

# Жорес Алфёров – учёный, благодаря которому работает большинство современных полупроводниковых лазеров.

## Часть 3. Полупроводниковые лазеры на базе квантовых плоскостей и квантовых проволок

Виктор Алексеев

Во второй части статьи, опубликованной в журнале «Современная электроника» № 9, 2024, были описаны основные научные достижения группы Жореса Алфёрова в 1960-х – 1970-х годах в области разработки двойных гетероструктур и создания на их основе полупроводниковых инжекционных ДГС-лазеров. В этой части рассмотрены основные работы этих учёных, посвящённые разработкам гетерогенных лазеров на базе квантовых плоскостей и квантовых проволок.

### Полупроводниковые гетероструктуры и лазеры на базе квантовых плоскостей

К концу 1970-х стремительный рост разработок полупроводниковых лазеров на базе двойных гетероструктур заметно снизился.

Используя классическую схему ДГС-лазера, разработанного Алфёровым, больше невозможно было увеличивать мощность и эффективность, а также снижать пороговые значения плотности тока. Необходимы были новые решения.

В 1978 году Ник Холоньяк (Nick Holonyak) с коллегами (Dupuis R.D., Darkus P.D., Rezek E.A., Chin R.) впервые продемонстрировали успешную работу лазера на основе квантово-размерных лазерных гетероструктур  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs}$  [1].

В этой работе описан лазер с квантовой ямой на базе гетероструктуры  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs}$ , полученной с использованием одного из первых вариантов метода, который в настоящее время получил название «Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy – MOVPE» (паро-

фазная эпитаксия металл-органических соединений). Здесь впервые в лазерной тематике появился термин «Quantum Wells Heterogeneous Laser Structure» (гетерогенные лазерные структуры на основе квантовых ям).

Квантовые ямы (Quantum Wells) являются одним из трёх представителей полупроводниковых микрокристаллов с квантово-размерным эффектом «КРЭ-нанокристаллы». Для этого класса перестают работать простые законы физики макромира, и их поведение может быть рассмотрено только с использованием элементов квантовой механики. Квантово-размерный (КРЭ) эффект (Quantum-Confined Effect – QCE) описывает изменение термодинамических, кинетических и оптических свойств кристаллов в случаях, когда хотя бы один из их геометрических размеров становится соизмеримым с длиной свободного пробега электрона (длина волны де Бройля).

Запрет на «свободное» перемещение носителей заряда оценивается с помощью параметра «Degrees of Freedom – DOF». В группу КРЭ-нанокристаллов входят: двумерные 2-DOF (Quantum Wells); одномерные 1-DOF (Quantum Wire, Carbon Nanotubes) и нульмерные 0-DOF (Quantum Dots) полупроводниковые микрокристаллы.

На рис. 1 показаны зависимости плотности состояний (ПС) от энергии для объёмных структур и идеальных образцов КРЭ-нанокристаллов, полученные с помощью модельных расчётов. Под термином «идеальный» понимается геометрически точная фигура без каких-либо поверхностных изъянов с полным запретом распространения зарядов по соответствующим направлениям [2].

Величина (ПС) задаёт количество доступных электронных состояний на каждом энергетическом уровне.

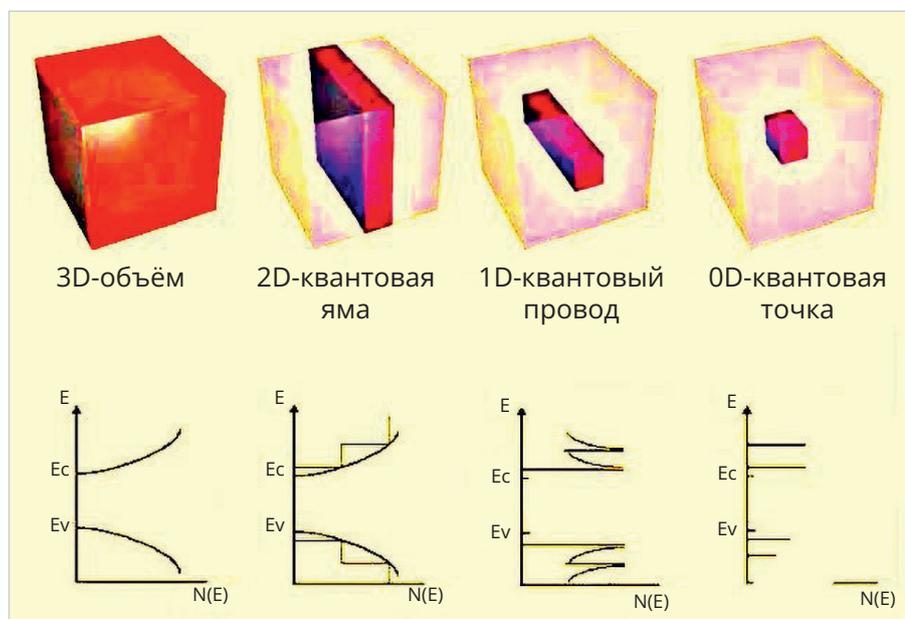


Рис. 1. Зависимость плотности состояний от энергии для объёмных структур и идеальных образцов КРЭ-нанокристаллов (2D, 1D, 0D)

Электроны в КРЭ-структурах, размеры которых сравнимы с длиной волны де Бройля, могут занимать только дискретные разрешённые уровни. Поэтому электронные свойства КРЭ-структур отличаются от известных свойств объёмных образцов тех же самых структур.

Лазеры на квантовой яме (Quantum Well Laser – QWL) отличаются от рассмотренных в предыдущей главе лазеров с двойной гетероструктурой (ДВГ) главным образом тем, что в гетероструктуре QWL толщина активной области приближается к длине волны де Бройля.

Квантовые плоскости и нанолиты (2-DOF – nanosheets) относятся к двумерным наноматериалам, которые представляют собой плоский отрезок кристаллической структуры, состоящий из одного слоя атомов или молекул определённого вещества, в которых перенос зарядов разрешён только в плоскости  $xy$ . В материале квантовой плёнки электроны, находящиеся на самом нижнем энергетическом уровне, удерживаются в квантовых ямах (Quantum Wells) и не могут перемещаться в вертикальном направлении.

Для квантовой плоскости энергия электрона квантуется и может принимать только значения в соответствии с его эффективной массой « $m_e$ ». Поэтому каждому дискретному уровню  $E_i$  соответствует определённый набор конкретных состояний, отличающихся импульсом  $P_x$  в направлении осей  $X$  и  $Y$ .  $E = E_i + (P_y + P_x)^2 / 2m_e$ .

Принцип действия полупроводникового лазера с квантовой ямой основан на тех же самых принципах, которые лежат в основе классического ДГС-лазера (ДГС – двойная гетероструктура). Эти вопросы достаточно подробно были рассмотрены во второй части статьи.

В лазере с квантовой ямой в качестве «рабочей прослойки транзисторного сэндвича» используется тонкая плёнка из активного компонента гетероструктуры толщиной несколько нанометров и квантово-размерным ограничением 2-DOF.

Тема лазеров с КРЭ-гетероструктурами стала крайне актуальной для Жореса Алфёрова, когда он в середине 1980-х годов понял глобальное значение этого направления. Во многом это было связано с тем, что бывший сотрудник Ленинградского Физтеха Алексей Екимов, который после

защиты кандидатской диссертации перешёл на работу в ГОИ, впервые в мире обнаружил квантово-размерный эффект в полупроводниковых микрокристаллах, заключённых в стеклянной матрице. За это открытие квантовых точек Алексей Екимов в 2023 году получил Нобелевскую премию.

Успешные работы Алексея Екимова продемонстрировали наличие отличной научно-технической базы, существовавшей в начале 1980-х в ФТИ имени Иоффе, которая была столь необходима для изучения КРЭ-структур.

Этими проблемами в лаборатории Алфёрова занималась отдельная группа во главе с Николаем Леденцовым, которого Алфёров называл одним из лучших своих учеников. В 1986 году Николай Леденцов защитил выполненную под руководством Жореса Алфёрова кандидатскую диссертацию на тему «Люминесценция слоёв арсенида галлия, арсенида галлия алюминия и гетероструктур с квантовыми ямами на их основе, полученных молекулярно-пучковой эпитаксией» [2]. Результаты этой работы были в дальнейшем использованы для создания лазеров на базе одной из наиболее успешных гетероструктур GaAs–AlGaAs, которая остаётся востребованной и в наши дни.

На рис. 2 пока зана типичная схема гетероструктуры 2D на основе AlGaAs/GaAs.

Важно подчеркнуть, что параметры всех слоёв гетероструктуры выбираются в зависимости от конкретного применения в конечном продукте.

Верхний слой GaAs со средней толщиной около 20 нм предотвращает окисление слоя AlGaAs и обеспечивает хороший омический контакт для напряжения смещения. Кроме того, этот слой также влияет на оптические свойства лазера. Например, если верхний слой GaAs будет слишком тонким, то это может вызвать плохой электрический контакт и проблемы с окислением. Эта асимметричная конструкция проектируется из соображений оптимизации как электрических, так и оптических свойств конкретного проектируемого устройства.

Барьерный слой AlGaAs в комбинации с GaAs образует двумерное квантовое ограничение для переноса носителей заряда. В случае, когда барьерный слой AlGaAs выбран недостаточно широким, возможно плохое



Рис. 2. Схема гетероструктуры 2D на основе AlGaAs/GaAs

ограничение носителей и квантовое туннелирование.

Базовым элементом 2D-гетероструктур с квантовыми ямами на основе GaAs/AlGaAs является тонкий слой GaAs (обычно 5–30 нм), зажатый между барьерными слоями AlGaAs ( $\hbar c/2$ ). Поскольку GaAs имеет меньшую запрещённую зону, чем AlGaAs, создаётся потенциальная яма для электронов и дырок. При этом дискретные уровни энергии формируются из-за эффекта КРЭ, ограничивающего за счёт слоя GaAs перемещение инжектированных носителей заряда. Таким образом, если в гетероструктурах 3D-носители свободно перемещаются во всех направлениях, то в структурах GaAs/AlGaAs на базе квантовых плёнок свободное перемещение носителей возможно только в плоскости квантовой ямы. За счёт этого в гетероструктурах 2D достигается более высокая плотность носителей в активной области.

Показанная на рис. 2 гетероструктура, как правило, выращивается на GaAs-подложке.

Следует отметить, что в гетероструктурах с квантовым ограничением электроны и дырки ведут себя в зоне проводимости (Conduction Band – CB) и в валентной зоне (Valence Band – VB) иначе, чем это происходит в «обычном» ДГС-лазере с объёмной гетероструктурой.

В квантовой механике под термином «дырка» (Hole) понимается квазичастица с положительным зарядом, равным элементарному заряду и положительной эффективной массой. Таким образом, формально дырка определяет незаполненную валентную связь, которая проявляет себя как положительный заряд, численно равный заряду электрона.

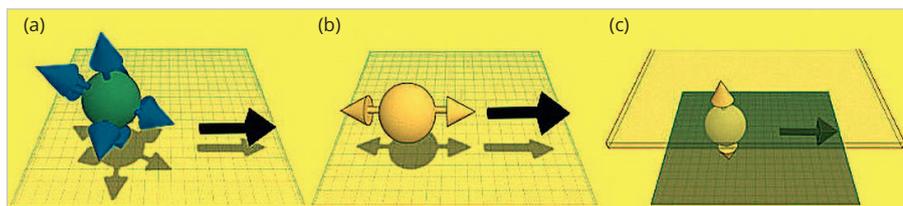


Рис. 3. Схематическое изображение направления спина (синие и песочные стрелки) и импульса (чёрные стрелки): а) для электронов; б) дырок в объёмных образцах; в) дырок в образцах с КРЭ

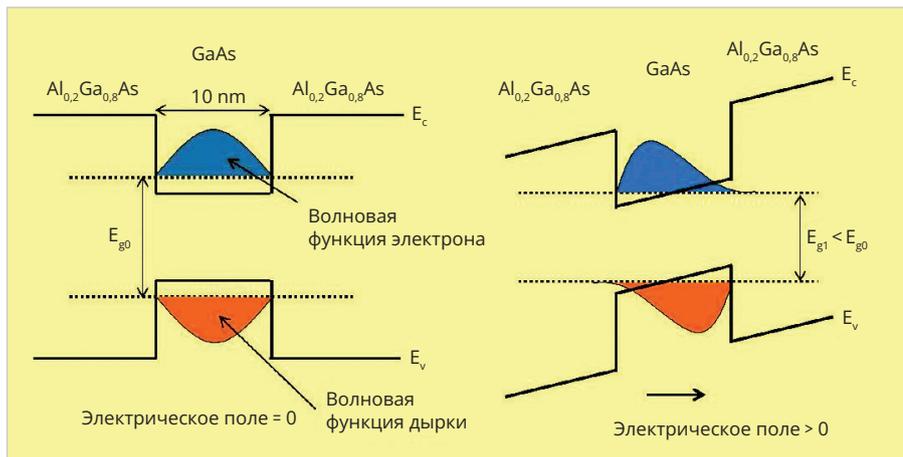


Рис. 4. Зонная структура квантовой ямы (QW) на основе GaAs, ограниченной барьерами из AlGaAs

На рис. 3 приведено схематическое изображение направления векторов спина (угловой момент) и импульса (количества движения): а) для электронов, б) дырок в объёмных образцах, в) дырок в образцах с квантово-размерным эффектом (КРЭ) [3].

В объёмных образцах типичных полупроводников направление вектора спина электрона (синяя стрелка) не коррелирует с направлением его вектора импульса (чёрная стрелка на рис. 3а). Для объёмных образцов псевдоспина дырки имеет то же самое направление, что и импульс (рис. 3б). Для КРЭ-нанокристаллов в валентной зоне (Valence Band – VB) проявляются дополнительные эффекты (рис. 3с), для описания которых вводится понятие «тяжёлые дырки» (Heavy Holes). Под термином «НН» подразумевается тип носителей заряда в валентной зоне (VB), характеризующихся относительно большой эффективной массой по сравнению с другими носителями заряда [4].

Тяжёлые дырки влияют на «плотность состояний» (ПС), определяющих число состояний, приходящихся на единицу энергии в единице объёма.

Для повышения производительности гетероструктуры в решётку полупроводника вводят примеси (леги-

рование), изменяющие плотность носителей заряда. Например, при легировании N-типа добавляются такие элементы, которые обеспечивают дополнительные электроны, увеличивающие проводимость. Кроме того, введение легирующих примесей в гетероструктурах GaAs/AlGaAs позволяет изменять ширину запрещённой зоны и влиять на поведение электронов и дырок в материале.

В классическом варианте в таких гетероструктурах (рис. 2) слои арсенида галлия слабо легированы. Плотности легирования  $N_D = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (количество атомов легирующей примеси на кубический сантиметр GaAs). В то же время слои алюминий – галлий арсенида легируются с высокой плотностью около  $N_D = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Такой подход обеспечивает дополнительные электроны в слое AlGaAs, которые переходят в слой GaAs. В результате электроны из легирующих примесей в слое AlGaAs могут туннелировать на границе раздела в более низкие энергетические состояния.

Крайне важным является то, что такая структура создаёт высокоподвижный электронный канал на границе, сохраняя при этом легирующие примеси физически отделёнными от проводящих электронов. Таким обра-

зом, создаются необходимые условия для формирования гетероперехода.

На рис. 4 схематически показана зонная структура квантовой ямы (QW) на основе GaAs, ограниченной барьерами из AlGaAs [5].

На границе кристаллов GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As образуется гетеропереход так называемого «первого рода» с энергетическими барьерами ΔEc для зоны проводимости и ΔEv для валентной зоны, которые образуют потенциальные ямы соответственно для электронов и дырок в направлении оси z, перпендикулярной плоскости слоя. Если ширина ямы L<sub>z</sub> сравнима с длиной волны де Бройля для электронов и дырок, их z-компонента волнового вектора k принимает дискретные значения, что приводит к квантованию энергии электронов в зоне проводимости (E<sub>1c</sub>, E<sub>2c</sub>, E<sub>3c</sub>) и двух типов дырок в валентной зоне: тяжёлых (E<sub>1hh</sub>, E<sub>2hh</sub>, E<sub>3hh</sub>) и лёгких (E<sub>1lh</sub>, E<sub>2lh</sub>).

В КРЭ-нанокристаллах вектор псевдоспина тяжёлых дырок НН, перпендикулярный их импульсу, совпадает по направлению с осью ограничения распространения носителей заряда (рис. 2с). Поэтому в энергетическом плане в образцах с КРЭ-ограничением тяжёлые дырки имеют преимущество по сравнению с другими носителями заряда. В результате кривизны валентной зоны вблизи вершины плотность состояний для тяжёлых дырок в этой области выше.

Как противоположность тяжёлым дыркам, вводится понятие «лёгкие дырки» (Light Holes – LH), которые имеют меньшую эффективную массу.

Благодаря увеличенной эффективной массе НН-дырки менее подвижны, и они медленнее перемещаются через кристаллическую решётку под действием электрического поля по сравнению с LH-дырками.

В структурах с квантовыми ямами уровни энергии для тяжёлых дырок располагаются ниже, чем для лёгких дырок. Такое расположение возникает из-за разницы в эффективных массах и кинетических энергиях.

Различие между объёмными и КРЭ-образцами проявляется также в поведении экситонов, которые представляют собой пару электрон-дырка, связанную посредством электростатической кулоновской силы.

В объёмном образце GaAs нестабильные при комнатной температуре экситоны ионизируются и поднима-

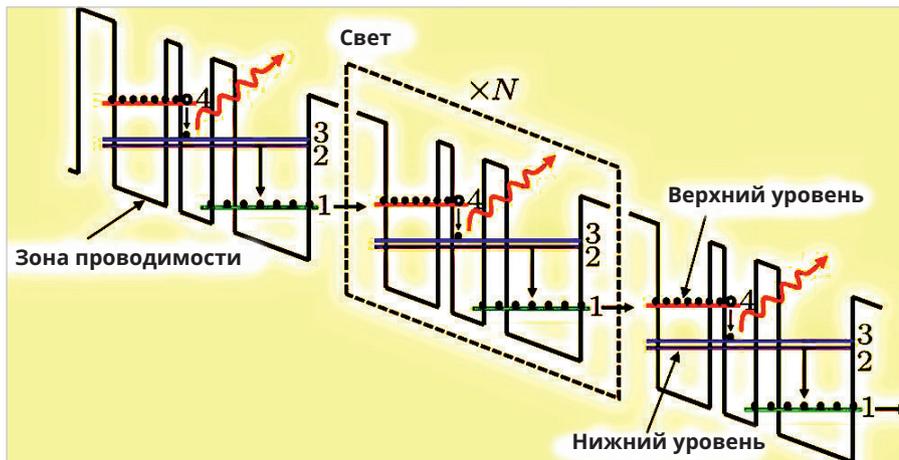


Рис. 5. Схема работы современного QCL-лазера

ются в зону проводимости фонами так быстро, что не могут возникнуть никакие резонансы. В то же время энергия связи двумерных экситонов внутри квантовой ямы в общем случае в четыре раза больше, чем в объёмном материале. Поэтому квантовые ямы GaAs демонстрируют экситонные резонансы в спектрах поглощения при комнатной температуре. Если статическое электрическое поле приложено перпендикулярно плоскости квантовой ямы, то зоны искривляются, что изменяет профиль потенциала.

На движение в плоскости  $xy$  потенциал самой квантовой ямы не влияет. В этой плоскости носители заряда могут свободно перемещаться. Однако полная энергия носителей в квантово-размерной плёнке складывается из дискретных уровней, связанных с движением в направлении  $z$ , и непрерывной компоненты, описывающей движение в плоскости  $xy$ . В такой системе электроны при упругом рассеянии могут изменять свой импульс только в плоскости  $xy$ . Поэтому в квантово-размерных гетероструктурах появляются дополнительные условия, уменьшающие рекомбинацию и удерживающие носители в активном слое. В результате стимулируется процесс создания инверсии населённости (ИН). Когда в активной зоне на верхнем энергетическом уровне образуется больше электронов, чем на низком уровне, возникает состояние (ИН) с последующим вынужденным когерентным лазерным излучением.

Более подробно историю создания гетероструктур на основе арсенидов галлия и алюминия можно посмотреть, например, в обзоре [6].

В начале 1990-х общие теоретические принципы создания лазеров на основе

КРЭ-нанокристаллов были более-менее понятны. Однако практическая реализация подобных устройств сдерживалась из-за отсутствия необходимых технологий. Вся сложность создания такой конструкции заключалась именно в разработке надёжных методов получения КРЭ-гетероструктур, требовавших прецизионного наращивания тонкой однородной плёнки на поверхности подложки [7].

Метод химического осаждения из паров металлоорганических соединений (Metalorganic Chemical Vapor Deposition – MOCVD) позволял создавать тонкие плёнки КРЭ-кристаллов 2-DOF для гетеролазеров с более низкими пороговыми токами. Так, для широкополосных лазерных диодов были получены пороговые плотности токов в диапазоне  $160\text{--}260\text{ A/cm}^2$  при значениях внешней дифференциальной квантовой эффективности около 70% [8].

Как правило, в более поздних моделях лазеров с квантовыми ямами использовались два и больше гетеропереходов. Идея таких «многослойных» лазеров с квантовыми ямами была отмечена Алфёровым ещё в 1971 году в статье, посвящённой гетерогенным сверхрешёткам (Superlattices) [9].

Упрощённо сверхрешётку можно представить как последовательность чередующихся слоёв более узкозонного и более широкозонного полупроводников, то есть некоторую последовательность квантовых ям. В сверхрешётке энергетические уровни в отдельных квантовых ямах образуют энергетические «минизоны», которыми можно управлять, меняя ширину барьеров.

В том же 1971 году коллеги Алфёрова из ФТИ имени А.Ф. Иоффе Казари-

нов Р.Ф., Сурис Р.А. показали, что протекание тока в сверхрешётках может быть реализовано за счёт туннелирования через потенциальные барьеры, разделяющие квантовые ямы [10].

Идея заключалась в том, что в случае, когда основное состояние одной ямы совпадает с возбуждённым состоянием следующей ямы, возможно возникновение стимулированного излучения, обусловленного туннелированием оптически возбуждённых носителей из основного состояния одной ямы в возбуждённое состояние следующей, расположенной на более низком энергетическом уровне. При этом интенсивность излучения может многократно возрастать за счёт многократных проходов излучения в кристалле гетероструктуры [11].

Полученные в этой работе результаты были использованы в технологии производства лазерных диодов на основе многопроходных p-n гетероструктур, разработанной в российском НИИФП [12].

Принцип последовательного соединения нескольких гетероструктур с квантовыми ямами был на практике реализован в лазерах, получивших название «Multi-Quantum Well Laser – MQWL» (лазер с множественными квантовыми ямами). Другое общее название этого типа лазеров – «Quantum-Cascade Lasers – QCL» (каскадный квантовый лазер) [13].

На рис. 5 показана схема работы современного QCL-лазера.

Каскадные лазеры используют в качестве активной зоны (АЗ) многоквантовую яму. Инжектированные в АЗ носители, которые не захвачены в одной яме, могут быть захвачены следующей ямой. Это позволяет увеличить выходную мощность и уменьшить пороговый ток. Изменяя ширину запретных зон и количество квантовых ям, можно регулировать как длину волны лазера, так и его мощность.

К одной из разновидностей класса MQWL относят лазеры с напряжёнными квантовыми ямами.

Базовая конструкция лазера с напряжёнными квантовыми ямами напоминает классическую схему ДГС-лазера, предложенную Алфёровым, которая состоит из нескольких тонких слоёв GaAs, зажатых между слоями AlGaAs (InGaAs). Использование специальных методов в процессе изготовления подобных гетероструктур позволяет создавать напряжение в тонком

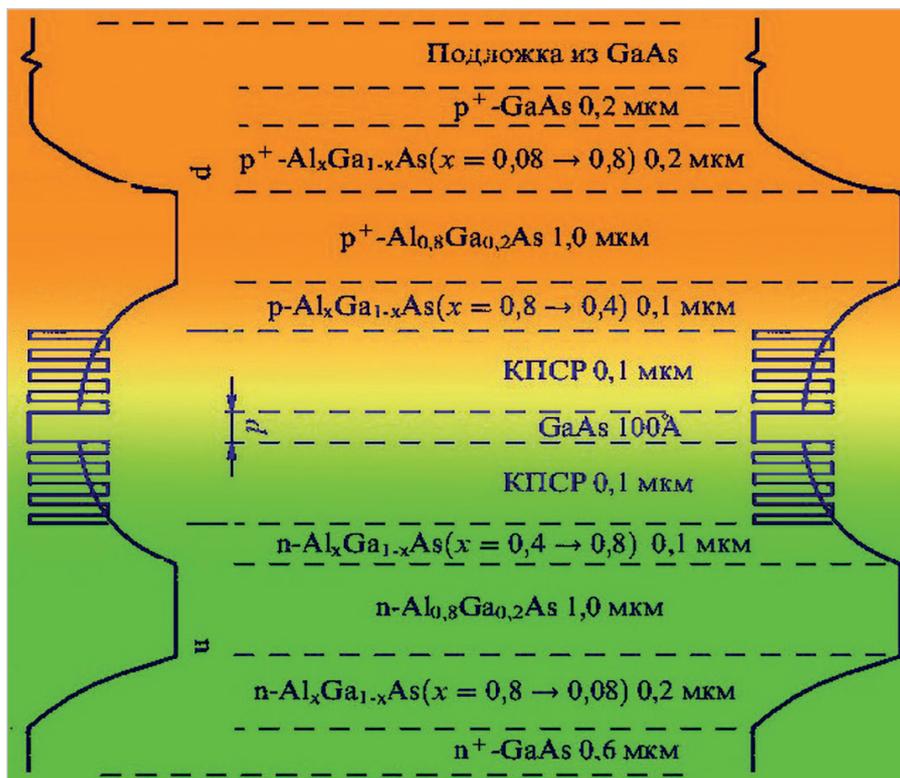


Рис. 6. Выращенная методом МЛЭ структура ДГС-лазера с напряжённой квантовой ямой, ограниченной короткопериодной сверхрешёткой

слое GaAs, приводящее к квантованию его энергетических уровней и образованию ряда определённых энергетических состояний в квантовой яме. Это даёт возможность изготавливать лазеры с заранее заданной длиной волны излучения и значительно увеличить эффективность лазерного излучения по сравнению с традиционными конструкциями лазеров.

Работы Жореса Алферова и его коллег внесли значительный вклад в развитие лазеров для волоконно-оптических систем связи. Конструкция лазера с распределённой обратной связью ДГС РО – лазер (Distributed Feedback Laser – DFB Laser) на длину волны 1,1 мкм описан в статье [14].

Инжекционный полупроводниковый лазер, обратная связь в котором создаётся за счёт отражения световых волн от периодической решётки, создаваемой в активной среде, был изготовлен на основе (In, Ga, Al)As с (InGa)As – напряжённой квантовой ямой.

На рис. 6 показана выращенная методом МЛЭ структура РО ДГС-лазера с напряжённой квантовой ямой, ограниченной короткопериодной сверхрешёткой (молекулярно-лучевая эпитаксия – МЛЭ; Molecular Beam Epitaxy – MBE).

На первом этапе создания гетероструктуры этого лазера формировал-

ся активный слой. На подложке GaAs, легированной цинком, выращивались следующие структуры: буферный слой GaAs толщиной 0,2 мкм, легированный бериллием; широкозонный эмиттер AlGaAs толщиной 1,5 мкм, легированный бериллием; корректирующий слой переменного состава AlGaAs толщиной 1000 ангстрем. После этого в процессе снижения температуры в потоке мышьяка выращивалась короткопериодная сверхрешётка (КПСР) с периодом 40 ангстрем.

В процессе создания активной области варьировалось соотношение толщины слоёв GaAs и AlGaAs с таким расчётом, чтобы получить параболическое изменение эффективной ширины запрещённой зоны короткопериодной сверхрешётки. Затем при снижении температуры напылялись слои GaAs (200 Å), InGaAs (50 Å), GaAs (200 Å).

После создания активной области температура снова повышалась, и в обратной последовательности в зеркальном порядке выращивались слои AlGaAs (рис 6). Верхний эмиттер и контактный слой GaAs (0,5 мкм) были легированы кремнием.

Пороговая плотность тока этого лазера при температуре 300К составила всего 900 А/см<sup>2</sup>.

Лазеры с напряжённой квантовой решёткой имеют очень низкую поро-

говую плотность тока и значительно меньшую ширину линии, чем обычные ДГС-лазеры. Поэтому современные модификации таких лазеров нашли широкое применение в системах оптической связи.

Следующий этап развития гетеролазеров был связан с квантовыми нитями.

## Полупроводниковые гетероструктуры и лазеры на основе квантовых трубок и нанопроволок

Общее англоязычное название «Quantum Wire – QWR» объединяет КРЭ-наноструктуры с индексом степени свободы «1 DOF», в которых носители заряда могут перемещаться только в одном направлении.

К данному классу относятся несколько типов, среди которых можно отметить такие известные в настоящее время структуры, как: скрученные из листов графена «углеродные нанотрубки» (Carbon Nanotubes); нитевидные кристаллические структуры с диаметром несколько нанометров – «нанопроволока» (Quantum Wire); «кристаллическое нановолокно» из отдельных элементов нанопроволоки, сплетённых между собой (Nanowhisker); нанесённые на подложку металлические полосы (Ni, Au и др.) шириной 1–5 нм и атомарной толщиной; протяжённые полупроводниковые структуры с нанометровым сечением; нитевидные органические молекулы.

Энергетический спектр Quantum Wire (QWR) представляет собой совокупность одномерных подзон размерного квантования. На графиках зависимости плотности состояний от энергии для квантовой проволоки возникают области сингулярности при каждом приближении сверху к уровню энергии очередного квантового уровня (рис. 1).

Несмотря на то что перенос заряда в квантовых проволоках (QWR) основан на тех же принципах, которые были описаны выше для квантовых ям, их свойства существенно различны, например, в плане взаимодействия между электронами и дырками.

Для квантовой нити (QWR) энергия электрона также квантуется и принимает значения, кратные его эффективной массе:  $E = E_i + (P_x)^2/2m_e$ . При этом каждому дискретному уровню  $E_i$  соответствует определённый набор конкретных состояний, отличающихся импульсом  $P_x$  в направлении только

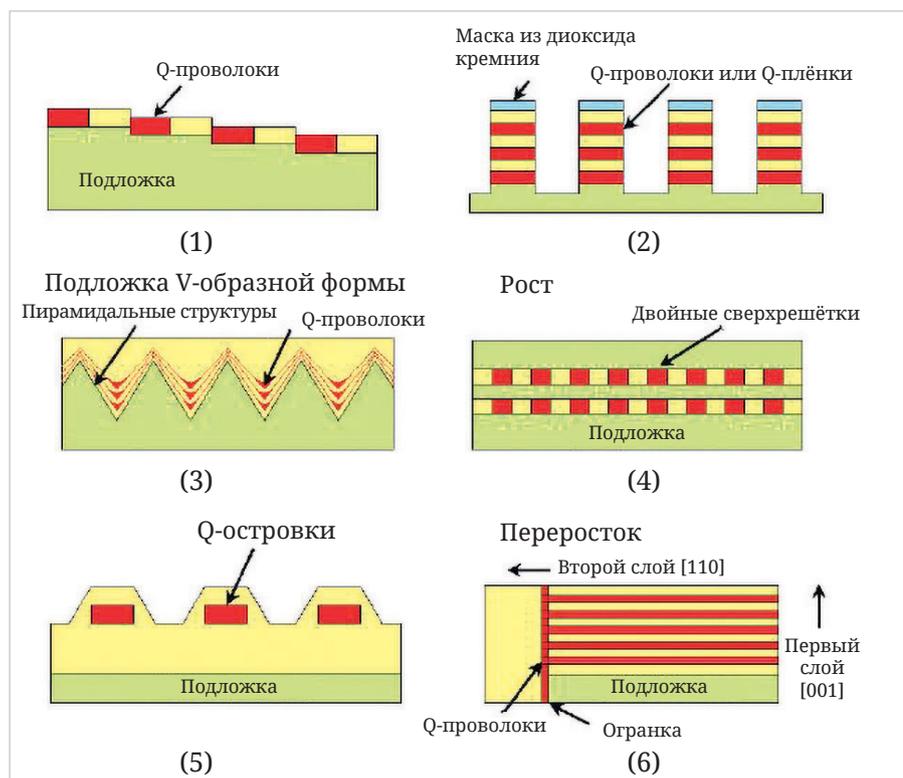


Рис. 7. Наиболее популярные в 1990-х методы изготовления гетероструктур на основе Q-wire показаны на рис. 6: 1) чередующиеся послойные сверхрешётки; 2) литография и травление; 3) селективный рост на V-образных подложках; 4) рост бинарных сверхрешёток; 5) самоорганизация; 6) наращивание на сколотых краях

нити оси X. Для квантовой ямы энергетические уровни электрона зависели от суммы двух импульсов ( $P_x + P_y$ ), направленных по осям X и Y. Дополнительный член в этом выражении коренным образом изменяет процесс переноса носителей заряда, что обуславливает значительные различия в основных свойствах квантовых проволок и плёнок.

Особый интерес представляет случай коротких квантовых нитей, длина которых меньше свободного пробега электронов. При последовательном соединении таких нитей электрон, вылетевший из одной такой нити, попадает в другую без столкновений.

Подробно механизмы переноса зарядов в квантовых нитях рассмотрены в работе [15].

Теоретические возможности улучшения свойств лазеров при использовании гетероструктур QWR исследовались многими научными группами ещё в начале 1990-х [16].

Благодаря более резкому спектру усиления, поляризационной анизотропии и расширенным параметрам генерации гетерогенные структуры на основе квантовых проволок (QWR) должны были стать следующим этапом развития транзисторных мини-

атюрных лазеров с малыми пороговыми токами. Однако практическая реализация таких лазеров затянулась на многие годы.

Считается, что первые образцы квантовой проволоки на основе GaAs с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии были изготовлены в 1982 году американскими физиками из Bell Laboratories [17].

Сечение полученной в результате квантовой проволоки, составлявшее  $200 \times 200 \text{ \AA}$ , а также неоднородности поверхности не позволяли в полной мере получить преимущества, предсказанные теорией для идеального варианта квантовой проволоки [18].

Прежде всего, это было связано с тем, что технологии изготовления квантовых проволок для лазеров оказались намного сложнее, чем технологии изготовления квантовых плёнок для QW-лазеров.

Общепризнанными заслугами группы Алфёрова в этот период считаются работы в области эпитаксиального роста соединений групп III-V и II-VI [19–21].

В эти годы во многих лабораториях мира продолжались интенсивные разработки технологий изготовления гетероструктур для лазеров на основе квантовых проволок.

Например, в работе [22] были проанализированы основные технологии, используемые в 1990-х гг. для производства гетерогенных структур на базе квантовых проволок. Наиболее популярные в 1990-х методы изготовления гетероструктур на основе Q-wire показаны на рис. 7.

Чередующиеся послойные сверхрешётки (Titled Superlattices – TSL) (рис. 7-1) представляют собой структуру, в которой два разных материала выращиваются до определённой толщины в чередующихся слоях. В основном используются для создания деформации в эпитаксиальном слое, расположенном сверху сверхрешётки [23].

Структура, полученная с помощью хорошо известного метода «литографии и травления» (Lithography and Etching – LE), показана на рис. 7-2. Этот метод обычно имеет два базовых варианта: с использованием электронно-лучевой литографии (EBL) или с последующим сухим травлением и повторным медленным ростом, сводящим к минимуму возможные повреждения.

Селективный рост на V-образных подложках (Selective Growth on V-shaped Sub – SGVS) (рис. 7-3) реализуется в классическом варианте следующим образом. Сначала на стандартной кремниевой подложке формируются V-образные канавки с помощью сухого травления с последующим влажным травлением.

В результате на подложке из Si получают канавки с шагом и глубиной около десятков нанометров. Затем методом химического осаждения металлоорганических соединений из паровой фазы (MOCVD) в первую очередь напыляется тонкая плёнка будущей квантовой проволоки (GaAs) толщиной в несколько нанометров. После чего поверх этой плёнки создаётся слой, заполняющий канавки из второго компонента гетероструктуры, например GaSb. Таким образом, с помощью вертикальных пикообразных микрокристаллов GaSb шириной около 50 нм нарезаются на кремниевой подложке не контактирующие между собой V-образные квантовые проволоки (V-Grooved Quantum Wire) [24].

Одним из наиболее интересных моментов в этом направлении, на который следует обратить внимание, была новая модернизированная тех-

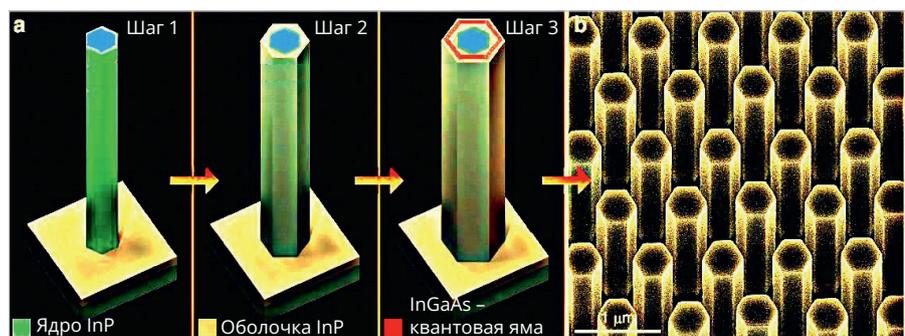


Рис. 8. Гетероструктура лазера с вертикальной генерацией на основе упорядоченного массива квантовых проволок InGaAs/InP, выращенных на одной подложке

нология эпитаксиального роста упорядоченных массивов КРЭ-структур на фасетированных поверхностях, досконально описанная в докторской диссертации Николая Леденцова [25].

Периодически фасетированные поверхности (ПФП) в теории квантовых точек представляют собой тип кристаллической поверхности, на которой возникают упорядоченные структуры, состоящие из микроскопических «фасок». Эти структуры образуются в результате спонтанного процесса, возникающего, когда плоская поверхность кристалла с высокой удельной поверхностной энергией трансформируется в более стабильную конфигурацию с меньшей общей свободной энергией.

При осаждении молекул целевого вещества на фасетированную подложку рост может происходить в самих «канавках» или на окаймляющих их гребнях, что определяет геометрию и распределение формирующихся КРЭ-нанокристаллов.

Структуры, полученные в результате роста бинарных сверхрешёток (Binary Superlattices Growth), соответствуют рис. 7-4. Процесс начинается с синтеза суперкристаллов, которые затем карбонизируются для формирования пористых структур. Эти каркасы затем пропитываются желаемыми прекурсорами с помощью влажной пропитки с последующим гидролизом и термическим отжигом, создавая таким образом взаимосвязанные сверхрешётки [26].

Квантовые проволоки, полученные с помощью технологии «самоорганизации» (Self-Organization SO), схематически показаны на рис. 7-5.

Вопросы теории и практического применения самоорганизующихся систем на основе квантовых проволок подробно рассмотрены в работе Николая Леденцова [27].

Спонтанное упорядочение наноструктур, возникающее в процессе включения полупроводников с узкой запретной зоной в матрицу полупроводника с широкой зоной, создаёт слой с локализирующим потенциалом для носителей тока. Периодические структуры таких включений образуют сверхрешётки, состоящие из квантовых проволок или точек. Упорядоченные наноструктуры могут возникать в замкнутых системах, например, при отжиге образцов. С другой стороны, спонтанные упорядоченные наноструктуры образуются в открытых системах в процессе роста кристаллов.

Структура, полученная методом CEO (Cleaved Edge Overgrowth), схематически показана на рис. 7-6. Метод CEO заключается в том, что с помощью специального оборудования гравировались грани кристалла, параллельные атомным решёткам в соответствии со строго определёнными кристаллографическими индексами Миллера. Затем на этих поверхностях, используемых как подложка, наращиваются слои необходимого полупроводника. Процесс может повторяться многократно, что позволяет создавать послойные сложные структуры КРЭ-нанокристаллов, например, на основе структур A3B5 (GaAs/AlGaAs) с использованием в основном методов молекулярно-лучевой эпитаксии.

Сотрудники лаборатории Алфёрова доказали, что в процессе роста InAs на гранях (100) кристалла GaAs формирование нескольких квантовых проволок высотой в один монослой вдоль направления (001) происходит сразу после осаждения первого монослоя InAs на сингулярную поверхность. Характерный период равен примерно 30 нм. Увеличение средней толщины InAs до 1,5 ML приводит к менее выраженной гофрировке поверхности, а характерный период увеличивается

до 50–60 нм. Проволочные структуры на вицинальных поверхностях возникают независимо от средней толщины InAs (в области от 1 до 1,5 ML) [27].

Метод CEO оказался очень эффективным с точки зрения получения высококачественных КРА-гетероструктур с параметрами, которые можно контролировать, используя в качестве подложки необходимые грани нанокристаллов, соответствующие определённому индексу Миллера [28]. Модернизированные варианты этого метода используются также в настоящее время.

В одной из последних работ, опубликованных в 2024 году, рассмотрена конструкция лазера с вертикальной генерацией на основе упорядоченного массива квантовых проволок на базе InGaAs/InP, выращенных на одной подложке методом селективной эпитаксии (рис. 8) [29].

Размер массива QWR составил 200×200 мкм. Стимулированное излучение такого лазера в диапазоне 940 нм было получено при пороге генерации около 28 мкДж/см<sup>2</sup> при температуре 128К. Результаты этой и других подобных работ показывают, что большие массивы квантовых гетеропроволок с несколькими длинами волн можно одновременно размещать на одной подложке.

В настоящее время благодаря вертикальной схеме излучения, низким пороговым токам, миниатюрным размерам и перестраиваемому диапазону лазеры с гетерогенными структурами на базе квантовых проволок рассматриваются как одно из наиболее перспективных устройств, предназначенных для оптической и квантовой связи следующего поколения.

За эти годы были разработаны новые технологии и методы, позволившие заметно улучшить параметры лазеров на квантовых проволоках. Так, в последнее время всё больше используются комбинированные варианты, включающие, например, выращивание квантовых проволок на подложках методом импульсного лазерного осаждения с последующей естественной самоорганизацией [30].

В следующем разделе будут рассмотрены гетерогенные лазеры на основе квантовых точек, разработанные Жоресом Алфёровым.

## Литература

1. Dupuis R.D., Dapkus P.D., Holonyak Nick, Jr., Rezek E.A., Chin R. Room-

- temperature laser operation of quantum-well Ga(1-x)AlxAs-GaAs laser diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Appl. Phys. Lett.* 32, 295–297 (1978). URL: <https://doi.org/10.1063/1.90026>.
2. *Леденцов Н.Н.* Люминесценция слоёв арсенида галлия, арсенида галлия алюминия и гетероструктур с квантовыми ямами на их основе, полученных молекулярно-пучковой эпитаксией: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10. Науч. рук. Алферов Ж.И. Л., 1986. Шифр хранения OD 61 87-1/2493. URL: <https://bit.ly/4fXEZAM>.
  3. *Nano Lett.* 2020 Jun 1;20(7):5201–5206. PMC. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7349564/>.
  4. Heavy Holes. *Semiconductor Physics*. URL: <https://fiveable.me/key-terms/physics-models-semiconductor-devices/heavy-holes>.
  5. *Vignesh Devaki Murugesan.* A New Approach to 3-D Imaging. URL: <https://www.researchgate.net/publication/329191511>.
  6. *Alferov Zh.I.* The history and future of semiconductor heterostructures from the point of view of a Russian scientist. *Physica Scripta*, Volume 1996, Number T68. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/1996/T68/005>.
  7. *Алфёров Ж.И.* История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. 1998. Вып. 1. С. 3. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/34218>.
  8. *Tsang W.T.* Extremely low threshold (AlGa)As graded-index waveguide separate-confinement heterostructure lasers grown by molecular beam epitaxy, *Appl. Phys. Lett.* 40, 217–219 (1982). URL: <https://doi.org/10.1063/1.93046>.
  9. *Алфёров Ж.И., Винокуров Д.А., Капитонов В.А. и др.* Самоорганизующиеся наноразмерные кластеры InP в матрице InGaP/GaAs и InAs в матрице InGaAs/InP // ФТП. URL: <https://j.ioffe.ru/articles/viewPDF/35807>.
  10. *Казаринов Р.Ф., Сурис Р.А.* О возможности усиления электромагнитных волн в полупроводниках со сверхрешёткой // ФТП. 1971. Т. 5. Вып. 4. С. 797. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/catalog>.
  11. *Алфёров Ж.И., Агафонов В.Г., Гарбузов Д.З. и др.* Многопроходные структуры II. Внешний квантовый выход излучения // ФТП. 1976. Т. 10. Вып. 8. С. 1497–1506. URL: <https://journals.ioffe.ru/>.
  12. *Бекирев У., Бабенко С. и др.* Лазер на основе многопереходной тонкоплёночной структуры. URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/4753>.
  13. *Zhi-Yong Tan et al.* Research progress in terahertz quantum-cascade lasers and quantum-well photodetectors *Chin. Phys. B* Vol. 29, No. 8 (2020) 084212. URL: <https://m.researching.cn/articles/OJ40de681ba7126b1d/figureandtable>.
  14. *Алфёров Ж.И., Иванов С.В., Копьев П.С. и др.* Лазеры на длинну волны 1,1 мкм // ФТП. 1990. Т. 24. Вып. 2. URL: <https://j.ioffe.ru/articles/viewPDF/22847>.
  15. *Harrison P.* Quantum Wells, Wires and Dots: Simple models of quantum wires and dots. URL: [https://www.researchgate.net/publication/315794145\\_Simple\\_models\\_of\\_quantum\\_wires\\_and\\_dots](https://www.researchgate.net/publication/315794145_Simple_models_of_quantum_wires_and_dots).
  16. *Arakawa Y. and Sakaki H.* Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, no. 11, pp. 939–941, Jun. 1982. URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/40/11/939/1023075/Multidimensional-quantum-well-laser-and?redirectedFrom=fulltext>.
  17. *Petroff P.M., Gossard A.C., Logan R.A. and Wiegmann W.* Toward quantum well wires: Fabrication and optical properties, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 41, no. 7, pp. 635–638, Oct. 1982. URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/41/7/635/48035/Toward-quantum-well-wires-Fabrication-and-optical?redirectedFrom=fulltext>.
  18. *Екимов А.И., Онущенко А.А.* Квантовый размерный эффект в трёхмерных микрокристаллах полупроводников // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 34. Вып. 6. С. 363–366. URL: [http://www.jetpletters.ru/ps/1030/article\\_15644.pdf](http://www.jetpletters.ru/ps/1030/article_15644.pdf).
  19. *Alferov Zh.I., Ledentsov N.N. Grundmann M. et al.* Proc. 7th Int'l. Conf. Modulated Semicond. Struct., Madrid, Spain, July, 10–14, 1995 [*Solid-State Electron.* 40, 785 (1996)]. URL: [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(95\)00364-9](https://doi.org/10.1016/0038-1101(95)00364-9).
  20. *Alferov Zh.I., Ledentsov N.N.* Formation of coherent superdots using metal-organic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, volume 69, issue 8, pages 1095–1097. 1996. URL: <https://colab.ws/articles/10.1063%2F1.117069>.
  21. *Ledentsov N.N. et al.* Epitaxy of Nanostructures Springer, Series on Nanoscience and Technology Berlin, 2003. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-07066-6\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-07066-6_1).
  22. *Shigehisa Arai, Takeo Maruyama.* GaInAsP/InP quantum wire lasers, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/224502836>.
  23. *Layer Superlattice, Superlattice to Nanoelectronics (Second Edition)*, 2011. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/layer-superlattice>.
  24. *Qiang Li, Billy Lai, Kei May Lau.* Epitaxial growth of GaSb on V-grooved Si (001) substrates with an ultrathin GaAs stress relaxing layer. *Applied Physics Letters* 111, 172103; October 2017. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5000100>.
  25. *Леденцов Н.Н.* Гетероструктуры с размерным квантованием в одном, двух и трёх измерениях: дис. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.10. Л., 1993. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01000017725?page=1&rotate=0&theme=white>.
  26. *Yucong Jiao et al.* Fabrication of three-dimensionally interconnected nanoparticle superlattices and their lithium-ion storage properties. *NATURE COMMUNICATIONS*, 2015. 6:6420. URL: <https://www.nature.com/articles/ncomms7420>.
  27. *Ledentsov N.N. et al.* Theory of quantum-wire formation on corrugated surfaces. *Physical Review B*, volume 51, issue 24, pages 17767–17779 1995. URL: <https://colab.ws/articles/10.1103%2Fphysrevb.51.17767>.
  28. *Ledentsov N.N.* Self Organized Quantum Wires and Dots: NEW OPPORTUNITIES FOR DEVICE APPLICATIONS. *Prog. Crystal Growth and Charset*. Vol. 35, Nos. 2–4. Pp. 289–305, 1997. URL: <https://colab.ws/articles/10.1016%2F0960-8974%2897%2900033-8>.
  29. *Zhang X. et al.* Telecom-band multiwavelength vertical emitting quantum well nanowire laser arrays. *Light: Science & Applications*, 2024. URL: <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01570-7>.
  30. *Tomoya Asaba et al.* Growth of self-integrated atomic quantum wires and junctions of a Mott semiconductor. *Sci. Adv.* 9, eabq5561 (2023). URL: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.abq5561>.