

# Широкополосное излучение суперлюминесцентных диодов на основе многослойных структур с квантовыми яма-точками InGaAs/GaAs

© М.В. Максимов<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>2</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, О.И. Симчук<sup>1</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>2</sup>, А.А. Бекман<sup>2</sup>, А.С. Паюсов<sup>2</sup>, С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.А. Калюжный<sup>2</sup>, М.М. Кулагина<sup>2</sup>, А.Е. Жуков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 190008 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: maximov.mikh@gmail.com

Поступила в Редакцию 26 мая 2023 г.

В окончательной редакции 16 июня 2023 г.

Принята к публикации 23 июня 2023 г.

Исследованы суперлюминесцентные диоды с активной областью на основе 5 и 7 слоев квантовых ямочек InGaAs/GaAs. Для реализации широкого спектра излучения без значительных провалов максимумы излучения отдельных слоев квантовых ямочек сдвинуты друг относительно друга на 15–35 нм. Центральная длина волны суперлюминесцентных диодов составила  $\sim 1$  мкм, а ширина линии излучения на половине высоты — 92 и 103 нм для суперлюминесцентных диодов с 5 и 7 слоями квантовых ямочек соответственно.

**Ключевые слова:** квантовые яма-точки, широкополосный источник излучения, суперлюминесцентный диод.

DOI: 10.21883/FTP.2023.04.55902.5262

## 1. Введение

Суперлюминесцентные диоды (СЛД) представляют значительный интерес для исследования фундаментальных основ излучения и усиления света в веществе, а также являются ключевыми компонентами для большого числа современных оптических систем. Активная область такого прибора должна обеспечивать высокую интенсивность люминесценции, при этом оптическая обратная связь в резонаторе подавлена, и режим лазерной генерации не достигается.

Одним из важных практических применений СЛД являются системы оптической когерентной томографии (ОКТ) во временной области, которые основаны на использовании широкополосного источника света и механически-подвижного опорного зеркала. Ключевым элементом ОКТ служит СЛД, основными наиболее общими требованиями к которому являются следующие: 1) большая ширина спектра излучения; 2) модуляции интенсивности (максимумы и провалы) в спектре должны быть минимизированы; 3) высокая выходная мощность. Чем шире полоса частот источника света, тем лучше разрешение и контраст биологических тканей в ОКТ изображении. Спектральные провалы и максимумы в спектре излучения нежелательны для систем ОКТ, а также и других применений, так как они могут стать источником ложных изображений. Третье требование, т. е. высокая выходная мощность, возникает из-за необходимости увеличения динамического диапазона и достижения максимально возможной чувствительности при

визуализации слабо рассеивающих областей в глубине образцов.

Широкополосные источники излучения оптического диапазона от 950 до 1150 нм крайне важны для реализации систем ОКТ, способных сканировать сетчатку глаза и другие органы, состоящие преимущественно из воды. Спектр поглощения воды имеет локальный минимум в области 1.06 мкм [1], поэтому использование таких источников уменьшает воздействие влаги на результаты исследования биологических объектов. Так как водосодержащие вещества имеют нулевую дисперсию в районе 1 мкм, исследование объектов на этих длинах волн уменьшает влияние дисперсии на разрешающую способность системы ОКТ [2]. Также следует отметить, что при одинаковой полуширине линии излучения более коротковолновый СЛД будет обеспечивать лучшее пространственное разрешение по глубине, которое пропорционально отношению квадрата длины волны излучения к ширине спектра [3].

Кроме ОКТ, суперлюминесцентные диоды широко используются и в других областях науки и техники. Важным применением для СЛД оптического диапазона 1–1.1 мкм являются волоконные гироскопы для беспилотных наземных транспортных систем. Технические требования к таким системам менее жесткие, чем к беспилотным летательным аппаратам, однако наземные системы должны быть достаточно дешевыми, надежными и работать в ИК спектральном диапазоне, относительно безопасном для зрения. Использование кремниевых фотодетекторов и приборов с зарядовой

связью (ПЗС) матриц, чувствительность которых быстро падает при увеличении длины волны более 1100 нм (что и определяет требуемый спектральный диапазон излучения СЛД), оказывает значительный эффект на уменьшение цены таких систем. Кроме того, СЛД перспективны для оптической передачи данных, генерации случайных чисел, а также в качестве источников света для получения изображений, начиная от микроскопов нового поколения и лазерных проекторов и заканчивая цифровой голографией и фотолитографией. СЛД находят широкое применение для научных исследований, в частности, в спектроскопии.

Традиционно в качестве активной области источников излучения в спектральной области от 950 до 1100 нм используют квантовые ямы (КЯ) InGaAs/GaAs. Однако разработка широкополосных СЛД на основе КЯ является достаточно сложной задачей. Спектральная ширина излучения КЯ относительно невелика (10–15 нм), а рост многослойной активной области требует использования сложной технологии компенсации упругих напряжений. Еще одна проблема связана с уменьшением плотности носителей в КЯ с их отдалением от *p*-эмиттера [4]. Это приводит к тому, что в спектрах усиления и электролюминесценции доминирует вклад от КЯ, наиболее близко расположенной к *p*-эмиттеру. Необходимо отметить, что в квантовых точках данный эффект менее выражен. В работе [5] исследован биполярный каскадный суперлюминесцентный диод, активная область которого состояла из четырех напряженных InGaAs/GaAs КЯ с длинами волн излучения основного состояния 1050, 1100, 1000 и 950 нм (перечислены в соответствии с расположением от *n*-эмиттера к *p*-эмиттеру). СЛД содержал туннельный *p*-*n*-переход в центре активной области, служащий для минимизации неравномерного распределения носителей между различными КЯ. Ширина спектра на половине высоты (full-width at half maximum, FWHM) данного СЛД в непрерывном режиме достигает 180 нм, выходная мощность при этом составила всего 0.65 мВт. При импульсной накачке достигнута выходная мощность 19 мВт при полуширине спектра 14 нм.

В последнее время в качестве активной области широкополосных СЛД используют самоорганизующиеся квантовые точки (КТ) InGaAs/GaAs. Неоднородное уширение ансамбля КТ, связанное с их дисперсией по форме и размеру, обуславливает достаточно большую полуширину линии излучения, которая типично составляет ~ 60 нм. Еще большее увеличение ширины спектра излучения СЛД и плавный профиль интенсивности без значительных модуляций может быть реализован за счет использования так называемой чирпированной (chirped) многослойной активной области, в которой максимумы в спектрах излучения отдельных слоев КТ сдвинуты таким образом, чтобы заполнить провалы между линиями основного и возбужденного состояний каждого из слоев КТ [6,7]. В качестве активной области инфракрасных СЛД часто используются так называемые точки-в-яме (dot-in-well, DWELL), полученные наращиванием начальных InAs-квантовых точек слоем InGaAs,

состав и толщина которого может варьироваться [8]. Наибольшие ширины спектра излучения достигнуты для оптического диапазона 1.2 мкм. Так, в работе [9] предложен СЛД с гибридной активной областью, состоящей из одной КЯ In<sub>0.34</sub>Ga<sub>0.66</sub>As и шести слоев КТ (DWELL) InAs/InGaAs/GaAs, ширина спектра на полувысоте которого достигала 290 нм. Выходная мощность при этом составила 2.4 мВт.

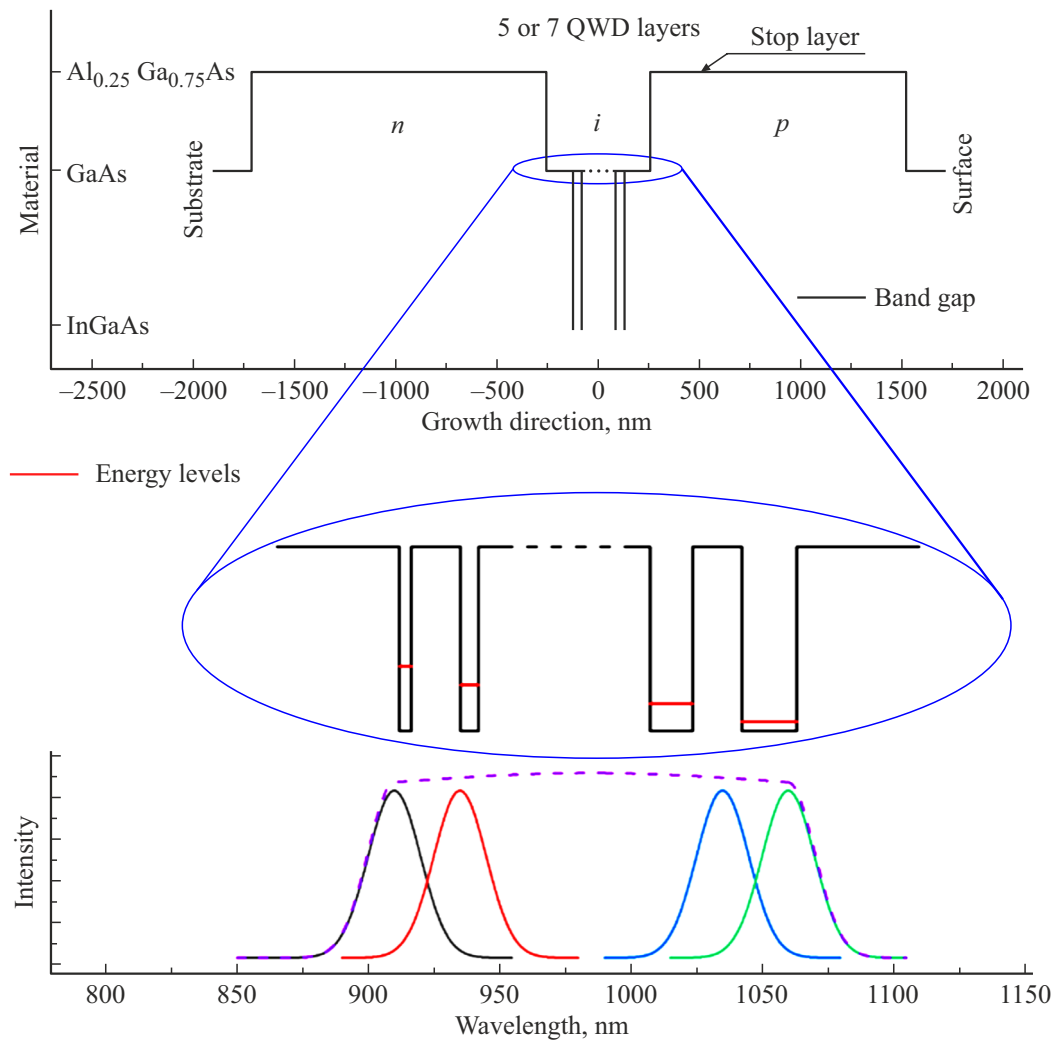
Для оптического диапазона 1.1 мкм получена полуширина спектра 140 нм при мощности излучения на выходе одномодового волокна 3 мВт [10]. В качестве активной области использовались 4 чирпированных слоя КТ различной высоты, повторенные 2 раза. Конструкция СЛД представляла собой наклонный полосок длиной 1 мм с расширяющимся в латеральном направлении волноводом.

Необходимо отметить, что использование In(Ga)As/GaAs КТ в качестве активной области СЛД инфракрасного диапазона ~ 1.1 мкм сопряжено с определенными трудностями. В таких КТ локализация носителей заряда относительно смачивающего слоя InGaAs достаточно мала, поэтому с ростом тока накачки пик от смачивающего слоя (~ 960 нм) быстро начинает доминировать в спектре на фоне насыщающихся длинноволновых пиков состояний КТ. Вследствие этого, при больших токах, соответствующих высокой выходной мощности, спектры сильно заужаются. Поэтому оказывается затруднительным одновременно добиться высокой мощности и широкого спектра излучения. В работе [11] продемонстрирован СЛД оптического диапазона 980–1060 нм с максимальной полушириной спектров излучения ~ 80 нм.

Для уменьшения ширины запрещенной зоны КТ и соответствующего смещения центральной длины волны излучения в коротковолновую область может использоваться метод перемешивания атомов при термическом отжиге (intermixing). СЛД на основе многослойной структуры с КТ, полученный методом быстрого термического отжига, продемонстрировал ширину полосы электролюминесценции 146 нм на уровне 3 дБ с центральной длиной волны 984 нм и непрерывную выходную мощность 15 мВт [12].

Интересным способом увеличения полуширины спектра излучения СЛД является повышение рабочей температуры, что позволяет увеличить заселенность носителями возбужденных состояний КТ. В работе [13] продемонстрированы СЛД, работающие при температуре 180°С с полушириной спектра излучения 270 нм и выходной мощностью 0.34 мВт. Однако деградационные характеристики приборов, работающих при такой высокой температуре, требуют отдельного исследования.

В данной работе в качестве активной области СЛД впервые использовались наноструктуры дробной (0D/2D) размерности — квантовые яма-точки (КЯТ) (quantum well-dots, QWDs) [14]. Они обладают рекордно высоким материальным усилением ( $1.1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ) [15] и более широким спектром излучения по сравнению с КЯ.



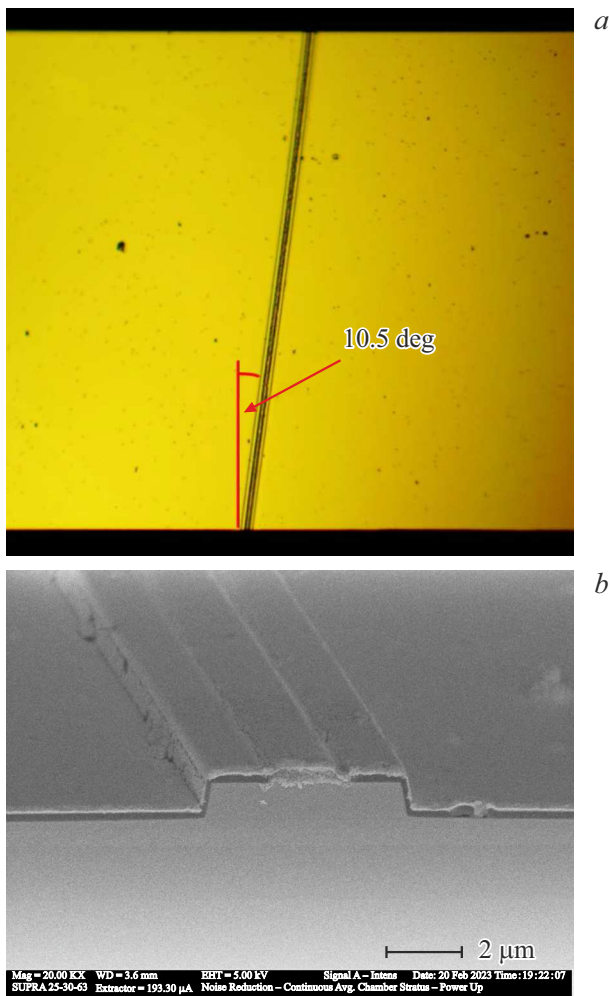
**Рис. 1.** Схематическое изображение зонной структуры и спектра излучения эпитаксиальной структуры суперлюминесцентных диодов с чирпированными слоями КЯТ.

Возможность бездислокационного роста 10–15 слоев КЯТ в активной области способствует реализации широких и плоских (без сильных модуляций интенсивности) спектров излучения в чирпированных структурах и высокой выходной мощности. В КЯТ в отличие от КТ насыщение основного состояния не наблюдается вплоть до очень высоких токов инжекции. Таким образом, спектр излучения многослойных чирпированных СЛД на КЯТ не будет сильно меняться с током накачки из-за увеличения вклада возбужденных состояний. Ожидается, что в КЯТ, в силу их сходства с КТ, проблема уменьшения плотности носители в отдельных слоях в активной области с их удалением от  $p$ -эмиттера будет менее выражена, чем в КЯ.

## 2. Образцы и методика эксперимента

Гетероструктуры синтезировались методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) на под-

ложках  $n^+$ -GaAs и представляли собой следующую последовательность слоев: нижний  $n$ -легированный эмиттер  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}:\text{Si}$  ( $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 1450 нм, волновод GaAs общей толщиной 440 нм, в середине которого находилась активная область с КЯТ, верхний  $p$ -легированный эмиттер  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}:\text{Zn}$  ( $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 1060 нм и контактный слой GaAs толщиной 150 нм. Толщина волновода была меньше отсечки вертикальной оптической моды 2-го порядка. Вблизи волноводного слоя для уменьшения оптических потерь уровень легирования был уменьшен до  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для возможности прецизионного травления в верхний  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ -эмиттер был вставлен стоп-слой InGaP на расстоянии 260 нм от волновода, что может быть использовано для изготовления 0-пространственно-одномодовых волноводов. Активная область представляла собой либо 5 (структура 5QWD), либо 7 (структура 7QWD) слоев КЯТ. КЯТ формировались осаждением от 2 до 8 монослоев (monolayers, MLs)



**Рис. 2.** Изображения верхней (*a*) и боковой (*b*) поверхности СЛД, полученные в оптическом и сканирующем электронном микроскопе соответственно.

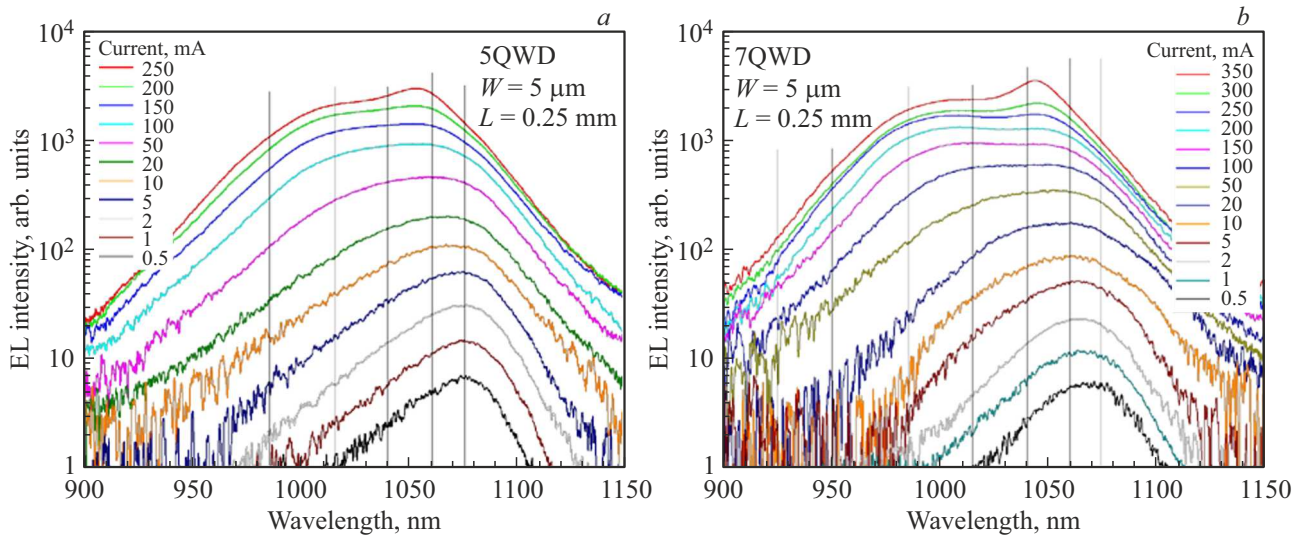
$\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  на подложки GaAs (100), разориентированные на  $6^\circ$  по направлению к (111). Использование разориентированных подложек, оптимальных температуры и скорости роста способствовало формированию высокоплотного массива In-обогащенных областей внутри In-обедненного слоя InGaAs, т.е. КЯТ. Технология и оптические свойства КЯТ подробно описаны в нашей работе [14]. Максимумы фотолюминесценции (ФЛ) слоев были смещены друг относительно друга. В структуре 5QWD номинальные количества осажденного  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  (длины волн максимумов излучения) отдельных слоев КЯТ были 4 (985 нм), 5 (1015 нм), 6 (1040 нм), 7 (1060 нм) и 8ML (1075 нм), в структуре 7QWD 2 (925 нм), 3 (950 нм), 4 (985 нм), 5 (1015 нм), 6 (1040 нм), 7 (1060 нм) и 8ML (1075 нм). Слои перечислены в соответствии с их расположением от  $n$ -к  $p$ -эмиттеру (рис. 1). Длины волн максимумов излучения отдельных слоев КЯТ были оценены по результатам измерения спектров фотолюминесценции гетерострук-

тур с одиночными слоями КЯТ, выращенными в процессе предварительных калибровок. Расстояние между отдельными слоями КЯТ в GaAs волноводе составляло 40 нм. Необходимо отметить, что в многослойных структурах поля упругих напряжений могут менять зонную структуру КЯТ и приводить к изменению спектрального положения максимумов линии ФЛ по сравнению со структурой, содержащей лишь один аналогичный слой КЯТ [16].

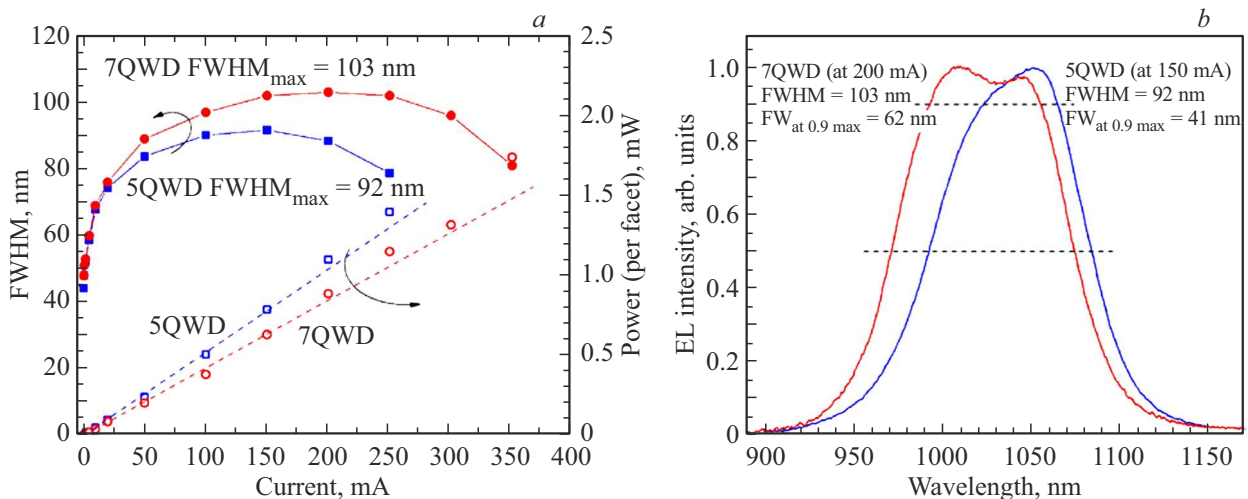
Были изготовлены СЛД в наклонной геометрии с полоском, составляющим угол  $10.5^\circ$  к нормали к выходной грани СЛД (рис. 2, *a*). Ширина полоска СЛД составила 5 мкм, глубина травления, ограниченная наличием стоп-слоя, 950 нм (рис. 2, *b*). Просветляющие покрытия на грани не наносились. Длины отдельных чипов, полученных скалыванием пластины с контактами, составляли 0.25 и 0.3 мм. Малая длина и наклонная геометрия СЛД позволяют значительно увеличить порог нежелательной лазерной генерации, сохраняя режим усиленного спонтанного излучения вплоть до высоких значений токов инжекции. Измерения проводились в импульсном режиме (длительность импульсов 0.3 мкс, частота следования 2 кГц) при комнатной температуре. Для регистрации спектров СЛД использовался монохроматор МДР-2 и PIN фотодиод InGaAs G12180-250A. Необходимо отметить, что длина приборов, исследованных в данной работе, значительно меньше, чем длина типичных СЛД. Это обусловлено тем, что задачей данной работы являлось исследование и оптимизация активной области с точки зрения ширины спектра излучения, а увеличение мощности может быть достигнуто за счет использования стандартных конструкций СЛД большой длины, просветляющих зеркал, а также дополнительной секции оптического усилителя [17–19].

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены спектры электролюминесценции СЛД 5QWD и СЛД 7QWD в зависимости от тока накачки. Номинальные положения максимумов отдельных слоев КЯТ отмечены вертикальными линиями. При малых токах накачки в спектре присутствует только длинноволновый пик (1070–1075 нм) от слоя КЯТ с наибольшей энергией локализации носителей. По мере увеличения тока инжекции вклад более коротковолновых пиков от слоев КЯТ с меньшей энергией локализации носителей постепенно увеличивается, и общая ширина спектра электролюминесценции (ЭЛ) возрастает (рис. 4, *a*). Замедление роста полуширины в спектральном диапазоне, соответствующем максимумам ФЛ слоев КЯТ 985, 1015, 1040, 1060 и 1075 нм. При дальнейшем увеличении тока в спектрах ЭЛ обоих СЛД возникают относительно узкие пики стимулированного излучения. Для СЛД 5QWD максимум пика стимулированного излучения находится на длине волны 1055 нм, в



**Рис. 3.** Спектры электролюминесценции СЛД 5QWD (a) и СЛД 7QWD (b) длиной 0.25 мм при различных токах накачки. Вертикальными линиями отмечены номинальные положения максимумов ФЛ слоев КЯТ, образующих активную область. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).



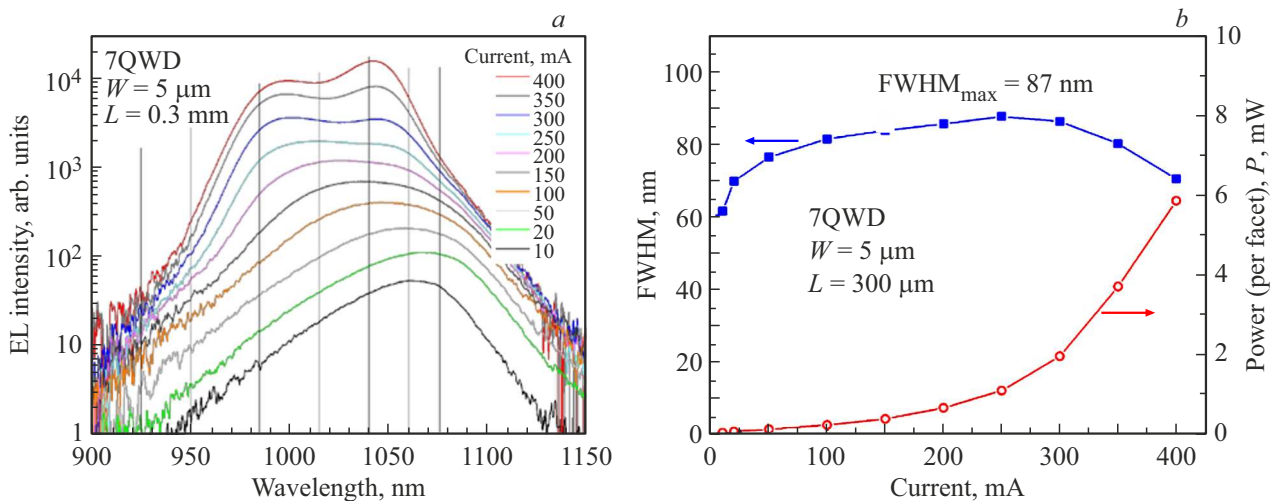
**Рис. 4.** Зависимости полуширины спектров электролюминесценции и мощности излучения СЛД 5QWD и 7QWD от тока накачки (a). Нормированные спектры электролюминесценции СЛД, имеющие максимальную ширину (b).

случае СЛД 7QWD он смещен на 10 нм в коротковолновую область (1045 нм). Увеличение интенсивности пиков стимулированного излучения приводит к уменьшению полуширины спектров ЭЛ (рис. 4, a). Для СЛД 5QWD максимальная полуширина спектра составляет 92 нм и достигается при токе инжекции 150 мА. Увеличение числа рядов КЯТ в активной области с 5 до 7 позволяет увеличить полуширину спектра излучения до 103 нм в СЛД 7QWD, при этом максимальное значение FWHM достигается при большем токе (200 мА), чем в случае СЛД 5QWD.

В СЛД с активной областью на основе 5 слоев КЯТ все слои дают вклад в максимальную полуширину на половине высоты. Однако спектр не имеет плоской вершины, что желательно для широкополосных

СЛД. Ширина спектра на уровне 90% интенсивности составляет 41 нм. Это связано с тем, что основной вклад в ширину спектра на уровне 90% интенсивности дают только слои КЯТ, излучающие на длинах волн 1040 и 1060 нм, в то время как вклад других слоев значительно меньше. В СЛД с активной областью на основе 7 слоев КЯТ основной вклад в максимальную ширину спектра на уровне 90% дают четыре слоя КЯТ, излучающих на длинах волн 985, 1015, 1040 и 1060 нм, что приводит к большим значениям данной величины, которая составляет 62 нм. Вклад слоев КЯТ, излучающих на длинах волн 925 и 950 нм, в коротковолновую часть суммарного спектра излучения очень мал. Данный факт может быть обусловлен двумя причинами. Первая аналогична упомянутому ранее уменьшению плотности





**Рис. 5.** Спектры электролюминесценции СЛД 7QWD длиной 0.3 мм при различных токах накачки (а), зависимости от тока полуширины спектров электролюминесценции и мощности излучения (б).

носителей в КЯ с их отдалением от  $p$ -эмиттера [4]. Это приводит к тому, что в спектрах усиления и ЭЛ доминирует вклад от КЯТ, наиболее близко расположенных к  $p$ -эмиттеру. Вторая причина может быть связана с тем, что термический выброс электронов и дырок из КЯТ с меньшей энергией локализации носителей и их перзахват в КЯТ с большей энергией локализации приводит к меньшей интенсивности ЭЛ первых.

В чипах с прямым полоском, которые фактически представляют собой торцевые лазеры с резонатором Фабри–Перо, при росте тока возникает лазерная генерация на длине волны  $\sim 1 \mu\text{m}$ . Спектральные положения линий лазерной генерации соответствуют энергетическому диапазону с максимальным оптическим усилением в многослойной активной области, которое, по-видимому, достигается за счет суперпозиции спектров усиления возбужденных и основного состояний нескольких рядов КЯТ. Отсутствие лазерной генерации в СЛД означает, что использование наклонной геометрии полосков СЛД позволяет достаточно эффективно подавить обратную связь. Ватт-амперная характеристика на начальном участке имеет линейную зависимость, переходящую с ростом тока в сверхлинейную, характерную для режима стимулированного излучения. Выходная мощность при максимальной ширине спектров ЭЛ составляла 0.8 мВт с одного зеркала как для СЛД 5QWD, так и для СЛД 7QWD.

В приборах с несколько большей длиной резонатора стимулированное излучение со сверхлинейной ватт-амперной характеристикой наблюдалось начиная с меньших токов. На рис. 5 представлены спектры ЭЛ, а также зависимости от тока полуширины спектров и мощности излучения СЛД 7QWD длиной 0.3 мм. Стимулированное излучение возникает в области длин волн, соответствующей слоям КЯТ с пиками ФЛ 985, 1015, 1040 и 1060 нм. Максимальная полуширина спектров ЭЛ

составила 87 нм при токе накачки 250 мА и была меньше полуширины в СЛД длиной 0.25 мм. Выходная мощность излучения с одного зеркала при максимальных ширинах спектров ЭЛ находилась в диапазоне 1.1–1.9 мВт, что больше соответствующей выходной мощности СЛД длиной 0.25 мм.

#### 4. Заключение

Продемонстрировано, что использование многослойных массивов КЯТ со сдвинутой друг относительно друга длиной волны излучения позволяет получить спектр ЭЛ шириной  $> 100 \text{ nm}$  с центральной длиной волны  $\sim 1 \mu\text{m}$  и достаточно плоской вершиной. Ожидается, что расположение слоев с КЯТ, излучающих в коротковолновой части спектра (925, 950 и 985 нм), ближе к  $p$ -эмиттеру с целью увеличения их заселенности носителями позволит повысить относительный вклад данных слоев в общий спектр излучения и тем самым увеличить его полуширину. Повышение выходной мощности может быть достигнуто путем увеличения длины приборов при условии эффективного подавления обратной связи, например путем нанесения антиотражающих покрытий, использования конструкций СЛД с расширяющимся в латеральном направлении волноводом и добавления интегрированной секции оптического усилителя.

#### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00038, <https://rscf.ru/project/23-72-00038/>. О.И. Симчук благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (проект 0791-2020-0002) за поддержку исследования поверхностных дефектов образцов методами темнопольной и светлопольной спектроскопии.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

**Список литературы**

- [1] G.M. Hale, M.R. Querry. *Appl. Opt.*, **12** (3), 555 (1973).
- [2] Y. Yasuno, Y. Hong, S. Makita, M. Yamanari, M. Akiba, M. Miura, T. Yatagai. *Opt. Express*, **15** (10), 6121 (2007).
- [3] A.F. Fercher, W. Drexler, C.K. Hitzenberger, T. Lasser. *Rep. Progr. Phys.*, **66**, 239 (2003).
- [4] M. Rossetti, P. Bardella, M. Gioannini, I. Montrosset. ECIO'08 Eindhoven — Proc. 14th Eur. Conf. on Integrated Optics and Technical Exhibition, Contributed and Invited Papers. Eur. Conf. on Integrated Photonics (2008).
- [5] S.-H. Guol, Jr.-H. Wang, Y.-H. Wu, W. Lin, Y.-J. Yang, C.-K. Sun, C.-L. Pan, J.-W. Shi. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **21** (5), 328 (2009).
- [6] A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, N.A. Maleev, N.N. Ledentsov, A.F. Tsatsul'nikov, M.V. Maximov, Yu.G. Musikhin, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *Semicond. Sci. Technol.*, **14**, 575 (1999).
- [7] A. Kovsh, I. Krestnikov, D. Livshits, S. Mikhlin, A. Zhukov, J. Weimert. *Optics Lett.*, **32** (7), 793 (2007).
- [8] M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, D.S. Sizov, Y.M. Shernyakov, I.N. Kaiander, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, V.M. Ustinov, Z.I. Alferov, R. Heitz, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Y.G. Musikhin, W. Neumann. *Phys. Rev. B*, **62** (24), 16671 (2000).
- [9] S. Chen, W. Li, Z. Zhang, D. Childs, K. Zhou, J. Orchard, K. Kennedy, M. Hugues, E. Clarke, I. Ross, O. Wada, R. Hogg. *Nanoscale Res. Lett.*, **10**, 340 (2015).
- [10] S. Haffouz, M. Rodermans, P.J. Barrios, J. Lapointe, S. Raymond, Z. Lu, D. Poitras. *Electron. Lett.*, **46** (16), 1144 (2010).
- [11] Du Chang Heo, Jin Dong Song, Won Jun Choi, Jung Il Lee, Ji Chai Jung, Il Ki Han. *Electron. Lett.*, **39** (11), 863 (2003).
- [12] Z.Y. Zhang, R.A. Hogg, B. Xu, P. Jin, Z.G. Wang. *Optics Lett.*, **33**, 1210–2 (2008).
- [13] Aye S. M. Kyaw, Dae-Hyun Kim, Iain M. Butler, K. Nishi, K. Takemasa, M. Sugawara, David T.D. Childs, Richard A. Hogg. *Appl. Phys. Lett.*, **122**, 031104 (2023).
- [14] M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, A.S. Payusov, F.I. Zubov, V.N. Nevedomskiy, S.S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Appl. Sci.*, **10**, 1038 (2020).
- [15] N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, A.S. Payusov, A.A. Serin, Yu.M. Shernyakov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov. *Semicond. Sci. Technol.*, **36**, 015008 (2020).
- [16] С.А. Мингаиров, Н.А. Калужный, А.М. Надточий, М.В. Максимов, В.Н. Неvedомский, Л.А. Сокура, С.С. Рувимов, М.З. Шварц, А.Е. Жуков. *ФТП*, **52** (10), 1131 (2018).
- [17] Z.C. Wang, P. Jin, X.Q. Lv, X.K. Li, Z.G. Wang. *Electron. Lett.*, **47** (21), 1191 (2011).
- [18] X. Li, P. Jin, Q. An, Z. Wang, X. Lv, H. Wei, J. Wu, J. Wu, Z. Wang. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **24** (14), 1188 (2012).
- [19] A.F. Forrest, M. Krakowski, P. Bardella, M.A. Cataluna. *Opt. Express*, **27** (8), 10981 (2019).

Редактор Г.А. Оганесян

**Broadband superluminescent diodes based on multiple InGaAs/GaAs quantum well-dot layers**

M.V. Maximov<sup>1</sup>, Yu.M. Shernyakov<sup>2</sup>, G.O. Kornyshev<sup>1</sup>, O.I. Simchuk<sup>1</sup>, N.Yu. Gordeev<sup>2</sup>, A.A. Beckman<sup>2</sup>, A.S. Payusov<sup>2</sup>, S.A. Mintairov<sup>2</sup>, N.A. Kalyuzhnyy<sup>2</sup>, M.M. Kulagina<sup>2</sup>, A.E. Zhukov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Alferov University,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> HSE University,  
190008 St. Petersburg, Russia

**Abstract** We have studied superluminescent diodes with simplified design and active region based on 5 or 7 layers of InGaAs/GaAs quantum well-dots (QWDs). Emission peaks of the individual QWD layers are shifted with respect to each other by 15–35 nm to provide as wide as possible emission line in a superluminescent mode with central wavelength of about 1 μm without significant spectral dips. For superluminescent diodes with the active region based on 5 and 7 QWD layers, the maximal value of full width at half maximum of emission spectrum was 92 and 103 nm respectively.