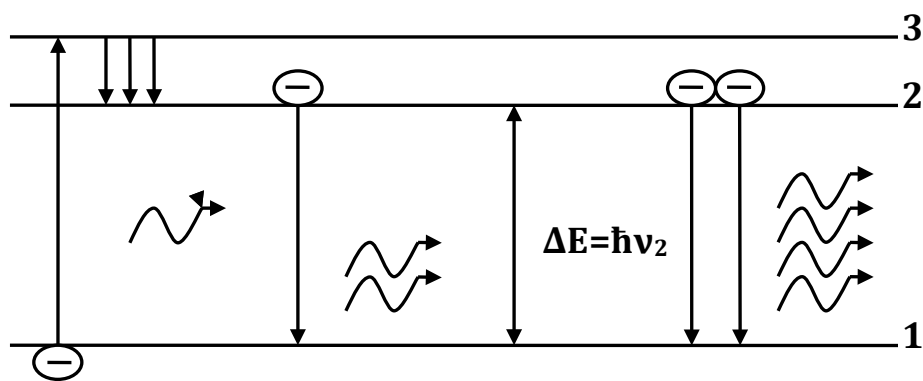


В.В. Левичев

**ЭЛЕКТРОННЫЕ И ФОТОННЫЕ УСТРОЙСТВА:
ПРИНЦИП РАБОТЫ,
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.В. Левичев

**ЭЛЕКТРОННЫЕ И ФОТОННЫЕ
УСТРОЙСТВА:
ПРИНЦИП РАБОТЫ,
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**
Учебное пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2015

В.В. Левичев, Электронные и фотонные устройства: принцип работы, технологии изготовления. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.

Описание устройств и методов нанотехнологий, изложенные в данном пособии, позволят понять основные принципы использования квантомеханических явлений в приборостроении.

Пособие предназначено для магистров по направлению 12.04.01 «Приборы исследования и модификации материалов на микро- и наноразмерном уровне»

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета ТМиТ 11 ноября 2014 года протокол № 9



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2015

© Левичев В.В., 2015

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Методы выращивания чистых кристаллов.....	5
Метод Чохральского.....	5
Метод Степанова.....	5
Метод Бриджмена – Стокбаргера.....	6
Зонная плавка.....	7
Глава 2 Создание тонких пленок.....	8
Термическое вакуумное напыление.....	8
Магнетронное распыление.....	9
Ионно-лучевое распыление	10
Эпитаксия.....	11
Технологии на основе эффектов самоорганизации.....	20
Технология фокусированного ионного пучка.....	23
Глава 3 Электронные и фотонные устройства.....	24
Резонансный туннельный диод.....	24
Транзистор с высокой подвижностью электронов.....	26
Одноэлектроника.....	29
Лазеры.....	33
ПЗС матрица.....	43
Магнитные наноструктуры.....	44
Фотонные кристаллы.....	48
ДНК оригами.....	54
Литература.....	63

Введение

С тех пор как Макс Планк сформулировал первые основы квантовой теории прошло уже более ста лет. За это время наука и техника пережили несколько существенных научных этапов развития приборостроения, таких как электрификация производства, полупроводниковые технологии, компьютеризация производства, нанотехнологии. Все эти этапы характеризовались разработкой и выпуском приборов способных осуществить качественное изменение технологического прогресса в мире. Ученые, такие как Жорес Иванович Алферов, работающие над данной тематикой получили нобелевские премии по физике. И этот факт показывает, какой существенный вклад в развитие науки и общества внесла квантовая механика.

Развитие техники и технологий в современном мире происходит достаточно быстро. И то, что ещё совсем недавно было уникальным явлением, или прибором, созданным для решения узкоспециализированной научной или инженерной задачи, сегодня становится предметом массового производства и доступно каждому человеку. Мобильные телефоны, смартфоны, планшеты, дисплеи различного типа, фототехника уже давно стали привычным для нас окружением.

В данном учебном пособии описаны основные методы создания сверхчистых материалов необходимых для нужд наноэлектроники, методы создания наноразмерных материалов и структур. Разобраны принципы работы некоторых электронных и фотонных устройств. Конечно же, спектр возможностей современных нанотехнологий гораздо шире, чем перечисленные здесь методы. Например, в данном пособии не упомянуты широко использующиеся методы фотолитографии, электронной и зондовой литографии, порошковые технологии, технологии пластической нанодеформации, и прочие не менее интересные направления современной физической науки.

Многие из современных электронных приборов работают на эффектах квантовомеханической теории или наноэффектах. Поэтому раскрытие основных принципов функционирования и создания таких приборов или их ключевых элементов является основной целью данного пособия.

Глава 1. Методы выращивания чистых кристаллов

Метод Чохральского

Метод выращивания кристаллов путём вытягивания их вверх от свободной поверхности большого объёма расплава с инициацией начала кристаллизации путём приведения затравочного кристалла (или нескольких кристаллов) заданной структуры и кристаллографической ориентации в контакт со свободной поверхностью расплава.

Скорость вытягивания монокристалла из расплава должна быть равна скорости кристаллизации. Отставание скорости подъема может привести к поликристаллическому росту, опережение - к уменьшению диаметра образца (в предельных случаях - к разрыву). При изменении скорости вытягивания происходят изменения в диаметрах образца, что приводит к большим температурным напряжениям, особенно на границе раздела. Одновременно изменяется коэффициент распределения примеси, т.е. монокристалл становится «зональным» в отношении легирующей его примеси. К аналогичным результатам приводят колебания температур кристаллизации.

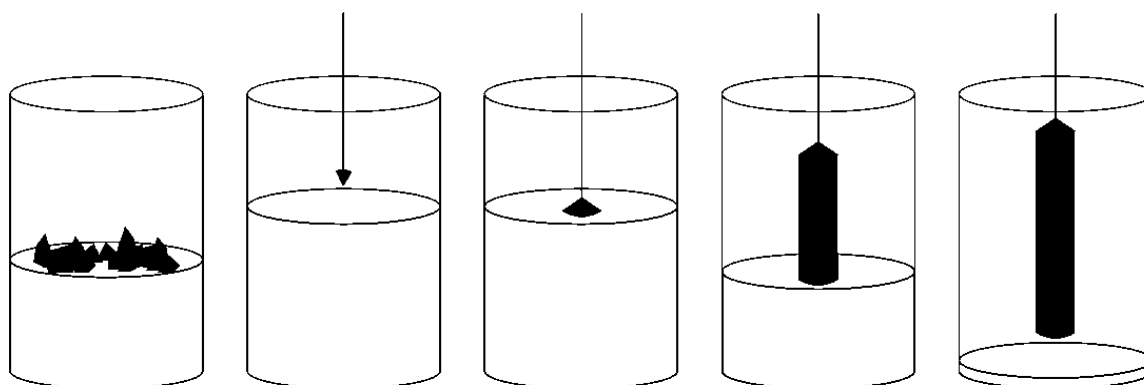


Рисунок 1 Этапы выращивания кристалла по методу Чохральского

Равномерность вытягивания монокристалла и стабильность температуры кристаллизации - важнейшие условия выращивания совершенных монокристаллов методом Чохральского. Желательная стабильность скорости вытягивания должна составлять $\pm 1\%$, допустимые колебания температур — не больше $\pm 0,5^\circ$.

Данный метод может использоваться для выращивания кристаллов элементов и химических соединений, устойчивых при температурах плавления-кристаллизации. Метод наиболее известен применительно к выращиванию монокристаллического кремния

Метод Степанова

Метод Степанова, отличается от методов Чохральского формообразующим устройством на поверхности расплава (рис.2).

Профилированные кристаллы производятся в специальной высокотемпературной камере заполненной инертным газом. В камеру помещают тигель, в котором расплавляется исходное вещество. Расплав, являющийся источником при росте кристалла, помещен в тигель с температурой близкой к температуре соответствующей температуре плавления кристаллизации.

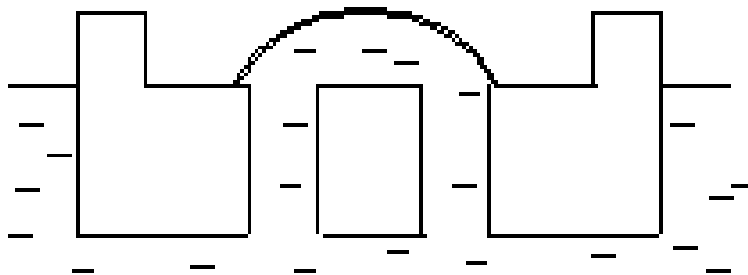


Рисунок 2 Выращивание кристалла по методу Степанова

В расплав помещается формообразователь с фильерами, образующими сечение растущего кристалла. Расплав за счет капиллярных сил смачивания поднимается в щели фильеры до ее края. При касании затравки расплава в щели фильеры, за счет теплоотвода по телу затравки в этой области температура понижается, и расплав начинает кристаллизоваться. Но при этом затравка поднимается со скоростью соответствующей скорости кристаллизации. В ходе этого процесса образуется профилированный кристалл. При таком способе можно широко варьировать разновидности профилей кристаллов в виде лент, стержней различного сечения и труб.

Метод Бриджмена - Стокбаргера

Метод Бриджмена - Стокбаргера, или метод направленной кристаллизации, заключается в том, что через печь, имеющую неравномерное распределение температуры по длине, протягивается ампула с материалом (возможна неподвижная ампула и движущаяся печь) (рис. 3).

Ампула имеет заостренный конец для исключения образования большого числа зародышей. Кристаллизация этим методом может осуществляться в двух режимах в контейнере: либо при перемещении контейнера с веществом через зону расплавления, либо при плавном снижении температуры в условиях постоянного градиента температурного поля. Эти режимы реализованы в двух вариантах: кристаллизации в вертикальном и горизонтальном направлениях. При вертикальном перемещении контейнера монокристаллы могут вырасти при спонтанном зарождении или на затравку.

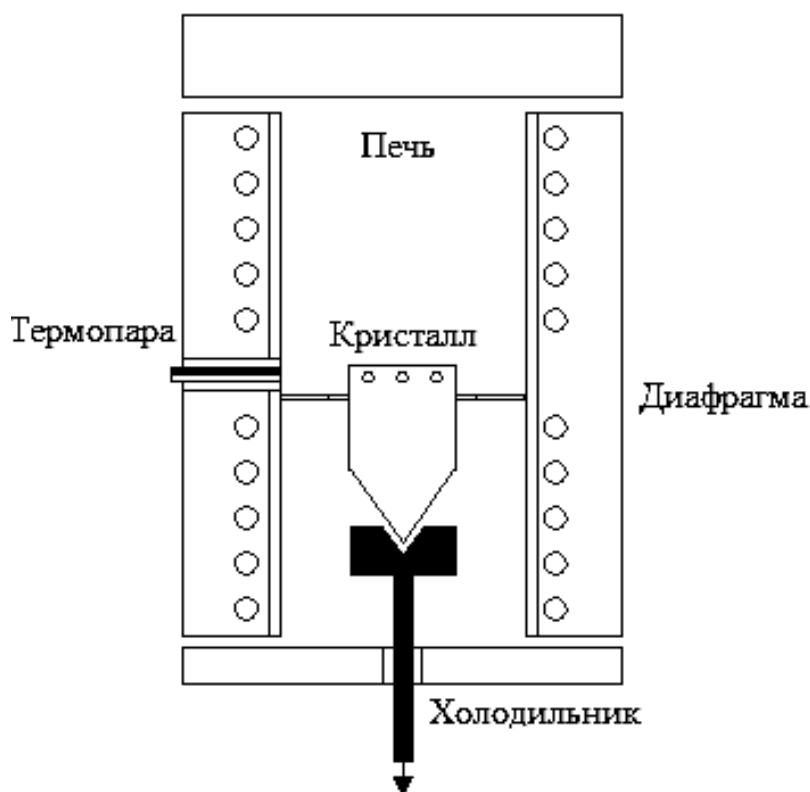


Рисунок 3 Схема установки для выращивания кристалла по методу Бриджмена - Стокбаргера

В случае спонтанного зарождения дну контейнера придают коническую форму. Тигель с расплавом перемещается в печи из высокотемпературной области в низкотемпературную. В результате этого на дне конусообразного тигля начинается кристаллизация, и благодаря геометрическому отбору вырастает один монокристалл, имеющий форму сосуда. Это не позволяет использовать метод Стокбаргера для кристаллизации веществ, расширяющихся при затвердении (Ge, Si и т. д.).

Зонная плавка

Метод очистки твёрдых веществ, основанный на различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазах. Метод является разновидностью направленной кристаллизации, от которой отличается тем, что в каждый момент времени расплавленной является некоторая небольшая часть образца (рис. 4).

Один конец образца расплавляется, затем расплавленная зона начинает двигаться вдоль слитка. Длина расплавленной зоны зависит от длины слитка и составляет несколько сантиметров. Вещество плавится либо индукционными токами, либо теплопередачей в печи сопротивления. Скорость движения составляет, как правило, от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в час.

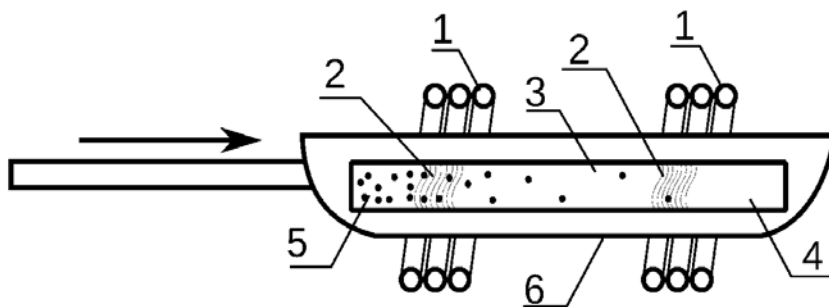


Рисунок 4 Схема установки зонной плавки кристаллов. 1 — индукционные катушки; 2 — расплавленные зоны; 3 — очищенный германий; 4 — сверхчистый германий; 5 — германий с повышенным содержанием примесей; 6 — графитовая лодочка

Движение может осуществляться либо за счет вытягивания лодочки через неподвижную печь, либо смещением зоны нагрева. Иногда для повышения эффективности увеличивают число проходов зоны или число зон. Таким образом, данные перемещения приводят к перераспределению примесей. Если примесь лучше растворяется в жидкой фазе, то она постепенно накапливается в расплавленной зоне, двигаясь вместе с ней. В результате примесь скапливается в одной части исходного образца.

Глава 2 Создание тонких пленок

Термическое вакуумное напыление

Получение тонких пленок является одной из основных задач технологии изготовления микросхем, а метод термического вакуумного напыления (ТВН) одним из самых распространенных даже до настоящего времени. Известен он еще с 1857 г. благодаря экспериментам Фарадея с взрывающимися проволочками и состоит из следующих основных этапов: нагреве в вакууме наносимого вещества до температуры испарения, транспортировке парогазового облака через вакуум от испарителя до подложки и конденсации пара на поверхности подложки.

Физически процесс испарения твердого тела связан с флуктуационным преодолением отдельными атомами или молекулами потенциального барьера на границе твердое тело-газ или твердое тело-вакуум. Для создания покрытия значительная часть частиц должна адсорбироваться на подложке или вследствие химической реакции образовать новое соединение. Поток испарившихся частиц в вакууме образуется в случае, когда давление пара испаряемого материала превышает давление остаточных газов в камере.

В настоящее время производственные установки термовакuumного напыления снабжены вращающимися устройствами подложкодержателями (дисками, барабанами), несущими несколько подложек (6, 8 или 12), как это показано на рис. 5, где 2 – подложки, расположенные на вогнутом

держателе 7; 3 – поток испаряемого вещества; 4 – испаритель; 6 – система поддержки подложкодержателей; 8 – ввод движения в вакуум; 9 – система вращения подложкодержателей центральная.

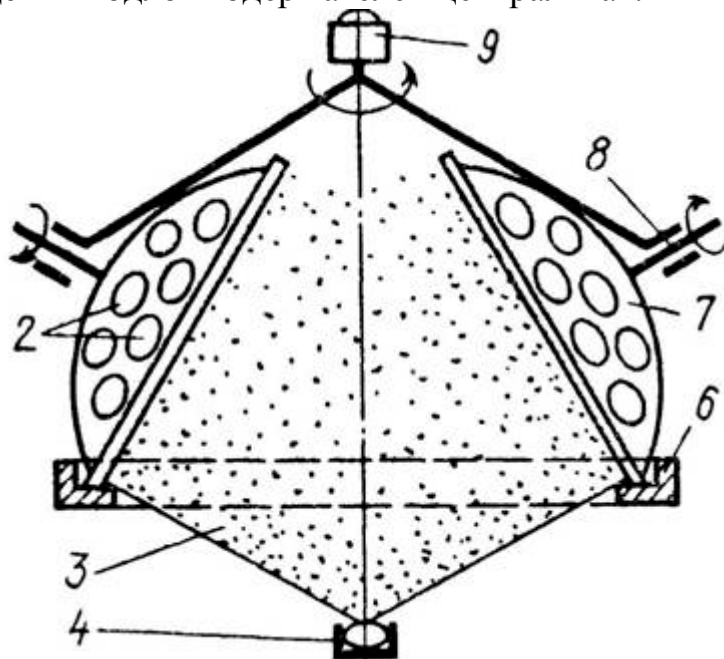


Рисунок 5 Планетарная система вращения подложек при вакуумном напылении

Подложки последовательно и многократно проходят над неподвижным испарителем, постепенно набирая необходимую толщину плёнки. В результате центральный "холм", который мог бы образоваться на неподвижной подложке, размывается в "хребет", вытянутый в направлении движения подложки. Для выравнивания толщины плёнки в поперечном направлении применяют корректирующую диафрагму, устанавливаемую между испарителем и подложкой в непосредственной близости от нее. Профиль диафрагмы рассчитывается на основании исследования рельефов плёнки, получаемых при напылении на неподвижную и движущуюся подложки. В результате различия времени облучения центральной и периферийной зон подложки равномерность толщины плёнки на всей площади групповой подложки повышается и находится в пределах $\pm 2\%$ для подложек диаметром 76 мм.

Магнетронное распыление

Технология нанесения тонких плёнок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда называется магнетронным распылением. Технологические устройства, предназначенные для реализации этой технологии, называются магнетронными распылительными системами или, сокращённо, магнетронами (рис. 6).

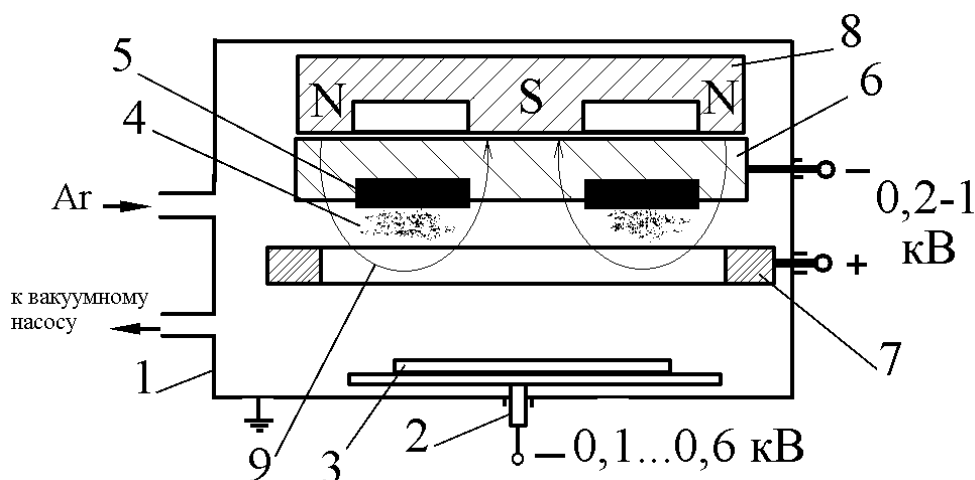


Рисунок 6 Схема магнетронного распыления: 1- вакуумная камера, 2- держатель подложки (в двухэлектродном методе также является анодом), 3- подложка, 4- зона концентрации плазмы тлеющего разряда, 5- распыляемый материал, 6- катод, 7- анод кольцевой или рамочной формы, 8- магнит, 9- силовые линии магнитного поля

При магнетронном распылении для повышения производительности процесса на область разряда накладывают магнитное поле, которое концентрирует плазму на мишени-катоде. Силовые линии магнитного поля направлены от одного полюса постоянного магнита к другому. Траектории движения электронов располагаются между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля. В этих местах и локализуется интенсивное образование плазмы и протекание процессов распыления. За счет такой локализации появляется возможность распыления не только металлических, но и диэлектрических и полупроводниковых материалов. Метод магнетронного распыления позволяет снизить нагрев подложки до 100-250 °С и обеспечить скорость осаждения до 1-2 мкм/мин.

Ионно-лучевое распыление

Представляет собой значительно усовершенствованный вариант методов катодного и магнетронного распыления. Главное отличие метода в том, что ионы инертного газа подаются к распыляемому материалу (мишени) из отдельно расположенного независимого ионного источника в виде концентрированного потока с энергией 1-10 кэВ (рис. 7).

Процесс ведут в вакууме $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Па. Поскольку образование ионного луча не связано с распыляемым материалом, то возможна реализация распыления как металлических, так и диэлектрических материалов (при использовании устройства, компенсирующего накопление положительного потенциала на поверхности мишени).

Распыляемый ионами материал мишени может также ионизироваться и дополнительно ускоряться при приложении к подложке дополнительного

потенциала смещения.

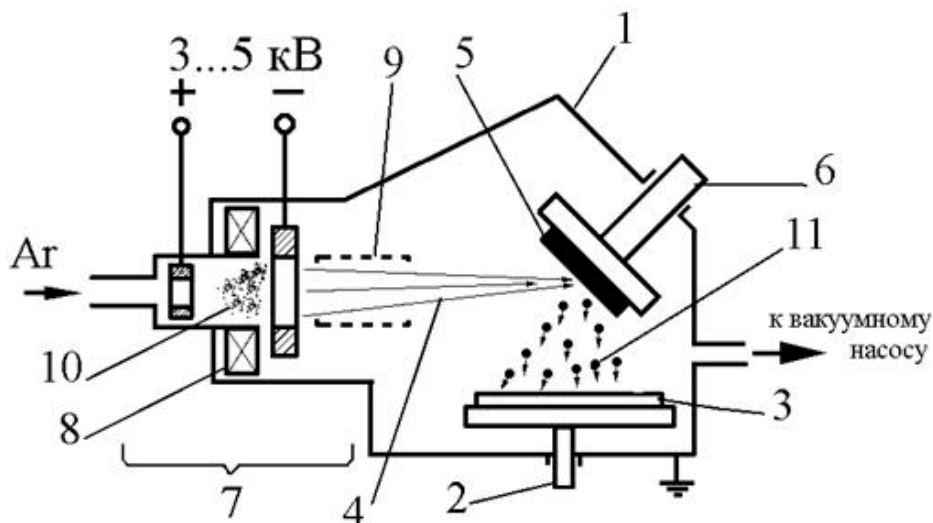


Рисунок 7 Схема ионно-лучевого распыления: 1- вакуумная камера, 2- держатель подложки, 3- подложка, 4- концентрированный поток ионов, 5- распыляемый материал, 6- держатель мишени, 7- ионно-лучевой источник, 8- магнитная система концентрации плазмы тлеющего разряда, 9- устройство фокусировки ионного луча, 10- зона концентрации плазмы тлеющего разряда, 11- поток частиц осаждающегося на подложку материала

Концентрация плазмы разряда внутри источника ионов позволяет избежать сильного разогрева материала подложки. Недостатком методом ионно-лучевого распыления является сложность точного соблюдения химического состава осаждаемого покрытия. Это связано с тем, что при столкновении ионов с поверхностью мишени, в ней протекает целый комплекс сложных процессов (в т. ч. преимущественное распыление, перемешивание, радиационно-стимулированные диффузия и сегрегация, адсорбция Гиббса), которые могут изменять химический состав верхнего слоя мишени и напыляемого материала. Метод ионно-лучевого распыления нашел применение, в частности, для получения многослойных слоистых структур для наноэлектроники с толщиной слоев 1-10 нм.

Эпитаксия

Эпитаксия - это закономерное нарастание одного кристаллического материала на другой, то есть ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки). Рост всех кристаллов можно назвать автоэпитаксиальным так как каждый последующий слой имеет ту же ориентировку, что и предыдущий.

Эпитаксия определяется условиями сопряжения кристаллических решёток нарастающего кристалла и подложки, причем, весьма существенное влияние оказывает их структурно-геометрическое соответствие. Легче всего сопрягаются вещества, кристаллизующиеся в

одинаковых или близких структурных типах, например, гранцентрированного куба (Ag) и решётки типа NaCl, но эпитаксиальный рост можно получить и для различающихся структур.

При описании механизма нарастания указываются плоскости срастания кристаллических решеток и направления в них. Эпитаксия особенно легко осуществляется, если разность параметров обеих решёток не превышает 10%. При больших расхождениях сопрягаются наиболее плотноупакованные плоскости и направления. При этом часть плоскостей одной из решёток не имеет продолжения в другой; края таких оборванных плоскостей образуют дислокации несоответствия, обычно образующие сетку. Плотность дислокаций в сетке тем больше, чем больше разность параметров сопрягающихся решёток. Меняя параметр одной из решёток (добавлением примеси), можно управлять количеством дислокаций в эпитаксиально нарастающем слое.

Эпитаксия происходит таким образом, чтобы суммарная энергия границы, состоящей из участков: подложка - кристалл, кристалл - маточная среда и подложка - среда, была минимальной. У веществ с близкими структурами и параметрами (например, Au на Ag) образование границы сопряжения энергетически невыгодно и нарастающий слой повторяет в точности структуру подложки (псевдоморфизм). С ростом толщины упруго напряжённой псевдоморфной плёнки запасённая в ней энергия растёт, и при толщинах более критической (для Au на Ag это 60 нм) нарастает плёнка с собственной структурой.

Помимо структурно-геометрического соответствия, сопряжение данной пары веществ при эпитаксии зависит от температуры процесса, степени пресыщения (переохлаждения) кристаллизующегося вещества в среде, от совершенства подложки, чистоты её поверхности и других условий кристаллизации. Для разных веществ и условий существует так называемая эпитаксиальная температура, ниже которой нарастает только неориентированная плёнка.

Процесс эпитаксии обычно начинается с возникновения на подложке отдельных кристалликов, которые срастаются (коалесцируют), образуя сплошную плёнку.

Разновидности эпитаксиальных методов

1) Молекулярно-пучковая эпитаксия

Технология молекулярно-пучковой эпитаксии была создана в конце 1960-х годов Дж. Р. Артуром (J. R. Arthur) и Альфредом Чо (Alfred Y. Cho). В основе метода лежит осаждение испаренного в молекулярном источнике вещества на кристаллическую подложку (рис. 8). Основные требования к установке эпитаксии следующие:

- В рабочей камере установки необходимо поддерживать сверхвысокий вакуум (около 10–8 Па).

- Чистота испаряемых материалов должна достигать 99,999999 %.
- Необходим молекулярный источник, способный испарять тугоплавкие вещества (такие как металлы) с возможностью регулировки плотности потока вещества.

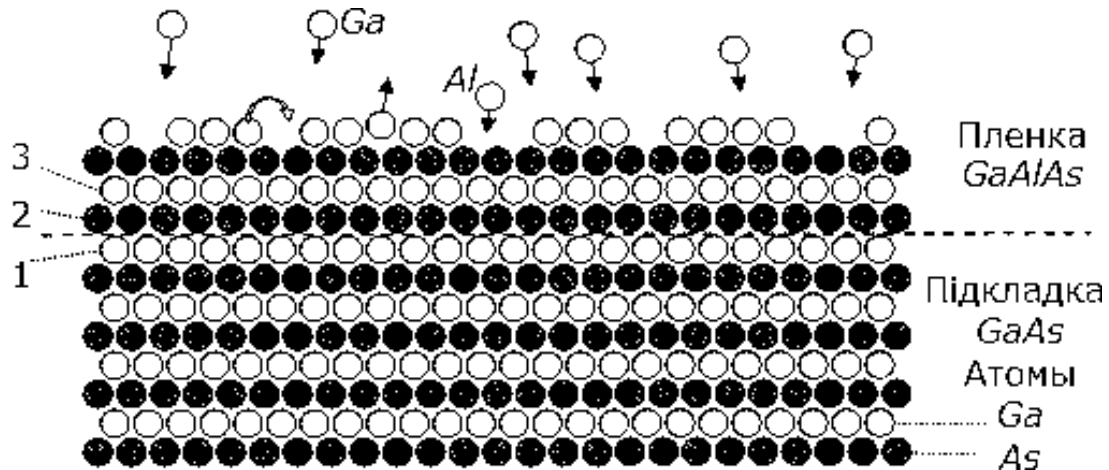


Рисунок 8 Иллюстрация эпитаксиального роста пленки GaAlAs на подложке из монокристаллического GaAs во время молекулярно-лучевой эпитаксии

Особенностью эпитаксии является невысокая скорость роста пленки (обычно менее 1000 нм в час).

Эпитаксиальный рост в условиях сверхвысокого вакуума. Позволяет выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования. Для процесса эпитаксии необходимы специальные хорошо очищенные подложки с атомарногладкой поверхностью.

Технологический комплекс для молекулярно лучевой эпитаксии (рис. 9) работает следующим образом: в высоковакуумной камере 1 находится нагреватель 2, на котором закреплены подложка 3 и маска (трафарет) 4.

Молекулярные (атомные) пучки от эффузионных ячеек 5 доставляют к подложке молекулы (атомы) веществ, из которых формируется заданная тонкая пленка. Геометрические размеры отверстия и установленной перед ним диафрагмы подбирают так, чтобы испарение из ячейки происходило лишь в пределах определенного пространственного угла, под которым из места расположения ячейки видна рабочая зона подложки.

Поскольку молекулы (атомы), вылетевшие из эффузионной ячейки, попадают в условия высокого вакуума, то они летят к подложке без столкновений, вдоль прямых линий. Скорость истечения можно плавно регулировать, изменяя температуру соответствующей эффузионной ячейки. За этим следит электронный блок 6. Перед отверстием каждой эффузионной ячейки установлена электромеханическая заслонка 7. Открыванием и закрыванием заслонок руководит электронный блок 8.

Точное программное регулирование температуры подложки осуществляет электронный блок 9. Установкой и заменой масок (трафаретов) управляет электронный блок 10.

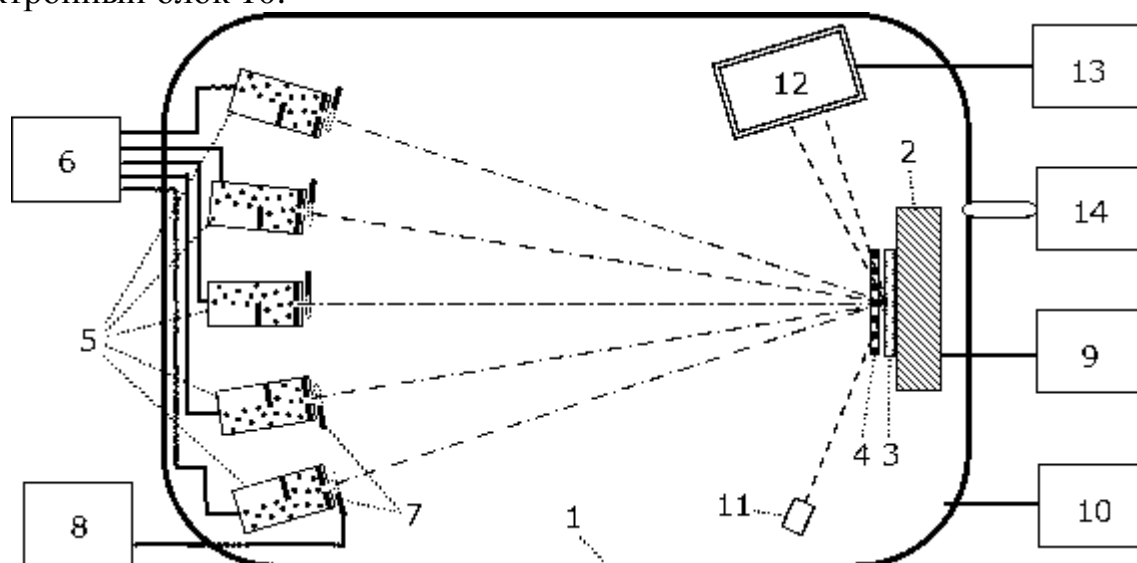


Рисунок 9 Блок-схема технологического комплекса для молекулярно-лучевой эпитаксии

Для слежения за технологическим процессом нанесения пленок в вакуумную камеру 1 встраивают разнообразные датчики. На рис. 9 в качестве примера показан датчик дифракции электронов, который состоит из электронной "пушки" 11 и матричного приемника 12. Электронный луч направляют на подложку под малым углом к ее поверхности. Дифракцию обратно рассеянных под разными углами электронов наблюдают с помощью устройства 13. Положение и интенсивность дифракционных максимумов дают информацию о толщине и о кристаллографических характеристиках наращиваемой тонкой пленки.

В высоковакуумную камеру с целью научных исследований можно встроить также устройства для Оже-спектрометрии, вторично-ионной масс-спектрометрии, для анализа рентгеновского и ультрафиолетового излучения, возбуждаемого в наращиваемой пленке и в подложке, и т.п. (блок 14 на рис. 9).

2) Газофазная эпитаксия

Получение эпитаксиальных слоев полупроводников путём осаждения из паро-газовой фазы. Наиболее часто применяется в технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Процесс проводится при атмосферном или пониженном давлении в специальных реакторах вертикального или горизонтального типа (рис. 10). Реакция идёт на поверхности подложек (полупроводниковых пластин), нагретых до 750 - 1200 °С (в зависимости от способа осаждения, скорости процесса и давления в реакторе). Понижение температуры процесса ниже

предельной для данных конкретных условий осаждения ведет к формированию поликристаллического слоя.

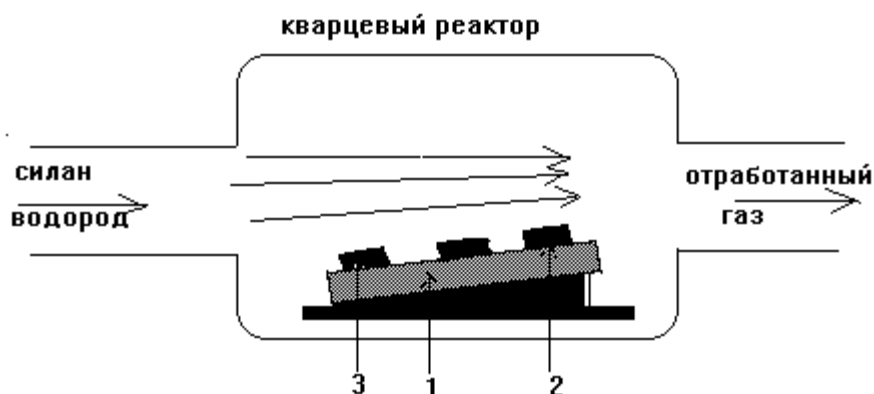


Рисунок 10 Схема реактора для эпитаксии из парогазовой смеси

Существуют два основных способа получения эпитаксиальных слоев кремния методом газофазной эпитаксии:

1. водородное восстановление тетрахлорида кремния (SiCl_4), трихлорсилана (SiHCl_3) или дихлорсилана (SiH_2Cl_2);
2. пиролитическое разложение моносилана

Разложение кремнесодержащих компонент происходит пиролитически, то есть только за счет тепла. Скорость роста пленки пропорциональна парциальному давлению силана. Все вещества, поступающие в реактор являются газами, отсюда и название "химическое осаждение из газовой фазы".

3) Химическое осаждение из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений

Метод заключается в пиролизе смеси металлоорганических соединений и гидридов в атмосфере водорода при температурах 600-800 °С. Данная реакция проводится в проточном охлаждаемом реакторе (горизонтального или вертикального типа) при атмосферном или пониженном давлении (рис. 11). Продукты реакции кристаллизуются на поверхности нагретой подложки. Реакция происходит в газовом потоке при атмосферном или пониженном давлении в реакторе с холодными стенками. Газом - носителем обычно является водород.

Отдельные стадии полной реакции имеют место уже в газовой фазе. Заключительные стадии и встраивание в решетку происходят на поверхности полупроводника. Типичные реакторы позволяют подключать несколько металлоорганических и гидридных источников, поэтому в едином ростовом цикле могут быть последовательно выращены чередующиеся слои разных материалов. Это дает возможность получать многослойные многокомпонентные эпитаксиальные структуры, в том числе сверхрешетки.

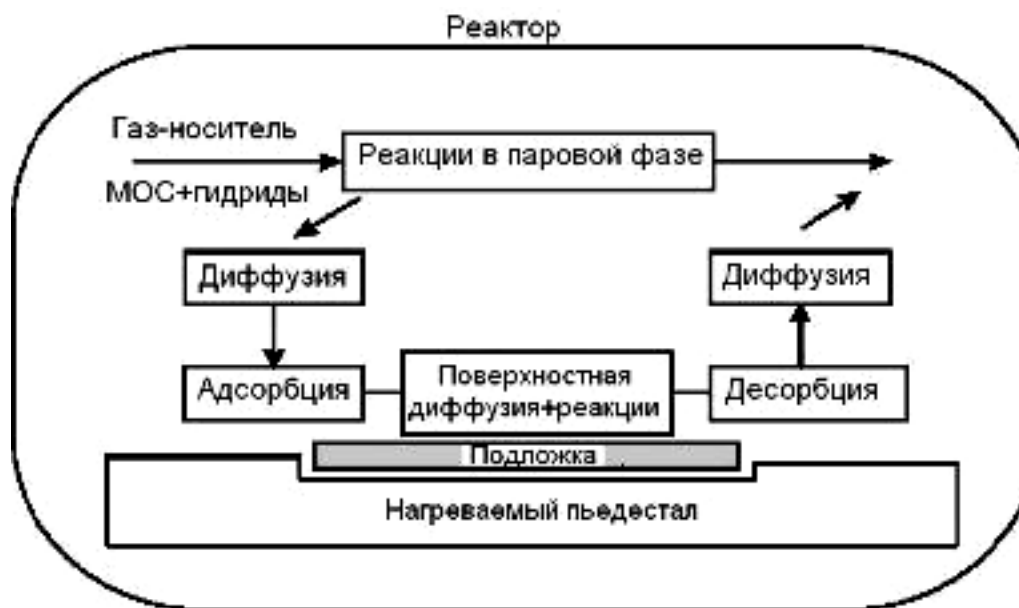


Рисунок 11 Схематическое описание процессов при МОС-гидридной эпитаксии

В технологическом процессе эпитаксии из металлоорганических соединений не участвуют травящие вещества, процесс роста при этом не является результатом конкуренции между осаждением и травлением, как в некоторых других методах эпитаксии из парогазовой фазы. Как следствие, обеспечиваются резкие границы между слоями, однородность растущих слоев по толщине и составу.

Например, арсенид галлия выращивают при использовании триметилгаллия $((\text{CH}_3)_3\text{Ga})$ и трифенилмышьяка $(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{As}$). Сам термин предложен основоположником метода Гарольдом Манасевитом в 1968 году. В отличие от молекулярно-лучевой эпитаксии рост осуществляется не в высоком вакууме, а из парогазовой смеси пониженного или атмосферного давления (от 2 до 101 кПа).

4) Эпитаксия из жидкой фазы

Эпитаксия из жидкой фазы в основном применяется для получения многослойных полупроводниковых соединений, таких как GaAs, CdSnP₂

Из вещества наращиваемого слоя готовится шихта, затем легирующая примесь (может быть подана и в виде газа) и металл-растворитель, имеющего низкую температуру плавления и хорошо растворяющий материал подложки (Ga, Sn, Pb). Процесс проводят в атмосфере азота и водорода (для восстановления оксидных плёнок на поверхности подложек и расплава) или в вакууме (предварительно восстановив оксидные плёнки). Расплав наносится на поверхность подложки, частично растворяя её и удаляя загрязнения и дефекты. После выдержки при максимальной температуре ≈ 1000 °С начинается медленное охлаждение. Расплав из

насыщенного состояния переходит в пересыщенное и избытки полупроводника осаждаются на подложку, играющую роль затравки. Существуют три типа контейнеров для проведения эпитаксии из жидкой фазы: вращающийся (качающийся), пенального типа, шибберного типа.

Следует отметить, что в современной полупроводниковой промышленности данный метод уже давно не используется, ввиду сложности контроля параметров получаемых пленок (толщина, однородность толщины, значение стехиометрического коэффициента), их относительно низкого качества, малой производительности метода.

Однако, для некоторых экзотических полупроводниковых соединений на данный момент является единственно возможной, и остается вопросом лабораторных исследований.

Механизмы Эпитаксии

Механизм роста Франка - Ван дер Мерве

Послойный рост по механизму Франка - Ван дер Мерве (рис. 12) относится к случаю, когда атомы пленки сильнее связаны с подложкой, чем друг с другом. В результате этого рост следующего слоя не начинается, пока не завершено формирование предыдущего, то есть имеет место строго двумерный рост. [1]

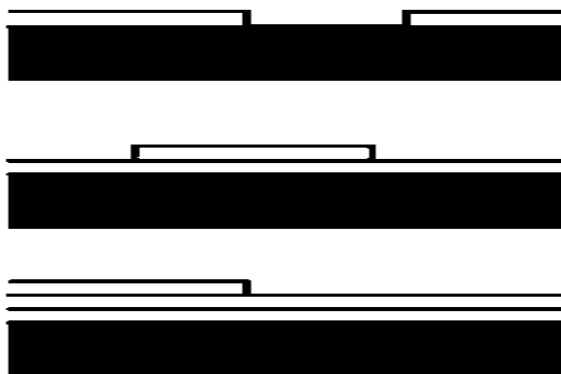


Рисунок 12 Механизм роста Франка — Ван дер Мерве

Послойный механизм роста реализуется при наличии на поверхности подложки ступеней, источником которых является, в частности, естественная шероховатость граней с большими индексами Миллера (рис. 13). Эти грани представляются в виде совокупности атомных ступеней, образованных участками плотно-упакованных плоскостей с малыми индексами Миллера. При низкой температуре, близкой к $T=0$ °К, фронт ступеней является атомно-гладким. Тепловые флуктуации, появляющиеся при конечных температурах, приводят к возникновению изломов в ступенях.

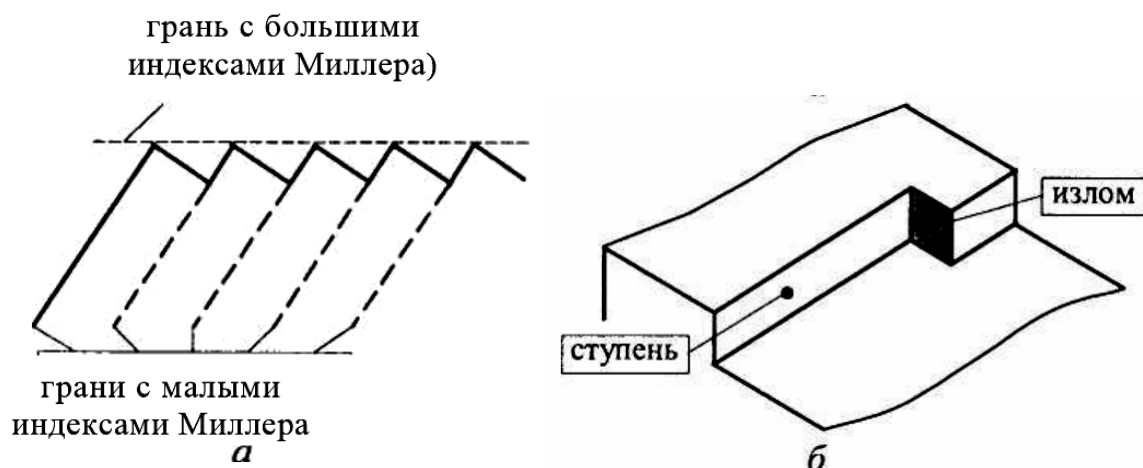


Рисунок 13 Совокупность моноатомных ступеней на грани кристалла с большими индексами Миллера (а) и излом моноатомной ступени (б)

При послойном механизме отсутствует необходимость в образовании зародышей, так что процесс роста пленки состоит из следующих последовательных стадий:

- 1) адсорбция частиц первичной фазы на поверхности подложки в виде атомов;
- 2) поверхностная диффузия адатомов к ступени с закреплением в ее углу;
- 3) движение атомов вдоль ступени с окончательным закреплением их в изломе.

Так как на гранях с большими индексами Миллера при любой температуре существуют ступени, то все они полностью не зарастают и процесс роста этих граней идет непрерывно при любых даже очень малых пересыщениях.

Такой механизм называется нормальным ростом, так как застраивание всей совокупности ступеней происходит по нормали к поверхности, в отличие от тангенциального движения ступени при послойном механизме роста.

Механизм роста Странского - Крастанова

Послойный-плюс-островковый рост по механизму Странского - Крастанова представляет собой промежуточный случай между послойным и островковым ростом (рис. 14). После завершения формирования двумерного слоя идет рост трехмерных островков. Природа и толщина двумерного слоя (часто называемого слоем Странского - Крастанова) зависят от конкретного случая. Например, этот слой может быть поверхностной реконструкцией с субмонослойным покрытием адсорбата или напряженной пленкой толщиной в несколько монослоев.

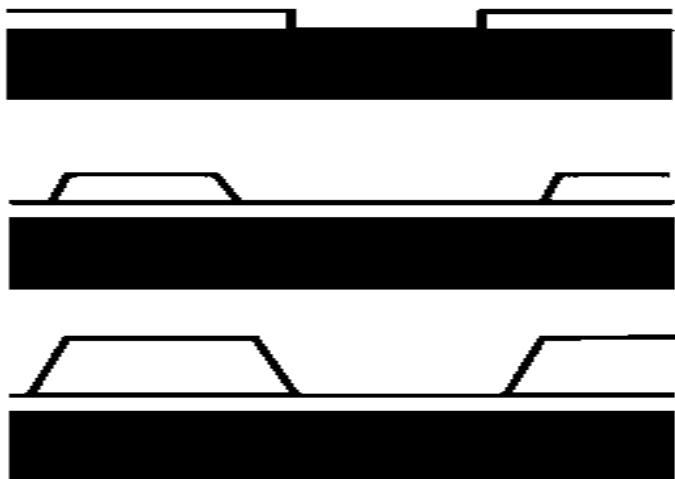


Рисунок 14 Механизм роста Странского — Крастанова

Условием реализации такого механизма является значительное (в несколько процентов) рассогласование постоянных решетки осаждаемого материала и материала подложки (например Ge и Si, InAs и GaAs). При этом в смачивающем слое возникают упругие напряжения - слой деформируется так, чтобы постоянная его решетки соответствовала постоянной решетки подложки. Если энергия деформации смачивающего слоя ниже поверхностной энергии, то ожидается дальнейший послойный рост пленки. Релаксация упругих напряжений в этом случае происходит в результате образования дислокаций несоответствия на границе раздела. Если же энергия деформации высока, то после образования смачивающего слоя, компенсация напряжений приводит к образованию трёхмерных островков (рис.14). Таким образом, движущей силой образования трехмерных островков является объемная упругая релаксация, то есть уменьшение упругой энергии при формировании островков по сравнению с упругой энергией однородно напряженной эпитаксиальной пленки.

Механизм роста Вольмера - Вебера

Островковый рост по механизму Вольмера - Вебера соответствует ситуации, когда атомы пленки сильнее связаны между собой, чем с подложкой. В этом случае трёхмерные островки зарождаются и растут прямо на поверхности подложки (рис. 15).

Зародышевый механизм роста Фольмера-Вебера реализуется на атомно-гладких плотноупакованных гранях совершенного кристалла, каковыми являются грани с малыми индексами Миллера. Рост пленок в этом случае происходит через начальное образование двухмерных или трехмерных зародышей, в дальнейшем разрастающихся в сплошную пленку на поверхности подложки.

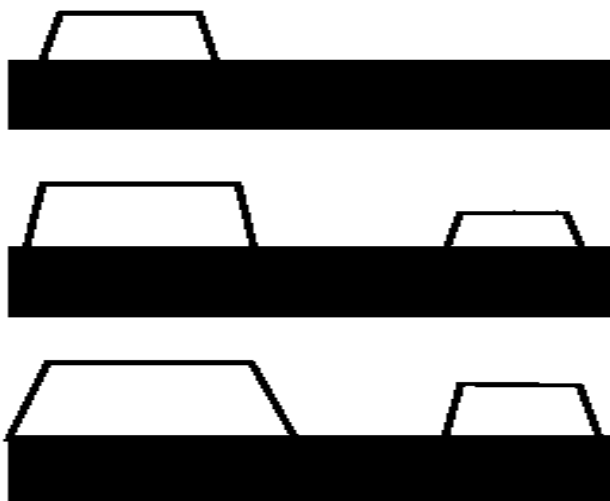


Рисунок 15 Механизм роста Вольмера - Вебера

Вероятность образования зародышей, а вместе с ней и скорость роста пленки, ничтожно малы вплоть до пересыщений, достигающих единиц и даже десятков процентов. В основе образования, разрастания и слияния (коалесценции) зародышей лежат следующие процессы:

а) массоперенос в первичной фазе (с помощью атомно-молекулярного пучка, диффузионного или конвективного потока), определяющий доставку вещества к поверхности подложки и растущего слоя;

б) адсорбция частиц первичной фазы на поверхности, определяющая процесс образования критических зародышей;

в) поверхностная диффузия адсорбированных атомов, определяющая доставку частиц к критическим зародышам с превращением их в центры кристаллизации.

Результирующая скорость роста пленки лимитируется наиболее медленным из этих трех процессов. Установление равновесия между физически адсорбированными атомами и первичной фазой обычно происходит достаточно быстро (в течение микросекунд). Поэтому в реальных условиях рост пленок контролируется либо процессами массопереноса в первичной фазе (при кристаллизации из жидкой фазы и химическом осаждении из газовой фазы), либо поверхностной диффузией (при физическом осаждении из атомно-молекулярных пучков).

Технологии на основе эффектов самоорганизации

Очень перспективными по сравнению с традиционными методами оказались методы прямого получения нанообъектов с использованием эффектов спонтанного образования наноструктур. Эти эффекты относятся к широкому классу фундаментальных явлений самоорганизации в конденсированных средах. Метод получения квантовых одно- и нульмерных структур опирается на рассмотренные ранее методы молекулярно-

лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.

В гетероэпитаксиальной системе при наличии рассогласования по постоянной решетки между осаждаемым материалом и подложкой на первых этапах рост может происходить послойно.

Однако более толстый слой осажденного материала имеет и большую упругую энергию. Тогда возникает тенденция уменьшить упругую энергию путем образования изолированных островков. В этих островках происходит релаксация упругих напряжений и соответствующее уменьшение упругой энергии.

В настоящее время известны следующие типы наноструктур, выращиваемых с использованием эффектов самоорганизации:

1) структуры на микроскопически упорядоченных фасетированных поверхностях;

2) упорядоченные массивы трехмерных когерентно напряженных островков в гетероэпитаксиальных рассогласованных системах;

3) периодические структуры плоских доменов (например, островков монослойной высоты);

4) структуры с периодической модуляцией состава в эпитаксиальных пленках твердых растворов полупроводников.

Достоинством способов получения этих наноструктур является то, что структуры появляются как бы сами собой, без применения специальных приемов технологии микроэлектроники и, в частности, без применения литографии.

Суть самосборки молекул заключается в следующем - когда молекулы вплотную прижимаются одна к другой, они автоматически упорядочиваются, образуя квазикристаллическую пленку. В основе подобной самоорганизации лежит то, что всякая система молекул (атомов) в процессе хаотического теплового движения с наибольшей вероятностью сама собой приходит в состояние с минимумом потенциальной энергии, являющееся наиболее устойчивым.

Аналогично ведут себя и молекулы, адсорбированные поверхностью твердого тела. Когда их становится много, то в процессе хаотического теплового движения (миграции) вдоль поверхности они тоже, в конце концов, образуют мономолекулярный слой с правильным упорядочением. Условия такой самоорганизации следующие:

- энергия взаимодействия одного из концов молекулы с атомами поверхности намного больше энергии взаимодействия этих молекул между собой;
- температура достаточна для тепловой поверхностной миграции молекул;
- энергия взаимодействия адсорбированных молекул между собой не зависит или мало зависит от направления (осевая симметрия).

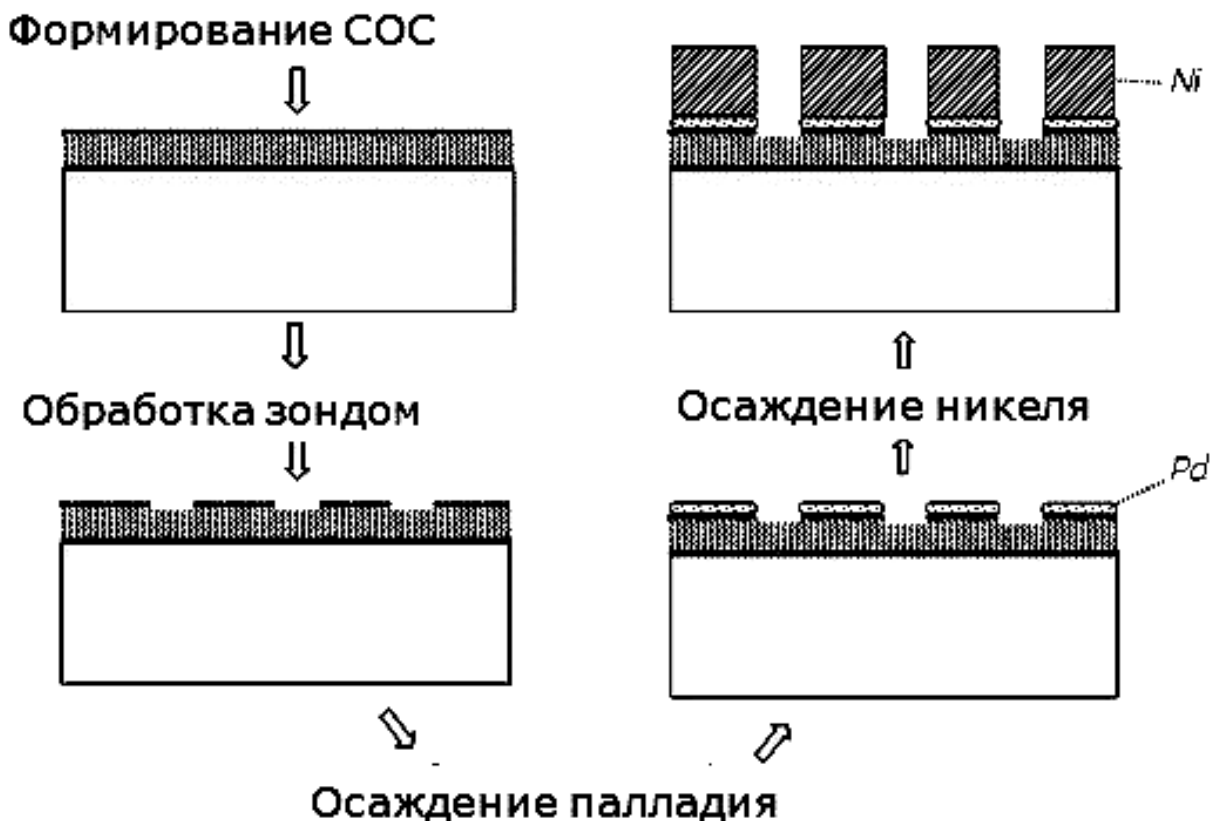


Рисунок 16 Схема одного из нанотехнологических процессов с применением самоорганизации молекул

В качестве примера применения процессов самоорганизации молекул, на рис. 16 показана схема технологического процесса формирования на подложке из кремния (серый прямоугольник) микроэлектродов из никеля с нанорасстояниями между ними.

Сначала на подложку кремния осаждают самоорганизованный слой (СОС) органосилана, например, $\text{ClCH}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_2\text{CH}_2(\text{CH}_3\text{O})_3\text{Si}$. Для этого на нее наливают раствор органосилана такой концентрации и такого объема, чтобы количество молекул было достаточным для формирования мономолекулярного слоя. Растворитель испаряют при температуре, достаточной для закрепления молекул одним концом к подложке и для миграции вдоль ее поверхности. После высушивания на поверхности кремния формируется самоорганизованный мономолекулярный слой толщиной порядка 1 нм. Затем с помощью зонда СТМ или АСМ этот слой облучают электронами, холодная эмиссия которых происходит из острия зонда. Эти электроны возбуждают или ионизируют "хвостики" молекул органосилана, что приводит к их отщеплению в электрическом поле зонда. Далее на слой кремния наливают коллоидный раствор с наночастицами палладия размером порядка 1 нм, имеющими значительное химическое сродство с "хвостиками" молекул органосилана, к которым они быстро прикрепляются. На молекулах органосилана с "оторванными хвостиками" наночастицы палладия не оседают. После высушивания слоя кремний

погружают в электролитическую ванну. В процессе электролиза никель оседает лишь на затравках из палладия.

Технология фокусированного ионного пучка

Другой способ создания наноструктур - использование технологии фокусированных ионных пучков (ФИП) [2, 3]. Существует два основных направления применения ФИП – травление и осаждение материалов. Ионное травление – техника безмасочного производства микро- и наноструктур. При травлении, ионы, покидающие катод, мгновенно достигают поверхности образца и выбивают атомы образца через каскад столкновений. Технология травления ионным пучком становится очень востребованной и широко применяется в микро- и наноинженерии и в различных областях микроскопии [4]. Основной проблемой технологии ионного травления является сложность расчета параметров травления для достижения заданной геометрии итоговой поверхности. На данный момент существует несколько математических моделей и программных продуктов, призванных для решения данной задачи. Практически любой материал может быть распылен и потом визуализирован при помощи ионного пучка. Скорость ионного травления материала выше скорости электронного травления, а минимальный размер пятна обеспечивает технологию субмикронной точности.

Технология на основе ФИП представляет собой мощный инструмент модификации материалов с высоким пространственным разрешением. Однако системы на основе ФИП обладают недостатком, обусловленным непрерывным деградированием поверхности образца, даже при использовании низкого значения тока ионного пучка. Деградация материала возникает под действием пучка ионов, имеющих конечную массу. Даже при использовании ионов с малой массой; взаимодействие пучка с образцом значительно сильнее, чем в случае электронного пучка.

В ФИП системе используется жидкометаллический источник ионов галлия. Использование галлия в жидкометаллическом источнике обусловлено низкой точкой плавления (~ 30 °C), низкими летучими свойствами, высокими эмиссионными характеристиками, малой энергетической дисперсией ионов и низкой поверхностной свободной энергией. При использовании жидкого ионного катода удается сфокусировать пучок ионов в пятно размером 2-5 нм [5]. Эмиссия ионов Ga происходит в два этапа. Разогретые атомы галлия смачивают область образца диаметром 5-10 нм. К образцу прикладывается электрическое поле для формирования источника ионов с диаметром 2-5 нм, где Ga ионизуется и отрывается постоянным ускоряющим напряжением. Таким образом, создается эмиссионный ток в области с низкой энергетической дисперсией ионов и высокой стабильностью пучка. Пучок ускоряется и фокусируется электростатическими и магнитными полями для бомбардировки образца. В

отличие от растрового электронного микроскопа (РЭМ) ФИП "разрушает" образец. При ударе ионов галлия о поверхность образца, они "вырывают" атомы с поверхности образца. Поскольку ионы Ga в $\sim 10^5$ раз тяжелее электронов они имеют больший момент инерции и большие размеры; что затрудняет их проникновение вглубь материала и приводит к поверхностному характеру взаимодействия.

Глава 3 Электронные и фотонные устройства

Резонансный туннельный диод

Энергетическая схема этого прибора показана на рис. 17. Он состоит из двух барьеров, разделенных областью с малой потенциальной энергией. Область между барьерами - это потенциальная яма, в которой есть один или несколько дискретных уровней. Характерная ширина барьеров и расстояние между ними составляют несколько нанометров.

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя.

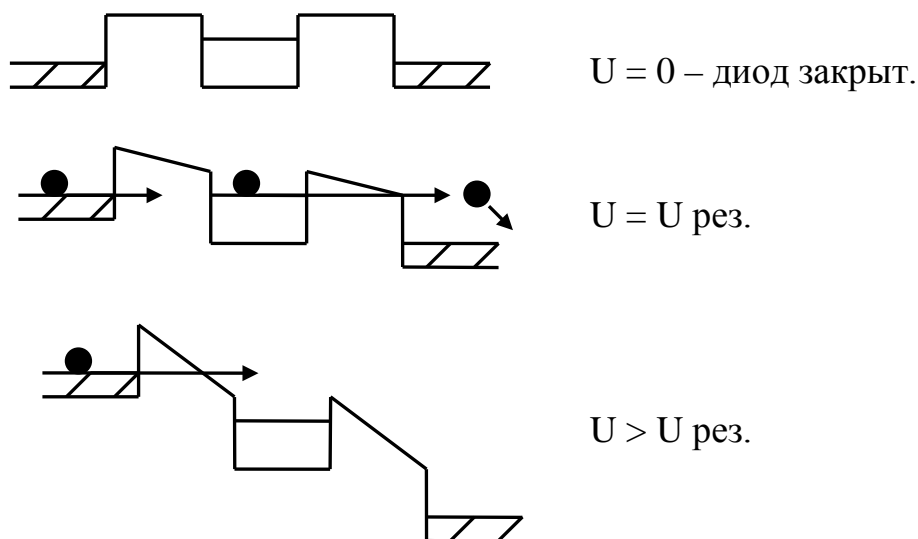


Рисунок 17 Схема работы резонансного туннельного диода при различных напряжениях смещения

Области слева и справа от двойного барьера играют роль резервуаров электронов проводимости, к которым примыкают контакты. Электроны занимают здесь довольно узкий энергетический интервал. В приборе используется следующая особенность двойного барьера: его туннельная прозрачность имеет ярко выраженный резонансный характер. Оказывается, что в том случае, когда энергия электронов, налетающих на барьеры, равна энергии дискретного уровня, туннельная прозрачность резко возрастает [6].

Механизм резонансного туннелирования таков: электрон, проникший в область между барьерами, надолго задерживается там, в результате многократного отражения от левого и правого барьеров существенно возрастает вероятность туннелирования. Одновременно можно сказать, что при резонансе из-за интерференции волн во внутренней области гасится волна, отражающаяся от двойного барьера. Следовательно, волна, упавшая слева, полностью проходит направо.

Ток, протекающий через двойной барьер, зависит от величины приложенного напряжения. Заметим, что потенциал в нашем приборе падает главным образом в области двойного барьера, так как области слева и справа от него обладают высокой проводимостью. Если приложенное напряжение мало и энергия электронов, налетающих на барьер слева, меньше энергии дискретного уровня, то прозрачность барьера и, следовательно, протекающий ток будут малы. Ток достигает максимального значения при таких напряжениях, когда энергия электронов равна энергии дискретного уровня. При более высоких напряжениях энергия налетающих электронов станет больше энергии дискретного уровня и туннельная прозрачность барьера уменьшится. При этом ток также уменьшится. При $U > U_{рез}$ туннельная прозрачность сначала падает, а затем растет с увеличением вклада нерезонансного туннелирования и надбарьерной температурной инжекции.

Для обеспечения одинаковой проницаемости барьеров второй барьер нужно сделать толще, причем степень идентичности зависит от $U_{рез}$. Если в яме несколько дискретных уровней, то и $U_{рез}$ тоже будет несколько.

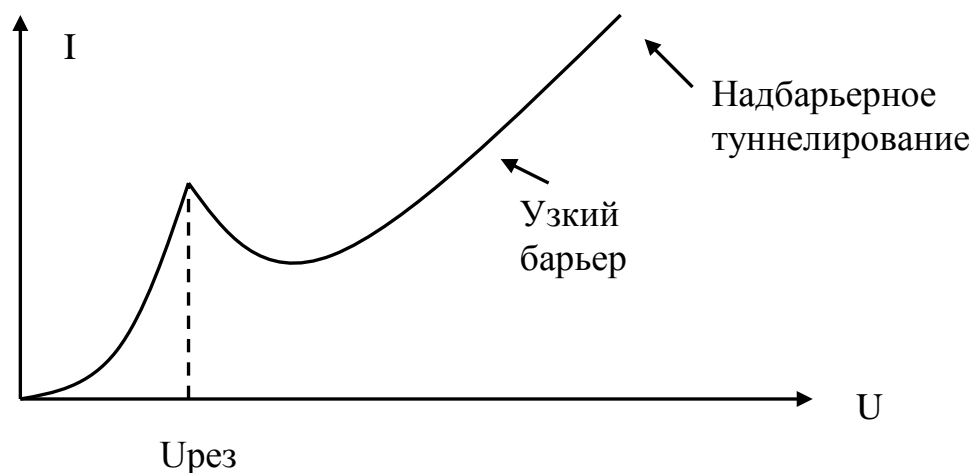


Рисунок 18 Вольт-амперная характеристика резонансного туннельного диода

Вольт-амперная характеристика резонансного туннельного диода показана на рис 18. Видно, что на вольт-амперной характеристике имеется максимум (если в области между барьерами не один, а несколько

дискретных уровней, то и максимумов будет несколько).

Справа от максимума кривая $I(V)$ имеет падающий участок, где ток убывает с ростом напряжения. Потенциал падает только в области барьеров, так как в крайних областях проводимость существенно высока. Можно еще сказать, что на вольт-амперной характеристике имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления. Благодаря этому в электронных схемах резонансный диод может использоваться не только как выпрямитель, но и выполнять самые разнообразные функции.

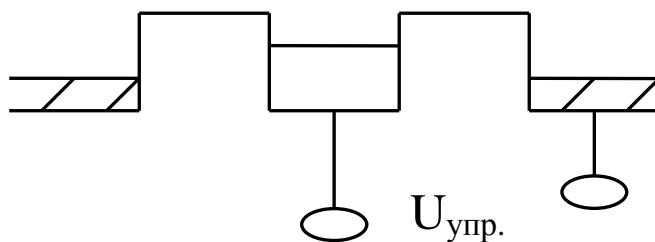


Рисунок 19 Резонансный туннельный транзистор

Если к центральной области резонансного диода подвести контакт, через который можно управлять положением дискретного уровня, получится новый прибор – транзистор (рис. 19).

Резонансный туннельный диод - это первое реальное устройство с квантовой ямой и барьерами. Он был создан Лео Эсаки и Чангом в 1974 году. Идея прибора была предложена раньше. Это сделал Л. Иогансен в 1963 году.

Транзистор с высокой подвижностью электронов

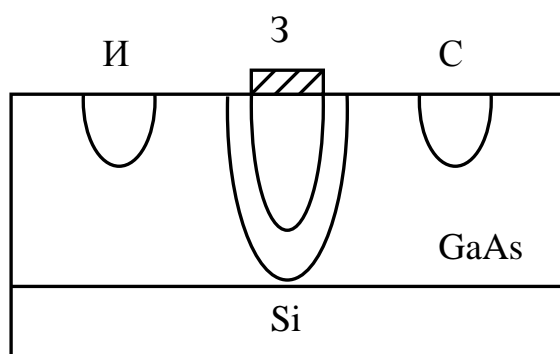


Рисунок 20 Схема работы полевого транзистора

Транзистор с высокой подвижностью электронов это разновидность обычного полевого транзистора с искусственно созданным узким проводящим каналом, в котором располагается 2 D электронный газ [7].

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью

электрического поля. Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвует только один вид носителей (рис 20).

Транзистор с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) - полевой транзистор, в котором для создания канала вместо легированной области, в отличие от обычных МОП-транзисторов, используется контакт двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны.

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя.

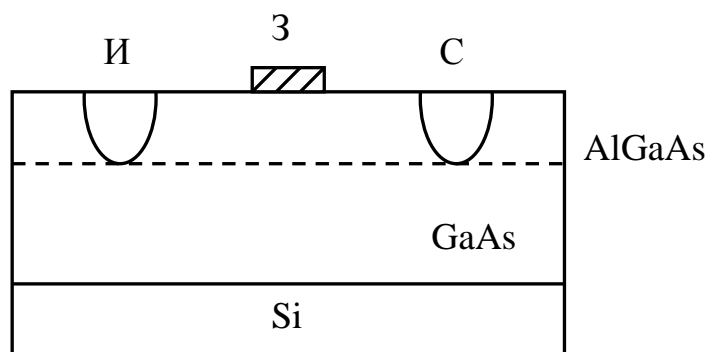


Рисунок 21 Полевой транзистор с высокой подвижностью электронов

В НЕМТ транзисторах чаще всего применяют гетеропереход GaAs-AlGaAs. С увеличением относительного содержания Al в твердом растворе AlGaAs плавно увеличивается ширина запрещенной зоны. Для состава с $x=0,3$ $\Delta E_z=1,8$ эВ и различие в ширине запрещенной зоны составляет $\sim 0,38$ эВ. Вследствие хорошего соответствия кристаллических решеток GaAs и AlGaAs в гетеропереходе обеспечивается низкая плотность поверхностных состояний и дефектов. По этим причинам для электронов, накопленных в области накопления затвора, в слабых электрических полях достигается очень высокая подвижность, близкая к объемной подвижности для нелегированного GaAs. При этом эта подвижность резко увеличивается при понижении температуры, так как в нелегированном GaAs преобладает решетчатое рассеяние.

Также подвижность электронов в канале увеличивается благодаря дополнительной прослойке (спейсеру) между каналом GaN и барьером AlGaN (рис. 21). Спейсер - тонкий (несколько нм) разделительный слой нелегированного $Al_xGa_{1-x}As$. Он способствует лучшему пространственному разделению двумерного электронного газа и рассеивающих центров между нелегированным GaAs и легированным донорами $Al_xGa_{1-x}As$. Концентрация рассеивающих центров в нелегированном слое ниже, чем в легированном, поэтому подвижность электронов, накопленных в области насыщения затвора, дополнительно увеличивается. В этом случае волновая функция электронов в канале не

проникает в барьер, а затухает в спейсере. При этом уменьшается рассеяние носителей на барьере. Введение спейсера также улучшает омический контакт, что приводит к повышению предельной рабочей частоты почти до теоретического предела.

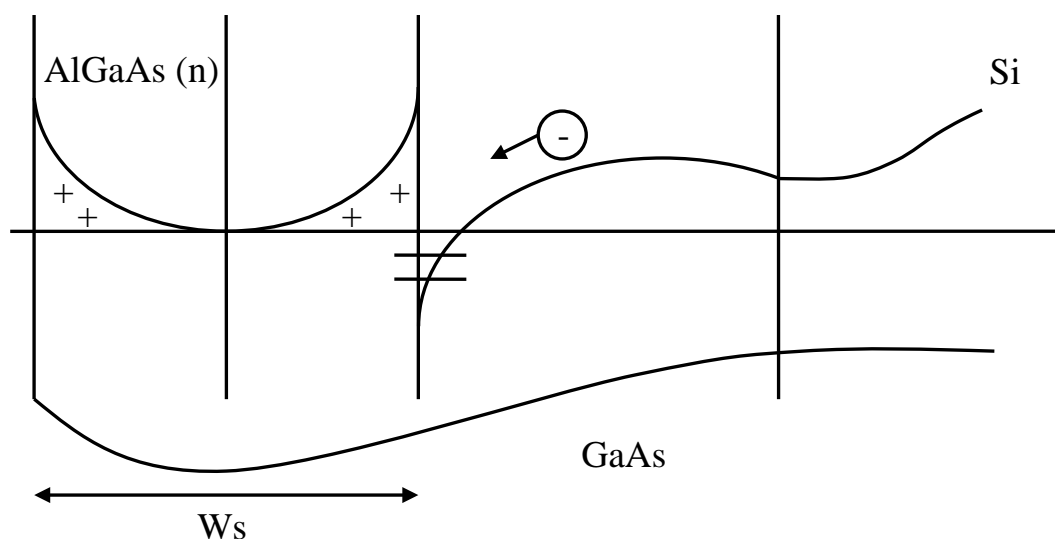


Рисунок 22 Зонная диаграмма транзистора с высокой подвижностью электронов

В нелегированном GaAs уровень Ферми располагается почти посередине запрещенной зоны, а в легированном $Al_xGa_{1-x}As$ вблизи дна зоны проводимости (E_c). В GaAs у границы раздела 2-х п/п образуется область с минимальной энергией электронов (рис. 22). В эту область из п/п с более широкой запрещенной зоной «скатываются» свободные электроны ионизированных атомов примеси. В результате произойдет пространственное разделение электронов и компенсирующих их ионизированных атомов примеси. Электроны, находясь в треугольной потенциальной яме и в слабых электрических полях могут перемещаться только вдоль границы в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка. Поэтому совокупность электронов в этой области и называют двумерным электронным газом, подчеркивая тем самым, что в слабых полях эти электроны не могут перемещаться в третьем измерении, то есть переходить, например, из области в область, так как этому препятствует потенциальный барьер.

Принцип действия ТВПЭ - между металлическим затвором и расположенным под ним слоем из AlGaAs, образуется управляющий переход Металл - Полупроводник. обедненная область этого перехода располагается, в основном, в слоях AlGaAs. Канал нормально открытого транзистора при $U_{gs} < 0$ формируется в слое нелегированного GaAs на границе гетероперехода в области накопления двумерного электронного газа. Под действием управляющего напряжения U_{gs} изменяется толщина обедненной области перехода металл-полупроводник, концентрация

электронов в ДЭГ и ток стока. Электроны поступают в область накопления из истока. При достаточно большом (по модулю) отрицательном $U_{gs}=U_f$ обедненная область расширяется настолько, что перекрывает область насыщения электронов. Ток стока при этом прекращается.

В нормально закрытом транзисторе вследствие меньшей толщины верхнего слоя AlGaAs при $U_{gs}=0$ проводящий канал отсутствует, так как область насыщения двумерного электронного газа перекрыта обедненной областью управляющего перехода. Канал возникает при некотором положительном $U_{gs}=U_f$, когда обедненная область управляющего перехода сужается настолько, что её нижняя граница попадает в область накопления электронов.

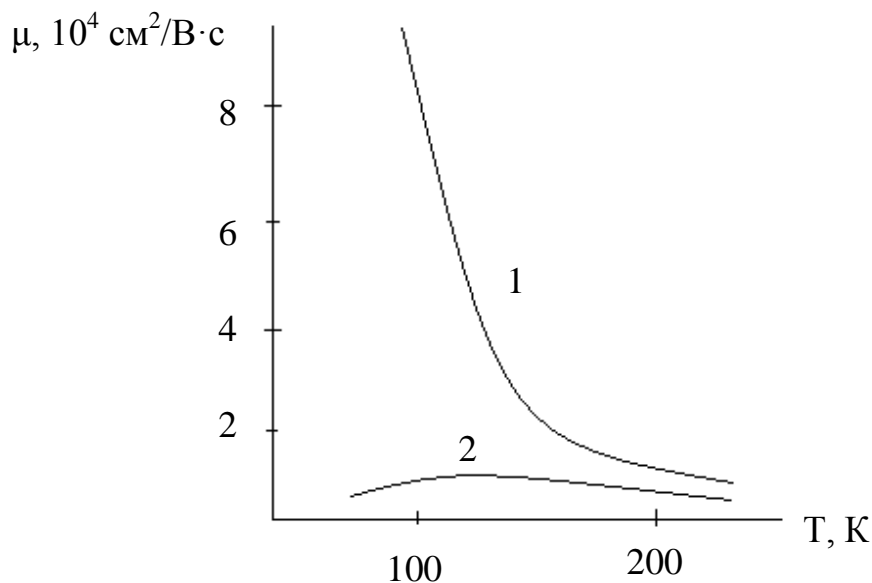


Рисунок 23 Температурная зависимость подвижности электронного газа.
1 – гетероструктура; 2 – GaAs

На рисунке 23 показана температурная зависимость подвижности электронного газа, полученная в этом случае. При температурах жидкого азота ($77\text{ }^{\circ}\text{K}$) и жидкого гелия ($4\text{ }^{\circ}\text{K}$) подвижность электронов соответственно возрастает до $1,4 \cdot 10^5$ и $2 \cdot 10^6\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. На этом же рисунке показана температурная зависимость подвижности электронов в GaAs с концентрацией донорной примеси $N_d = 10^{17}\text{ см}^{-3}$.

В январе 2010 г. группа ученых из Японии и Европы представила терагерцовый ТВПЭ с рабочей частотой $2,5\text{ ТГц}$ [8]

Одноэлектроника

Интересным объектом наноэлектроники являются квантовые точки, через которые осуществляется туннельное взаимодействие. Туннельным током между двумя массивными электродами можно управлять, если между ними поместить проводящий элемент с нанометровыми

размерами – квантовую точку (рис.24). В этом случае вероятность туннелирования электронов между электродами значительно выше, чем в отсутствие её, поскольку туннелирование идет не непосредственно между электродами, а через квантовую точку.

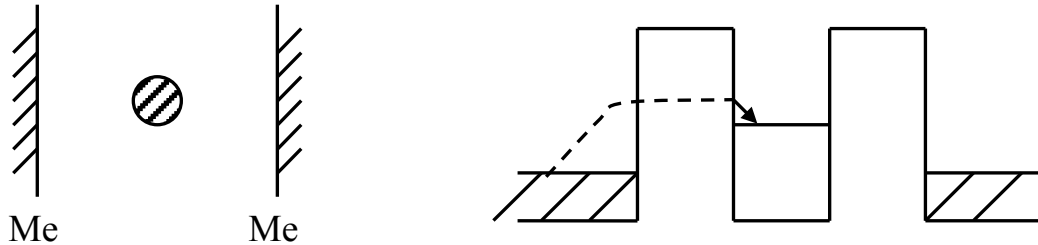


Рисунок 24 Структурная схема и зонная диаграмма металлической частицы расположенной в диэлектрической прослойке между двумя металлическими контактами

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, с использованием как литографических методов создания квантовых точек так и технологий самоорганизованного роста наноструктур.

Конструктивно квантовая точка расположена между двумя массивными металлическими электродами, отделенными друг от друга тонким изолятором (это может быть собственный окисел металла). Таким образом, это аналог обычного конденсатора. Туннельный переход может быть охарактеризован туннельным сопротивлением R_t и емкостью C . Допустим, конденсатор заряжен электрическим зарядом Q . Так как существует возможность туннелирования, электроны начнут переходить через контакт, справа налево. Рассмотрим результат перехода первого из этих электронов. Поскольку при туннелировании полная энергия электрона не меняется, то возможность его перехода через барьер определяется изменением электростатической энергии.

$$\Delta F = \frac{(Q-e)^2}{2C} - \frac{Q^2}{2C} = E_c \left(1 - \frac{Q}{e/2} \right),$$

где характерная энергия электрона $E_c = e^2/2C$ определяется емкостью C . При нулевой температуре туннелирование произойдет только тогда, когда выполнится условие $\Delta F < 0$, т.е. вся система перейдет в состояние с меньшей энергией (в противном случае туннелирование энергетически невыгодно).

Рассмотрим энергию данной квантовой точки:

$$E_a = \frac{e^2}{L} = \frac{e^2}{\epsilon r},$$

где r – радиус квантовой точки, ϵ – диэлектрическая проницаемость.

Чтобы электрон туннелировал в квантовую точку, его энергия должна быть выше её энергии. Но при низких температурах таких электронов мало. Необходимо внешнее напряжение: $U > |e|/C_{\text{частицы}}$

Соответственно, после того как электрон перешел на уровень квантовой точки и внутренняя энергия её повысилась. То есть что бы следующий электрон попал на этот уровень нужно приложить большее напряжение. Этот эффект называется кулоновской туннельной блокадой. Пришедший электрон блокирует остальные. Протекание тока при этом блокируется и на вольт-амперной характеристике контакта, дискретность заряда проявляется в виде ступенек так называемой «кулоновской лестницы».

Для улучшения работы системы, можно подвести сверху дополнительный электрод (рис. 25). Если подавать напряжение на этот верхний электрод, то можно управлять и нормализовать движение электронов по данной системе. Этот электрод называется затвором.

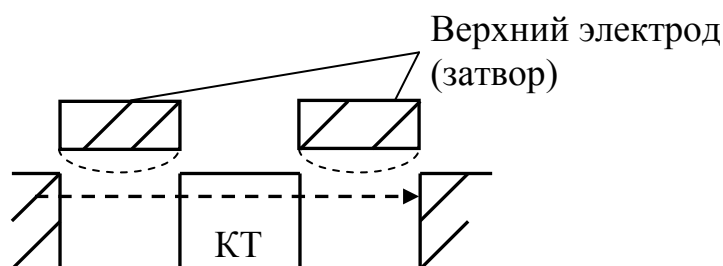


Рисунок 25 Улучшение эффективности системы туннелирования через квантовую точку (КТ)

Если задать внешние напряжения на контактах и на затворе: U_k и U_z и задать вероятность $w_n(t)$ того, что в квантовой точке n -ое количество избыточных электронов в момент времени t , то можно описать систему фермиевскими функциями:

$$f_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_1 - E_{F1}}{kT}}}; \quad f_2 = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_2 - E_{F2}}{kT}}}$$

Одноэлектронный транзистор

Также как и полевой полупроводниковый транзистор, он имеет три электрода, называемые Истоком, Стоком и Затвором. В области между электродами (рис. 26) располагается квантовая точка, изолированная от электродов диэлектрическими прослойками, через которые и может при определенных условиях происходить движение электрона. Если приложить напряжение между Истоком и Стоком транзистора, то ток

протекать не будет, так как этому препятствует кулоновская блокада. Для появления тока необходимо увеличить потенциал на управляющем электроде – Затворе. Только когда потенциал на Затворе станет больше некоторого порогового значения, блокада прорывается, электрон получает способность пройти через барьер, и в цепи Исток-Сток начинает протекать ток. Количество электронов в наночастице должно быть не более 10 (а желательно и меньше). Это может быть достигнуто в квантовых структурах с размером порядка 10 нм.

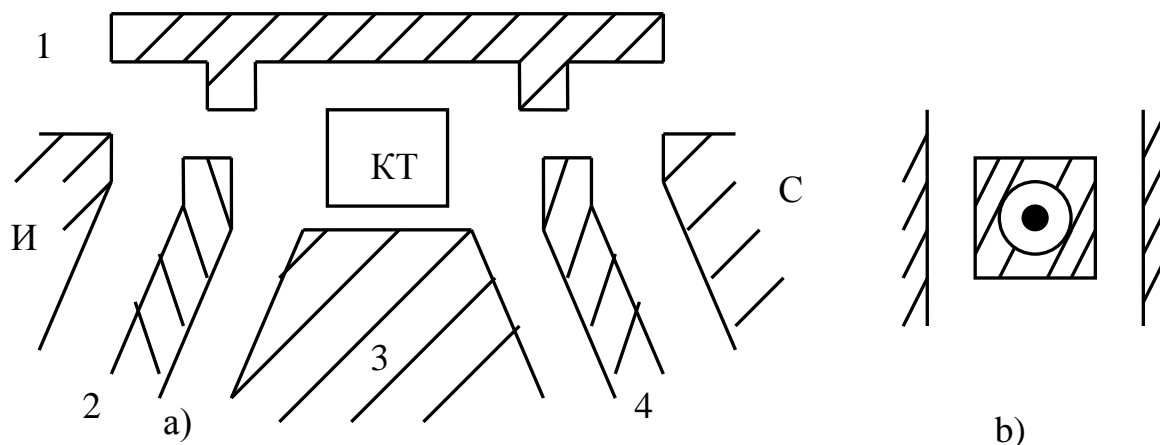


Рисунок 26 Одноэлектронный транзистор (а) Структурная схема 1,2,3,4 – затворы. 3-й затвор – главный. (б) вид сверху

Между истоком и стоком приложено небольшое напряжение, такое что, кондуктанс в узких интервалах напряжения на затворе не равен нулю. Следовательно, небольшое изменение напряжения на затворе способно сильно изменять значение тока. Работу транзистора может нарушать маловероятное, но существующее, прямое туннелирование от истока к стоку. Для предотвращения этого используют две квантовые точки. Плюсами такого решения являются быстроедействие и малая мощность.

В транзисторе контакты 1,2 и 4 играют вспомогательную роль и напряжение на них равно константе. В стандарте силы тока на контакт 2 и 4 подается переменное напряжение, влияющие на высоту левого и правого туннельного барьера. Между истоком и стоком небольшое постоянное напряжение. На контакты 2 и 4 подается напряжение с частотой f , которое можно точно измерить. Причем напряжение противофазно.

Когда через пониженный левый барьер электрон переходит в квантовую точку, то правый барьер в этот момент высокий и электрон дальше не идет. Через полпериода правый барьер повышается, а левый понижается, и электрон уходит в сток. Т.е. за время одного периода через квантовую точку проходит ровно один электрон. Так мы можем регулировать частотой силу тока – этот процесс называется «стандарт силы тока».

$$I = |e| f$$

Лазеры

Лазер - устройство, использующее квантовомеханический эффект вынужденного (стимулированного) излучения для создания когерентного потока света. Луч лазера может быть непрерывным, с постоянной амплитудой, или импульсным, достигающим экстремально больших пиковых мощностей. Во многих конструкциях рабочий элемент лазера используется в качестве оптического усилителя для излучения от другого источника. Усиленный сигнал очень точно совпадает с исходным по длине волны, фазе и поляризации, что очень важно в устройствах оптической связи.

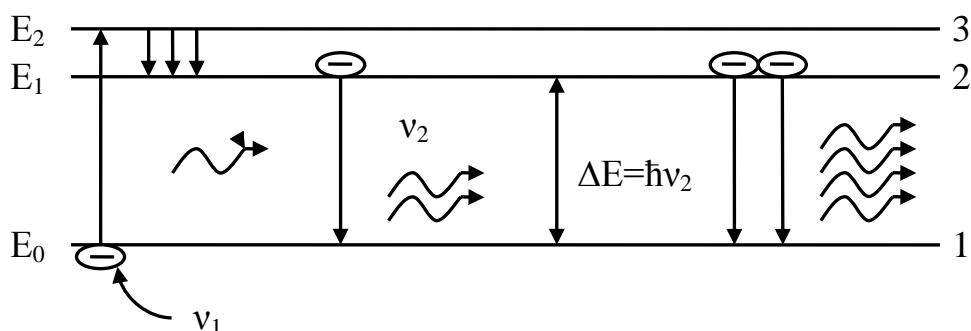


Рисунок 27 Трех уровневая схема работы лазера

Физической основой работы лазера служит явление вынужденного (индуцированного) излучения^[9]. Лазерное излучение (явление) состоит в том, что возбуждённый атом способен излучить фотон под действием другого фотона не поглощая его, если энергия последнего равняется разности энергий уровней атома до и после излучения. При этом излучённый фотон когерентен фотону, вызвавшему излучение (излучённый фотон является «точной копией» фотона, который его «спровоцировал»). Таким образом, происходит усиление светового потока электромагнитного излучения. В отличие от спонтанного излучения, в котором излучаемые фотоны имеют случайное направление распространения, в данном случае имеет место излучения направленного усиленного луча через поляризацию и одинаковую фазу колебания

Классическая трёхуровневая система накачки рабочей среды (рис. 27) используется, например, в рубиновом лазере. Рубин представляет из себя кристалл корунда Al_2O_3 , легированный небольшим количеством ионов хрома Cr^{3+} , которые и являются источником лазерного излучения. Из-за влияния электрического поля кристаллической решётки корунда внешний энергетический уровень хрома (3) расщеплён. Именно это делает возможным использование немонохроматического излучения в качестве

накачки. При этом атом переходит из основного состояния с энергией E_0 (1) в возбуждённое с энергией около E_2 (3). В этом состоянии атом может находиться сравнительно недолго (порядка 10^{-8} с), почти сразу происходит безизлучательный переход на уровень E_1 , на котором атом может находиться значительно дольше (до 10^{-3} с), это так называемый метастабильный уровень. Возникает возможность осуществления индуцированного излучения под воздействием других случайных фотонов. Как только атомов, находящихся в метастабильном состоянии становится больше, чем в основном, начинается процесс генерации.[¹⁰]

Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах

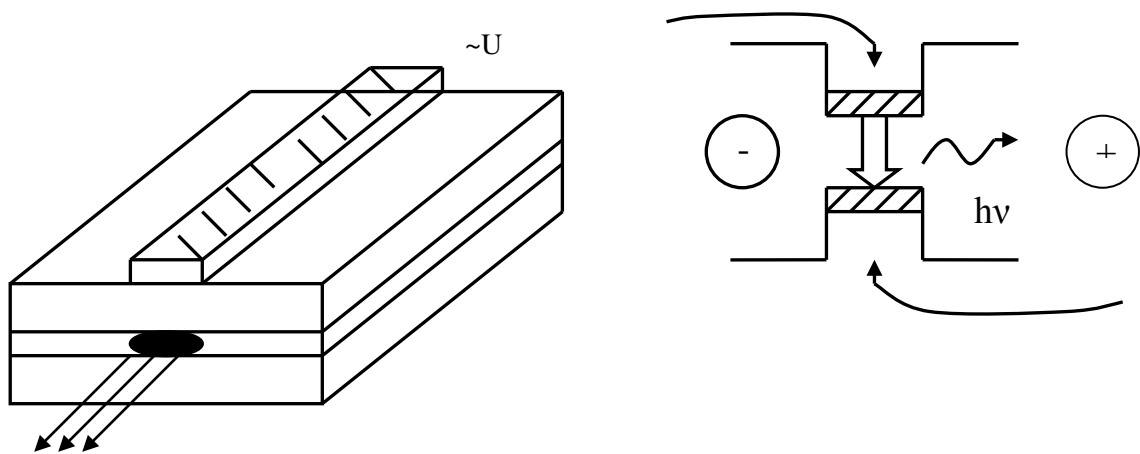


Рисунок 28 Схематическое изображение полупроводникового лазера с резонатором Фабри-Перо и его энергетическая диаграмма

На рис. 28 показана конструкция стандартного полупроводникового лазера. Размеры активного слоя составляют 200-500 μm в длину, 2-100 μm в ширину и ~ 0.1 μm в поперечном разрезе.

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя.

Существует множество различных конструкций полупроводниковых лазеров. Их принцип действия основан на инжекции электронов и дырок в активную область. В двойной гетероструктуре широкозонный полупроводник имеет более низкий показатель преломления, чем активная область. Излучение ограничено в области активного слоя. Формирование контактного полоска, ограниченного полуизолирующими областями, созданными ионной имплантацией, позволяет току протекать в ограниченной части активной области. Это создает оптическое ограничение в активной области.

Хотя для создания лазера можно использовать и обычный p-n переход,

пороговый ток генерации лазерного излучения, слишком велик. Причиной этого является диффузия электронов и дырок из области, где происходит рекомбинация. Более эффективными являются гетероструктуры и двойные гетероструктуры.

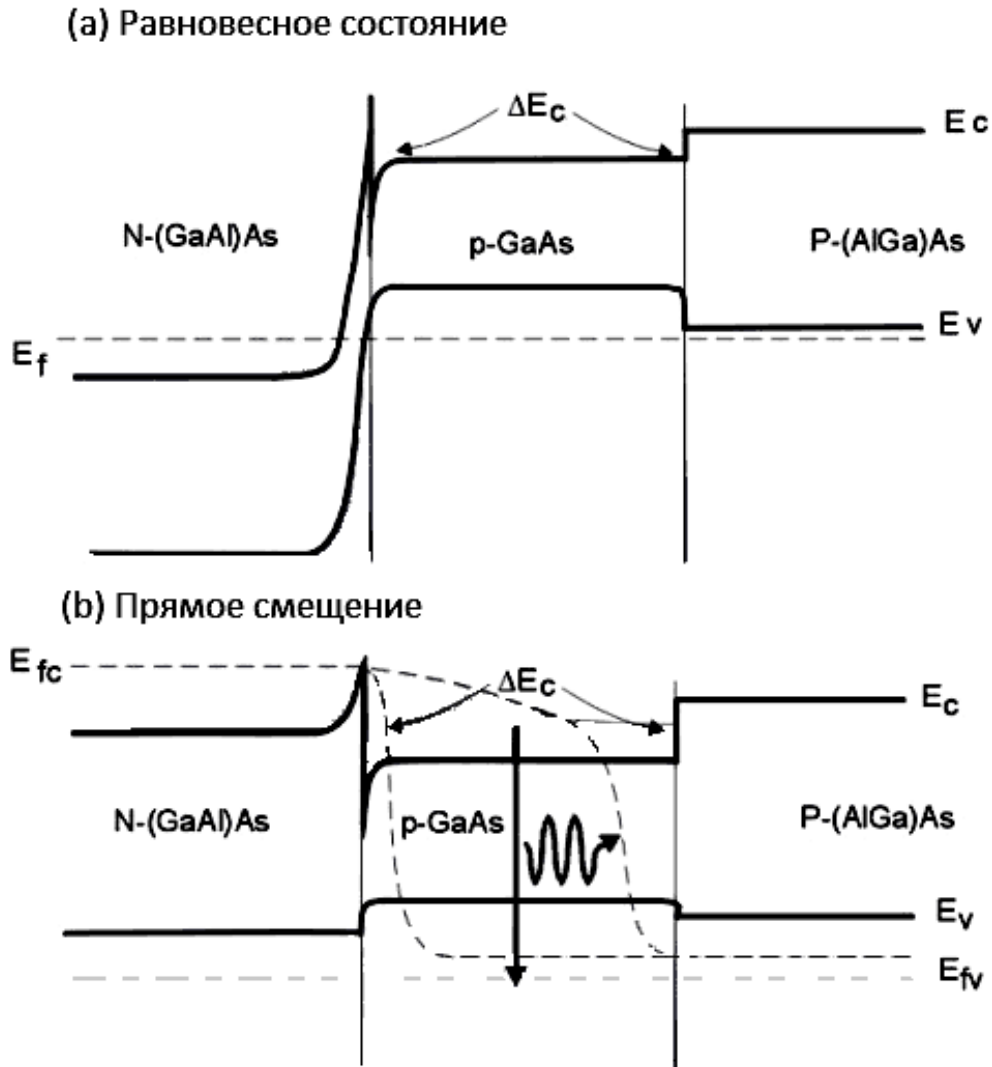


Рисунок 29 Зонная диаграмма гетероструктуры n^+pp^+ AlGaAs/GaAs/AlGaAs

Понятие «гетероструктура» предполагает контакт двух разнородных полупроводников со схожей кристаллической решеткой. На контакте формируются потенциальные барьеры, которые ограничивают движение электронов и дырок.

На рис. 28а показана зонная диаграмма двойной гетероструктуры AlGaAs/GaAs/AlGaAs типа n^+pp^+ в равновесии. Уровень Ферми постоянен на протяжении всей структуры. Контактная разность потенциалов на гетеропереходах вызывает изгиб зон.

На рис 28b показана зонная диаграмма двойной гетероструктуры AlGaAs/GaAs/AlGaAs в условиях прямого смещения. В этом состоянии происходит инжекция электронов и дырок в область p- GaAs из слоев AlGaAs n^+ и p^+ -типа соответственно. Электроны локализируются в слое p-GaAs, их выходу из этого слоя препятствует потенциальный барьер высотой ΔE_c . Аналогично, дырки из p^+ - AlGaAs инжектируются в валентную зону p-GaAs. Таким образом, благодаря наличию разрыва зон в гетеропереходе, электроны и дырки в прямосмещенной двойной гетероструктуре локализованы в узкозонном полупроводнике, где создаются наиболее благоприятные условия для их излучательной рекомбинации. В этом заключается явление *суперинжекции* в двойных гетероструктурах, открытое Ж.И.Алферовым [11]. Благодаря ему в лазерах на двойных гетероструктурах была впервые получена генерация в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Условие инверсной заселенности в полупроводнике соответствует одновременному выполнению условий $F_n > E_c$ для зоны проводимости и $F_p < E_v$ в валентной зоне в одной и той же области пространства. Кроме наличия инверсной населенности, для вынужденной эмиссии свет должен взаимодействовать с электронами в зоне проводимости. Это достигается, если свет находится в области, которая имеет отражающие стенки (оптический резонатор). Если увеличение числа фотонов равно числу уходящих, то происходит генерация лазерного излучения.

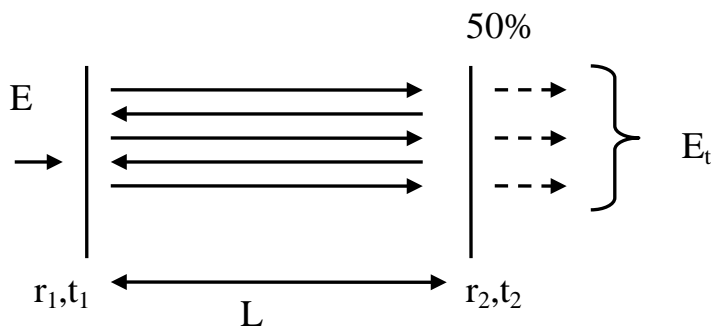


Рисунок 30 Распространение волны в волноводном слое

Проанализируем качественно процессы потерь и найдем минимальное усиление, соответствующее порогу генерации [12]. Рассмотрим волноводный слой (Рис. 30) длины L с комплексным показателем преломления и плоскую волну с амплитудой E входящую в него с левой стороны.

$$K = \gamma + i\beta = i(n - k)k_0$$

Положим коэффициент прохождения через левую грань равным t_1 , а через правую - t_2 . Отношение отраженного к падающему свету $r_1 \exp(i\Theta_1)$ в левом зеркале и $r_2 \exp(i\Theta_2)$ в правом. Сдвигом фаз пренебрегаем.

Без временной зависимости, электрическое поле плоской волны $E_i \exp(-\Gamma z)$ так что E_x есть $t_1 E_i$ на левой грани и $t_1 E_i \exp(-KL)$ на правой грани. Амплитуда волны, прошедшая через правую грань при первом отражении, будет $t_1 t_2 E_i \exp(-KL)$, при втором - $t_1 t_2 r_1 r_2 E_i \exp(-3KL)$ и так далее:

$$E_t = t_1 t_2 E_i \exp(-KL) [1 + r_1 r_2 \exp(-2KL) + (r_1 r_2)^2 \exp(-4KL) + \dots]$$

Это уравнение можно записать через сумму геометрической прогрессии:

$$E_t = E_i \left[\frac{t_1 t_2 \exp(-KL)}{1 - r_1 r_2 \exp(-2KL)} \right]$$

Когда знаменатель уравнения стремится к нулю, условием для возникновения генерации является конечное значение E_t в излученной волне при нулевом E_i . Поэтому условие генерации достигается при:

$$r_1 r_2 \exp(-2KL) = 1$$

Подставляя коэффициент K , определённый выше, и замечая, что $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ а так же $k = \alpha \lambda_0 / 4\pi$ при условии резонанса получаем:

$$r_1 r_2 \exp[(g - \alpha_i)L] \exp\left[-2i\left(\frac{2\pi n}{\lambda_0}\right)L\right] = 1$$

Коэффициент поглощения записан как разность между усилением и α_i . Условие генерации подразумевает волну, проходящую путь длиной $2L$ внутри волновода от одной грани до другой и обратно с той же самой амплитудой и фазой, кратной 2π . Условие постоянной амплитуды гласит:

$$r_1 r_2 \exp[(\Gamma g - \alpha_i)L] = 1$$

Это уравнение записывается обычно в виде:

$$\Gamma g = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad \text{и} \quad g = \alpha_i + \left(\frac{1}{L}\right) \ln\left(\frac{1}{R}\right)$$

где $R = R_1 = r_1 r_1^* = R_2 = r_2 r_2^*$ - коэффициент отражения по мощности. Для сколотых граней в GaAs $R \sim 0.3$. Дополнительный коэффициент, который часто включается в оптический показатель преломления Γ , учитывает долю моды излучения, локализованную в пределах активной области. Для полупроводниковых лазеров на основе двойной гетероструктуры он составляет порядка 1, но для лазеров на квантовых ямах его значение намного меньше (~ 0.1).

Фазовое условие генерации записывается как:

$$4\pi nL / \lambda_0 = 2q\pi$$

Которое приводит к

$$q = 2nL / \lambda_0$$

Резонанс происходит, когда в резонаторе укладывается целое число половин длин волн (рис. 31).

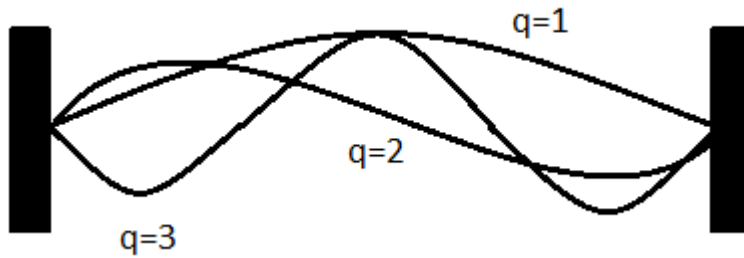


Рисунок 31 Схематическое изображение лазерного волновода, показаны 3 первые моды

Например, в волноводе GaAs длиной 200 μm будет иметь место около 1600 мод.

Продольное разделение мод дается дифференцированием

$$\lambda \Delta q + q d\lambda = 2L dn$$

Для смежных мод, $q=-1$ и уравнение замещения.

$$d\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL[1 - (\lambda/n)(dn/d\lambda)]}$$

В первом приближении, $dn/d\lambda$ мало, поэтому

$$d\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL}$$

$$\frac{\partial^2 E_1}{\partial x^2} - q^2 E_1 = 0$$

при $L \gg \lambda$ размер моды довольно мал и поэтому много мод может вписаться в лазерный волновод.

На рис. 32 снизу показан спектр излучения полупроводникового лазера ниже порогового значения. Близко расположенные моды накладываются на спектр спонтанного излучения. Этот режим работы называется сверхлюминесценцией или суперлюминесценцией. В активной области создана инверсия населенности, но её ещё не хватает для начала генерации, т.е. не выполнено условие самовозбуждения. Как только ток повышается до величины порогового тока, одна мода становится доминирующей. Так как спектр спонтанного излучения довольно широк, то несколько мод конкурируют, чтобы стать доминирующей модой лазерного излучения, и эта мода может переключаться в процессе работы. При увеличении тока накачки максимум спектральной зависимости показателя усиления сдвигается в коротковолновую область. Одновременно при больших токах происходит нагрев кристалла, за счет

чего спектр сдвигается в длинноволновую область. Часто второй эффект преобладает над первым.

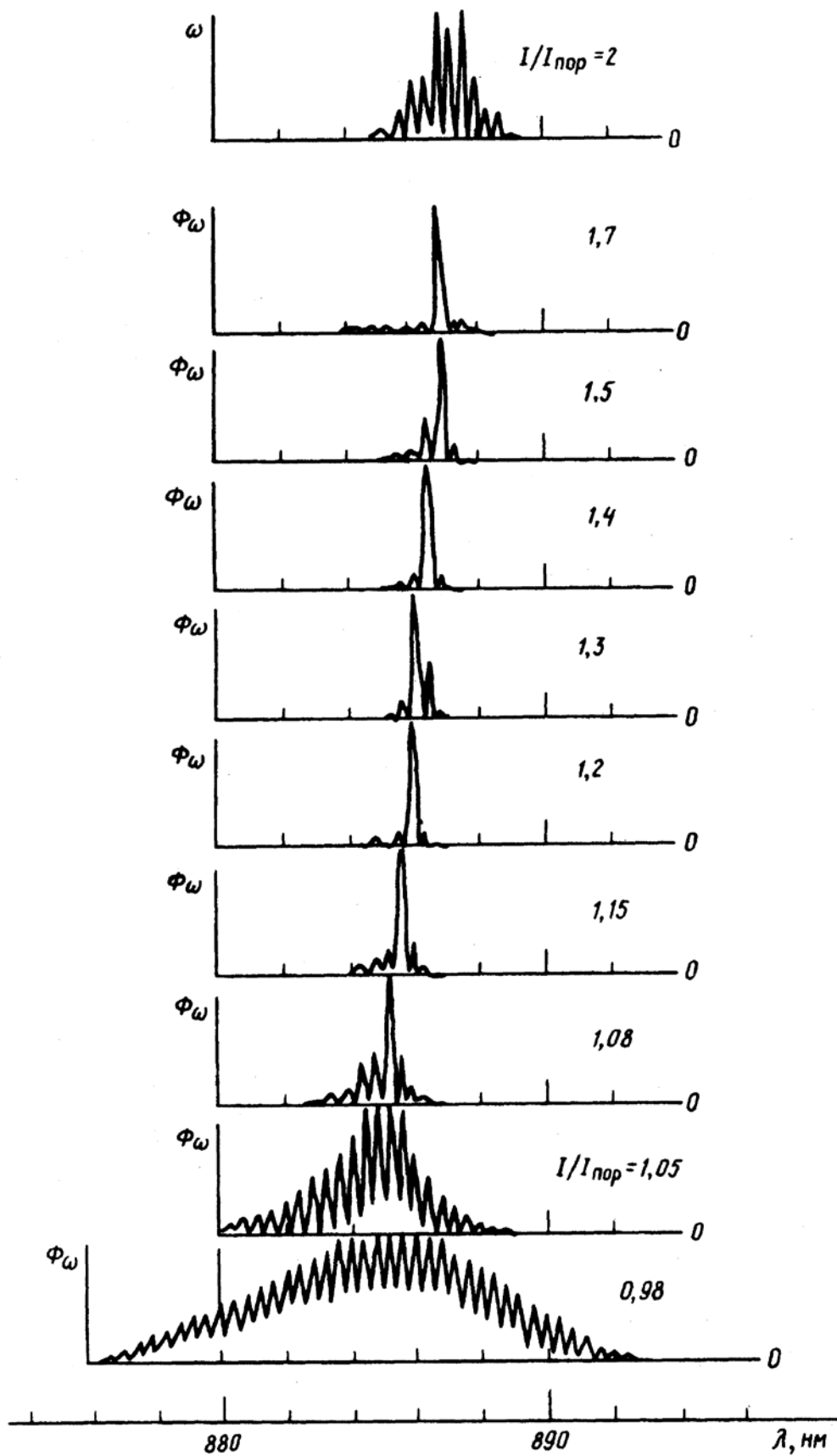


Рисунок 32 Изменение спектра излучения лазера в зависимости от тока накачки

Активные области современных лазеров могут иметь сложную структуру и содержать более одного ограничивающего слоя (например, Separate Confinement Heterostructure, SCH или Graded-Index Separate Confinement Heterostructure, GRINSCH). Активные области могут содержать квантовые ямы (КЯ) и сверх решетки (СР). Такие лазеры обладают рядом преимуществ. Квантовая яма формируется, когда толщина двойной гетероструктуры становится сравнимой с длиной волны де Бройля (примерно 100 \AA). В этом случае электроны локализованы в пределах квантовой ямы. Ширина квантовой ямы и её состав определяет число и энергии квантово-размерных уровней в ее пределах, таким образом определяя длину волны излучения. Излучающая рекомбинация в квантовой системе происходит преимущественно с основных состояний электронов в КЯ в зоне электропроводимости на первый энергетический уровень тяжелых дырок в валентной зоне. Поэтому распределение энергетических уровней и, соответственно, длину волны излучения можно регулировать, задавая положение энергетических уровней. Другое преимущество лазеров на квантовых ямах состоит в том, что температурная зависимость порогового тока линейна. Разработанные к настоящему времени лазеры на квантовых ямах имеют низкие пороговые токи и высокую стабильность в работе (срок службы более 10^6 часов) [13].

Лазер на горячих «дырках»

В работе данного лазера используются внутризонные переходы положительно заряженных частиц (дырок). Электроны прямого участия в генерации излучения не принимают.

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя. Контакты наносятся методами фотолитографии или искровым методом.

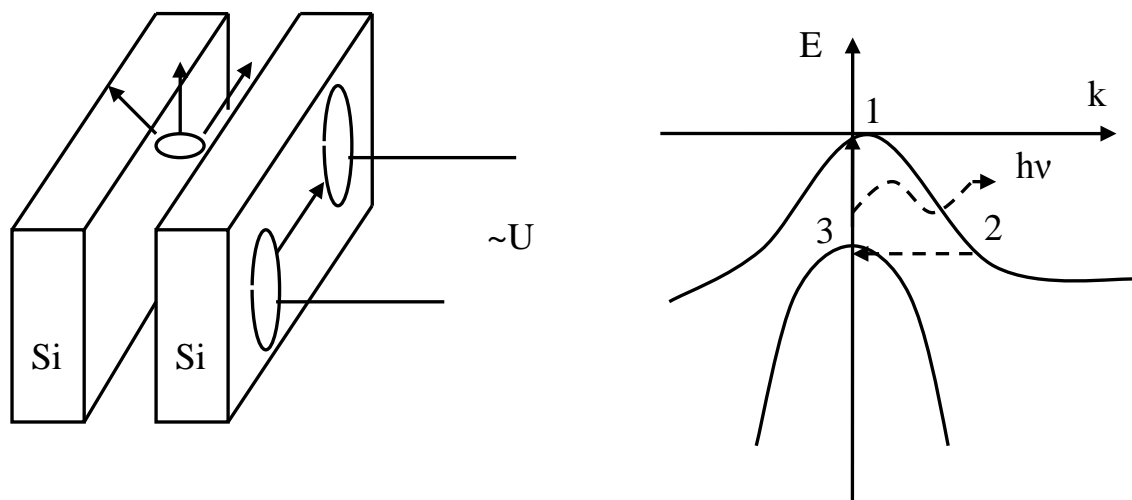


Рисунок 33 Лазер на горячих «дырках» и зонная диаграмма

При подаче напряжения накачки на контакты, происходит увеличение энергии носителей заряда в активной области лазера, которая идет на повышение квазиимпульса дырки (нагрев). В результате этого нагрева носителя заряда на энергетической диаграмме смещаются вдоль энергетического уровня в точку 2 (рис. 33).

Затем, при смещении в точку 3, происходит горизонтальный переход на другой энергетический уровень. Квазиимпульс частицы при этом обнуляется, а изменения энергии не происходит, поэтому этот внутризонный переход не сопровождается излучением и называется безизлучательным. Частицы в точке 3 находятся в стабильном состоянии для последующего перехода в более выгодное энергетически положение - точку 1, который сопровождается излучением кванта фотона $h\nu$.

Каскадный лазер

В отличие от обычных полупроводниковых лазеров, которые излучают электромагнитные волны посредством рекомбинации электронно-дырочных пар, через запрещенную зону полупроводника, каскадный лазер являются однополярными (униполярными) и излучение возникает при переходе электронов между слоями гетероструктуры полупроводника внутри одной зоны.

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя.

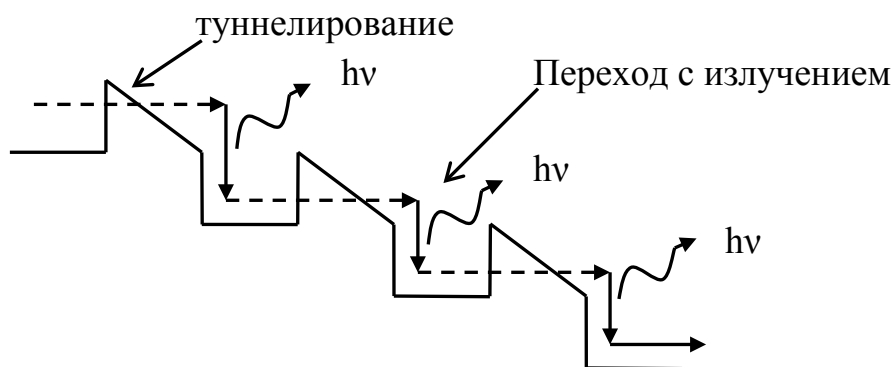


Рисунок 34 Энергетическая диаграмма каскадного лазера

В каскадных лазерах не используются объемные полупроводниковые материалы в оптически активной зоне. Вместо этого они включают в себя периодический ряд тонких слоев различных материалов, которые формируют состав сверхрешетки. Сверхрешетка создает варьирующийся вдоль структуры электрический потенциал, а это означает, что различаются вероятности нахождения электронов, в различных позициях по всей длине сверхрешетки. Такая структура называется одномерной квантовой ямой и приводит к расщеплению полосы разрешенных энергий

на ряд дискретных электронных подзон. По подходящему значению толщины слоя можно спроектировать инверсии населенности двух подзон в системе, которая необходима для получения лазерного излучения. Так как положение энергетических уровней в системе в первую очередь определяется толщиной слоя, а не составом материала, то в каскадном лазере можно настроить длину волны излучения в широком диапазоне в той же структуре.

В квантово-каскадной структуре, фотоны излучаются при переходе электронов через внутризонные переходы (рис. 34). Электроны туннелируют на следующий период структуры, и процесс повторяется. Кроме того, в полупроводниковых лазерных диодах, электроны и дырки уничтожаются после рекомбинации через запрещенную зону и не могут участвовать в дальнейшей генерации фотонов. Напротив, в однополярном каскадном лазере, когда электрон прошел межподзонный переход и испускается один фотон при прохождении одного периода сверхрешетки, электрон может туннелировать в следующий период структуры, где может излучиться другой фотон. Этот процесс, при котором происходит излучение нескольких фотонов при прохождении одного электрона через структуру лазера, называется «каскадный процесс». Значение квантовой эффективности такого процесса больше единицы, что приводит к повышению выходной мощности излучения по сравнению с обычными полупроводниковыми лазерами.

Лазер на квантовых точках

Полупроводниковый лазер, который использует в качестве активной лазерной среды квантовые точки в их излучающей области. Из-за жестких ограничений на передвижение носителей заряда в квантовых точках, они имеют электронную структуру, похожую на атомы.

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя. При создании квантовых точек в активной области используют технологии самоорганизованного роста.

Лазеры, изготовленные на таких активных средах, обладают характеристиками, похожими на характеристики газовых лазеров, и в них удаётся избежать некоторых негативных аспектов устройств, которые имеются у традиционных полупроводниковых лазеров с активной средой на основе объёмных структур или на квантовых ямах. Наблюдается улучшение характеристик по полосе частот, порогу генерации, относительной интенсивности шума, увеличению ширины спектральной линии и нечувствительности к колебаниям температуры. Активную область квантовой точки можно также рассчитать для работы на различных длинах волн, изменяя размер и состав точки. Появилась возможность производить лазеры на квантовых точках для работы на таких длинах волн, на которых

ранее сделать это не представлялось возможным с использованием прежних технологий полупроводниковых лазеров. По сравнению с характеристиками предыдущих обычных лазеров на квантовых ямах новые лазеры на квантовых точках имеют значительно более высокую температурную стабильность.

ПЗС-матрицы

Прибор с зарядовой связью можно рассматривать как матрицу близко расположенных конденсаторов со структурой металл/диэлектрик/полупроводник. В качестве полупроводника в ПЗС обычно используется кристаллический кремний, а в качестве изолятора - оксиды кремния. Поэтому такую структуру называют "металл/окисел/полупроводник" (МОП). С физической точки зрения, ПЗС интересны тем, что электрический сигнал в них представлен не током или напряжением, как в большинстве других твердотельных приборах, а зарядом. При соответствующей последовательности тактовых импульсов напряжения на электродах МОП-конденсаторов зарядовые пакеты можно переносить между соседними элементами прибора.

На рис. 35 показана структура одного элемента линейного трехфазного ПЗС в режиме накопления. Структура состоит из слоя кремния р-типа (подложка), изолирующего слоя (диоксид кремния) и набора пластин - электродов. Один из электродов смещен более положительно, чем остальные два, и именно под ним происходит накопление заряда.

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя.

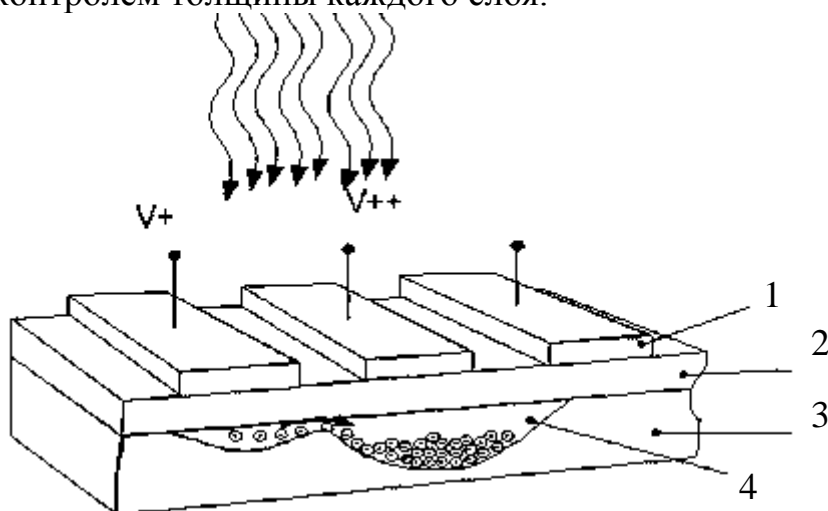


Рисунок 35 Структура одного элемента ПЗС 1 – металлический электрод, 2 – диоксид кремния, 3 – кремниевая подложка, 4 – потенциальная яма

Если подать небольшой положительный потенциал на один из

электродов ячейки трехфазного ПЗС, а два других электрода оставить под нулевым потенциалом относительно подложки, то под положительно смещенным электродом образуется потенциальная яма. Когда кремнием поглощается фотон, то генерируется пара носителей заряда - электрон и дырка. Электростатическое поле в области элемента вытесняет "дырку" вглубь кремния, а электроны накапливаются в потенциальной яме под электродом, к которому подведен положительный потенциал. Здесь они могут храниться достаточно длительное время, поскольку дырки в обедненной области отсутствуют и электроны не рекомбинируют.

Заряд, накопленный под одним электродом, в любой момент может быть перенесен под соседний электрод, если его потенциал будет увеличен, в то время как потенциал первого электрода будет уменьшен. Если все три электрода элемента ПЗС находятся под нулевым потенциалом, то накопление генерированных светом электронов не происходит. Считывание фототоков ПЗС-элементов осуществляется так называемыми последовательными регистрами сдвига, которые преобразовывают строку зарядов на входе в серию импульсов на выходе. Данная серия представляет собой аналоговый сигнал, который в дальнейшем поступает на усилитель.

Магнитные наноструктуры

В 1988 году было открыто гигантское магнетосопротивление (GMR) в многослойных материалах с чередующимися тонкими слоями ферромагнитных и немагнитных металлов (рис. 36). Толщина отдельного слоя составляет всего несколько атомов. Сопротивление таких образцов велико, если магнитные поля в ферромагнетиках направлены в противоположные стороны, и минимально, когда магнитные поля параллельны^[14].

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя.

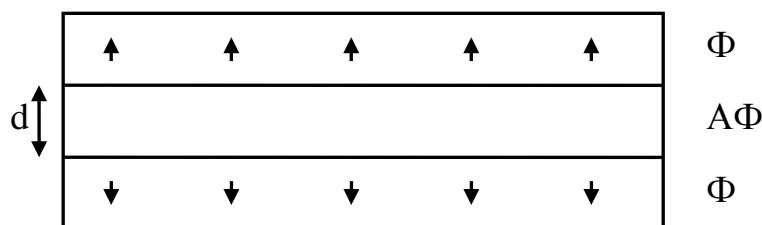


Рисунок 36 Магнитная наноструктура из ферромагнитных (Ф) и антиферромагнитного слоя (АФ)

Основная сфера применения эффекта - датчики магнитного поля, используемые для считывания информации в жёстких дисках, биосенсорах, устройствах МЭМС и др. Обладающие гигантским

магнетосопротивлением многослойные структуры применялись в магниторезистивной оперативной памяти в качестве ячеек, хранящих один бит информации.

В ферромагнитном слое спины электронов вследствие обменного взаимодействия ориентируются в одну сторону, так как со спином связан магнитный момент, то намагниченность лежит в плоскости слоев.

В случае немагнитной прослойки обменное взаимодействие между слоями ферромагнетиков осуществляется через электроны проводимости. Это взаимодействие называется взаимодействием Рудермана – Киттеля – Кайсуа – Иосиды (РККИ).

$$\text{Энергия взаимодействия } W = -J(\overline{M}_1, \overline{M}_2),$$

где M – намагниченность ферромагнитных слоев.

$$\text{Обменный интеграл } J = \frac{C_0 \sin(2k_F d)}{d^2},$$

где k_F – фермиевский волновой вектор электронов проводимости, d – толщина слоя антиферромагнетика, которая обеспечивает существенное влияние на величину изменения магнетосопротивления (рис. 38).

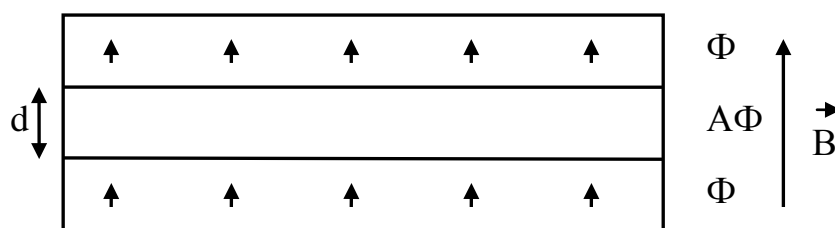


Рисунок 37 Магнитная наноструктура из ферромагнитных (Ф) и антиферромагнитного слоя (АФ) во внешнем магнитном поле

При $J > 0$ ферромагнитным слоям энергетически выгодно ориентироваться параллельно (сонаправлено). А при $J < 0$ – антипараллельно. Если приложить внешнее магнитное поле, то ориентация спинов изменяется на сонаправленное с полем.

Если $J < 0$, то угол между намагниченностью слоев изменится от 180° до 0° (рис. 37). При этом сопротивление структуры уменьшится на 20%

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(0) - R(H_{нас})}{R(H_{нас})}$$

Поле, при котором падение сопротивления максимально, называется полем насыщения.

Если менять поле периодически, то будет наблюдаться типичная гистерезисная зависимость, т.е. при прямом и обратном ходе изменения магнитного поля максимумы будут наблюдаться в разных местах.

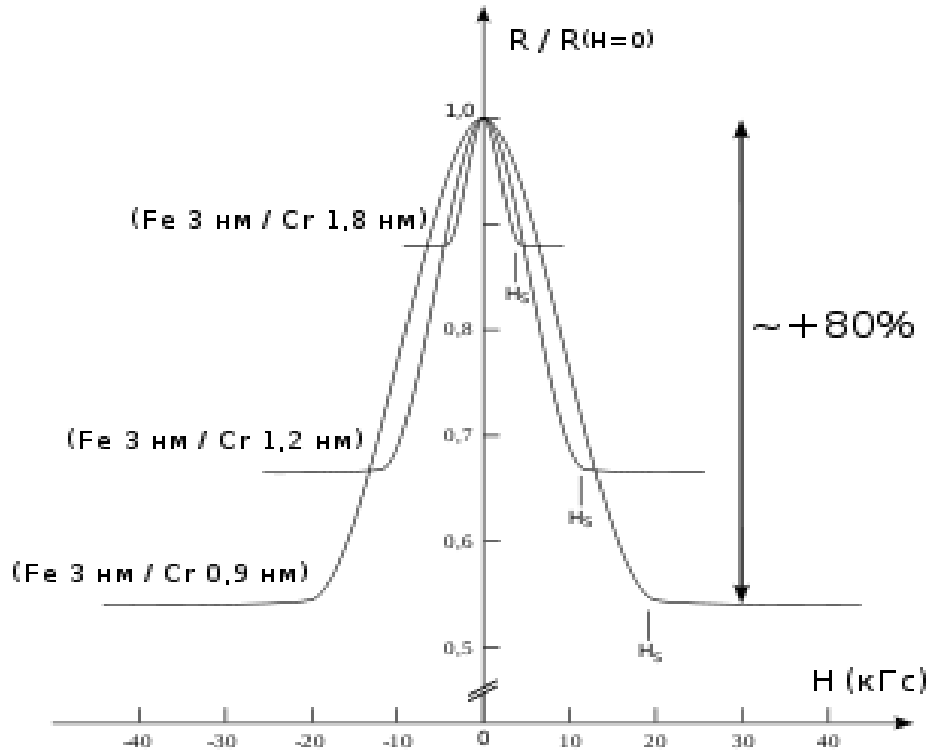


Рисунок 38 Изменение сопротивления Fe/Cr сверхрешёток при температуре 4,2 °К при приложении внешнего магнитного поля напряжённостью H

Рассмотрим *качественную модель*:

В процессе движения электрон переходит из одного слоя в другой. Из общей массы электронов можно выделить электроны большинства со временем пробега t_b и электроны меньшинства с t_m .

1) При $J > 0$

Электропроводимость для электронов большинства:

$$\sigma_B^* = \left(\frac{1}{\sigma_{B_1}} + \frac{1}{\sigma_{B_{np}}} + \frac{1}{\sigma_{B_2}} \right)^{-1}$$

Для электронов меньшинства:

$$\sigma_M^* = \left(\frac{1}{\sigma_{M_1}} + \frac{1}{\sigma_{M_{np}}} + \frac{1}{\sigma_{M_2}} \right)^{-1}$$

Общая электропроводимость: $\sigma_{J>0} = \sigma_B^* + \sigma_M^*$

2) Если $J < 0$ то электроны большинства становятся электронами меньшинства для разных слоев

$$\sigma_{J<0} = 2\sigma_{BM} = 2 \left(\frac{1}{\sigma_B} + \frac{1}{\sigma_{np}} + \frac{1}{\sigma_M} \right)^{-1} = \left(\frac{2\sigma_{np}\sigma_B\sigma_M}{\sigma_B\sigma_M + \sigma_{np}\sigma_M + \sigma_{np}\sigma_B} \right)$$

Таким образом, величина магнетосопротивления:

$$G_0 = \frac{\rho_{J<0} - \rho_{J>0}}{\rho_{J>0}} = \frac{\sigma_{J>0}}{\sigma_{J<0}} - 1 = \frac{\sigma_{np}^2 (\sigma_B - \sigma_M)^2}{\sigma_B \sigma_M (2\sigma_{np} + \sigma_B)(2\sigma_{np} + \sigma_M)}$$

В рамках нашей модели

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_M} = \frac{t_B}{t_M},$$

поэтому наличие магнетосопротивления обусловлено различием t_B и t_M .

Модификации элементов с гигантским магнетосопротивлением

1. Спиновый вентиль

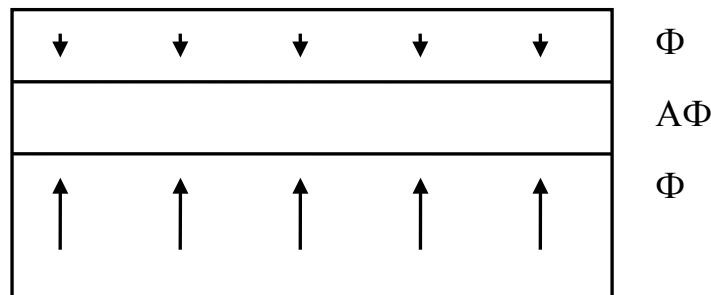


Рисунок 39 Схематичное изображение спинового вентиля

В качестве элементов на основе эффекта ГМС как правило используется структура, получившая название спиновый вентиль (spin valve) (рис. 39). В ней один из магнитных слоев напылен на слой антиферромагнетика. Благодаря обменному взаимодействию между электронами ферромагнетика и антиферромагнетика спины в этих двух слоях становятся жестко связанными между собой. Поскольку внешнее магнитное поле не очень большой величины не оказывает влияния на антиферромагнетик, то намагниченность магнитного слоя оказывается закрепленной. Такой слой, намагниченность которого в некотором интервале полей может считаться неизменной, называют закрепленным или фиксированным. Второй же магнитный слой может быть свободно перемагничен внешним полем, поэтому его называют свободным. Промежуточный слой немагнитного металла, как правило, изготавливается из меди. Сопротивление спинового вентиля R может быть с хорошей точностью описано с помощью формулы:

$$R = R_0 + \Delta R_{gmr} \sin^2(0.5|\Theta|),$$

где R_0 - сопротивление структуры при параллельной намагниченности слоев, ΔR_{gmr} – инкремент сопротивления, обусловленный эффектом ГМС, и Θ – угол между намагниченностями магнитных слоев (принимает значения между ρ и $-\rho$). Типичные значения R составляют десятки Ом, а для используемых в индустрии спиновых вентилях составляет 6-10% [15]

2. Туннельное магнитное сопротивление

Квантовомеханический эффект, проявляется при протекании тока между двумя слоями ферромагнетиков разделенных тонким (около 1 нм) слоем диэлектрика. При этом общее сопротивление устройства, ток в котором протекает вследствие туннельного эффекта, зависит от взаимной ориентации полей намагничивания двух магнитных слоев. Сопротивление будет выше при перпендикулярной намагниченности слоев. Эффект туннельного магнитного сопротивления похож на эффект гигантского магнитного сопротивления, но в нем, вместо слоя немагнитного металла используется слой изолирующего туннельного барьера.

Туннельный ток увеличивается, а сопротивление уменьшается, если ориентация спинов параллельна и сонаправлена.

При разнонаправленной ориентации спинов сопротивление увеличивается на ~45%, т.к. при туннелировании электронов, они сохраняют свой спиновый магнитный момент и тратят дополнительную энергию на переориентацию спинов.

3. Псевдоспиновый вентиль

Эффект гигантского магнетосопротивления может наблюдаться и в отсутствие антиферромагнитной связи между слоями. В таком случае магнетосопротивление возникает из-за различия в коэрцитивных силах. В многослойных структурах типа пермаллой/медь/кобальт/медь внешнее магнитное поле приводит к переключению между различными направлениями намагниченности насыщения в слоях (параллельная при больших полях и антипараллельная в малых). Подобные системы характеризуются меньшим полем насыщения, чем сверхрешетки с антиферромагнитной связью.

Фотонные кристаллы

С общей точки зрения фотонный кристалл является сверхрешеткой - средой, в которой искусственно создано дополнительное поле с периодом, на порядки превышающим период основной решетки. Для фотонов такое поле получают периодическим изменением коэффициента преломления среды - в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры соответственно). Если период оптической сверхрешетки сравним с длиной электромагнитной волны, то поведение фотонов кардинально отличается от их поведения в решетке обычного кристалла,

узлы которого находятся друг от друга на расстоянии, много меньшем длины волны света. Поэтому такие решетки и получили особое название - фотонные кристаллы.

Одним из первых практически важных применений таких структур стало изготовление диэлектрических покрытий с уникальными оптическими характеристиками, применяемых для создания высокоэффективных оптических спектральных фильтров и снижения нежелательного отражения от оптических элементов (такая оптика получила название просветленной), и диэлектрических зеркал с коэффициентом отражения, близким к 100%. В качестве другого, хорошо известного примера 1D-фотонных структур, можно упомянуть полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью, а также оптические волноводы с периодической продольной модуляцией физических параметров (профиля или коэффициента преломления). При рассеянии фотонов на 1D- и 2D-структурах (рис. 40) всегда находятся такие направления распространения дифрагировавших лучей, для которых условие максимума интерференции выполнено.

Для одномерного кристалла - нити (а), направления распространения образуют конические поверхности, а в двумерном случае (б) - совокупность отдельных, изолированных друг от друга лучей. Трехмерный случай (в) принципиально отличается от одномерного и двумерного тем, что условие максимума интерференции для данной длины волны света может оказаться невыполнимым ни для одного из направлений в пространстве. Распространение фотонов с такими длинами волн в трехмерном кристалле невозможно, а соответствующие им энергии образуют запрещенные фотонные зоны.

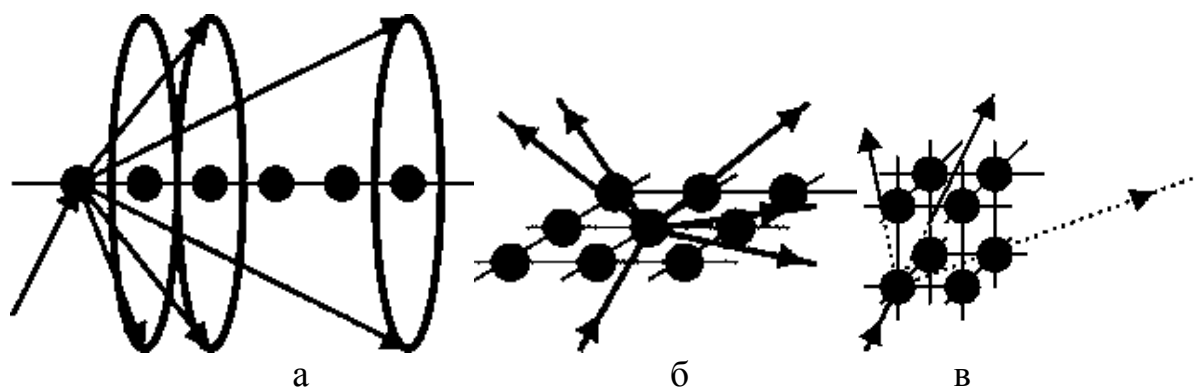


Рисунок 40 схематично показано явление дифракции лучей света на периодических структурах различной размерности

Традиционно оптические и электрические среды рассматривались независимо друг от друга. Правда, полупроводниковые оптоэлектронные приборы уже требовали к себе особого внимания из-за необходимости совмещения условий проводимости электрического тока с возможностью

распространения света.

Продолжая аналогию, фотонные кристаллы можно разделить на проводники, изоляторы, полупроводники и сверхпроводники. Фотонные проводники обладают широкими разрешенными зонами. Это прозрачные тела, в которых свет пробегает большое расстояние, практически не поглощаясь.

Другой класс фотонных кристаллов - фотонные изоляторы - обладает широкими запрещенными зонами.

Такому условию удовлетворяют, например, широкодиапазонные многослойные диэлектрические зеркала. В отличие от обычных непрозрачных сред, в которых свет быстро затухает, превращаясь в тепло, фотонные изоляторы свет не поглощают. Что же касается фотонных полупроводников, то они обладают более узкими по сравнению с изоляторами запрещенными зонами.

Фотонные волноводы

Использование фотонных полупроводников удобно для организации управления световыми потоками. Это можно делать, например, влияя на положение и ширину запрещенной зоны. Поэтому фотонные кристаллы представляют огромный интерес для построения лазеров нового типа, оптических компьютеров, хранения и передачи информации.

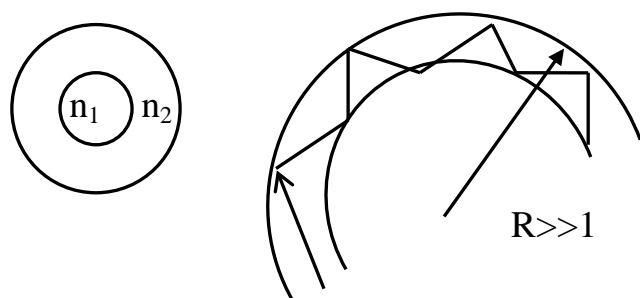


Рисунок 41 Принцип работы волновода из оптоволокна

Фотонные кристаллы предполагается использовать для создания оптических интегральных схем так же, как обычные полупроводники, металлы и диэлектрики используются для создания электронных интегральных схем.

Данный прибор изготавливается методами послойного роста полупроводниковых структур, точным (вплоть до атомарного слоя) контролем толщины каждого слоя. Так же могут использоваться методы спекания нанопорошков и наноструктурной протяжки, ионной и электронной литографии и фотолитографии.

Еще одна возможность, предоставляемая фотонными кристаллами, - создание нового типа волноводов. Радиус изгиба обычного стекловолокна не может быть очень маленьким, иначе свет покинет волновод. Поэтому для изменения направления движения волны, например, на угол 90

градусов требуется расстояние не менее десяти длин волн (рис. 41).

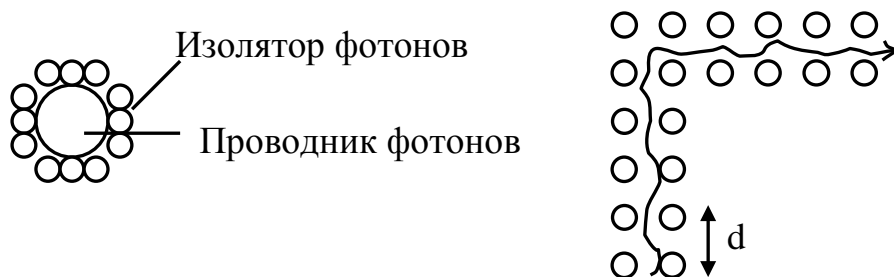


Рисунок 42 Принцип работы волновода из модифицированного оптоволокна

А в волноводе из фотонных кристаллов потребуется расстояние порядка одной длины волны и даже меньше (рис. 42): в пределе, в случае трехмерной упаковки, плотность элементов можно увеличить в сто раз.

Плотность упаковки функциональных узлов кристаллофотоники ниже, чем у электронных компонентов, однако возможность создания уже в ближайшие годы оптических интегральных схем нового типа, способных к тому же использовать весь объем кристалла, а не только тонкую пленку на его поверхности, является хорошим стимулом для исследователей.

Фотонный кристалл с отрицательным показателем преломления

С развитием фотонных кристаллов стало возможным создавать кристаллы с отрицательным показателем преломления. В разных областях физики существует так называемое правило "правой руки". Именно этому правилу подчиняется процесс отражения и преломления света в подавляющем большинстве "нормальных" веществ, то есть веществ с положительным показателем преломления.

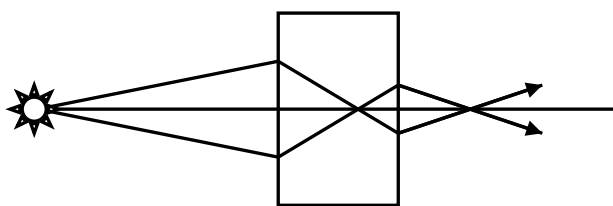


Рисунок 43 Линза с отрицательным показателем преломления на основе фотонных кристаллов

Однако, как оказалось, в природе могут существовать и вещества подчиняющиеся правилу "левой руки". В этом случае (то есть на границе среды с отрицательным показателем преломления) свет будет распространяться в обратном направлении. В итоге два пучка, которые преломляются на разных границах среды, могут даже пересекаться! (рис. 43). Это не противоречит фундаментальным законам физики, более того,

это прямое следствие из уравнений Максвелла - основного средства описания поведения электромагнитных волн, в том числе и света. Теоретически возможность такого эффекта была предсказана еще в 1968 году советским физиком В. Г. Веселаго. Показатель преломления определяется формулой:

$$n = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0}}$$

где ε_0 и μ_0 - электрическая и магнитная константы.

Поскольку и диэлектрическая, и магнитная проницаемость - величины комплексные, то величина n может быть как положительной, так и отрицательной.

Если говорить о практической пользе такого эффекта, то следует вспомнить, что в "правой" оптике нельзя получить изображение такого же качества, что и исходное, прошедшее через обычную линзу. Причина заключается в том, что в "правой" оптике нельзя сфокусировать луч в область, размерами меньше длины волны (умноженной на константу). Для "левой" оптики такого ограничения не существует!

Английский физик Джон Пендри уже показал, что возможно создание "суперлинзы", которая будет фокусировать свет в область, размером в сотни раз меньшую, чем длина волны падающего света. Возможности такой "суперлинзы" будут определяться только фантазией пользователей и возможностями технологий.

Усилитель света в оптоволокне

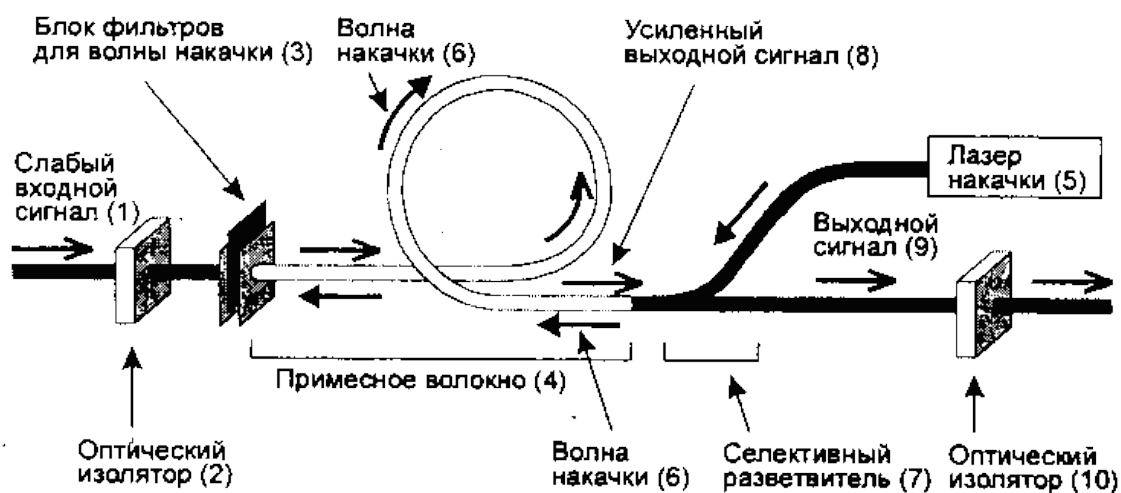


Рисунок 44 Схема эрбиевого усилителя

При прохождении излучения по световоду от источника к приемнику часть световой энергии теряется, и сигнал может стать настолько слабым, что выйдет за пределы чувствительности приемника и окажется

потерянным. Оптические сигналы, передаваемые по промышленным кварцевым световодам, должны усиливаться через каждые 10-50 км. Поэтому передаваемые на большие расстояния сигналы должны периодически усиливаться. В качестве оптических усилителей используют эрбиевые усилители, работающие на эффекте квантовой генерации (рис 44).

Входной сигнал с длиной волны λ_1 отличается от излучения от лазера накачки с длиной волны λ_2 . Причем $\lambda_2 < \lambda_1$ сделана для того, чтобы произошла перекрестная интерференция. Фильтры 3 и 7 не пускают λ_2 за пределы усилителя. Излучение лазера проходит по спирали, при этом возбуждает частицы эрбия. Его электроны переходят на более высокий но нестабильный энергетический уровень, потом переходят ниже теряя энергию на более стабильный энергетический уровень на котором создается инверсия населенности благоприятная для последующей рекомбинации, затем, под влиянием проходящего по волноводу сигнала с длиной волны λ_1 , переходят на нижний уровень, излучая при этом квант фотона с длиной волны λ_1 . таким образом происходит усиление и модуляция (отсутствие потерь в информационном содержании) исходного информационного сигнала.

Ловушка для фотонов

Такая ловушка представляет собой область в кристалле, выход излучения из которой запрещен в силу отсутствия в окружающем ловушку материале фотонной «зоны проводимости». Конструкция аналогична заряженному проводнику, окруженному со всех сторон диэлектриком. С другой стороны, задержание фотона, масса покоя которого равна нулю, принципиально отличается от задержания электрона, обладающего конечной массой. Здесь ситуация формально сходна с остановкой света, носителем которого являются фотоны.

Если остановить фотон в свободных условиях - и он исчезнет, так как вся его энергия связана с движением. Но в данном случае речь идет не о свободных фотонах, а о квазичастицах, образованных когерентным взаимодействием света с кристаллом - физики уже окрестили их тяжелыми фотонами (heavy photons).

При решении этой задачи исследователи научились преобразовывать информацию, которую несет свет, в когерентную атомную форму (и наоборот). Посылая лазерный импульс в специальным образом подготовленный пар рубидия, группе из Гарвардского астрофизического центра (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) под руководством Рона Уолсворта (Ron Walsworth) и Михаила Лукина удалось, во-первых, уменьшить групповую скорость импульса до нуля и, во-вторых, записать переносимую им информацию в форме атомной спиновой волны (коллективного возбуждения атомов рубидия).

Спиновая волна может быть представлена как упорядоченная структура в ориентации атомов, каждый из которых обладает свойствами маленького магнита. (спином и называется вектор магнитного момента атома). Такая волна когерентна и существует длительное время, что позволяет "консервировать" заключенную в импульсе света информацию и, когда необходимо, выпускать ее в виде такого же импульса.

Эксперименты по "хранению света" начались с облучения "управляющим" лазерным пучком стеклянной кюветы, заполненной парами рубидия при температуре около 70-90 °С. Излучение переводило атомы в состояние индуцированной прозрачности, в котором они (в обычном смысле) не могут поглощать свет. Затем кювета освещалась "сигнальным" световым импульсом, содержащим сохраняемую информацию. В парах рубидия скорость этого импульса падала примерно до 900 м/с. После попадания переднего фронта импульса в кювету (и, соответственно, его замедления) происходит пространственное сжатие (компрессия): с нескольких километров в вакууме до сантиметров в парах рубидия. Взаимодействуя с атомами, свет когерентно изменяет ориентацию их магнитных моментов и создает связанную систему из атома и фотона (поляритон).

Взаимодействие "свет-атом" приводит к тому, что поляритон движется как частица, имеющая собственную массу (эффективную массу). Одно из объяснений уменьшения скорости света заключается в том, что не имеющие массы фотоны "довешиваются" массивными атомами (образуя поляритоны) и поэтому теряют скорость.

Далее, исследователи остановили сигнальный импульс, постепенно выключая управляющий пучок. При этом все больше атомов "смешивается" со все меньшим количеством фотонов, увеличивая массу поляритонов и уменьшая их скорость. Когда управляющий пучок выключается полностью, поляритоны становятся чисто атомными, лазерный импульс - остановленным. За время хранения эта среда не излучает.

Итак, в кювете не остается фотонов. Энергия света не идет, как это обычно бывает, на "подогрев" атомов. Вместо этого фотоны "тратятся" на формирование атомной спиновой волны, сохраняя в ней всю информацию из сигнального импульса и "ожидая" ее освобождения (т.е. излучения импульса, идентичного начальному).

ДНК оригами

Конструирование объектов нанометрового размера является важной задачей современной науки. Актуальным направлением является принципиально новая технология, позволяющая «заставить» атомы и молекулы собираться в нужные структуры и затем эти структуры использовать в технике. Такая технология должна использовать дешевые и

доступные материалы, а самосборка сложной пространственной структуры системы должна легко «программироваться». Одним из таких материалов являются биополимеры (белки, ДНК, РНК). Однако не все биополимеры удовлетворяют поставленным условиям: к примеру, белки слишком сложно устроены, их трехмерная структура задается совершенно неочевидным образом множеством нековалентных взаимодействий и получить белок с произвольной структурой – нетривиальная и нерешаемая на данный момент задача. РНК в отличие от ДНК более реакциспособная молекула, а значит менее стабильная, легко разрушаемая.

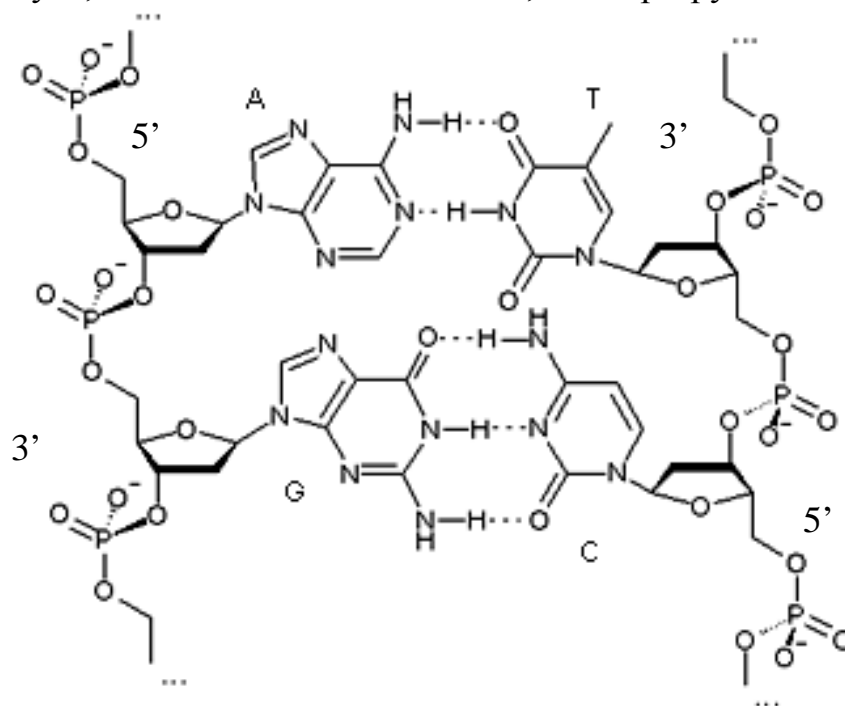


Рисунок 45 Комплементарность цепей в ДНК

Иное дело ДНК: одна нить ДНК состоит из монотонно повторяющегося сахаро-фосфатного остова (он асимметричен и имеет направление, различают 5` и 3` конец цепи, в зависимости от 3` или 5` свободного атома углерода в дезоксирибозном кольце в случае ДНК), к каждому сахару прикреплено одно из четырех типов азотистых оснований - аденин (A), Тимин (T), цитозин (C), гуанин (G). Таким образом, в ДНК есть только 4 типа мономеров, в отличие от 20 аминокислот в составе белка, что делает структуру ДНК намного проще. Две нити ДНК взаимодействуют друг с другом по принципу комплементарности: азотистые основания каждой цепи способны образовывать пары за счет водородных связей: А-Т – образуют две водородные связи, G-C - три (рис. 45).

Две цепи ДНК, последовательность которых комплементарна образуют двойную спираль. Энергия одной водородной связи (5 ккал/моль) не намного превосходит энергию теплового движения, а

значит, одна отдельно взятая водородная связь может быть с высокой вероятностью тепловым движением разрушена. Однако, чем больше водородных связей, тем более устойчивой становится система. Это значит, что короткие участки комплементарных оснований ДНК не могут образовать устойчивую двойную спираль, она будет легко «плавиться», однако более длинные комплементарные участки уже смогут образовать стабильные структуры.

Стабильность двухцепочечной структуры выражается одним параметром - температурой плавления (T_m). По определению, температура плавления - это температура, при которой в равновесии 50% молекул ДНК с данной длиной и последовательностью нуклеотидов находятся в двухцепочечном состоянии, а другие 50% - в расплавленном одноцепочечном состоянии. Очевидно, что температура плавления напрямую зависит от длины комплементарной области (чем длиннее - тем выше температура плавления) и от нуклеотидного состава (так как в паре Г-Ц три водородные связи, а в паре А-Т - две, то чем больше пар Г-Ц, тем выше температура плавления). Если же синтезировать одну нить ДНК, содержащую комплементарные области, то ДНК может изгибаться, чтобы эти области образовали двойную спираль, таким образом, появляются вторичные структуры типа «шпилька» (DNA hairpin).

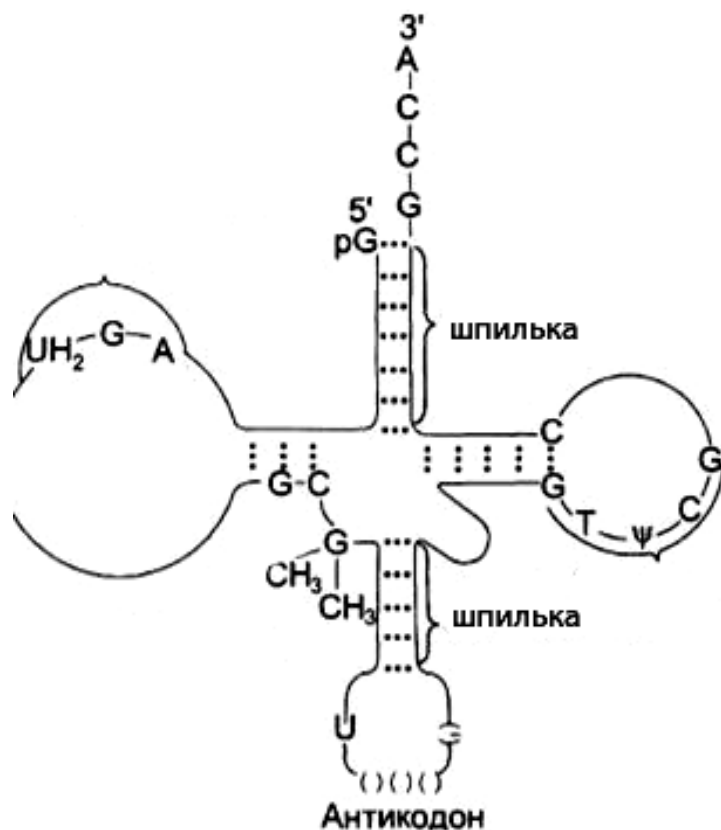


Рисунок 46 Структура тРНК

РНК в клетке существует в основном в одноцепочечном виде, часто

образуя множество таких вторичных структур (рис. 46)

С помощью химического синтеза можно напрямую синтезировать цепи ДНК длиной до 120 нуклеотидов (потом выход продукта существенно уменьшается). Если нужна более длинная цепь, то ее можно собрать из тех самых химически синтезированных фрагментов длиной до 120 нуклеотидов. Итак, можно легко и дешево делать ДНК любой последовательности, которые потом соберутся в интересующие нас сложные структуры. При этом такие структуры должны быть стабильны при комнатной температуре, значит нужно рассчитать температуру плавления для комплементарных участков и сделать ее достаточно большой. При этом на одной цепи ДНК можно делать много разных областей с разными последовательностями и слипаться будут только комплементарные.

Так как комплементарных областей может быть несколько, в результате молекула может свернуться достаточно сложным образом. Чтобы получить некую структуру нужно подобрать последовательность ДНК, которая в эту структуру свернется за счет взаимодействия комплементарных областей, но при этом в последовательности не должно быть ненужных взаимодействий, непредусмотренных нами комплементарных областей, образующих альтернативные структуры. Плюс структура должна отвечать другим критериям, например, иметь температуру плавления выше некоторой заданной величины. В результате имеем типичную оптимизационную задачу.

Двухмерные структуры из ДНК

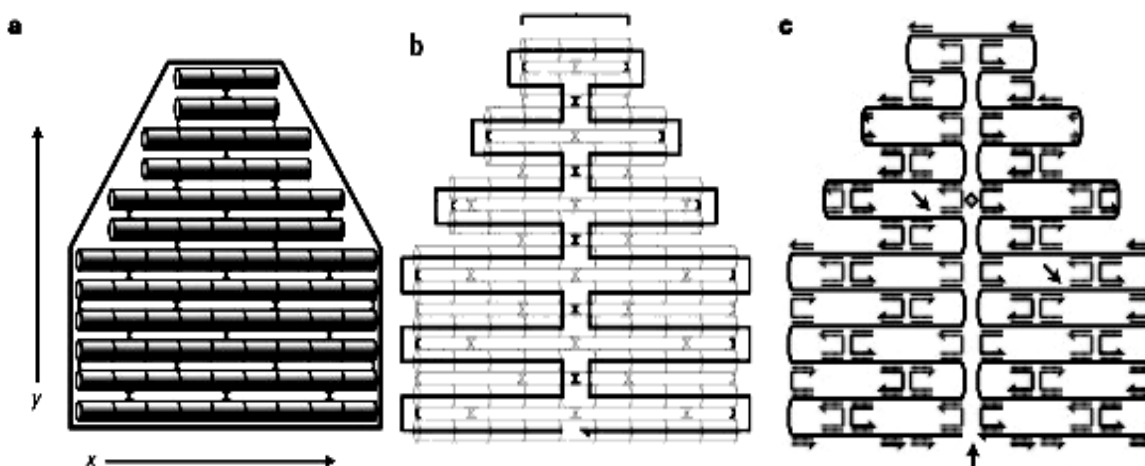


Рисунок 47 Для начала (a) нарисуем нужную нам форму и прикинем, как заполнить ее ДНК (представим ее на этом этапе в виде труб). Далее (b) представим, как провести одну длинную опорную молекулу по нужной нам форме (показана черной линией). На третьем этапе (c) подумаем, где мы хотим разместить «скрепки», стабилизирующие укладку длинной опорной цепи

Методологический прорыв устроил Paul Rothemund (Калифорнийский Технологический Институт) в 2006 году, именно он и придумал термин «ДНК-оригами» [16]. Принцип, предложенный им, достаточно прост: взять длинную (примерно 7000 нуклеотидов) «опорную» одноцепочечную молекулу ДНК и затем с помощью сотни коротких ДНК-скрепок, образующих двухцепочечные области с опорной молекулой, согнуть опорную ДНК в нужную нам двумерную структуру (рис. 47)

Чтобы собрать из химически синтезированных ДНК нужную структуру используют процесс плавления: водный раствор, содержащий все фрагменты ДНК, нагревают до 94-98 °С, при этом вся ДНК переходит в одноцепочечную форму. Затем очень медленно (в течении многих часов, в некоторых работах - в течении нескольких дней) охлаждают пробирку до комнатной температуры (эта процедура называется «отжиг»). При этом постепенно образуются заданные двухцепочечные структуры. В оригинальной работе в каждом эксперименте примерно 70% молекул успешно собирались в нужную структуру, остальные имели дефекты.

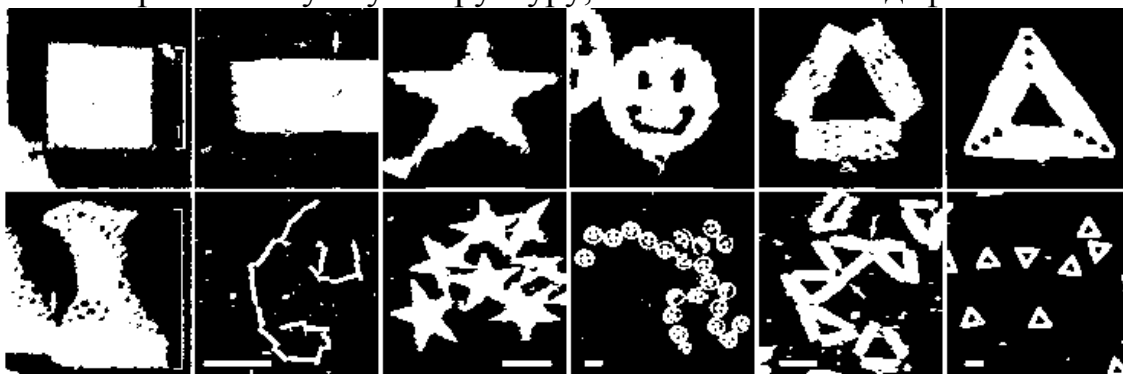


Рисунок 48 Различные 2-мерные фигуры, собранные из ДНК

Для того, чтобы показать, что ДНК собирается именно в заданную форму используют атомно-силовую микроскопию, но иногда используют и скую-SEM (электронную микроскопию). Из ДНК можно создать множество различных структур (рис. 48).

Трехмерные структуры из ДНК

Пионерами в конструировании трехмерных объектов была исследовательская группа из Института Скриппса в Ла-Холле, Калифорния, которые в 2003 году придумали, как из ДНК сделать нано-октаэдр [17]. Хотя эта работа и сделана на 2 года раньше плоского ДНК-оригами, в тот раз был решен лишь частный случай (получение октаэдра из ДНК), а в работе по ДНК-оригами было предложено общее решение, поэтому именно работа 2006 года по ДНК-оригами считается основополагающей.

Октаэдр был сделан из одноцепочечной молекулы ДНК длиной примерно 1700 нуклеотидов, имеющей комплементарные области и к тому

же скрепленной пятью 40-нуклеотидными ДНК-адаптерами, в результате был получен октаэдр с диаметром 22 нанометра.

В 2009 году ученые из Бостона и Гарвардского Университета опубликовали принципы построения трехмерного ДНК-оригами, по подобию пчелиных сот [18]. Одно из достижений этой работы — open-source программа caDNAno (<http://cadnano.org>) для конструирования трехмерных структур ДНК, позволяющую собрать нужную структуру из готовых блоков с использованием графического интерфейса, и рассчитать необходимую последовательность (или последовательности) ДНК, в эту структуру сворачивающуюся.

Следует упомянуть о работе [19] авторы которой предложили тип ДНК-модуля, трехмерной структуры, напоминающей «кирпичик» из детской игры LEGO. Это короткая (всего 32 нуклеотида) нить, имеющая четыре «липких» домена, содержащих комплементарные области для присоединения участков других нитей. Кирпичи при склеивании поворачиваются друг относительно друга на 90°. Таким образом, во-первых, благодаря такому повороту структура становится объемной, а во-вторых, поскольку 90° — это четверть полного, 360-градусного поворота, то каждый пятый кирпич в ряду будет принимать то же положение, что и первый, и двойные спирали, образуемые разными модулями, не будут друг на друга наезжать, а четко и аккуратно выстроятся в пространстве.

Затем из подобных кирпичиков можно собрать любые модели, при этом вместо того, чтобы каждый раз заново просчитывать новую модель Последовательность сборки следующая:

Вначале собирают большой куб (точнее, как можно более приближенный к кубу параллелепипед). Сборка такого параллелепипеда из ДНК предполагает соблюдение нескольких условий.

1. Последовательность каждого из модулей должна быть уникальна - то есть два кирпича могут быть либо полностью идентичны, либо полностью различны, наличие одинаковых доменов на разных кирпичах недопустимо - иначе два одинаковых домена с разных кирпичиков будут конкурировать за связывание с комплементарным себе доменом. Если первое условие соблюдено, то, встретившись вместе, кирпичики могут собраться одним и только одним способом, причем каждый кирпичик займет свое, уникальное место внутри параллелепипеда.

2. Последовательность нуклеотидов в каждом кирпичике должна быть такой, чтобы его домены слеплялись с доменами только соседних кирпичей и не возникало ситуации, когда один домен на кирпичике взаимодействует с комплементарным себе доменом на одном конце куба, а второй домен того же кирпича тянется к комплементарному себе домену на другом конце. Если соблюдено второе условие, то при соединении кирпичиков получится именно параллелепипед.

А затем на основе этого параллелепипеда можно создать почти любую трехмерную форму, выбросив из него ненужные кирпичи. Таким образом, один раз просчитав набор кирпичиков для параллелепипеда достаточно большого объема, можно собрать из этого набора почти любую объемную структуру, которая помещается внутри параллелепипеда. Однако надо помнить, что минимальная объемная точка (ворксел) в этой структуре не может быть меньше, чем объем витка двойной спирали, образованной комплементарными доменами двух кирпичиков, который составляет $2,5 \times 2,5 \times 2,7$ нм. Это накладывает определенные ограничения на построение объемных моделей.

Динамические структуры из ДНК

Следующий шаг в конструировании трехмерных нанообъектов - движущийся объект. Самый простой ДНК-шагоход (рис. 49) был сделан в 2007 году командой из Калифорнийского Технологического института [20].

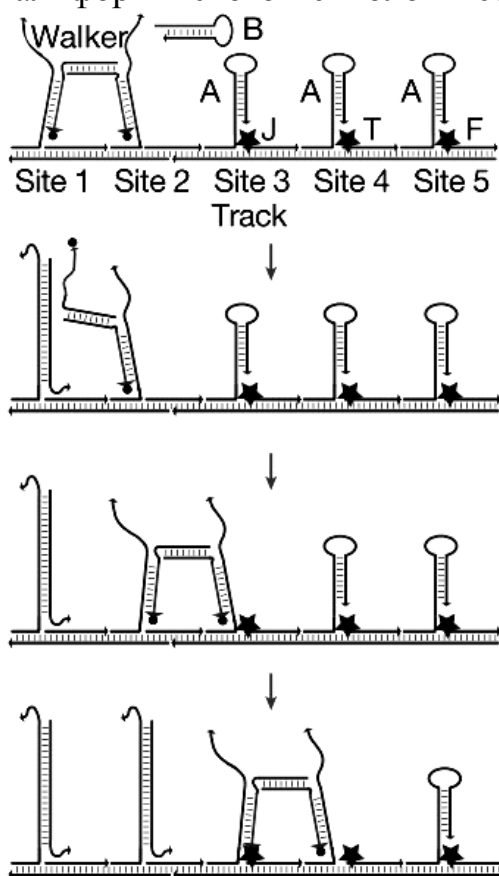


Рисунок 49 ДНК-шагоход

Работает он по следующему принципу: пусть есть одноцепочечная ДНК длиной, 100 нуклеотидов и другая одноцепочечная ДНК, короткая, длиной 50 нуклеотидов, комплементарная половине первой молекулы. При смешивании таких ДНК фрагментов образуется двухцепочечную структуру в районе комплементарных 50 нуклеотидов, вторая же половина

первой молекулы останется свободной. При этом если к этой структуре добавить еще одну молекулу ДНК, длиной 100 нуклеотидов и полностью комплементарной первой молекуле, она вытеснит короткую цепь длиной 50 нуклеотидов, так как обладает большим сродством к первой молекуле (у них сродство 100 из 100, а с короткой - только 50 из 100 нуклеотидов). Именно так и работал первый ДНК-шагоход. На подложке закреплены молекулы одноцепочечной ДНК, к ним из раствора приходит молекула-шагоход, имеющая комплементарные зоны к двум соседним цепям на подложке и связывается с ними. Если потом добавить в раствор другую ДНК, имеющую большее сродство к первой цепи на подложке, то она вытеснит одну ногу шагохода, после чего эта нога свяжется со следующей (третьей) цепью ДНК на подложке. Добавляя новые вытесняющие ДНК можно гнать шагоход все дальше и дальше по подложке. Обратный ход невозможен, так как предыдущие цепи на подложке уже инактивированы связыванием с более длинной молекулой ДНК.

Более сложный шагоход с несколькими «руками» и «ногами» создала группа исследователей из Нью-Йорка^[21] - они прицепили при помощи комплементарных ДНК на подложку «груз» (золотые частицы диаметром 5 и 10 нм) и «запрограммировали» шагоход таким образом, чтобы он прошел по подложке и собрал груз - три маленькие и одну большую золотые частицы. Принцип - тот же самый, вытеснение одной ДНК другой.

Еще один «наноробот для молекулярного транспорта», был создан группой из Бостона^[22]. Выглядит как «коробочка» из ДНК, закрывающаяся на «замок» из ДНК, который может быть открыт по уже известному нам принципу вытеснения одной ДНК другой, как в шагоходах. Внутри коробочки спрятан груз - частицы золота либо молекулы иммуноглобулина. ДНК можно химически модифицировать таким образом, чтобы на ней можно было закрепить этот самый груз. Итак, закрытая коробочка, содержимое которой надежно спрятано, при добавлении молекулы, открывающую коробочку, она открывается и иммуноглобулин, спрятанный внутри, выходит наружу и начинает действовать.

К сожалению, данная технология еще находится в стадии разработки, и ощутимой практической пользы пока нет, но, во-первых, ДНК может быть химически модифицирована, к ней могут быть добавлены химические группы, обеспечивающие связывание с другими молекулами и тогда ДНК можно использовать как подложку для построения сложных структур из других молекул. Например, если удастся сделать адаптер, связывающийся одним концом с ДНК, а другим - с нанотрубкой, тогда структуры из ДНК можно использовать для соединения нанотрубок. С другой стороны, уже есть сообщения о контролируемой металлизации ДНК, а отсюда уже рукой подать до конструирования электронных устройств на базе структур из металлизированной ДНК. Может быть,

ученые изобретут более подходящий полимер, обеспечивающий более удобную самосборку сложных структур, но в любом случае ДНК-оригами займет свое место в истории науки, как один из первых примеров конструирования сложных объектов в наномасштабе.

Литература

- ¹ Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др. Введение в физику поверхности / Под ред. В. И. Сергиенко. — М.: Наука, 2006. — 490 с.
- ² Melngailis J. Critical review: focused ion beam technology and applications // J. Vac. Sci. Technol. – 1987. – Vol. 5. – P.469.
- ³ Langford R. M., Philipp M. N., Gierak J., Fu, Y. Q. Focused Ion Beam Micro- and Nanoengineering // MRS Bulletin. – 2007. – Vol. 32. – P. 417 – 423.
- ⁴ Volkert C. A., Minor A. M. Focused Ion Beam Microscopy and Microengineering // MRS Bulletin. – 2007. – Vol. 32. – P. 389 – 399.
- ⁵ Sanket N. Bhavsar, Aravindan S. and Venkateswara Rao P. A Critical Review on Microtools Fabrication by Focused Ion Beam (FIB) Technology. World congress on engineering Vol. II. – London. 2009.
- ⁶ В.Я. Демиховский., Квантовые ямы, нити, точки. что это такое? // Соросовский образовательный журнал, N 5, 1997 г.
- ⁷ Mimura, T., The early history of the high electron mobility transistor (HEMT). IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 50, 3, 780-782, 2002.
- ⁸ A. El Fatimy, N. Dyakonova, Y. Meziani, AlGaIn/GaN high electron mobility transistors as a voltage-tunable room temperature terahertz sources, Journal Of Applied Physics, 107, 024504, 2010.
- ⁹ Д. В. Сивухин . Общий курс физики Т. 4: Оптика — Изд. 3-е, стер. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013 .
- ¹⁰ F. Balembois, S. Forget, Laser : Fundamentals // Spectroscopic systems used to create a laser, Prn1. univ-lemans.fr, 2009.
- ¹¹ Алферов Ж.И. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры / Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. // ФТП –1998. – Т. 32, № 4. - С. 385 - 410.
- ¹² Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах, М.: Мир, 1981.
- ¹³ Алферов. Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Жорес Алферов // ФТП – 1998. - Т.32, № 1. - С. 3 -18.
- ¹⁴ Баклицкая О. Нобелевские премии 2007 г. Гигантское магнетосопротивление — триумф фундаментальной науки // Наука и жизнь. 2007. №11.
- ¹⁵ А.В. Хвальковский, А.П. Пятаков, Гигантское магнетосопротивление: от открытия до Нобелевской премии, Бюллетень МАГО, т. 8, № 4 (2007)
- ¹⁶ Rothmund P. Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns. Nature.2006. 440, 297-302
- ¹⁷ Shih W., Quispe J.D., Joyce G.F. A 1.7-kilobase single-stranded DNA that folds into a nanoscale octahedron. Nature. 2004. 427, 618-621
- ¹⁸ Douglas S.M., Dietz H., Liedl T., Högberg B., Graf F., Shih W.M. Self-assembly of DNA into nanoscale three-dimensional shapes. Nature. 2009. 459,

414-418

19 Peng Yin et al. Programming DNA Tube Circumferences // *Science*. 2008. V. 321. P. 824–826

20 Yin P., Choi H., Calvert C.R., Pierce N.A. Programming biomolecular self-assembly pathways. *Nature*. 2007. 451, 318-322

21 Gu H., Chao J., Xiao S.-J., Seeman N.C. A proximity-based programmable DNA nanoscale assembly line. *Nature*. 2010. 465, 202–205

22 Douglas S.M., Bachelet I., Church G.M. A Logic-Gated Nanorobot for Targeted Transport of Molecular Payloads. *Science*. 2012. 335(6070), 831-834

Левичев Вадим Вячеславович

**Электронные и фотонные устройства: принцип
работы, технологии изготовления**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА НАНОТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Кафедра Нанотехнологий и материаловедения (НТМ) была создана в 1932 году как кафедра Металловедения. С 1998 года функционирует совместная кафедра материаловедения ИТМО-ИАНП РАН, что позволило наиболее полно использовать потенциал методических и материальных возможностей ИТМО и ИАНП РАН.

С 2008 года на кафедре НТМ функционирует кластер «Нанодиагностика и наномодификация материалов» научно-образовательного центра в области нанотехнологий Университета ИТМО, входящего в национальную нанотехнологическую сеть.

Кафедра нанотехнологий и материаловедения (НТМ) проводит исследования и разработки в области приборов и методов для нанотехнологий и нанобиотехнологий.

В настоящее время в рамках международной лаборатории «Метаматериалы» Университета ИТМО разрабатываются новые подходы к созданию и исследованию функциональных твердотельных наноструктур и нанобиосистем.

Образовательный процесс на кафедре НТМ неразрывно связан с научными исследованиями, активное участие в которых принимают учащиеся бакалавриата, магистратуры и аспирантуры. Кафедра оснащена современным нанотехнологическим оборудованием.

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49