджабали оглы
«ЭПИТАКСИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СОЕДИНЕНИЙ A₂B₆ И
СОЗДАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ НА ИХ ОСНОВЕ»,
представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.19 – «Лазерная физика»

Актуальность темы.

Задача создания полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур широкозонных соединений A₂B₆ по-прежнему представляет большой интерес в связи с огромным числом потенциальных практических применений когерентного излучения зеленого диапазона видимого спектра. Несмотря на то, что времена жизни лазерных диодов на основе ZnSe оказались недостаточными для коммерческого использования из-за процессов медленной деградации, вызванных нестабильностью азотного акцептора, нелегированные структуры лишены данного недостатка. На сегодняшний день при использовании A₂B₆ лазеров с оптической накачкой продемонстрирована возможность перекрытия видимого диапазона от синей до желто-оранжевой части спектра. В частности, в ФТИ им. А.Ф. Иоффе несколько лет назад активно развивалась идея инжекционных лазерных конвертеров A₃N/A₂B₆, в которых излучение A₃N ЛД используется для накачки нелегированных A₂B₆ лазерных структур, и были продемонстрированы прототипы приборов, излучающих в диапазоне длин волны от 500 до 590 нм.

Диссертационная работа Бутаева М.Р. посвящена созданию и исследованию полупроводниковых лазеров с оптической и электронной накачкой с активной областью на основе гетероструктуры типа II CdS/ZnSe/ZnSSe, при этом основной упор делается на реализации полупроводниковых микрорезонаторных и дисковых лазеров, также известных как поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным внешним резонатором (VECSEL – vertical-external-cavity surface-emitting lasers). Несмотря на практическую невозможность эпитаксиального выращивания гетероструктур с распределенными брэгговскими отражателями на основе соединений A²B⁶ из-за отсутствия подходящих пар материалов с требуемым скачком показателей преломления и, одновременно, согласованных по периоду решетки с подложкой GaAs, существуют возможности переноса гетероструктуры A²B⁶ на другую подложку типа алмаза или SiC с лучшей

теплопроводностью при использовании селективного травителя для GaAs. В этом случае вместо эпитаксиального брэгговского зеркала можно использовать внешние диэлектрические брэгговские зеркала, состоящее, например, из окислов типа $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$, $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ и др., что и было продемонстрировано в рамках проведенного исследования.

Интенсивное развитие технологии полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ) во многом связано с возможностью их эффективной накачки лазерными диодами, и, соответственно, с потенциально высокой выходной мощностью излучения, в том числе в непрерывном режиме генерации, высоким качеством (малой расходимостью) лазерного пучка и возможностью эффективного нелинейного преобразования частоты генерации внутри резонатора. При этом данный тип лазеров практически не разрабатывается в России.

В этой связи, представленная диссертационная работа Бутаева М.Р., безусловно, обладает актуальностью как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Более того, одним из дальнейших перспективных направлений развития этой работы является получение эффективной лазерной генерации в востребованном среднем ультрафиолетовом диапазоне при использовании внутрирезонаторного удвоения частоты.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 190 страниц, включая 12 таблиц и 106 рисунков. Список использованной литературы содержит 151 наименование.

Во *введении* подробно обосновывается актуальность выбранной темы исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* приводится литературный обзор по теме диссертации. Проведен анализ современного состояния развития полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ) и рассмотрены основные пути реализации лазеров зеленого и среднего ультрафиолетового диапазонов.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора гетероструктуры $\text{Cd}(\text{Zn})\text{S}/\text{Zn}(\text{S})\text{Se}$ с разрывами зон типа II для реализации ПДЛ. Детально разобраны преимущества и недостатки применения такой системы. В частности, одним из потенциально полезных преимуществ системы с квантовыми ямами (КЯ) типа II $\text{CdS}/\text{ZnSe}/\text{ZnSSe}$ является малое внутреннее поглощение при неоднородной накачке КЯ. Немаловажным фактором является возможность выращивания гетероструктур, согласованных по периоду кристаллической решетки с подложкой GaAs, а также относительная простота технологической реализации эпитаксиальными методами. Также достоинством гетероструктуры CdS/ZnSe является низкий скачок показателя преломления на гетерограницах, что позволяет существенно ослабить эффект вытеснения моды за пределы запрещенной зоны фотонного кристалла (каким является периодическая структура) и из максимума линии усиления, и тем самым достигнуть минимального порога генерации, который можно получить при резонансно-периодическом усилении.

Третья глава посвящена моделированию и расчету исследуемых гетероструктур, составов барьерных слоев, необходимых для компенсации упругих напряжений в гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe, а также спектров оптического усиления и люминесценции этих гетероструктур в зависимости от уровня возбуждения, основанном на согласованном решении уравнений Пуассона и Шредингера. В этой же главе проведены расчеты зонной диаграммы гетероструктуры, в том числе с учетом взаимной диффузии атомов Cd и Zn в процессе выращивания гетероструктуры методом газофазного осаждения из элементоорганических соединений (ГФЭЭОС).

Четвертая глава посвящена выращиванию гетероструктур CdS/ZnSe/ZnSSe методом ГФЭЭОС, а также их исследованию методами люминесцентной микроскопии, фото- и катодолюминесценции, атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии. Приведено описание лабораторной установки ГФЭЭОС и подробно описана технология выращивания гетероструктур. В этом разделе автором подробно исследованы процессы взаимодиффузии Cd и Zn на гетероинтерфейсе CdS/ZnSe и предложены пути борьбы с этим явлением: взаимодиффузию удастся в существенной степени подавить при уменьшении потоков VI/II до уровня ~ 2-4 при выращивании слоёв CdS и ZnSe.

Пятая глава посвящена реализации различных полупроводниковых лазеров на полученных гетероструктурах и их исследованиям. В этой связи стоит отметить не самое удачное название диссертационной работы «Эпитаксия низкоразмерных гетероструктур соединений A^2B^6 и создание полупроводниковых дисковых лазеров на их основе», так как в этой главе представлены результаты не только по достижению генерации в ПДЛ на основе гетероструктур CdS/ZnSe/ZnS, но и результаты исследований лазерных структур с микрорезонатором при оптической накачке и накачке электронным пучком.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Новизна исследований и полученных результатов.

Основной целью диссертационной работы Бутаева М.Р. являлось создание полупроводникового дискового лазера с оптической накачкой на основе гетероструктуры типа II CdS/ZnSe/ZnSSe, излучающего в зеленой области спектра. Из наиболее важных результатов, имеющих научную новизну, на наш взгляд, необходимо выделить следующие:

1) Впервые методом газофазного осаждения из элементоорганических соединений выращены гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением для полупроводниковых лазеров, излучающих в зеленой области спектра.

2) Впервые использована методика измерения сопротивления растекания тока при «фиолетовой» подсветке контакта зонда с поверхностью скола гетероструктуры в атомно-силовом микроскопе для обнаружения разделения носителей заряда в гетероструктуре с разрывами зон типа II.

3) Впервые на выращенных гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением реализованы различные (как лазер с микрорезонатором, так и с

внешним зеркалом обратной связи) полупроводниковые лазеры с продольной оптической накачкой, излучающие в зеленой области спектра. При продольной накачке микрорезонатора излучением «фиолетового» лазерного диода, достигнута импульсная мощность до 0.32 Вт на длине волны $\lambda=525$ нм с эффективностью 10 %. В случае полупроводникового дискового лазера с составным резонатором продемонстрирована лазерная генерация в зеленой области спектра на длине волны $\lambda=521$ нм с импульсной мощностью 57 мВт и дифференциальной эффективностью 1.5 %.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, представленных в диссертационной работе Бутаева М.Р., подтверждается проведенными экспериментальными и теоретическими исследованиями, повторяемостью и воспроизводимостью экспериментальных результатов, полученных с использованием современного сертифицированного оборудования, корреляцией экспериментальных результатов с проведенными расчетами и с результатами теоретических работ других исследовательских групп, внутренней непротиворечивостью результатов, а также успешным представлением основных результатов диссертации на российских и международных конференциях. Метрологическое обеспечение исследований подкреплялось использованием большого ряда экспериментальных методик. Так, для структурной характеристики образцов использовались методы рентгеновской дифрактометрии, просвечивающей электронной микроскопии, люминесцентной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. Исследование оптических свойств выращенных гетероструктур проводилось методами фото- и катодолюминесценции.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы определяется суммой новых результатов, часть которых отмечена выше. Следует отметить большой объем экспериментального материала.

Несомненный интерес представляет технологическая часть работы, а именно установление связи между величиной взаимной диффузии атомов Cd и Zn, приводящей к размытию КЯ в процессе выращивания гетероструктуры методом ГФЭЭОС и параметрами технологического процесса. Диссертантом показано, что заметная диффузия, наблюдающаяся при типичных условиях роста – температуре эпитаксии $\sim 450^\circ\text{C}$ и соотношении потоков элементоорганических соединений VI/II ~ 10 , может быть существенно подавлена, если рост слоёв CdS и ZnSe квантовой ямы проводить при пониженном соотношении потоков VI/II $\sim (2-4)$. В этом случае уменьшение взаимной диффузии атомов Cd и Zn, по-видимому, связано с уменьшением вакансий катионов, способствующих диффузии атомов металлов. При этом при сильном уменьшении соотношения потоков VI/II можно ожидать перехода в режим стабилизации поверхности роста атомами металлов.

Также интерес представляет проведенные автором расчеты оптических переходов и коэффициента оптического усиления для гетероструктуры CdS/ZnSe с разрывами зон типа II. Неожиданным результатом проведенных расчетов изменения зонной диаграммы гетероструктуры CdS/ZnSe в результате размытия КЯ в процессе роста является тот факт, что при значительном времени отжига КЯ при температуре эпитаксиального роста может происходить плавный переход от структуры зон типа II к структуре зон типа I (раздел 3.2.1.2 диссертации).

Рекомендации для использования результатов и выводов работы.

Результаты диссертационной работы Бутаева М.Р. могут быть использованы научными группами, работающими в области полупроводниковых лазеров, физики и технологии гетероструктур (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН, ООО «Лассард», АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха»).

Замечания по работе

- 1) Не очень удачно сформулированы научные положения. В частности, положение 2: «Выращивание гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe методом газофазного осаждения из элементоорганических соединений при оптимальной с точки зрения скорости роста и морфологии поверхности температуре $\sim 450^\circ\text{C}$ и соотношении VI/II ~ 10 приводит к взаимной диффузии атомов Cd и Zn в КЯ в процессе роста, и, как следствие, к неоднородности КЯ по глубине структуры. Эта взаимная диффузия существенно подавляется при выращивании слоев КЯ CdS и ZnSe при пониженных соотношениях VI/II $\sim 2-4$, что объясняется уменьшением вакансий металла вблизи КЯ, стимулирующим диффузию». В данной формулировке не очень понятно, что подразумевается под «при оптимальной с точки зрения скорости роста и морфологии поверхности температуре»? Если морфология поверхности выращиваемой структуры безусловно зависит от температуры эпитаксии и соотношения потоков VI/II, то связь этих параметров со скоростью осаждения слоев отнюдь не очевидна. С другой стороны, скорость роста крайне важна, если мы оцениваем степень размытия КЯ за счет взаимной диффузии Cd и Zn, так как именно скорость роста определяет время эпитаксии структуры и, соответственно, и времена "отжига" различных КЯ в гетероструктуре с множественными квантовыми ямами. Однако в формулировке положения значение скорости роста не указано.
- 2) Положение 4: «На выращенных гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением при продольной накачке излучением «фиолетового» лазерного диода реализованы полупроводниковый лазер с микрорезонатором с импульсной мощностью до 0.32 Вт на длине волны 525 нм и эффективностью 10%, и полупроводниковый дисковый лазер с мощностью до 17 мВт на длине волны 522 нм и углом расходимости менее 5 мрад».

Данное положение является скорее выводом или значимым результатом проведенной работы, чем научным положением.

- 3) При построении зонной диаграммы гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe (рис. 7, стр. 35) вызывает сомнения корректность определения разрывов энергетических зон на гетерогранице ZnSe/ZnSSe. В диссертации они определялись в соответствии с расчетной работой [S.-H. Wei, A. Zunger, Band offsets and optical bowings of chalcopyrites and Zn-based II-VI alloys J. Appl. Phys. 78, 3846 (1995)], где предсказывается существование заметного разрыва в зоне проводимости для гетероперехода ZnS/ZnSSe. С другой стороны, согласно широко используемому справочнику Адачи [S. Adachi, Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors, John Wiley & Sons, Ltd., 2009], где приведены ссылки на экспериментальные работы, а также теории модельного твердого тела Ван-де-Валле [C. G. Van de Walle. Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory. Phys. Rev. B 39, 1871 (1989)], разрыв зон в этой системе материалов практически полностью приходится на валентную зону ($\Delta E_c/\Delta E_v=0:100$). Более того, существуют экспериментальные работы, указывающие для данной системы даже существование типа II сопряжения зон [например, D. Bertho and C. Jouanin, Alloy effects on the band offsets of $ZnS_xSe_{1-x}/ZnSe$ heterostructures, Phys. Rev. B 47, 2184 (1993); S. Lankes et al., Photoreflectance Measurements on ZnSe/ZnS_{0.25}Se_{0.75} SQW, phys. stat. sol. (a) 152, 123 (1995)]. При этом при малом содержании серы в твердом растворе ($x\sim 0.1$) можно не учитывать влияние фактора упругих напряжений на изменение зонной структуры, т.е. считать, что мы имеем согласованный по периоду решетки гетеропереход.

Тем не менее, стоит отметить, что указанное несоответствие не оказывает сколь либо существенного влияния на расчёты оптических переходов и коэффициента оптического усиления для гетероструктуры CdS/ZnSe, проведенные автором.

- 4) В работе при анализе изображений поперечного сечения двух структур, выращенных при различном соотношении потоков VI/II, полученных методом атомно-силовой микроскопии в режиме измерения тока, протекающего через зонд (стр. 94, рис. 39), на основании некоторого размытия изображения первых КЯ (рис. 39 б) делается предположение о существовании сильной взаимной диффузии Cd и Zn в процессе эпитаксиального роста структуры. Однако, учитывая, что радиус закругления зонда (20 нм) и цена деления шкалы на рис. 39 б (20 нм) существенно превышают толщину сдвоенной КЯ (12 нм), можно предположить, что раздвоение картинка в левой части рис. 39 б может являться и артефактом изображения. При этом сравнении двух структур (на рис. 39а и 39б) препятствует отсутствие в таблице 9 параметров технологического процесса для структуры ГСМ-2. Более того, из работы не до конца понятно, подтверждается ли факт размытия КЯ для других выращенных структур?
- 5) НТ и КТ - крайне неудачные аббревиатуры, используемые в диссертации для обозначения криогенной (низкой, 15К) и комнатной (300К) температуры. Стандартно аббревиатура КТ - это квантовые точки, а НТ - high temperature. Почему было температуры не указать явно как в представленных рисунках - $T=15K$ и $T=300K$?
- 6) Текст диссертации содержит существенное количество грамматических и стилистических ошибок, а также ряд неудачных формулировок, особенно в разделе, посвященном описанию технологического процесса. В частности,

а) "Реальная температура на поверхности подложки калибровалась экспериментальным путем и **контролировалась условной температурой $T_{усл.}$** " (стр. 79-81). Из текста ниже можно понять, что под условной температурой понимается показания термопары, но сам термин явно неудачный.

б) "В частности, с помощью экспериментальных исследований, было установлено, что наилучшие структуры, **как с точки зрения идентичности КЯ по глубине**, так и по уровню интенсивности люминесценции достигаются при соотношениях потоков VI/II ~ 2-4 в слоях CdS и ZnSe." (стр 101). Из текста диссертации далее становятся понятно, что речь идёт об одинаковости толщин КЯ, однако представленная формулировка, мягко говоря, неудачна.

в) "ЛД на основе полупроводников A2B6 до сих пор отсутствуют из-за **ненадежности р-типа легирования и контактов**" (стр. 25). Более корректно было написать, что одной из основных причин медленной деградации A2B6 ЛД является нестабильность азотного акцептора и переход атома азота в междоузельное положение с образованием донорного комплекса под действием собственного излучения ЛД, в то время как представленная автором формулировка не позволяет понять сути проблемы.

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости её вклада в развитие технологии ГФЭЭОС п/п соединений A2B6, а также полученных результатов по практической реализации полупроводниковых лазеров зеленого спектрального диапазона.

Общая оценка работы

Несмотря на указанные недостатки, диссертация Бутаева М.Р. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне и в целом заслуживает высокой оценки. Она свидетельствует о широкой научной эрудиции соискателя, его высокой экспериментальной культуре. Диссертация написана понятным языком и хорошо структурирована. Тема и содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19 – «Лазерная физика». Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации и полученные результаты. Результаты работы прошли апробацию на российских и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Заключение

Диссертация Бутаева Марата Раджабали оглы «Эпитаксия низкоразмерных гетероструктур соединений A2B6 и создание полупроводниковых дисковых лазеров на их основе» полностью удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Бутаев Марат Раджабали оглы, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Доклад Бутаева М.Р. по материалам диссертации был заслушан и обсужден на расширенном семинаре лаборатории «Квантовой фотоники» 05.07.2023 г. Отзыв подготовлен к.ф.-м.н. Сорокиным С. В. и одобрен на заседании семинара лаборатории «Квантовой фотоники» 06.07.2023 г.

Старший научный сотрудник
Лаборатории квантовой фотоники
Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
кандидат физ.-мат. наук
Сорокин С.В.
Тел.: +7(812)292-7124
E-mail: sorokin@beam.ioffe.ru



Главный научный сотрудник,
Руководитель Лаборатории квантовой фотоники
Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
доктор физ.-мат. наук
Торопов А.А.
Тел.: +7(812)292-7124
E-mail: toropov@beam.ioffe.ru



Федеральное государственное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
Электронная почта: post@mail.ioffe.ru Факс: +7 (812) 297-1017 Телефон: +7 (812) 297-2245

Список работ сотрудников ведущей организации ФТИ им. А.Ф. Иоффе близких по тематике к теме диссертационной работы диссертации Бутаева М.Р.:

1. М.М. Зверев, Н.А. Гамов, Е.В. Жданова, Д.В. Перегудов, В.Б. Студенов, И.В. Седова, С.В. Гронин, С.В. Сорокин, С.В. Иванов, П.С. Копьев. Эффективный полупроводниковый лазер зеленого диапазона с электронно-лучевой накачкой на основе многослойных наноструктур $A^{II}B^{VI}$. ФТП, т.42, 12, 2008, с. 1472 - 1477
2. S.V. Ivanov, E.V. Lutsenko, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Gronin, A.G. Voinilovich, N.P. Tarasuk, G.P. Yablonskii, P.S. Kop'ev. Compact green laser converter with injection pumping, based on MBE grown II-VI nanostructures. J. Cryst. Growth, v.311, 7, 2009, p. 2120 – 2122; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.11.032>
3. М.М. Zverev, S.V. Ivanov, N.A. Gamov, E.V. Zdanova, V.B. Studionov, D.V. Peregoudov, I.V. Sedova, S.V. Gronin, S.V. Sorokin, P.S. Kop'ev, I.M. Olikhov. Green electron-beam pumped laser arrays based on II-VI nanostructures. Phys. Status Solidi B, v.247, 6, 2010, p. 1561 – 1563; <http://dx.doi.org/10.1002/pssb.200983274>
4. S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Gronin, G.V. Klimko, K.G. Belyaev, S.V. Ivanov, A. Alyamani, E.V. Lutsenko, A.G. Voinilovich, G.P. Yablonskii. Violet-green electrically pumped laser converters with output power over 150 mW. Electron. Lett., v.48, 2, 2012, p. 118 – 119; <http://dx.doi.org/10.1049/el.2011.2918>
5. М.М. Зверев, Н.А. Гамов, Е.В. Жданова, Д.В. Перегудов, В.Б. Студенов, С.В. Гронин, И.В. Седова, С.В. Сорокин, С.В. Иванов. Исследование постепенной деградации ZnSe-содержащих многослойных наноструктур – активных элементов лазеров с электронно-лучевой и оптической накачкой. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, т.1, 2013, с. 27 – 30
6. Е.В. Луценко, А.Г. Вайнилович, Н.В. Ржеуцкий, В.Н. Павловский, Г.П. Яблонский, С.В. Сорокин, С.В. Гронин, И.В. Седова, П.С. Копьев; С.В. Иванов, М. Аланзи, А. Хамидалдин, А. Альямани. Лазер с оптической накачкой на квантовых точках Cd(Zn)Se/ZnSe и микрочип-конвертер для желто-зеленого диапазона спектра. Квант. электрон., т.43, 5, 2013, с. 418 – 422
7. С.В. Сорокин, С.В. Гронин, И.В. Седова, М.В. Рахлин, М.В. Байдакова, П.С. Копьев, А.Г. Вайнилович, Е.В. Луценко, Г.П. Яблонский, Н.А. Гамов, Е.В. Жданова, М.М. Зверев, С.С. Рувимов, С.В. Иванов. Молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур широкозонных соединений $A^{II}B^{VI}$ для низкороговых лазеров с оптической и электронной накачкой. ФТП, т.49, 3, 2015, с. 342 – 348
8. М.М. Zverev, S.V. Sorokin, N.A. Gamov, E.V. Zdanova, V.B. Studionov, I.V. Sedova, S.V. Gronin, S.V. Ivanov. RT ZnSe-based lasers and laser arrays pumped by low-energy electron beam. Phys. Status Solidi C, v.13, 7-9, 2016, p. 661 – 664; <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.201510251>
9. S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Gronin, G.V. Klimko, K.G. Belyaev, M.V. Rakhlin, I.S. Mukhin, A.A. Toropov, S.V. Ivanov. CdTe/Zn(Mg)(Se)Te quantum dots for single

photon emitters grown by MBE/ J. Cryst. Growth, v.477, SI, 2017, p. 127 – 130;
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.12.018>

10. С.В. Сорокин, И.В. Седова, К.Г. Беляев, М.В. Рахлин, М.А. Яговкина, А.А. Торопов, С.В. Иванов. Наногетероструктуры с квантовыми точками CdTe/ZnMgSeTe для однофотонных источников, формируемые методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Письма ЖТФ, т.44, 6, 2018, с. 94 – 102;
<http://dx.doi.org/10.21883/PJTF.2018.06.45772.17075>