

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук

(31 января 2001 г.)

31 января 2001 г. в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады:

1. Устинов В.М., Малеев Н.А., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Сахаров А.В., Воловик Б.В., Цацульников А.Ф., Леденцов Н.Н., Алферов Ж.И. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург), Lott J.A. (Air Force Institute of Technology, Department of Electrical and Computer Engineering, Ohio, USA), Bimberg D. (Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany). *Вертикально-излучающие приборы на основе структур с квантовыми точками.*

2. Крестников И.Л., Луидин В.В., Сахаров А.В., Бедарев Д.А., Заварин Е.Е., Мусихин Ю.Г., Шмидт Н.М., Цацульников А.Ф., Усиков А.С., Леденцов Н.Н., Алферов Ж.И. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Гетероструктуры на основе нитридов третьей группы: технология, свойства, световые приборы.*

Краткие содержания двух докладов публикуются ниже.

PACS numbers: 42.55.Px, 68.55.+g, 85.30.Vw

Вертикально-излучающие приборы на основе структур с квантовыми точками

В.М. Устинов, Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, А.В. Сахаров, Б.В. Воловик, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, Ж.И. Алферов, Дж.А. Лотт, Д. Бимберг

Существенный прогресс в исследованиях полупроводниковых гетероструктур с массивами самоорганизующихся квантовых точек (КТ), достигнутый за последние годы, позволил не только продвинуться в изучении их фундаментальных физических свойств, но и перейти к практическому использованию в полупроводниковых источниках оптического излучения. Одно из интересных направлений связано с использованием массивов КТ в качестве активных слоев светодиодов с оптическими микрорезонаторами (МРСИД) и вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ). Принципиальные преимущества таких приборов

обусловлены узкой диаграммой направленности выводимого оптического излучения, повышенной температурной стабильностью длины волны, групповой технологией изготовления и тестирования [1].

Несмотря на успешное развитие технологии МРСИД и ВИЛ для спектральных диапазонов 850 и 980 нм, создание аналогичных приборов для практически важных диапазонов длин волн 1,3 и 1,55 мкм требует решения ряда принципиальных проблем [1]. В приборах с вертикальными оптическими резонаторами зеркалами служат распределенные брэгговские отражатели (РБО), образованные последовательностью чередующихся слоев двух материалов с разными показателями преломления (толщина каждого слоя составляет одну четвертую резонансной длины волны с учетом показателя преломления материала). Высококачественные РБО для МРСИД и ВИЛ диапазонов 850/980 нм формируются из чередующихся слоев AlGaAs и GaAs. При этом важно, что приборная структура может быть выращена в едином эпитаксиальном процессе. Система материалов InAlGaAsP/InP, традиционная для источников оптического излучения диапазонов 1,3/1,55 мкм, не позволяет в едином эпитаксиальном процессе формировать высокодобротные вертикальные оптические резонаторы из-за существенно меньшей (по сравнению с системой AlGaAs/GaAs) разницы коэффициентов преломления слоев InGaAsP, InAlGaAs и InP, а также низкой теплопроводности четверных соединений. Это стимулирует поиск новых полупроводниковых материалов, пригодных для создания длинноволновых ВИЛ на подложках GaAs. Наибольший интерес в настоящее время привлекают структуры с квантовыми ямами InGaAsN и GaAsSb, а также структуры с массивами КТ In(Ga)As [2].

Недавно при участии авторов впервые была продемонстрирована лазерная генерация на длине волны 1,3 мкм для ВИЛ на подложке GaAs при использовании активной области на основе InAs/InGaAs КТ [3]. В настоящей работе кратко представлены основные результаты наших исследований в области создания длинноволновых (диапазон 1,3 мкм) вертикально-излучающих приборов с активными областями на основе массивов КТ.

Ранее было показано, что оптимизация условий молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) позволяет формировать структуры с несколькими слоями InAs/InGaAs КТ, имеющие высокую поверхностную плотность мас-

сива и демонстрирующие яркую фотолуминесценцию (ФЛ) в диапазоне длин волн 1,3 мкм без увеличения полуширины линии по сравнению со структурами, содержащими только один слой КТ [4, 5]. Полосковые лазеры с такой активной областью демонстрируют низкопороговую лазерную генерацию ($< 80 \text{ А см}^{-2}$) и высокую выходную мощность в непрерывном режиме ($> 2,5 \text{ Вт}$) [6].

Первым шагом на пути реализации длинноволновых вертикально-излучающих приборов на подложках GaAs стало создание и исследование структур с вертикальными микрорезонаторами, содержащими массивы InAs/InGaAs КТ, а также МРСИД на их основе, демонстрирующие узкую линию электролюминесценции в диапазоне длин волн 1265–1325 нм [7]. В данных приборах использовались гибридные оптические микрорезонаторы, образованные нижним AlGaAs/GaAs РБО (проводящим n-типа или нелегированным) и верхним диэлектрическим РБО. Однако попытки реализовать лазерную генерацию в такой конструкции не привели к успеху.

Рассмотрим факторы, учет которых принципиален при выборе конструкции длинноволновых ВИЛ с активной областью на основе InAs/InGaAs КТ. Условием начала лазерной генерации является баланс между оптическим усилением и суммарными оптическими потерями, включающими потери на вывод излучения и внутренние потери в лазерной структуре [1]. При этом для ВИЛ следует учесть, что оптическая волна проникает в РБО на некоторую глубину, т.е. эффективная длина резонатора отличается от геометрического расстояния между зеркалами. Кроме того, для активных слоев с малой толщиной следует принять во внимание положение активной области относительно пространственного распределения амплитуды стоячей волны оптического поля в вертикальном микрорезонаторе.

В первом приближении оценку принципиальной возможности реализации ВИЛ с тем или иным оптическим резонатором можно сделать на основе экспериментальных характеристик для полосковых лазеров с такой же активной областью [8]. Известно, что для структур на основе InAs/InGaAs КТ наблюдается насыщение усиления при увеличении тока инжекции, обусловленное конечным значением поверхностной плотности КТ [2]. Максимальное измеренное значение модального оптического усиления для длинноволновых торцевых лазеров на основе трех слоев InAs/InGaAs КТ не превышает $10\text{--}12 \text{ см}^{-1}$ при внутренних оптических потерях $1,5 \pm 0,3 \text{ см}^{-1}$ [6]. Анализ показывает [8], что в случае ВИЛ с активной областью на основе трех слоев InAs/InGaAs КТ для начала лазерной генерации необходимо иметь $R > 0,9994$ в предположении нулевых внутренних потерь и $R > 0,9997$ при величине внутренних потерь 2 см^{-1} ($R = \sqrt{R_1 R_2}$, где R_1, R_2 — коэффициенты отражения верхнего (выводного) и нижнего зеркал). Таким образом, для получения лазерной генерации требуются очень высокие коэффициенты отражения зеркал в сочетании с малыми внутренними оптическими потерями.

Существенные оптические потери в легированных полупроводниковых зеркалах [9] обуславливают практическую невозможность использования традиционной конструкции с верхним и нижним контактами к легированным зеркалам n- и p-типа при реализации длинноволновых ВИЛ на основе КТ. Оптимальной представляется конструкция с верхним и нижним нелегированными

Al_xO_y/GaAs РБО, которые можно получить селективным оксидированием слоев AlGaAs в атмосфере, насыщенной парами воды [10]. Большая разница в показателях преломления слоев для оксидированных зеркал обеспечивает широкую спектральную область с высокими уровнями оптического отражения.

Структуры ВИЛ с активными слоями на основе InAs/InGaAs КТ выращивались методом МПЭ с твердотельным источником As⁴ в установке Riber-32P. Схематическое сечение и основные характеристики для типичного ВИЛ представлены на рис. 1. Две Al_xO_y апертуры, полученные частичным оксидированием слоев AlGaAs, обеспечивают не только ограничение тока, но и дополнительное перераспределение оптического поля в резонаторе. По сравнению с резонатором на основе полупроводниковых РБО амплитуда оптического поля в активной области существенно возрастает, а глубина его проникновения в зеркала уменьшается [8]. Для приборов с размером оксидированной апертуры $8 \times 8 \text{ мкм}$ пороговый ток составляет 1,8 мА при максимальной внешней дифференциальной эффективности 43% (при выводе излучения через верхнее зеркало) [3]; это наилучшие опубликованные значения для ВИЛ диапазона 1,3 мкм на подложках GaAs. В непрерывном режиме при комнат-

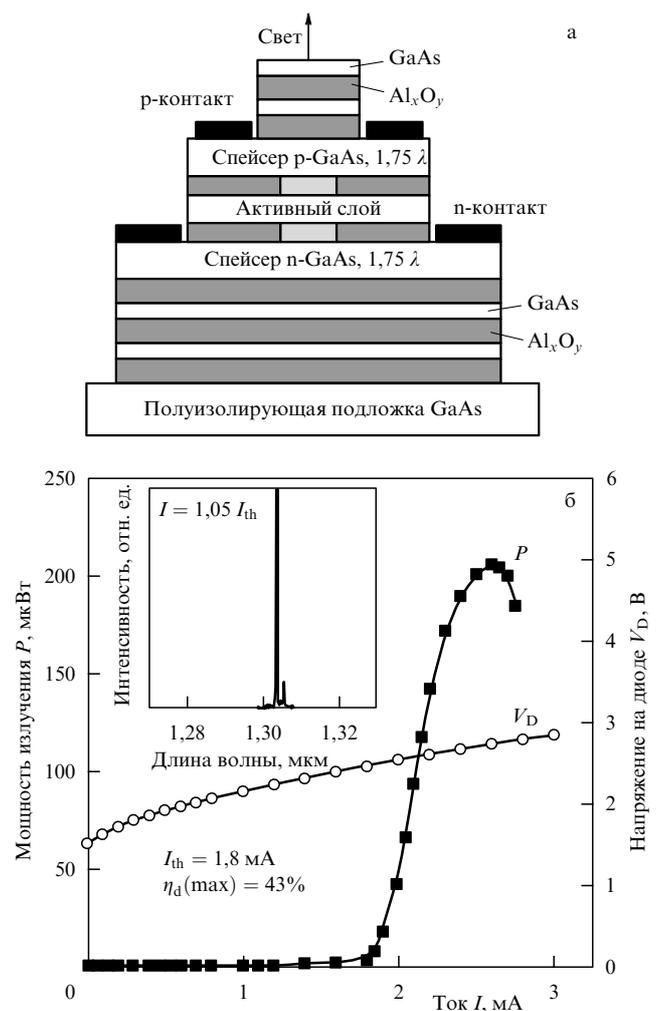


Рис. 1. Схематическое поперечное сечение (а) и основные характеристики (б) ВИЛ с активной областью на основе 3 слоев квантовых точек InAs/InGaAs.

ной температуре максимальная выходная мощность для лучших приборов превышает 0,6 мВт [11]. Уровень внутренних оптических потерь 0,04...0,05 % на один проход фотона соответствует лучшим опубликованным значениям для ВИЛ всех типов [12].

В заключение отметим, что представленные в настоящей работе результаты исследований подтверждают возможность создания нового поколения эффективных длинноволновых (диапазон 1,3 мкм) вертикально-излучающих приборов на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 00-02-17039), программы "Физика твердотельных наноструктур" (грант 99-2014), NanOp и INTAS (грант 99-928).

Список литературы

1. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* (Eds C W Wilmsen, H Temkin, L A Coldren) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999)
2. Ustinov V M, Zhukov A E *Semicond. Sci. Technol.* **15** R41 (2000)
3. Lott J A et al. *Electron. Lett.* **36** 1384 (2000)
4. Ustinov V M et al. *Appl. Phys. Lett.* **74** 1815 (1999)
5. Малеев Н А и др. *ФТП* **34** 612 (2000)
6. Zhukov A E et al. *IEEE Photon. Tech. Lett.* **11** 1345 (1999)
7. Maleev N A et al. *Phys. Status Solidi B* **224** (1/2) (2000)
8. Малеев Н А и др. *ФТП* **35** (2001) (в печати)
9. Babic D I et al. *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1369 (1997)
10. MacDougal M H et al. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* **3** 905 (1997)
11. Lott J A et al. *Proc. IEEE Annu. Meeting LEOS-2000* Vol. 1 (2000) pp. 304–305
12. MacDougal M H et al. *IEEE Photon. Tech. Lett.* **10** 9 (1998)

PACS numbers: 42.55.Px, 85.30.Vw

Гетероструктуры на основе нитридов третьей группы: технология, свойства, светоизлучающие приборы

И.Л. Крестников, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Д.А. Бедарев, Е.Е. Заварин, Ю.Г. Мусихин, Н.М. Шмидт, А.Ф. Цацульников, А.С. Усиков, Н.Н. Леденцов, Ж.И. Алферов

В настоящее время большую важность представляют системы оптической и магнитооптической записи и считывания информации, которые составляют примерно одну пятую часть быстро растущего рынка полупроводниковых лазеров (6 млрд. долларов и 108 % роста за 2000 г.). Для этого сегмента рынка необходимы светоизлучающие приборы с как можно меньшей длиной волны излучения. Действительно, переход от длины волны излучения 780 нм, используемой в устройствах CD-ROM, к длине волны излучения 650 нм (DVD-ROM) позволил увеличить плотность записи информации в 20 раз. Дальнейшее уменьшение длины волны полупроводниковых лазеров может позволить записывать на один компакт-диск до 150 Гбайт информации.

Все вышеперечисленное обуславливает громадный интерес к широкозонным соединениям, а именно к нитридам третьей группы, так как основное соединение этой системы — нитрид галлия — имеет ширину запрещенной зоны 3,42 эВ, что соответствует ультрафиолетовой области спектра. Использование твердых растворов AlGaN и InGaN позволяет управлять шириной

запрещенной зоны, увеличивая или уменьшая ее, соответственно. Таким образом, система нитридов третьей группы позволяет получить излучение от ультрафиолетового до красного спектрального диапазона. Поэтому, помимо использования светоизлучающих приборов на основе GaN в системах записи и хранения информации, эти приборы могут найти применение в таких областях как источники белого света, проекционное телевидение высокого разрешения, светофоры, маяки, сигнальные огни, медицина и т.д.

Так как в настоящее время уже существуют коммерчески доступные светодиоды (СД) и полосковые лазеры на основе GaN, то научный интерес для нас представляет создание вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) в этой системе [1], а создание СД и полосковых лазеров мы рассматриваем как очередные шаги на пути к конечной цели. ВИЛ обладают целым рядом преимуществ, как например, высокой интеграцией, температурной стабильностью, низкими пороговыми токами, хорошей диаграммой направленности, что и обуславливает интерес к подобным приборам. В ВИЛ на основе нитридов третьей группы в качестве зеркал используются AlGaIn/GaN распределенные Брэгговские отражатели (РБО), между которыми располагается GaN микрорезонатор с InGaIn/GaN активной областью. Рассмотрению проблем создания подобных структур и исследованию их свойств и посвящен этот доклад.

Так как для выращивания нитрида галлия отсутствует гомоподложка, то мы применяем сложную двухстадийную процедуру роста на сапфировых подложках методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС). На первой стадии при низкой температуре (~ 550 °С) происходит нитридизация подложки, а также осаждение и отжиг зародышевого слоя AlGaIn. Во время второй стадии при высокой температуре (~ 1050 °С) происходит рост буферного слоя Ga(Al)N, роль которого заключается в обеспечении планарного роста и ухода от дефектов, прорастающих от границы сапфир/Ga(Al)N, и рост эпитаксиальной структуры [2].

При создании AlGaIn/GaN РБО приходится принимать во внимание, что разница показателей преломления AlGaIn и GaN очень мала, и для получения даже невысоких коэффициентов отражения (~ 80–90 %) приходится использовать большое число четвертьволновых AlGaIn/GaN пар. Однако в отличие от системы AlAs/GaAs, система AlN/GaN не является решеточно-согласованной, и при большом числе слоев в структуре возникают огромные механические напряжения, приводящие к образованию трещин и, соответственно, к деградации электрических и оптических свойств структуры.

Чтобы избежать образования трещин, можно вырастить РБО непосредственно на сапфировой подложке. В этом случае отсутствует проблема решеточного согласования, так как каждый слой достаточно тонок, чтобы выдержать напряжение, и параметр решетки всей структуры равен среднему арифметическому параметров решеток GaN и AlGaIn. Однако отсутствие буферного слоя приводит к тому, что большая часть РБО содержит дефекты, прорастающие от границы с подложкой. Поэтому наиболее оптимальным с нашей точки зрения является использование AlGaIn буфера, параметр решетки которого равен усредненному параметру решетки РБО. В этом случае получается структура с

компенсацией напряжений, позволяющая получить бездефектный РБО. Выращенные подобным образом структуры демонстрируют коэффициент отражения более 90 % для УФ спектрального диапазона. Кроме высоких оптических свойств, эти структуры обладают высокой проводимостью, обеспечивающей омический тип ВАХ с сопротивлением 50 Ом, а также демонстрируют отсутствие деградации при протекании токов больших плотностей. Таким образом, AlGaIn/GaN РБО может быть использован как в качестве зеркала, так и в качестве эмиттера носителей в активную область [3].

В качестве активной области используются InGaIn/GaN сверхрешетки, для получения которых мы применяем метод термоциклирования подложки. Так как входение индия в растущие слои кардинально зависит от температуры подложки, то даже при сохранении всех потоков в реакторе термоциклирование приводит к формированию структуры с периодически изменяющимся в направлении роста составом индия [4], хотя реальные ростовые процессы значительно сложнее [5]. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения показывают, что в латеральном направлении отсутствует однородность по составу индия. Вместо однородных квантовых ям возникают нанодомены, обогащенные по индию (до 60 %), с характерными размерами 3–10 нм. Эти домены эффективно локализируют носители во всех трех направлениях и играют роль квантовых точек в этой системе [6].

В широкозонных соединениях экситонное поглощение может быть очень большим. Однако в случаях объемного материала или квантовой ямы экситонные состояния не дают вклада в усиление, так как, во-первых, разогреваются и не могут рекомбинировать излучательно, а во-вторых, экранируются. В случае трехмерной локализации экситонов на плотном массиве квантовых точек оба эти эффекта отсутствуют, и появляется возможность получить значительное экситонное усиление [7]. При этом показатель преломления в этой спектральной области испытывает сильную модуляцию, поскольку показатель преломления и коэффициент усиления связаны соотношениями Крамерса–Кронига. В условиях сильной модуляции показателя преломления в резонаторе могут проявляться нелинейные эффекты, и в частности, автоподстройка мод резонатора [8]. В этом случае снижаются требования к тщательности подгонки толщины резонатора с тем, чтобы мода резонатора совпадала с пиком усиления, так как это условие может выполняться автоматически в некотором спектральном диапазоне. Экспериментально этот эффект наблюдался в виде сдвига моды лазерной генерации с увеличением плотности возбуждения [9]. Оба этих эффекта — возникновение лазерной генерации и сдвиг моды — позволили оценить коэффициент усиления, обеспечиваемый InGaIn/GaN активной областью. Обе оценки дали результат $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$, что говорит о согласованности наших представлений о процессах, развивающихся в активной области.

Столь высокий коэффициент усиления активной области позволяет использовать в ВИЛ на основе GaN РБО с невысокими коэффициентами отражения — 80–90 %. Совместное применение таких РБО и активной области позволило нам впервые в мире продемонстрировать при комнатной температуре лазерное излучение в вертикальном направлении при оптическом возбужде-

нии [10]. Однако практический интерес представляет инжекционная накачка, при которой через структуру течет ток. Для этого нами были выращены резонансные InGaIn/GaN/AlGaIn СД, которые обладают всеми компонентами, присущими ВИЛ. В спектре излучения резонансных СД выделяется узкая мода резонатора. При дальнейшем улучшении параметров эта мода может превратиться в линию лазерной генерации. Таким образом, наш следующий шаг — создание инжекционного InGaIn/GaN/AlGaIn вертикально-излучающего лазерного диода.

Одним из возможных путей расширения представленной тематики является использование твердых растворов GaAsN. Эта система обладает весьма нехарактерной зависимостью ширины запрещенной зоны от состава, такой что ширина запрещенной зоны может достигать даже отрицательных значений. Это позволяет перекрыть весь спектральный диапазон от ультрафиолета до инфракрасного света. И если для инфракрасных приложений используется GaAsN, состоящий в основном из GaAs, то мы сконцентрировались на GaN с небольшими добавками мышьяка. Для его получения на буфер GaN осаждается слой GaAs, который зарастается слоем GaN. В процессе последнего зарастания арсенид галлия стравливается, и мышьяк растворяется в слое GaN [11]. Оптические исследования подобных структур продемонстрировали широкую линию излучения от оранжевого до фиолетового цветов, что делает этот материал потенциально пригодным для создания светоизлучающих приборов в широком спектральном диапазоне.

В заключение представляем основные результаты этой работы:

- разработана технология получения эффективных AlGaIn/GaN РБО;
- продемонстрировано высокое усиление в InGaIn/GaN активной области;
- исследованы нелинейные эффекты автоподстройки мод микрорезонатора;
- впервые в мире для структур InGaIn/GaN/AlGaIn была получена лазерная генерация в вертикальном направлении при комнатной температуре;
- проведены предварительные исследования структур GaAsN.

Работа выполнена в сотрудничестве с Берлинским техническим университетом и Университетом г. Карлсруэ (Германия).

Список литературы

1. Ledentsov N N et al. *Comp. Semicond.* **5** (9) 61 (1999)
2. Lundin W V et al. *Booklet 8th Europ. Work. Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy and Related Growth Techniques. June 8–11, 1999. Prague* (1999) p. 46
3. Lundin W V et al. *Booklet 8th Europ. Work. Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy and Related Growth Techniques. June 8–11, 1999. Prague* (1999) p. 49
4. Sakharov A V et al. *Phys. Status Solidi B* **216** 435 (1999)
5. Sakharov A V et al. *Proc. Intern. Work. Nitride Semiconductors, September 24–27, 2000. Nagoya. IPAP Conf. Series Vol. 1* (2000) p. 241
6. Sakharov A V et al. *Phys. Status Solidi B* **216** 435 (1999)
7. Ledentsov N N et al. *Appl. Phys. Lett.* **69** 1343 (1996)
8. Ledentsov N N et al. *Semicond. Sci. Technol.* **13** 99 (1998)
9. Sakharov A V et al. *Appl. Phys. Lett.* **74** 3921 (1999)
10. Krestnikov I L et al. *Appl. Phys. Lett.* **75** 1192 (1999)
11. Tsatsul'nikov A F et al. *Semicond. Sci. Technol.* **15** 766 (2000)