

Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Звенигород, 27 – 29 ноября 2007 г.)

И.Н.Завестовская, О.Н.Крохин, Ю.М.Попов, А.С.Семенов

Представлен обзор докладов, посвященных гетероструктурным полупроводниковым лазерам и получению с их помощью мощного когерентного излучения, полупроводниковым лазерам с оптической и электронной накачкой, униполярным полупроводниковым лазерам, перспективным направлениям создания оптических когерентных источников, физике разрушения и деградации излучающих полупроводниковых структур и др.

Ключевые слова: когерентность, полупроводниковые лазеры, светодиоды, наноструктуры.

Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур проходил с 27 по 29 ноября 2007 года в г. Звенигороде Московской области. Организаторами симпозиума являлись Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН), Отделение физических наук РАН, Российский фонд фундаментальных исследований, журнал «Квантовая электроника». Председатель организационного комитета – академик О.Н.Крохин

В работе Симпозиума приняли участие ученые из Москвы, Санкт-Петербурга, Самары, Владивостока, Нижнего Новгорода и других городов России. Было сделано 25 пленарных докладов и проведен круглый стол.

Программа Симпозиума включала в себя работы, освещающие все современные направления фундаментальных исследований в области когерентного оптического излучения полупроводниковых соединений и структур.

Основное внимание было уделено генерации когерентного излучения широко используемыми инжекционными (диодными) лазерами. Эта тематика была представлена в нескольких докладах и отдельно активно обсуждалась на круглом столе. Отечественные ученые внесли значительный вклад в разработку и создание полупроводниковых лазеров. Идея создания инжекционного лазера была предложена в ФИАНе в 1961 г., первые гетеролазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре, были созданы в Физико-техническом институте имени А.Ф.Иоффе РАН (ФТИ) в 1970 г. Проводимые в настоящее время в этих институтах работы по полупроводниковым лазерам определяют их лидерство в успешном развитии в России этой важнейшей области квантовой электроники.

И.С.Тарасов (ФТИ) представил обзор работ, ведущихся в ФТИ по диодным лазерам, в частности исследований, направленных на получение высоких мощностей излучения. Снижение внутренних оптических потерь до $0.3-0.5 \text{ см}^{-1}$ позволило увеличить длину резонатора лазера до 5 мм и при ширине излучающей полоски 100 мкм довести выходную мощность до 16–20 Вт в непрерыв-

ном режиме при КПД «от розетки» более 70 % и до 120–150 Вт – в импульсном. Получаемая плотность энергии на выходе лазерной матрицы с волоконным выводом, работающей в импульсном режиме, позволяет эффективно резать стальные листы толщиной в несколько миллиметров, причем стоимость работ может быть существенно ниже, чем при использовании волоконных лазеров с диодной накачкой. Обсуждалась пока еще существующая проблема покрытий выходных торцов лазеров, которые в значительной степени определяют предельную излучаемую мощность. Решению этой проблемы в какой-то мере может помочь использование безалюминиевых твердых растворов лазерной гетероструктуры. К сожалению, стоимость одного ватта излучения мощных диодных лазеров все ещё остается высокой.

В докладе В.В.Безотосного (ФИАН) было подчеркнуто, что качество соединения лазерного кристалла (чипа) с теплоотводящим элементом является одним из основных факторов достижения высоких мощностей излучения и КПД, а также требуемого рабочего ресурса диодного лазера. Необходимо обеспечивать планарность и копланарность рабочей и базовой поверхностей теплоотводящего элемента. При длине кристалла 3 мм и толщине припоя 2–3 мкм требуемый параметр копланарности должен составлять 1 мкм на базе в 3 мм, что можно обеспечить с помощью алмазного точения. Существенное значение имеет также качество обработки поверхности (желательно иметь шероховатость $\sim 5 \text{ нм}$). Металлические пленки толщиной 8–4 мкм наносились в вакууме на медные хладопроводы магнетронным источником. Монтаж кристаллов проводился на установке Lambda A6 (Finetech) в условиях локальной чистой зоны класса 100. Для повышения эффективности теплоотвода поверхность пленки обрабатывалась сканирующим лазерным пучком, что позволило уменьшить пористость и шероховатость поверхности, а также очистить ее от окислов и органических загрязнений. Получена кратковременная выходная мощность излучения до 7 Вт, однако ресурсным характеристикам отвечает режим работы с непрерывной мощностью только 4 Вт. Причиной быстрой деградации является повышенное тепловыделение, связанное с несовершенством используемых технологий обработки теплоотводящих элементов и нанесения металлических пленок и припоя. Для накачки кристалла АИГ : Nd

И.Н.Завестовская, О.Н.Крохин, Ю.М.Попов, А.С.Семенов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: zavest@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 18 февраля 2008 г.

использовалась суммарная мощность трех лазерных диодов. Получена непрерывная выходная мощность в одномодовом режиме, составившая 5 Вт на длине волны 1060 нм и 2 Вт – на длине волны 530 нм.

В докладе А.П.Богатова (ФИАН) сообщалось о методе расширения оптического пучка лазера в перпендикулярном гетерослоям направлении, позволяющем снизить лучевую нагрузку на выходные зеркала и уменьшить угловую расходимость излучения. Были выполнены расчеты по оптимизации ширины оптического пучка в пассивном волноводном слое с учетом одновременной возможности и получения большой мощности, и нежелательного падения фактора оптического ограничения, а также уменьшения модового усиления. Как показали расчетные и экспериментальные данные, для лазерного диода с гребневым волноводом было получено пятикратное расширение лазерного пучка, выходная мощность достигла 500 мВт, а расходимость в поперечно-одномодовом режиме генерации уменьшилась до $11^\circ - 12^\circ$ (вместо обычных 30°).

В.И.Козловский (ФИАН) представил последние результаты исследований, направленных на улучшение характеристик полупроводниковых лазеров с продольной оптической и электронной накачкой на основе наноразмерных гетероструктур из соединений A_2B_6 и A_3B_5 , излучающих в видимой области спектра. На основе гетероструктуры GaInP/AlGaInP с одним и двумя брэгговскими зеркалами из AlAs/AlGaAs реализованы сканирующие лазеры на длине волны в диапазоне 620–660 нм с выходной мощностью 7–8 Вт. Улучшенное качество наноструктур ZnSe/ZnMgSSe позволило увеличить выходную мощность лазера на длине волны 460 нм до 2.5 Вт. Продолжаются работы по созданию лазеров среднего ИК диапазона (2–5 мкм) с диодной накачкой на основе монокристаллов соединений A_2B_6 , легированных металлами переходной группы. Впервые достигнут непрерывный режим генерации на кристалле CdSe:Cr (1 Вт, 2.6 мкм) и осуществлена перестройка спектра в диапазоне 2.26–3.61 мкм.

Результаты проводимых в МГУ исследований низкочастотных шумов мощности и диаграммы направленности излучения диодного лазера на основе AlGaAs/GaAs со спектрально-селективным внешним резонатором были доложены В.В.Бруевичем. Изучались спектральная плотность мощности низкочастотных (до 1 кГц) шумов интенсивности и диаграммы направленности излучения. Измерения проводились в режиме генерации на одной продольной моде внешнего резонатора. Установлено, что в этом частотном диапазоне уровень шумов может не зависеть (в пределах точности измерений) от наличия или отсутствия обратной связи.

В докладе Ю.П.Яковлева (ФТИ) были представлены результаты исследований лазеров на двойной гетероструктуре InAsSbP/InAsSb/InAsSbP, выращенной методом жидкофазной эпитаксии на подложке p-InAs. Генерация в спектральном диапазоне 2.7–3.8 мкм в непрерывном режиме имела место в области температур 30–120 К, а в импульсном – при температурах до 200 К. Ширина спектральной линии составила 18 МГц. Предложена и осуществлена быстрая перестройка длины волны за счет нелинейно-оптических эффектов внутри волновода и записаны спектры поглощения газов OCS, NH₃, H₂O, CH₃Cl.

Одной из актуальных задач современной твердотельной электроники является продвижение в сторону сверх-

высокого быстродействия и сверхвысоких частот, создание новых источников излучения, в том числе основанных на лазерных принципах генерации.

Новые перспективы в этом направлении связаны с развитием физики и технологии наноструктур. Исследования в данной области развиваются в двух основных направлениях, одно из которых связано с повышением рабочей частоты традиционных полупроводниковых электронных приборов благодаря использованию сложных наногетероструктур, а также с возможным дальнейшим повышением частоты генерации за счет ее умножения при использовании нелинейных элементов, роль которых могут выполнять сами наноструктурные устройства. Другое направление связано с разработкой терагерцовых полупроводниковых лазеров на основе оптических переходов между подзонами размерного квантования и мелкими примесными уровнями в наноструктурах.

Генерация терагерцового излучения обсуждалась в докладах нижегородских ученых В.В.Кочаровского (Институт прикладной физики РАН) и В.И.Шастина (Институт физики микроструктур РАН). В.В.Кочаровский предложил осуществить в едином резонаторе одновременную генерацию на двух различных частотах и в результате их смешения получить когерентное излучение терагерцового диапазона. Можно также смешивать моды двух независимых по току p–n-переходов с немного отличающимися квантовыми ямами (КЯ), но имеющих два связанных друг с другом волновода, или использовать межзонный двухкаскадный лазер с туннельным p–n-переходом, разделяющим активные области двух КЯ, которые расположены в едином волноводе. В случае создания двухволнового лазера с низким пороговым током можно ожидать генерацию терагерцового излучения с микроваттной мощностью при комнатной температуре. В импульсном режиме генерации мощность может быть значительно увеличена.

В докладе В.Н.Шастина обсуждалась проблема получения генерации терагерцового диапазона при инверсной населенности уровней примесных доноров пятой группы в кремнии. Отметим, что этот вариант получения генерации был предложен Н.Г.Басовым, Б.М.Вулом и Ю.М.Поповым еще в 1958 г. Большие трудности в осуществлении инверсии связаны с малыми временами релаксации возбужденных состояний из-за их сильного взаимодействия с различного типа фононами и с отсутствием методов накачки для создания подходящих лазеров. Расчеты времен релаксации возбужденных состояний при взаимодействии с различными типами фононов показывают, что они, как правило, не превышают 1 нс.

Исследования пикосекундной динамики лазеров на основе наногетероструктур были представлены в докладе Е.Л.Портного (ФТИ). Проанализированы принципы создания интегрально-оптических схем и разработана схема лазерных устройств на основе волноводных наногетероструктур с квантовыми точками, содержащих монолитно-интегрированные секции усиления и поглощения. Созданные схемы были использованы для генерации коротких световых импульсов в режимах пассивной модуляции добротности и пассивной синхронизации мод.

О генерации лазерных диодов на основе квантовых точек (КТ) InAs/InGaAs в области 1.15–1.3 мкм сообщалось в докладе А.Е.Жукова (ФТИ). Этот спектральный диапазон (О-диапазон), в котором оптические потери всего лишь в 2–3 раза больше абсолютного минимума

для волоконных световодов на основе кварцевого стекла и мала дисперсия групповых скоростей, представляет несомненный интерес для оптической связи. В небольших пределах длину волны лазера можно изменять, используя различную эффективную толщину осажденного материала (InAs) на подложке GaAs при молекулярно-пучковой эпитаксии. Заращивание массива КТ InAs слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 10\% - 20\%$) толщиной 4–12 нм позволяет изменять максимум излучения от 1.1 до 1.3 мкм. Неравномерное уширение составляет 40 мЭВ. Существует оптимальная плотность массива КТ, при которой пороговая плотность тока достигает минимального значения, соответствующего заданному уровню оптических потерь. В случае типичных потерь возможно получение пороговых плотностей токов $\sim 100 \text{ А/см}^2$ при плотностях массива $(3 - 5) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, что отвечает 6–10 рядам КТ. Сверхнизкий пороговый ток (1.4 мА) был получен в использующем два ряда КТ лазере гребневой конструкции с коротким резонатором (600 мкм) и высокоотражающими гранями. Высокая мощность (800 мВт) была достигнута в лазере (10 рядов КТ) длиной 7 мм с просветленной выходной гранью при ширине гребня 6 мкм. Использование преднамеренно внесенной разупорядоченности КТ позволило реализовать сверхширокий спектр генерации; так, был продемонстрирован спектр генерации шириной 75 нм. С помощью внешней модуляции интенсивности спектрально выделенной моды разработанного лазера была осуществлена передача сигналов со скоростью 10 Гб/с при вероятности появления ошибки (BER) менее 10^{-13} . Согласно оценке срок службы лазеров при нормальных условиях эксплуатации (40 °С) составил 1.2×10^6 ч.

Работы по гетероструктурам на основе квантовых ям InSb/InAsSb для инжекционных ИК (3–5 мкм) лазеров были представлены А.Н.Семеновым (ФТИ). Доложены основные научные результаты исследований особенностей формирования и физических свойств полупроводниковых гетероструктур на основе КТ InSb в матрице InAsSb, получаемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии и пригодных для использования в качестве активной области инжекционных лазеров среднего ИК диапазона

Ю.А.Алещенко (ФИАН) представил результаты совместного с Ю.В.Копаевым исследования по созданию униполярных полупроводниковых лазеров на гетероструктурах с переменной размерностью электронных состояний. Предложена оригинальная конструкция активного элемента квантового униполярного полупроводникового лазера на основе квантовых ям $\text{GaAs/Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с сильно асимметричными по высоте барьерами. В результате оптимизации активного элемента униполярного лазера получены численные значения ширины КЯ и барьеров, обеспечивающие высокие лазерные параметры.

Доклад В.Н.Мурзина (ФИАН) был посвящен анализу результатов фундаментальных исследований нелинейных и неравновесных свойств полупроводниковых квантоворазмерных резонансно-туннельных структур. Исследования проводились с целью изучения возможностей создания на основе этих структур нового типа лазерных генераторов и преобразователей субтерагерцового и терагерцового диапазонов. Показана возможность формирования инвертированных распределений в нижних подзонах размерного квантования в структурах с широкими КЯ. Энергетическое расстояние между нижними подзо-

нами в них меньше энергии оптического фона. Выявлена принципиальная возможность создания на основе таких структур твердотельного резонансно-туннельного лазера терагерцового диапазона на межподзонных электронных переходах.

Создание генераторов и преобразователей субтерагерцового и терагерцового диапазонов является актуальным для освоения этих диапазонов и открывает возможности различных применений в электронике, микроэлектронике, информатике, системах связи, радиовидении, интроскопии, молекулярной спектроскопии, астрофизике, медицине, биологии и других областях науки и техники.

Доклад, посвященный проводимым в МГУ исследованиям нелинейной оптики магнитных наноструктур и магнитофотонных кристаллов, был сделан Т.В.Мурзиной. Представлены результаты изучения нелинейно-оптического магнитного отклика магнитных наноструктур (нанослоев, наночастиц) и магнитофотонных кристаллов. Экспериментально показано, что в этих структурах магнитный нелинейно-оптический отклик по крайней мере на один-два порядка превышает линейный магнитооптический отклик. Это свидетельствует о том, что нелинейно-оптические методы, в первую очередь метод магнитоиндуцированной второй оптической гармоники, могут широко использоваться для диагностики магнитных структур. Обнаружено, что в магнитофотонных кристаллах и микрорезонаторах магнитоиндуцированные вклады в ГВГ превышают немагнитные. Показана взаимозависимость сегнетоэлектрических и магнитных свойств наноструктурированных сегнетомагнетиков, которая проявляется в характерном виде температурной зависимости интенсивности ВГ.

Большое внимание уделялось работам по изучению свойств лазерного излучения, возможностей его формирования и преобразования. Коллинеарное взаимодействие световых потоков с разными длинами волн в гетерофазном жидкофазном нанокompозите было темой доклада Ю.Н.Кульчина (Институт автоматике и систем управления ДВО РАН, Владивосток). Изучены зависимости эффективности пропускания нанокompозита от интенсивности входящего в кювету излучения с длинами волн 532 и 633 нм как при раздельном использовании этих пучков, так и в случае их коллинеарного взаимодействия. Обнаружено, что при прохождении излучения через нанокompозит, в результате его взаимодействия с комплексом наночастиц Al_2O_3 – жидкофазная матрица, наблюдаются изменения показателя преломления и коэффициента поглощения материала композитной среды, зависящие как от длины волны и интенсивности излучения, так и от параметров материала матрицы, химического строения, размера и концентрации наночастиц.

В докладе В.С.Лебедева (ФИАН) были представлены результаты исследований по преобразованию оптического излучения в поля субволновых масштабов в конусообразных полупроводниковых волноводах. Продemonстрирована высокая эффективность преобразования оптического излучения в поля нанометровой протяженности (30–100 нм) в полупроводниковых (GaAs, GaP, GaN, Si) оптических зондах ближнего поля длиной в несколько микрометров. Установлено, что использование высоко-рефрактивных полупроводниковых материалов с малым коэффициентом экстинкции вместо стекловолокна или кристаллического кварца позволяет на несколько поряд-

ков повысить плотность световой энергии в ближней зоне на выходе оптического зонда в коротковолновой части видимого спектра. Обсуждалась возможность использования полученных результатов при оптическом исследовании наноструктур и в задачах, связанных с локальным фотоиндуцированным воздействием на материалы.

Работы по формированию полей излучения полупроводниковых лазеров были темой доклада С.П.Котовой (Самарский филиал ФИАНа). Формирование и распространение сложных поперечных пространственно-временных полей (оптических вихрей с ненулевым угловым моментом) представляет в оптике фундаментальный интерес и может использоваться в различных областях, в частности для лазерного манипулирования микроскопическими объектами, захвата и удержания атомов. Диодные лазеры в силу их высокой эффективности, компактности и удобства управления излучательными характеристиками посредством изменения тока накачки имеют наибольшее распространение среди когерентных источников излучения. Это определяет актуальность поиска эффективных способов формирования вихревых полей с заданным распределением интенсивности излучения полупроводниковых лазеров. В докладе были представлены два подхода к решению этой проблемы.

Новые источники перестраиваемого излучения на основе микроструктурированных волокон для фемтосекундной микроспектроскопии полупроводниковых материалов были рассмотрены в докладе А.Б.Федотова с соавторами (МГУ). Микроструктурированные волокна представляют собой новый тип оптических волноводов, оболочка которых состоит из набора вытянутых при высокой температуре полых стеклянных капилляров. Они обладают рядом уникальных свойств, открывающих новые возможности для передачи электромагнитного излучения, а также для нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов.

Проблеме надежности полупроводниковых лазеров были посвящены два доклада. И.Н.Завестовская (ФИАН) представила результаты по моделированию процессов,

приводящих к деградации активной области излучения полупроводниковых лазеров на соединениях нитрида галлия. Исследован порог лазерно-индуцированного разрушения при воздействии на нитрид галлия фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 400 нм, являющейся длиной волны излучения таких лазеров. Порог составил 34 ТВт/см^2 при длительности импульса облучения $\sim 130 \text{ фс}$, что обеспечивает большой ресурс работы полупроводниковых лазеров на основе нитридов галлия.

Работы по экспериментальному изучению деградации полупроводниковых светодиодов были представлены в докладе А.Н.Туркина (МГУ). С целью определения предельных характеристик светодиодов на основе широкозонных полупроводников нитрида галлия и механизмов деградации полупроводниковых структур исследовались процессы деградации полупроводниковых гетероструктур при температурах, близких к критической рабочей температуре р–n-перехода, а также в рекомендуемых рабочих условиях. Цель таких исследований – изучение механизмов и закономерностей процессов деградации полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия при инжекции постоянного или импульсного тока. Для исследований использовались выборки кристаллов на основе InGaN-гетероструктур синего и зеленого цветов свечения.

На заключительном заседании 29 ноября 2007 г. было отмечено, что Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур прошел успешно как в научном, так и в организационном плане. Программа, насыщенная докладами высокого научного уровня, была полностью выполнена. Особо было отмечено, что Симпозиум восполнил нехватку научного общения и широкого обсуждения вопросов развития когерентного оптического излучения полупроводниковых соединений и структур. Принято решение проводить Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур не реже, чем раз в два года.



Участники симпозиума в зимнем саду пансионата «Звенигородский».