

*50-летию кафедры
квантовой радиофизики и оптоэлектроники
Белгосуниверситета
посвящается*

Е. Д. Карих, И. С. Манак

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ЛАЗЕРОВ НА КАФЕДРЕ КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКИ И
ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Работы по полупроводниковой квантовой электронике на кафедре электрофизики (ныне кафедра квантовой радиофизики и оптоэлектроники) начались в 1964 г., т. е. практически через два года с момента создания первых инжекционных лазеров на основе арсенида галлия (GaAs) в СССР и США в 1962-1963г.г. Для получения динамического вырождения носителей при инжекции с целью обеспечения необходимого для генерации оптического усиления использовались сильно легированные структуры, изготавливавшиеся методами диффузии и жидкостной эпитаксии. Такие лазеры обладали высокими порогами генерации и могли работать в непрерывном режиме только при глубоком (криогенном) охлаждении до температуры жидкого азота (~77К). Из-за высоких уровней легирования активной среды время жизни носителей заряда было очень малым (до долей наносекунды), что, с одной стороны, приводило к высоким порогам генерации, а с другой – к малой инерционности лазеров по отношению к внутренней модуляции излучения по цепи накачки.

Первые работы по полупроводниковым лазерам на кафедре были связаны с исследованиями их инерционных свойств, в частности амплитудно- и фазово-частотных характеристик излучения диффузионных и эпитаксиальных гомолазеров. Основная проблема в технике эксперимента заключалась в отсутствии фотодетекторов с высокой чувствительностью и одновременно обладающих достаточной широкополосностью (порядка сотен мегагерц - единиц гигагерц). В связи с этим на первом этапе основные усилия были сосредоточены на разработке аппаратуры для исследования частотных характеристик лазеров на основе обычных (низкочастотных) фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), работающих в режиме преобразования частоты или фазового детектирования в прикатодной области, и методике исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) лазеров с их помощью (А. Ф. Шилов, И. А. Кобак, И. С. Манак).

Работы в данном направлении стимулировались, в частности, со стороны Государственного оптического института им. С. И. Вавилова

(Ю. В. Попов), где разрабатывались светодиодномеры на основе полупроводниковых лазеров. Информация об АЧХ лазеров и фазовой неоднородности в поле их излучения во многом определяла достижимую точность измерения расстояний фазовыми светодиодномерами. Теоретически рассмотрена частотная зависимость фазовой неоднородности излучения, с использованием ФЭУ в режиме фазового детектирования экспериментально исследована пространственно-временная структура излучения, установлены причины ее формирования и даны практические рекомендации повышения эффективности применения полупроводниковых источников излучения в светодиодномерных системах (И. С. Манак, А. Ф. Шилов). Разработаны методики для изучения вариаций моментов начала генерации излучения в ближней зоне полосковых лазеров на двухсторонней гетероструктуре (ДГС) и выявлены причины их появления (И. С. Манак, Ф. А. Ермалицкий, В. А. Шевцов¹).

Помимо решения прикладных задач, использование ФЭУ в режиме гетеродинамирования позволяло исследовать внутренние параметры лазеров, в частности, время жизни носителей заряда и его зависимость от тока накачки ниже и выше порога генерации (А. Ф. Шилов, И. А. Кобак, И. С. Манак, Е. Д. Карих), а также АЧХ гомо- и гетеросветодиодов при различных токах смещения (И. С. Манак, Т. С. Ефременко). Тесные научные контакты с НИИ «Полюс» (г. Москва) позволили продолжить исследования инжекционных свойств первых гетеролазеров с одиночной (ОГС) и двойной гетероструктурой (Е. Д. Карих, А. Ф. Шилов, И. С. Манак (БГУ), В. Д. Курносов, С. М. Сапожников (НИИ «Полюс»)). Удалось установить, что в непрерывном режиме время жизни носителей уменьшается с ростом тока еще до порога генерации за счет вынужденного излучения и оценить внутренний квантовый выход вынужденного излучения (Е. Д. Карих, И. С. Манак, А. Ф. Шилов).

При переходе от гомо- к гетеролазерам резко снизились пороговые токи генерации, лазеры стали способными к квазинепрерывному и непрерывному режимам генерации без криогенного охлаждения. Одной из проблем этого переходного периода был малый срок службы лазеров, связанный с постепенной, а иногда и катастрофической деградацией лазеров в процессе эксплуатации. В связи с этим были интенсифицированы работы по выяснению причин ухудшения характеристик лазеров в процессе работы (И. С. Манак, Т. А. Сырникова, А. В. Баркова) и влияния облучения лазеров быстрыми электронами на их характеристики (А. В. Баркова, И. С. Манак). Следует отметить, что в этот период про-

¹ Подчеркнуты фамилии студентов

блема деградации лазеров была одной из самых острых, однако несмотря на многочисленные работы по физике деградационных процессов в различных научных коллективах, практическое свое решение она нашла только на пути улучшения технологии изготовления лазеров. В 1980-х годах срок службы лазеров на основе AlGaAs был резко увеличен и проблема деградации практически утратила свое значение.

Появление совершенных гетероструктур привело к необходимости более детального изучения физики излучения в лазерных структурах, так как повышение внутреннего квантового выхода излучения сделало весьма существенным влияние так называемых вторичных процессов, связанных с циркуляцией собственной люминесценции внутри лазерной структуры. Всплеск числа работ по этой проблеме в мире приходится на конец 1970-х - начало 1980-х годов. Работы в этом направлении на кафедре касались влияния переизлучения собственной люминесценции на амплитудно- и фазовочастотные характеристики излучения, постоянную времени и внешний квантовый выход люминесценции (Е. Д. Карих, А. Ф. Шилов). Впоследствии была доказана существенная роль фотонного переноса возбуждения на пространственное перемещение носителей заряда в двойных гетероструктурах и формирование ближнего поля излучения в допороговом режиме (Е. Д. Карих).

Неравновесность люминесценции приводит к зависимости параметров излучения от условий выхода фотонов за пределы лазерной структуры. Использование этого фундаментального факта позволило предложить новую оригинальную методику определения внутреннего квантового выхода люминесценции в структурах с переизлучением, не требующую абсолютных измерений мощности излучения (Е. Д. Карих).

Исследование импеданса и емкостных свойств лазерной структуры при обратном смещении позволили предложить методику определения постоянной времени лазерных структур в наносекундном диапазоне с помощью низкочастотной электронной аппаратуры (Е. Д. Карих, А. Ф. Шилов).

Теоретически проанализированы амплитудно-частотные, фазовочастотные и переходные характеристики полупроводниковых источников излучения при межзонной рекомбинации неравновесных носителей заряда и в случае рекомбинации ННЗ через примесные состояния в запрещенной зоне полупроводника (И. С. Манак, С. Б. Михнюк). Экспериментально исследованы спектрально-временные характеристики светодиодов в зеленой и красной областях спектра (И. С. Манак, А. М. Лисенкова, А. Н. Бондаренко, Н. В. Фалькова). Сформулированы условия оптимизации амплитуды и длительности импульса излучения в

одномодовом лазере в режимах свободной генерации и модуляции добротности резонатора (А. А. Афоненко, И. С. Манак).

Установлены существенные отличия переходных процессов для отдельных мод и в интегральном потоке многомодовых инжекционных лазеров (И. С. Манак, В. Н. Ювченко), определено влияние нагрева активной области лазера с вертикальным резонатором на модовый состав излучения (И. С. Манак, О. П. Дуль). Рассмотрено влияние мощности накачки и длины внешнего резонатора на динамику излучения непрерывно действующего инжекционного лазера и установлены возможные режимы его работы: режим синхронизации мод, квазистационарный и неустойчивый автоколебательный режимы (В. К. Кононенко, И. С. Манак, И. Н. Троцкий).

Для возбуждения лазерных диодов, генерирующих оптические импульсы излучения пикосекундной и наносекундной длительностей, созданы оригинальные генераторы накачки (И. А. Кобак, В. Г. Пикулик).

Предложен способ перестройки длины волны излучения ДГС-лазера за счет дополнительной модуляции короткими импульсами тока смещенного в прямом направлении лазерного диода (С. Д. Жарников, И. А. Малевич, И. С. Манак).

Сведения о поляризации излучения инжекционных лазеров представляют интерес в связи с широким применением оптических методов записи, хранения, обработки и передачи информации. В этой связи проведено детальное исследование пространственно-поляризационных (М. Е. Клокова, В. М. Колесников, И. С. Манак) и спектрально-поляризационных (И. С. Манак, Ю. Л. Журавский) характеристик излучения ДГС-лазеров. Предложены способы управления диаграммой направленности ДГС-лазеров изменением температуры (С. Д. Жарников, И. С. Манак, Ю. В. Пучин, А. Ф. Шилов) и приложением ВЧ-поля (С. Д. Жарников, И. С. Манак, А. Ф. Шилов). Разработаны способы экспериментального измерения температуры активной области инжекционных лазеров методом радиационной пирометрии (С. Д. Жарников, И. С. Манак, А. Ф. Шилов) и спектральным методом (С. Д. Жарников, И. С. Манак, И. В. Лешкевич, А. Ф. Шилов).

В течение всего периода не прекращались исследования в области модуляционных свойств новых типов полупроводниковых излучателей. Проведен детальный анализ источников энгармонизма при глубокой модуляции излучения в гетеросветодиодах. Показано, что в излучении слабелегированных структур появляются так называемые частотно-зависимые гармоники, возникновение которых не может быть предска-

зано по стационарным ватт-амперным характеристикам излучателей (Е. Д. Карих).

Применительно к системам с когерентным приемом излучения исследована эффективность гетеродинирования излучения инжекционных лазеров в расходящихся пучках (Е. Д. Карих, И. А. Малевич).

Цикл работ был посвящен способам и системам управления излучением инжекционных лазеров, включая мощностные, частотные и импульсные характеристики лазеров (Е. Д. Карих, К. Н. Коростик, И. А. Малевич), на которые получен ряд авторских свидетельств.

С середины 1990-х годов на кафедре начаты работы в области когерентной регистрации оптических эхо-сигналов с помощью полупроводниковых инжекционных лазеров. Проанализированы математические модели лазеров в режиме когерентной регистрации оптического эхо-сигнала (Е. Д. Карих, А. Г. Рудой), исследован микрохаос в инжекционном лазере со стохастической внешней обратной связью (Е. Д. Карих, А. В. Осадчий), реакция лазера на оптический эхо-сигнал с доплеровским сдвигом частоты (Е. Д. Карих, С. А. Василевский), оценена эффективность автодинного преобразования в инжекционном лазере (Е. Д. Карих, А. Г. Рудой), изучены особенности ондуляционных характеристик в полупроводниковом лазере с переключением мод (Е. Д. Карих, А. Г. Рудой, Д. В. Пухов), измерен оптоэлектронный отклик многомодового инжекционного лазера (Е. Д. Карих, Д. В. Пухов), создана установка для изучения спектральных и оптоэлектронных свойств инжекционных лазеров на основе малогабаритной телевизионной системы (Е. Д. Карих, Д. В. Пухов).

В связи с разработкой нового поколения инжекционных лазеров с квантоворазмерными активными областями изучались особенности работы таких структур в режиме оптоэлектронного преобразования (А. А. Афоненко, Е. Д. Карих, И. С. Манак).

Разработана обобщенная модель полупроводникового лазера с оптической обратной связью от рассеивающей среды, с помощью которой обоснован метод самосмещения в спектроскопии квазиупругорассеянного лазерного излучения (Е. Д. Карих).

Всегда являлась актуальной задача генерации инжекционными лазерами ультракоротких импульсов излучения. Экспериментальные исследования динамики генерации излучения ДГС-лазерами с насыщающимся поглотителем в резонаторе показали возможность генерации ими оптических импульсов с длительностью менее 50 пс (И. С. Манак, Е. В. Карачун (Павловец), А. С. Прохоренко).

С 1992 г. на кафедре интенсивно начали проводиться теоретические работы в области квантоворазмерных инжекционных лазеров. Обычно процессы, происходящие в полупроводниковых лазерах, описываются на основе скоростных уравнений, в которых принимаются во внимание два основных эффекта: усиление электромагнитного поля в результате вынужденных переходов и обратное влияние, оказываемое излучением на активную среду. Для хорошего согласования с экспериментальными результатами в теоретических расчетах учтены эффекты нелинейного усиления и для объяснения причин нелинейности усиления предложены несколько механизмов, которые приводят к демпфированию релаксационных пульсаций излучения и снижению полосы частот прямой модуляции излучения лазеров (А. А. Афоненко, В. К. Кононенко, И. С. Манак). Показано, что в лазерах на основе многослойных асимметричных гетероструктур генерация может осуществляться одновременно на двух или трех спектрально разнесенных длинах волн, и различные механизмы нелинейного усиления по-разному отражаются на динамическом отклике лазера (А. А. Афоненко, В. К. Кононенко, И. С. Манак). Установлено, что причиной нелинейных явлений с отмеченными особенностями является динамический нагрев носителей излучением.

Расчеты зонного профиля и эффективности инжекции асимметричных квантоворазмерных гетероструктур на основе совместного интегрирования уравнения Пуассона и уравнений непрерывности для электронного и дырочного токов с учетом процессов туннелирования и баллистического переноса показывают, что в системе тройного соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ разделение квантовых ям широкозонным барьерным слоем $x > 0,3$ толщиной около 25 нм и уровнем легирования порядка 10^{18} см^{-3} приводит к неоднородному возбуждению квантоворазмерных слоев. При соответствующем подборе параметров в таких структурах можно реализовать режимы бистабильного включения мощности и генерации самоподдерживающихся импульсов излучения (А. А. Афоненко, В. К. Кононенко, И. С. Манак). Бистабильный режим генерации осуществляется в структуре, в которой одна квантовая яма служит насыщающимся поглотителем для излучения, генерируемого в соседней квантовой яме.

На основе многослойных асимметричных квантоворазмерных гетероструктур, в которых различные квантовые ямы, разделенные легированными широкозонными барьерными слоями, образуют активные и пассивные области, предложена конфигурация инжекционного лазера, позволяющая существенно ослабить зависимость порогового тока и выходной мощности излучения от температуры (А. А. Афоненко, И. С. Манак, С. В. Наливко). В последней структуре падение мощности, обусловлен-

ное ростом скорости спонтанной рекомбинации при нагреве лазерного диода, может быть компенсировано (при неизменном токе накачки) увеличением коэффициента инжекции носителей тока в усиливающую квантовую яму. Для лазерных структур с рабочей температурой около 300 К относительное изменение мощности генерации при заданном токе накачки составляет менее 0,5 % при изменении температуры ± 5 К,

Для нового типа полупроводниковых квантоворазмерных лазеров на основе асимметричных многослойных гетероструктур с неоднородно возбужденными активными слоями, отличающимися толщиной и компонентным составом, показана возможность непрерывной перестройки длины волны генерации в широком спектральном интервале с практически постоянной выходной мощностью излучения во всем диапазоне перестройки (В. К. Кононенко, И. С. Манак, С. В. Наливко). Обоснованы методы получения широкого плоского спектра волноводного усиления и контроля спектрального положения максимума усиления в широком диапазоне длин волн при изменении тока накачки.

Показана возможность генерации разностной моды благодаря решеточной нелинейности в инжекционных полупроводниковых лазерах с квантовыми ямами, генерирующих две моды ближнего ПК диапазона (высокочастотные моды). Для полупроводниковых лазеров с диэлектрическим волноводом предложена специальная конструкция, позволяющая, во-первых, осуществлять генерацию двух высокочастотных мод, а во-вторых, обеспечить условие фазового синхронизма необходимое для эффективного смешивания этих мод (А. А. Афоненко).

Предложены методики расчета профиля потенциальной энергии, позволяющие установить закономерности изменения формы и глубины потенциального рельефа легированной сверхрешетки в зависимости от толщины слоев, концентрации примесей, других конструктивных параметров, а также уровня возбуждения сверхрешетки. Проведен анализ распределения энергетических состояний и рассчитана двумерная концентрация носителей тока в легированной сверхрешетке с учетом хвостов плотности состояний, возникающих в результате флуктуации концентраций легирующих примесей. Рассмотрены особенности экранирования электростатического потенциала, связанные с пространственным разнесением электронов и дырок в легированных сверхрешетках, определено изменение длин экранирования и характеристических параметров хвостов плотности состояний в n и p -областях с уровнем возбуждения n - i - p - i -кристалла и проведен сравнительный анализ при учете гауссовых и экспоненциальных хвостов плотности состояний. Показано, что корреляция в распределении примесей обуславливает постоянство длины эк-

ранирования и параметра хвоста плотности состояний при низких уровнях возбуждения, что отражается на оптических и электрических характеристиках легированной сверхрешетки (Д. В. Ушаков, В. К. Кононенко, И. С. Манак). Предсказан аномальный характер изменения отношения коэффициента диффузии к подвижности носителей тока в n n - i - p - i -кристаллах (В. К. Кононенко, Д. В. Ушаков).

Развита методика расчета спектров излучения в легированных сверхрешетках с учетом хвостов плотности состояний и сужения ширины запрещенной зоны. Исследованы пороговые и динамические характеристики двухсекционной лазерной структуры на основе δ -легированной сверхрешетки. Проанализированы особенности изменения спектра усиления и найдены условия перестройки длины волны генерации в широком спектральном диапазоне в режимах стационарной генерации, переходного процесса и регулярных пульсаций (Д. В. Ушаков, В. К. Кононенко, И. С. Манак).

Изучен режим четырехволнового смешения в полупроводниковом лазере, на основе волнового уравнения получены аналитические выражения для комплексных амплитуд генерируемого излучения, проведен анализ динамики генерации инжекционного лазера с внешней сильной оптической запаздывающей обратной связью и построен критерий его устойчивости. Предложена методика определения параметра уширения линии генерации, а также параметра амплитудно-фазовой связи для нелинейного усиления на основе частотной зависимости отношения коэффициентов фазовой и амплитудной модуляции (А. А. Афоненко, И. С. Манак, А. Б. Матюхин).

В дипольном приближении для системы $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ проведены численные расчеты спектров поглощения и нелинейной рефракции, зависимости показателя преломления от интенсивности электромагнитного излучения в активной области. Установлены основные закономерности изменения показателя преломления с ростом плотности потока излучения для легированных и нелегированных квантоворазмерных гетероструктур. Проведены оценки эффективного времени жизни неравновесных носителей тока для прямых переходов в модели без правила отбора для гетероструктур на основе GaAs , GaInAs , GaN и ZnCdSe . Теоретически исследованы спектральные характеристики лазерных диодных линеек (В. К. Кононенко, В. И. Цвирко).

Теоретически исследованы поляризационные характеристики излучения лазерной гетероструктуры $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с одной квантовой ямой в неселективном и селективном резонаторах с учетом различных факторов (А. Г. Буйкевич, В. К. Кононенко, И. С. Манак).