

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2000

Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии

Ж.И. Алфёров

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2000 г.)

PACS number: 01.60. + q

Автобиография

Жизнь проносится удивительно быстро. Кажется, совсем недавно я отмечал юбилеи видных физиков, своих учителей, казавшихся мне весьма пожилыми людьми, а сегодня уже я сам недавно отметил свое семидесятилетие.

Мои родители, Иван Карпович и Анна Владимировна, родились и выросли в Белоруссии. Отец восемнадцатилетним юношей в 1912 г. приехал в Санкт-Петербург и работал грузчиком в порту, разнорабочим на конвертной фабрике и наконец начал настоящую рабочую карьеру на заводе "Лесснер" (впоследствии завод им. Карла Маркса).

В первую мировую войну он — храбрый гусар, унтер-офицер лейб-гвардии, Георгиевский кавалер. В сентябре 1917 г. отец вступил в партию большевиков и сохранил преданность идеям социализма и коммунизма до конца жизни.

В детстве с замиранием сердца старший брат и я слушали его рассказы о гражданской войне и его военной карьере. Мы узнали, как вчерашний унтер-офицер стал командиром кавалерийского полка Красной армии. Отец также рассказывал нам о своих встречах с революционными лидерами: В.И. Лениным, Л.Д. Троцким, Б.Е. Думенко, "товарищем Андреем" (А. Сольцем), в квартире которого в "Доме на набережной" мы всегда останавливались, приезжая в Москву. После окончания отцом Промакадемии в 1935 г. судьба бросала нас по всей стране: Сталинград, Новосибирск, Барнаул, Сясьстрой под Ленинградом, Туринск Свердловской области, где мы прожили военные годы, и наконец лежащий в руинах после войны Минск. Папа был назначен директором завода, комбината, позже начальником треста. Мама возглавляла Совет женщин, работала в библиотеке и всегда была для

Ж.И. Алфёров. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул. 26, 194021 Санкт-Петербург, Российская Федерация
Тел. (812) 247-21-45



нас самым мудрым воспитателем и самым близким другом. То, что мы с братом были "директорскими детьми", означало прежде всего, что нужно быть примером в школе и в общественной жизни.

Мне было легко учиться, и у меня всегда был надежный защитник — старший брат Маркс, сделавший мое существование безоблачным как в школе, так и на

улице. Он закончил школу в Сясьстрое 21 июня 1941 г. (на следующий день началось вторжение фашистов), и несколько дней спустя мы уехали на Урал, в город Туринск, куда папа был незадолго до этого назначен директором только что построенного завода пороховой целлюлозы (Завода № 3, как он именовался тогда). Старший брат, ему было тогда 17 лет, поступил в Уральский индустриальный институт на энергетический факультет. Юноша считал, что будущее за энергетикой. Но проучился он недолго, поскольку решил, что его долг — идти на фронт защищать Родину от фашистов.

Он прошел Сталинград, Харьков, Курскую дугу. Оправившись от тяжелого ранения в голову, попал снова на фронт. Это был "второй Сталинград", как называли тогда Корсунь-Шевченковское сражение, где и погиб в бою в свои 20 лет гвардии младший лейтенант Марк Иванович Алфёров, мой старший брат, навсегда оставшийся для меня двадцатилетним.

В октябре 1943 г. Марк провел с нами в Свердловске три дня, когда после госпиталя снова ехал на фронт. Часто, оглядываясь назад, я вспоминаю эти три дня, его фронтные рассказы, его страстную юношескую веру в силу науки и инженерной мысли.

В послевоенном разрушенном Минске я учился в единственной в то время русской мужской средней школе № 42, где был замечательный учитель физики — Яков Борисович Мельцерзон. Он читал нам лекции по физике, на которых мы, вообще довольно "хулиганистый" класс, никогда не шалили и слушали его внимательно, потому что Яков Борисович, влюбленный в физику, умел передать это отношение к своему предмету нам. Пораженный его рассказом о работе катодного осциллографа и принципах радиолокации, я по его совету после окончания школы поехал учиться в Ленинград, в Электротехнический институт им. В.И. Ульянова-Ленина (сокращенно ЛЭТИ).

Здесь, в институте, внесшем значительный вклад в развитие отечественной электроники и радиотехники и в образование в этих областях, мне очень повезло с моим первым научным руководителем. Теоретические дисциплины давались мне очень легко, и поэтому меня привлекала "работа руками". На третьем курсе я пошел работать в Вакуумную лабораторию. Там я начал экспериментальную работу под руководством Наталии Николаевны Созиной, которая исследовала полупроводниковые фотодетекторы. Так в 1950 г., полвека тому назад, полупроводники стали главным делом моей жизни. Написанная во время блокады Ленинграда книга Ф.Ф. Волькенштейна *Электропроводность полупроводников* стала моим учебником по физике полупроводников. Моя дипломная работа была посвящена получению пленок и исследованию фотопроводимости теллурида висмута.

В декабре 1952 г. я окончил институт, и мой руководитель Наталия Николаевна очень хотела, чтобы я остался на кафедре в ЛЭТИ для совместной работы. Но я мечтал о работе в Физтехе, институте Абрама Федоровича Иоффе, монография которого *Основные представления современной физики* стала для меня настольной книгой. К счастью, в ЛЭТИ на наш факультет пришли три заявки из Института Иоффе, и одна из них досталась мне. Радости моей не было границ. И я думаю, что моя счастливая жизнь в науке была предопределена этим удачным распределением.

В письме родителям, жившим тогда в Минске, я писал о выпавшем мне огромном счастье работать в Институте Иоффе. Я тогда еще не знал, что академик Иоффе был освобожден от обязанностей директора и ушел из созданного им института, где он проработал директором более 30 лет.

Я вспоминаю свой первый день в Физико-техническом институте, 30 января 1953 г., представление моему новому научному руководителю, Владимиру Максимовичу Тучкевичу, в то время заведующему сектором. Наш небольшой коллектив решал очень важную задачу: создание первых отечественных германиевых диодов и триодов (транзисторов) с р-п-переходами.

Физтех в 1953 г. был по нынешним временам небольшим институтом, я получил пропуск № 429, и это означало, что в тот момент численность всех сотрудников Института не превышала эту величину. Большинство знаменитых физтеховцев уехало в Москву к И.В. Курчатову и в другие вновь создаваемые "атомные" центры. Полупроводниковая "элита" ушла вместе с А.Ф. Иоффе в недавно организованную Лабораторию полупроводников при Президиуме АН СССР. В Физтехе из старшего поколения "полупроводниковцев" остались Д.Н. Наследов, Б.Т. Коломиец и В.М. Тучкевич.

Новый директор Физтеха после А.Ф. Иоффе, академик А.П. Комар, далеко не лучшим образом вел себя по отношению к своему предшественнику, но в возрождении и развитии института избрал вполне разумную стратегию. Основное внимание дирекция уделяла поддержке работ по созданию качественно новой полупроводниковой электроники, космических исследований (газодинамика больших скоростей и высокотемпературные покрытия), разработке методов разделения легких изотопов для водородного оружия под руководством Б.П. Константинова.

Развивались и фундаментальные исследования как теоретического, так и экспериментального характера: именно в это время был экспериментально открыт экситон (Е.Ф. Гросс), созданы основы кинетической теории прочности (С.Н. Журков), начаты пионерские работы по физике атомных столкновений (В.М. Дукельский, Н.В. Федоренко).

Дирекция (А.П. Комар и Д.Н. Наследов) прекрасно понимала важность привлечения молодежи в науку, и каждый приходящий на работу в ЛФТИ молодой специалист проходил обязательное собеседование в дирекции. Именно таким образом были приняты на работу в Физтех многие известные российские ученые, среди которых были нынешние члены Академии наук Б.П. Захарченя, А.А. Каплянский, Е.П. Мазец, В.В. Афрохимов и другие.

Как одно из самых ярких событий в жизни, я вспоминаю свое первое участие в полупроводниковом семинаре в Физтехе в феврале 1953 г. Это был блестящий доклад Е.Ф. Гросса об открытии экситона. Ощущение, которое я испытал тогда, трудно с чем-либо сравнить. Я был потрясен докладом о рождении открытия в той области науки, в которой я делал свои первые шаги.

Однако главным делом была ежедневная работа в лаборатории. Как реликвию я храню лабораторный журнал того времени с моими записями о создании первого советского транзистора с р-п-переходом 5 марта 1953 г. Я и сейчас, вспоминая те дни, горжусь тем, что мы сделали. Мы — это группа очень молодых

людей, которая под руководством В.М. Тучкевича преуспела в разработке основ технологии и метрики транзисторной электроники. Вот имена исследователей, которые работали в нашей небольшой лаборатории: А.А. Лебедев, выпускник Ленинградского государственного университета — выращивание и легирование совершенных монокристаллов германия, Ж.И. Алфёров — получение транзисторов с параметрами на уровне лучших мировых образцов, А.И. Уваров и С.М. Рывкин — создание прецизионной метрики монокристаллов германия и транзисторов, Н.С. Яковчук, выпускник радиотехнического факультета ЛЭТИ — разработка схем на транзисторах.

Уже в мае 1953 г. первые советские транзисторные приемники демонстрировались "высокому начальству". В этой работе, которой мы отдавались со всей страстью молодости и сознанием высочайшей ответственности перед страной, очень быстро и эффективно шло мое формирование как ученого. Я начал понимать значение технологии не только для создания новых электронных приборов, но также и для фундаментальных исследований; роль и значение "мелких", на первый взгляд, деталей в эксперименте. И именно с тех времен я предпочитаю анализировать эксперимент, исходя из "простых" общих законов прежде, чем выдвигать высоконаучные объяснения.

В последующие годы наш небольшой коллектив заметно расширился, и в очень короткое время уже в лаборатории В.М. Тучкевича были созданы первые советские германиевые силовые выпрямители — германиевые фотодиоды и кремниевые солнечные батареи; было также исследовано поведение примесей в германии и кремнии.

В мае 1958 г. Анатолий Петрович Александров (впоследствии Президент АН СССР) обратился к нам с просьбой выполнить работу по созданию специального полупроводникового устройства для первой советской атомной подводной лодки. Для решения этой задачи нужно было разработать принципиально новую технологию и конструкцию германиевых вентилях, что и было сделано в рекордно короткие сроки. В октябре устройства уже стояли на лодке. Помню, как мне, младшему научному сотруднику, звонил первый заместитель Председателя Правительства СССР Дмитрий Федорович Устинов и просил ускорить на две недели создание устройств. Пришлось поселиться на два месяца прямо в лаборатории, но задание, конечно, было выполнено. Для меня и сегодня полученный в 1959 г. мой первый орден за эту работу — одна из самых ценных наград.

В 1961 г. я защитил кандидатскую диссертацию, посвященную в основном разработке и исследованию мощных германиевых и частично кремниевых выпрямителей. На основе этих работ возникла отечественная силовая полупроводниковая электроника. С научной, чисто физической точки зрения для меня был очень важным полученный мной вывод, что в $p-i-n$, $p-n-n^+$ -полупроводниковых гомоструктурах при рабочих плотностях тока (для большинства полупроводниковых приборов), ток в пропускном направлении определяется рекомбинацией в сильно легированных p - и $n(n^+)$ -областях структур, тогда как вклад рекомбинации в средней $i(n)$ -области гомоструктуры не является определяющим. Поэтому при появлении первой работы по полупроводниковым лазерам для меня было естествен-

ным рассмотрение преимуществ использования в лазерах двойной гетероструктуры типа $p-i-n$ ($p-n-n^+$, $n-p-p^+$). Эта идея была нами сформулирована сразу же после появления первой работы Р. Холла с сотрудниками, описывающей полупроводниковый лазер на основе гомо- $p-n$ -структуры в арсениде галлия.

Реализация главных преимуществ гетероструктур оказалась возможной только после получения гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As$. В этой работе мы всего лишь на один месяц опередили американских исследователей из IBM.

Если в начале наших исследований гетероструктур мне не раз приходилось убеждать моих молодых коллег, что мы далеко не единственные в мире, кто считает, что полупроводниковые физика и электроника будут развиваться на основе ГЕТЕРО-, а не ГОМО-структур, то с 1968 г. реально началось очень жесткое соревнование, прежде всего с тремя лабораториями крупнейших американских фирм: Bell Telephone, IBM и RCA.

В 1967 г. во время короткой научной командировки в Англию я посетил лаборатории STL в Харлоу, которые были великолепно оборудованы по тем временам и в которых имелась прекрасная экспериментальная база, но с английскими коллегами можно было обсуждать лишь теоретические аспекты физики гетероструктур, поскольку они тогда считали экспериментальные исследования неперспективными. Поэтому я потратил некоторое время на лондонские достопримечательности, в том числе и магазины. Я купил свадебные подарки моей невесте, Тамаре Дарской. Сразу по возвращении из Англии мы отпраздновали свадьбу в роскошном ресторане "Крыша" в гостинице "Европейская".

Тамара, дочь замечательного актера Георгия Дарского из Воронежского театра музыкальной комедии, работала в то время под Москвой, в космической фирме академика В.П. Глушко. Она удивительным образом сочетала несравненную красоту с глубоким умом и душевностью по отношению к своим друзьям. Это было время моих еженедельных полетов в Москву. Я мог себе это позволить, будучи старшим научным сотрудником Физтеха — билет на летавший ежечасно ТУ-104 стоил 11 рублей (около 15 долларов). Тем не менее после полугода таких "челночных" полетов мы решили, что все-таки лучше Тамаре переехать в Ленинград.

В 1968–1969 гг. были практически реализованы все основные идеи управления электронными и световыми потоками в классических гетероструктурах на основе системы арсенид галлия–арсенид алюминия. Мы получили принципиально важные фундаментальные результаты, такие как односторонняя эффективная инжекция, эффект "сверхинжекции", диагональное туннелирование, электронное и оптическое ограничения в двойной гетероструктуре, ставшей вскоре основным элементом исследований низкоразмерного электронного газа в полупроводниках; нам удалось реализовать основные преимущества использования гетероструктур в полупроводниковых приборах: лазерах, светодиодах, солнечных батареях, диодах и транзисторах. Самым значительным было, конечно, создание низкопороговых, работающих при комнатной температуре лазеров на двойной гетероструктуре (ДГС), предложенной нами еще в 1963 г. Подход, который предложили М.Б. Паниш (M.V. Panish) и И. Хаяши (I. Hayashi) из Bell Telephone, а также

Г. Крессель (H. Kressel) из RCA, отличался от нашего в том отношении, что он был основан на использовании в лазерах одиночной гетероструктуры p-AlGaAs–p-GaAs, и это накладывало определенные ограничения. Очевидно, они не верили в возможность получения эффективной инжекции в гетеропереходах, хотя потенциальные преимущества ДГС были им известны.

В августе 1969 г., во время моей первой поездки в США на Международную конференцию по люминесценции в Ньюарке, штат Делавэр, мой доклад, в котором приводились параметры низкопороговых, работающих при комнатной температуре лазеров на основе AlGaAs-ДГС, произвел на американских коллег впечатление разорвавшейся бомбы. Профессор Я. Панков (Ya. Pankov) из RCA, незадолго до доклада сообщивший мне, что, к сожалению, для моего визита в их лабораторию у них нет разрешения, сразу после доклада сообщил, что оно получено, и компания ждет меня после конференции. Я не отказал себе в удовольствии ответить, что теперь у меня нет времени, поскольку IBM и Bell Telephone пригласили меня посетить их лаборатории еще до моего доклада, и у меня уже все распланировано.

Мой доклад на семинаре в Bell, осмотр лабораторий и дискуссии с американскими коллегами довольно четко показали мне наши достоинства и недочеты. Думаю, что наступившее вскоре соперничество за достижение первыми непрерывного режима работы лазеров при комнатной температуре было редким для того времени примером открытого соревнования лабораторий из двух антагонистических великих держав. Мы выиграли это соревнование, опередив на месяц группу М. Панища из Bell Telephone. Значение получения "непрерыва" было прежде всего связано с тем, что в это же время было создано оптическое волокно с малыми потерями, и создание наших ДГС-лазеров привело к рождению и бурному развитию волоконно-оптических систем связи.

В течение зимы 1970–1971 гг. и весны 1971 г. я провел шесть месяцев в США, работая в лаборатории полупроводниковых приборов Иллинойского университета совместно с проф. Ником Холоньяком (Nick Holonyak). Мы впервые познакомились в 1967 г., когда он посетил мою лабораторию в Физтехе. Ник Холоньяк, который является одним из основателей полупроводниковой оптоэлектроники и изобретателем первых полупроводниковых лазеров видимого диапазона и светодиодов, стал моим близким другом. Вот уже 33 года мы обсуждаем все проблемы физики полупроводников и электроники, а также жизненные аспекты; наши контакты (визиты, письма, семинары, телефонные разговоры) сыграли очень важную роль в нашей работе и жизни.

В 1971 г. за работы по ДГС-лазерам мне была присуждена Золотая медаль Франклиновского института в США — моя первая международная награда, которая поэтому имеет для меня особую ценность. Франклиновский институт присуждал медали и другим советским ученым: в 1944 г. академику П.Л. Капице, в 1974 г. академику Н.Н. Боголюбову и в 1981 г. академику А.Д. Сахарову. Быть в такой компании — большая честь!

Система изопериодичных гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As$, которая поначалу казалась счастливым исключением, получила неограниченное развитие на

основе многокомпонентных твердых растворов, сперва теоретическое, а затем экспериментальное (самый яркий пример — InGaAsP).

Солнечные батареи на основе гетероструктур были созданы нами еще в 1970 г. И когда американцы публиковали свои первые работы, наши батареи уже летали на спутниках, и было развернуто их промышленное производство. Многолетняя эксплуатация наших батарей на орбитальной станции "Мир" блестяще доказала их преимущества в космосе. И хотя прогнозы резкого снижения стоимости электроэнергии, получаемой от полупроводниковых солнечных батарей, пока не оправдались, в космосе самым эффективным источником энергии, безусловно, являются солнечные батареи на гетероструктурах на основе соединений $A^{III}B^V$.

Присуждение в 1972 г. Ленинской премии (высшей научной награды в СССР) мне и моим ученикам-коллегам было для нас большой радостью, омраченной только тем, что в силу не зависящих от нас, сугубо формальных и малопонятных причин из списка представленных к награде выпали Р.Ф. Казаринов и Е.Л. Портной.

В день присуждения премии я был в Москве и позвонил домой, в Ленинград, чтобы сообщить об этом радостном событии, но телефон не отвечал. Я позвонил родителям (с 1963 г. они жили уже в Ленинграде) и, радостно сообщив отцу, что его сын — лауреат Ленинской премии, услышал в ответ: "Что твоя Ленинская премия! У нас сегодня внук родился!". 1972 год был счастливым для меня: в дополнение к престижной премии я был избран осенью в Академию наук, но самой большой радостью было, конечно, рождение Вани Алфёрова.

Исследования сверхрешеток и квантовых ям, бурно развивавшиеся на Западе, а затем и у нас, в короткое время привели к рождению новой области квантовой физики твердого тела — физики низкоразмерных электронных систем. Апогеем этих работ в настоящее время являются исследования нуль-мерных структур — "квантовых точек". Отрадно, что Институт Иоффе и сегодня — в столь трудное для российской науки время — остается мировым лидером в этой области. И работы уже второго и третьего поколений моих учеников — П.С. Копьева, Н.Н. Леденцова, В.М. Устинова, С.В. Иванова — получили широкое признание. Н.Н. Леденцов стал самым молодым членом-корреспондентом Российской академии наук.

В 1987 г. я был избран директором ФТИ, в 1989 г. — председателем президиума Ленинградского научного центра АН СССР, а в апреле 1990 г. — вице-президентом Академии наук СССР. Впоследствии на эти посты я был переизбран уже в Российской академии наук.

В первые годы моего президентства и директорства нам удалось значительно расширить возможности проведения исследований в нашей уникальной (для всего мира) Академии наук и развить систему эффективного сотрудничества с вузами и школой. Так, в те годы при Физтехе была открыта Физико-техническая школа и был продолжен процесс создания на базе Института специализированных учебных кафедр: первая кафедра такого рода — кафедра оптоэлектроники — была создана в Электротехническом университете (бывший ЛЭТИ) еще в 1973 г. На основе уже существующей и вновь организованных базовых кафедр в Политехническом институте в 1988 г. был создан Физико-технический факультет.

Создание Научно-образовательного центра при Физтехе, объединяющего школьников, студентов и ученых в одном прекрасном здании, которое можно с полным правом назвать "Дворцом знаний", внесло значительный вклад в развитие вышеупомянутой системы образования.

И все-таки главным в эти годы было сохранение нашей Академии наук как высшей — и уникальной! — научной и образовательной структуры России. Ее хотели уничтожить в 20-е годы как "наследие царского режима". Ее хотели уничтожить в 90-е годы как "наследие тоталитарного советского режима". Для ее сохранения я согласился пойти депутатом в Государственную Думу в 1995 г. Президент РАН академик Ю.С. Осипов, ее вице-президенты, академики и члены-корреспонденты, доктора и кандидаты наук, старшие и младшие научные сотрудники, лаборанты и механики — все заняли твердую позицию в этой трудной ситуации. Ради сохранения Академии наук мы шли иногда на компромиссы с властью, но никогда — со своей совестью.

Все, что создало человечество, оно создало благодаря Науке. И если уж суждено нашей стране быть великой державой, то она ею будет не благодаря ядерному оружию, не благодаря вере в Бога или в президента, или в западные инвестиции, а благодаря труду ее народа, вере в знание, в науку, благодаря сохранению и развитию научного потенциала и образования.

Десятилетним мальчиком я прочитал замечательную книгу В.А. Каверина *Два капитана*. И всю последующую жизнь я следую принципу ее главного героя, Сани Григорьева: "Бороться и искать, найти и не сдаваться!".

Очень важно при этом понимать, за что ты борешься.

PACS numbers: 01.30.Bb, 42.55.Px, 78.67. – n

Нобелевская лекция

1. Введение

Сегодня невозможно представить себе современную физику твердого тела без полупроводниковых гетероструктур. Полупроводниковые гетероструктуры, и в особенности двойные гетероструктуры, включая квантовые ямы, проволоки и точки, являются сегодня предметом исследования 2/3 исследовательских групп, работающих в области физики полупроводников.

Если возможность управления типом проводимости полупроводника с помощью легирования различными примесями и идея инжекции неравновесных носителей заряда были теми семенами, из которых выросла полупроводниковая электроника, то гетероструктуры позволили решить значительно более общую проблему управления фундаментальными параметрами в полупроводниковых кристаллах и приборах, такими как ширина запрещенной зоны, эффективные массы носителей заряда и их подвижности, показатель преломления, электронный энергетический спектр и т.д.

Развитие физики и технологии полупроводниковых гетероструктур привело к удивительным изменениям в нашей повседневной жизни. Электроника на гетероструктурах широко используется во многих областях человеческой деятельности. Едва ли можно представить нашу жизнь без телекоммуникационных систем, основанных на лазерах с двойной гетероструктурой (ДГС), без

гетероструктурных светодиодов и биполярных транзисторов, без малошумящих транзисторов с высокой подвижностью электронов (ВПЭТ) для высокочастотных применений, включая, например, системы спутникового телевидения. ДГС-лазеры присутствуют сейчас практически в каждом доме в проигрывателях для лазерных дисков. Солнечные элементы на гетероструктурах широко используются как в космосе, так и на земле.

Наш интерес к полупроводниковым гетероструктурам не был случайным. Систематические исследования полупроводников были начаты еще в 30-е годы в Физико-техническом институте под прямым руководством его основателя — Абрама Федоровича Иоффе. В 1932 г. В.П. Жузе и Б.В. Курчатова исследовали собственную и примесную проводимость полупроводников, и в том же году А.Ф. Иоффе и Я.И. Френкель создали теорию выпрямления тока на контакте металл–полупроводник, основанную на явлении туннелирования [1]. В 1931 и 1936 гг. Я.И. Френкель опубликовал свои знаменитые работы, в которых он предсказал экситоны в полупроводниках, ввел сам это название и разработал теорию экситонов, а Е.Ф. Гросс экспериментально открыл экситоны в 1951 г. [2]. Первая диффузионная теория выпрямляющего р–n-гетероперехода, которая стала основой теории n–p-перехода В. Шокли, была опубликована Б.И. Давыдовым в 1939 г. [3]. По инициативе А.Ф. Иоффе с конца 40-х годов в Физико-техническом институте были начаты исследования по интерметаллическим соединениям. Теоретическое предсказание и экспериментальное открытие полупроводниковых свойств соединений $A^{III}B^V$ были сделаны независимо Г. Велькером и, на примере InSb, Н.А. Горюновой и А.Р. Регелем в Физико-техническом институте [4]. Мы почерпнули очень много из того высокого теоретического, технологического и экспериментального уровня исследований, который существовал в ФТИ в то время.

2. Классические гетероструктуры

Идея использования гетеропереходов в полупроводниковой электронике была выдвинута на заре развития электроники. Уже в первом патенте, связанном с транзисторами на р–n-переходах, В. Шокли [5] предложил использовать широкозонный эмиттер, чтобы получить одностороннюю инжекцию. В нашем институте А.И. Губанов впервые теоретически проанализировал вольт-амперные характеристики изотипных и анизотипных гетеропереходов [6], однако важные теоретические изыскания на этой ранней стадии исследования гетероструктур были сделаны Г. Крёмером, который ввел понятие квазиэлектрических и квазимагнитных полей в плавном гетеропереходе и предположил, что гетеропереходы могут иметь чрезвычайно высокую эффективность инжекции по сравнению с гомопереходами [7]. Тогда же были выдвинуты различные предложения по использованию гетероструктур в полупроводниковых солнечных элементах.

Предложение полупроводниковых лазеров на р–n-переходах [8], экспериментальное наблюдение эффективной излучательной рекомбинации в р–n-структуре на основе GaAs с возможностью стимулированного излучения [9] и создание лазеров и светоизлучающих диодов (СИД) на р–n-переходах [10] были теми зернами, из которых начала расти полупроводниковая оптоэлектроника.

ника. Однако лазеры были неэффективными из-за высоких оптических и электрических потерь. Пороговые токи были очень высоки, и для получения генерации требовались низкие температуры. Эффективность СИД была также очень низкой вследствие высоких внутренних потерь.

Важный шаг был сделан сразу же после создания лазеров на $p-n$ -переходах, когда концепция лазера на двойной гетероструктуре была независимо сформулирована нами и Г. Крёмером [11]. В своей статье Г. Крёмер предложил использовать двойные гетероструктуры для пространственного ограничения носителей в активной области. Он предположил, что "с помощью пары гетеропереходных инжекторов лазерная генерация может быть осуществлена во многих непрямозонных полупроводниках и улучшена в прямозонных".

В нашем патенте мы также отметили возможность достижения высокой плотности инжектированных носителей и инверсной заселенности с помощью "двойной" инжекции. Мы особо указали на то, что лазеры на гомопереходах "не обеспечивают непрерывного режима генерации при высоких температурах" и, как дополнительное преимущество ДГС-лазеров, мы рассмотрели возможность "увеличения излучающей поверхности и использования новых материалов для получения излучения в различных областях спектра".

Первоначально теория развивалась существенно быстрее, чем экспериментальная реализация. В 1966 г. мы предсказали [12], что плотность инжектированных носителей могла бы на несколько порядков превосходить плотность носителей в широкозонном эмиттере (эффект "суперинжекции"). В том же году в статье [13], посланной в новый советский журнал *Физика и техника полупроводников*, я обобщил наше понимание основных преимуществ ДГС для различных приборов, особенно для лазеров и высокоомощных выпрямителей: "Области рекомбинации, светового излучения и инверсии заселенности совпадают и сосредоточены в среднем слое. Благодаря потенциальным барьерам на границе полупроводников с различной шириной запрещенной зоны, даже при больших смещениях в пропускном направлении целиком отсутствует сквозное токопрохождение электронов и дырок, и рекомбинация в эмиттерах равна нулю (в отличие от гомоструктур $p-i-n$, $p-n-n^+$, $n-p-p^+$, где она играет доминирующую роль)... Вследствие заметной разницы в диэлектрических постоянных свет полностью локализован в среднем слое, играющем роль высококачественного волновода, и, таким образом, световые потери в пассивных областях (эмиттерах) отсутствуют".

Вот самые важные особенности полупроводниковых гетероструктур, которые мы выделили в то время: 1) суперинжекция носителей, 2) оптическое ограничение и 3) электронное ограничение.

Реализация эффекта "широкозонного окна" была очень важна для фотоприемников, солнечных батарей и светодиодов. Это позволило значительно расширить и точно контролировать спектральную область солнечных элементов и фотодетекторов и радикально улучшить эффективность светодиодов. Основные физические явления в двойных и одиночных классических гетероструктурах показаны на рис. 1. Теперь осталось только найти гетероструктуру, где эти явления могли бы быть реализованы.

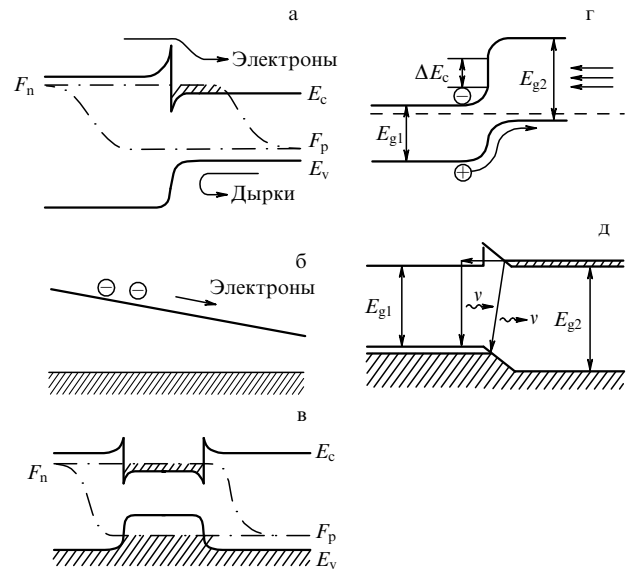


Рис. 1. Основные физические явления в классических гетероструктурах: (а) односторонняя инжекция и суперинжекция; (б) диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле; (в) электронное и оптическое ограничение; (г) эффект широкозонного окна; (д) диагональное туннелирование через гетерограницу.

В то время существовал общий скептицизм относительно возможности создания "идеального" гетероперехода с бездефектной границей и, тем более, с теоретически предсказываемыми инжекционными свойствами. Даже пионерские работы Р.Л. Андерсона [14] по исследованию первого эпитаксиального монокристаллического гетероперехода с совпадающими постоянными кристаллической решетки $Ge-GaAs$ не давали доказательств инжекции неравновесных носителей в гетероструктурах. Фактическая реализация эффективных широкозонных эмиттеров считалась попросту невозможной, и патент лазера на ДГС многими рассматривался как "бумажный патент".

Главным образом из-за этого общего скептицизма существовало лишь несколько групп, пытавшихся найти "идеальную пару", что являлось, конечно, трудной задачей. Требовалось выполнение многих условий совместности тепловых, электрических, кристаллохимических свойств контактирующих материалов, а также их кристаллической и зонной структур.

Удачная комбинация ряда свойств, т.е. малые эффективные массы и большая ширина запрещенной зоны, эффективная излучательная рекомбинация и резкий край оптического поглощения вследствие "прямой" зонной структуры, высокая подвижность электронов в абсолютном минимуме зоны проводимости и ее сильное уменьшение в ближайшем минимуме в точке (100) уже в то время обеспечивала для $GaAs$ достойное место в физике полупроводников и электронике. Так как максимальный эффект может быть получен при использовании гетероперехода между полупроводником, выступающим в качестве активной области прибора, и более широкозонным материалом, наиболее перспективными системами, рассматривавшимися в то время, были $GaP-GaAs$ и $AlAs-GaAs$. Для "совместности" материалы пары должны удовлетворять первому — и самому важному — условию: иметь наиболее близкие значения

постоянных решетки. Поэтому гетеропереходы в системе AlAs–GaAs были предпочтительнее. Однако для того чтобы начать работы по получению и исследованию свойств этих гетеропереходов, требовалось преодолеть определенный психологический барьер. К тому времени AlAs был уже давно получен [15], но многие свойства этого соединения оставались неисследованными, так как было известно, что AlAs химически нестабилен и разлагается во влажной атмосфере. Возможность получения устойчивого и приспособленного для практических приложений гетероперехода в этой системе казалась малоперспективной.

Первоначально наши попытки создать ДГС были связаны с решеточно-несогласованной системой GaAsP. Мы успешно изготовили первые лазеры на основе ДГС в этой системе методом газовой эпитаксии (ГФЭ). Однако из-за несоответствия параметров решетки лазерная генерация, как и в лазерах на гомопереходах, могла осуществляться только при температуре жидкого азота [16]. Любопытно отметить, однако, что это был первый практический результат для решеточно-несогласованной и даже частично релаксировавшей структуры.

Опыт, который мы получили при изучении системы GaAsP, был очень важен для понимания как многих специфических физических свойств гетеропереходов, так и основ гетероэпитаксии. Разработка метода многокамерной ГФЭ для системы GaAsP позволила нам в 1970 г. создать структуры со сверхрешетками с периодом 200 Å и продемонстрировать расщепление зоны проводимости на минизоны [17].

Однако к концу 1966 г. из общих соображений мы пришли к выводу, что даже небольшое несоответствие параметров решеток в гетероструктурах GaP_{0,15}As_{0,85}–GaAs не позволяет реализовать потенциальные преимущества ДГС. В то время сотрудник моей группы Д.Н. Третьяков сообщил мне, что с мелкими кристаллами твердых растворов Al_xGa_{1-x}As различных составов, полученными два года назад путем охлаждения из расплава и положенными А.С. Борщевским в ящик стола, ничего за это время не случилось. Тотчас же стало ясно, что твердые растворы Al_xGa_{1-x}As являются химически устойчивыми и подходящими для изготовления долгоживущих гетероструктур и приборов. Изучение фазовых диаграмм и кинетики роста в этой системе, а также разработка модифицированного метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), пригодного для роста гетероструктур, вскоре привели к созданию первой решеточно-согласованной AlGaAs-гетероструктуры. Когда мы опубликовали первую работу на эту тему, мы были счастливы считать себя первыми, кто обнаружил уникальную, фактически идеальную, решеточно-согласованную систему для GaAs, но, как это часто случается, одновременно и независимо такие же результаты были получены Х. Рупрехтом и Дж. Вудолом в Исследовательском центре Т. Уотсона корпорации ИВМ [18].

Дальнейший прогресс в области полупроводниковых гетероструктур был стремительным. Прежде всего, мы экспериментально подтвердили уникальные инжекционные свойства широкозонных эмиттеров и эффект суперинжекции [19], продемонстрировали стимулированное излучение в ДГС AlGaAs [20], установили зонную диаграмму гетероперехода Al_xGa_{1-x}As–GaAs, тщательно изучили люминесцентные свойства и диффузию носителей в плавном гетеропереходе, а также чрезвычайно

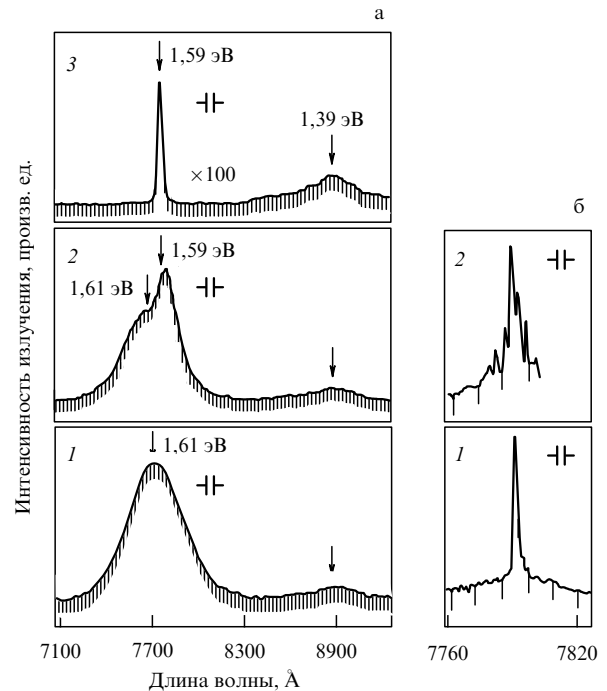


Рис. 2. Спектр генерации первого низкопорогового лазера на ДГС Al_xGa_{1-x}As, работающего при комнатной температуре (300 К), $J_{th} = 4300 \text{ А см}^{-2}$. Ток возрастает: (а) от 0,7 А (1) до 8,3 А (2) и затем до 13,6 А (3); (б) от 13,6 А (1) до 18 А (2); $s = 2,2 \times 10^{-3} \text{ см}^2$.

интересные особенности протекания тока через гетеропереход, например, диагональные туннельно-рекомбинационные переходы непосредственно между дырками из узкозонной и электронами из широкозонной составляющих гетероперехода [21].

В это же время мы создали большую часть наиболее важных приборов, в которых были реализованы основные преимущества гетероструктур:

- низкопороговые ДГС-лазеры, работающие при комнатной температуре [22] (рис. 2, 3);
- высокоэффективные светодиоды на одиночной гетероструктуре (ОГС) и на ДГС [23];
- солнечные элементы на гетероструктурах [24];
- биполярные транзисторы на гетероструктурах [25];
- тиристорные p–n–p–n-переключатели на гетероструктурах [26].

Одним из первых опытов успешного применения гетероструктур в промышленном производстве в нашей

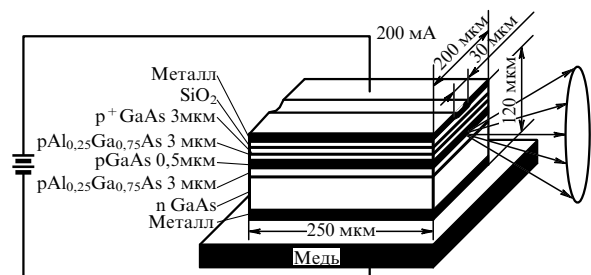


Рис. 3. Схематическое изображение структуры первого инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре.

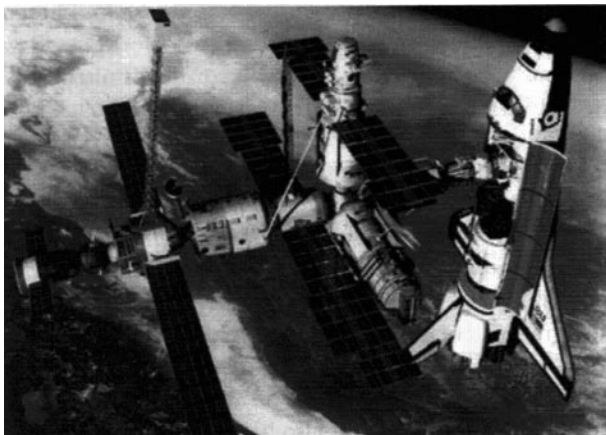


Рис. 4. Космическая станция "Мир" с солнечными батареями на гетероструктурах.

стране стало использование солнечных батарей на гетероструктурах в космических исследованиях. Мы передали нашу технологию в НПО "Квант", и уже с 1974 г. солнечные элементы на основе GaAlAs устанавливались на многих отечественных спутниках. Наша космическая станция "Мир" (рис. 4) использовала эти элементы в течение 15 лет.

Большой частью эти результаты были воспроизведены в других лабораториях в течение 1–2 лет, а в некоторых случаях даже позже. Но в 1970 г. международная конкуренция стала очень сильной. Позже один из наших основных конкурентов, И. Хаяши, который работал вместе с М. Панишем в лаборатории корпорации Bell Telephone в Мюррей-Хилл, писал [27]: "В сентябре 1969 г. Жорес Алфёров из Института Иоффе в Ленинграде посетил нашу лабораторию. Мы узнали, что он уже получил $J_{th}(300\text{ K}) = 4,3\text{ кА см}^{-2}$ на ДГС. До этого мы не понимали, что конкуренция настолько острая, и удвоили наши усилия... О непрерывном режиме лазерной генерации при комнатной температуре было сообщено в мае 1970 г. ...". В нашей статье, посланной в печать в мае 1970 г. [28], непрерывный режим лазерной генерации был реализован в лазерах с полосковой геометрией, для создания которых была использована фотолитография; лазеры были установлены на медных теплоотводах, покрытых серебром (см. рис. 3). Самая низкая плотность порогового тока J_{th} при 300 К составляла 940 А см^{-2} для широких лазеров и $2,7\text{ кА см}^{-2}$ для полосковых лазеров. Независимо о непрерывном режиме лазерной генерации в ДГС-лазерах сообщили Ицуо Хаяши и Мортон Паниш [29] (для широких лазеров с алмазным теплоотводом) в статье, направленной в печать всего лишь на месяц позже, чем наша работа. Реализация режима непрерывной лазерной генерации при комнатной температуре вызвала взрыв интереса к физике и технологии полупроводниковых гетероструктур. Если в 1969 г. AlGaAs-гетероструктуры изучались только в нескольких лабораториях, в основном в СССР (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также "Полус" и "Квант" — НПО, где мы внедряли наши технологии) и в США (Bell Telephone, D. Sarnoff RCA Research Center, T. Watson IBM Research Center), то в начале 1971 г. многие университеты, промышленные лаборатории в США, СССР, Великобритании, Японии, а также в Бразилии и Польше начали исследования III–V-гетероструктур и прибороов на их основе.

На этой ранней стадии развития физики и технологии гетероструктур нам стало ясно, что для расширения спектральной области необходимо искать новые решеточно-согласованные гетероструктуры. Первый важный шаг был осуществлен в нашей лаборатории в 1970 г., когда в работе [30] мы сообщили, что возможно получение различных решеточно-согласованных гетеропереходов с использованием четверных твердых растворов $A^{III}B^V$, позволяющих независимо менять постоянную решетки и ширину запрещенной зоны. Позже к тем же выводам пришел Г.А. Антипас с сотрудниками [31]. В качестве примера реализации этой идеи мы использовали различные составы InGaAsP, и скоро этот материал стал одним из наиболее важных для практического применения, например, в фотокатодах [32] и, особенно, в лазерах ИК диапазона для волоконно-оптической связи [33] и видимого диапазона [34].

В начале 1970-х гг. была составлена "карта мира" идеальных решеточно-согласованных гетероструктур (рис. 5). Менее, чем 10 лет спустя эта "карта мира" кардинально изменилась (рис. 6). В настоящее время следует добавить еще и III-нитриды.

Основные идеи полупроводникового лазера с распределенной обратной связью (РОС) были сформулированы нами в авторском свидетельстве в 1971 г. [35]. В том же самом году Х. Когельник и К.В. Шэнк рассмотрели возможность замены в лазерах на крылатых резонатора Фабри–Перо или подобных ему на периодические объемные неоднородности [36]. Необходимо отметить, что их подход неприменим к полупроводниковым лазерам, и все исследователи полупроводниковых лазеров с РОС или с распределенными брэгговскими зеркалами (РБЗ) используют идеи, сформулированные в [35]:

1. Дифракционная решетка создается не в объеме, а на поверхности волноводного слоя.
2. Взаимодействие волноводных мод с поверхностной дифракционной решеткой приводит не только к распределенной обратной связи, но и дает на выходе хорошо скоммутированное излучение.

Подробный теоретический анализ работы полупроводникового лазера с поверхностной дифракционной решеткой был выполнен в 1972 г. [37]. В этой работе

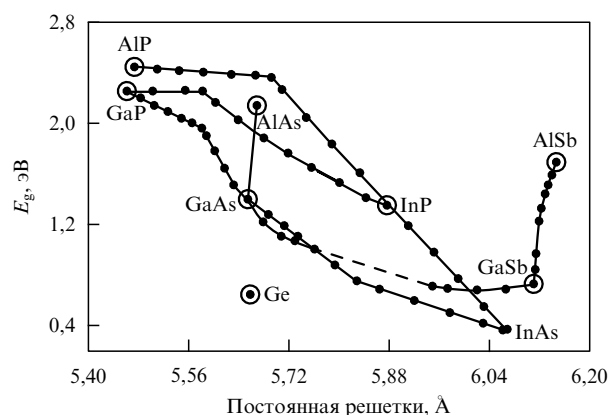


Рис. 5. Ширина запрещенной зоны E_g в зависимости от постоянной решетки для полупроводников $A^{III}B^V$. Решеточно-согласованные гетеропереходы: Ge–GaAs — 1959 г. (R.L. Anderson), AlGaAs — 1967 г. (Ж.И. Алфёров и др., J.M. Woodall & H.S. Rupprecht). Четверные ГС (InGaAsP и AlGaAsSb): предложены в 1970 г. (Ж.И. Алфёров и др.), первый эксперимент — 1972 г. (G.A. Antipas et al.).

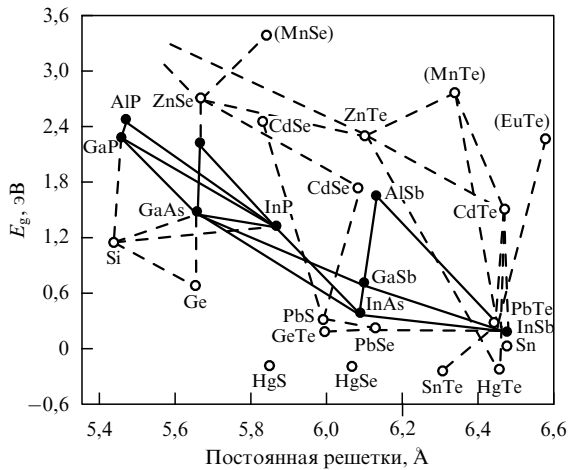


Рис. 6. Ширина запрещенной зоны E_g в зависимости от параметра решетки для полупроводников IV группы, соединений III–V и II(IV)–VI. В скобках указаны магнитные материалы. Линии, соединяющие полупроводники, обозначают гетероструктуры, которые уже исследованы. Сплошными линиями указаны соединения $A^{III}B^V$, штриховыми — все остальные.

авторами был установлен способ получения одномодовой генерации. Первые полупроводниковые лазеры с поверхностной дифракционной решеткой и распределенной обратной связью были получены практически одновременно в Физико-техническом институте [38], в Калифорнийском технологическом институте [39] и в Лаборатории корпорации Хегох в Пало-Альто [40].

В начале 80-х годов Г. Крёмер и Г. Гриффитс опубликовали работу [41], стимулировавшую повышенный интерес к гетероструктурам со ступенчатой структурой зон (гетеропереходы II рода). Пространственное разделение электронов и дырок на таких гетерограницах позволяет в широких пределах управлять их оптическими свойствами [21в, 42]. Ступенчатая структура зон дает возможность получить оптическое излучение с энергией фотона, много меньшей ширины запрещенной зоны каждого из полупроводников, формирующих гетеропереход. Реализация инжекционного лазера на основе гетеропереходов II рода в системе GaInAsSb–GaSb [42] открыла хорошие перспективы для создания эффективных когерентных источников света в инфракрасном оптическом диапазоне. Излучение в структурах такого типа возникает за счет рекомбинации электронов и дырок, локализованных в самосогласованных потенциальных ямах, расположенных по разные стороны от гетерограницы. Таким образом, гетероструктуры II рода открывают новые возможности как для фундаментальных исследований, так и для приборных применений, реализация которых на гетероструктурах I рода в системе соединений $A^{III}B^V$ невозможна. Однако практическое использование гетероструктур II рода до сих пор лимитируется недостаточным пониманием их фундаментальных свойств и ограниченным числом экспериментально исследованных систем.

В заключение этого краткого обзора развития классических гетероструктур представляется весьма удобным классифицировать наиболее важные результаты следующим способом:

Классические гетероструктуры

I. Фундаментальные физические явления (см. рис. 1)

- Односторонняя инжекция.

- Сверхинжекция.
- Диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле.
- Электронное ограничение.
- Оптическое ограничение.
- Эффект широкозонного окна.
- Диагональное туннелирование через гетерограницу.

II. Важные применения в электронике

• Полупроводниковые лазеры — низкопороговые и работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре, РОС- и РБЗ-лазеры, вертикальные поверхностно-излучающие лазеры, ИК лазеры на гетероструктурах II рода.

• Высокоэффективные светоизлучающие диоды (СИД).

• Солнечные батареи и фотодетекторы, основанные на эффекте широкозонного окна.

• Полупроводниковая интегральная оптика на основе полупроводниковых РОС- и РБЗ-лазеров.

• Биполярные транзисторы с широкозонным эмиттером.

• Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала.

• Мощные диоды и тиристоры.

• Преобразователи света из ИК в видимый диапазон.

• Эффективные холодные катоды.

III. Важные технологические особенности

• Принципиальная необходимость структур с хорошим согласованием параметров решетки.

• Многокомпонентные твердые растворы используются для согласования параметров решеток.

• Принципиальная необходимость эпитаксиальных технологий выращивания.

В заключение этого краткого обзора раннего развития классических гетероструктур можно сказать, что создание "идеального" гетероперехода и введение концепции гетероструктуры в физику и технологию полупроводников привело к открытию новых физических эффектов, кардинальному улучшению характеристик фактически всех известных полупроводниковых приборов и созданию новых типов таких приборов.

3. Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками

Благодаря наличию электронного ограничения в двойных гетероструктурах лазеры на их основе по существу стали прямыми предшественниками структур с квантовыми ямами, в которых средний узкозонный слой имеет толщину порядка нескольких сотен ангстрем, что приводит к расщеплению электронных уровней вследствие эффектов размерного квантования. Однако лишь с развитием новых методов выращивания гетероструктур стала возможной реализация высококачественных двойных гетероструктур со сверхтонкими слоями. В 70-е годы были разработаны два основных современных метода эпитаксиального роста с прецизионным контролем толщины, планарности, состава и т.д. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) превратился сегодня в одну из важнейших технологий выращивания гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$, прежде всего, благодаря пионерской работе А. Чо [43]. Основные идеи метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений (МОС ГФЭ) были изложены в ранней работе Г. Манасевита [44]. Этот метод нашел широкое применение для выращивания III–V-гетероструктур, в особен-

ности после сообщения Р. Дюпюи и П. Дапкуса о получении с его помощью инжекционного ДГС-лазера в системе AlGaAs, работающего при комнатной температуре [45].

Четкое проявление эффекта размерного квантования в оптических спектрах полупроводниковой гетероструктуры GaAs–AlGaAs со сверхтонким слоем GaAs (квантовой ямой) было продемонстрировано Р. Динглом и др. в 1974 г. [46]. Авторы наблюдали характерную ступенчатую структуру в спектрах поглощения и систематический сдвиг характеристических энергий при уменьшении толщины квантовой ямы (КЯ).

Экспериментальное изучение сверхрешеток началось в 1970 г. с работы Л. Есаки и Р. Тсу [47], где авторы рассмотрели электронный транспорт в сверхрешетке, т.е. в структуре с дополнительным периодическим потенциалом, который создается с помощью легирования или изменения состава полупроводниковых материалов и период которого больше, но сравним с постоянной решетки кристалла. В этом, как его назвал Лео Есаки, "кристалле, созданном человеком" (man-made crystal), происходит расщепление параболической зоны на мини-зоны, разделенные малыми запрещенными щелями, а зона Бриллюэна определяется периодом сверхрешетки. Аналогичные идеи были сформулированы Л.В. Келдышем еще в 1962 г. [48] при рассмотрении периодического потенциала, создаваемого на поверхности полупроводника интенсивной ультразвуковой волной. В начале 70-х годов в Физико-техническом институте Р. Казаринов и Р. Сурис теоретически рассмотрели прохождение тока в структурах со сверхрешетками [49]. Было показано, что протекание тока определяется туннелированием через потенциальные барьеры, разделяющие ямы. Авторами также были предсказаны очень важные физические явления: туннелирование носителей под действием электрического поля, когда основное состояние одной ямы совпадает с возбужденным состоянием следующей ямы, и стимулированное излучение, возникающее при туннелировании оптически возбужденных носителей из основного состояния одной ямы в возбужденное состояние соседней, расположенное ниже по энергии за счет действия приложенного электрического поля. Практически в то же время Л. Есаки и Р. Тсу независимо рассмотрели эффекты резонансного туннелирования в структурах со сверхрешетками [50].

Пионерские экспериментальные исследования структур со сверхрешетками были выполнены Л. Есаки и Р. Тсу на сверхрешетках в системе GaP_xAs_{1-x}–GaAs, полученных методом ГФЭ. В нашей лаборатории к тому времени мы разработали первую многомерную установку и, как было упомянуто ранее, изготовили структуры со сверхрешетками GaP_{0,3}As_{0,7}–GaAs с толщиной каждого из слоев 100 Å и общим количеством слоев, равным 200 [17]. Наблюдаемые особенности вольт-амперных характеристик, их температурные зависимости и эффект фотопроводимости были объяснены расщеплением зоны проводимости за счет действия одномерного периодического потенциала сверхрешетки. Эти первые сверхрешетки являлись в то же время и первыми сверхрешетками с напряженными слоями. Э. Блэксли (E. Blakeslee) и Дж. Мэттьюз (J. Matthews), работавшие с Л. Есаки и Р. Тсу в ИВМ, в середине 1970-х годов достигли заметных успехов в выращивании напряженных сверхрешеток с очень низкой концентрацией

дефектов. Но только намного позднее, после теоретической работы Г. Осборна [51] из Sandia Lab и выращивания первой высококачественной напряженной сверхрешетки GaAs–In_{0,2}Ga_{0,8}As М. Людовицем из Varian Associates, Н. Холоньяку из Иллинойского университета удалось создать на основе этих структур лазер, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре [52]. Стало понятно, что в сверхрешетках с напряженными слоями напряжение решетки является дополнительной степенью свободы и, варьируя толщины и составы слоев, можно изменять непрерывно и независимо друг от друга такие фундаментальные параметры, как ширина запрещенной зоны, постоянная решетки и т.д.

В начале 1970-х годов Л. Есаки и др. применили технологию МЛЭ к системе AlGaAs [53], а в марте 1974 г. они представили работу по резонансному туннелированию [54]. Это была первая экспериментальная демонстрация новых физических свойств гетероструктур с квантовыми ямами. Были измерены зависимости туннельного тока и проводимости от приложенного напряжения в гетероструктуре GaAs–GaAlAs с двойными барьерами и обнаружены максимумы тока, связанные с резонансным туннелированием. Позже, в том же году Л. Есаки и Л.Л. Чанг наблюдали эффект резонансного туннелирования в сверхрешетке [55]. Усиленное внимание к резонансному туннелированию, очевидно, было также связано с потенциальными возможностями применения этого эффекта в быстродействующей электронике. В конце 80-х годов для двойного резонансного туннельного диода удалось достичь пикосекундного диапазона времени переключения; в резонансно-туннельных диодах на GaAs были получены осцилляции на частоте 420 ГГц при комнатной температуре.

Утверждение о переходе к двумерному движению электронов в полевых транзисторах было высказано уже достаточно давно [56] и для электронов, захваченных в инверсном слое, впервые проверено А.Б. Фаулером и др. в 1966 г. [57] в экспериментах по магнитопроводимости. Спектральные эффекты, обусловленные пространственным квантованием, наблюдались в тонких пленках висмута В.Н. Луцким и Л.А. Куликом в 1968 г. [58].

Пионерская работа по модулированно-легированным сверхрешеткам [59], в которой было продемонстрировано увеличение подвижности по сравнению с объемными кристаллами, стимулировала развитие исследований по использованию двумерного электронного газа с высокой подвижностью для микроволнового усиления. Во Франции и Японии практически одновременно на основе одиночной модулированно-легированной гетероструктуры n-AlGaAs–n-GaAs были созданы новые типы транзисторов, получившие во Франции название TEGFET (полевые транзисторы с двумерным электронным газом) [60], а в Японии — НЕМТ (транзисторы с высокой подвижностью электронов, ВПЭТ) [61].

Впервые лазерная генерация на квантовых ямах была получена Дж.П. ван дер Зилом и др. [62], но параметры генерации значительно уступали средним ДГС-лазерам. Лишь в 1978 г. Р. Дюпюи и П. Дапкус в сотрудничестве с Н. Холоньяком впервые сообщили о создании лазера на квантовой яме с параметрами, сравнимыми с параметрами стандартных ДГС-лазеров [63]. В этой работе впервые прозвучало название "квантовая яма". Реаль-

ное преимущество лазеров на квантовых ямах было продемонстрировано намного позже В.Т. Цангом из Bell Telephone Lab. За счет значительного улучшения технологии МЛЭ и создания оптимизированной структуры (раздельно ограниченная ДГС с плавным изменением показателя преломления волноводной области: РО ПИПП ДГС) ему удалось добиться снижения пороговой плотности тока до 160 А см^{-2} [64].

В Физико-техническом институте развитие методов МЛЭ и МОС ГФЭ выращивания гетероструктур $A^{III}B^V$ было начато только в конце 1970-х годов. Прежде всего, мы стимулировали разработку и конструирование первой советской установки молекулярно-лучевой эпитаксии в нашей электронной промышленности. В течение нескольких лет были разработаны три поколения машин для МЛЭ, и последние, носившие название "Цна" (красивая река недалеко от Рязани — города, где находится Научно-исследовательский технологический институт электронной промышленности — НИТИ; в НИТИ и была выполнена разработка установок для МЛЭ), оказались достаточно хорошими для реализации научных программ. Параллельно, чуть позже, мы начали разрабатывать системы МЛЭ в Научно-технологическом объединении Академии наук в Ленинграде. В середине 1980-х годов несколько систем этой версии были установлены в ФТИ. Оба типа систем МЛЭ все еще работают в ФТИ и других лабораториях страны.

Системы МОС ГФЭ были разработаны непосредственно в нашем институте, а позже, в 1980-е годы, шведская компания Eriqur специально для нас сконструировала, при нашем активном участии, несколько систем для нашего института, которые до сих пор используются в научных исследованиях.

Большой интерес к изучению низкоразмерных структур и отсутствие оборудования для технологий МЛЭ и МОС ГФЭ стимулировали наши исследования по развитию метода ЖФЭ, пригодного для выращивания гетероструктур с квантовыми ямами. Однако до конца 1970-х годов казалось, что методом ЖФЭ невозможно вырастить гетероструктуры $A^{III}B^V$ с толщиной активной области менее 500 \AA из-за существования вблизи гетеропереходов протяженных переходных областей переменного химического состава.

Ситуация изменилась благодаря работе Н. Холоньяка и др. [65], предложивших для выращивания сверхрешеток на основе соединений InGaAsP использовать систему ЖФЭ с вращающимися "лодочками". В нашей лаборатории мы разработали модифицированный метод ЖФЭ с обычным последовательным перемещением подложки в стандартной горизонтальной геометрии "лодочки" для InGaAsP-гетероструктур [66] и метод низкотемпературной ЖФЭ для AlGaAs-гетероструктур [67]. Эти методы позволили нам выращивать гетероструктуры с квантовыми ямами превосходного качества, практически любого вида, с толщиной активной области до 20 \AA и с размером переходных областей, сравнимым с постоянной кристаллической решетки. Важное практическое значение имело получение методом ЖФЭ рекордных значений пороговых плотностей тока в лазерах с раздельным ограничением и одиночной квантовой ямой на основе гетероструктур InGaAsP-InP ($\lambda = 1,3$ и $1,55 \text{ мкм}$) и InGaAsP-GaAs ($\lambda = 0,65-0,9 \text{ мкм}$) [68]. Для мощных лазеров InGaAsP-GaAs ($\lambda = 0,8 \text{ мкм}$), выполненных в полосковой геометрии, были достигнуты

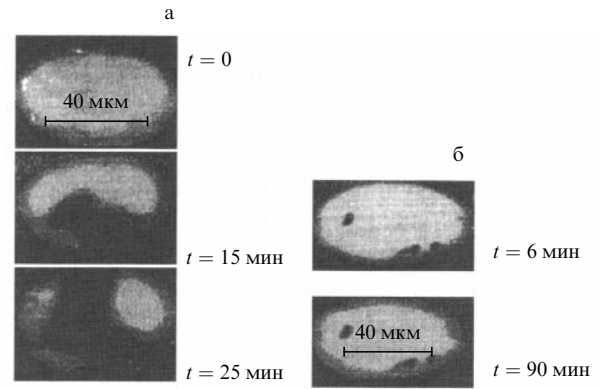


Рис. 7. Временная эволюция картин люминесценции из активной области двойной гетероструктуры при высоком уровне фотовозбуждения: (а) AlGaAs-GaAs и (б) InGaAsP-GaAs. Диаметр пятна возбуждения Кг⁺-лазера — 40 мкм. Уровни возбуждения: 10^4 Вт см^{-2} (а) и 10^5 Вт см^{-2} (б).

в непрерывном режиме эффективность 66 % и мощность излучения 5 Вт при ширине полоски 100 мкм [69]. В этих лазерах впервые было реализовано эффективное охлаждение мощного полупроводникового прибора за счет рекомбинационного излучения, как было предсказано ранее в [13]. Другой важной особенностью InGaAsP-гетероструктур явилась их довольно большая устойчивость к развитию дислокаций и дефектов (рис. 7) [70]. Данные исследования положили начало широкому применению гетероструктур, не содержащих алюминия.

Наиболее сложная лазерная структура с квантовыми ямами, которая соединила в себе одиночную квантовую яму (КЯ) и короткопериодные сверхрешетки (КПСР), использовавшиеся для создания РО ПИПП ДГС (наиболее предпочтительной для получения наименьших значений порогового тока J_{th}), была выращена в нашей лаборатории в 1988 г. [71] (рис. 8). Используя КПСР, удалось не только достичь желаемого профиля показателя преломления в волноводной области и создать барьер движению дислокаций в активную область, но также получить возможность выращивать различные части структуры при существенно различных температу-

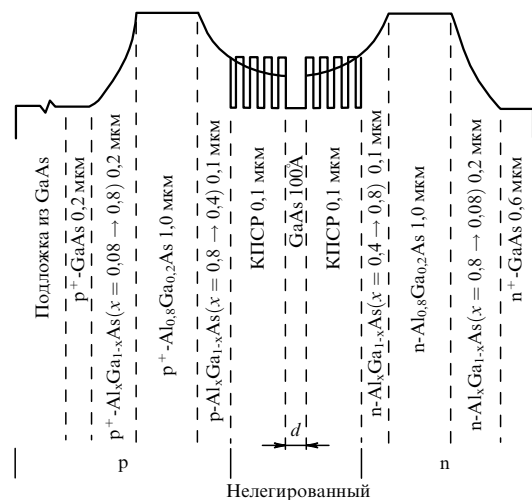


Рис. 8. Выращенная методом МЛЭ структура РО ДГС-лазера с квантовой ямой, ограниченной короткопериодной сверхрешеткой.

рах. Таким образом, были достигнуты одновременно как превосходная морфология поверхности, так и высокая внутренняя квантовая эффективность на планарной поверхности GaAs (100). Самое низкое значение пороговой плотности тока $J_{th} = 52 \text{ А см}^{-2}$ и, после некоторой оптимизации, $J_{th} = 40 \text{ А см}^{-2}$ в течение долгого времени являлось мировым рекордом для полупроводниковых инжекционных лазеров и служило хорошей демонстрацией эффективного применения квантовых ям и сверхрешеток в электронных приборах.

Идея стимулированного излучения в сверхрешетках, выдвинутая Р. Казариновым и Р. Сурисом [49], была реализована почти на четверть столетия позже Федерико Капассо [72]. Предложенная ранее структура была существенно оптимизирована, и каскадный лазер, разработанный Ф. Капассо, вызвал к жизни новое поколение униполярных лазеров, работающих в среднем ИК диапазоне.

История развития полупроводниковых лазеров — это, с определенной точки зрения, история борьбы за снижение их порогового тока, что наглядно проиллюстрировано на рис. 9. Наиболее значительные изменения в данной области произошли только после внедрения концепции ДГС-лазеров. Использование КПСР КЯ фактически привело к достижению теоретического предела для этого — одного из наиболее важных — параметра. Дальнейшие возможности, связанные с применением новых структур с квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ), будут обсуждаться в следующем разделе.

Возможно, венцом исследований квантовых ям было открытие квантового эффекта Холла [73]. Это открытие и всестороннее его изучение в AlGaAs–GaAs-гетероструктурах, приведшее вскоре к открытию дробного квантового эффекта Холла [74], оказало принципиальное влияние на всю физику твердого тела. Обнаружение данного эффекта, имеющего отношение только к фундаментальным величинам и не зависящего от особенностей зонной структуры, подвижности и плотности носителей

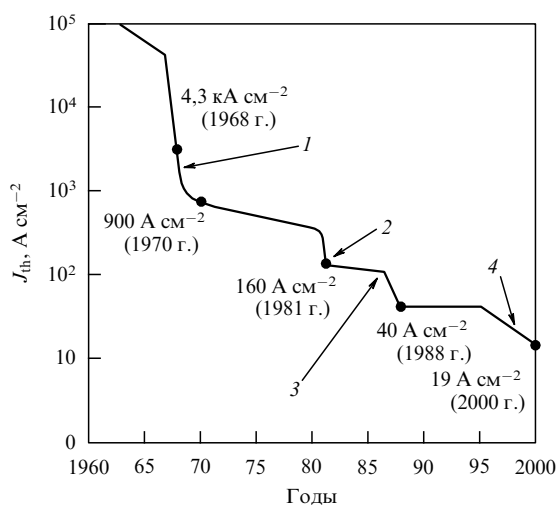


Рис. 9. Эволюция порогового тока полупроводниковых лазеров. Цифрами обозначены резкие снижения порогового тока, обусловленные применением: 1 — двойных гетероструктур; 2 — гетероструктур с КЯ; 3 — гетероструктур с КЯ, ограниченной КПСР; 4 — гетероструктур с КТ.

заряда в полупроводнике, показало, что гетероструктуры могут использоваться и для моделирования некоторых фундаментальных физических явлений. В последнее время большая часть исследований в этой области направлена на объяснение механизма конденсации электронов и на поиск вигнеровской кристаллизации.

Обобщим кратко основные положения данного раздела аналогично тому, как это было сделано в предыдущем разделе, посвященном классическим гетероструктурам.

Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками

I. Фундаментальные физические явления

- Двумерный (2D) электронный газ.
- Ступенчатый вид функции плотности состояний.
- Квантовый эффект Холла.
- Дробный квантовый эффект Холла.
- Существование экситонов при комнатной температуре.
- Резонансное туннелирование в структурах с двойным барьером и сверхрешетках.
- Энергетический спектр носителей в сверхрешетках определяется выбором потенциала и упругих напряжений.

• Стимулированное излучение при резонансном туннелировании в сверхрешетках.

- Псевдоморфный рост напряженных структур.

II. Важные следствия для применений

• Более короткие длины волн излучения, меньшие значения порогового тока, большее дифференциальное усиление и более слабая температурная зависимость порогового тока в полупроводниковых лазерах.

- Инфракрасные квантовые каскадные лазеры.
- Лазер с квантовой ямой, ограниченной короткопериодной сверхрешеткой (КПСР КЯ).

• Оптимизация электронного и оптического ограничения и характеристик волновода в полупроводниковых лазерах.

- Транзисторы с двумерным электронным газом (ВПЭТ).

• Резонансно-туннельные диоды.

• Высокоточные стандарты сопротивлений.

• Приборы на основе эффекта электропоглощения и электрооптические модуляторы.

• Инфракрасные фотодетекторы на основе эффекта поглощения между уровнями размерного квантования.

III. Важные технологические особенности

• Нет необходимости в согласовании параметров решеток.

• Принципиально необходимо использование технологий с низкими скоростями роста (МЛЭ, МОС ГФЭ).

• Метод субмонослойного выращивания.

• Подавление распространения дислокаций несоответствия в процессе эпитаксиального роста.

• Резкое увеличение разнообразия материалов-компонентов гетероструктур.

4. Гетероструктуры с квантовыми проволоками и квантовыми точками

Принципиальное преимущество применения квантово-размерных гетероструктур для лазеров является следствием существенного возрастания плотности состояний при уменьшении размерности электронного газа (рис. 10).

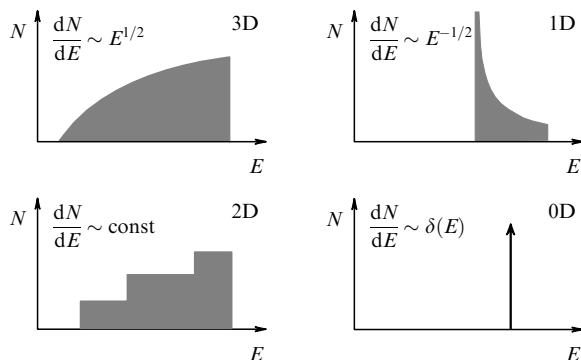


Рис. 10. Плотность состояний $N(E)$ для носителей заряда в структурах с различной размерностью.

В 1980-е годы прогресс в физике двумерных гетероструктур с квантовыми ямами и их прикладных применениях привлек многих ученых к исследованию систем, обладающих еще меньшей размерностью, — квантовых проволок и квантовых точек. В отличие от квантовых ям, где носители ограничены в направлении, перпендикулярном к слоям, и могут свободно двигаться в плоскости слоя, в квантовых проволоках носители заряда ограничены в двух направлениях и свободно перемещаются только вдоль оси проволоки. В квантовых точках — "искусственных атомах", носители заряда ограничены уже во всех трех направлениях и обладают полностью дискретным энергетическим спектром (рис. 11).

Экспериментальная работа по изготовлению и исследованию структур с квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ) была начата более 15 лет назад. В 1982 г. Я. Аракава и Х. Сакаки [75] теоретически рассмотрели некоторые эффекты в лазерах на гетероструктурах с размерным квантованием в одном, двух и трех направлениях. Они писали: "Самое важное, что пороговый ток такого лазера, как оказалось, является гораздо менее чувствительным, чем для традиционного лазера, что отражает уменьшение размерности электронного газа". Авторы провели эксперименты на лазерах с КЯ, помещенных в сильные магнитные поля, направленные перпендикулярно плоскости КЯ, и продемонстрировали, что характеристическая температура (T_0), описывающая экспоненциальный рост порогового тока от температуры, возрастает в магнитном поле с 144 до

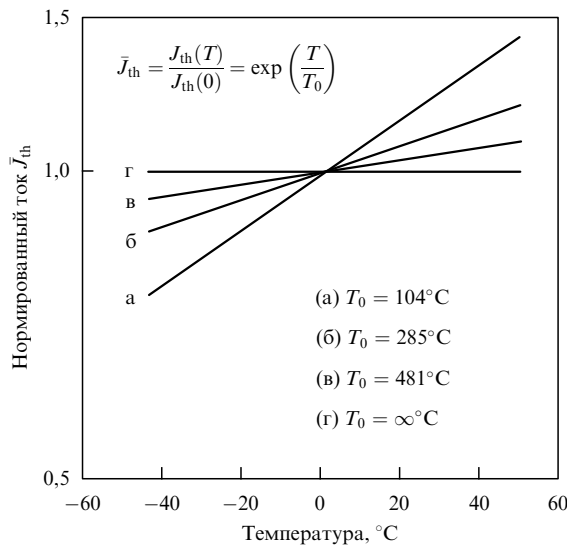


Рис. 12. Нормированные температурные зависимости порогового тока J_{th} для различных ДГС-лазеров: (а) объемных; (б) с квантовыми ямами; (в) с квантовыми проволоками и (г) с квантовыми точками.

313 °С. Они отметили возможность ослабления температурной зависимости плотности порогового тока для лазеров на КП и полную температурную стабильность лазеров на КТ (рис. 12). К настоящему времени в данной области уже имеется значительное число как теоретических, так и экспериментальных работ.

Первые полупроводниковые точки — микрокристаллы соединений $A^{II}B^{VI}$, сформированные в стеклянной матрице, были предложены и реализованы А.И. Екимовым и А.А. Онущенко [76]. Однако, поскольку полупроводниковые квантовые точки были внедрены в изолирующую стеклянную матрицу и качество гетерограницы между стеклом и полупроводниковой точкой было невысоким, это создавало определенные ограничения как для фундаментальных исследований, так и для приборных применений. Намного более интересные возможности появились с созданием трехмерных КТ, когерентных с окружающей их полупроводниковой матрицей [77].

Для изготовления этих структур было предложено несколько методов. Непрямые методы, например, изготовление КТ путем их поперечного вытравливания из структур с КЯ, часто страдают недостаточным разрешением и могут вызывать повреждение гетерограниц в процессе травления. Более перспективным способом является применение прямых методов изготовления, таких как рост в V-образных канавках и на гофрированных ("корругированных") поверхностях, приводящих к образованию КП и КТ. Лаборатории Физико-технического института и Берлинского технического университета — в последнее время мы проводили эти исследования в тесном сотрудничестве — значительно продвинулись именно в последнем направлении.

Наконец, мы пришли к выводу, что наиболее многообещающим методом формирования упорядоченных массивов КП и КТ является метод, использующий явление самоорганизации на кристаллических поверхностях. Релаксация напряжений на краях ступеней или граней может приводить к формированию упорядоченных массивов КП и КТ в случаях роста как согласован-

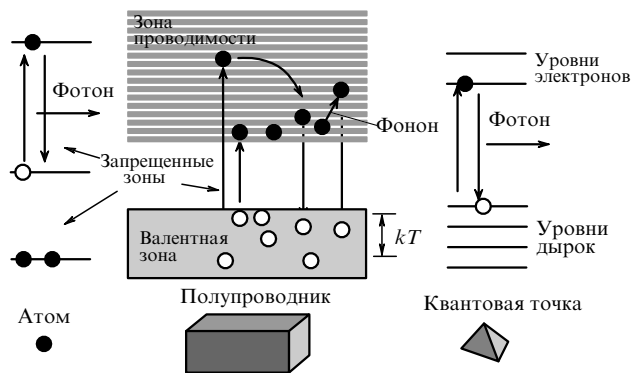


Рис. 11. Схема энергетических уровней для случая одиночного атома (слева), объемного кристалла (в центре) и квантовой точки (справа).

ных, так и рассогласованных по параметру решетки материалов.

Первые очень однородные массивы трехмерных квантовых точек, имеющих также поперечное упорядочение, были получены в системе InAs–GaAs с помощью методов МЛЭ и МОС ГФЭ [78, 79].

Движущей силой, вызывающей образование массива однородных напряженных островков на кристаллической поверхности, является релаксация упругих напряжений на краях граней и взаимодействие островков посредством напряжений, создаваемых ими в подложке [80].

В решеточно-согласованных гетероэпитаксиальных системах режим роста определяется исключительно соотношением между энергиями двух поверхностей и энергией границы раздела. Если сумма поверхностной энергии эпитаксиального слоя (γ_2) и энергии поверхности раздела (γ_{12}) меньше, чем поверхностная энергия подложки (γ_1), $\gamma_2 + \gamma_{12} < \gamma_1$, т.е., если материал 2, который будет осаждаться, смачивает подложку, тогда мы имеем режим роста Франка–ван дер Мерве. Изменение значения величины $\gamma_2 + \gamma_{12}$ может привести к переходу из режима Франка–ван дер Мерве к режиму Вольмера–Вебера, когда трехмерные островки образуются непосредственно на поверхности подложки.

В гетероэпитаксиальной системе с несоответствием решеток между материалом, который осаждается, и подложкой рост первоначально может происходить в послойном режиме.

Однако более толстый слой обладает большей упругой энергией, которая имеет тенденцию к уменьшению посредством образования изолированных островков. В этих островках упругие напряжения уменьшаются и, соответственно, понижается и упругая энергия. Это приводит к режиму роста по Странски–Крастанову (рис. 13). Характерный размер островков определяется минимумом энергии массива трехмерных однородно напряженных островков на единицу поверхности в зависимости от размера островка (рис. 14) [80]. Взаимодействие между островками через упруго напряженную подложку будет приводить к поперечному упорядочению островков в квадратную решетку.

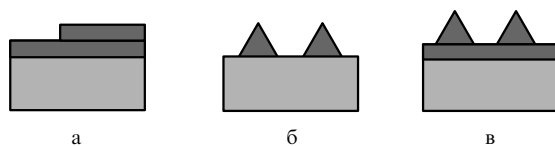


Рис. 13. Режимы роста по Франку–ван дер Мерве (а), Вольмеру–Веберу (б) и Странски–Крастанову (в).

Эксперименты показывают в большинстве случаев довольно узкое распределение островков по размерам, и, более того, при некоторых условиях когерентные островки InAs образуют квазипериодическую квадратную решетку (рис. 15). Форма КТ может значительно изменяться в процессе зарастивания или постростового отжига, а также при использовании сложных ростовых манипуляций. Короткопериодное попеременное нанесение различных напряженных материалов ведет к расщеплению квантовых точек и формированию сверхрешеток, образуемых плоскостями вертикально связанных КТ (см. рис. 15) [81]. В работе [78] было обнаружено, что энергия излучения из основного состояния КТ совпадает

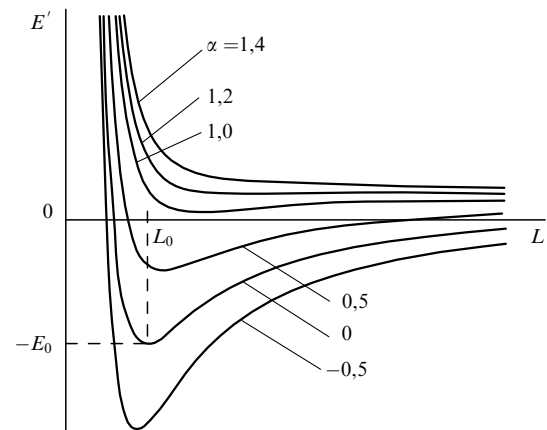


Рис. 14. Энергия разбросанного массива трехмерных напряженных островков на единицу поверхности как функция размера островка. Параметр α — отношение изменения поверхностной энергии при образовании островков к вкладу краев островков в упругую энергию релаксации. При $\alpha > 1$ система термодинамически стремится к сращиванию островков. При $\alpha < 1$ существует оптимальный размер островка, и система островков стабильна по отношению к слиянию островков.

с краем поглощения и энергией лазерной генерации. Наблюдение сверхузких ($< 0,15$ мэВ) линий люминесценции из одиночных квантовых точек [78], которые не уширяются с увеличением температуры, является доказательством формирования электронных КТ (рис. 16).

Лазеры на квантовых точках, как ожидается, будут иметь более высокие характеристики по сравнению со стандартными лазерами на КЯ. Считается, что в них

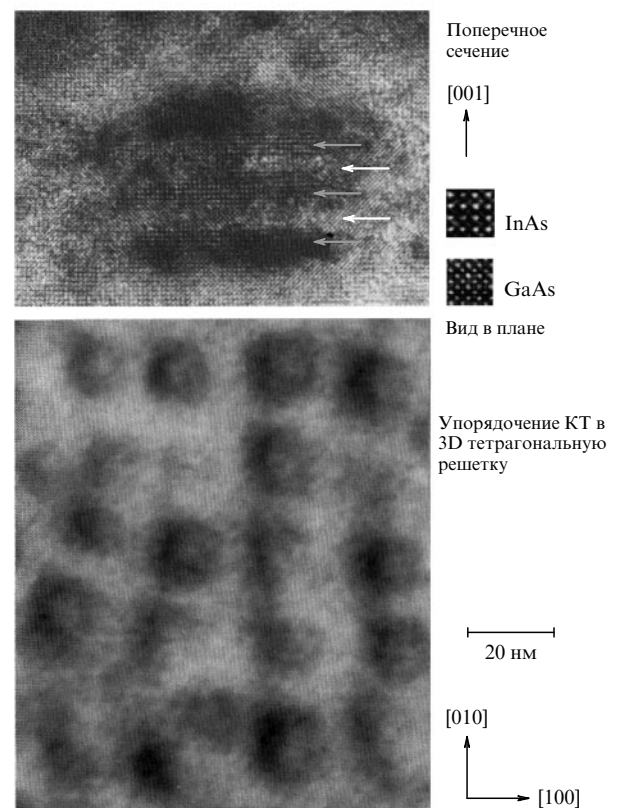


Рис. 15. Вертикальное и поперечное упорядочение связанных квантовых точек в системе InAs–GaAs.

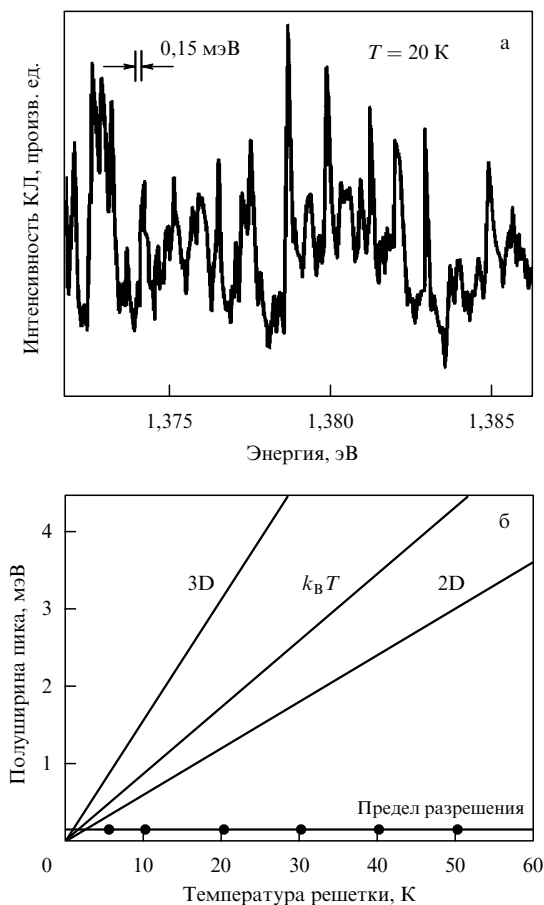


Рис. 16. (а) Спектр катодоллюминесценции (КЛ) высокого разрешения для структур InAs–GaAs с КТ. (б) Температурная зависимость полуширины пика (full width at half maximum) в спектре катодоллюминесценции одиночной КТ.

одновременно проявятся такие уникальные свойства, как высокое дифференциальное усиление, сверхнизкое значение пороговой плотности тока и высокая температурная стабильность пороговой плотности тока. В дополнение к этому упорядоченные массивы КТ, сформированные в области оптического волновода, могут привести к появлению распределенной обратной связи и (или) к стабилизации одномодового лазерного излучения. *In situ* захороненные в полупроводнике структуры с КТ пространственно локализуют носители и предотвращают их безызлучательную рекомбинацию на зеркалах резонатора. Таким способом можно избежать перегрева зеркал резонатора, являющегося одной из наиболее серьезных проблем высокоомощных и высокоэффективных AlGaAs–GaAs- и AlGaAs–InGaAs-лазеров.

С момента первой реализации лазеров на КТ [82] стало сразу ясно, что однородность КТ по размеру вполне достаточна для обеспечения хорошей работы лазера. Но даже в то время было понятно, что основное препятствие для работы КТГС-лазера при комнатной и высокой температурах связано с термически индуцированным выбросом носителей из квантовых точек. Чтобы улучшить работу лазера, были разработаны различные методы: (1) увеличение объемной плотности КТ за счет увеличения количества слоев, содержащих массивы КТ (рис. 17); (2) вставка КТ в слой КЯ; (3) использование более широкозонного полупроводника для матрицы. В

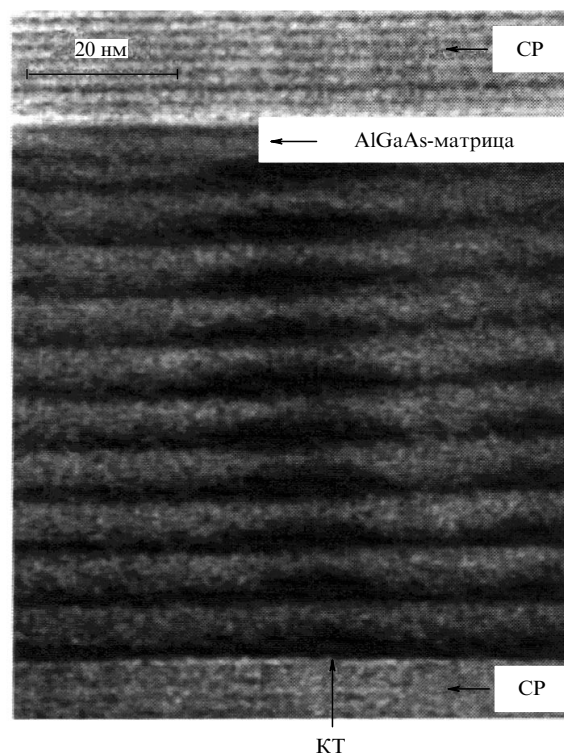


Рис. 17. ПЭМ изображение активной области мощного лазера на гетероструктуре с КТ.

результате мы получили многие параметры КТГС-лазеров лучше, чем у КЯГС-лазеров, сделанных на том же материале. Так, например, недавно был достигнут мировой рекорд плотности порогового тока в 19 A cm^{-2} [83]. Далее, были получены выходная мощность в непрерывном режиме до 3,5–4,0 Вт для полосковой геометрии с шириной в 100 мкм, квантовая эффективность, равная 95 %, и КПД около 50 % [84].

Значительные усилия были также предприняты в теоретическом изучении лазеров на КТ с реалистичными параметрами. При 10%-ном разбросе размеров КТ и других практических параметрах структуры теория [85] предсказывает типичную плотность порогового тока, равную 5 A cm^{-2} при комнатной температуре. Экспериментально наблюдались уже значения 10 A cm^{-2} при 77 К [86] и 5 A cm^{-2} при 4 К [87].

С точки зрения применения КТ в усовершенствованных приборах оказывается, что введение КТ в поверхность излучающие лазеры с вертикальным резонатором (ВРПИЛ) очень существенно. Уже созданы подобные лазеры с параметрами, соответствующими лучшим значениям для приборов на КЯ с той же геометрией (рис. 18) [88]. Недавно многообещающие результаты были получены для лазера такого типа на подложке из GaAs, излучающего на длине волны 1,3 мкм, для использования в волоконно-оптических системах связи (рис. 19) [89].

В трехмерном островке, образованном за счет рассогласования параметров решеток островка и подложки, напряжения могут релаксировать упруго, без образования дислокаций. Таким образом, достаточно большой объем узкозонного материала может быть реализован в качестве когерентно-напряженных КТ. Это дает возможность охватить спектральный диапазон 1,3–1,5 мкм,

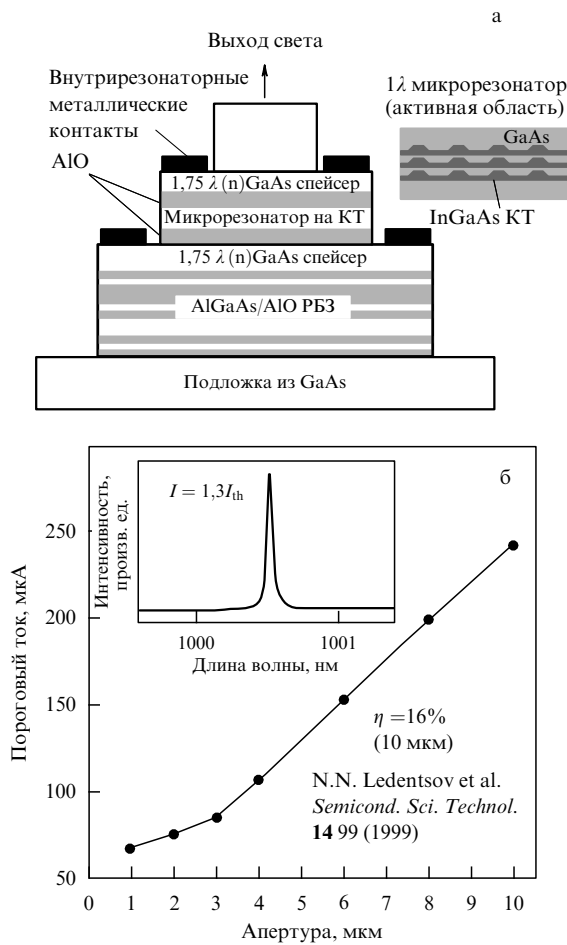


Рис. 18. (а) Схематическое изображение прибора КТ ВРПИЛ. Основные преимущества КТ: 1) отсутствие интерфейсной рекомбинации на апертуре; 2) уменьшение бокового растекания носителей из области апертуры. Возможность создания лазера на одиночной КТ с ультранизким пороговым током. (б) Зависимость порогового тока от размера апертуры: 1) низкие пороговые плотности тока (170 А см^{-2} при 300 К); 2) низкие пороговые плотности тока при ультрамалых размерах апертуры; 3) спектральный диапазон 1,3 мкм на GaAs подложке.

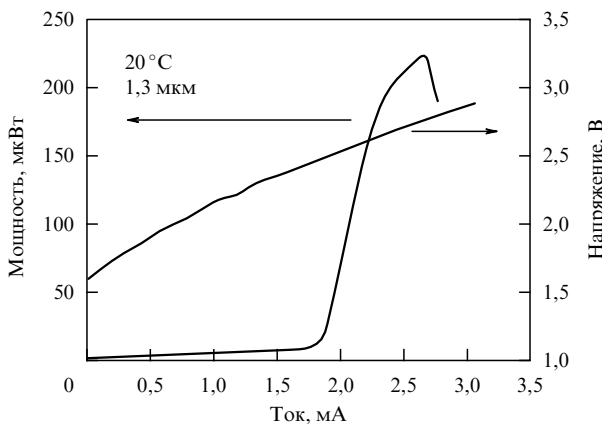


Рис. 19. КТ ВРПИЛ на GaAs, излучающий на длине волны 1,3 мкм.

используя GaAs-подложку, и разработать мультиплексные системы на основе приборов КТ ВРПИЛ в будущем.

Очень важно подчеркнуть, что мы всегда использовали концепцию ДГС для КП и КТ, поскольку в обоих

случаях мы имеем узкозонный материал в широкозонной матрице.

Подведем итог данного раздела таким же образом, как это было сделано для других разделов.

Гетероструктуры с квантовыми проволоками и точками

I. Фундаментальные физические явления

- Одномерный (1D) электронный газ (проволоки).
- Функция плотности состояний с острыми максимумами (проволоки).
- Нуль-мерный (0D) электронный газ (точки).
- Функция плотности состояний типа дельта-функции (точки).

II. Важные следствия для применений в электронике

- Уменьшенное значение порогового тока лазера и увеличенное дифференциальное усиление.
- Уменьшенная температурная зависимость порогового тока (проволоки).
- Температурная стабильность порогового тока (точки).
- Дискретный спектр усиления и возможность получения рабочих характеристик, подобных характеристикам твердотельных или газовых лазеров (точки).
- Более высокий коэффициент модуляции в электрооптических модуляторах.
- Возможность создания "одноэлектронных" устройств.
- Новые возможности для разработки полевых транзисторов.

III. Важные технологические особенности

- Применение для роста эффектов самоорганизации.
- Эпитаксиальный рост в V-канавках (проволоки).
- Литография высокого разрешения и травление структур с квантовыми ямами.

5. Тенденции развития

Недавно были получены впечатляющие результаты для коротковолновых источников излучения на основе II–VI-селенидов и III–V-нитридов. Использование гетероструктурных концепций и методов роста, разработанных для КЯ и СР на $A^{III}B^V$, в большой степени определило успех этих исследований. Естественная и наиболее предсказуемая тенденция — применение гетероструктурных концепций и технологических методов к новым материалам. Разработанные недавно различные гетероструктуры на основе полупроводниковых соединений III–V, II–VI и IV–VI являются хорошими примерами.

С более общей и глубокой точки зрения, гетероструктуры (и это относится ко всем гетероструктурам: классическим, КЯ и СР, КП и КТ) представляют собой способ создания новых типов материалов — гетерополупроводников. Еще раз повторим слова Лео Есаки: вместо "Богом созданных кристаллов" мы сами создаем "кристаллы, сделанные человеком".

Классические гетероструктуры, квантовые ямы и сверхрешетки уже сейчас весьма совершенны, и мы используем многие из их уникальных свойств. Структуры же с квантовыми проволоками и точками пока еще очень молоды, и на этом пути нас ожидают захватывающие открытия и новые неожиданные применения. Уже сейчас можно сказать, что упорядоченные равновесные массивы квантовых точек будут использоваться во многих устройствах: лазерах, оптических модуляторах,

детекторах и эмиттерах, работающих в дальней ИК области, и т.д. Использование резонансного туннелирования через атомы полупроводника, внедренные в более широкозонные слои, возможно, приведет к значительному улучшению характеристик приборов. В общем, структуры с КТ будут развиваться как "вширь", так и "вглубь".

"Вширь" подразумевает системы из новых материалов, которые охватят новые диапазоны энергетического спектра. Проблемы, связанные со сроком службы зеленых и синих полупроводниковых лазеров, и даже более общие проблемы создания структур без дефектов на основе широкозонных полупроводников II–VI и III–V (нитридов), весьма вероятно, будут решены при использовании структур квантовых точек в этих системах.

"Вглубь" подразумевает понимание того, что степень упорядочения зависит от очень сложных условий роста, свойств материалов, конкретных значений поверхностной свободной энергии. Путь к резонансно-туннельным и одноэлектронным приборам и устройствам — глубокое и тщательное исследование и оценка этих параметров с целью достижения максимально возможной степени упорядочения. В целом, необходимо найти более сильные механизмы самоорганизации для создания упорядоченных массивов КТ.

В начале 1980-х я был приглашен прочитать лекцию о гетероструктурах и их применении в Amoco Photonic Center близ Чикаго, США.

Резюме моей лекции было следующим:

1. Гетероструктуры — новый тип полупроводниковых материалов; дорогой, сложный химически и технологически, но наиболее эффективный.

2. Современная электроника основана на использовании гетероструктур:

— ДГС-лазер — основной прибор современной оптоэлектроники;

— гетероструктурный фотодиод — самый эффективный и быстродействующий фотодиод;

— оптоэлектронные интегральные схемы: только с их помощью можно решить проблему высокой информационной плотности оптических систем связи.

3. Быстродействующая микроэлектроника будет создаваться, главным образом, на основе гетероструктур.

4. Высокотемпературная быстродействующая силовая электроника — новая обширная область применения гетероструктур.

5. Гетероструктуры в преобразовании солнечной энергии: самые дорогие солнечные элементы и самый дешевый производитель электрической энергии.

6. В XXI веке гетероструктуры оставят гомопереходам в электронике только 1 %.

И даже через 20 лет я не хочу менять здесь ни одного слова.

Едва ли возможно отразить в статье все основные направления современной физики и технологии полупроводниковых гетероструктур. Их намного больше, чем было упомянуто. Многие ученые внесли свой вклад в этот впечатляющий прогресс, который не только в значительной степени определяет будущее развитие физики конденсированного состояния, полупроводниковых лазеров и коммуникационных технологий, но в каком-то смысле также и будущее человеческого общества. Я хотел бы также особо подчеркнуть роль ученых

предыдущих поколений, тех, кто подготовил наш путь. Я счастлив, что имел возможность работать в этой области с самого начала. Я счастлив, что могу продолжать эту работу и сейчас.

Перевел с английского *Б.В. Егоров*
Перевод авторизовал *Ж.И. Алфёров*

Список литературы

1. Жузе В П, Курчатов Б В "К вопросу об электропроводности записи меди" *ЖЭТФ* 2 (5/6) 309 (1932); Zhuze V P, Kurchatov B V "Zur elektrischen Leitfähigkeit von Kupferoxydul" *Phys. Z. Sowjetunion* 2 (6) 453 (1932); Frenkel Ya I, Ioffe A "On the electrical and photoelectric properties of contacts between a metal and semiconductor" *Phys. Z. Sowjetunion* 1 (1) 60 (1932)
2. Frenkel J "On the transformation of light into heat in solids I, II" *Phys. Rev.* 37 17, 1276 (1931); Френкель Я И "О поглощении света и прилипании электронов и положительных дырок в кристаллических диэлектриках" *ЖЭТФ* 6 647 (1936); Гросс Е Ф, Каррье Н А "Поглощение света кристаллом записи меди в инфракрасной и видимой части спектра" *ДАН СССР* 84 261 (1952); "Оптический спектр экситона" *ДАН СССР* 84 471 (1952)
3. Давыдов Б И "О контактном сопротивлении полупроводников" *ЖЭТФ* 9 451 (1939)
4. Welker H "Über neue halbleitende Verbindungen I, II" *Z. Naturforsch. A* 7 744 (1952); *Z. Naturforsch. A* 8 248 (1953); Горюнова Н А "Серое олово", Дисс. ... канд. хим. наук (Л.: ЛГУ, Физико-технический институт, 1951); Блум А И, Мокровский Н П, Регель А Р "Изучение электропроводности полупроводников и интерметаллических соединений в твердом и жидком состояниях", *Труды VII конференции по свойствам полупроводников, Киев, 1950; Изв. АН СССР. Сер. физ.* XVI (2) 139 (1952)
5. Shockley W "Circuit Element Utilizing Semiconductive Material", US Patent 2,569,347 (September 25, 1951)
6. Губанов А И "Теория контакта двух полупроводников с различным типом проводимости" *ЖТФ* 20 1287 (1950); "Теория контакта двух полупроводников с проводимостью одного типа" *ЖТФ* 21 304 (1951)
7. Kroemer H "Theory of a wide-gap emitter for transistors" *Proc. IRE* 45 1535 (1957); "Quasi-electric and quasi-magnetic fields in non-uniform semiconductors" *RCA Rev.* 18 332 (1957)
8. Басов Н Г, Крохин О Н, Попов Ю М "Возможности использования непрямых переходов для получения отрицательной температуры в полупроводниках" *ЖЭТФ* 39 1486 (1961) [*Sov. Phys. JETP* 12 1033 (1961)]
9. Наследов Д Н, Рогачев А А, Рывкин С М, Царенков Б В "Рекомбинационное излучение арсенида галлия" *ФТТ* 4 1062 (1962) [*Sov. Phys. Solid State* 4 782 (1962)]
10. Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, Soltys T J, Carlson R O "Coherent light emission from GaAs junctions" *Phys. Rev. Lett.* 9 366 (1962); Nathan M I, Dumke W P, Burns G, Dills F H (Jr), Lasher G "Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions" *Appl. Phys. Lett.* 1 62 (1962); Holonyak N (Jr), Bevacqua S F "Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions" *Appl. Phys. Lett.* 1 82 (1962)
11. Алфёров Ж И, Казаринов Р Ф "Полупроводниковый лазер с электрической накачкой", Авт. свид. № 181737, Заявка № 950840/26-25, Заявлено 30.03.1963; *Бюлл. изобрет.* (14) 147 (1975); Kroemer H "A proposed class of heterojunction injection lasers" *Proc. IEEE* 51 1782 (1963)
12. Алфёров Ж И, Халфин В Б, Казаринов Р Ф "Об одной особенности инжекции в гетеропереходах" *ФТТ* 8 3102 (1966) [*Sov. Phys. Solid State* 8 2480 (1967)]
13. Алфёров Ж И "О возможности создания выпрямителя на сверхвысокие плотности тока на основе p-i-n (p-n-n), (n-p-p)-структуры с гетеропереходами" *ФТП* 1 436 (1967) [*Sov. Phys. Semicond.* 1 358 (1967)]
14. Anderson R L "Germanium-gallium arsenide heterojunctions" *IBM J. Res. Dev.* 4 283 (1960); "Experiments on Ge-GaAs heterojunctions" *Solid State Electron.* 5 341 (1962)
15. Natta G, Passerini L *Gazz. Chim. Ital.* 58 458 (1928); Goldschmidt V M "Crystal structure and chemical constitution" *Trans. Faraday Soc.* 25 253 (1929)
16. Алфёров Ж И, Гарбузов Д З, Григорьева В С, Жилев Ю В, Крадинова Л В, Корольков В И, Морозов Е П, Нинуа О А,

- Портной Е Л, Прочухан В Д, Трукан М К "Инжекционная люминесценция эпитаксиальных гетеропереходов в системе GaP–GaAs" *ФТТ* 9 279 (1967) [*Sov. Phys. Solid State* 9 208 (1967)]
17. Алферов Ж И, Жилиев Ю В, Шмарцев Ю В "Расщепление зоны проводимости в "сверхрешетке" на основе GaP_xAs_{1-x}" *ФТП* 5 196 (1971) [*Sov. Phys. Semicond.* 5 174 (1971)]
 18. Алферов Ж И, Андреев В М, Корольков В И, Третьяков Д Н, Тучкевич В М "Высоковольтные p–n-переходы в кристаллах Ga_xAl_{1-x}As" *ФТП* 1 1579 (1967) [*Sov. Phys. Semicond.* 1 1313 (1968)]; Rupprecht H S, Woodall J M, Pettit G D "Efficient visible electroluminescence at 300 K from Ga_{1-x}Al_xAs p–n junctions grown by liquid-phase epitaxy" *Appl. Phys. Lett.* 11 81 (1967)
 19. Алферов Ж И, Андреев В М, Корольков В И, Портной Е Л, Третьяков Д Н "Инжекционные свойства гетеропереходов p-Al_xGa_{1-x}As–p-GaAs" *ФТП* 2 1016 (1968) [*Sov. Phys. Semicond.* 2 843 (1969)]
 20. Алферов Ж И, Андреев В М, Корольков В И, Портной Е Л, Третьяков Д Н "Когерентное излучение в эпитаксиальных структурах с гетеропереходами в системе AlAs–GaAs" *ФТП* 2 1545 (1968) [*Sov. Phys. Semicond.* 2 1289 (1969)]
 21. (a) Алферов Ж И, Андреев В М, Корольков В И, Портной Е Л, Третьяков Д Н "Рекомбинационное излучение в эпитаксиальных структурах в системе AlAs–GaAs", в кн. *Труды 9-й Международной конф. по физ. полупровод., Москва, 23–29 июля 1968 г.* Т. 1 (Л.: Наука, 1969) с. 534; (b) Alferov Zh I "Electroluminescence of heavily-doped heterojunctions p-Al_xGa_{1-x}As–nGaAs", in *Proc. of the Intern. Conf. on Luminescence, Newark, Delaware, USA, August 25–29, 1969* (Ed. F Williams) (Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1970); *J. Lumin.* 1 869 (1970); (c) Алферов Ж И, Гарбузов Д З, Морозов Е П, Портной Е Л "Диагональное тунелирование и поляризация излучения в гетеропереходах Al_xGa_{1-x}As–GaAs и p–n-переходах в GaAs" *ФТП* 3 1054 (1969) [*Sov. Phys. Semicond.* 3 885 (1970)]; (d) Алферов Ж И, Андреев В М, Корольков В И, Портной Е Л, Яковенко А А "Рекомбинационное излучение в твердых растворах Al_xGa_{1-x}As с переменной шириной запрещенной зоны" *ФТП* 3 541 (1969) [*Sov. Phys. Semicond.* 3 460 (1970)]
 22. Алферов Ж И, Андреев В М, Портной Е Л, Трукан М К "Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов в системе AlAs–GaAs с низким порогом генерации при комнатной температуре" *ФТП* 3 1328 (1969) [*Sov. Phys. Semicond.* 3 1107 (1970)]
 23. Алферов Ж И, Андреев В М, Корольков В И, Портной Е Л, Яковенко А А "Источники спонтанного излучения на основе структур с гетеропереходами в системе AlAs–GaAs" *ФТП* 3 930 (1969) [*Sov. Phys. Semicond.* 3 785 (1970)]
 24. Алферов Ж И, Андреев В М, Каган М Б, Протасов И И, Трофим В Г "Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов p-Al_xGa_{1-x}As–n-GaAs" *ФТП* 4 2378 (1970) [*Sov. Phys. Semicond.* 4 2047 (1971)]
 25. Алферов Ж И, Ахмедов Ф А, Корольков В И, Никитин В Г "Фотогетеропереходы на основе гетеропереходов в системе GaAs–AlAs" *ФТП* 7 1159 (1973) [*Sov. Phys. Semicond.* 7 780 (1973)]
 26. Алферов Ж И, Андреев В М, Корольков В И, Никитин В Г, Яковенко А А "p–n–p–n-структуры на основе GaAs и твердых растворов Al_xGa_{1-x}As" *ФТП* 4 578 (1970) [*Sov. Phys. Semicond.* 4 481 (1971)]
 27. Hayashi I "Heterostructure lasers" *IEEE Trans. Electron Dev.* ED-31 1630 (1984)
 28. Алферов Ж И, Андреев В М, Гарбузов Д З, Жилиев Ю В, Морозов Е П, Портной Е Л, Трофим В Г "Исследование влияния параметров гетероструктуры в системе AlAs–GaAs на пороговый ток лазеров и получение непрерывного режима генерации при комнатной температуре" *ФТП* 4 1826 (1970) [*Sov. Phys. Semicond.* 4 1573 (1971)]
 29. Hayashi I, Panish M B, Foy P W, Sumski S "Junction lasers which operate continuously at room temperature" *Appl. Phys. Lett.* 17 109 (1970)
 30. Alferov Zh I, Andreev V M, Konnikov S G, Nikitin V G, Tretyakov D N "Heterojunctions on the base of A^{III}B^V semiconducting compounds and of their solid solution", in *Proc. of the Intern. Conf. on Physics Chemistry of Semiconductor Heterojunctions and Layer Structures, Budapest, October, 1970* Vol. 1 (Eds G Szigeti et al.) (Budapest: Akadémiai Kiadó, 1971) p. 93
 31. Antipas G A, Moon R L, James L W, Edgecumbe J, Bell R L, in *Gallium Arsenide and Related Compounds, 1972* (Institute of Physics Conf. Series, Vol. 17) (London: Institute of Physics, 1973) p. 48
 32. James L, Antipas G, Moon R, Edgecumbe J, Bell R L "Photoemission from cesium-oxide-activated InGaAsP" *Appl. Phys. Lett.* 22 270 (1973)
 33. Богатов А П, Долгинов Л М, Дружинина Л В, Елисеев П Г, Свердлов Л Н, Шевченко Е Г "Гетеролазеры на основе твердых растворов Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y} и Al_xGa_{1-x}Sb_yAs_{1-y}" *Квант. электрон.* 1 2294 (1974) [*Sov. J. Quantum Electron.* 1 1281 (1974)]; Hsieh J J "Room-temperature operation of GaInAsP/InP double-heterostructure diode lasers emitting at 1.1 μm" *Appl. Phys. Lett.* 28 283 (1976)
 34. Алферов Ж И, Арсентьев И Н, Гарбузов Д З, Конников С Г, Румянцев В Д "Генерация когерентного излучения в гетероструктурах nGa_{0.5}In_{0.5}P–pGa_{x-0.55}In_{1-x}As_{y-0.10}P_{1-y}–nGa_{0.5}In_{0.5}P" *Письма в ЖТФ* 1 305 (1975) [*Sov. Tech. Phys. Lett.* 1 147 (1975)]; Алферов Ж И, Арсентьев И Н, Гарбузов Д З, Румянцев В Д "Красные инжекционные гетеролазеры в системе Ga–In–As–P" *Письма в ЖТФ* 1 406 (1975) [*Sov. Tech. Phys. Lett.* 1 191 (1975)]; Hitchens W R, Holonyak N (Jr), Wright P D, Coleman J J "Low-threshold LPE In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z/In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z/In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z yellow double-heterojunction laser diodes ($J < 10^4$ A/cm², $I = 5850$ A, 77 K)" *Appl. Phys. Lett.* 27 245 (1975)
 35. Алферов Ж И, Андреев В М, Казаринов Р Ф, Портной Е Л, Сурис Р А "Полупроводниковый оптический квантовый генератор", Авт. свид. № 392875 (СССР) МКИ H01 S 3/19, Заявка № 1677436/26-25, Заявлено 19.07.1971; *Бюлл. изобрет.* (1) 259 (1977)
 36. Kogelnik H, Shank C V "Stimulated emission in a periodic structure" *Appl. Phys. Lett.* 18 152 (1971)
 37. Казаринов Р Ф, Сурис Р А "Инжекционный гетеролазер с дифракционной решеткой на контактной поверхности" *ФТП* 6 1359 (1972) [*Sov. Phys. Semicond.* 6 1184 (1973)]
 38. Алферов Ж И, Гуревич С А, Казаринов Р Ф, Мизеров М Н, Портной Е Л, Сейсян Р П, Сурис Р А "ПКГ со сверхмалой расходимостью излучения" *ФТП* 8 832 (1974) [*Sov. Phys. Semicond.* 8 541 (1974)]; Алферов Ж И, Гуревич С А, Клепикова Н В, Кучинский В И, Мизеров М Н, Портной Е Л "Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью во втором порядке" *Письма в ЖТФ* 1 645 (1975) [*Sov. Tech. Phys. Lett.* 1 286 (1975)]
 39. Nakamura M, Yariv A, Yen H W, Somekh S, Garvin H L "Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback" *Appl. Phys. Lett.* 22 315 (1973)
 40. Scifres D R, Burnham R D, Streifer W "Distributed-feedback single heterojunction GaAs diode laser" *Appl. Phys. Lett.* 25 203 (1974)
 41. Kroemer H, Griffiths G "Staggered-lineup heterojunctions as sources of tunable bellow-gap radiation: Operating principle and semiconductor selection" *IEEE Electron Dev. Lett.* EDL-4 1, 20 (1983)
 42. Баранов А Н, Джурганов Б Е, Именков А М, Рогачев А А, Шерняков Ю М, Яковлев Ю П "Генерация когерентного излучения в квантово-размерной структуре на одном гетеропереходе" *ФТП* 20 2217 (1986) [*Sov. Phys. Semicond.* 20 1385 (1986)]
 43. Cho A Y "Film deposition by molecular-beam techniques" *J. Vac. Sci. Technol.* 8 (5) S31 (1971); "Growth of periodic structures by the molecular-beam method" *Appl. Phys. Lett.* 19 467 (1971)
 44. Manasevit H M "Single crystal GaAs on insulating substrates" *Appl. Phys. Lett.* 12 156 (1968)
 45. Dupuis R D, Dapkus P D "Room-temperature operation of Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs double-heterostructure lasers grown by metal-organic chemical vapor deposition" *Appl. Phys. Lett.* 31 466 (1977)
 46. Dingle R, Wiegmann W, Henry C H "Quantum states of confined carriers in very thin Al_xGa_{1-x}As–GaAs–Al_xGa_{1-x}As heterostructures" *Phys. Rev. Lett.* 33 827 (1974)
 47. Esaki L, Tsu R "Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors" *IBM J. Res. Dev.* 14 61 (1970)
 48. Келдыш Л В "О влиянии ультразвука на электронный спектр кристалла" *ФТТ* 4 2265 (1962) [*Sov. Phys. Solid State* 4 1658 (1963)]
 49. Казаринов Р Ф, Сурис Р А "О возможности усиления электромагнитных волн в полупроводнике со сверхрешетками" *ФТП* 5 797 (1971) [*Sov. Phys. Semicond.* 5 707 (1971)]; "К теории электрических и электромагнитных свойств полупроводников со сверхрешетками" *ФТП* 6 148 (1972) [*Sov. Phys. Semicond.* 6 120 (1972)]; "К теории электрических свойств полупроводников со сверхрешеткой" *ФТП* 7 488 (1973) [*Sov. Phys. Semicond.* 7 347 (1973)]

50. Tsu R, Esaki L "Tunneling in a finite superlattice" *Appl. Phys. Lett.* **22** 562 (1973)
51. Osbourn G C "Strained-layer superlattices from lattice mismatched materials" *J. Appl. Phys.* **53** 1586 (1982)
52. Ludowise M, Dietze W T, Lewis C R, Camras M D, Holonyak N (Jr), Fuller B K, Nixon M A "Continuous 300 K laser operation of strained superlattices" *Appl. Phys. Lett.* **42** 487 (1983)
53. Chang L L, Esaki L, Howard W E, Ludeke R "The growth of a GaAs–GaAlAs superlattice" *J. Vac. Sci. Technol.* **10** 11 (1973)
54. Chang L L, Esaki L, Tsu R "Resonant tunneling in semiconductor double barriers" *Appl. Phys. Lett.* **24** 593 (1974)
55. Esaki L, Chang L L "New transport phenomenon in a semiconductor 'superlattice'" *Phys. Rev. Lett.* **33** 495 (1974)
56. Schrieffer J R, in *Semiconductor Surface Physics* (Ed. R H Kingston) (Philadelphia, PA: Univ. of Pennsylvania Press, 1957) p. 68
57. Fowler A B, Fang F F, Howard W E, Stiles P J "Magnetoo-scillatory conductance in silicon surfaces" *Phys. Rev. Lett.* **16** 901 (1966)
58. Lutsikii V N "Quantum-size effect — present state and perspective on experimental investigations" *Phys. Status Solidi A* **1** 199 (1970)
59. Dingle R, Störmer H L, Gossard A C, Wiegmann W "Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices" *Appl. Phys. Lett.* **33** 665 (1978)
60. Delagebeaudeuf D, Delescluse P, Etienne P, Laviron M, Chaplart J, Linh N T "Two-dimensional electron gas MESFET structure" *Electron. Lett.* **16** 667 (1980)
61. Mimura T, Hiyamizu S, Fujii T, Nanbu K "A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions" *Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 2* **19** L225 (1980)
62. van der Ziel J P, Dingle R, Miller R C, Wiegmann W, Nordland W A (Jr) "Laser oscillation from quantum states in very thin GaAs–Al_{0.2}Ga_{0.8}As multilayer structures" *Appl. Phys. Lett.* **26** 463 (1975)
63. Dupuis R D, Dapkus P D, Holonyak N (Jr), Rezek E A, Chin R "Room-temperature laser operation of quantum-well Ga_{1-x}Al_xAs–GaAs laser diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition" *Appl. Phys. Lett.* **32** 295 (1978)
64. Tsang W T "Extremely low threshold (AlGa)As graded-index waveguide separate-confinement heterostructure lasers grown by molecular beam epitaxy" *Appl. Phys. Lett.* **40** 217 (1982)
65. Rezek E A, Shichijo H, Vojak B A, Holonyak N (Jr) "Confined-carrier luminescence of a thin In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z well ($x \sim 0.13$, $z \sim 0.29$, ~ 400 Å) in an InP p–n junction" *Appl. Phys. Lett.* **31** 534 (1977)
66. Алферов Ж И, Гарбузов Д З, Арсентьев И Н, Бер Б Я, Вавилова Л С, Красовский В В, Чудинов А В "Оже-профили состава и люминесцентные исследования жидкофазных InGaAsP-гетероструктур с активными областями $(1,5-5) \times 10^{-6}$ см" *ФТП* **19** 1108 (1985) [*Sov. Phys. Semicond.* **19** 679 (1985)]
67. Алферов Ж И, Андреев В М, Воднев А А, Конников С Г, Ларионов В Р, Погребницкий К Ю, Румянцев В Д, Хвостиков В П "AlGaAs-гетероструктуры с квантово-размерными слоями, полученные низкотемпературной жидкофазной эпитаксией" *Письма в ЖТФ* **12** 1089 (1986) [*Sov. Tech. Phys. Lett.* **12** 450 (1986)]
68. Алферов Ж И, Гарбузов Д З, Кижаев К Ю, Нивин А Б, Никшин С А, Овчинников А В, Соколова З Н, Тарасов И С, Чудинов А В "Низкопороговые InGaAsP/InP лазеры раздельного ограничения с $\lambda = 1,3$ мкм и $\lambda = 1,55$ мкм ($j_{\text{пор}} = 600-700$ А/см²)" *Письма в ЖТФ* **12** 210 (1986) [*Sov. Tech. Phys. Lett.* **12** 87 (1986)]; Алферов Ж И, Антонишкис Н Ю, Арсентьев И Н, Гарбузов Д З, Тихунов А В, Халфин В Б "Низкопороговые квантово-размерные InGaAsP/GaAs РО ДГ лазеры, изготовленные методом жидкостной эпитаксии ($\lambda = 0,86$ мкм, $I_{\text{н}} = 90$ А/см², $L = \infty$; $I_{\text{н}} = 165$ А/см², $L = 1150$ мкм, $T = 300$ К)" *ФТП* **21** 1501 (1987) [*Sov. Phys. Semicond.* **21** 914 (1987)]
69. Алферов Ж И, Антонишкис Н Ю, Колышкин В И, Налет Т А, Стругов Н А, Тихунов А В "Квантово-размерные InGaAsP/GaAs ($\lambda = 0,86-0,78$ мкм) лазеры раздельного ограничения ($I_{\text{н}} = 100$ А/см², к.п.д. = 59%)" *ФТП* **22** 1031 (1988) [*Sov. Phys. Semicond.* **22** 650 (1988)]; Garbuzov D Z et al., Technical Digest CLEO, paper THU44 (1988) p. 396
70. Garbuzov D Z et al., in *12th IEEE Intern. Semiconductor Laser Conf., Davos, Switzerland, Sept. 1990*, Conf. Digest, paper L-33 (1990) p. 238
71. Алферов Ж И, Васильев А М, Иванов С В, Копьев П С, Леденцов Н Н, Луценко М Э, Мельцер Б Я, Устинов В М "Снижение пороговой плотности тока в GaAs–AlGaAs ДГС РО квантово-размерных лазерах ($J_{\text{n}} = 52$ А/см², $T = 300$ К) при ограничении квантовой ямы короткопериодной сверхрешеткой с переменным шагом" *Письма в ЖТФ* **14** 1803 (1988) [*Sov. Tech. Phys. Lett.* **14** 782 (1988)]
72. Faist J, Capasso F, Sivco D L, Sirtori C, Hutchinson A L, Cho A Y "Quantum cascade laser" *Science* **264** 553 (1994)
73. v. Klitzing K, Dorda G, Pepper M "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance" *Phys. Rev. Lett.* **45** 494 (1980)
74. Tsui D C, Stormer H L, Gossard A C "Two-dimensional magnetotransport in the extreme quantum limit" *Phys. Rev. Lett.* **48** 1559 (1982)
75. Arakawa Y, Sakaki H "Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current" *Appl. Phys. Lett.* **40** 939 (1982)
76. Екимов А И, Онущенко А А "Квантовый размерный эффект в трехмерных микрокристаллах полупроводников" *Письма в ЖЭТФ* **34** 363 (1981) [*JETP Lett.* **34** 345 (1981)]
77. Goldstein L, Glas F, Marzin J Y, Charasse M N, Le Roux G "Growth by molecular beam epitaxy and characterization of InAs/GaAs strained-layer superlattices" *Appl. Phys. Lett.* **47** 1099 (1985)
78. Ledentsov N N, Grundmann M, Kirstaedter N, Christen J, Heitz R, Böhrer J, Heinrichsdorff F, Bimberg D, Ruvimov S S, Werner P, Richter U, Gösele U, Heydenreich J, Ustinov V M, Egorov A Yu, Maximov M V, Kop'ev P S, Alferov Zh I "Luminescence and structural properties of (In, Ga)As–GaAs quantum dots", in *Proc. of the 22nd Intern. Conf. on the Physics of Semiconductors, Vancouver, Canada, Aug. 15–19, 1994* Vol. 3 (Ed. D J Lockwood) (Singapore: World Scientific Publ. Co., 1995) p. 1855
79. Алферов Ж И, Гордеев Н Ю, Зайцев С В, Копьев П С, Кочнев И В, Комин В В, Крестников И Л, Леденцов Н Н, Лунев А В, Максимов М В, Рувимов С С, Сахаров А В, Цацульников А Ф, Шерняков Ю М, Бимберг Д "Низкопороговый инжекционный гетеролазер на квантовых точках, полученный методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений" *ФТП* **30** 357 (1996) [*Semicond.* **30** 197 (1996)]
80. Shchukin V A, Ledentsov N N, Kop'ev P S, Bimberg D "Spontaneous ordering of arrays of coherent strained islands" *Phys. Rev. Lett.* **75** 2968 (1995)
81. Алферов Ж И, Берг Н А, Егоров А Ю, Жуков А Е, Копьев П С, Косонов А О, Крестников И Л, Леденцов Н Н, Лунев А В, Максимов М В, Сахаров А В, Устинов В М, Цацульников А Ф, Шерняков Ю М, Бимберг Д "Инжекционный гетеролазер на основе массивов вертикально связанных квантовых точек InAs в матрице GaAs" *ФТП* **30** 351 (1996) [*Semicond.* **30** 194 (1996)]
82. Kirstaedter N, Ledentsov N N, Grundmann M, Bimberg D, Ustinov V M, Ruvimov S S, Maximov M V, Kop'ev P S, Alferov Zh I, Richter U, Werner P, Gösele U, Heydenreich J "Low threshold, large T₀ injection laser emission from (InGa)As quantum dots" *Electron. Lett.* **30** 1416 (1994)
83. Park G, Shchekin O B, Huffaker D L, Deppe D G "Low-threshold oxide-confined 1.3 μm quantum-dot laser" *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 230 (2000)
84. Zhukov A E, Kovsh A R, Mikhrin S S, Maleev N A, Ustinov V M, Lifshits D A, Tarasov I S, Bedarev D A, Maximov M V, Tsatsul'nikov A F, Soshnikov I P, Kop'ev P S, Alferov Zh I, Ledentsov N N, Bimberg D "3.9 W CW power from sub-monolayer quantum dot diode laser" *Electron. Lett.* **35** 1845 (1999)
85. Asryan L V, Suris R A "Inhomogeneous line broadening and the threshold current density of a semiconductor quantum dot laser" *Semicond. Sci. Technol.* **11** 554 (1996)
86. Zhukov A E, Ustinov V M, Egorov A Yu, Kovsh A R, Tsatsul'nikov A F, Ledentsov N N, Zaitsev S V, Gordeev N Yu, Kop'ev P S, Alferov Zh I "Negative characteristic temperature of InGaAs quantum dot injection laser" *Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1* **36** 4216 (1997)
87. Park G, Shchekin O B, Csutak S, Huffaker D L, Deppe D "Room-temperature continuous-wave operation of a single-layered 1.3 μm quantum dot laser" *Appl. Phys. Lett.* **75** 3267 (1999)
88. Lott J A, Ledentsov N N, Ustinov V M, Egorov A Yu, Zhukov A E, Kop'ev P S, Alferov Zh I, Bimberg D "Vertical cavity lasers based on vertically coupled quantum dots" *Electron. Lett.* **33** 1150 (1997)
89. Lott J A, Ledentsov N N, Ustinov V M, Maleev N A, Zhukov A E, Kovsh A R, Maximov M V, Volovik B V, Alferov Zh I, Bimberg D "InAs–InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3 μm" *Electron. Lett.* **36** 1384 (2000)