

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Физический факультет
Кафедра общей физики

А. Л. Асеев

ПОЛУПРОВОДНИКИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Новосибирск
2023

УДК 621.315.592+539(075)

ББК В379.2я73-1

А901

Рецензенты:

академик РАН, д-р физ.-мат. наук А. В. Латышев,
член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук А. В. Двуреченский

Асеев, А. Л.

А901 Полупроводники и нанотехнологии: учеб. пособие / А. Л. Асеев ;
Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2023. – 144 с.

ISBN 978-5-4437-1360-1

В пособии приводятся лекции академика А. Л. Асеева в рамках курса современной экспериментальной физики под руководством профессора В. И. Тельнова для магистрантов физического факультета НГУ. Главной целью пособия является изложение базовых знаний и современного состояния физики и технологии полупроводников как основы стремительного развития информационных и телекоммуникационных технологий на рубеже XX и XXI веков, во многом определяющих сегодняшнее развитие науки, общества и цивилизации в целом. Еще более впечатляющие горизонты связаны с интенсивным развитием нанотехнологий и их применением в традиционных и новых областях полупроводниковой электроники, таких как интегральные микросхемы сверхвысокой плотности, терабитная электронная память, нейропроцессоры, спинтроника и квантовые вычислители, интеллектуальные системы управления и энергосбережения, устройства связи и локационные системы, элементы СВЧ- и ТГц-электроники, оптоэлектроника и радиофотоника, экономичные источники освещения на полупроводниковых светодиодах, полупроводниковые лазеры и фотоприемные устройства тепло- и ночного видения. При подготовке данного пособия широко использовались результаты работ автора и его коллег, полученные в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Пособие может быть полезно студентам и выпускникам вузов, научным сотрудникам, преподавателям, сотрудникам высокотехнологических предприятий и всем работающим в этой интереснейшей области науки и технологий.

УДК 621.315.592+539(075)

ББК В379.2я73-1

ISBN 978-5-4437-1360-1

© Новосибирский государственный
университет, 2023

Оглавление

Энергетические зоны и транспорт электронов в полупроводниках	4
Изобретение транзистора и история твердотельных электронных устройств.....	9
Полупроводниковые приборы, интегральные схемы и планарная технология	15
Полупроводниковые технологии и компьютерная техника в СССР и РФ	29
Дерево полупроводниковой электроники	34
Полупроводниковые элементы силовой электроники.....	35
Кремний-на-изоляторе, радиационно-стойкая электроника, биосенсоры	39
Полупроводниковая память, мемристоры.....	45
Полупроводниковые наноструктуры и нанотехнологии	54
2D-электронный газ, целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла	67
Гетероструктуры для СВЧ-электроники и радиофотоники	71
Принц-технология, трубчатые сенсоры	74
Элементы солнечной энергетики	79
Квантовый транспорт в наноструктурах	82
Лазеры с вертикальным резонатором, источники фотонов.....	88
Квантовые точки Ge/Si, плазмоники.....	95
Полупроводниковые элементы тепловидения и терагерцового видения	99
Структуры с отрицательным электронным сродством и ночное видение.....	109
Эпитаксиальные структуры CdHgTe: фотоприемники и квантовые системы	114
Графен: открытие, свойства и перспективы применения.....	122
Квантовые биты в моноизотопном кремнии.....	128
Инфраструктура полупроводниковых нанотехнологий	136
Список литературы.....	141
Благодарности.....	143

Энергетические зоны и транспорт электронов в полупроводниках

В физике твердого тела, физике конденсированного состояния и в физике полупроводников базовыми представлениями являются разделы о химической связи и валентности, типах сил связи в твердых телах; типах и симметрии кристаллических решеток твердых тел, решетках Бравэ, свойствах обратной решетки, представления об ячейках Вигнера–Зейтца и зонах Бриллюэна; точечных (вакансии, междоузельные атомы, атомы примесей), линейных (дислокации) и двумерных (дефекты упаковки, антифазные границы и границы зерен) дефектах твердых тел; дифракционных методах исследования твердых тел; типах колебаний кристаллической решетки; тепловых, электронных, магнитных, оптических свойствах твердых тел и кристаллических полупроводников. В твердом теле вместо индивидуальных атомных орбит образуются коллективные, и подболочки отдельных атомов объединяются в единую для всего кристалла коллектив – зону [1]. Зонная теория занимает важнейшее место в понимании свойств твердых тел и полупроводниковых кристаллов и объясняет принципиальные различия в свойствах металлов, полупроводников и диэлектриков структурой их энергетических зон.

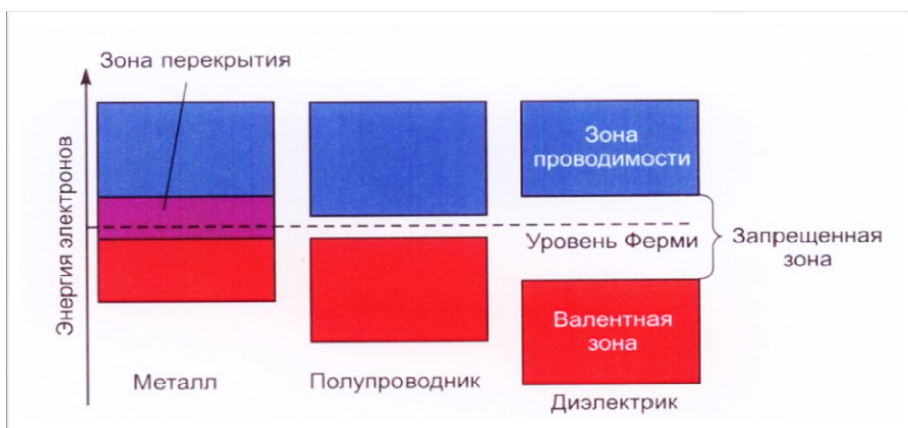


Рис. 1. Энергетические зоны металлов, полупроводников и диэлектриков

На рис. 1 видно, что в кристаллах металлов энергетические зоны перекрываются и носители заряда электроны не имеют препятствий для увеличения своей энергии, что является основой высокой электропроводности металлов. В полупроводниках и диэлектриках существует область энергии, запрещенная для движения носителей заряда, что

объясняет непроводящие свойства диэлектриков, к которым относят материалы с величиной запрещенной зоны E_g , превышающей значение 3 эВ. В полупроводниковых кристаллах, к которым относят материалы с величиной запрещенной зоны менее этого значения, движение электронов возможно при их забросе в зону проводимости за счет тепловой энергии, поглощении световых квантов – фотонов с энергией, превышающей E_g , а также при легировании полупроводниковых кристаллов атомами примесей. При этом в полупроводниках перенос заряда осуществляется как электронами (n – *negative*) в зоне проводимости, так и положительно заряженными дырками (p – *positive*) в валентной зоне. Особенности зонной структуры полупроводников отличают температурную зависимость металлов, в которых с повышением температуры проводимость уменьшается за счет взаимного рассеяния электронов при повышении температуры. В полупроводниках при увеличении температуры проводимость возрастает за счет увеличения концентрации электронов в зоне проводимости.

Важнейшим параметром электронной подсистемы кристаллов является положение уровня химического потенциала, называемого также уровнем Ферми E_F , который для металлов равен наивысшей энергии электронов. У полупроводниковых кристаллов уровень Ферми определяется нижеприведенной формулой, в которой E_C – энергия дна зоны проводимости, а m_p^* и m_n^* – эффективные массы дырок и электронов соответственно. В простейшем случае равенства эффективных масс и при нулевой температуре E_F располагается посередине запрещенной зоны, как это показано на рис. 1:

$$E_F = E_C - \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \cdot \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}. \quad (1)$$

Для физики полупроводников ключевыми являются представления об электронах и дырках в качестве основных и неосновных носителей электрического тока, донорных и акцепторных примесях; равновесной статистике электронов и дырок, представление об уровне Ферми; кинетических явлениях, включая дрейфовые и диффузионные токи, дрейфовую и холловскую подвижность; механизмы рекомбинации электронов и дырок; контактные явления, включая переходы между полупроводниками электронного и дырочного типов (*positive-negative junction*, *p-n*-переход), гетеропереходы; свойства поверхности полупроводников; оптические и фотоэлектрические явления, квантовые свойства полупроводниковых структур пониженной размерности и сверхрешеток.

Основой для понимания уникальных свойств полупроводниковых структур является p - n -переход, сформированный при контакте легированных, т. е. содержащих атомы примесей, полупроводников электронной (n) и дырочной проводимости (p). В этом случае уровень Ферми E_F в кристалле n -типа находится вблизи дна зоны проводимости, а в кристалле p -типа вблизи валентной зоны. Непосредственно в области p - n -перехода в равновесии формируется область, обедненная носителями заряда (рис. 2, а). При приложении электрического напряжения определенной полярности ширина обедненной зоны уменьшается, снижаются энергетические барьеры для движения носителей заряда, и p - n -переход становится проводящим (рис. 2, б). При обратной полярности приложенного напряжения ширина обедненной зоны увеличивается, и ток через p - n -переход практически полностью отсутствует из-за возрастания энергетических барьеров для движения основных для каждого из легированных кристаллов носителей заряда (рис. 2, в). Именно благодаря резкому различию проводимости p - n -переходов для различных полярностей приложенного напряжения контакт кристаллов полупроводников обладает выпрямляющими свойствами, а полупроводники получили свое настоящее название.

Квантовая теория химической связи в твердых телах и полупроводниковых кристаллах лежит в основе понимания особенностей зонной структуры, механизмов взаимодействия между носителями тока, атомами примесей, фотонами и квантами упругих колебаний – фононами в кристаллах полупроводников.

На рис. 3 представлены результаты квантовомеханических расчетов зависимости энергии электронной и дырок в пространствах энергия-импульс для различных направлений в кристаллической решетке наиболее широко используемых полупроводников Si, GaAs и InSb. Указаны положения дна зоны проводимости E_C , потолка валентной зоны E_V , а также величина запрещенной зоны E_g , которая при комнатной температуре для Si равна 1,17 эВ, для GaAs – 1,42 эВ и для InSb – 0,17 эВ. Отметим, что кривизна параболических зависимостей $E(\mathbf{k})$ обратно пропорциональна величине эффективных масс носителей заряда m^* в соответствии с формулой $E(\mathbf{k}) = E_0 + \hbar^2 \mathbf{k}^2 / 2m^*$, где E_0 – константа, дающая край полосы данной зоны, $\mathbf{k}$ – значение волнового вектора.

Символом Γ обозначен центр зоны Бриллюэна, а символами L и X обозначены точки на краю зоны Бриллюэна, ограничивающей области разрешенных состояний энергии в $\mathbf{k}$ -пространстве обратной решетки кристалла [1].

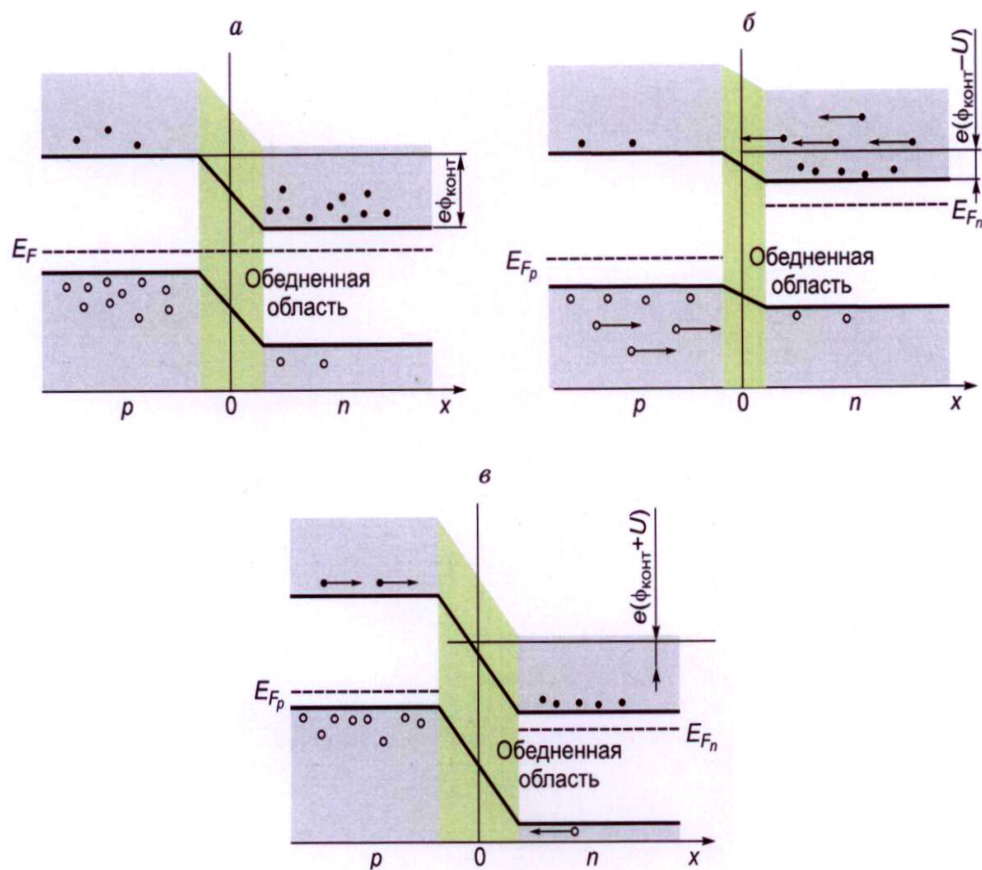
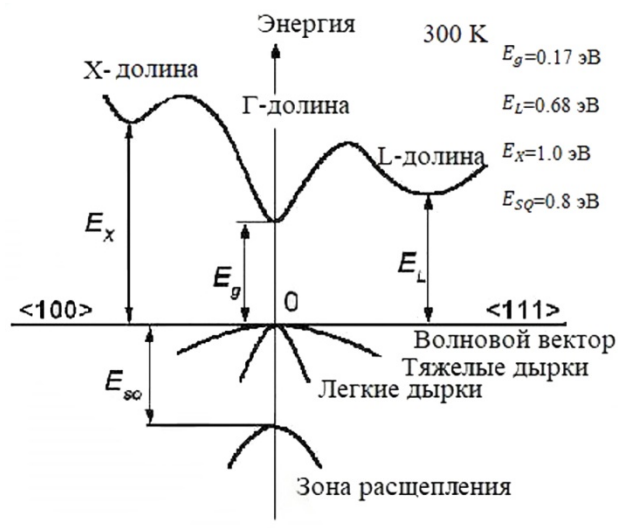
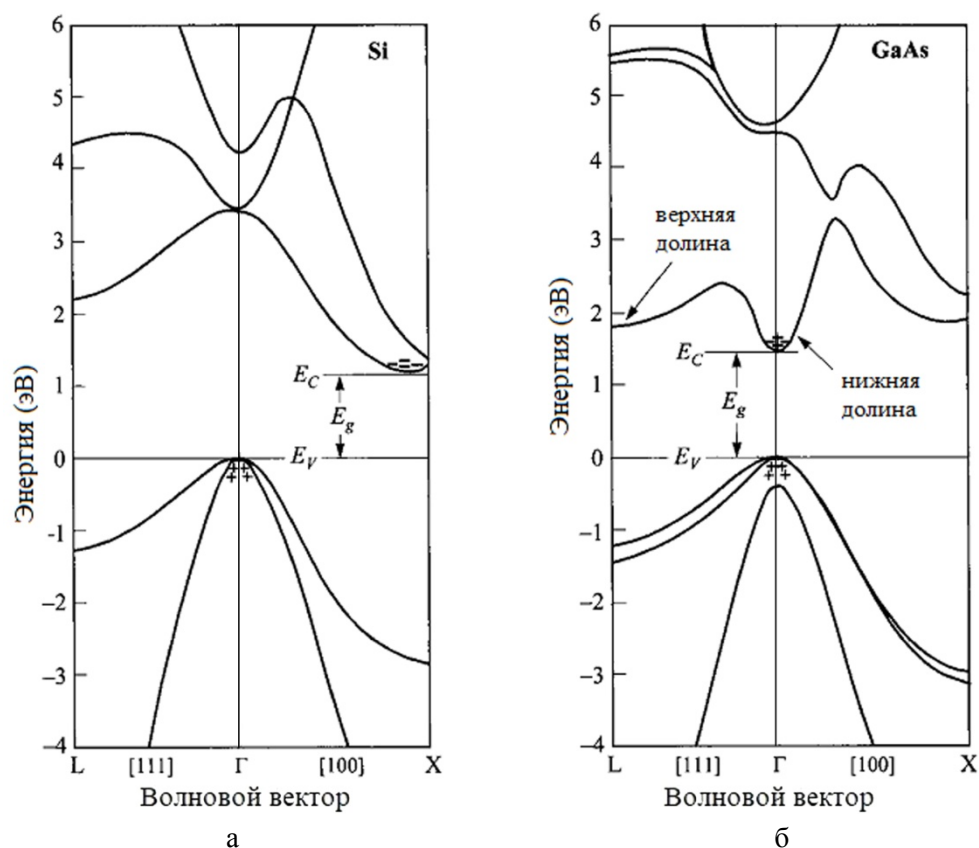


Рис. 2. Энергетическая диаграмма p - n -перехода: a – состояние равновесия; b – при приложенном прямом напряжении (положительный потенциал + слева); $в$ – при приложенном обратном напряжении (+ справа)

Другая важная особенность зонной структуры Si состоит в разнесенности максимума энергии дырок в валентной зоне и минимума энергии электронов в зоне проводимости в k -пространстве, что исключает прямые переходы электронов между зонами при поглощении фотонов, без дополнительного взаимодействия с возбуждениями кристаллической решетки – фононами. Это делает кремний оптически неактивным материалом и серьезно затрудняет конструирование элементов оптоэлектроники и фотоники на базе полупроводникового кремния. Напротив, в отличие от Si, GaAs является прямозонным материалом, в котором разрешены прямые переходы электронов между зонами при поглощении фотонов и генерация фотонов при рекомбинации дырок и электронов.



В

Рис. 3. Структура энергетических зон в полупроводниковых кристаллах Si (а), GaAs (б) и InSb (в)

На рис. 2, б видно, что в зоне проводимости GaAs существует дополнительная долина для тяжелых электронов (*upper valley*). Эта особенность является причиной появления доменов легких и тяжелых электронов при протекании тока в кристаллах GaAs. На этом явлении основано создание диодов Ганна, названных по имени первооткрывателя этого явления **Д. Ганна**, которые являются источниками сверхвысокочастотных колебаний с частотой до 100 ГГц. Как видно на рис. 2, в, в кристаллах InSb эффективная масса дырок существенно (около 10 раз) превышает эффективную массу электронов и в соответствии с формулой (1) при $T > 450^\circ\text{C}$ E_F находится в зоне проводимости. Это состояние называют вырожденным состоянием полупроводника.

Изобретение транзистора и история твердотельных электронных устройств

Начало полупроводниковой эры принято связывать с созданием полупроводникового транзистора в 1947 г. сотрудниками фирмы Bell Labs **У. Браттейном**, **Д. Бардиным** и **У. Шокли**, за что они впоследствии в 1956 г. были удостоены Нобелевской премии по физике (рис. 4).



Рис. 4. Изобретатели полупроводникового транзистора
Д. Бардин, У. Шокли и У. Браттейн

Первый транзистор был точечным и представлял собой пластинку кристалла германия n -типа, припаянного к металлическому основанию, который играл роль базового контакта (базы). Эмиттерным и коллекторным контактами являлись заостренные бронзовые проволоочки, прижатые к верхней стороне германиевой пластинки на расстоянии друг от друга в нескольких десятках микрон (рис. 5, а).

Коллекторный контакт формировался подачей импульса сильного напряжения, в результате чего атомы меди диффундировали в германий и в небольшой области превращали его в материал p -типа. При этом более медленная диффузия из бронзовой проволоки атомов фосфора формировала в коллекторной области дополнительный p - n -переход с коллекторной ловушкой. Именно для этой p - n - p -структуры предложенная У. Шокли теория транзистора оказалась наиболее приемлемой. Эффект усиления в транзисторе достигался за счет управления большим током в n - p -переходе база-коллектор с помощью небольшого тока неосновных носителей (дырок) через p - n -переход эмиттер-база. Свое название прибор получил от сокращения слов *transfer resistance*, т. е. переходное сопротивление. В дальнейшем были предложены более надежные конструкции сплавных биполярных транзисторов, получаемых сплавлением двух таблеток полупроводников одного типа проводимости с противоположных сторон в тонкий базовый кристалл полупроводника противоположного типа проводимости (рис. 5, б), а затем диффузионных и эпитаксиальных транзисторов, называемых так по технологии их получения.

В настоящее время основным типом транзисторов являются полевые униполярные транзисторы (Field Effect Transistor – FET) на структурах металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) или металл-оксид-полупроводник (МОП). Их структура и принцип работы поясняются на рис. 5, в. Полевой транзистор состоит из областей истока и стока с типом проводимости, противоположной типу проводимости подложки.

Между ними располагается область затвора, изолированная от подложки слоем диэлектрика. При положительном напряжении на затворе для карманов n -типа в подзатворной области образуется проводящий канал, что отвечает открытому состоянию транзистора и току между истоком и стоком. При противоположном напряжении на затворе транзистор находится в закрытом состоянии.

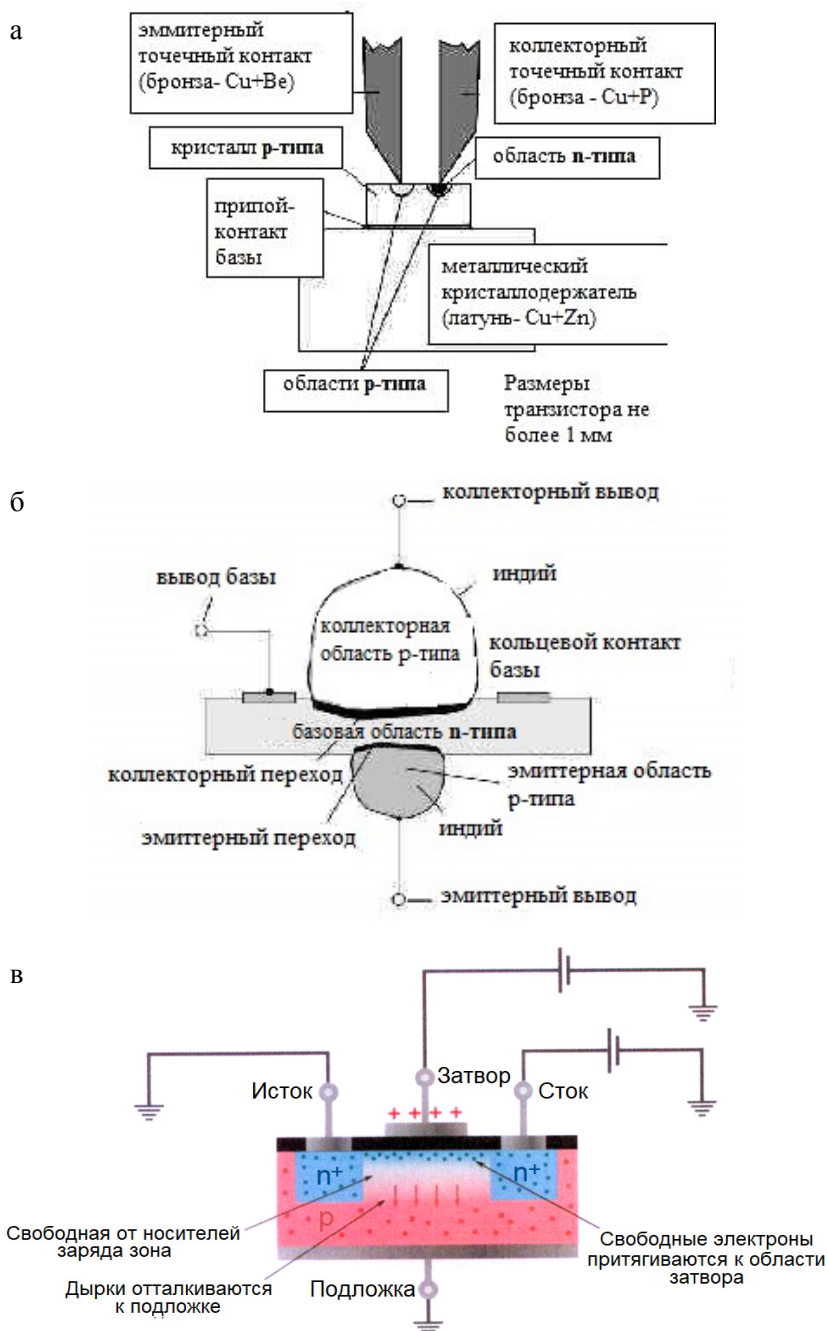


Рис. 5. Точечный транзистор У. Браттейна, Д. Бардина и У. Шокли (а), конструкция сплавного $p-n-p$ -биполярного транзистора (б), структура и принцип работы полевого транзистора полупроводник-диэлектрик-металл с индуцированным каналом n -типа (в)

Транзистор полностью управляется электрическим полем затвора и в отличие от рассмотренных выше биполярных транзисторов является униполярным, т. е. проводимость обеспечивается одним типом носителей заряда. Наличие границы раздела Si-SiO₂ с минимальной плотностью поверхностных состояний обеспечивает преимущество кристаллов кремния по отношению ко всем другим возможным полупроводниковым материалам, а способность осуществлять функции полупроводникового ключа является основой их применения в цифровой электронике.

Патент на полевой транзистор был заявлен **Ю. Лилиенфельдом** в 1928 г. с приоритетом от 1933 г. № 1900018 (рис. 6) на полупроводниковый прибор алюминий-оксид-сульфид меди, что предвосхитило почти на тридцатилетие его широкое применение в качестве полевого транзистора металл-диэлектрик-полупроводник.

Юлий Эдгар Лилиенфельд (*Julius Edgar Lilienfeld*; 18 апреля 1882, Львов — 28 августа 1963, Шарлотта-Амалия, Виргинские острова), физик, изобретатель полевого транзистора. Юлий Эдгар Лилиенфельд учился во Львовском университете и политехническом институте в Берлине (1900–1904, университет Фридрих-Вильгельма), где слушал лекции, в частности, М. Планка. Доктор наук (1905). С 1910 по 1926 гг. был профессором Лейпцигского университета. В США с 1926 г. Знание инженерных наук помогало Ю. Лилиенфельду в его деятельности изобретателя. Ещё в Германии он сотрудничал с изобретателем и производителем стратостатов Ф. Цеппелином, исследовал рентгеновское излучение. В США разрабатывал новые виды радиоприемников. Исследователь и изобретатель активно общался с коллегами, выдающимися учёными, в частности, переписывался с Альбертом Эйнштейном. Ю. Лилиенфельд зарегистрировал в Германии 15 патентов, а в США — 60.



Важно напомнить, что в 20-е гг. прошлого столетия выдающийся российский исследователь **О. В. Лосев** обнаружил эффекты усиления слабых радиосигналов и возбуждения незатухающих колебаний в двухэлектродном приборе на основе контакта угольной проволоки с кристаллом цинкита ZnO. Создание в 1922 г. О. В. Лосевым в Нижегородской лаборатории радиоприемника, названного кристаллическим

гетеродином – **кристадином**, явилось первым в мире использованием полупроводникового прибора для практической реализации в технике радиосвязи. Лосев также установил фундаментальную закономерность: генерация или усиление радиосигналов требует отрицательного дифференциального сопротивления контактного устройства. О. В. Лосеву принадлежит и открытие явления люминесценции – способности полупроводниковых кристаллов излучать свет при протекании через них электрического тока.

March 7, 1933.

J. E. LILIENTELD

1,900,018

DEVICE FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENT

Filed March 28, 1928

3 Sheets-Sheet 1

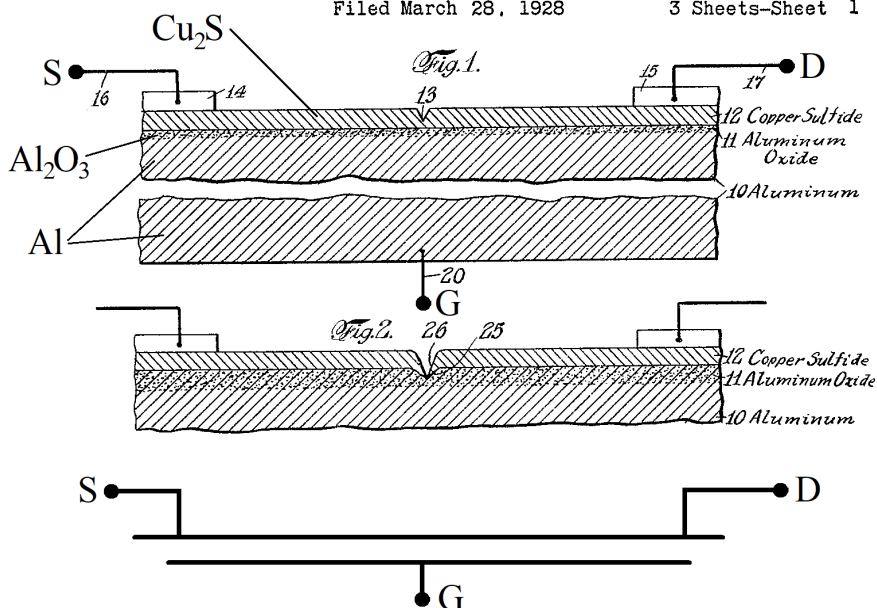


Рис. 6. Патент Ю. Лилиенфельда 1928 г.
на полупроводниковый прибор сульфид меди-оксид-алюминий

Изобретение Лосевым кристадина стало мировой сенсацией. К сожалению, пионерные работы О. В. Лосева значительно опередили свое время и оказались невостребованными, а сам изобретатель скончался в годы Великой Отечественной войны в блокадном Ленинграде. Лишь много лет спустя явление, экспериментально открытое советским радиолюбителем и исследователем, получило объяснение и дальнейшее использование. Детектор кристадина оказался прообразом современных туннельных диодов. А метод приема незатухающих колебаний на кристаллический детектор, генерирующий на частоте, близкой к частоте

принимаемого сигнала, стал важным вкладом в развитие техники приемников прямого преобразования, которые благодаря простоте схемы и высокому качеству работы с 1920-х гг. завоевали широкую популярность у радиолюбителей-коротковолновиков. Ныне кристадин Лосева хранится в Центральном музее связи им. А. С. Попова в Санкт-Петербурге. Из статей И. Лобнера и В. В. Жирнова с Н. В. Суэтиным, опубликованных в сборнике [2], следует, что О. В. Лосев предвосхитил более чем на 30 лет открытие Л. Есаки туннельного диода, отмеченного Нобелевской премией 1973 г., а также явился пионером оптоэлектроники, фактически открыв свечение контактных областей твердых тел задолго до изобретения светодиода Н. Холомьяком в начале 1960-х гг. Открытия О. В. Лосева тем более удивительны, что в 1920-х гг. квантовая механика твердого тела только начала формироваться, и не существовало таких важнейших представлений физики полупроводников, как зонная теория и роль примесей в полупроводниках. К сожалению, должной оценки современников работы О. В. Лосева не получили, и Россия на несколько десятилетий упустила возможность возглавить научный и технологический прорыв в физике твердого тела и в полупроводниковой электронике.



Олег Владимирович Лосев (27 апреля (10 мая) 1903, Тверь — 22 января 1942, Ленинград) — советский физик и изобретатель (15 патентов и авторских свидетельств), кандидат физико-математических наук (1938, за исследования по электролюминесценции, без защиты диссертации). Получил известность за изобретение генерирующего кристаллического детектора, экспериментальное измерение вольтамперных характеристик контактов кристалла с падающим (отрицательным) участком и открытие холодного свечения приконтактных областей кристаллов. Автор первых научных трудов, описывающих процессы, происходящие в поверхностных слоях полупроводника. Внёс большой

вклад в исследование электролюминесценции в твёрдых полупроводниках. Работал в Нижегородской радиолaborатории им. В. И. Ленина (1921–1928), затем в Центральной радиолaborатории и в Физико-техническом институте в Ленинграде, с 1937 на кафедре физики 1-го Медицинского института им. И. П. Павлова.

Полупроводниковые приборы, интегральные схемы и планарная технология

В СССР первые полупроводниковые транзисторы были созданы в конце 1940-х – начале 1950-х гг. группами под руководством **А. В. Ржанова** в Физическом институте АН СССР, под руководством **В. М. Тучкевича** и при активном участии будущего Нобелевского лауреата и академика **Ж. И. Алфёрова** в Физико-техническом институте АН СССР, под руководством **С. Г. Калашникова** в Институте радиотехники и электроники АН СССР и под руководством **А. В. Красилова** в НИИ «Исток».

По воспоминаниям А. В. Ржанова, «было много возни с точечно-контактными транзисторами, вопреки рекламным широковещательным заявлениям американцев о том, что, в отличие от вакуумных ламп, германиевые транзисторы – это вечное устройство, в котором никогда ничего не должно происходить, я убедился, что это вовсе не так. Там заведомо идут процессы на поверхности в «устье» сплавного контакта, благодаря которым у прибора есть вполне определенное время жизни, поскольку его характеристики со временем портятся. При разработке конструкции сплавного транзистора мы все это учли. Мы все это загоняли в специальную капсулу, содержащую два стеклянных ввода, которые могли быть герметизированы.

Ржанов Анатолий Васильевич (9 апреля 1920, Иваново – 25 июля 2000, Новосибирск), российский физик, академик РАН (1991; академик АН СССР с 1984). Труды по физике диэлектриков и полупроводников, полупроводниковой электронике. В 1941 г. окончил Ленинградский политехнический институт. Участник Великой Отечественной войны. После тяжелого ранения в 1943 г. был демобилизован. В 1948 г. окончил аспирантуру Физического института им. Лебедева, в котором начал первые в СССР работы по созданию полупроводникового транзистора. В 1962 г. по приглашению академика М. А. Лаврентьева переехал в новосибирский Академгородок, где организовал и возглавил Институт физики твердого тела и полупроводниковой электроники (впоследствии Институт физики полупроводни-

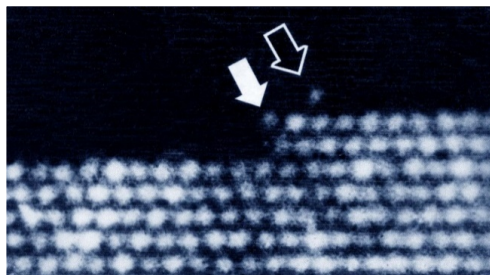


ков его имени). Открыл и исследовал пьезоэффект в поляризованной керамике на основе титаната бария. Создал и исследовал образцы точечно-контактных и вплавленных германиевых диодов и триодов. Изучал процессы объемной и поверхностной рекомбинаций в полупроводниках, происхождение и свойства поверхностных электронных состояний, разработал энергонезависимые матричные элементы памяти, различные приборы и устройства СВЧ-электроники и фотоприемные устройства от видимого до дальнего инфракрасного диапазона спектра излучения. В 1963—2000 гг. преподавал в Новосибирском государственном университете, где основал кафедру физики полупроводников.

Было принято решение правительственной комиссии – и наши образцы – полсотни, такое же количество образцов изготовления Ленинградского ФТИ, образцов промышленного НИИ, – поставить на длительное испытание стабильности во времени. Результаты этого испытания оказались такими, что и партии образцов НИИ и ФТИ погибли целиком за год. Может быть, один-два образца остались. У нас же наоборот – из пятидесяти образцов только несколько погибли. Это привело меня к убеждению, что исследованием поверхности и эффектов, которые лежат в основе процессов, происходящих на поверхности, нужно всерьез заняться» [3]. Важно отметить, что данный вывод А. В. Ржанова оказался удивительно точным в последовавшем в конце XX-го – начале XXI в. стремительном переходе от микроэлектроники к наноэлектронике, в которой не только произошел переход к элементам нанометровым размерам, но и состоялось практическое использование принципиально новых квантовых эффектов в полупроводниковых системах пониженной размерности. В своей ставшей классической монографии [4] А. В. Ржанов это сформулировал следующим образом: «Опыт исследований поверхностных электронных процессов свидетельствует о крайней важности химической чистоты и структурного совершенства объектов исследования для получения результатов, ценных в научном и техническом отношении. В отношении поверхностных явлений это требование распадается на два. Во-первых, чрезвычайно высокие требования должны предъявляться к чистоте и совершенству структуры самого кристалла полупроводника, объемные свойства которого должны быть хорошо изучены. Во-вторых, весьма важным является требование химической определенности и возможной простоты структуры самой поверхности полупроводника или, точнее, границы раздела между полупроводником и покрывающей его защитной плёнкой».

В настоящее время можно с уверенностью сказать, что благодаря предвидениям академика А. В. Ржанова и многолетней успешной работе

всего коллектива Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН обладает наивысшей степенью компетенции в России и в мире в области атомной структуры и электронных свойств поверхности, границ раздела полупроводниковых систем, в физике и технологии полупроводниковых систем пониженной размерности, в развитии научных основ современной полупроводниковой электроники. В качестве примера приведем изображение в просвечивающем электронном микроскопе атомной структуры границы раздела Ge-GeO₂. Стрелками на фото указаны предположительно быстрое поверхностное электронное состояние (полная стрелка) и медленное поверхностное электронное состояние (контурная стрелка) [20].



Оценим минимальные параметры разделительного барьера для переключения состояний полевого транзистора при осуществлении вычислительных операций бинарной логики (рис. 7).

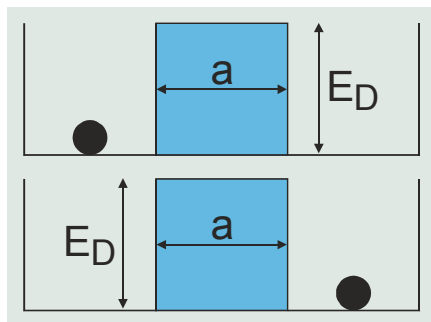


Рис. 7. Схематическое изображение разделительного барьера состояний бинарной логики

Из выражения **Шеннона–Неймана–Ландауэра** для минимальной высоты барьера или, другими словами, для обработки одного бита информации $E_{\text{bit}} = \exp(-E_D/k_B T)$ следует, что при $T = 300$ К $E_{\text{bit}} = 0,017$ эВ. Из соотношения неопределённости Гейзенберга $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$, $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ следуют значения минимального размера переключающих элементов $d_{\text{min}} = \hbar/(2m_e k_B T \ln 2)^{1/2} \approx 1,5$ нм, минимального времени переключения $t_{\text{min}} = \hbar/(k_B T \ln 2) \approx 0,04$ ps и максимальной плотности переключающих элементов $n_{\text{max}} = (d_{\text{min}})^{-2} \approx 4,7 \cdot 10^{13}$ см⁻². Эти значения близки к тем, достижение которых полупроводниковые технологии обеспечивают в настоящее время.

Типичное электронно-микроскопическое изображение поперечного среза МДП-транзистора с длиной канала 30 нм приведено на рис. 8 справа. В левой части этого рисунка приведено сравнительное изображение в просвечивающем электронном микроскопе фрагмента молекулы ДНК с поперечным размером 2,2–2,4 нм. Для надежной фиксации изображения молекула ДНК декорирована наночастицами золота с размером 10 нм. Видно, что размер МДП-транзистора сравним с поперечным размером ДНК молекулы.

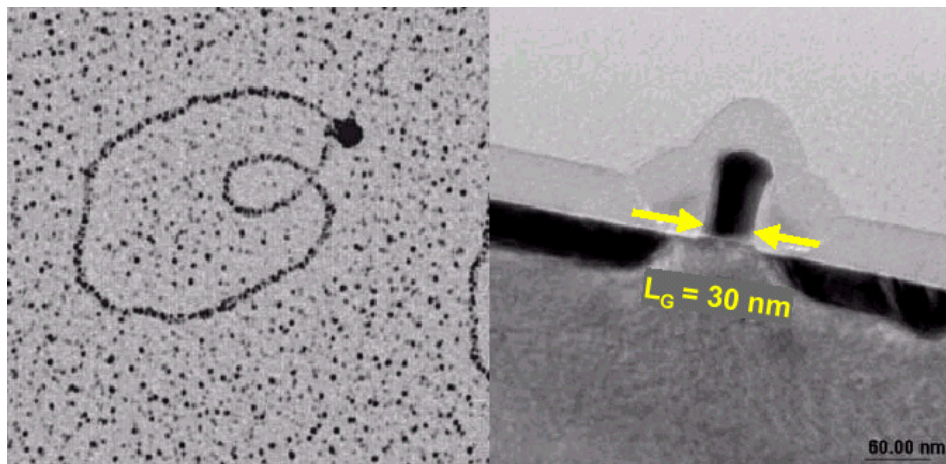


Рис. 8. Изображение в просвечивающем электронном микроскопе декорированной 10 нм наночастицами золота молекулы ДНК (слева) и изображение МДП-нанотранзистора с размером затвора 30 нм (справа)

При уменьшении площади транзисторов падает емкость затвора C и уменьшается ток насыщения на вольтамперной характеристике МДП-транзистора I_D согласно приведенным ниже формулам (2), где W и L – ширина и длина канала, соответственно, μ – подвижность носителей, C_{inv} – емкость затвора при нахождении канала в инвертированном состоянии, V_G – напряжение на затворе транзистора, V_T – напряжение формирования инверсионного канала (напряжение открытия транзистора), S и d – площадь затвора и толщина диэлектрика, соответственно, ϵ_0 – электрическая постоянная:

$$I_D = \frac{W}{L} \mu C_{inv} \frac{(V_G - V_T)^2}{2}, \quad C = \frac{k\epsilon_0 S}{d}. \quad (2)$$

Одним из способов увеличения емкости затвора при уменьшении размеров транзистора является уменьшение толщины подзатворного диэлектрика. Но при достижении толщины затвора менее 3 нм экспоненциально возрастает ток утечки, обусловленный туннелированием заряда через диэлектрик. Переход на изготовление подзатворного

диэлектрика из материалов с высокой диэлектрической проницаемостью позволяет увеличить его толщину, увеличивая емкость затвора и обеспечивая снижение тока утечки на несколько порядков по сравнению с более тонким диэлектриком из SiO_2 при равной емкости затвора. Среди диэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости – оксиды Al, Hf, Zr, Ta, Ti и др. Коэффициенты низкочастотной диэлектрической проницаемости k для наиболее распространенных диэлектриков составляют для SiO_2 – 3,9; Si_3N_4 – 7,0; Al_2O_3 – 10; HfO_2 – 12–40; ZrO_2 – 12–40; Ta_2O_5 – 25–100; TiO_2 – 40–170; Y_2O_3 – 16; MgO – 9,7; SrTiO_3 – 310.

Другая проблема при производстве высокоинтегрированных интегральных схем на кремнии связана с многоуровневой системой контактной разводки (до 10–15 слоев межсоединений), см. рис. 9, и увеличением времени задержки RC при передаче электрических сигналов за счет увеличения сопротивления R и увеличения паразитных емкостей C межсоединений [5].

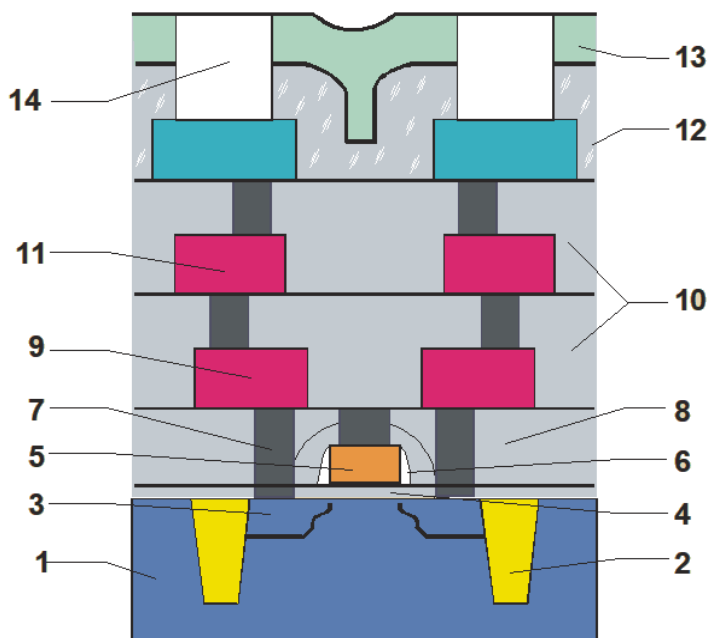


Рис. 9. Схема поперечного среза интегральной схемы, иллюстрирующая многоуровневую систему контактных межсоединений: 1 – кремниевая подложка; 2 – тренч; 3 – исток / сток; 4 – подзатворный диэлектрик; 5 – затвор; 6 – изоляция затвора; 7 – контакт; 8, 10 – диэлектрик с низкой диэлектрической постоянной; 9, 11 – Cu в оболочке TiO_2 ; 12 – фосфоросиликатное стекло; 13 – Si_3N_4 ; 14 – металлическая разводка

Для предотвращения задержек в качестве материала контактов вместо Al применяется более высокопроводящая медь, капсулированная в оболочку тугоплавких металлов Ti или Ta, их оксидов или нитридов для предотвращения диффузии быстро мигрирующих атомов меди в полупроводник (медь считается «убийцей» подвижности носителей заряда в кремнии). Для уменьшения емкостных связей межсоединений используют диэлектрики с малым значением диэлектрической проницаемости, такие как пористый SiO_2 (k менее 2,0), или органические соединения, например, силсеквиоксан ($k = 2,6\text{--}2,8$), см., например, [21].

Основным материалом современной электроники является кристаллический кремний, по-видимому, наиболее высокочистый и высокосовершенный материал за всю историю человечества. Выращиваемые из расплава методом Чохральского монокристаллы кремния имеют диаметр до 450 мм, длину до 2 м и достигают веса в сотни килограмм. При этом кристаллы практически не содержат дефектов кристаллического строения в виде дефектов упаковки, дислокаций и кластеров точечных дефектов – вакансий или междоузельных атомов. Содержание металлических примесей не превышает 10^{10} см^{-3} , а концентрация легирующих примесей варьируется обычно в диапазоне $10^{12}\text{--}10^{15} \text{ см}^{-3}$. Основной примесью в этих кристаллах является электрически нейтральный кислород с концентрацией $10^{15}\text{--}10^{16} \text{ см}^{-3}$, поступающий в расплав при высокой температуре выращивания из кварцевого стекла ростовых тиглей. Выращенные кристаллы разрезаются на пластины толщиной в доли миллиметра с помощью алмазных пил и полируются алмазными абразивами с применением химико-механической полировки (рис. 10).



Рис. 10. Пластины монокристаллического кремния диаметром 450 и 300 мм

Высочайшего совершенства достигли методы оптической микролитографии, которая в настоящее время является базовой при изготовлении элементов все меньших размеров в субмикронном и нанометровом диапазонах на полупроводниковых пластинах все большей площади. За полвека стремительного развития полупроводниковой промышленности было разработано несколько поколений высокотехнологического оборудования со все более ультимативными параметрами. В качестве примера на рис. 11 представлено изображение основного инструмента оптической литографии – высокопрецизионного оптического степпера, работающего для длины волны света в ультрафиолетовом диапазоне. Степпер разработан ведущим в мире производителем литографического оборудования – фирмой ASML (Advanced Semiconductor Materials Lithography).

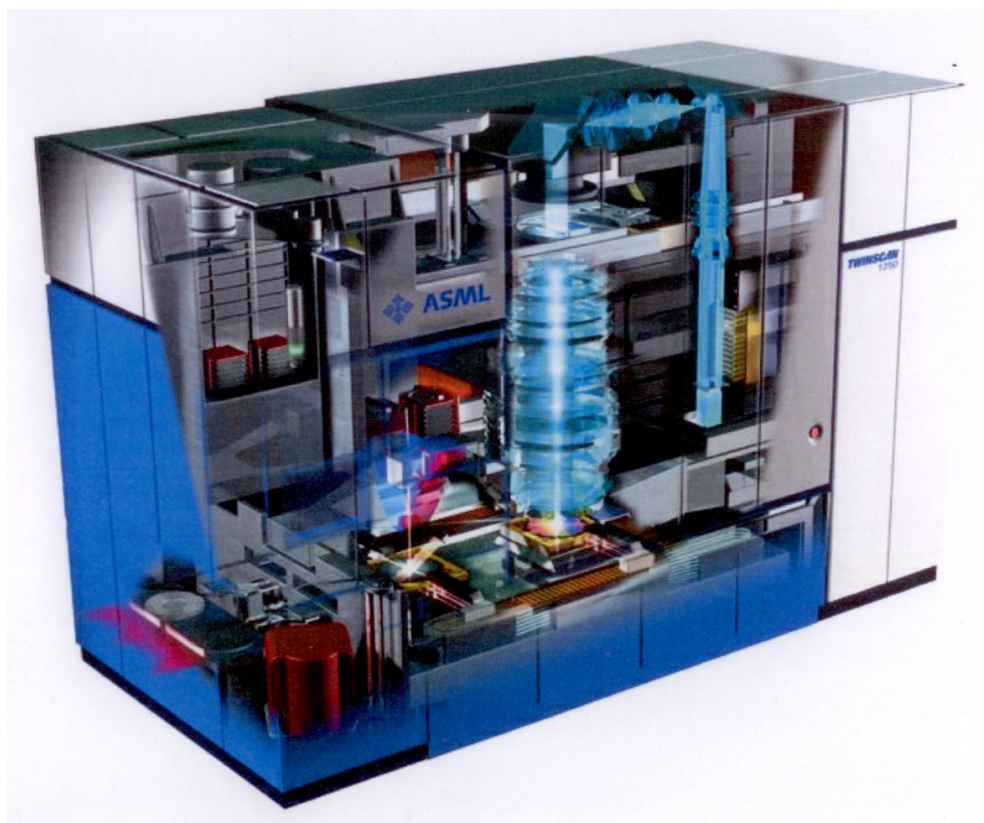


Рис. 11. Оптический степпер TwinScan 1250 фирмы ASML (Нидерланды)

Установка оснащена безабберационным высокоапертурным оптическим объективом разработки и производства фирмы «Цейсс». Вес объектива достигает полутонны, а размер – одного метра. Установка

обеспечивает проецирование рисунка фотошаблонов на поверхность кремниевой пластины, покрытой тонким слоем фоточувствительного резистора с последующей специальной обработкой для каждого слоя микросхемы (нанесение диэлектрика, ионно-плазменное травление, имплантация примесей, металлизация и т. д.) с повторением процедур фотолитографии и технологических обработок до сотни раз и более. Источником света является эксимерный лазер с длиной волны в глубоком ультрафиолете 193 нм, в настоящее время используются лазерно-плазменные источники с длиной волны в экстремальном ультрафиолете 13,5 нм. Используется иммерсионная и зеркальная оптика, что обеспечивает перенос изображений для данной установки с минимальным размером до 50 нм с производительностью до 100 пластин в час. Степперы ASML последующих поколений представляют собой сложнейшие инженерные системы и обеспечивают перенос рисунка с минимальным размером в несколько нанометров. Отметим, что базовым предприятием литографического оборудования для отечественной микроэлектроники в течение многих лет является ОАО «Планар» в Республике Беларусь.

Спустя полтора десятка лет после изобретения транзистора благодаря работам по созданию полупроводниковых интегральных схем и планарной технологии **Д. Килби**, **Р. Нойса**, **Ж. Эрни** и многих других реальностью стали интегральные микросхемы высокой степени интеграции. Вместе с развитием методов проектирования интегральных схем, с созданием математических алгоритмов и методов программирования произошли революционные изменения в развитии компьютеров и вычислительной техники. В 1958 г. в работах Д. Килби (Texas Instruments) и независимо в работах Р. Нойса (Fairchild Semiconductors) было предложено изготавливать и активные, и пассивные элементы, включая металлические соединения, в едином технологическом процессе изготовления полупроводниковых электронных схем. Позднее планарную технологию, состоящую в проведении параллельных технологических обработок для массива интегральных схем на одной пластине полупроводникового кремния, предложил Ж. Эрни (Fairchild Semiconductors). Ключевым при этом стал переход от изготовления точечных и сплавных транзисторов на германии к использованию полупроводникового кремния и полевых транзисторов с диоксидом кремния в качестве изолирующего слоя. Как описано в Нобелевской лекции Д. Килби [22], поначалу идея изготавливать не только активные, но и пассивные элементы электронных схем из кремния и слоев металлов, осаждаемых на поверхность полупроводниковых пластин, не встретила поддержки разработчиков. При этом одними из основных

аргументов оппонентов являлись, например, утверждения о низком качестве пассивных элементов микросхем и неремонтопригодности интегральных схем. Перелом наступил в связи с реализацией в 1960-е гг. в США программ по производству межконтинентальных ракет «Минитмен», и в особенности лунной программы «Аполлон», в которых ограничения по весу электронной аппаратуры и бортовых вычислительных комплексов, их надежности и функциональности оказались решающими в пользу применения интегральных схем на кремнии, изготавливаемых по планарной технологии в едином технологическом процессе. Так, в бортовом вычислительном устройстве космического корабля «Аполлон» использовано несколько тысяч интегральных схем, изготовленных по планарной технологии.

Именно благодаря указанным достижениям в технологии производства полупроводниковых интегральных схем на кремнии с 60-х гг. прошлого столетия начался бурный и неудержимый прогресс промышленности полупроводниковой микроэлектроники. Этот прогресс наиболее точно характеризуется эмпирическим законом одного из основателей фирмы Intel **Г. Мура** (Moore's law), который гласит, что плотность элементов интегральных схем удваивается, а проектная норма изделий микроэлектроники уменьшается вдвое каждые полтора-два года (рис. 12, 13). От нескольких десятков элементов в первых интегральных схемах современные интегральные схемы площадью около одного квадратного сантиметра насчитывают в настоящее время десятки и сотни миллиардов транзисторов и других электронных компонентов. Непрерывно уменьшается топологический размер (проектная норма) элементов, который с величины в десятки микрон в 1960-е гг. в настоящее время вплотную приблизился к рубежам в 22, 13, 7, 5 и 3 нанометров. Созданы лабораторные образцы полупроводниковых транзисторов с длиной затвора 0,7 нм, то есть активная область транзистора включает всего несколько отдельных атомов кремния.

В настоящее время мировая промышленность ежегодно выпускает миллиарды транзисторов на каждого жителя Земли. Прогресс в технологии изготовления полупроводниковых интегральных схем так велик, что если бы подобный прогресс был бы достигнут в автомобильной промышленности, то цена автомобиля сегодня составляла бы несколько центов, а на одной заправке автомобильного бака бензином можно было бы преодолеть расстояние от Земли до Луны. В авиаиндустрии прогресс, сравнимый с прогрессом в микроэлектронной промышленности, привел бы к длительности полета в несколько секунд вместо нескольких часов, а цена авиабилета составила бы несколько центов.

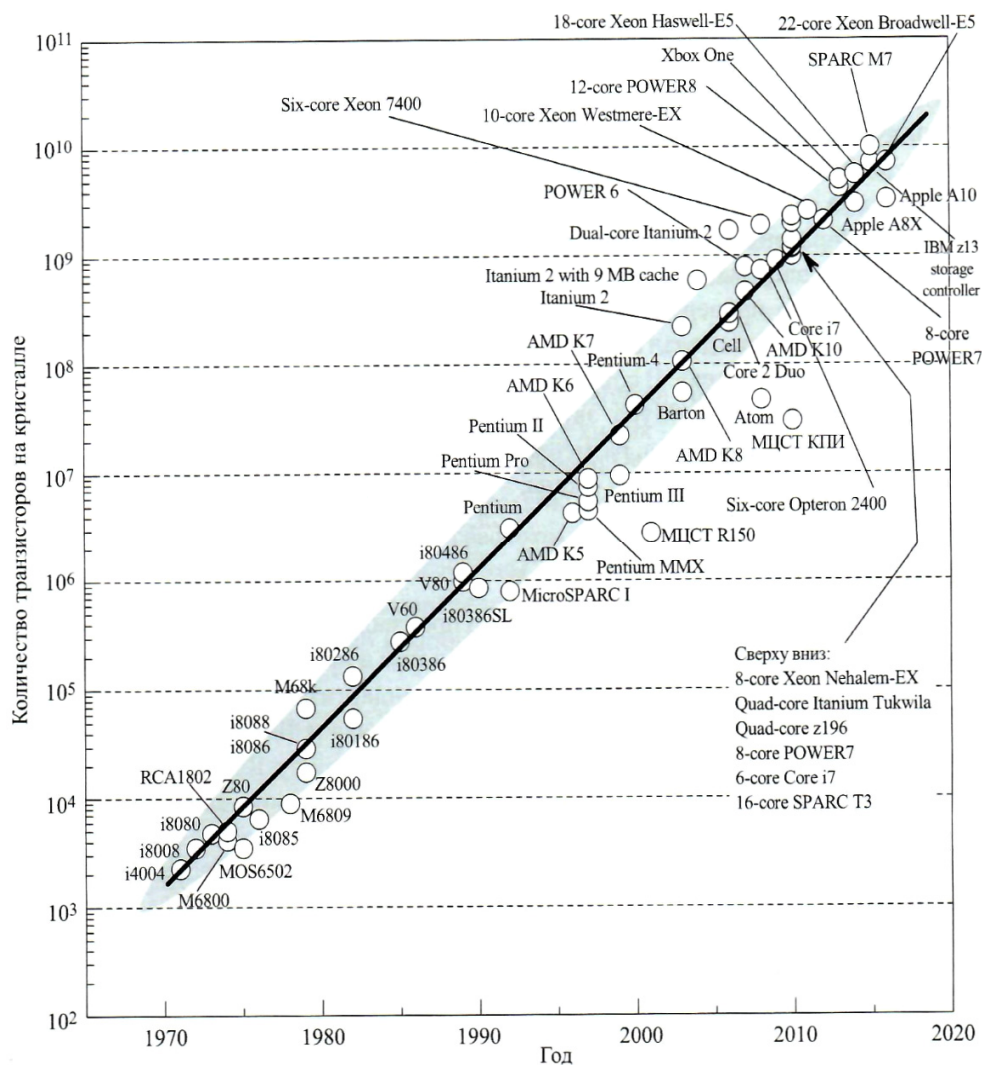


Рис. 12. Изменение количества транзисторов на кристаллах микросхем

В соответствии с интервью вице-президента ведущей европейской электронной фирмы ST Microelectronics **А. Астье**, опубликованного в 2013 г. (www.nanonewsnet.ru), в пирамиде добавленной стоимости в электронной промышленности объем производства интегральных схем (чипов) составляет около 300 млрд долларов США, при объеме производства оборудования около 40 млрд долларов США и объеме производства материалов более 40 млрд долларов США. При этом объем добавленной стоимости в электронной промышленности за счет

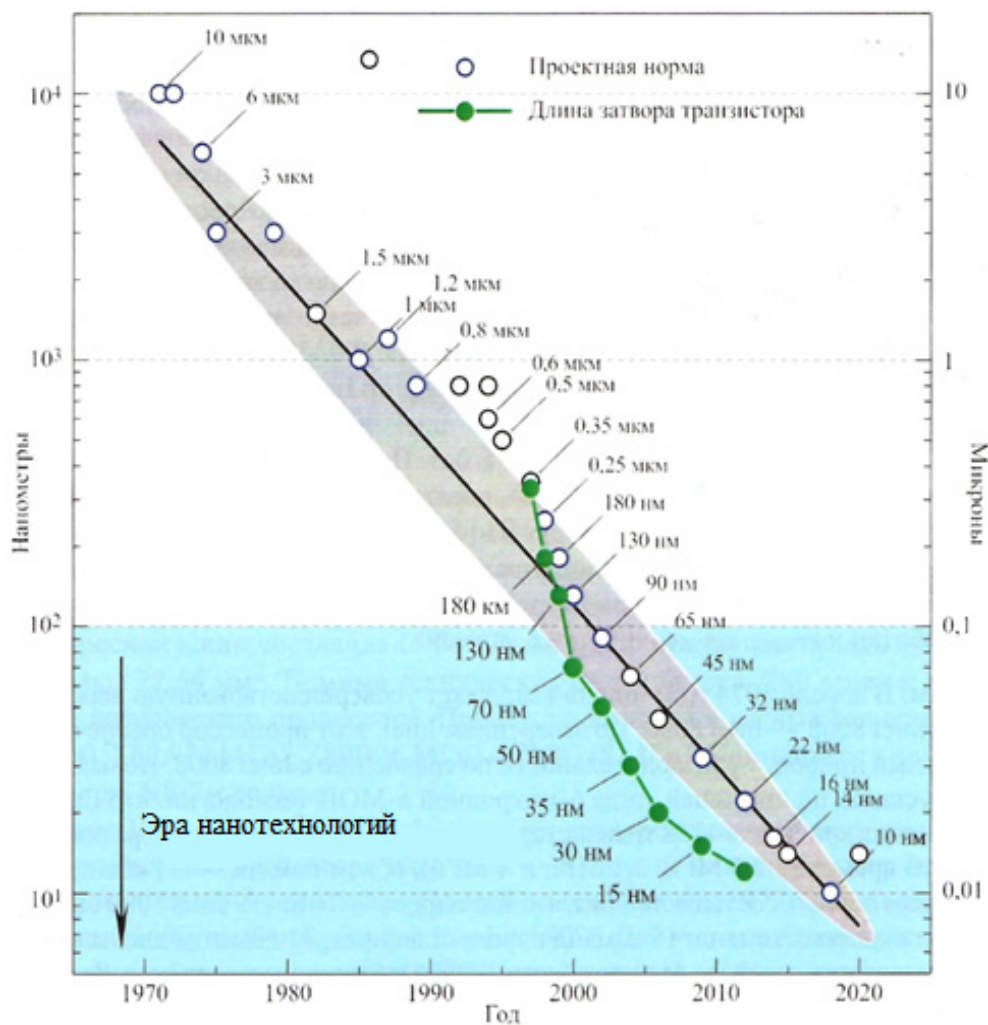


Рис. 13. Изменение проектной нормы и длины затвора полевых транзисторов по годам – закон Мура

провайдерских услуг в области телекоммуникаций и интернета составляет 6,8 трлн долларов США, т. е. около 10 % мирового валового продукта! Отметим, что из множества технологий полупроводниковой электроники, созданных за ее более чем полувековую историю развития и широко используемых при производстве интегральных микросхем и элементов микроэлектроники, одна из них, названная лазерным отжигом, открыта и разработана в России в 70-е годы прошлого столетия с участием сотрудников Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

профессоров **Л. С. Смирнова, Л. Н. Александрова, Г. А. Качурина** и **А. В. Двуреченского**. Последний из них является выпускником физического факультета НГУ 1968 г., в настоящее время член-корр. РАН, профессор кафедры физики полупроводников ФФ НГУ. Лазерный отжиг состоит в восстановлении кристаллической структуры ионно-легированных полупроводниковых пластин с аморфным слоем под воздействием импульсов наносекундной длительности при плотности мощности $\sim 10^7$ Вт/см⁻² [7].

В настоящее время дальнейшее уменьшение длины затвора МДП-транзисторов от 22 нм и далее до 14, 10, 7, 5 и 3 нм осуществляется различными конструкциями: классический планарный нанопроволочный МДП-транзистор на полностью обедненных носителями заряда тонких структурах кремний-на-изоляторе – FD FET (Fully Depleted Field Effect Transistors), см. рис. 14, *а*, этот тип конструкции развивается компаниями ST Microelectronics, IMEC (Европа), IBM, Global Foundries (США) и другими; новая конструкция нанопроволочных трехмерных непланарных FET, называемых «плавниковыми», а также «трехзатворными» – FinFET, или Tri-GateFET, развивается Intel, AMD, Samsung, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) и др. (рис. 14, *б*, *в*). На рис. 14, *г* схематически изображен МДП-нотранзистор с круговым затвором (Gate All Around – GAAFET) и тремя горизонтально ориентированными нанопластинами (нанолистами) кремния, которые по сути представляют собой «положенный набок» FinFET (или Tri-gateFET) (кремний выделен серым цветом, затвор – зеленым, диэлектрик – голубым). Эта конструкция для МДП-транзисторов с длиной канала 12 нм и менее была предложена в 2017 г. и рассматривается в качестве основной при длине канала транзисторов вплоть до 5 нм и даже 2 нм, рис. 15 [23].

В 2021 г. ведущими производителями полупроводниковых микросхем фирмами IBM и Samsung предложена конструкция, согласно которой МДП-транзистор ориентирован вертикально рис. 14, *д*, на котором затвор окрашен голубым цветом. Этот тип транзистора, названный Vertical Transport FET (VTFET), предложен и разрабатывается IBM и Samsung. При этом ожидается двукратное повышение производительности интегральных микросхем, снижение энергопотребления на 85 %, а также обеспечивается действие закона Мура на ближайшие годы, рис. 16 (67th Annual International Electron Devices Meeting, December 11–15, 2021, San Francisco).

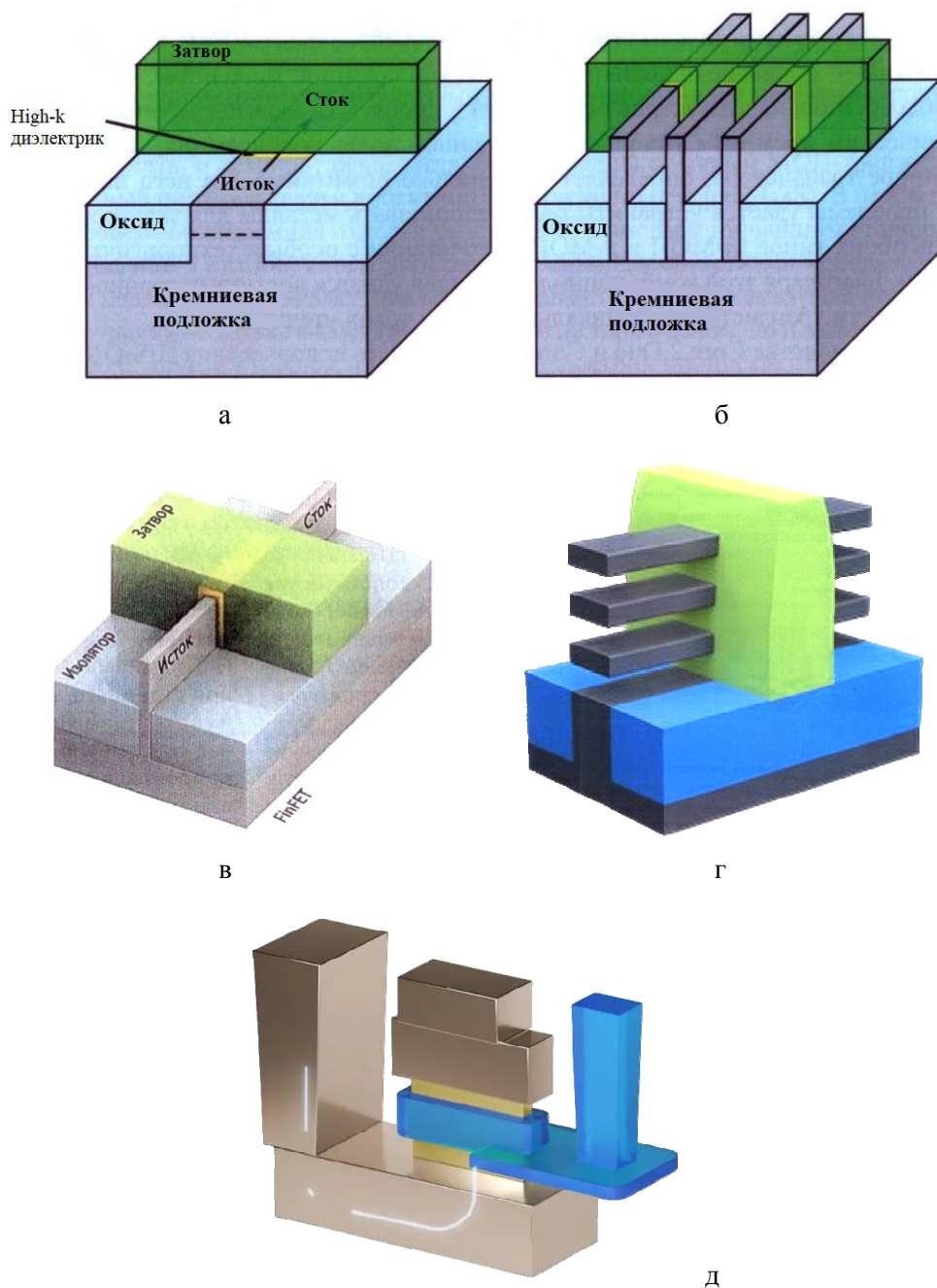


Рис. 14. Различные конструкции МДП-транзисторов: классический со слоем high- k диэлектрика (а); трехзатворный (б); «плавниковый» (в); с круговым затвором и тремя нанопластинами кремния (gate all around – GAAFET) (г); вертикальный VTFET (д)

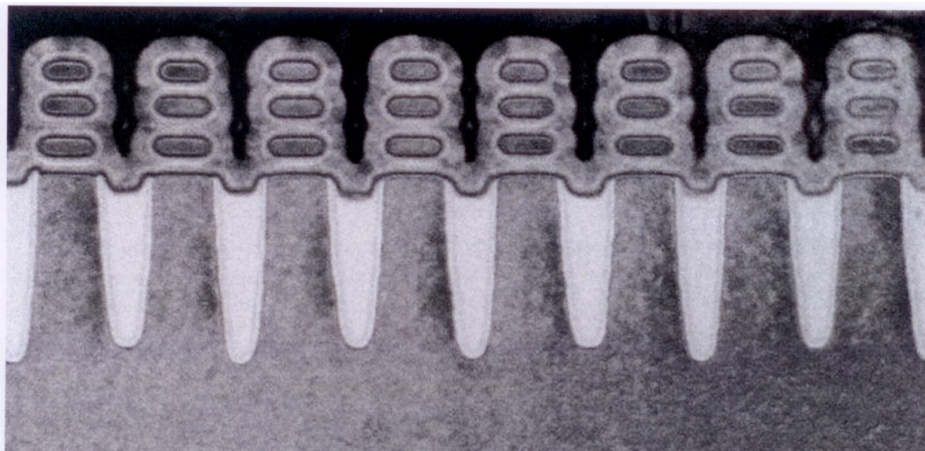


Рис. 15. Изображение в просвечивающем электронном микроскопе поперечного среза МДП-транзисторов с длиной канала 5 нм в кремнии, изготовленных фирмой IBM по технологии горизонтально расположенных нанопластин кремния (по три в каждом транзисторе) с круговым затвором – GAAFET

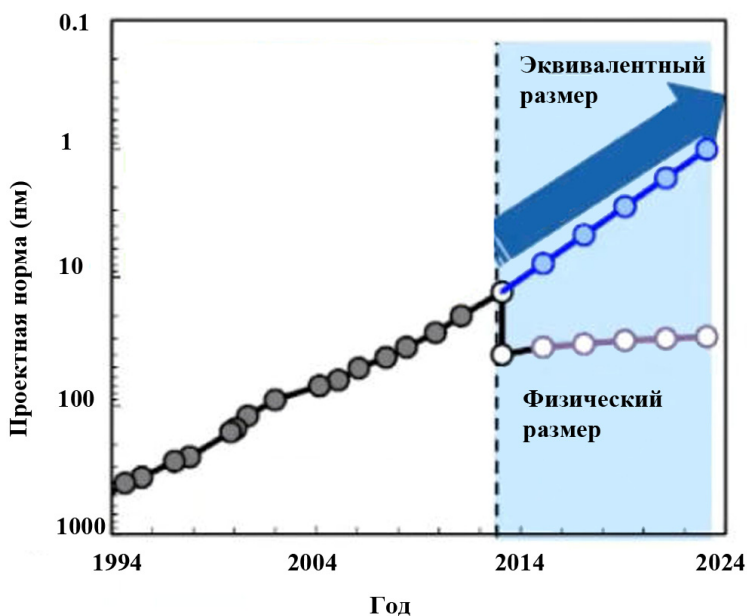


Рис. 16. Закон Мура в последние годы при использовании конструкции вертикально ориентированных транзисторов VTFET, по версии IBM и Samsung. Показано уменьшение эквивалентного размера транзисторов при сохранении их физического размера за счет вертикальной конструкции. Голубым цветом показан переход от двумерной логики NAND (HE-I) памяти к трехмерной энергонезависимой памяти (NVM) с 2014 года

Полупроводниковые технологии и компьютерная техника в СССР и РФ

Подлинная революция в производстве компьютеров началась с применением полупроводниковых транзисторов и, в дальнейшем, интегральных схем. Первый компьютер на полупроводниковых транзисторах был создан фирмой NCR (National Cash Register) совместно с компанией General Electric в 1957 г. Все это обеспечило бурное развитие полупроводниковой микро- и нанoeлектроники, начиная со второй половины XX в. и по настоящее время. Непосредственную основу полупроводниковой революции представляют классическая и квантовая физика, включая законы механики, в том числе волнового движения, молекулярную физику и термодинамику, электричество и магнетизм, оптику, физику атомного ядра и элементарных частиц.

Первая в СССР и в континентальной Европе вычислительная машина МЭСМ (малая электронная счетная машина) на электровакуумных лампах была построена под руководством академика **С. А. Лебедева** в 1951 г. в Институте электротехники АН УССР в Киеве. С. А. Лебедевым и учеными его школы было создано три поколения ЭВМ и мощных вычислительных систем: ламповые МЭСМ, БЭСМ, М-20 и др.; полупроводниковые БЭСМ-6 и др.; машины и системы с использованием интегральных схем 5Э26, Эльбрус-2 и др. В 1996 г. С. А. Лебедеву решением правления международного Института инженеров электротехники и электроники (IEEE, США) было присвоено престижное звание Пионера компьютерной эры.

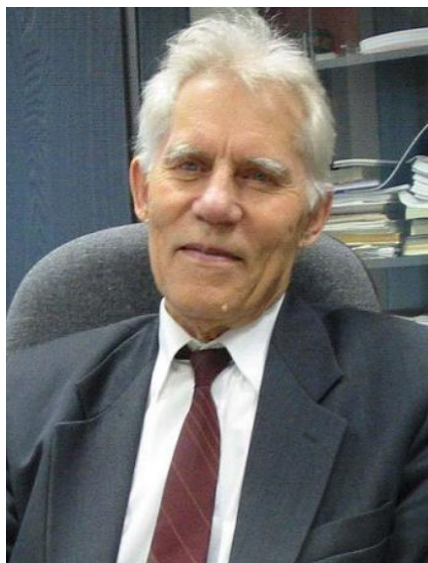
Согласно публикации статьи К. Дифендорфа в журнале Microprocessor Report под характерным названием “The Russians are Coming” сравнительные характеристики микропроцессоров E2k разработки АО «МЦСТ-Эльбрус» не уступают, а по производительности и другим параметрам превосходят микропроцессоры Merced фирмы Intel того времени [24].

Таблица 1

Сравнительные характеристики микропроцессоров E2k (Эльбрус) и Merced (Intel)

Микропроцессор	E2K	Merced
Тактовая частота, ГГц	1,2	0,8
Производительность, SPECint95/SPECfp95	135/350	45/70
Размер кристалла, мм ²	126	300
Энергопотребление, Ватт	35	60
Пропускная способность шины, Гбайт/сек	15	н/д
Кэш (Кбайт)	64/256	н/д
Пиковая производительность, GFLOPS	10,2	н/д

Центром отечественной микроэлектроники явился подмосковный Зеленоград, основанный в 1962 г. под руководством талантливых инженеров и организаторов **А. И. Шокина, И. В. Берга, Г. Ф. Староса, Ф. В. Лукина** и многих других. Был создан мощный комплекс научных, проектных и производственных организаций. Основополагающий вклад в становление и развитие отечественной микроэлектроники внес академик **К. А. Валиев**, который в 1965 г. возглавил базовое предприятие микроэлектронной промышленности – НИИ молекулярной электроники и завод «Микрон». Под руководством К. А. Валиева созданы первые отечественные интегральные микросхемы гражданского и специального назначения, что обеспечило необходимый паритет в развитии отечественных ЭВМ и систем для обороны и безопасности страны. В числе его научных заслуг – развитие физики субмикронной литографии для современной микроэлектроники. К. А. Валиев внес большой вклад в формирование новых направлений – физики квантовых вычислений, квантовой и информатики и квантовой криптографии. В 2020 г. Российская Академия наук учредила Золотую медаль им. К. А. Валиева за выдающиеся достижения в области микро- и нанoeлектроники.



Валиев Камиль Ахметович (15 января 1931 года – 28 июля 2010 года) – советский и российский физик, д-р физ.-мат. наук, профессор, академик АН СССР (1984). Выдающийся ученый и специалист в области теории спектроскопии (магнитный резонанс, молекулярное рассеяние и поглощение света), по которым были защищены кандидатская (1958) и докторская (1963) диссертации. В 1965–1978 гг. возглавлял НИИ молекулярной электроники и завод «Микрон» в подмосковном Зеленограде. Основал и заведовал кафедрой интегральной электроники и микросистем Московского института электронной техники (МИЭТ). Основатель, первый директор и научный

руководитель Физико-технологического института РАН, лауреат Ленинской премии (1974).

В настоящее время благодаря работе команды менеджеров АФК «Система» и коллективов ОАО «НИИ молекулярной электроники» и АО «Микрон», возглавляемых талантливым ученым и руководителем

академиком **Г. Я. Красниковым**, ныне Президентом РАН, на предприятии АО «Микрон» организовано лучшее в России и одно из лучших в мире современное промышленное производство полупроводниковых интегральных микросхем (ИМС) с проектными нормами 180, 90 и 65 нм, есть задел для создания отечественной технологии производства интегральных микросхем с проектными нормами 45 и 22 нм, освоен выпуск широкой номенклатуры изделий микро- и наноэлектроники, включающий микросхемы промышленного применения (аналоговые микросхемы, конвертеры и интерфейсные ИС, ЦАП/АЦП, память, заказные специализированные ИС); микросхемы управления питанием (стабилизаторы, конвертеры, драйверы); чипы для паспортно-визовых документов и карт с высокой степенью защиты (чип биометрического паспорта, чип социальной карты) и др. Решена задача производства отечественной элементной базы для телекоммуникации и связи, космической и авиационной техники, медицины и транспорта, для всевозможных социальных приложений, таких как SIM-карты для мобильных телефонов, чипы для электронных паспортов, банковских карт, проездные карты метро и др. Так, бесконтактные бумажные карты (БСК) с кристаллом, спроектированным и изготовленным в ОАО «НИИМЭ и Микрон» по технологии 180 нм, полностью обеспечивают потребность в транспортных билетах Московского метрополитена и поставляются транспортным предприятиям многих регионов страны от Москвы и Санкт-Петербурга до Владивостока, а также за рубеж. В 2013 г. IEEE (международный Институт инженеров по электротехнике и электронике – мировой законодатель стандартов по радиоэлектронике и электротехнике) признал кристалл для карт общественного транспорта самым экономически эффективным. Объем производства и поставок БСК обеспечивает проездными документами ежедневно более 11 млн человек. Разработан чип-модуль для универсальной электронной карты (УЭК), являющийся одновременно идентификационным документом и банковской картой, который в составе УЭК уже поставляется в 32 региона России. В 2014 г. УЭК эмитирована для 10 млн человек в более чем 40 регионах России. Самому передовому мировому уровню соответствуют созданные в ОАО «НИИМЭ» микросхемы встраиваемой флэш-памяти, благодаря чему Россия стала восьмой страной в мире, обладающей такой технологией. Технологии и элементная база СБИС с энергонезависимой памятью стали основой для разработки и производства средств радиочастотной идентификации (RFID-технологии). Только за последние годы на рынок выведен целый ряд новых наукоемких и высокотехнологичных изделий, соответствующих мировому уровню.

Созданное в ОАО «НИИ молекулярной электроники и завод «Микрон» современное производство не только удовлетворило запросы разработчиков предприятия, но и дало возможность другим российским дизайнерским командам реализовать проекты в России, а не на зарубежных фабриках. Особое значение запуск нового производства имеет для отраслей оборонного комплекса и ряда иных применений, где использование импортной элементной базы ограничено или вообще недопустимо с точки зрения безопасности страны.

Выдающимся достижением последнего времени коллектива ОАО «НИИ молекулярной электроники и завод «Микрон» явилось изготовление по технологии 90 нм двухъядерного процессора «Эльбрус», разработанного под руководством чл.-корр. РАН **Б. А. Бабаяна** и канд. техн. наук **А. К. Кима** в АО «МЦСТ-Эльбрус», с площадью кристалла 320 мм², количеством транзисторов 320 млн и производительностью 12 млрд операций. АО «Международный центр SPARC технологий» (Москва) – ведущий в России разработчик микропроцессоров «Эльбрус» с проектными нормами 130 нм (2005 г.), 90 нм (2010 г.), 65 нм (2014 г.) и 14 нм (2020 г.). Микропроцессоры применяются в основном для построения вычислительных комплексов «Эльбрус-3М» для нужд систем ПВО и ПРО Минобороны РФ. Изготавливаются на заводах АО «НИИМЭ» и ПАО «Завод Микрон» (Зеленоград) и «Taiwan Semiconductor Manufacturing Company» (TSMC) по российской документации. Представляют собой двух- и четырёхъядерные системы со встроенными кэш-памятью, контроллерами оперативной и периферийной памяти и по скорости обработки данных превышают или сравнимы с процессорами Pentium (рис. 17).

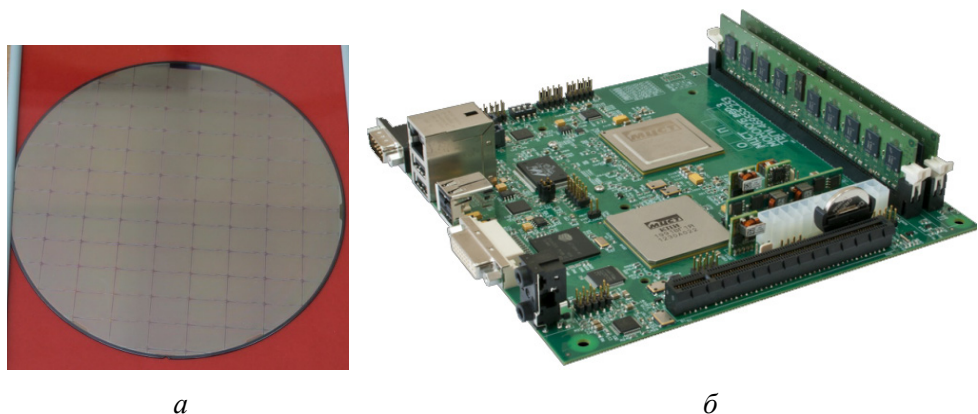


Рис. 17. Пластина кремния с процессорами «Эльбрус-2СМ» (а) и компактная материнская плата «Монокуб-М» (б) на базе процессоров «Эльбрус-2СМ», производимых АО «НИИМЭ» и ПАО «Завод «Микрон» по технологии 90 нм



Рис. 18. В одном из производственных помещений
ОАО «НИИМЭ и Микрон» [6]



Рис. 19. Отечественная ЭВМ для обработки
конфиденциальной информации «Багет»

Крупным достижением на пути обеспечения информационной безопасности России на рубеже 1990–2000 гг. явилась работа НИИ системных исследований РАН под руководством академика **В. Б. Бетелина** по созданию отечественного микроэлектронного производства с проектными нормами 0,5–0,35 мкм и разработка полностью отечественных 32- и 64-разрядных RISC-микропроцессоров и СБИС системных, коммуникационных и периферийных контроллеров. На их базе было создано семейство

современных магистрально-модульных вычислительных систем, необходимый уровень информационной безопасности которых обеспечивается разработанной в НИИСИ РАН отечественной операционной системой ОС2000 и комплектами полностью отечественных сверхбольших интегральных схем (СБИС) в их составе. Примером аппаратно-программной платформы, обеспечивающей реализацию и функционирование сервисов безопасности, является ЭВМ для обработки конфиденциальной безопасности «Багет», созданная в НИИСИ РАН и в КБ «Корунд» (рис. 19).

Дерево полупроводниковой электроники

Бурное развитие полупроводниковой электроники с момента изобретения полупроводникового транзистора в 1947 г. привело к формированию множества областей производства и применения полупроводниковых технологий. Автором была предложена последовательность изложения материала о современной полупроводниковой микро- и нанoeлектронике в образе «дерева» с пышной и плодоносящей кроной, ветви которого образуют различные области и направления развития микро- и нанoeлектроники¹. Жизнеспособность «дерева» обеспечивается его произрастанием на «почве» естественных и технических наук. Живительный ствол этого «дерева» образуют физика твердого тела, физика полупроводников и квантовая механика, питающие своими достижениями многочисленные «ветви» (рис. 20). Центральная часть кроны «дерева» полупроводниковой микро- и нанoeлектроники – дискретные полупроводниковые приборы, микропроцессоры и схемы памяти в интегральном исполнении. Эти направления являются основой современных информационных технологий и вычислительных технологий и обеспечивают прогресс цивилизации за счет вычислительных систем разнообразного применения от персональных компьютеров до суперкомпьютеров, включая применение в управлении технологическими процессами, транспортом, спутниковыми системами и т. д. Ветви в правой части кроны «дерева» – это области, связанные со свойствами электронной подсистемы полупроводников, снизу вверх – это силовая электроника как основа интеллектуальных и энергосберегающих систем в энергетике; сверхвысокочастотная (СВЧ) электроника как основа современной техники связи, радиолокационных и навигационных систем, а также сенсорики как основа систем управления, контроля экологии и др., включая «умные дома». В левой части «дерева» –

¹ Асеев А. Л. Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой технологии // Росс. нанотехнологии. 2006. Т. 1. № 1–2. С. 97–110. См также [11, с. 364].

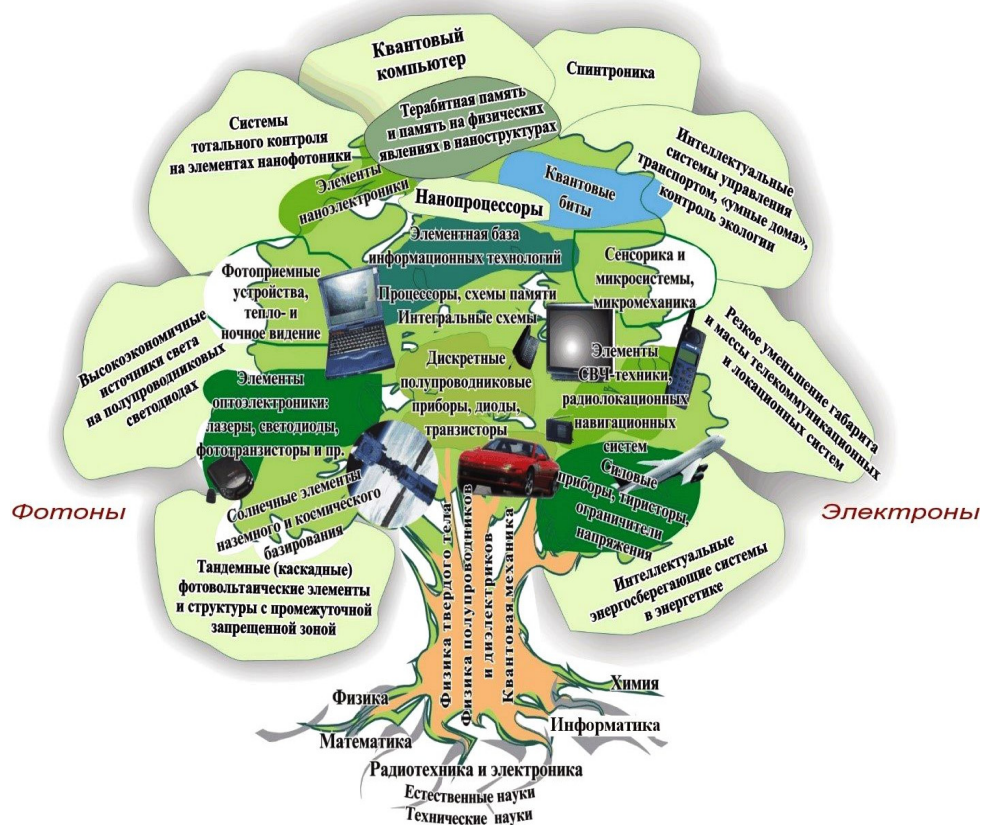


Рис. 20. Дерево полупроводниковой электроники

области, связанные преимущественно с оптическими свойствами полупроводников, снизу вверх – элементы солнечной энергетики; элементы оптоэлектроники, полупроводниковые лазеры, высокоэкономичные источники света на светодиодах и т. д.; фотоприемные полупроводниковые устройства и элементы нанофотоники. Крона и все ветви «дерева» полупроводниковой электроники имеют перспективы дальнейшего роста, связанные с развитием нанотехнологий, как это будет рассмотрено в последующих частях пособия.

Полупроводниковые элементы силовой электроники

Под силовой электроникой понимается преобразование электрической энергии, решение задач ее передачи на большие расстояния, управление энергоснабжением электро-, авто- и трубопроводного транспорта, разнообразных электроприводов предприятий промышленности, бытовую электронику, включая интернет вещей, аудио-,

видео-, компьютерную технику, радиосвязь и многое другое. Рисунок 21 иллюстрирует области применения силовой электроники по шкале электрической мощности до 100 МВт и по рабочей частоте силовых переключателей до 1 МГц и основные типы применяемых полупроводниковых приборов.

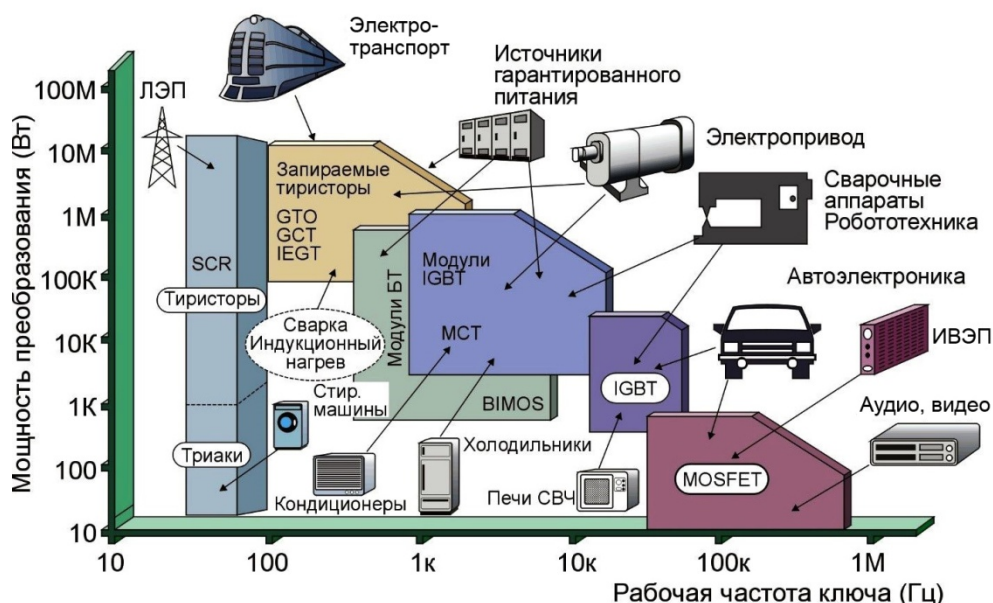


Рис. 21. Области применения элементов силовой электроники и ключевые полупроводниковые приборы

Эпоха полупроводниковой силовой электроники началась в середине 1950-х гг. с изобретением фирмой General Electric полупроводникового прибора с тремя p - n -переходами, названного тиристором. На рис. 22, 1 показано схематическое изображение тиристора, на рис. 22, 2 – его схематическое представление в виде двух транзисторов. Особенностью тиристора является наличие S -образной вольтамперной характеристики (ВАХ) с обратной ветвью (увеличение тока при уменьшении напряжения) и двух состояний прибора – полностью непроводящего с закрытым центральным n - p -переходом и полностью проводящего со всеми тремя открытыми p - n -переходами. При наличии управляющего электрода (УЭ) подача слабого сигнала на УЭ открывает центральный n - p -переход за счет увеличения концентрации неосновных носителей заряда и переводит тиристор из непроводящего состояния в проводящее, т. е. прибор обладает функцией переключения. Согласно схеме на рис. 22, 2, оба транзистора связаны положительной обратной связью, что и определяет открытое состояние тиристора и обратную ветвь ВАХ.

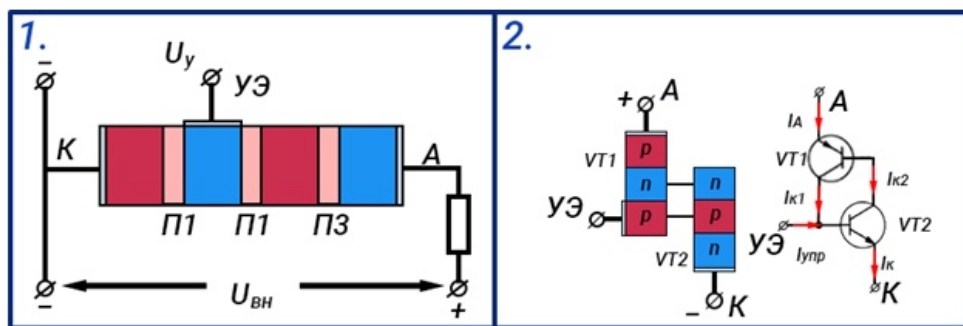


Рис. 22. Схема полупроводникового p - n - p - n -тиристора с управляющим электродом (1) и его схематическое представление в виде двух транзисторов (2)

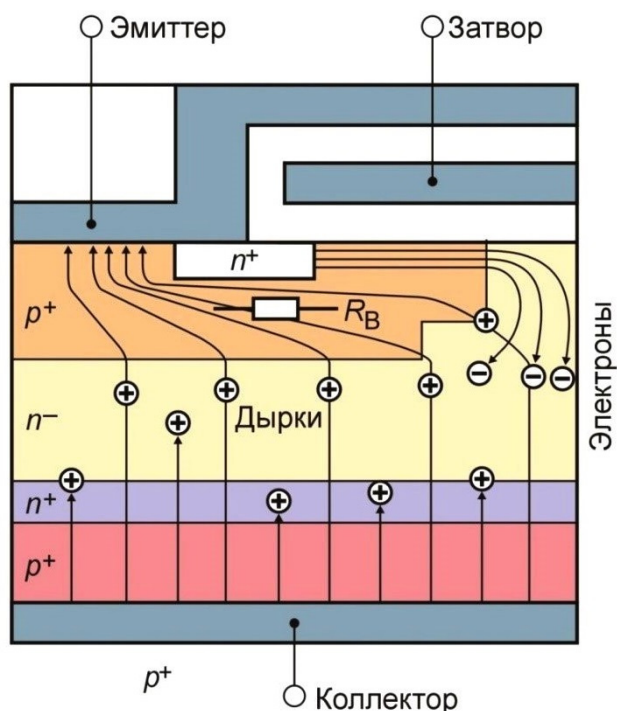


Рис. 23. Схематическое представление структуры биполярного транзистора с изолированным затвором

В настоящее время основным прибором полупроводниковой силовой электроники среднего уровня мощности от 1 кВт до 1 МВт является биполярный транзистор с изолированным затвором – БТИЗ (Isolated Gate Bipolar Transistor – IGBT), схема которого представлена на рис. 23. Объем пластины кремния является биполярным транзистором со структурой $p^+n^+np^+$ (знак + означает в данном случае повышенную концентрацию легирующих примесей) и представляет собой сило-

вую часть прибора. На поверхности кремниевой пластины методами планарной технологии сформирована управляющая структура, включающая МДП-транзисторы с изолированным от силовой части затвором. На рис. 23 показано, как генерация электронов через открытый канал МДП-транзистора в силовую часть прибора и встречный поток дырок превращают первоначально непроводящий объем пластины кремния в область высокой проводимости. БТИЗ сочетает преимущества управляющей части, позволяющей цифровое интеллектуальное управление силовой частью при небольшом изменении потенциала изолированного затвора, и преимущества мощного биполярного транзистора по управлению большими значениями электрического тока через объем пластины кремния. Преимуществом БТИЗ является работа в импульсном ключевом режиме при высоких частотах управления до 100 кГц. Это обстоятельство позволяет осуществлять работу силовой части прибора по любому наперед заданному алгоритму за счет применения широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Рисунок 24 иллюстрирует формирование магнитного потока синусоидальной формы в статоре электродвигателя за счет импульсного управления БТИЗ в режиме ШИМ.

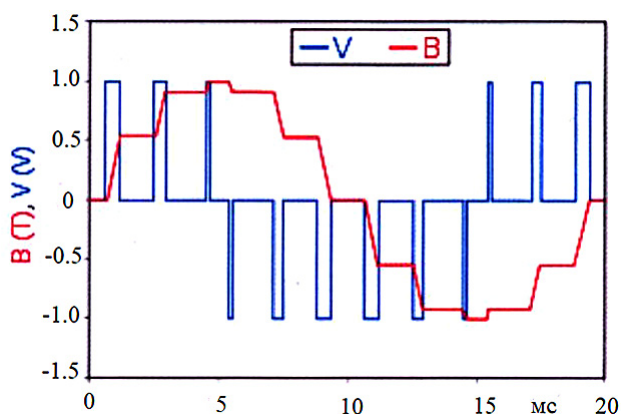


Рис. 24. Реализация принципа широтно-импульсной модуляции при управлении асинхронным электродвигателем: V – импульсное напряжение различной длительности от ШИ-модулятора; B – результирующий магнитный поток в статоре машины

Для изготовления элементов силовой электроники (тиристоры, БТИЗ) используется высокочистый высокосовершенный кристаллический кремний, получаемый методом бестигельной зонной плавки и содержащий электрически активные примеси в концентрации менее 10^{12} см^{-3} и электрически неактивные примеси в концентрации менее 10^{16} см^{-3} .

Кремний-на-изоляторе, радиационно-стойкая электроника, биосенсоры

Технология кремний-на-изоляторе (КНИ) основана на изготовлении трехслойных пластин кремний-на-изоляторе вместо монокристаллических пластин кремния и отражает тот простой факт, что активным слоем интегральных микросхем на кремнии является приповерхностный слой с толщиной, не превышающей несколько микрон. Как показывает рис. 25, при изготовлении полупроводниковых микросхем на пластинах КНИ благодаря диэлектрической изоляции отдельных элементов микросхем отсутствуют паразитные емкости и паразитная проводимость между отдельными элементами микросхем. Это обстоятельство приводит к лучшим вольтамперным характеристикам МДП-транзисторов по крутизне и напряжению насыщения, как показано на рис. 26.

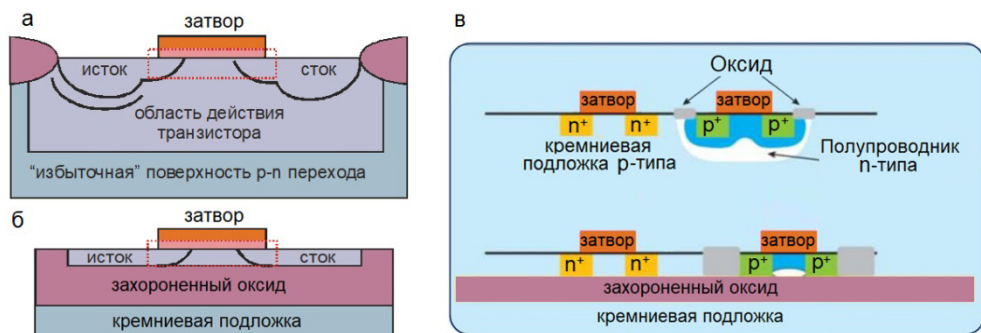
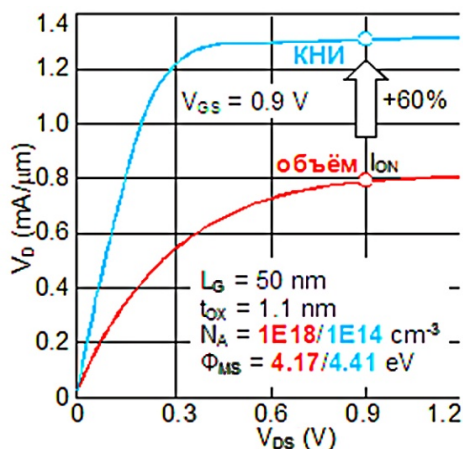


Рис. 25. Одиночные МДП-транзисторы: а – на объемном кремнии; б – на КНИ-структуре; в – комплементарные (КМОП) транзисторы на монокристаллическом кремнии (вверху) и на структурах кремний-на-изоляторе (внизу)

Рис. 26. Сравнение вольтамперных характеристик МДП-транзисторов на монокристаллических пластинах кремния (красная кривая) и на КНИ-структурах (синяя кривая)



В отличие от классических микросхем, КНИ-микросхемы отличаются пониженным энергопотреблением, увеличенным быстродействием и повышенной плотностью упаковки. Особенно ярко преимущества КНИ технологии проявляются при наиболее массовой в настоящее время технологии комплементарных МОП транзисторов (КМОП) изготовления интегральных микросхем.

Однако наиболее впечатляющим преимуществом КНИ-микросхем является их радиационная стойкость, что обеспечивает широкое применение КНИ-микросхем для систем управления в атомной промышленности и в авиационно-космической отрасли. Рисунок 27 показывает, что радиационная стойкость КНИ-микросхем достигает величины до 10 Мрад [25, 26].

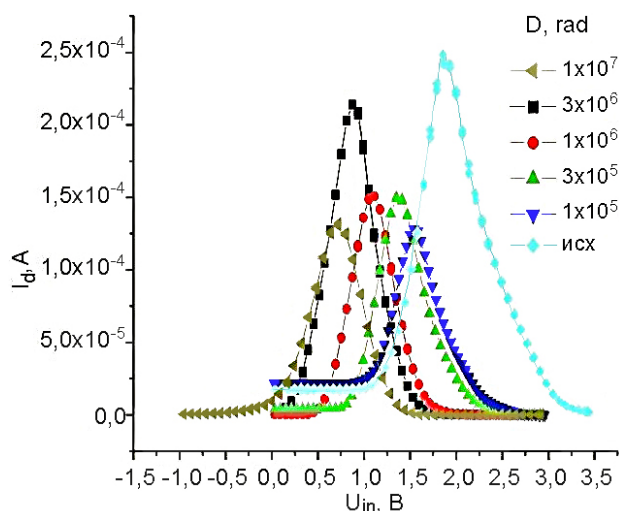


Рис. 27. Изменение порога переключения инверторов, изготовленных на базе КНИ-МДП-транзисторов, вплоть до доз 10 Мрад

Отметим, что технология формирования тонких слоев отщепленного монокристаллического кремния при имплантации ионами водорода и гелия была предложена **В. Ф. Реутовыми** и **Ш. Ш. Ибрагимовым** еще в 1983 г. [27]. Затем **М. Брюэль** в 1994 г. получил патент [28] на формирование КНИ-структур при соединении (бондинге) двух пластин кремния, одна из которых термически окислена, а вторая имплантирована водородом. Последующий отжиг системы сопровождается образованием сплошного газового слоя водорода в имплантированной пластине, благодаря чему слой кремния отщепляется от исходной имплантированной пластины и таким образом формируется структура КНИ. Этот метод, получивший название SmartCut, был использован фирмой SOITEC для производства структур КНИ и в настоящее время большая часть структур КНИ в мире (более 85 %) производится этим методом. Крупнейшими потребителями структур КНИ являются фирмы

IBM, AMD и Free Scale Semiconductors, которые используют SmartCut КНИ при производстве микропроцессоров. В Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН д-р физ.-мат. наук **В. П. Попов** (выпускник физфака НГУ 1977 г.) предложил модификацию этого метода, названную DeleCut и предусматривающую окисление облучаемой пластины кремния до облучения. После облучения оксид удаляется, и встроенный слой оксида в отличие от метода SmartCut формируется оксидом на поверхности пластины-подложки. Принципиальной особенностью метода DeleCut является возможность получения ультратонких слоев КНИ с толщиной кремния до 3 нм при последовательном формировании и удалении термического диоксида кремния (рис. 28).

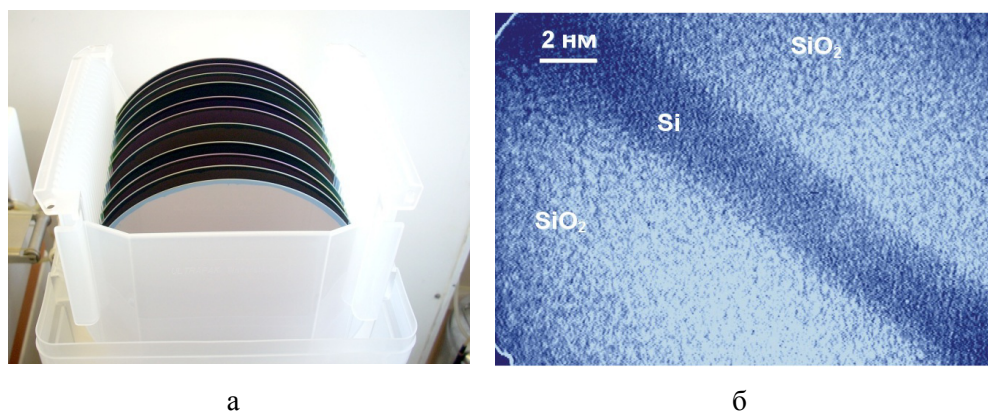


Рис. 28. КНИ-пластины кремния диаметром 100 мм, полученные методом DeleCut в ИФП СО РАН (а), и высокоразрешающее электронно-микроскопическое изображение поперечного среза КНИ-структуры с толщиной кристаллического слоя кремния 3 нм (б)

На основе КНИ-структур разрабатываются и изготавливаются пилотные образцы КНИ нанопроволочных и нанополосковых (НП) транзисторов с открытым затвором, которые используются в качестве биосенсоров с фемтомольной чувствительностью для регистрации биологических молекул, бактерий и вирусов. Биосенсоры ИФП СО РАН использовались в совместных работах с Институтом биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича РАН по международной программе «Протеом человека». В качестве тестовых использовались молекулы бычьего сывороточного альбумина BSA. Чтобы обеспечить максимальный отклик к белку, были использованы транзисторные характеристики КНИ-сенсоров с использованием кремниевых подложек структур КНИ в качестве управляющего затвора, а слоя скрытого диэлектрика – в качестве подзатворного диэлектрика. Это позволило

обеспечить внутреннее усиление сигнала за счет экспоненциальной зависимости тока в подпороговом режиме КНИ нанопроволочного транзисторного сенсора.

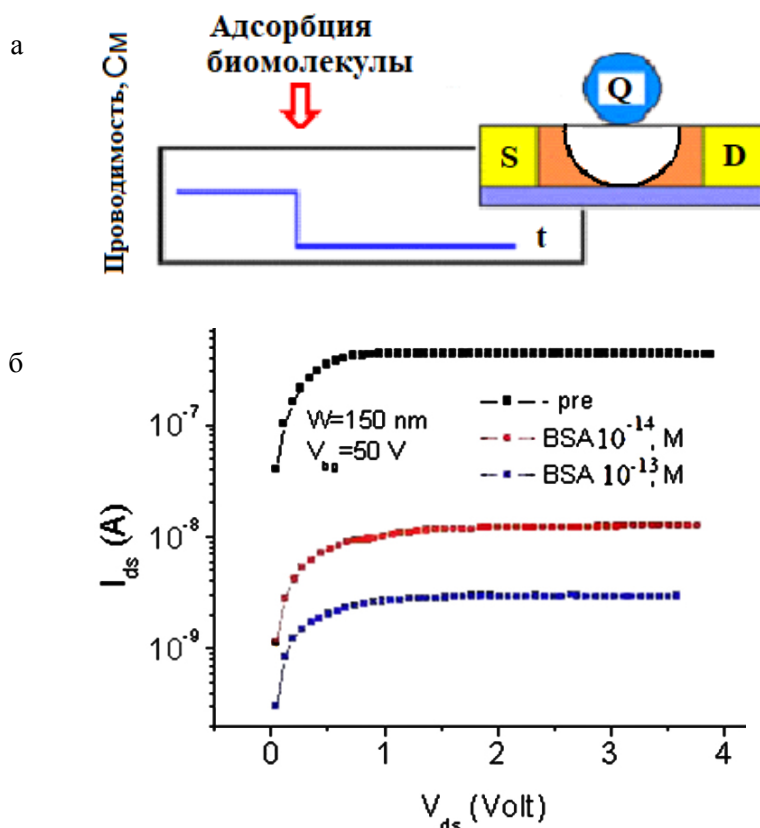
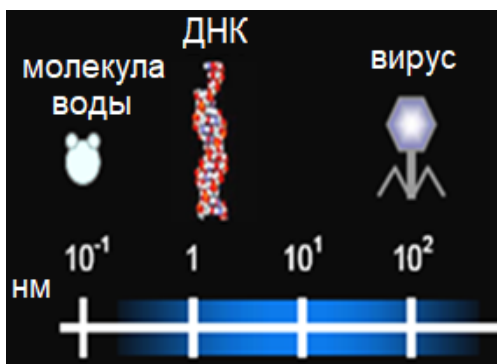


Рис. 29. Принцип работы (а) и экспериментально измеренные ВАХ исток-сток КНИ-МДП-транзистора с открытым затвором при осаждении из раствора молекул бычьего сывороточного альбумина (BSA) с концентрацией 10^{-13} М, синяя кривая, и 10^{-14} М, красная кривая (б)

Рисунок 29, а схематически иллюстрирует детектирование биологической молекулы при ее осаждении на поверхность открытого затвора КНИ-МДП-транзистора за счет изменения тока исток-сток. Рисунок 29, б представляет экспериментально измеренные ВАХ исток-сток КНИ-МДП-транзистора с открытым затвором при осаждении из раствора молекул бычьего сывороточного альбумина (БСА) с различной концентрацией. Напомним, что молекула БСА имеет размер около 5 нм и молекулярный вес 66 килодальтон ($\sim 10^{-19}$ г). На рис. 30 схематически представлены размеры ДНК (2,2–2,4 нм) и вирусов (около 100 нм). Молекулы протеинов имеют размер в интервале 10–100 нм.

Рис. 30. Размеры молекул воды (слева), ДНК (в центре) и вирусов (справа) в нанометрах



В дальнейшем КНИ-НП-сенсоры были использованы при детекции HBsAg-маркеров гепатита В, онкомаркера печени α -фетопротеина (чувствительность в интервале 10^{-14} – 10^{-15} Моль), онкомаркера легких D-NFATc1 с чувствительностью $2,5 \cdot 10^{-15}$ Моль.

В настоящее время проведены исследования по применению КНИ-НП-транзисторов совместно с профильными институтами СО РАН и с сотрудниками ГНЦ «Вектор» (п. Кольцово, Новосибирская обл.) в биомедицине и вирусологии, весьма актуальных в настоящее время. Показана возможность применения таких сенсоров для индикации модельного белка VP-40 маркера вируса Эбола и его комплексов со специфичными моноклональными антителами. Исследованы эффекты диэлектрофореза и показана возможность регистрации вирусов ядерного полиодроза и осповакцины. В последнее время отработана методика регистрации вирусоподобных частиц коронавирусов, измерении тока исток-сток КНИ-НП-транзистора при предварительной активации поверхности открытого затвора специально подобранными антителами и последовательном осаждении растворов с вирусоподобными частицами коронавирусов. Результаты измерений свидетельствуют о принципиальной возможности регистрации коронавирусов с субатомольной чувствительностью $\sim 10^{-17}$ М (рис. 31). Это открывает перспективы решения исследовательских и диагностических задач по индикации патогенов в экстренных ситуациях эпидемий и пандемий².

² Генералов В. М., Наумова О. В., Фомин Б. И. и др. Индикация белка VP-40 вируса Эбола с помощью нанопроволочного КНИ-биосенсора // Автометрия. 2019. Т. 55. № 6. С. 102–107; Наумова О. В., Генералов В. М., Зайцева Э. Г. и др. Биосенсоры на основе КНИ нанопроволочных транзисторов для биомедицины и вирусологии // Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 3. С. 166–174; Generalov V., Naumova O., Shcherbakov D. et al. Indication of the Coronavirus Model Using a Nanowire Sensor // MDPI Proceedings of the 1st Intern. Electronic Conf. on Biosensors. 2020. V. 60. P. 50.

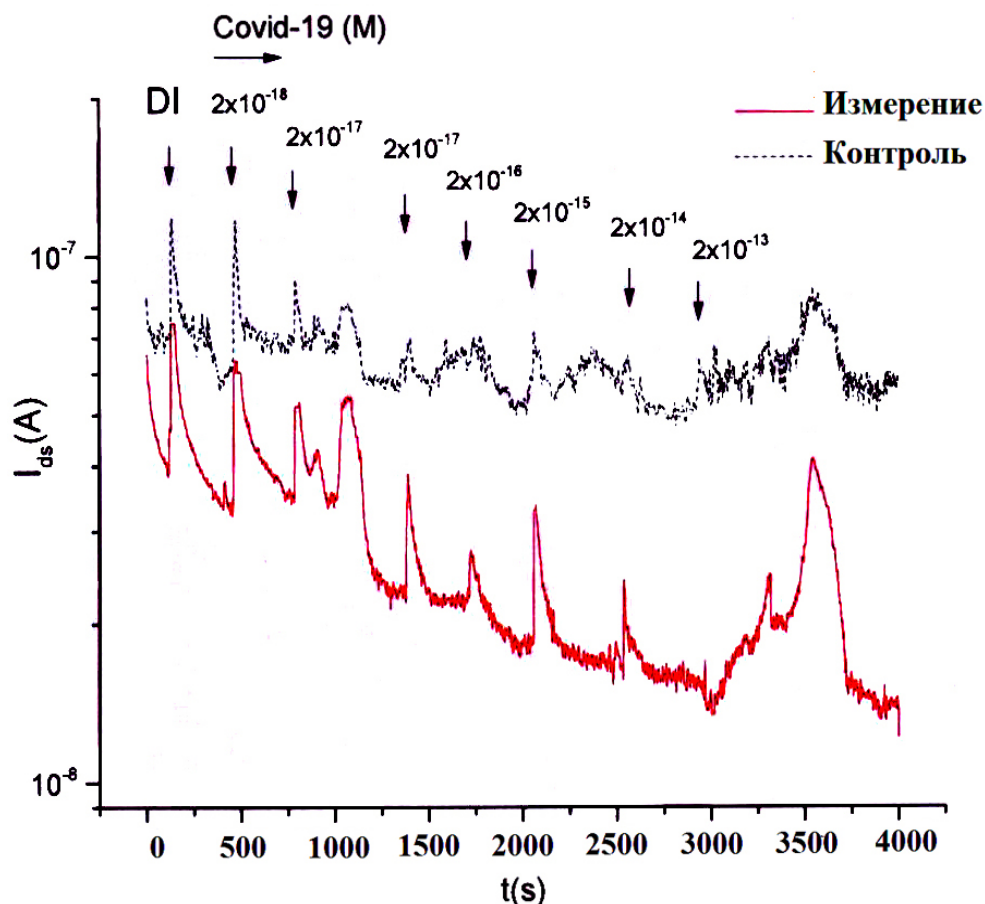


Рис. 31. Результаты измерения тока исток-сток КНИ-НП-транзистора при последовательном осаждении на открытый затвор транзистора растворов с вирусоподобных частицами коронавируса различной концентрации, красная линия. Линия черного цвета – контрольные измерения на поверхности без антител

КНИ-НП-транзисторы с открытым затвором могут использоваться не только для регистрации малых количеств биомолекул и вирусов, но и для высокочувствительного обнаружения следовых концентраций взрывчатых веществ. В этом случае открытая поверхность затвора транзистора должны быть активирована металлоорганическими полиэдрическими соединениями с каркасной структурой, которые должны осуществлять захват молекул анализируемого вещества. Ожидаемая чувствительность обнаружения паров тринитротолуола (ТНТ) – 0,01 ppt, что соответствует концентрации на уровне 10^{-16} г/см³.

Полупроводниковые транзисторы являются основой современных систем электронной памяти. Рассмотрим их особенности, следуя **В. А. Гриценко** и **Д. Р. Исламову** [5]. Рисунок 32 демонстрирует триггерную ячейку энергозависимой памяти оперативных запоминающих устройств – статическую память с произвольным доступом – статическое оперативное запоминающее устройство – СОЗУ (*Static Random Access Memory, SRAM*). Триггер, включающий четыре МДП транзистора, представляет собой логическое устройство, которое находится в одном из двух устойчивых состояний, и меняет свое состояние под действием внешних сигналов, поступающих через два транзистора доступа от словарной линии (*word line, WL*). Битовые линии (*bit line, BL*) обеспечивают как запись, так и чтение данных. СОЗУ является наиболее быстродействующей памятью и работает на частоте, достигающей несколько ГГц, сохраняет свое состояние в течение длительного времени, не требует регенерации памяти и работает при небольшом энергопотреблении. Площадь одной ячейки СОЗУ достаточно велика и составляет $(120\text{--}140)F^2$, где F – проектная норма используемого технологического процесса.

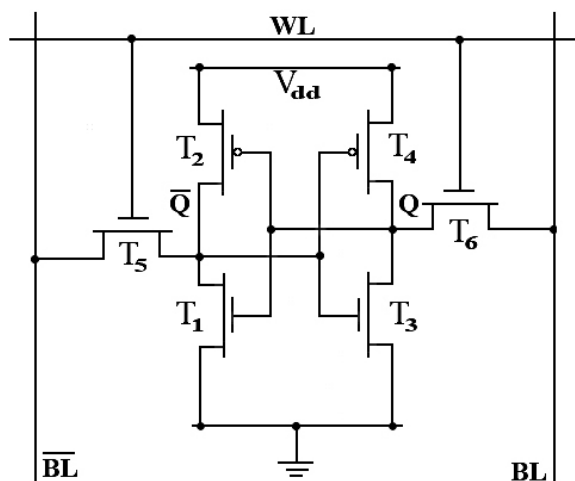


Рис. 32. Статическое оперативное запоминающее устройство (СОЗУ)

В оперативных запоминающих устройствах динамического типа – ДОЗУ (*Dynamic Random Access Memory, DRAM*), запоминающей ячейкой является входная емкость МДП-транзистора или конденсатор, как показано на рис. 33. В отличие от триггерных цепочек ОЗУ, при отсут-

ствии электрического питания конденсаторы ДОЗУ довольно быстро разряжаются, что требует их периодической подзарядки (регенерации) во избежание потерь данных. ДОЗУ позволяет хранить большие объемы данных и является намного более компактной по занимаемой площади (до $4F^2$) и более дешевой по сравнению с СОЗУ.

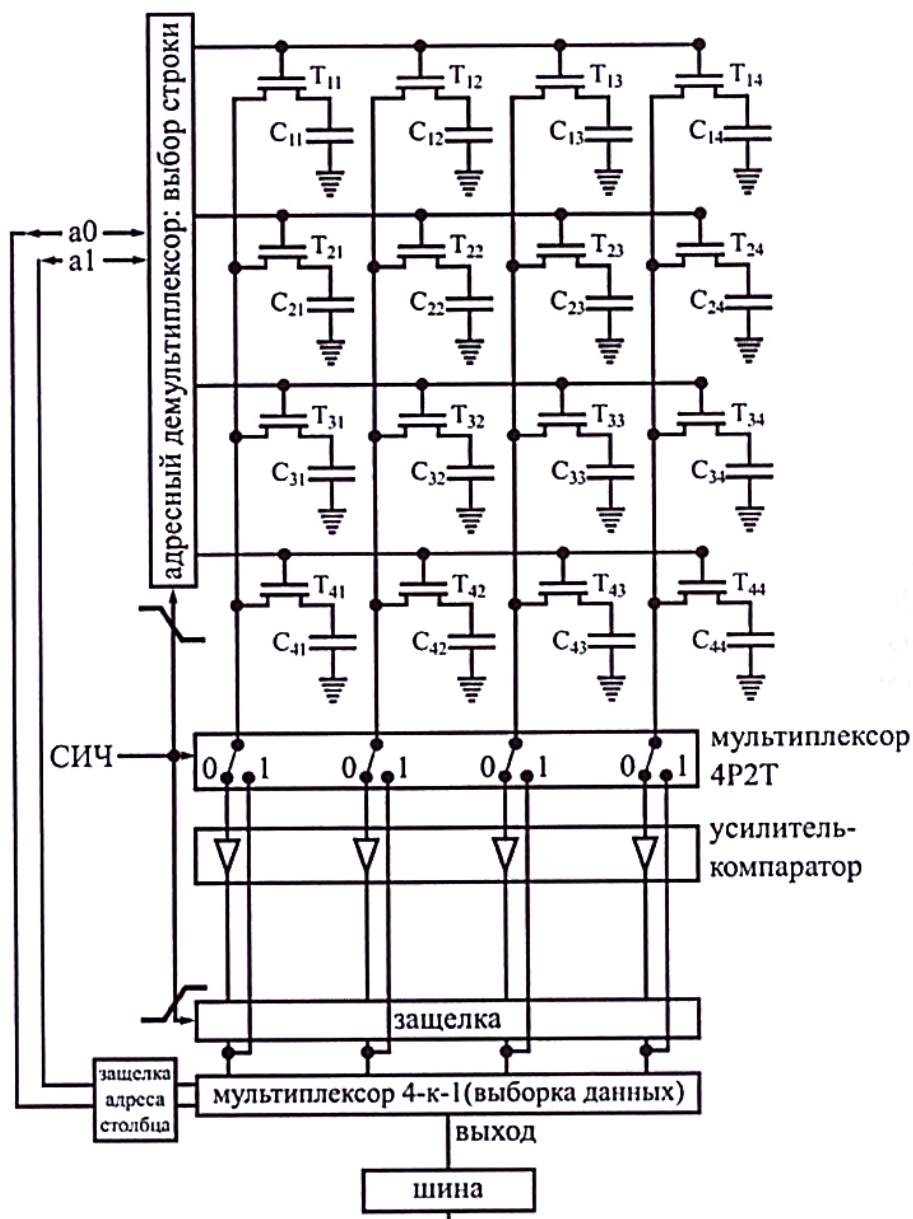


Рис. 33. Оперативное запоминающее устройство динамического типа (ДОЗУ)

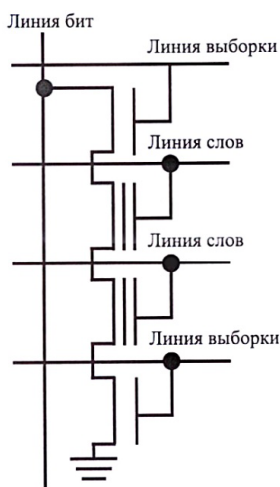


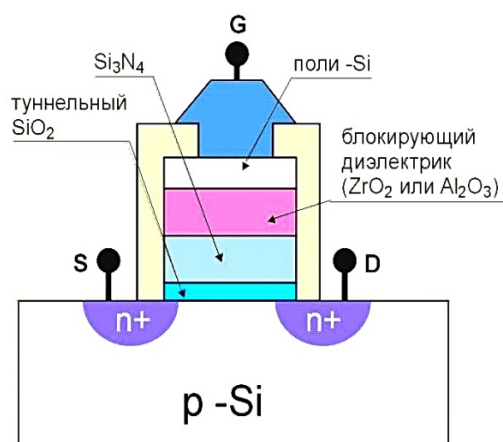
Рис. 34. Флеш-память, особый вид энергонезависимого перепрограммируемого полупроводникового устройства памяти (ЭППЗУ)

В середине 1980-х годов фирмой Toshiba была изобретена флеш (*flash*)-память, которая по отношению к СОЗУ и ДОЗУ отличается относительной простотой конструкции и технологии изготовления. Флеш-память представляет собой особый вид энергонезависимого перепрограммируемого полупроводникового устройства памяти (ЭППЗУ), которая не заменяет СОЗУ и ДОЗУ и отличается компактностью, отсутствием механических частей. Флеш-память не требует энергии для хранения информации, т. е. является энергонезависимой, ее преимуществом является большое значение циклов изменения содержимого памяти. Архитектура флеш-памяти типа NAND (производное от NOT-AND, НЕ-И), представлена на рис. 34. Видно, что центральной частью флеш-памяти является полевой транзистор, в котором между каналом и затвором располагается запоминающая среда – плавающий затвор, отделенная слоями диэлектрика как от управляющего затвора, так и от канала МДП-транзистора. В качестве плавающего затвора первоначально использовались нанокластеры металлов и островки поликремния, в настоящее время это нитрид кремния с глубокими ловушками для носителей заряда. Рассматривается возможность использования в качестве запоминающей среды также слоев оксидов металлов, мультиграфена и квантовых точек [5]. Зарядовое состояние запоминающей среды меняется за счет инжекции носителей заряда из кремниевой подложки или обратно. При этом изменяется проводимость канала, так что состояние высокой проводимости соответствует логическому нулю, а закрытое состояние транзистора отвечает логиче-

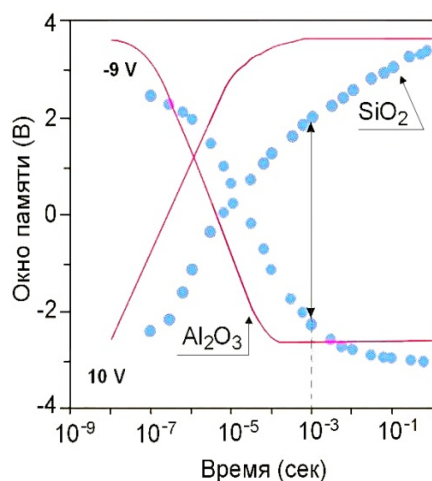
ской единице. Считывание состояния транзистора осуществляется приложением к затвору напряжения, величина которого соответствует промежуточному состоянию транзистора между открытым и закрытым состояниями. Состояние транзистора сохраняется длительное время (~10 лет) без потребления энергии. Благодаря своим преимуществам флеш-память нашла широкое применение в портативных устройствах записи, хранения и обработки информации. В настоящее время более 50 ведущих фирм мира занимаются массовым производством изделий флеш-памяти, среди которых такие гиганты полупроводниковой промышленности как Samsung, Hynix, Toshiba, Matsushita, Mitsubishi, Sony, NEC, National, Sharp и многие другие.

Принципиальное улучшение характеристик МДП-структур кремний-оксид-нитрид-оксид-поликремний (КОНОП) было предложено **В. А. Гриценко** за счет использования в качестве блокирующего диэлектрика слоев с высоким значением диэлектрической проницаемости (патент РФ 20033103143.09 от 03.02.2003). На рис. 35, *а* показана структура предложенного флеш-элемента памяти с плавающим затвором нитрида кремния и блокирующего диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью (*high-k*). Из сравнения экспериментальных данных с результатами численного моделирования в рамках одномерной двухзонной модели **Шокли – Рида** при концентрации ловушек в нитриде кремния не менее $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ следует, что применение блокирующих слоев *high-k*-диэлектриков вместо SiO_2 ведет к увеличению быстродействия ЭППЗУ, уменьшению напряжения перепрограммирования и увеличению «окна» памяти (рис. 35, *б*). Эти изменения являются результатом уменьшения нежелательной паразитной инжекции электронов из поликремниевого затвора, увеличения электрического поля в туннельно тонком подзатворном оксиде и в нитриде кремния и увеличения инжекции носителей через подзатворный диэлектрик. Таким образом, использование *high-k*-диэлектриков в ЭППЗУ на основе нитрида кремния уменьшает перепрограммирующее напряжение, паразитную инжекцию электронов и дырок из поли-Si-затвора, повышает скорость записи / стирания и увеличивает толщину туннельного оксида, что обеспечивает большее время хранения накопленного заряда³.

³ Gritsenko V. A., Nasyrov K. A., Novikov Yu. N. et al. A new low voltage fast SONOS memory with high-k dielectric // Solid State Electronics. 2003. V. 47. № 10. P. 1651–1656; Гриценко В. А., Насыров К. А., Новиков Ю. Н., Асеев А. Л. Новый элемент памяти для электрически перепрограммируемого запоминающего устройства на основе диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 2. С. 90–96.



а



б

Рис. 35. Запоминающее устройство на основе слоя Si_3N_4 с использованием *high-k*-диэлектриков в качестве блокирующего слоя, указаны исток S, сток D и затвор G (а). Характеристики записи / стирания КОНОП-структуры (окно памяти) для SiO_2 и Al_2O_3 в качестве блокирующих диэлектриков. Точки – экспериментальные измерения, сплошные линии – моделирование (б)

В заключение этой части пособия, посвященной принципам и путям развития флеш-памяти, отметим реализацию фирмой Samsung массового производства трехмерной (3D) вертикальной NAND флеш-памяти на основе транзисторов с плавающим затвором с увеличением числа слоев с одного-двух в 2008–2009 гг. до 48 слоев в 2016 г., что обеспечило увеличение емкости памяти до 256 Гбит. В настоящее время Samsung выпускает устройства 3D флеш-памяти с емкостью 1 Тбит с перспективой дальнейшего прогресса в этой области. Достижению этого результата во многом способствовало 10-летнее сотрудничество фирмы Samsung с группой д-ра физ.-мат. наук В. А. Гриценко в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Мемристор, сопротивление с памятью, был предложен физиком Л. Чуа (Leon Chua) из университета Пардью (США) в начале 1970-х гг. в качестве «недостающего» элемента в теории электрических цепей⁴. Место мемристора в качестве двухполюсного пассивного элемента, связывающего электрический заряд и магнитный поток в семействе известных элементов – сопротивления, емкости и индуктивности, показано схематически на рис. 36, а. На рис. 36, б представлена рас-

⁴ Chua L. Memristor – The Missing Circuit Element // IEEE. Transactions On Circuit Theory. 1971. CT-18. P. 507–519.

считанная Л. Чуа вольтамперная характеристика мемристора с самопересекающейся петлей гистерезиса, зависящей от частоты. Таким образом, сопротивление мемристора должно меняться при пропускании электрического тока или при приложении импульса напряжения.

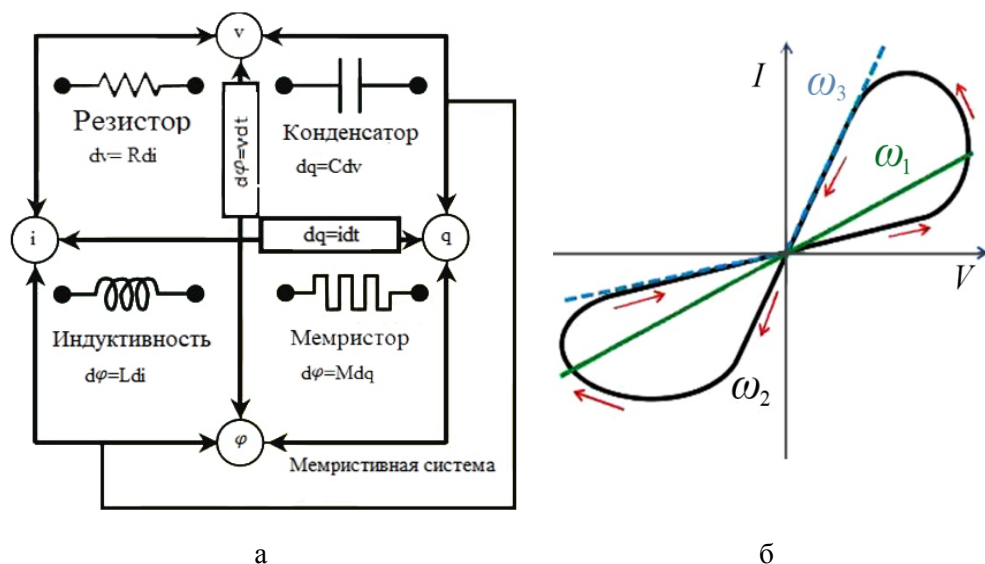


Рис. 36. Мемристор в семействе пассивных элементов электрических цепей (а) и вольтамперная характеристика мемристора (б)

Мемристор стал реальностью лишь в последнее время после работ по обнаружению мемрезистивного эффекта в нестехиометричных диэлектриках на рубеже 2000–2010 гг.⁵ В частности, мемрезистивным эффектом, возникающим при движении вакансий под действием электрического тока, обладают субоксиды многих переходных металлов. Это схематично иллюстрирует рис. 37, на котором видно, что движение вакансий в оксиде смещает границу раздела стехиометричности в оксиде и меняет тем самым общее сопротивление мемрезистивной структуры.

На рис. 37, а-в показана схема мемрезистивной структуры Pt-TiO₂-TiO_{2-x}-Pt. Дефицит кислорода в TiO_{2-x} проявляется как «пузырьки» положительно заряженных вакансий кислорода, разбросанных по верхнему слою (рис. 37, г).

⁵ Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. The Missing Memristor Found // Nature. 2008. V. 453. P. 80; Pershin Y. V., Di Ventra M. Memory effects in complex materials and nanoscale systems // Advances in Physics. 2011. V. 60. P. 145–227.

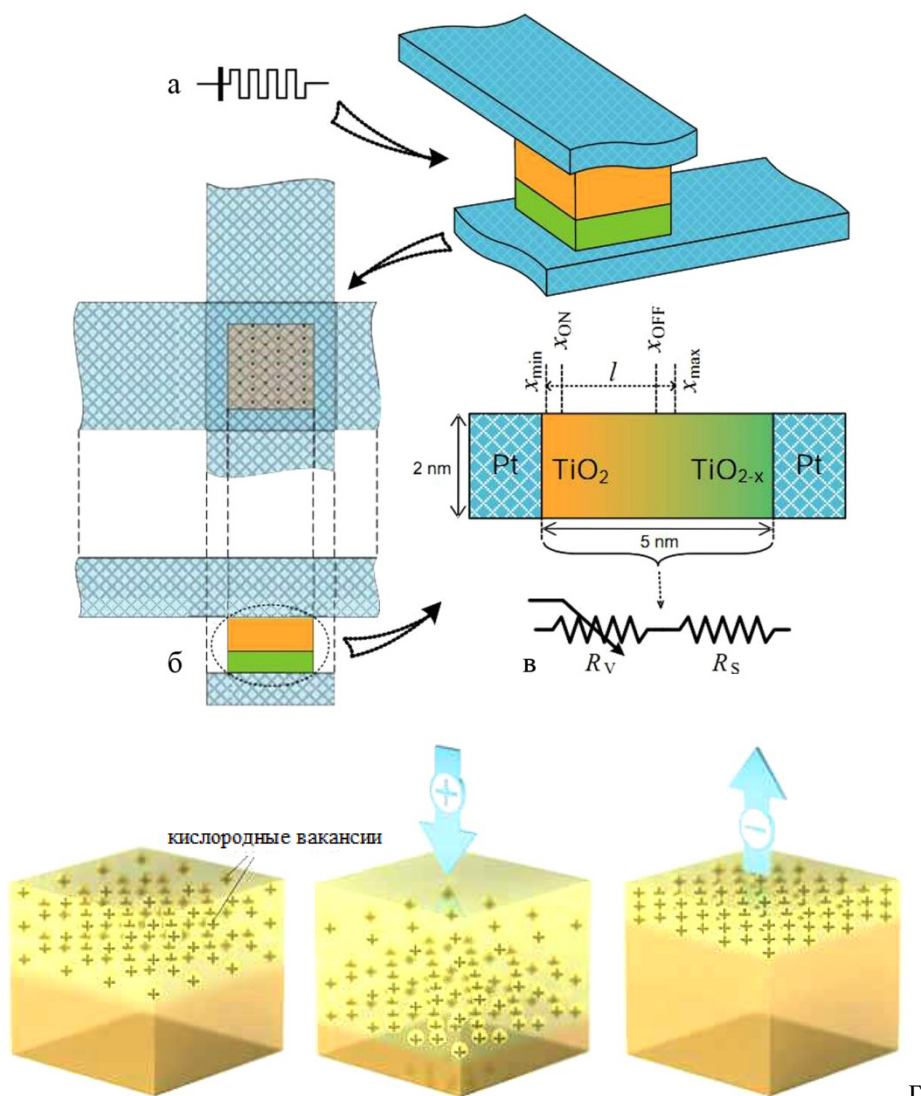


Рис. 37. Граница раздела TiO_2 - TiO_{2-x} в мемрезистивной структуре Pt- TiO_2 - TiO_{2-x} -Pt (a–в) и ее движение при прохождении электрического тока различного направления (г)

Положительное напряжение на переключателе отталкивает положительно заряженные вакансии кислорода в металлическом верхнем слое TiO_{2-x} , посылая их вниз в изолирующий слой TiO_2 . Это вызывает движение границы между двумя слоями вниз, увеличивая процент проводящего слоя TiO_{2-x} и проводимость всего переключателя. Чем больше приложенное напряжение, тем выше становится проводимость переключателя. При отрицательном напряжении на верхнем контакте

вакансии смещаются вверх и сопротивление мемристора увеличивается за счет передвижения границы раздела $\text{TiO}_2\text{-TiO}_{2-x}$.

Применение мемристоров включает создание новых систем резистивной памяти с произвольным доступом (ReRAM), способной работать в экстремальных условиях, например, в космических аппаратах с энергонезависимым, обратимым переключением сопротивления, высокой скоростью, высоким отношением *ON/OFF* и высокой плотностью.

Многообещающие перспективы имеет применение мемристоров при проведении нейроморфных вычислений – использовании СБИС-систем, содержащих электронные аналоговые схемы, и для симуляции нейробиологических архитектур, присутствующих в нервной системе, аналогично биологическим синапсам. Это связано с подобием принципов работы мемристоров и биологических нейронов человеческого мозга.



Рис. 38. Структура нейрона головного мозга человека и его взаимодействие с другими нейронами

Архитектура и принципы взаимодействия нейронов головного мозга человека показаны на рис. 38. Биологический нейрон – нелинейная динамическая система, динамика которой носит вероятностный характер. Получая электрические импульсы (спайки) от других нейронов через синапсы, нейрон накапливает потенциал в теле клетки. Накопление необходимого значения потенциала заставляет нейрон выработать импульс (спайк – *spike*), который передается через аксоны на синапсы других нейронов. После выработки спайка нейрон переходит в рефрактерный период (порядка 2–30 мс), в течение которого вероятность спайка резко снижается. Нейрон имеет множество синапсов и связан со многими нейронами в сетях головного мозга. Человеческий мозг включает $\sim 10^{16}$ нейронов/см², $\sim 10^{10}$ синапсов/см², величина удельной потребляемой энергии составляет ~ 2 мВт/см² и полная потребляемая

мощность ~ 20 Вт. При фантастических возможностях человеческого мозга конкретные молекулярные механизмы его работы в настоящее время неясны.

Представляется, что мемристоры работают во многом аналогично нейронам, накапливая электрический потенциал и передавая его другим элементам. Поэтому использование мемристоров целесообразно при создании искусственных нейроморфных систем, в том числе при обработке сенсорной информации (зрение и слух); исследовании механизмов рабочей и кратковременной памяти мозга – изучении принципов комбинирования недавно полученной информации с приходящими позднее стимулами; исследовании кодирования информации: выяснении способов трансформации одной кодировки в другую; применении систем искусственного интеллекта в системах автоматического управления (робототехника); в нейропротезировании и при создании интерфейсов «мозг – компьютер».

Другое важное применение мемристора может состоять в решении проблемы создания универсальной памяти электронных устройств, которая сочетала бы функции оперативной и внешней памяти при высоком значении плотности записи и быстродействия с длительным временем хранения данных и большим количеством циклов перезаписи, вместе с энергонезависимостью и низким электропотреблением (табл. 2). При этом желательна совместимость массового производства устройств универсальной памяти с доведенными до совершенства современными кремниевыми технологическими линейками массовых объемов производства с нанометровыми проектными нормами.

Таблица 2

Характеристики различных элементов памяти

<i>Показатели</i>	<i>Мемристор</i>	<i>DRAM</i>	<i>FLASH</i>	<i>HDD</i>
Время чтения, нс	10	10–50	25000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время записи, нс	0,2–20	10–50	200 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время хранения информации	Годы	Менее секунды	Годы	Годы
Количество циклов записи	10^{12}	10^{16}	10^3-10^6	10^{15}
Энергия на запись одного бита, пДж	0,1–3	2	10 000	$(1-10) \cdot 10^9$

В настоящее время исследование свойств материалов для создания универсальной памяти ведется широким фронтом. В числе исследуемых материалов – мемристорная память на основе структур $\text{Si-TiN-ZrO}_x\text{-TiN}$ с нестехиометрическим оксидом циркония; мемристорные элементы памяти на основе SiO_2 и TaO_x ; магниторезистивная память на основе системы Fe-MgO-Fe ; сегнетоэлектрические элементы памяти на основе систем $\text{TiN-La:HfO}_2\text{-TiN}$ и $\text{TiN-La:Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2\text{-TiN}$, а также сегнетоэлектриков Sc:HfO_2 ; мемристоры на перовскитах $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, RENiO_3 , $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$; тонкопленочные структуры металл-электрид-диэлектрик-металл, где электрид – $(\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64})^{4+} \cdot 4\text{e}^-$, двумерные системы типа Ca_2N и др.

Полупроводниковые наноструктуры и нанотехнологии

Постепенное освоение в науке и технологиях размеров объектов все меньшего размера, вплоть до нанометровых, в физике, химии, биологии и материаловедении (рис. 39) породило известное высказывание Нобелевского лауреата 1965 г. **Р. Феймана** «Там внизу еще много места». Путь к нанотехнологиям отмечен Нобелевскими премиями, в том числе уже упомянутой премией за экспериментальное открытие квантового туннелирования в полупроводниках и сверхпроводниках в 1973 г. (**Л. Есаки, И. Джевер, Б. Джозефсон**); открытием целочисленного квантового эффекта Холла в 1985 г. (**К. фон Клитцинг**); премией 1986 г. за создание электронного микроскопа и сканирующего туннельного микроскопа (**Э. Руска, Г. Биннинг и Г. Рорер**); открытием фуллеренов в 1996 г. (**Р. Курл, Х. Крото и Р. Смолли**); дробного квантового эффекта Холла в 1998 г. (**Р. Лаффлин, Х. Штермер, Д. Цуи**); упомянутой выше премией за вклад в создание полупроводниковых гетероструктур для СВЧ-электроники и оптоэлектроники и изобретение интегральных схем **Ж. И. Алфёрова, Г. Кремера и Д. Килби** в 2000 г.; премией 2009 г. **Ч. Као, У. Бойля и Дж. Смита** за основополагающие достижения по прохождению света в оптоволокнах для развития оптических коммуникаций и изобретение оптических полупроводниковых сенсоров – ПЗС-матриц; премией за открытие и исследование графена в 2010 г. (**А. Гейм и К. Новоселов**), создание эффективных светодиодов голубого свечения в 2014 г. (**И. Акасаки, Х. Аmano и С. Накамура**); премией 2016 г. **Д. Таулесс, Дж. Костерлиц и Д. Холдейна** за теоретические открытия топологических фазовых переходов и топологических фаз вещества.

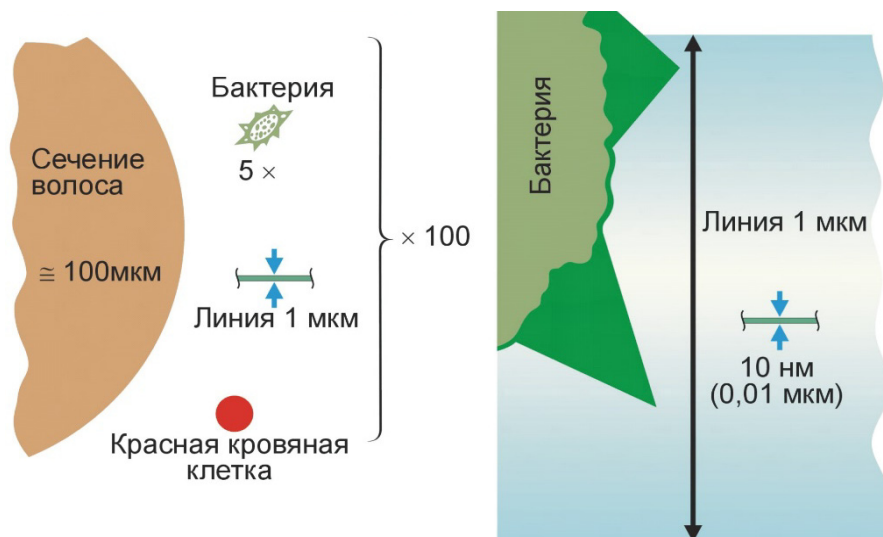


Рис. 39. Схематическое изображение размеров объектов

Бурный расцвет нанотехнологий в их современном понимании начался в 2000 г. с объявленной Президентом США Б. Клинтоном «нанотехнологической инициативы», согласно которой ставились следующие основные цели: создание компактных устройств хранения информации (библиотека Конгресса США на одном чипе), получение высокопрочных материалов на основе новых форм углерода, создание наносредств для адресной доставки лекарств к больным органам человека.

В качестве основных направлений работ были определены следующие:

- долговременные фундаментальные исследования в нанонауке и технических приложениях;
- разработка и синтез наносистем с заданными характеристиками;
- применение наноматериалов и наносистем в промышленном производстве, энергетике, в обеспечении национальной безопасности и здравоохранении;
- образование и обучение нового поколения специалистов, необходимых для быстрого прогресса в нанонауке и нанотехнологиях.

Особенное внимание уделяется удешевлению производства нанопродуктов за счет перехода от традиционных методов создания нанобъектов «сверху вниз» по шкале размеров к методам молекулярной и атомной самосборки «снизу вверх», подобно тому как это происходит в природе (рис. 40).

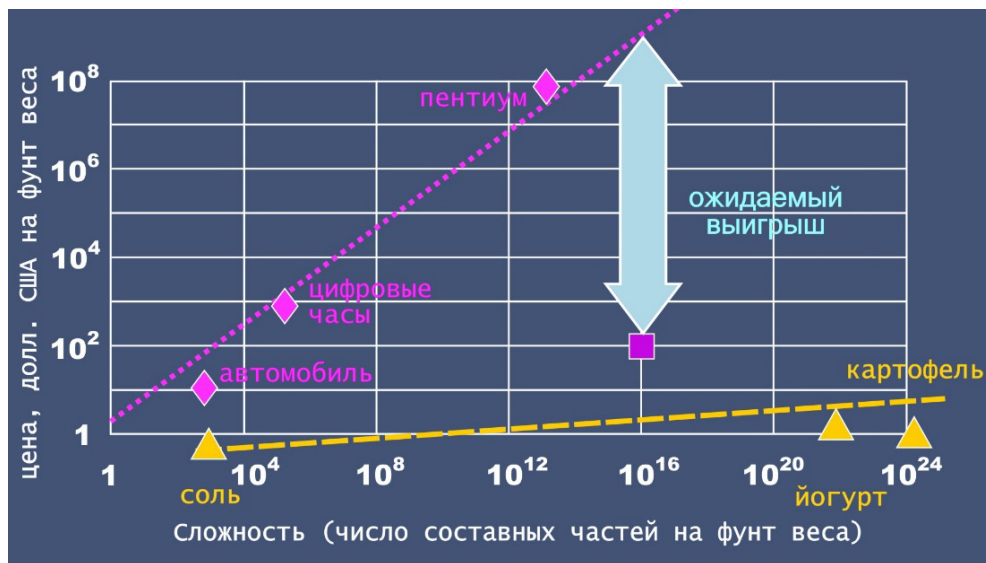


Рис. 40. Оценка удешевления продуктов при переходе от традиционных технологий к нанотехнологиям «снизу вверх»

Интерес к нанотехнологиям подогревался оценкой возможного объема рынков (рис. 41). В частности, в нашей стране для быстрого и эффективного использования нанотехнологий при переходе на новые технологические уклады в 2007 г. была создана госкорпорация «Роснано» (позднее АО «Роснано»).

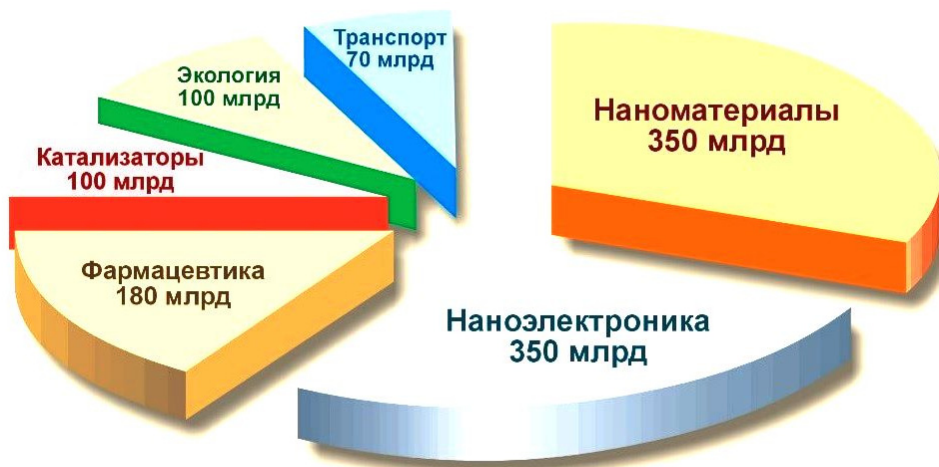


Рис. 41. Прогноз общемирового рынка нанотехнологий: более \$1 трлн ежегодно

Была предложена следующая квалификация нанопродуктов – идентифицировать изделие как нанотехнологическое можно, если по крайней мере один из его размеров находится в диапазоне от 1 до 100 нм и этот размер существен для функций квалифицируемого изделия ⁶. Для полупроводниковых нанотехнологий и наноэлектроники было предложено следующее определение нанопродуктов – использование квантовых свойств наноструктур, применение методов атомной и зонной инженерии при конструировании элементов наноэлектроники, в технологии наноэлектроники – использование эффектов самоорганизации и реализация принципа «снизу вверх» по шкале размеров ⁷.

В числе хорошо известных и новых квантово-механических эффектов в наноструктурах укажем туннелирование электронов, квантование электронных состояний в квантовых ямах, спиновые эффекты, отличающиеся малыми тратами энергии и, наконец, квантовые биты и формирование квантово-запутанных состояний (рис. 42).

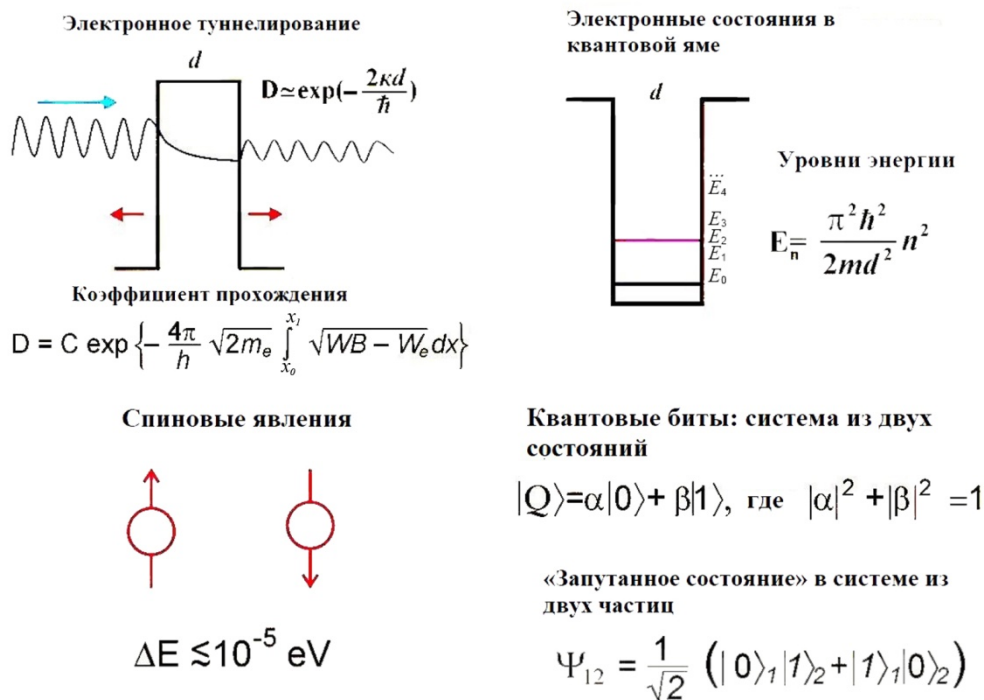


Рис. 42. Квантовые эффекты в наноструктурах

⁶ Забродский А. Г. Нанофинансирование нанотехнологий в России // ПерсТ. 2004. Т. 11. В. 22.

⁷ Алфёров Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3–8.

Квантовые эффекты в полупроводниковых наноструктурах пониженной размерности иллюстрирует рис. 43, который показывает изменение энергетического спектра в квантовых ямах, квантовых проволоках и в квантовых точках. Отметим, что дискретный спектр носителей заряда в квантовых точках подобен спектру электронных состояний в атомах, и с этой точки зрения квантовые точки представляют собой искусственные атомы. По выражению академика Ж. И. Алфёрова, современные ученые, познавая законы природы, становятся подобными богу, поскольку создают новые ранее не известные человечеству материалы с необычными свойствами [8].

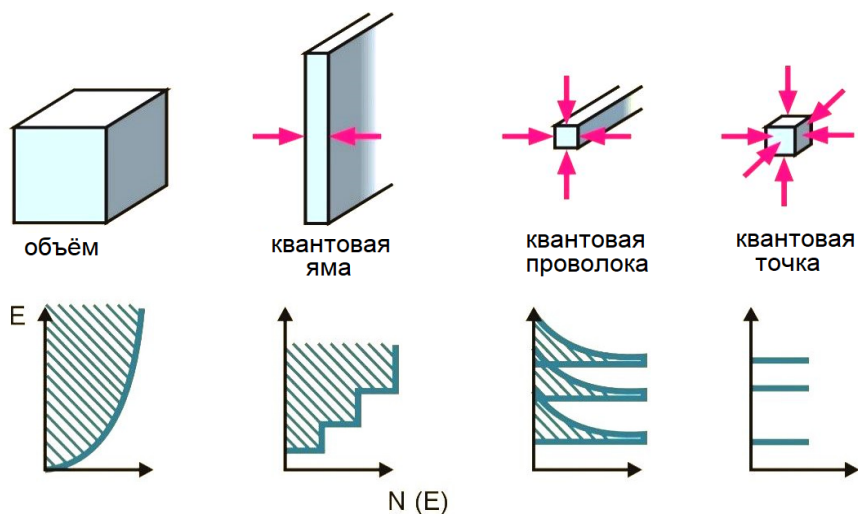
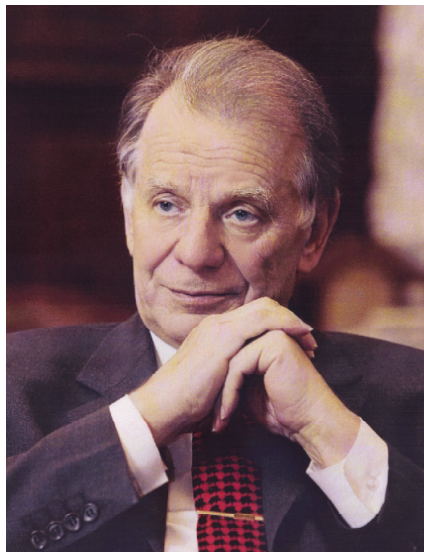


Рис. 43. Плотность электронных состояний в полупроводниковых структурах пониженной размерности

Успехи в изучении и в технологии создания полупроводниковых наноструктур с квантовыми свойствами привели к выдающимся результатам в разработке и реализации полупроводниковых излучающих элементов – лазеров и светодиодов, появлению сверхчувствительных и мощных СВЧ-транзисторов на системах с двумерным электронным газом. Стремительный переход на нанометровые размеры полупроводниковых транзисторов в интегральных схемах и использование нанотехнологий в полупроводниковой электронике лежит в основе технологий грядущего VI-го технологического уклада, призванного революционизировать облик человеческой цивилизации в ближайшие десятилетия. Выдающийся вклад в развитие физики и технологии полупроводниковых наноструктур внес наш соотечественник, Нобелевский лауреат по физике 2000 г. академик **Ж. И. Алфёров**, почетный председатель ученого совета ИФП СО РАН в 2006–2019 гг.

Алфёров Жорес Иванович (15 марта 1930 года, Витебск, Беларусь – 1 марта 2019 года, Санкт-Петербург) – выдающийся физик, доктор физико-математических наук, профессор, академик АН СССР с 1979 г., удостоен Нобелевской премии 2000 г. «за развитие полупроводниковых гетероструктур для быстродействующей электроники, оптоэлектроники и за изобретение интегральных схем». Создатель нового направления в физике полупроводников – физики гетеропереходов и разработки полупроводниковых гетероструктур для быстродействующей микро- и оптоэлектроники. Им открыто явление суперинжекции в структурах с двойными гетеропереходами, созданы «идеальные» полупроводниковые гетероструктуры. С начала 1990-х гг. под руководством Ж. И. Алфёрова ведутся исследования квантовых свойств полупроводниковых наноструктур пониженной размерности; квантовых проволок, квантовых точек, сверхрешеток и новых элементов наноэлектроники на их основе. Закончил факультет электронной техники Ленинградского электротехнического института в 1952 г., работал в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР в лаборатории академика В. М. Тучкевича. Принимал участие в работах по созданию первых отечественных транзисторов, фотодиодов и германиевых выпрямителей высокой мощности. С 1987 по 2003 гг. Ж. И. Алфёров – директор ФТИ им. А. Ф. Иоффе. С 1989 г. возглавлял президиум Петербургского научного центра РАН. Создатель образовательного центра нового типа, ныне Академического национального исследовательского университета РАН в Санкт-Петербурге, ректором которого Ж. И. Алфёров был с его основания и до своей кончины в 2019 г. и который ныне носит его имя. Почетный член многих научных организаций и университетов мира, в том числе Почетный доктор НГУ (2007), почетный председатель Ученого совета ИФП СО РАН (с 2006 г.). Награжден многими орденами и медалями, в том числе орденами «За заслуги перед Отечеством» всех четырех степеней. Лауреат Ленинской премии (1972), Государственных премий СССР (1984) и РФ (2001). Почетный гражданин Санкт-Петербурга, Минска и других городов.

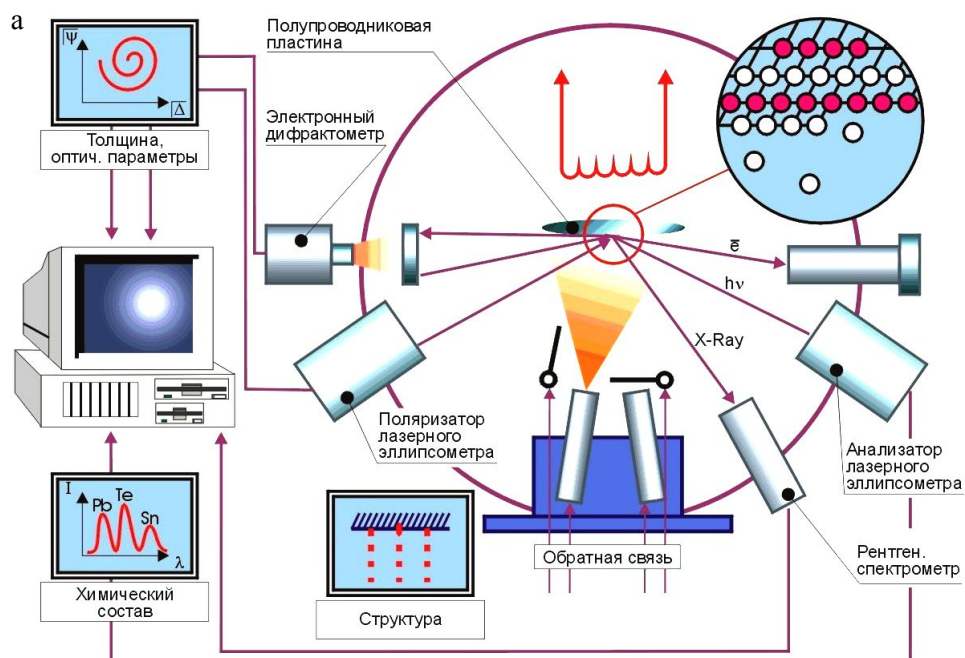


На одном из рабочих совещаний, посвященных стратегии работы в области полупроводниковых нанотехнологий, академик Ж. И. Алфёров высказал мысль о том, что для успешной работы в этой области необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, нужно реально владеть технологиями изготовления полупроводниковых нанострук-

тур, основной из которых является технология молекулярно-лучевой эпитаксии. Во-вторых, необходимо располагать надежной, поэтапной диагностикой изготовленных наноструктур.

С этой точки зрения, важным достижением отечественных разработчиков во главе с д-ром техн. наук **В. А. Быковым** явилось создание в 1989 г. линейки сканирующих туннельных (СТМ) и сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) фирмой NT-MDT (Nano-Technology – Molecular Dynamics Tools, г. Зеленоград). Ныне это группа компаний, которая быстро заняла рыночную нишу этих важных нанодиагностических исследовательских приборов в России и за рубежом. Востребованными оказались линейки СЗМ Solver, Ntegra, Next, NanoEducator, Titanium, а также сверхвысоковакуумный технологический комплекс разработки NT-MDT – «Нанофаб». Доля компании NT-MDT на мировом рынке СЗМ в результате составила 16 % (второе место в мире).

Крупные успехи в области развития технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при получении полупроводниковых наноструктур были достигнуты в ИФП СО РАН большой группой разработчиков во главе с академиком **А. В. Ржановым**, чл.-корр. РАН **К. К. Свиташевым**, д-ром физ.-мат. наук **С. И. Стениным** при активном и основополагающем участии д-ра физ.-мат. наук **О. П. Пчелякова**, д-ра физ.-мат. наук **Ю. Г. Сидорова**, канд. физ.-мат. наук **С. В. Рыхлицкого** и многих других сотрудников института. Рисунок 44, *а* представляет принципиальную схему сверхвысоковакуумной установки МЛЭ, основными частями которой являются блок молекулярных источников и комплекс диагностических методов. Комплекс диагностических методов включает дифракцию быстрых электронов, масс-спектрометрию и автоматическую эллипсометрию, которые обеспечивают контроль параметров выращиваемых структур с атомным разрешением по толщине. В ИФП СО РАН разработана и действует линейка установок МЛЭ для выращивания гетероэпитаксиальных наноструктур Ge/Si, кристаллов A_3B_5 и A_2B_6 [10]. На рис. 44, *б* представлена автоматическая сверхвысоковакуумная установка нового поколения для молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых многослойных гетеросистем и наноструктур «Катунь 100». В институте эксплуатируются также большой парк установок МЛЭ различных модификаций производства ведущей мировой фирмы Riber (Франция).



б



Рис. 44. Принципиальная схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии (а) и внешний вид (б) автоматической сверхвысоковакуумной установки нового поколения для молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых многослойных гетеронаноструктур «Катунь 100»



а



б

Рис. 45. Установки ионной литографии (а) и штамповой (импринт) нанолитографии (б)

Создание полупроводниковых наноструктур пониженной размерности требует применения современных методов оптической, электронной, ионной, зондовой и штамповой (импринт) нанолитографии. В ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН под руководством автора этого пособия, академика **А. В. Латышева** и канд. физ.-мат. наук **Д. В. Щеглова** создан уникальный комплекс технологий нанолитографии. Этот комплекс включает электронный литограф Raith-150 на основе модернизированного сканирующего электронного микроскопа и обеспечивающий получение элементов с латеральным размером до 20 нм. Комплекс нанолитографии также включает установку фокусированных ионных пучков фирмы Zeiss CrossBeam с приставкой для ионной (разрешение до 8 нм) и электронной (разрешение до 1,1 нм) литографии, а также приставку для вырезания тонких образцов для просвечивающей электронной микроскопии (рис. 45, *а*); сканирующую зондовую лабораторию на основе C3M Ntegra Aura и C3M Solver-Smena-P47H с вертикальным разрешением менее 0,08 нм и латеральным разрешением ~ 10 нм, с возможностью модификации поверхности конденсированных сред в различных средах; установку штамповой (импринт) нанолитографии (рис. 45, *б*), которая обеспечивает получение элементов с размером до 10 нм на подложке диаметром до 150 мм.

Основой диагностических методов атомного разрешения при исследовании полупроводниковых наноструктур является комплекс методов высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии. В ИФП СО РАН исследование атомной структуры полупроводниковых наноструктур проводится с помощью уникальных электронных микроскопов атомного разрешения JEM-4000EX, который работает при ускоряющем напряжении 400 кВ и обеспечивает разрешение 0,16 нм (рис. 46, *а*). Электронный микроскоп TITAN 80-300 оснащен системой коррекции сферической аберрации объективной линзы, что обеспечивает разрешением 0,08 нм. На рис. 46, *б* – центральная часть колонны электронного микроскопа. На рис. 47 представлены снимки атомной структуры дефектов кристаллического строения полупроводниковых наноструктур – микродвойниковая ламель в слое $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ (*а*) и скопление точечных дефектов по плоскости $\{111\}$ в Si. На схеме атомной структуры атомы Cd отмечены светлым тоном, атомы Te – темным. Исследование дефектов кристаллической структуры, механизмов их образования в полупроводниковых кристаллах и в наноструктурах представляет собой важную проблему в связи с их влиянием на электрофизические свойства наноструктур и квантовых систем, которое обусловлено нарушением периодичности расположения атомов кристаллической решетки. В то же время

известно, что любое технологическое воздействие на полупроводниковые структуры (эпитаксиальное выращивание тонких слоев и систем пониженной размерности, ионная имплантация, нагрев, деформация и т. д.) изменяет периодичность расположения атомов кристаллической решетки за счет образования границ раздела и дефектов кристаллической решетки. Результаты, имеющие классический характер для изучения атомной структуры дефектов дислокационного типа, границ раздела и скоплений точечных дефектов в полупроводниковых кристаллах, получены в ИФП СО РАН канд. физ.-мат. наук **А. К. Гутаковским** и канд. физ.-мат. наук **Л. И. Фединой**.



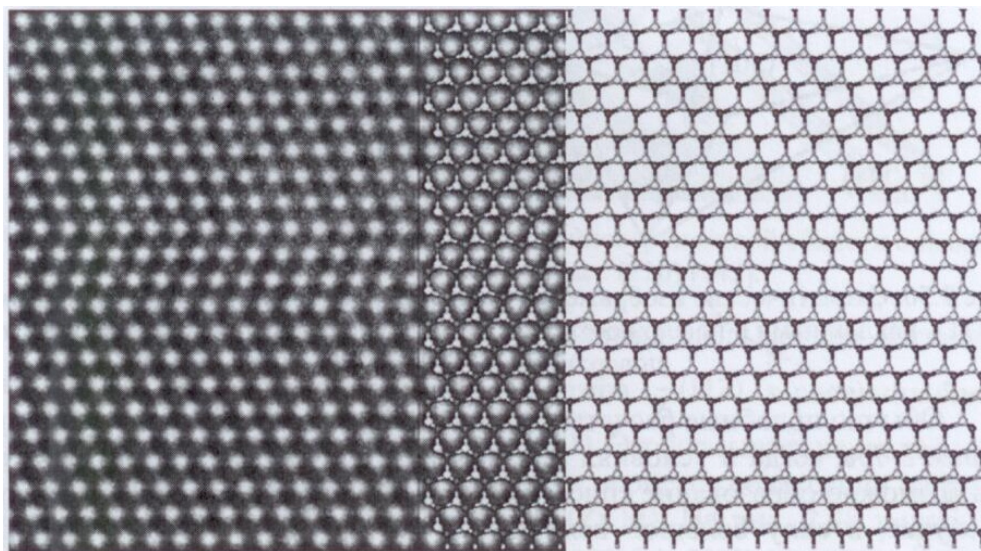
а



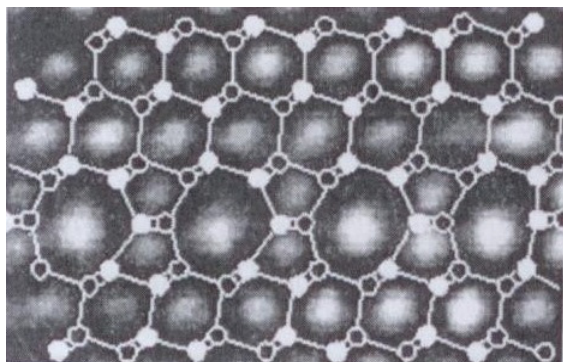
б

*Рис. 46. Высокоразрешающие просвечивающие электронные микроскопы:
а – JEM-4000EX; б – TITAN 80-300, центральная часть колонны
электронного микроскопа*

При поатомном выращивании полупроводниковых наноструктур и квантовых систем в методе молекулярно-лучевой эпитаксии исключительно важными являются точные знания об атомных механизмах поведения осаждаемых атомов, их взаимодействии с поверхностью подложки и с атомными ступенями поверхности подложки, механизмы формирования поверхностных сверхструктур и монослойных покрытий на кристаллической поверхности полупроводниковых кристаллов (рис. 48, а, б).



а

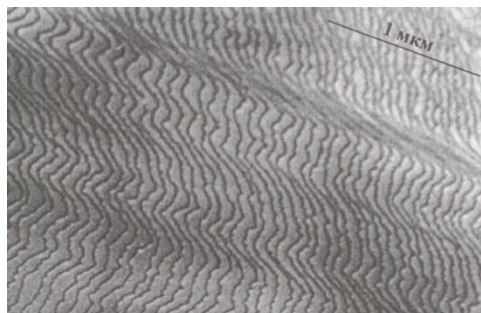


б

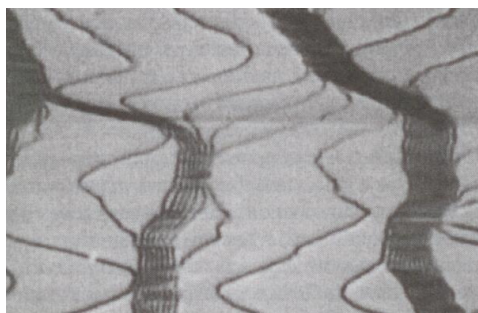
Рис. 47. Высокоразрешающие электронно-микроскопические изображения дефектов и представление их атомной структуры:
а – микродвойниковая ламель в слое $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$. На схеме атомной структуры атомы Cd отмечены светлым, атомы Te – темным тоном;
б – скопление точечных дефектов по плоскости $\{111\}$ в Si

Для этой цели в ИФП СО РАН под руководством акад. **А. В. Латышева** создан многофункциональный аналитический субангстремный сверхвысоковакуумный комплекс – МАССК-ИФП (рис. 48, в). Его центральной частью является развитый в ИФП СО РАН уникальный метод сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ ОЭМ), обеспечивающий исследование атомных процессов на атомно-чистых поверхностях полупроводниковых кри-

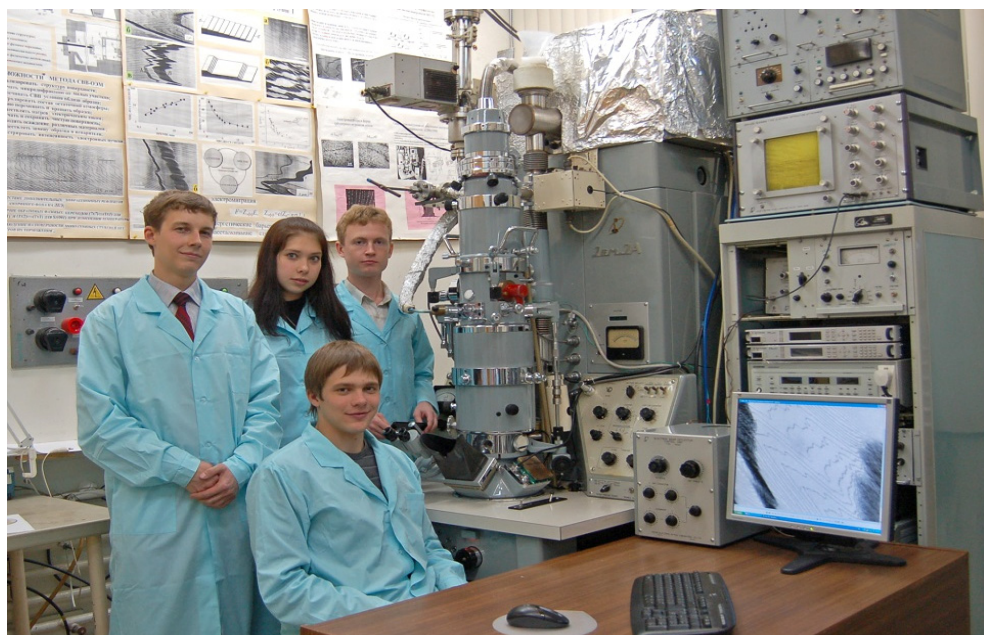
сталлов при сублимации, фазовых переходах на поверхности и при эпитаксиальном росте⁸.



а



б



в

Рис. 48. Обратимый переход системы моноатомных ступеней, изображаемых темными линиями на электронно-микроскопическом снимке (а) на поверхности кремния (111), в систему эшелонов ступеней (б) при сублимации кристалла кремния; молодые сотрудники ИФП СО РАН у сверхвысоковакуумного отражательного электронного микроскопа (в)

⁸ Латышев А. В., Асеев А. Л. Моноатомные ступени на поверхности кремния. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 241 с.; см. также: Латышев А. В., Асеев А. Л. Моноатомные ступени на поверхности кремния // Успехи физ. наук. 1998. Т. 168. № 10. С. 1117–1127.

Мощным методом исследования атомной структуры и элементарных процессов на поверхности полупроводников является метод сканирующей туннельной микроскопии в сверхвысоком вакууме. Эти работы ведутся в ИФП СО РАН совместно с ЦКП ВТАН ФФ НГУ под руководством д-ра физ.-мат. наук **А. А. Шкляева** с помощью STM VT OMICRON (см. разд. «Инфраструктура полупроводниковых нанотехнологий»).

2D-электронный газ, целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла

Ярким примером преимуществ нанотехнологий и новых перспектив в полупроводниковой электронике является получение методами молекулярной эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур с высокоподвижным двумерным электронным газом (рис. 49).

Достижение предельных параметров полупроводниковых транзисторов на основе GaAs по чувствительности, предельной мощности и быстродействию требует высоких значений концентрации и подвижности носителей заряда в активной области транзисторов. Для транзисторов на монокристалле эти требования являются взаимоисключающими, так как увеличение концентрации легирующей примеси приводит к снижению подвижности из-за рассеяния носителей заряда на ионизованных атомах примесей. Нанотехнологии позволяют преодолеть это противоречие за счет пространственного разделения областей с высокой концентрацией примесей и нелегированных слоев с высокой подвижностью электронов. На рис. 49, а представлена энергетическая диаграмма такой структуры на основе гетероперехода слоя нелегированного GaAs с более широкозонным слоем высоколегированного AlGaAs. Рисунок демонстрирует формирование квантовой ямы с повышенным содержанием электронов на уровне Ферми в слое нелегированного GaAs, непосредственно прилегающего к сильнолегированному слою AlGaAs за счет изгиба потенциального рельефа в гетеропереходе (отмечено красным). Образованная тонкая прослойка с большой концентрацией высокоподвижных электронов обладает свойствами двумерного (2D) электронного газа и может рассматриваться как прослойка с металлической проводимостью. Подвижность электронов в квантовых ямах значительно превышает значение подвижности в кристаллах GaAs и достигает величины в несколько миллионов В/см²·с (при температуре жидкого гелия). Транзисторы, созданные на гетеропереходах с высокоподвиж-

ным 2D-электронным газом, имеют аббревиатуру ТВПЭ или НЕМТ – *High Electron Mobility Transistor*. Именно этот тип транзисторов обеспечивает высокую чувствительность приемных каскадов систем радиосвязи, в частности мобильных телефонов, что сделало возможным их компактирование и привело к широкому распространению систем мобильной телефонной связи, спутниковой связи и информационных технологий в целом.

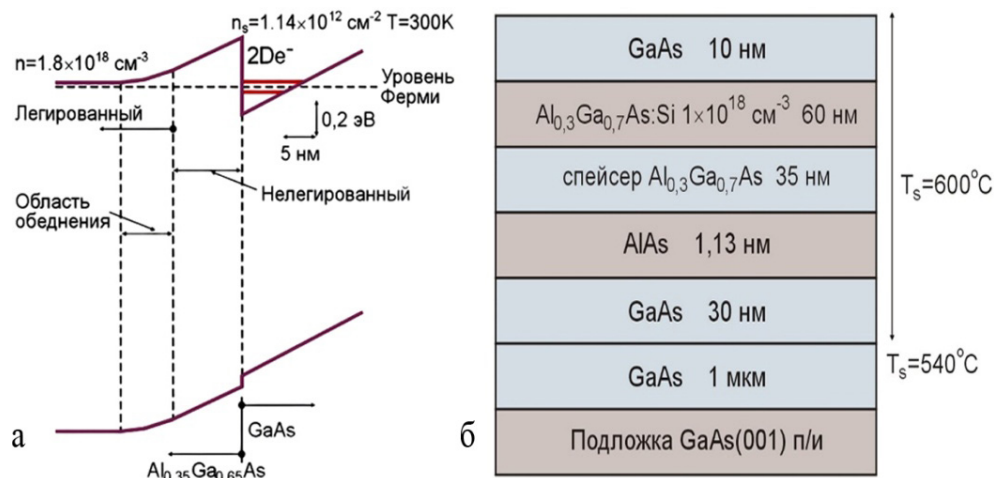


Рис. 49. Профиль энергетической диаграммы (а) гетероструктуры с 2De^- (б), выращенной на установке МЛЭ «Катунь-В»

Электрофизические параметры структуры из измерений эффекта Холла:

- при 300 К – $\mu_s = 5600 \text{ cm}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, концентрация электронов $n_s = 1,14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$;
- при 77 К – $\mu_s = 1,4 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n_s = 4,7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$;
- при 4,2 К – $\mu_s = 1,44 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n_s = 3,6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

Целочисленный квантовый эффект Холла был предсказан теоретически при решении задач электропроводности в двумерной электрон-примесной системе в сильном магнитном поле⁹. Примечательно, что одна из этих работ была сделана сотрудниками теоретической лаборатории ИФП СО РАН Э. М. Баскиным, Л. И. Магариллом и М. В. Энтиным. Экспериментально квантовый эффект Холла был открыт К. фон Клитцингом в 1980 г., при исследовании холловской проводимости двумерного электронного газа в инверсионном канале

⁹ Ando T., Matsumoto Y., Uemuro Y. Theory of Hall Effect in a Two-Dimensional Electron System // J. Phys. Soc. Japan. 1975. V. 39. P. 279–288; Баскин Э. М., Магарилл Л. И., Энтин М. В. Двумерная электронно-примесная система в сильном магнитном поле // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. Вып. 2. С. 723.

МДП-транзистора при пониженной температуре ~ 1 К и в сильном магнитном поле $B > 1$ Т. За это открытие К. фон Клитцинг в 1985 г. был удостоен Нобелевской премии. В дальнейшем целочисленный квантовый эффект Холла уверенно наблюдался в МДП-транзисторах с 2D-электронным газом на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs (рис. 50).

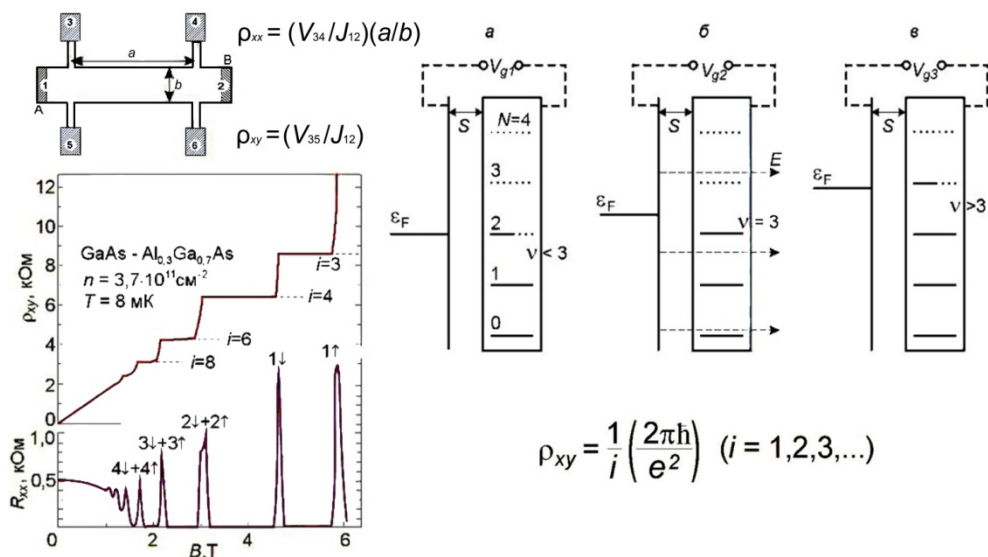


Рис. 50. Целочисленный квантовый эффект Холла. Слева – геометрия измерения эффекта Холла (вверху) и зависимость магнитосопротивления R_{xx} и ρ_{xy} от магнитного поля B в гетероструктуре GaAs/AlGaAs при температуре 8 мК. Электронная плотность в 2D-слое – $3,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, подвижность электронов $4,1 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Стрелки указывают направления спинов на уровнях Ландау с номером N . Справа – схема заполнения уровней Ландау при изменении положения уровня Ферми

Как показывает схема на рис. 50 (справа), возникновение плоских участков на зависимости $\rho_{xy}(B)$ и участки нулевого сопротивления на зависимости $R_{xx}(B)$ связано с пересечением уровней Ландау и уровнем Ферми. При этом возникновение плато на зависимости $\rho_{xy}(B)$ обусловлено постепенным высвобождением электронов, локализованных на примесях и неоднородностях кристалла (см., например, [9]). Замечательным является тот факт, что величина электросопротивления этих участков ρ_{xy} равна комбинации фундаментальных физических констант, деленной на целое число i : $\rho_{xy} = 2\pi\hbar/ie^2$, где $\hbar$ – приведенная постоянная Планка, e – заряд электрона. Величина h/e^2 получила название постоянной Клитцинга. Высокая точность квантования холловского сопротив-

ления и воспроизводимость экспериментальных результатов привели к созданию эталона сопротивления равного $2\pi\hbar/e^2 = 25\,812,808\text{ Ом}$.

Дальнейшие исследования квантового эффекта Холла в образцах более высокой чистоты и в более сильных магнитных полях привели к открытию в 1982 г. дробного квантового эффекта Холла, в котором плато холловского сопротивления наблюдается не только при целочисленных, но и при дробных значениях i (рис. 51). За эту работу Р. Б. Лафлин, Х. Штермер, Д. Цуи были удостоены Нобелевской премии в 1998 г.

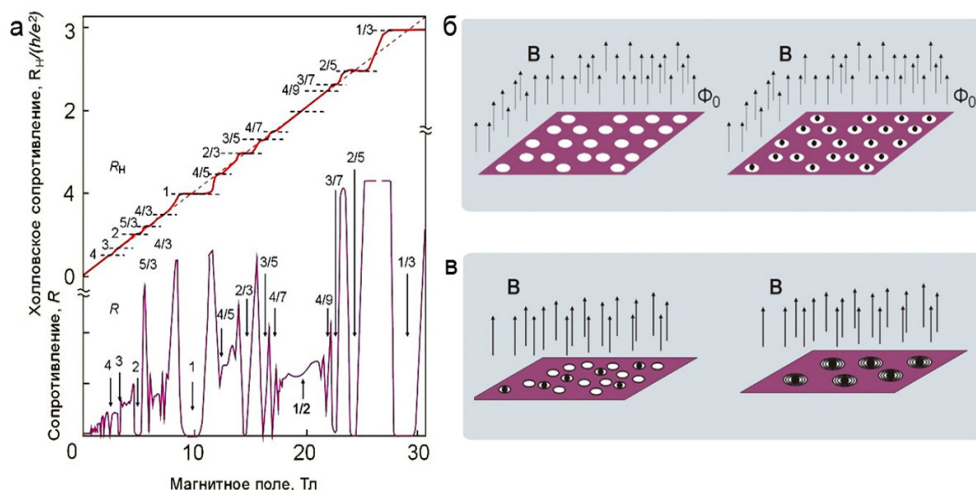


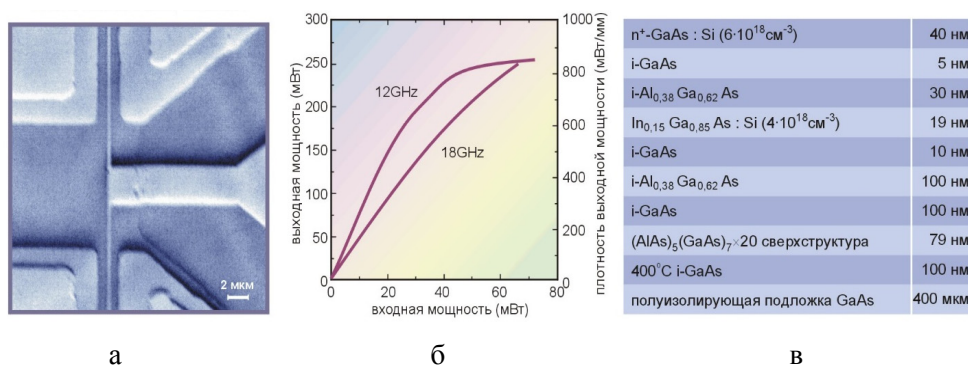
Рис. 51. Дробный квантовый эффект Холла. В – направление магнитного поля: а – холловское сопротивление R_H и магнитосопротивление в гетероструктуре GaAs/AlGaAs со сверхвысокой подвижностью; б – взаимодействие вихрей магнитного поля и электронов в случае целочисленного эффекта Холла. Полное заполнение уровней Ландау; в – электрон-вихревое притяжение и образование композитных частиц при дробном заполнении уровней Ландау

Вначале обнаружение дробного квантового эффекта Холла было ошибочно интерпретировано в качестве свидетельства дробного заряда электрона. Впоследствии Р. Б. Лафлин предложил теоретическое объяснение этого явления, суть которого заключается в том, что электроны объединяются в частицы нового типа с вихрями (квантами) магнитного поля, образуя т. н. составные (композитные) частицы. При этом каждый электрон располагается в центре вихря магнитного поля для уменьшения общей энергии системы, как показано на рис. 51 справа. При высоких значениях магнитного поля число вихрей магнитного поля превышает число электронов и такого рода составные

частицы можно рассматривать как подчиняющиеся не статистике Ферми–Дирака, а статистике Бозе–Эйнштейна, для которой не работает принцип Паули. Таким образом, измеряемый экспериментально дробный заряд электрона относится не к отдельным электронам, а к композитным частицам, включающим различное число вихрей (квантов) магнитного поля, как это показано на схеме справа внизу на рис. 51¹⁰.

Гетероструктуры для СВЧ-электроники и радиофотоники

Как уже упоминалось, гетероструктуры на основе кристаллов A_3B_5 с двумерным электронным газом являются основой для создания СВЧ-электронной компонентной базы для современных систем связи гражданского (сотовая телефония, высокоскоростные оптоволоконные линии связи, цифровое телевидение, связи широкополосного доступа и т. д.), а также в системах связи и управления специального назначения, таких как активные фазированные антенные решетки (АФАР). На рис. 52 представлено типичное изображение в сканирующем электронном микроскопе (фото слева) микроволнового полевого НЕМТ транзистора с субмикронным затвором на псевдоморфной эпитаксиальной гетероструктуре $AlGaAs/InGaAs/GaAs$, выходные характеристики транзистора (график в центре) и структура полевого транзистора, выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии (справа).



а

б

в

Рис. 52. Микроволновой полевой транзистор:

а – изображение в сканирующем электронном микроскопе;

б – выходные характеристики; в – эпитаксиальная структура

¹⁰ Лафлин Р. Б., Штермер Х., Цуи Д. Открытие нового вида квантовой жидкости с дробно заряженными возбуждениями // Успехи физ. наук. 2000. № 170. № 3. С. 289–324.

С целью улучшения параметров мощных полевых НЕМТ транзисторов коллективом авторов из ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова и ОАО «НПП Исток» им. А. И. Шокина предложена новая конструкция и МЛЭ технология изготовления гетероструктур с дополнительными потенциальными барьерами для электронов delta-(pn)-AlGaAs/InGaAs/GaAs (DpHEMT), не имеющая аналогов в мире.

Дополнительные потенциальные барьеры создавались легированием акцепторами нанометровых областей широкозонных слоев AlGaAs вокруг канала транзистора (рис. 53). По данным измерений в ОАО «НПП Исток» выходная удельная мощность таких транзисторов достигла величины 1,6 Вт/мм, при усилении 8 дБ на частоте 10 ГГц, что значительно превосходят параметры лучших зарубежных DpHEMT¹¹.

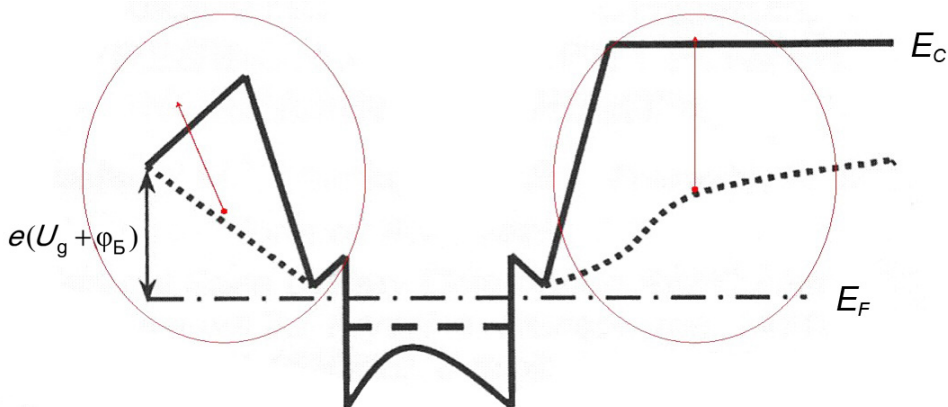


Рис. 53. Структура активной области delta-(pn)-DpHEMT.
Выделены области дополнительного легирования

Важным направлением работы по увеличению выходной мощности и рабочей частоты является переход на технологию выращивания гетероструктур AlGaN/GaN. В этом случае удельная выходная мощность НЕМТ достигает 5,6 Вт/мм при частоте 14 ГГц, см. книгу [10], с. 565–569.

¹¹ Протасов Д. Ю., Бакаров А. К., Торопов А. И. и др. Подвижность двумерного электронного газа в DA-pHEMT-гетероструктурах с различной шириной профиля δ -n-слоев // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. Вып. 1. С. 48–56; Богданов С. А., Бакаров А. К., Журавлев К. С. и др. Полевой транзистор миллиметрового диапазона длин волн на основе псевдоморфной гетероструктуры с дополнительными потенциальными барьерами // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 7. С. 52–54.

Новой и перспективной технологией обработки аналоговых данных являются системы радиофотоники, в которых для передачи СВЧ-сигналов используются волоконно-оптические линии (ВОЛС), а для их обработки применяют подходы фотоники. Реализация преимуществ передачи СВЧ-сигналов с помощью ВОЛС (сверхширокая полоса пропускания, устойчивость к помехам, компактность) требует применения мощных высокоскоростных фотодиодов для преобразования оптического сигнала в электрический с частотой в диапазоне до 50 ГГц. Задача создания мощных высокоскоростных фотодиодов на основе гетеропитаксиальных гетероструктур InAlAs/InGaAs выполнена в совместной работе исследователями из ИФП СО РАН (К. С. Журавлев, А. М. Гилинский, А. И. Торопов) и из ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси (А. Л. Чиж, К. Б. Микитчук). На рис. 54 представлено схематическое изображение мезаструктуры СВЧ-фотодиода, изготовленной на основе эпитаксиальной гетероструктуры, выращенной методом МЛЭ; рис. 55 представляет амплитудно-частотную характеристику фотодиода (а) и зависимость выходной мощности СВЧ-сигнала от входной оптической мощности (б).

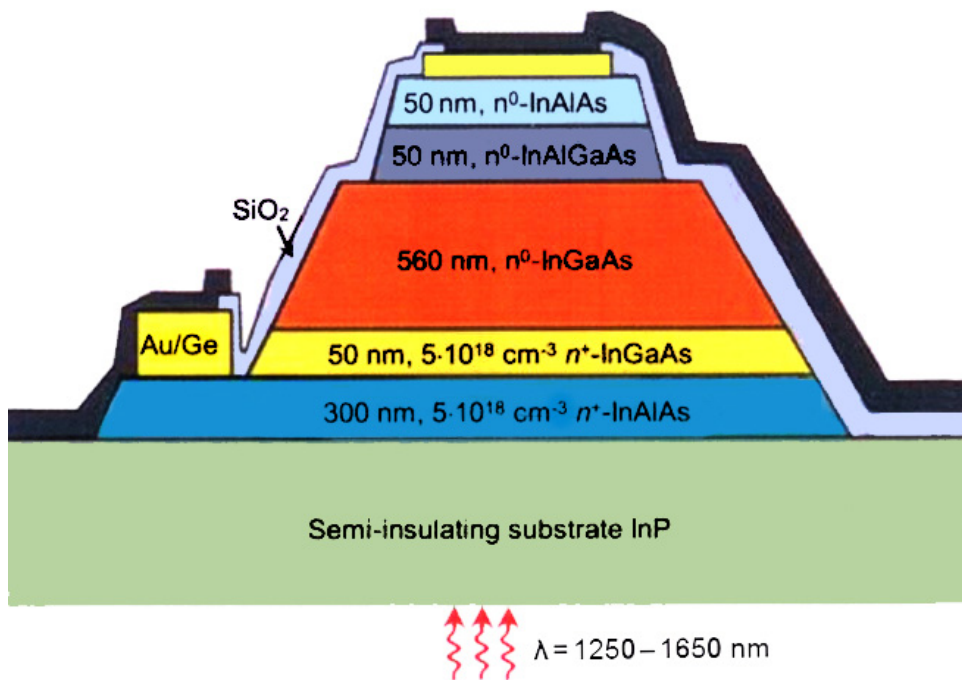


Рис. 54. Схематическое изображение поперечного среза СВЧ-фотодиода. Стрелками показано направления оптического излучения. Внизу — полуизолирующая подложка InP

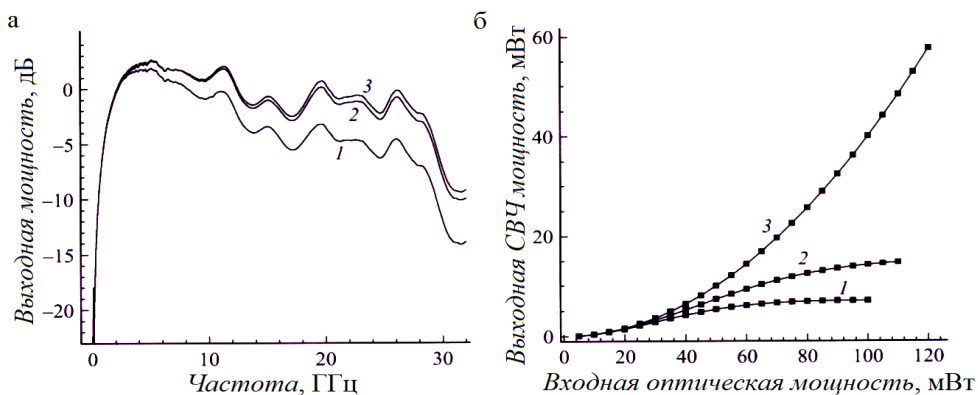


Рис. 55. Амплитудно-частотная характеристика фотодиода (а) и зависимость выходной мощности СВЧ-сигнала от входной оптической мощности при различном обратном смещении (б)

Контакты фотодиода толщиной 5 мкм выполняются в виде микрополосковых выводов, с помощью которых обеспечивается монтаж фотодиода методом перевернутого кристалла непосредственно на копланарную СВЧ-линию передачи, которая является также теплоотводом. Оптическое излучение направляется в фоточувствительную область фотодиодов через полуизолирующую подложку InP, прозрачную в спектральном диапазоне 1,26–1,65 мкм распространенных ВОЛС на основе волокон $\text{SiO}_x/\text{SiO}_y$. Достигнутый уровень полосы рабочих частот до 30 ГГц и выходной мощности до 60 мВт разработанных СВЧ-фотодиодов позволяет использовать их в аналоговых ВОЛС передачи СВЧ-сигналов с широким линейным динамическим диапазоном, а также для генерации и обработки СВЧ-сигналов оптическими методами в системах радиосвязи, радиолокации и измерительной СВЧ-техники¹².

Принц-технология, трубчатые сенсоры

Технология молекулярно-лучевой эпитаксии лежит в основе оригинального метода наноструктурирования, позволяющего формирование трехмерных наноструктур атомной точности разнообразной формы и геометрии. Метод был предложен сотрудником ИФП СО РАН д-ром физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН **В. Я. Принцем**, выпускником

¹² Чиж А. Л., Микитчук К. Б., Журавлев К. С. и др. Мощные высокоскоростные фотодиоды Шоттки для аналоговых волоконно-оптических линий передачи СВЧ-сигналов // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 14. С. 52–54; Zhuravlev K. S., Chizh A. L., Mikitchuk K. B. et al. High-power InAlAs/InGaAs Schottki barrier photodiodes for analog microwave signal transmission // J. Semiconductors. 2022. V. 43. P. 012302.

НГУ 1972 г. [11]. Метод формирования трехмерных наноструктур по его имени получил название «принц-технология» или «принцтроника». Суть метода иллюстрируется на рис. 56 на примере гетероструктуры $p^+-Si/p^+-GeSi-n-Si$ и состоит в выращивании упруго напряженных гетероэпитаксиальных структур p^+-Si/p^+-GeSi с жертвенным слоем $n-Si$. Затем проводится литография для задания формы будущей трехмерной (3D) наноструктуры и производится удаление селективным травлением жертвенного слоя $n-Si$. При удалении жертвенного слоя силы межатомного взаимодействия в двухслойной напряженной гетероструктуре действуют в противоположных направлениях и изгибают ее, так что формируется изначально плоская гетероструктура сворачивается в трубку. В результате формируются микро- и нанотрубки заранее заданного диаметра и толщины стенок, как показано на рис. 56. Эти параметры задаются технологией МЛЭ с точностью до одного монослоя, что определяет прецизионность геометрических размеров, формируемых методом принцтроники трехмерных структур.

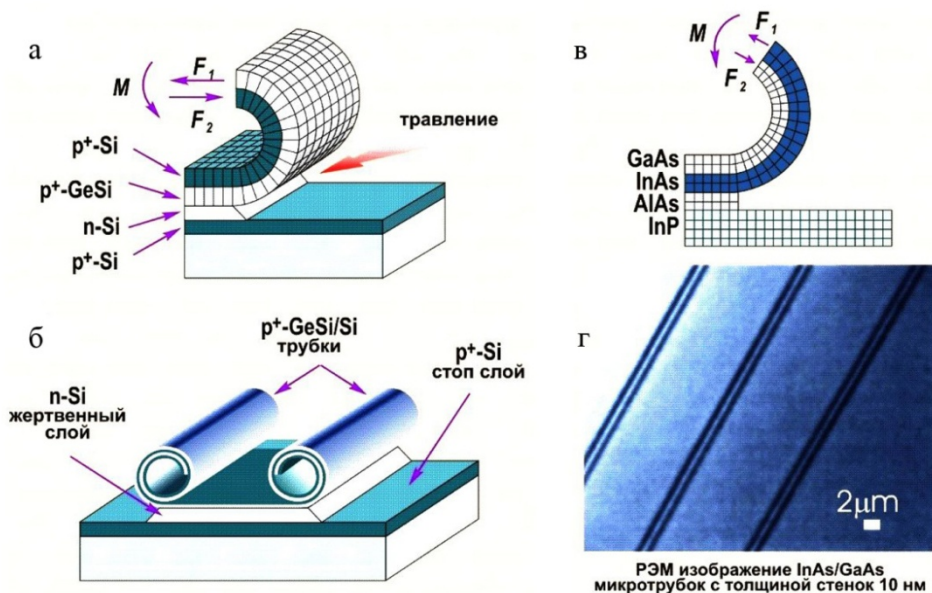


Рис. 56. Принцип формирования полупроводниковых микро- и нанотрубок в гетероэпитаксиальной структуре $p^+-Si/p^+-GeSi-n-Si$ (а–б); схема формирования (в) и изображение в растровом электронном микроскопе микротрубок InAs/GaAs с толщиной стенок 10 нм (г)

Метод принц-технологии относится к разновидности методов молекулярной сборки «снизу вверх» и позволяет формировать сложные трехмерные наноструктуры и их массивы разнообразной формы –

нанотрубки, нанокольца, спиральные структуры, нановолокна, нано-гофрировки, микро- и нанооболочки, различного рода метаматериалы и т. д. Неожиданным экспериментальным фактом явилась высокая устойчивость 3D-наноструктур к окислению в атмосферной среде при комнатной температуре [11].

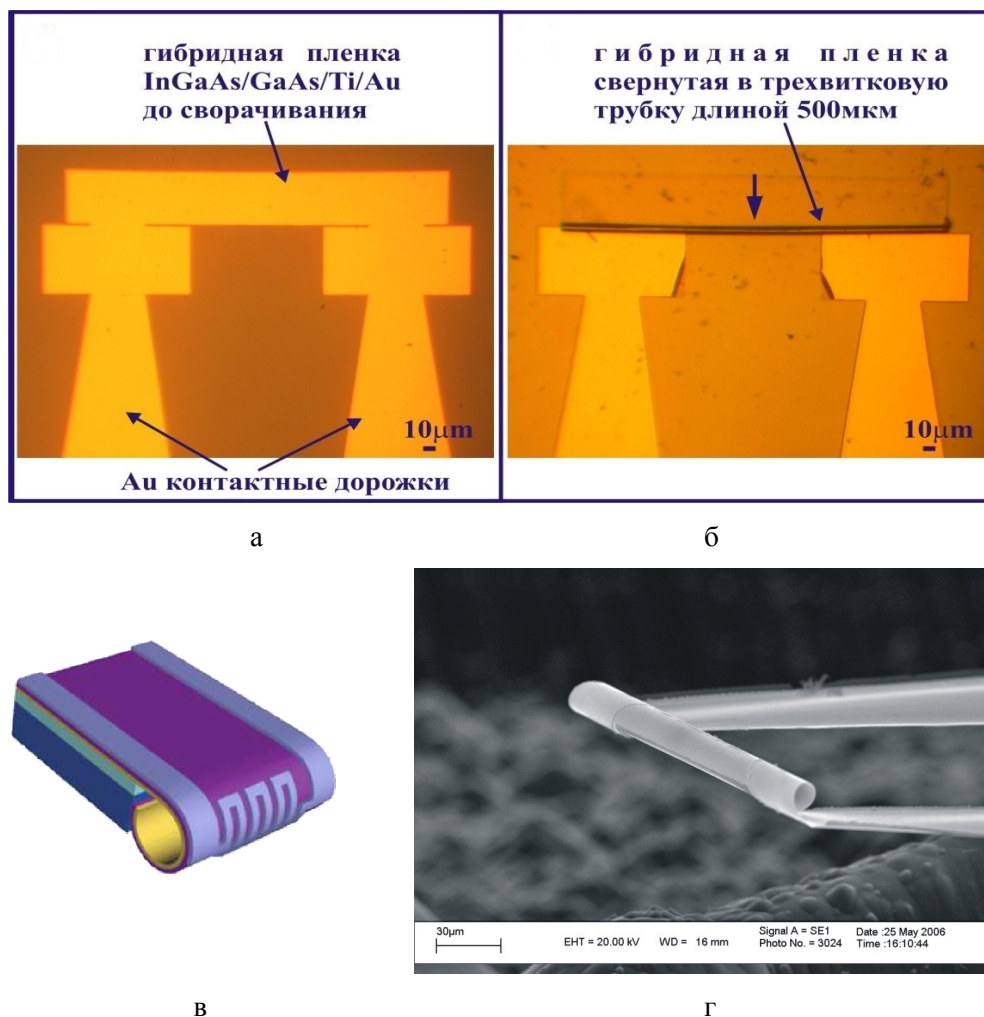


Рис. 57. Гибридный трубчатый микротермоанемометр InGaAs/GaAs/Ti/Au.

Схема изготовления (а-в) и изображение на держателе, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (г)

Один из ярких примеров эффективности метода принц-технологии состоит в создании сверхбыстродействующих высокочувствительных микротермоанемометров на основе полупроводниковых и металлических нанотрубок. Рисунок 57 представляет процесс формирования

гибридного микротермоанемометра InGaAs/GaAs/Ti/Au, изготовленного с помощью МЛЭ, оптической литографии и в едином технологическом процессе с приготовлением контактов к трубчатому датчику. Постоянная времени трубчатых датчиков составляет ~ 1 мкс при постоянной времени монокристаллических проволочных датчиков ~ 1 мс при большей чувствительности. Сверхбыстродействующие и сверхчувствительные трубчатые термоанемометры используются для фиксации ламинарно-турбулентного перехода в совместных работах ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН и ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН при решении проблем аэродинамики в самолето- и ракетостроении.

Принципиально новым явилось использование методов принцип-технологии для получения изогнутых гетероструктур с высокоподвижным двумерным электронным газом (ДЭГ). Рисунок 58 иллюстрирует результат изящного эксперимента по приготовлению в едином цикле цилиндрически изогнутой холловской структуры с ДЭГ в квантовой яме GaAs вместе с контактами 1-6 (а-в). В качестве источника упругих напряжений использован слой InGaAs, жертвенным слоем служил слой AlAs. Исследование баллистического транспорта ДЭГ в изогнутой холловской структуре в магнитном поле привело к обнаружению гигантской асимметрии (до 10^3) продольного магнитосопротивления двумерного электронного газа на разных сторонах изогнутой поверхности (R_{23} и R_{56} на рис. 59).

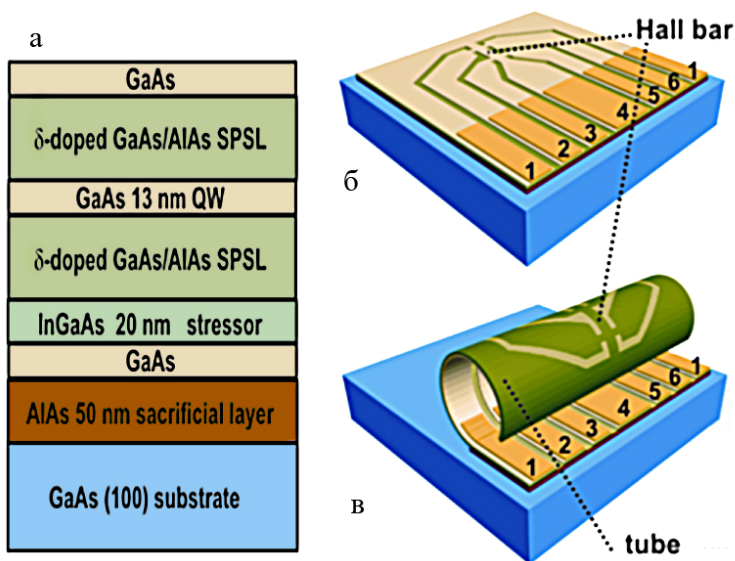


Рис. 58. Схема получения изогнутой холловской структуры с высокоподвижным двумерным электронным газом в квантовой яме GaAs, свернутой вместе с тонкопленочными контактами

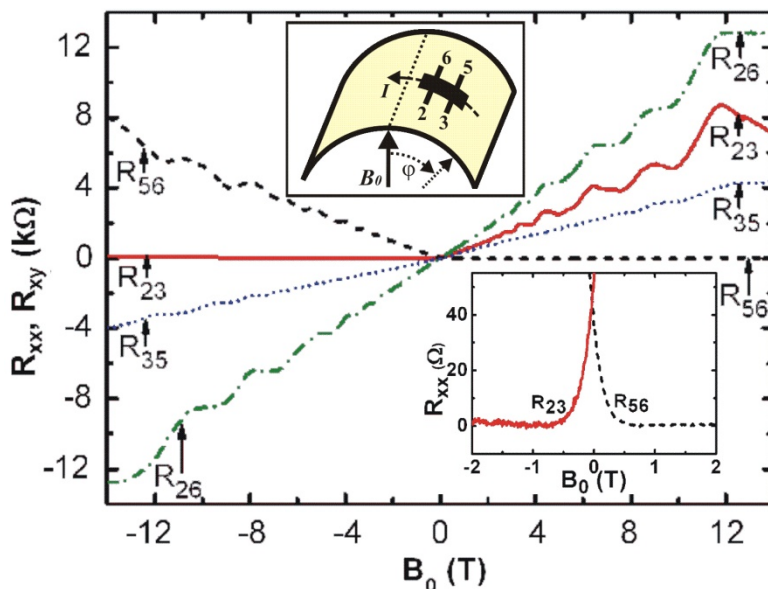


Рис. 59. Магнитосопротивление ДЭГ в цилиндрически изогнутой структуре. На верхней вставке показана геометрия эксперимента, нижняя вставка – магнитосопротивление R_{xx} в зависимости от величины и направления магнитного поля, индексы R_{ij} отвечают номерам контактных площадок

Объяснение данного эффекта состоит в том, что в изогнутых образцах уровни Ландау для электронов в магнитном поле изгибаются так, что появляются дополнительные линии пересечения с уровнем Ферми и дополнительные токопроводящие состояния. Вместе с обычными «краевыми» состояниями они образуют замкнутые контуры, форма и расположение которых зависят от радиуса изгиба, величины и направления магнитного поля. Величина измеряемого сопротивления определяется относительным положением контуров этих состояний относительно потенциальных контактов, при этом некоторые замкнутые контуры замыкаются на токовых контактах и не формируют продольные токи. Зануление электропроводности в изогнутом ДЭГ имеет такую же природу, как в обычном плоском ДЭГ, однако из-за несовпадения уровня Ферми с одним из уровней Ландау во всем образце зануление электропроводности наблюдается во всем диапазоне квантующих магнитных полей для каждого из противоположных направлений магнитного поля B ¹³.

¹³ Vorob'ev A. B., Friedland K.-J., Kostial H. et al. Giant asymmetry of the longitudinal magnetoresistance in high-mobility two-dimensional electron gas on a cylindrical surface // Phys. Rev. 2007. V. 75. № 20. P. 205309–205312.

Точное решение классического эффекта Холла в неоднородном магнитном поле, электронного спектра и транспорта в изогнутых нанотрубках было дано ранее в работах **А. В. Чаплика** и др.¹⁴

В заключение данного раздела отметим, что холловские датчики широко используются для регистрации малых магнитных полей, а их приготовление методами принц-технологии открывает пути создания более высокочувствительных датчиков магнитного поля.

Элементы солнечной энергетики

Фотогальванические элементы на полупроводниковых кристаллах с *p-n*-переходами являются важнейшей частью солнечной энергетики, имеют критическое значение для развития экологической чистой «зеленой» энергетики и являются практически единственным источником энергии для космических аппаратов и систем. В числе главных трендов развития в этой области – солнечные элементы (СЭ) на основе кристаллов кремния; каскадные СЭ на основе полупроводниковых гетероструктур прямозонных соединений A_3B_5 ; концентраторные системы и фотоактивные среды с «промежуточной зоной»¹⁵. На рис. 60 схематически представлена гетероструктура трехкаскадного элемента (Al)GaInP/GaAs на подложке Ge, каскады, которые связаны друг с другом туннельными переходами, выполненными из GaAs. Эпитаксиальное выращивание таких сложных структур – это одностадийный и полностью автоматизированный процесс с использованием метода газофазовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС ГФЭ). Опыт разработки и применения трехкаскадных солнечных элементов позволяет рассчитывать на практическую реализацию четырех-, пяти- и более многокаскадных структур с возможным применением слоев материалов A_3N . Отметим, что увеличение числа каскадов солнечных элементов – это основной путь повышения их эффективности, о чем свидетельствуют данные табл. 3.

¹⁴ Магарилл Л. И., Романов Д. А., Чаплик А. В. Низкоразмерные электроны в криволинейных наноструктурах // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 3. С. 325–327; Chaplik A. V. Electronic spectrum and ballistic transport in bent nanotubes // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80. № 2. С. 140–142.

¹⁵ Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–947.

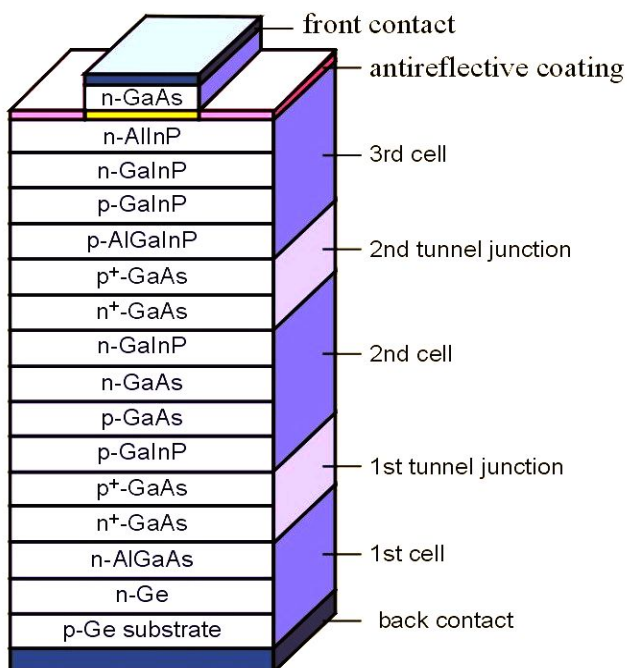


Рис. 60. Поперечный разрез трехкаскадного солнечного элемента с указанием лицевого и тыльного контактов, преобразующих каскадов и туннельных переходов между ними

Таблица 3

Теоретические, ожидаемые и достигнутые значения КПД каскадных солнечных элементов для различных значений воздушной массы AM (air mass)

Солнечный спектр	Коэффициент полезного действия					
	Значение	Количество <i>p-n</i> -переходов в каскаде				
		1	2	3	4	5
В условиях околоземного космоса (AM 0)	Теоретические	28	33	38	42	45
	Ожидаемые	23	28	33	36	38
	Достигнутые	21,8	27,2	29,3	—	—
В наземных условиях (AM 1,5)	Теоретические	30	36	42	47	49
	Ожидаемые	27	33	38	42	44
	Достигнутые	25,1	30,3	31,0	—	—
В наземных условиях с концентрацией (AM 1,5)	Теоретические	35	42	48	52	54
	Ожидаемые	31	38	43	47	49
	Достигнутые	27,6	31,1	34,0	—	—

Еще один путь повышения КПД фотовольтаических преобразователей состоит в переходе к преобразованию предварительно сконцентрированного солнечного излучения. В пользу перехода к преобразованию предварительно сконцентрированного солнечного излучения свидетельствуют и стоимостные факторы, поскольку приготовление исходных высокочистых материалов и процесс изготовления многокаскадных солнечных элементов являются весьма дорогостоящими. Концентрация солнечного излучения с кратностью $\times 500$ осуществляется за счет применения плоских френелевских линз, приготавливаемых из обычного стекла, как и весь концентраторный модуль, разработанный в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН (рис. 61). При применении вторичных минилинз, расположенных в непосредственной близости к фотоэлементу, ожидается достижение кратности до $\times 1000$.

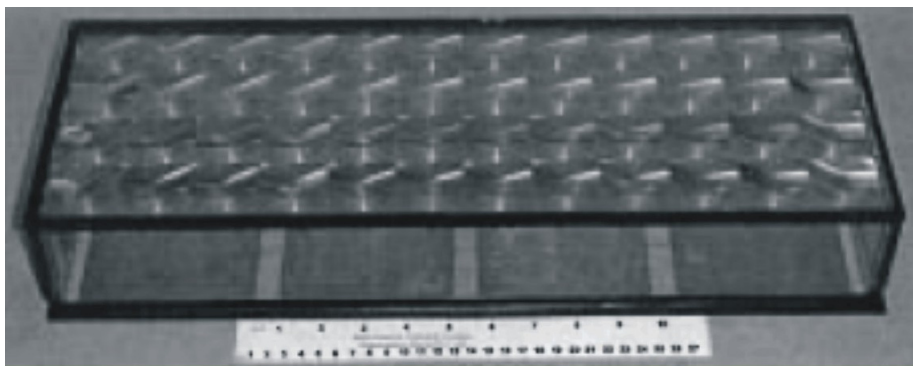


Рис. 61. Экспериментальный фотовольтаический модуль для преобразования концентрированного солнечного излучения с панелью из линз Френеля

Перспективы увеличения эффективности солнечных элементов при использовании полупроводниковых материалов с промежуточной зоной в запрещенной зоне основного полупроводника рассмотрены, например, в работе А. Marti с соавт.¹⁶ Предлагается формировать промежуточную зону за счет введения квантовых точек (КТ) узкозонного материала в солнечный элемент из более широкозонного материала, например, КТ InAs в GaAs (рис. 62). В этом случае ожидается поглощение фотонов как коротковолнового солнечного излучения, которые не поглощаются материалом широкозонного полупроводника, так и длинноволнового излучения за счет перехода носителей из валентной зоны в промежуточную, так и из промежуточной зоны в зону проводимости (указаны

¹⁶ Marti A., Cuadra L., Lopez N., Luque A. Intermediate band solar cells: comparison with Shockley-Read-Hall recombination // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 985–987.

стрелками на рис. 62 слева). В результате фототок увеличивается за счет увеличения спектра поглощаемого солнечного света при сохранении высокого значения выходного напряжения солнечного элемента, т. е. эффективность СЭ возрастает. Это подтверждается теоретическими расчетами, которые показывают значительное увеличение значения эффективности солнечного элемента с промежуточной зоной по сравнению с однопереходным и каскадным элементами (график на рис. 62 справа).

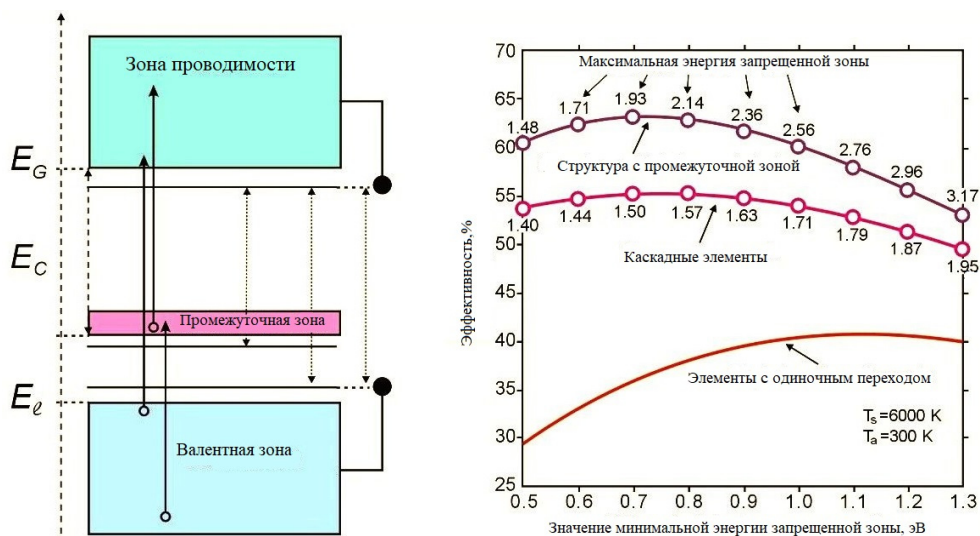


Рис. 62. Схема зонной структуры солнечного элемента с промежуточной зоной (слева) и рассчитанные значения эффективности для однопереходного элемента, каскадного элемента и солнечного элемента с промежуточной зоной в зависимости от минимума энергии запрещенной зоны (справа)

К сожалению, реализация преимуществ СЭ с промежуточной зоной затрудняется трудностью выращивания СЭ с большой концентрацией КТ узкозонного материала и формированием генерационно-рекомбинационных центров на границе раздела КТ с материалом широкозонного материала – матрицы.

Квантовый транспорт в наноструктурах

Исследование баллистического квантового транспорта электронов в наноструктурах на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с высокоподвижным электронным газом представляет интерес для построения нового поколения логических квантовых, одноэлектронных и спиновых устройств. Такие устройства отличаются малыми размерами и низкой температурой реализации когерентного транспорта носителей заряда. Работа по исследованию эффектов баллистического транспорта

в квантовых точках и кольцевых квантовых интерферометров ведется в рамках вычислительно-экспериментальной интроскопии субмикронных квантовых и одноэлектронных GaAs/AlGaAs гетероструктур с 2D-электронным газом и организована по инициативе выпускников НГУ **В. А. Ткаченко** и **О. А. Ткаченко** [10, с. 132–151]. Типичные значения концентрации и подвижности электронов в 2D-электронном газе составили 10^{11} – 10^{12} см⁻² и 10^5 – 10^6 см²/В·с соответственно при $T = 4,2$ К. Геометрия устройств задавалась реактивно-ионным травлением, латеральный профиль которого определялся электронно-лучевой литографией остросфокусированным электронным пучком. Использовалась также нанолитография с помощью зонда атомно-силового микроскопа (АСМ), предложенная выпускником НГУ, ныне заведующим лабораторией ИФП СО РАН **Д. В. Щегловым**. При этом проводилось локальное прокисление гетероструктур GaAs/AlGaAs с 2D-электронным газом с латеральным разрешением до 40 нм. С помощью методов нанолитографии были изготовлены малые участки треугольной формы (трехвходовые квантовые точки) между тремя соседними антиточками. На рис. 63, *а* показана топология наноструктур, содержащих области 2D-электронного газа (отмечены синим цветом).

Кондактанс наноструктур определялся с помощью многоканальной формулы Ландауэра, а влияние магнитного поля учитывалось с помощью рекурсивных функций Грина. Рис. 63, *б* демонстрирует крупные провалы кондактанса (проводимости) в зависимости от уровня Ферми, задаваемого на верхнем затворе структуры с трехвходовой квантовой точкой. По итогам вычислительного моделирования эти провалы были обусловлены асимметричной резонансной интерференцией Фано. Из результатов вычислительного эксперимента следует, что характерное расстояние между провалами кондактанса ΔE_F отвечает изменению числа электронов в квантовой точке приблизительно на 10. В случае 2, в котором точка менее открыта и менее симметрична, хорошо видно дублетное расщепление пиков кондактанса при нулевой температуре и в нулевом магнитном поле. Величина расщепления соответствует изменению числа электронов в точке на 2-3, то есть речь идет о расщеплении на двух уровнях, между которыми нет других дискретных состояний.

Микроскопические картины интерференции рассчитаны на суперкомпьютерах Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН (Новосибирск), Международного суперкомпьютерного центра РАН (Москва) и суперкомпьютерного центра IDRIS CNRS (Франция) для наиболее интересных особенностей кондактанса трехвходовой квантовой точки, отмеченных звездочками на рис. 63, *б*, приведены на рис. 63, *в*.

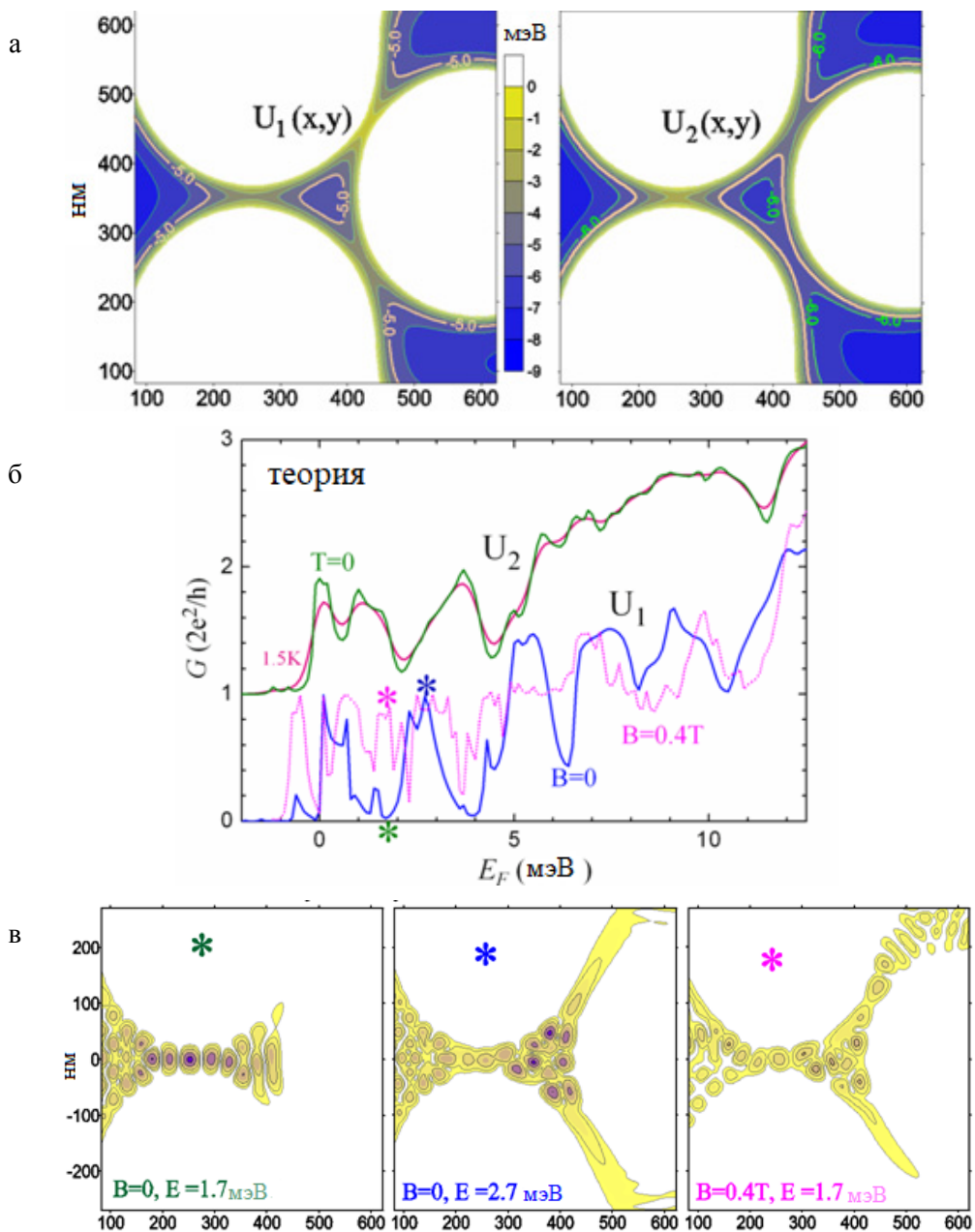
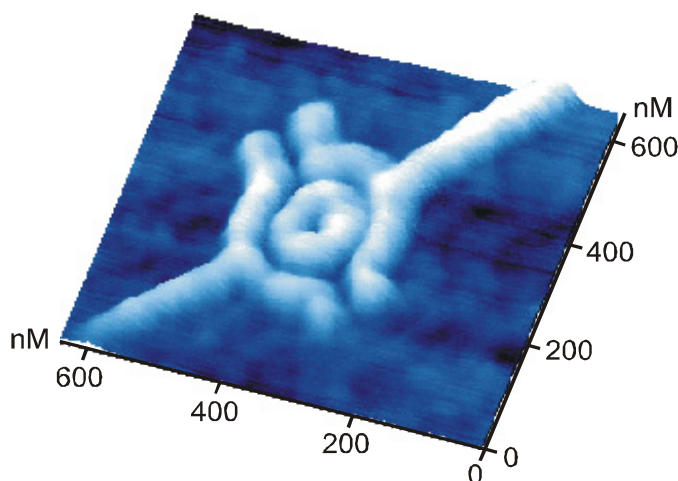


Рис. 63. Профили потенциала трехходовой квантовой точки (а), вычисленные зависимости полного кондактанса квантовой точки для разных профилей потенциала U_1 и U_2 от энергии Ферми (б) и (в) распределение электронной плотности для потенциала U_1 в точках, отмеченных звездочкам разного цвета на нижней кривой в (б)

Предполагается, что электроны движутся слева направо и в случае сильного отражения волновая функция представляет собой стоячую волну (левая картина на рис. 63, в) и электроны не распространяются через квантовую точку. Для состояния полной проницаемости треугольной точки бегущая волна распространяется через оба сужения, прилегающие к кантовой точке, с высокими пиками плотности непосредственно в квантовой точке (средняя часть рис. 63, в). При наличии слабого магнитного поля $B = 0,4$ Тл поток электронов прижимается к верхней антиточке и электроны проходят в верхний точечный контакт (правая картина на рис. 63, в)¹⁷.

Методы вычислительно-экспериментальной интроскопии были применены для исследования процессов квантового транспорта электронов в малых кольцевых интерферометрах в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с 2D-электронным газом. На фото ниже приведен пример такой структуры с эффективным радиусом до 90 нм, которая приготовлена с помощью нанолитографии при локальном прокислении гетероструктуры зондом атомно-силового микроскопа. Светлые участки отвечают прокисленным областям, в которых 2D-электронный газ отсутствует.



На рис. 64 приведены экспериментально измеренные (а) и расчетные (б) зависимости кондактанса малых кольцевых интерферометров от затворного напряжения V_g (а) и энергии Ферми E_F (б) при различных значениях магнитного поля и при $T = 1,5$ К. Из этих данных видны провалы кондактанса при определенных значениях E_F (V_g) и их уменьшение в магнитном поле.

¹⁷ Ткаченко В. А., Ткаченко О. А., Квон З. Д. и др. Когерентное рассеяние в малой квантовой точке // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80. С. 688–692.

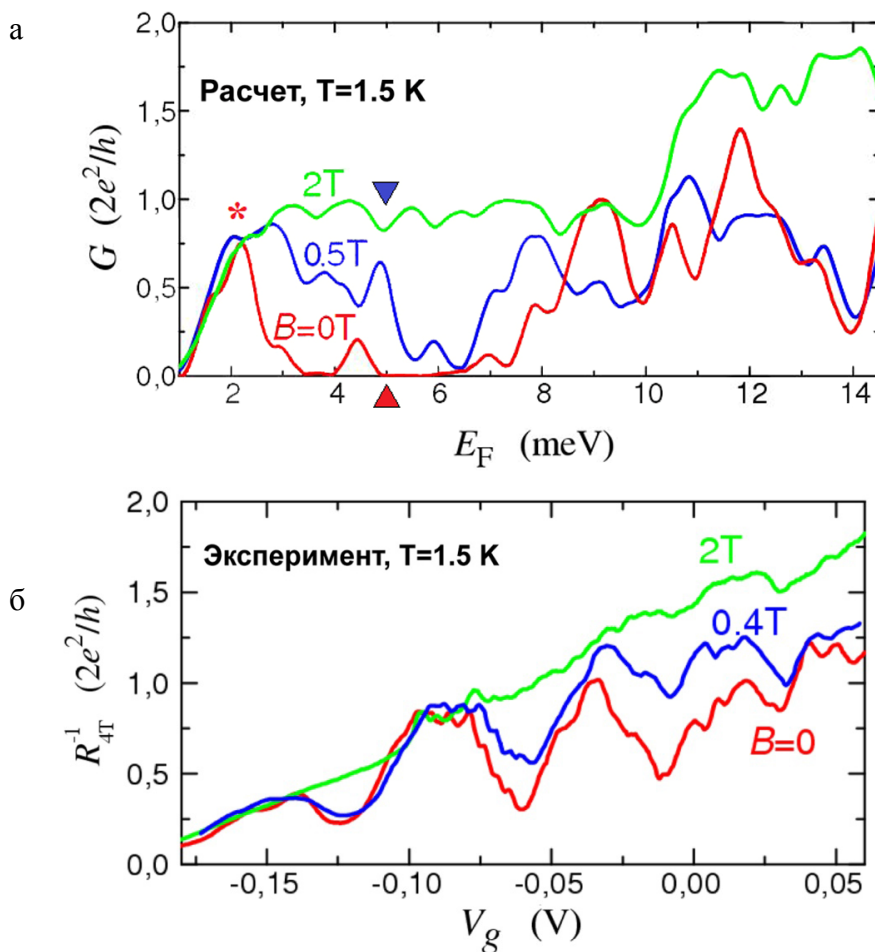


Рис. 64. Расчетные (а) и экспериментально измеренные (б) зависимости кондактанса малых кольцевых интерферометров от энергии Ферми (а) и затворного напряжения (б) при различных значениях магнитного поля и при $T = 1,5$ K. Красная звездочка соответствует полному прохождению электронов при магнитной индукции $B = 0$ T на рис. 65а, это $E_F = 2$ meV. Красный треугольник соответствует полному непрохождению при $B = 0$ T на рис. 65 (б), это $E_F = 5$ meV. Синий треугольник соответствует прохождению при B выше 0 T, это $E_F = 5$ meV.

Рисунок 65 представляет графики плотности вероятности электронных волн в интерферометре, отвечающие условиям полного прохождения (а) и полного отражения (б). На рис. 65, а видно, что прохождение определяется квантовой интерференцией и стоячая волна вдоль кольца интерферометра состоит из 16 пучностей. В отсутствие прохождения волновая функция представляет собой стоячую волну в треугольной точке между кольцом и входом в интерферометр слева

(рис. 65, б). С увеличением магнитного поля симметрия в положении максимумов плотности вероятности нарушается, и вероятность прохождения электронов через интерферометр возрастает, что отвечает экспериментальным данным на рис. 64, а.

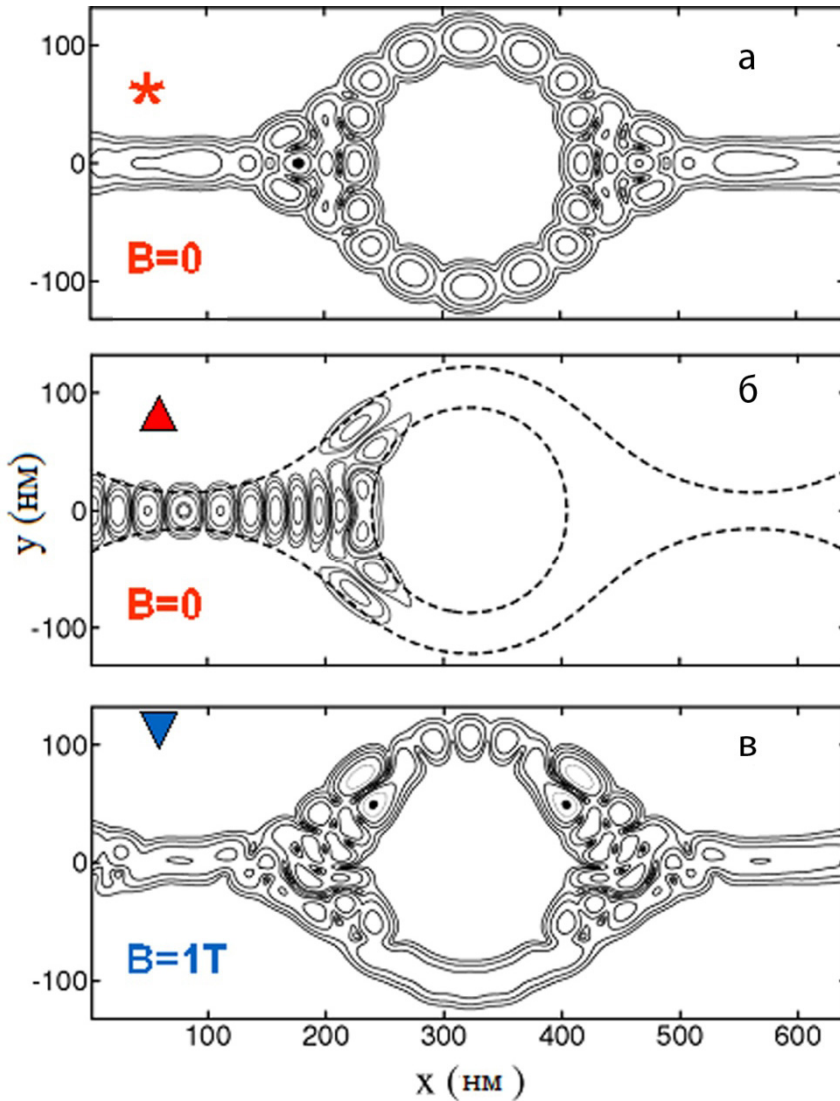


Рис. 65. Распределение плотности вероятности в электронной волне, падающей на интерферометр слева, для значений кондактанса на рис. 64, б. Пунктир (б) показывает границу разрешенной области $E_F = U_{eff}$. Значения магнитного поля B указаны на рисунках. Изолинии плотности вероятности отвечают значениям 0,01, 0,316, 1,0 и максимальным значениям 1,2 (а), 1,4 (б) и 2,3 (в)

Итак, двумерное моделирование эффектов квантовой интерференции электронов методами вычислительно-экспериментальной интроскопии при исследовании процессов квантового транспорта электронов в малых треугольных квантовых точках и в кольцевых интерферометрах в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с 2D электронным газом правильно отражает резонансный характер транспорта баллистических электронов и предсказывает появление пиков сопротивления. Показана также немонотонная зависимость эффектов интерференции электронов от энергии Ферми, величины магнитного потока и асимметрии квантовых структур¹⁸.

Лазеры с вертикальным резонатором, источники фотонов

К настоящему времени разработана и предлагается на рынке широчайшая номенклатура полупроводниковых излучателей в спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до субмиллиметровой (терагерцовой) областях и различного назначения – от ярких мощных светодиодных излучателей, используемых для освещения, подсветки мониторов и экранов телевизоров, для накачки твердотельных лазеров, используемых для технологических обработок материалов и изделий в машиностроении, до менее мощных полупроводниковых излучателей в лазерных принтерах, DVD-системах, мобильных телефонах и волоконно-оптических линиях интернета (ВОЛС). Яркой страницей в новейшей истории достижений в этой области является разработка технологии и создание эпитаксиальных структур с квантовыми ямами и квантовыми точками для сверхминиатюрных полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором (ЛВР), которые отличаются предельно малыми значениями пороговых токов (единицы мкА), рекордно высокой частотой токовой модуляции лазерного излучения (десятки ГГц), что имеет первостепенное значение для быстродействующих оптических информационных систем. Лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР, англ. Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) выпускаются ежегодно в количестве до миллиона штук и используются в многомодовых локальных ВОЛС, ручных компьютерных манипуляторах («мышях»), сенсорных устройствах и т. д. В ИФП СО РАН инициатором и руководителем работ по разработке и созданию ЛВР явился д-р физ.-мат. наук **В. А. Гайслер** при технологическом сопровождении канд. физ.-мат. наук **А. И. Торопова**.

¹⁸ Ткаченко О. А., Ткаченко В. А., Бакшеев Д. Г. Волновые функции баллистического электрона и отрицательное магнетосопротивление в малом кольцевом интерферометре // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. Вып. 6. С. 351–355.

Устройство, принцип работы и характеристики ЛВР на основе квантовой ямы $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ приведены на рис. 66. Схематически показан процесс движения электронов и дырок в эпитаксиальной диодной структуре и их рекомбинация в квантовой яме с генерацией фотонов (см. центральную часть рис. 66). На этой же схеме показаны $\lambda/4$ волновые слои сверхрешетки, где λ – длина волны, с чередующимися показателями преломления n-GaAs и AlGaAs , которые образуют зеркало интерферометра ЛВР. Поскольку зеркала ЛВР формируют одновременно диодную структуру ЛВР, то легирующие примеси располагают в узлах пучности стоячих волн зеркальных сверхрешеток. Показаны также туннельные барьеры AlAs по краям квантовой ямы. Приготовление эпитаксиальных структур ЛВР отличается предельной сложностью и атомная точность технологии МЛЭ и включает формирование в едином технологическом процессе следующих составляющих ЛВР: активной зоны из одного или нескольких слоев квантовых ям или квантовых точек; нескольких сотен или тысяч слоев брэгговских зеркал резонатора Фабри – Перо с чередующимися показателями преломления; высоколегированных слоев структуры диода накачки в областях нулевой интенсивности стоячей оптической волны. После процесса эпитаксиального выращивания формируются мезаструктуры с оксидными апертурами AlGaO с различными латеральными размерами от долей микрона до нескольких микрон (рис. 66 слева).

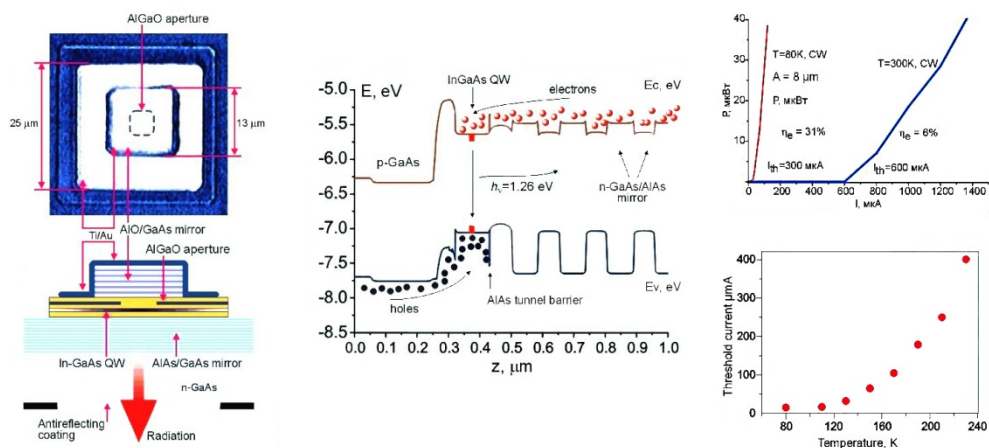


Рис. 66. Лазер с вертикальным резонатором на основе квантовой ямы $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$. Слева – внешний вид и поперечный срез; в центре – фрагмент зонной структуры с квантовой ямой в центре и брэгговской решеткой отражающего зеркала резонатора справа. График сверху справа – зависимость выходной мощности от тока, зависимость порогового тока от температуры внизу справа

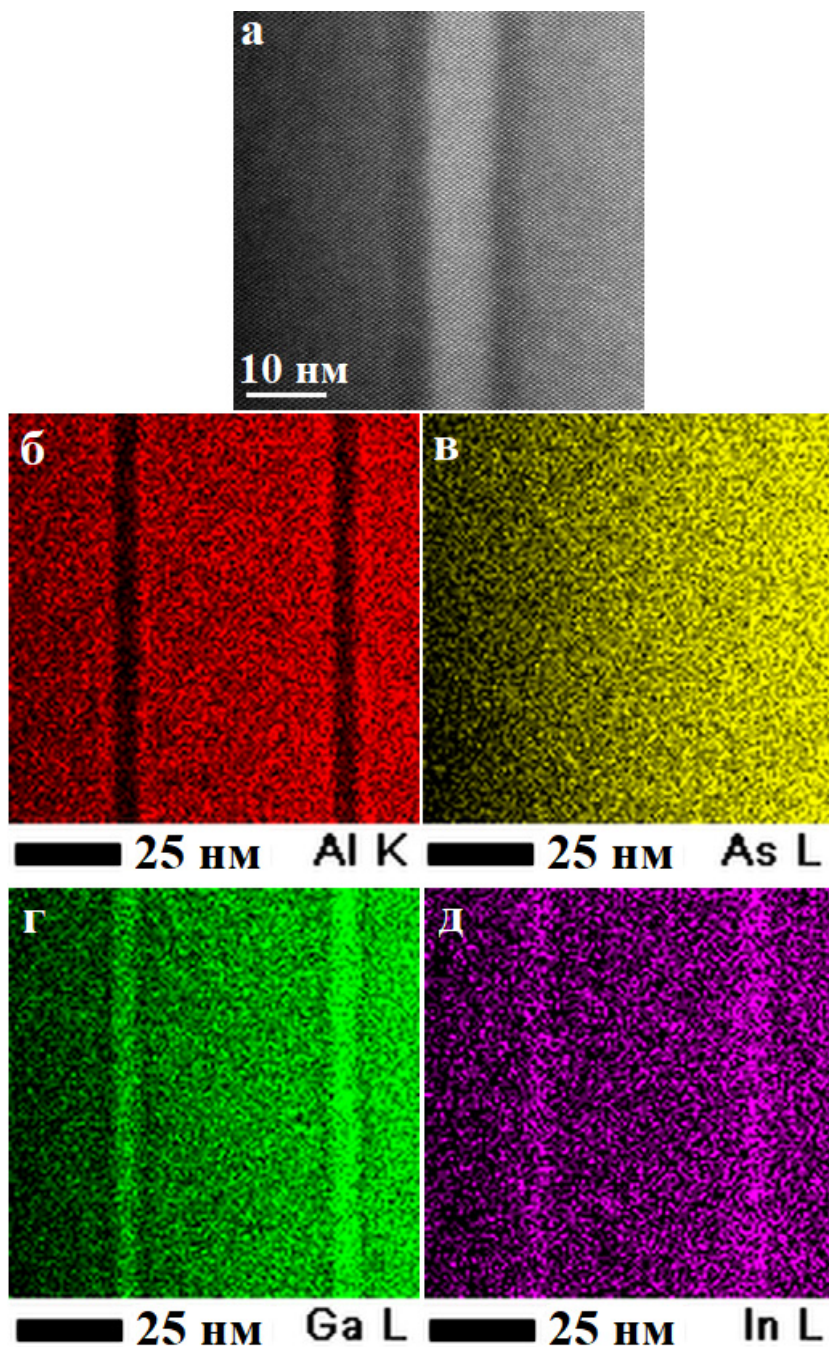


Рис. 67. Атомная структура (а) и элементный состав гетероструктур InAs-AlAs-GaAs (б-д). Изображение а получено на электронном микроскопе JEM-4000EX в ИФП СО РАН, изображения б-д – на электронном микроскопе JEM-2200FS в ЦКП «ВТАН» АТИЦ ФФ НГУ

Атомную точность при эпитаксиальном выращивании структуры ЛВР и элементный состав гетероструктур с квантовыми ямами демонстрирует высокоразрешающее электронномикроскопическое изображение (рис. 67, *a*). Для определения элементного состава выращенных гетероструктур применялся метод высокоуглового темного поля в сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (HAADF STEM), см. снимки (рис. 67, *b-d*). Электронномикроскопические изображения получены **А. К. Гутаковским** [12].

Результаты исследования генерационных характеристик ЛВР подтверждают низкий уровень порогового тока, который варьируется в интервале от 150 до 800 мкА в зависимости от диаметра лазерной апертуры. Квантовая эффективность изготовленных ЛВР составляет 0,3–0,4 мкВт/мкА. Исследование спектральных характеристик лазеров с апертурой менее 5 мкм демонстрирует устойчивый одномодовый режим генерации во всем исследованном диапазоне тока накачки до 1,5 мА. Лазеры с апертурой 6 мкм работают в одномодовом режиме лишь при небольшом превышении порогового тока. Лазеры с большей апертурой при любом уровне накачки работают в многомодовом режиме [10, с. 378–400].

Принципиально новые возможности открываются в связи с созданием ЛВР с квантовыми точками в активной области. Рисунок 68 показывает, как меняется спектр электролюминесценции (ЭЛ) при уменьшении диаметра лазерного пятна и уменьшении, тем самым, количества люминесцирующих КТ.

При участии в фотолюминесценции массива КТ спектр ЭЛ содержит уширенный максимум, что связано с наложением спектров ЭЛ множества КТ (спектр на рис. 68 вверху слева). При уменьшении диаметра лазерного пятна до приблизительно 2 мкм спектр ЭЛ содержит счетное количество пиков электролюминесценции от отдельных КТ (спектр на рис. 68 вверху справа). При размере лазерного пятна менее 1 мкм происходит уверенная адресация к отдельной КТ и спектр ЭЛ содержит единственный пик, отвечающий рекомбинации экситонных состояний X (рис. 68 внизу). Отметим, что экспериментально наблюдаемый спектр ЭЛ подобен спектрам излучения отдельного атома, и в этом смысле InAs КТ представляют собой искусственные атомы, как об этом говорилось выше в разделе «Полупроводниковые наноструктуры и нанотехнологии», см. рис. 43. При повышении мощности возбуждения в спектре ЭЛ появляются пики, соответствующие рекомбинации биэкситонных (XX) и трионных (X^+ и X^-) состояний. На основе этих данных были сформированы гетероэпитаксиальные структуры с InAs КТ и определены условия возбуждения отдельных

КТ с одиночной линией, отвечающей рекомбинации экситонов. Таким образом, была показана принципиальная возможность источников излучения одиночных фотонов (ИОФ), см. [10, с. 378–400].

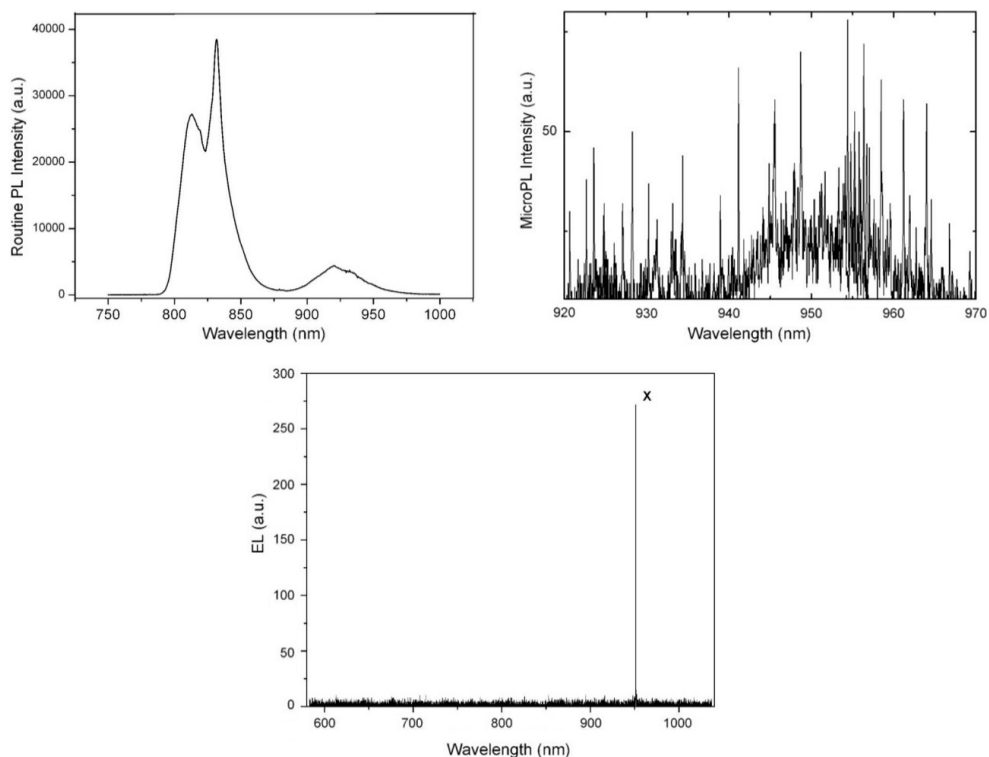


Рис. 68. Спектры люминесценции системы КТ при уменьшении диаметра лазерного пятна от 100 мкм (вверху слева) к ~ 2 мкм (вверху справа) и менее 1 мкм (внизу)

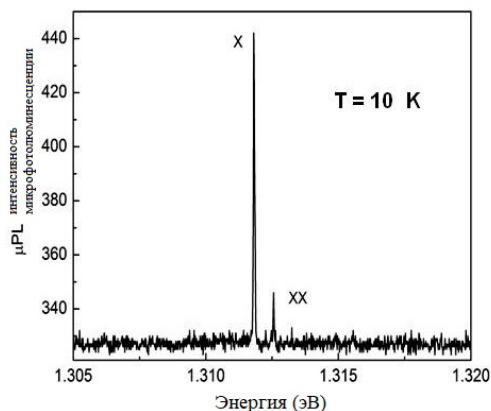


Рис. 69. Спектр электролюминесценции гетероструктур с InAs КТ при $T = -10$ К, демонстрирующий рекомбинацию экситона X и биэкситона XX

Показано, что пары запутанных фотонов могут излучаться одиночными квантовыми точками в процессе каскадной рекомбинации биекситона и экситона в случае, если экситонные состояния вырождены по энергии или же их расщепление ΔE_{FS} не превышает естественную ширину экситонных уровней $\Gamma_x = \hbar/\tau_x$, где τ_x – время жизни экситона. В этом случае излучается пара фотонов, запутанных по поляризации. Процесс генерации иллюстрирует рис. 70, который показывает, что при излучении фотонов с левой циркулярной поляризацией КТ переходит в экситонное зарядовое состояние и при его рекомбинации излучается фотон с правой циркулярной поляризацией (схема сверху), и наоборот (схема внизу).

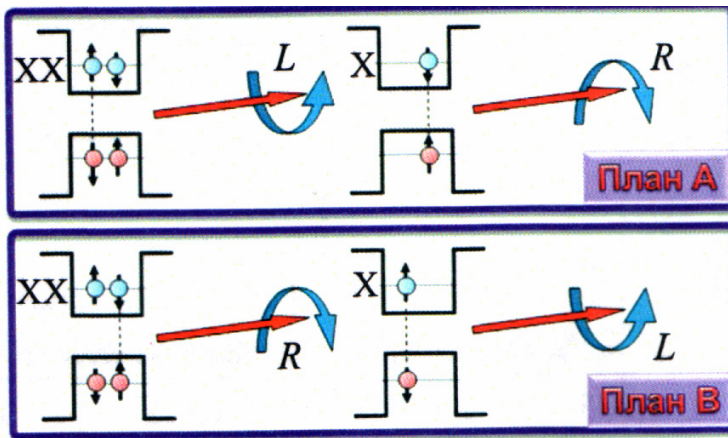


Рис. 70. Генерация запутанных по поляризации фотонных пар в процессе каскадной рекомбинации биекситона и экситона в полупроводниковых квантовых точках

В реальных КТ расщепление экситонных состояний ΔE_{FS} , как правило, превышает естественную ширину экситонных уровней Γ_x , что обусловлено отклонениями формы КТ от идеальной, наличием пьезопотенциала, который индуцирован встроенными механическими напряжениями. Это является основным препятствием для создания запутанных по поляризации фотонных пар на основе КТ. Результаты исследования факторов, задающих величину ΔE_{FS} , а также условий, при которых расщепление экситонных состояний подавляется до величины Γ_x , показало, что использование в процессе роста малых по времени (единицы секунд) пауз является эффективным способом получения массива КТ сверхмалой плотности (10^6 см^{-2}), при этом формируются КТ минимального размера с малой дисперсией размера (см. книгу [10, с. 378–400]). На рис. 71 представлены экспериментальные данные по величине ΔE_{FS} , которые показывают группу КТ с энергией экситона

1,3–1,4 эВ, для которой удовлетворяется условие $\Delta E_{FS} \sim \Gamma_x$. К этой группе относятся КТ наименьшего размера, в которых не наблюдается заметного расщепления экситонных состояний из-за малого значения пьезопотенциала. На рис. 71 эта группа КТ выделена прямоугольной рамкой. Таким образом показано, что эпитаксиальные структуры с квантовыми точками InAs, выращенные по механизму Странского – Крастанова с малым временем прерывания роста, содержат субансамбли квантовых точек, для которых выполняется соотношение $\Delta E_{FS} \sim \Gamma_x$, и которые пригодны для создания излучателей пар запутанных фотонов рис. 69. Этот вывод подтверждается гистограммой распределения КТ по величине ΔE_{FS} , приведенной на вставке к рис. 71.

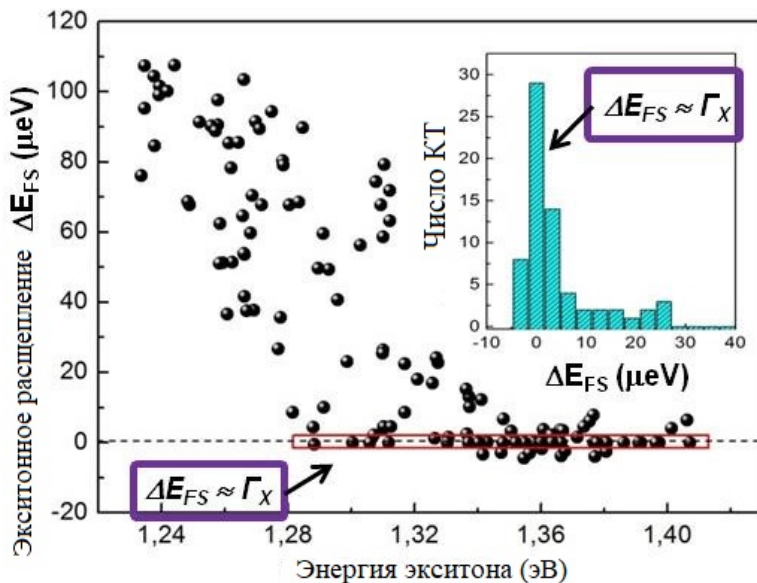


Рис. 71. Величина ΔE_{FS} для 135 InAs квантовых точек

В результате отметим, что работы по изготовлению и исследованию характеристик ЛВР, а также источников одиночных фотонов и источников квантово-запутанных пар фотонов на основе квантовой ямы наногетероструктур A_3B_5 с квантовыми ямами и квантовыми точками InAs, проведенные под руководством д-ра физ.-мат. наук **В. А. Гайслера** в ИФП СО РАН, создают важнейший ресурс по использованию неклассических состояний света в разработке систем квантовой криптографии и квантовых вычислений, в проведении экспериментов в области фундаментальной квантовой физики¹⁹.

¹⁹ Гайслер В. А., Дербезов И. А., Гайслер А. В. и др. Неклассические излучатели на основе квантовых точек // Вестн. РФФИ. 2015. № 4. С. 42–54.

Квантовые точки Ge/Si, плазмоника

Гетероэпитаксиальная система Ge/Si привлекательна с точки зрения создания новых приборов и устройств полупроводниковой электроники с использованием преимуществ хорошо развитой кремниевой технологии, базовой для современной микро- и нанoeлектроники. Однако трудно преодолимым препятствием для технологий на базе гетероэпитаксиальной системы Ge/Si является большое значение разницы параметров кристаллических решеток Ge и Si, которое составляет 4 % и препятствует получению совершенных и бездефектных гетероструктур. Работы по изучению структуры и механизмов роста в эпитаксиальной системе Ge/Si ведутся в ИФП СО РАН уже длительное время под руководством докторов физ.-мат. наук **О. П. Пчелякова** и **А. И. Никофорова**. Новый импульс этим работам дан инициативой чл.-корр. РАН **А. В. Двуреченского** и д-ра физ.-мат. наук **А. И. Якимова** по проведению активных исследований технологии получения и свойств гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками. Предложены новые технологические методы по повышению однородности и плотности массивов КТ, которые состоят в проведении низкоэнергетического ионного воздействия в процессе эпитаксии и в постростовом лазерном отжиге наногетероструктур. В результате этой работы найдены условия по повышению степени однородности КТ по их размеру и по управлению плотностью КТ (см. [10, с. 76–102]).

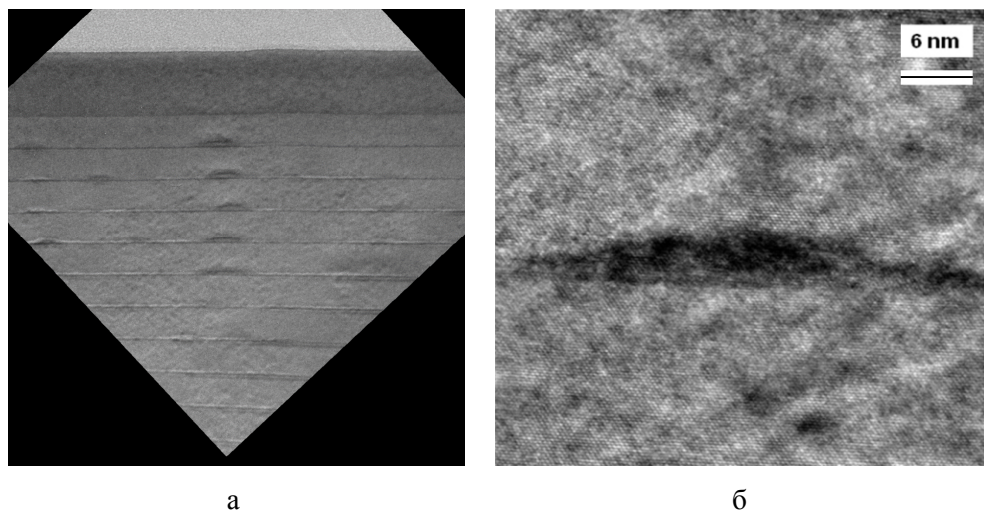


Рис. 72. Поперечное (110) высокоразрешающее электронномикроскопическое изображение упорядоченной системы КТ Ge в матрице Si (а) и отдельной КТ Ge/Si в (001) кристалле Si (б). ПЭМ JEM-4000EX, 400 кВ

На основе гетероструктур с квантовыми точками Ge/Si созданы фотодетекторы ближнего ИК-диапазона, структура которых представлена на рис. 72. Фотодетекторы представляют собой p^+-i-n^+ -фотодиоды со встроенной в базовую область многослойной структуры КТ Ge (36 слоев для фотодетектора на рис. 73). Внутриподзонные оптические переходы в квантовых точках обеспечивают работу фотоприемников при нормальном падении оптического излучения, при малых темновых токах до 10^{-5} А/см², и, что важно, при увеличении рабочей температуры вплоть до комнатной температуры. Квантовая эффективность детектора составила 3 %. Увеличение квантовой эффективности достигалось за счет эффекта многократного внутреннего отражения волноводной структуры на подложке кремний-на-изоляторе до значений ~21 % и ~16 % для длин волн 1,3 и 1,55 мкм соответственно. Важное достоинство данного типа фотодетекторов состоит в совместимости технологических процессов приготовления Ge-квантовых точек в кремниевой матрице со стандартными технологиями кремниевой микроэлектроники.

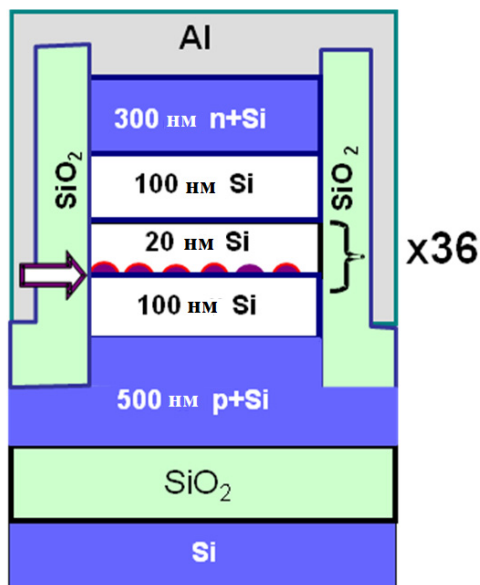


Рис. 73. Схематическое изображение фотодетектора на гетероструктуре с квантовыми точками Ge (36 слоев), встроенными в базу p^+-i-n^+ -фотодиода (указано стрелкой) на подложке кремний-на-изоляторе

Другой способ селективного увеличения дырочного фототока фотоприемников с квантовыми точками Ge/Si состоит в формировании на поверхности фотодетектора двумерной плазмонной структуры в виде перфорированной металлической пленки Au, как показано на вставке

к рис. 74. Увеличение квантовой эффективности в области 5,4 мкм и усиление фототока до 30 раз по узкой спектральной полосе пропускания ($\sim 0,3$ мкм) связано с возбуждением локализованного поверхностного плазмонного резонанса на границе раздела металл – кремний. Этот результат показывает большой потенциал предложенного подхода для реализации высокопроизводительных Ge/Si-фотодетекторов с высоким спектральным разрешением²⁰.

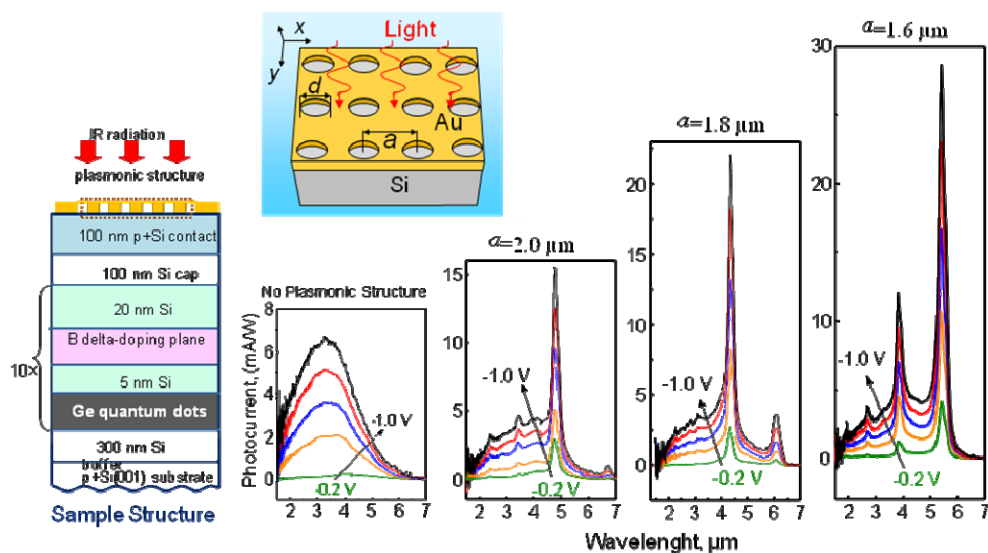


Рис. 74. Структура фотодиода с 10 слоями квантовых точек Ge (слева) и изменение фототока при разной периодичности перфорации пленки металла. На вставке сверху – схематическое изображение перфорированной пленки Au на поверхности фотодиода

Исследование электронной структуры гетеросистем с Ge/Si-квантовыми точками методом ЭПР привело к нескольким важным результатам. Вычисление времени спиновой релаксации из ширины сигнала ЭПР, которое может определяться как время декогеренизации спиновой системы (поперечное время спиновой релаксации), так и временем спин-решеточной релаксации (продольное время релаксации), показало неожиданно большое время спиновой релаксации для массива КТ. По ЭПР-измерениям спинового эха время спиновой релаксации составило 10 и 20 мкс для продольной и поперечной мод соответственно. Вторым важным результатом является обнаружение одновременного

²⁰ Yakimov A. I., Kirienko V. V., Bloshkin A. A. et al. Plasmon polariton enhanced mid-infrared photodetectors based on Ge quantum dots in Si // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. № 13. P. 133101.

существование электронов у одной КТ с разными g -факторами и $\Delta g \approx 0,001$ для состояний на вершине и у подножия КТ (рис. 75, а). Третий вывод состоит в обнаружении коррелированности в расположении и в перемещении электронных состояний в системе упорядоченных КТ (рис. 75, б, в).

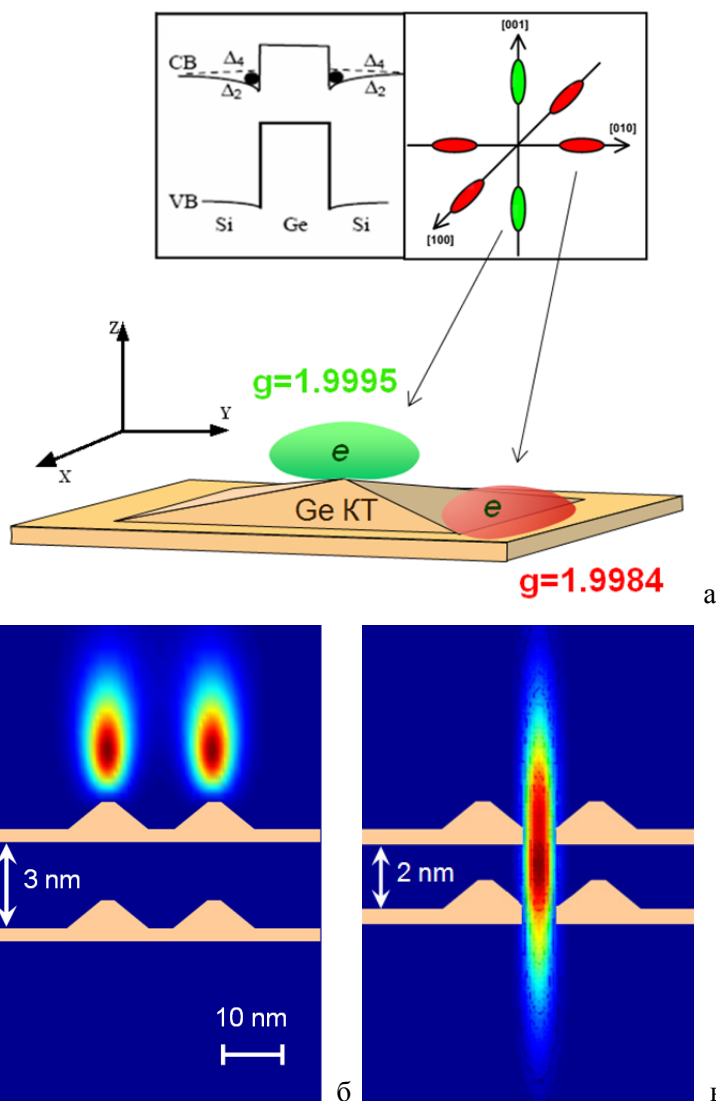


Рис. 75. Схематическое изображение областей локализации электронов в структурах с Ge/Si-квантовыми точками и значения g -факторов для электронов, локализованных в разных областях (а). Расчетные изображения волновых функций электронов, локализованных в разных Δ -долинах, в зависимости от строения молекул из квантовых точек (б, в)

Структуры с квантовыми точками, в которых подавлены механизмы спиновой релаксации, могут стать системами хранения спиновой информации и перспективны для создания каналов передачи спиновой информации. При создании логических элементов для квантовых вычислений инженерия g -фактора является основой для адресного обращения к отдельному кубиту и для проведения однокубитовых операций²¹.

Полупроводниковые элементы тепловидения и терагерцового видения

Полупроводниковые элементы являются центральной частью современных систем тепло- и ночного видения. Среди них основное место занимают матричные фотоприемные устройства (МФПУ) инфракрасного (ИК) диапазона, подробное изложение физики работы, технологии изготовления и областей их применения изложено в большом количестве монографий и статей фундаментального характера, в их числе выделим книги [13, 14]. Интенсивная исследовательская и прикладная работа в области создания основ физики и технологии МФПУ в ИФП СО РАН велась по инициативе и под руководством академика **А. В. Ржанова** и чл.-корр. РАН **К. К. Свиташева**.

Примером создания МФПУ на основе полупроводниковых систем с квантовыми ямами явилась проведенная в ИФП СО РАН под руководством д-ра физ.-мат. наук **В. Н. Овсяюка** работа по физике оптических явлений и квантового транспорта в эпитаксиальных структурах GaAs/AlGaAs. На рис. 76 представлена зонная структура МФПУ на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами (МСКЯ), выращенных методом МЛЭ канд. физ.-мат. наук **А. И. Тороповым**. Приведена схема поперечного среза МСКЯ (справа сверху), высокоразрешающее электронномикроскопическое изображение структуры GaAs/AlGaAs (слева внизу) и внешний вид фрагмента МФПУ с мезаструктурами пикселей и In-микростолбов на каждом из элементов (справа внизу).

²¹ Zinovieva A. F., Timofeev V. A., Nenashev A. V. et al. Electron localization in Ge/Si heterostructures with double quantum dots detected by an electron spin resonance method // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. P. 255308; Зиновьева А. Ф., Двуреченский А. В., Горнов А. Ю. и др. Квантовые логические операции на спиновых состояниях в непрерывном СВЧ-поле // Микроэлектроника. 2018. Т. 47. Вып. 4. С. 49–58.

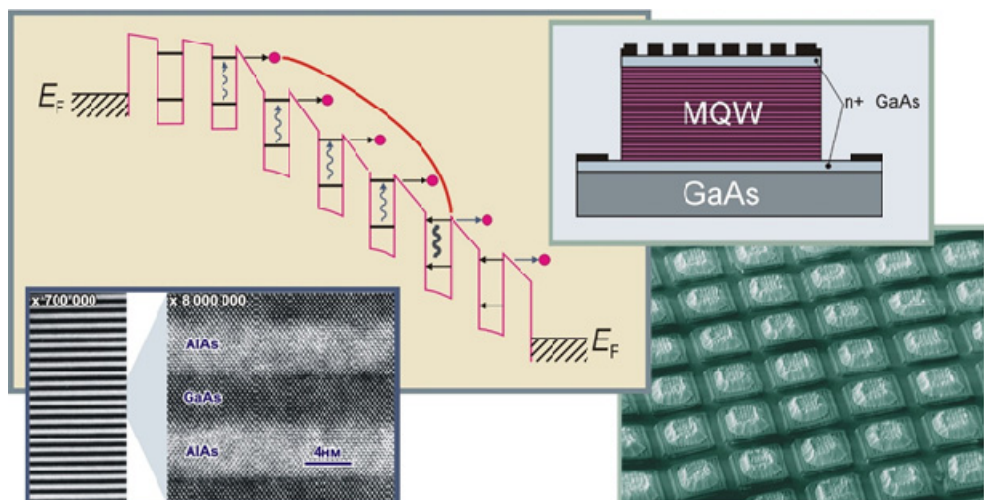


Рис. 76. ИК МФПУ на МСКЯ в гетероструктуре GaAs/AlGaAs

МСКЯ содержит квантовые ямы GaAs толщиной 4–5 нм, легированного донорной примесью Si ($n = 3 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$), и разделяющие барьерные слои AlGaAs толщиной 4–5 нм (рис. 76, внизу слева). Состояния электронов в зоне проводимости квантовых ям квантуются в соответствии с зонной диаграммой рис. 76. При поляризации света вдоль слоев МСКЯ происходит поглощение фотонов на свободных носителях с переходом электронов на уровни большей энергии. Зонная диаграмма на рис. 76 схематически показывает, что фотопроводимость в такой структуре возникает при возбуждении электронов в состояния квазинепрерывного спектра над барьером или возбуждением на уровень в квантовой яме с последующим туннелированием в состояния квазинепрерывного спектра. Параметры МФПУ, такие как спектральная зависимость коэффициента поглощения, пороговая обнаружительная способность, темновой ток, определяются положением уровней квантования относительно друг друга и относительно потенциального барьера (край зоны проводимости AlGaAs), от величины тянущего электрического поля, от рабочей температуры и размеров отдельных фотоприемных элементов (пикселей).

Неотъемлемой частью МФПУ являются кремниевые мультиплексоры, соединяемые с фотоприемной матрицей прецизионными методами холодной сварки через индиевые микростолбы. Мультиплексор представляет собой матрицу ячеек считывания, горизонтальный и вертикальный регистры, схемы управления временем накопления и выходной узел (рис. 77). Ячейки считывания содержат входные транзисторы, емкость накопления и два ключа полевых транзисторов T_1

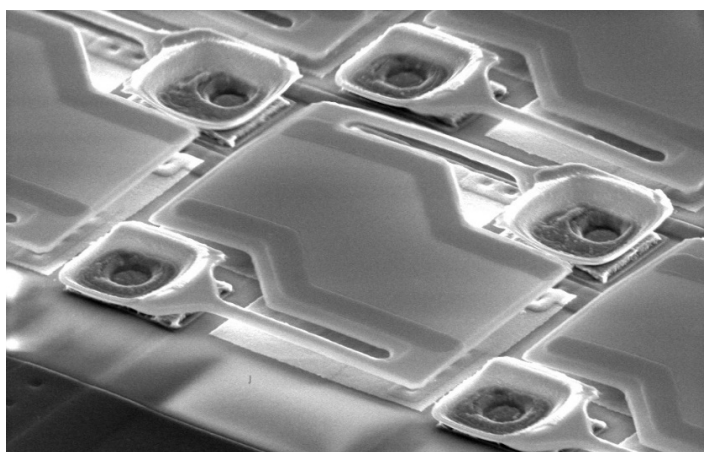
погоду. Хорошо видны открытые части тела людей, двигателя и салона автомобиля с более высокой температурой поверхности по сравнению с температурой окружающей среды.



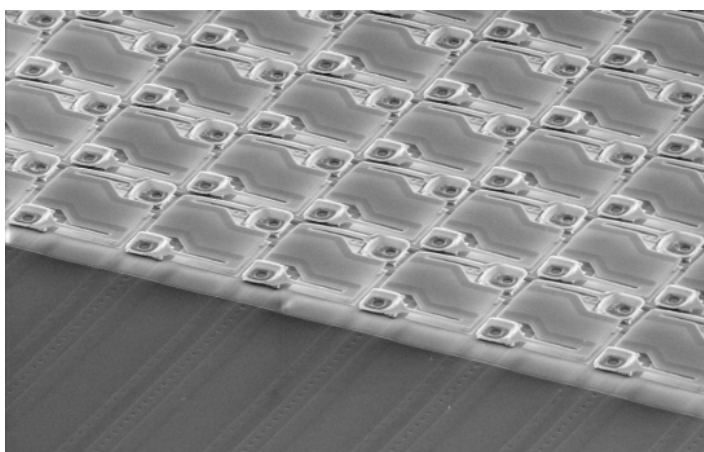
Рис. 78. Пример теплового изображения, полученного с помощью МСКЯ МФПУ

Широко используемым типом полупроводниковых тепловых приемников излучения являются микроболометры, изготовленные с применением материала с большим температурным коэффициентом сопротивления и с малой теплоемкостью. При получении кремниевых микроболометров в качестве терморезисторного материала наиболее широко используется диоксид ванадия VO_2 . Важнейшим отличием матричных микроболометрических приемников (ММБП) в отличие от других типов полупроводниковых приемников является возможность приема с их помощью не только инфракрасного, но и терагерцового излучения и способность их работы при комнатной температуре. ММБП представляют собой матрицу фоточувствительных микроболометров мостикового типа, в которых термочувствительное сопротивление подвешивается на слабо теплопроводящих несущих балках («ножках») над подложкой, на которой изготавливается мультиплексор считывающего устройства. На подложке под болометром размещается зеркало для увеличения поглощения ИК-излучения. Термочувствительное сопротивление в виде тонкого слоя заключено между двумя

слоями нитрида кремния, являющихся несущими материалами. Изображение ММБП формата 320×240 разработки и изготовления ИФП СО РАН представлено на рис. 79. При изготовлении ММБП в качестве жертвенного слоя для подвешивания тонкого термочувствительного слоя использовался полиимид. Мультиплексоры были разработаны и изготовлены в совместной работе с ОАО «Ангстрем» (Зеленоград) и ОАО ЦНИИ «Циклон» (Москва).



а



б

Рис. 79. Изображение в сканирующем электронном микроскопе отдельного болометрического элемента (а) и фрагмента болометрической матрицы 320×240 элементов (б)

На рис. 80 представлены результаты испытаний разработанных ММБП на основе, проведенные в Прокопьевской горноспасательной части, Кемеровская область, Кузбасс. Показанный пример показывает несомненные перспективы применения монолитных кремниевых ИК ФПУ на основе неохлаждаемых матричных микроболометрических

приемников в ряде практически важных областей, таких как пожарная безопасность, охрана и правопорядок, военное дело, поисковые и спасательные работы и др.



а



б

Рис. 80. Изображение спасателей в конце задымленного тоннеля со степенью задымленности 4 балла на удалении 20 м: а – с помощью ММБП; б – реальное изображение тоннеля в видимом диапазоне, где на мониторе ноутбука слева вверху заметно изображение а

Еще более значимые перспективы открываются при применении ММБП в терагерцовом диапазоне для систем безопасности, в биологических и медицинских целях из-за отсутствия угроз и ущерба здоровью живых организмов при облучении терагерцовым излучением, а также для исследования атмосферы, в физике плазмы, радиоастрономии и т. д. Это направление терагерцового радиовидения в настоящее время получило специальное название – терагерцовое видение, или теравидение. Были проведены эксперименты по выявлению скрытых изображений с использованием ТГц-излучения лазера на свободных электронах Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН с длиной волны 130 мкм с помощью ММБП. Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) ИЯФ СО РАН генерирует непрерывную последовательность импульсов ТГц-излучения длительностью около 50 пс с частотой 5,6 МГц. На рис. 81 приведены результаты предварительных экспериментов по выявлению скрытых объектов при регистрации отраженного и проходящего ТГц-излучения ЛСЭ с помощью ММБП формата 160×120²³.

²³ Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Овсяк В. Н. и др. Матричные микробо-
лометрические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов // Оп-
тич. журн. 2009. Т. 76. № 12. С. 5–11.

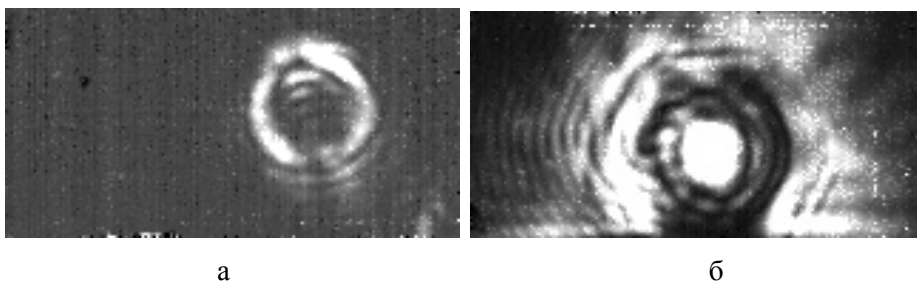


Рис. 81. Выявление с помощью ММБП скрытого объекта – гайки М8 за листом бумаги (а) и за листом винипласта толщиной 2 мм (б) при регистрации отраженного (а) и проходящего (б) ТГц-излучения лазера на свободных электронах

Значительный цикл работ был проведен коллективом под руководством д-ра физ.-мат. наук **Г. Л. Курышева** по разработке МФПУ для среднего ИК-диапазона длин волн 2–3 мкм на основе МДП-конденсаторов на эпитаксиальных структурах узкозонного полупроводника InAs ($E_G = 0,35$ эВ при 300 К) с прямым оптическим переходом. В книге [14, с. 10–118] подробно изложена физика МДП-структур, работающих в режиме прибора с накоплением и зарядовой инжекцией (ПЗИ), технологии изготовления многоэлементных фоточувствительных линеек и матриц, гибридных микросхем на их основе. Созданы быстродействующие тепловизионные системы для спектрального диапазона 0,5–3,05 мкм на основе линейчатых ФПУ и для спектрального диапазона 2,5–3,05 мкм на основе матричных ФПУ. Наиболее впечатляющим достижением, обеспечившим успех работы по созданию тепловизоров на МДП-конденсаторах InAs-диэлектрик, явилось создание совершенной границы раздела InAs-анодный оксид во фторсодержащем электролите. Эта технология, разработанная **А. П. Ковчавцевым** и **Н. А. Валишевой**, обеспечила минимальную плотность поверхностных состояний на уровне 10^{10} см⁻² эВ⁻¹, что является рекордом для подобных полупроводниковых систем и сравнимо с плотностью поверхностных состояний на границе раздела Si-термический оксид SiO₂.

Рисунок 82 иллюстрирует устройство ПЗИ-элемента МФПУ на основе InAs МДП-конденсатора, работающего в режиме неравновесного обеднения. При подаче импульса обедняющего напряжения под затвором образуется потенциальная яма, процесс релаксации которой к квазистационарному состоянию зависит от темпа накопления носителей заряда, генерированных ИК-излучением изучаемого объекта. Эффективность преобразования ИК-излучения в электрический заряд, накапливаемый в инверсионном слое МДП-структуры, определяется количеством фото-

нов, поглощаемых в полупроводнике, с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны InAs. В ФПУ матричного типа ИК-излучение попадает в эпитаксиальный слой сквозь сильнолегированную подложку (рис. 82). Подложка в МФПУ играет роль коротковолнового отражающего фильтра, и поглощение происходит в узкой спектральной полосе $\sim 2,5\text{--}3,0$ мкм.

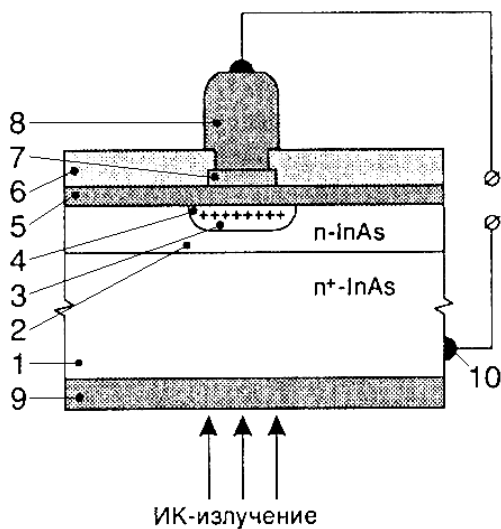


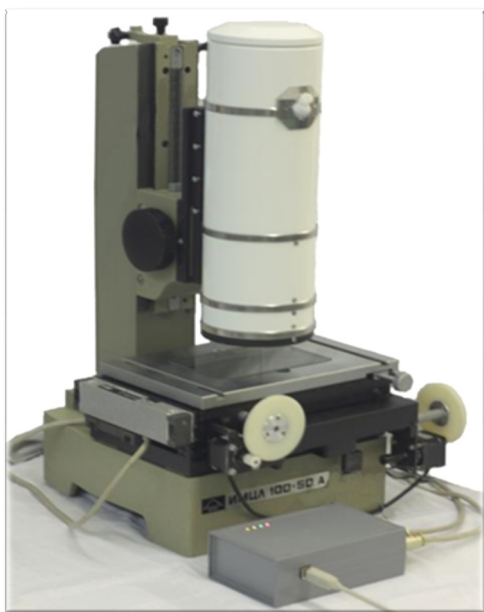
Рис. 82. Поперечное сечение ПЗИ-элемента фотоприемной матрицы: 1 – сильнолегированная подложка InAs; 2 – эпитаксиальная пленка; 3 – область обеднения; 4 – инверсионный слой; 5 – подзатворный диэлектрик (анодный оксид); 6 – защитный диэлектрик (низкотемпературный диоксид кремния); 7 – затвор ПЗИ-элемента; 8 – индиевый контактный столбик; 9 – просветляющее диэлектрическое покрытие; 10 – омический контакт к полупроводниковой подложке

Фотоприемные модули – это гибридные микросхемы, состоящие из матрицы МДП-структур и кремниевого мультиплексора для управления матрицами и вывода сигналов на внешнюю шину. При изготовлении матричных ФПУ используется метод перевернутого монтажа (*flip-chip*) с соединением кристаллов методом групповой холодной сварки с помощью индиевых столбов, напыленных на контактные площадки. Кремниевые мультиплексоры производят периодический последовательный опрос всех элементов и выводят данные о накопленном заряде в виде последовательностей импульсов в сигнальную шину. В промежутках между опросами все элементы МФПУ находятся в режиме накопления полезного сигнала, что обеспечивает высокую эффективность регистрации сигнала. Время обработки сигнала с одного элемента составляет около 1 мкс при времени накопления 0,2–50 мс [14].

На основе InAs МФПУ в ИФП СО РАН под руководством д-ра физ.-мат. наук **Г. Л. Курышева** и при активном участии **А. А. Гузева**, **В. М. Базовкина**, **И. И. Ли**, **Б. Г. Вайнера** и **Л. М. Логвинского** разработана линейка аналитических и диагностических приборов ИК-техники – медицинский матричный тепловизор «СВИТ», инфракрасный сканирующий микроскоп и быстродействующий ИК-спектрометр, внешний вид которых представлен на рис. 83, 84, а.



а

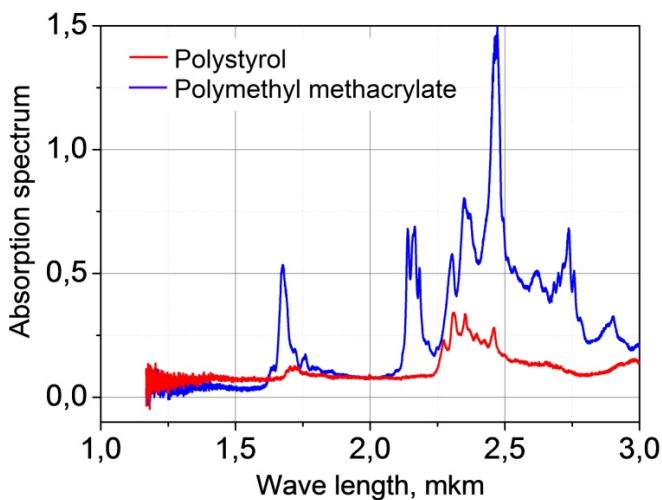


б

*Рис. 83. Медицинский матричный тепловизор «Свит» и тепловые изображения, полученные с его помощью на экране ПК (а);
Инфракрасный сканирующий микроскоп (б)*



а



б

Рис. 84. Быстродействующий ИК-спектрометр (а)
и пример спектров поглощения, полученных с его помощью (б)

Наибольшую известность получил матричный тепловизор «Свит», на который были получены сертификаты России Ru. АЯ79.Р15452 и Европейского сообщества No. 11 0176 QS/NB. Прибор работает в спектральном диапазоне 2,6–3,0 мкм, имеет формат кадра (число пикселей) 128×128, частоту кадров до 100 Гц, требует охлаждения жидким азотом с расходом 200 мл на 10 часов работы и обладает высоким значением предельной температурной чувствительности (Noise Equivalent Temperature Difference – NETD) 7 мК. На основе матричного тепловизора «Свит» осуществляется медицинская и научная термография на основе дистанционного измерения распределения температуры по поверхности объектов. Прибор является неинвазивным методом диаг-

ностики в терапии, онкологии, ангиологии, маммографии, хирургии, травматологии, ревматологии, неврологии, эндокринологии, рефлексотерапии, косметологии, фармакологии, педиатрии и широко применяется в медицинской практике при решении задач изучения кожного покрова, сосудистой системы и терморегуляции человека. В монографии Б. Г. Вайнера приведены многочисленные примеры использования матричного тепловизора в физиологии и медицине²⁴.

Инфракрасный сканирующий микроскоп на основе фотоприёмной InAs матрицы 128×128 элементов работает в спектральном диапазоне 2,6–3,0 мкм, на основе фотоприёмной InSb линейки 192×2 элемента в спектральном диапазоне 3–5 мкм и имеет пространственное разрешение 1,6 мкм. Это позволяет применять прибор для изучения теплового режима работы полупроводниковых микросхем и печатных плат микроэлектронных систем и устройств.

Быстродействующий ИК-спектрометр создан на основе InAs-линейчатого модуля 1×384, работает в спектральном диапазоне 0,5–3,05 мкм с временем накопления элементов 0,2–10 мс, имеет предельное быстродействие 5000 спектров/с и динамический диапазон 2000 отн. ед. Прибор отличается высоким значением обнаружительной способности фоточувствительных элементов $D^* = 1,5 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$. На рис. 84, б приведен пример измерения спектров поглощения для широко распространенных полимерных материалов.

Структуры с отрицательным электронным сродством и ночное видение

Особым классом полупроводниковых структур являются структуры с отрицательным электронным сродством (ОЭС). При адсорбции на атомно-чистые поверхности прямозонных полупроводников A_3B_5 с дырочной проводимостью атомов цезия или цезия и кислорода уровень вакуума E_{vac} оказывается ниже дна зоны проводимости в объеме полупроводника и даже медленные электроны, термализованные вблизи дна зоны проводимости, имеют высокую вероятность выхода в вакуум (рис. 85). Полупроводники с отрицательным ОЭС являются эффективными эмиттерами электронов и широко используются в качестве фотокатодов (рис. 86) для регистрации фотонов с высоким пространственным и временным разрешением в приборах ночного видения,

²⁴ Вайнер Б. Г. Матричное тепловидение в физиологии. Исследование сосудистых реакций, перспирации и терморегуляции у человека. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 96 с.

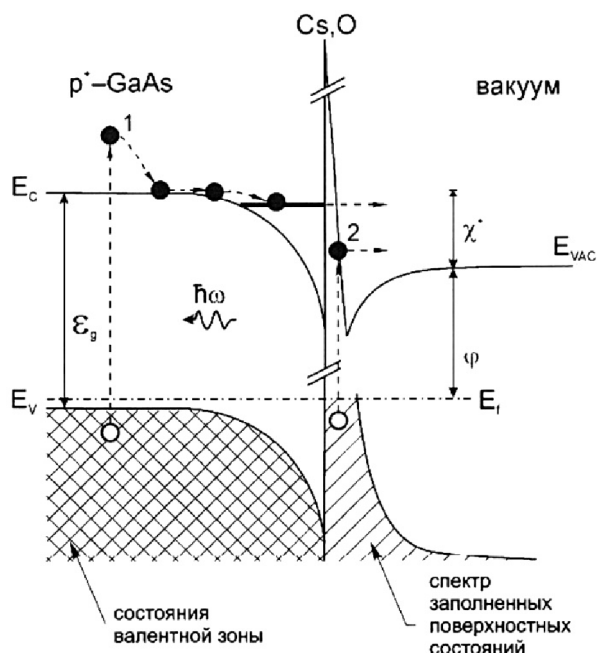


Рис. 85. Фотоэмиссия электронов из $p^+-\text{GaAs}$ (Cs, O) в вакуум:
1 – переход фотовозбужденного электрона из зоны проводимости;
2 – из поверхностных состояний

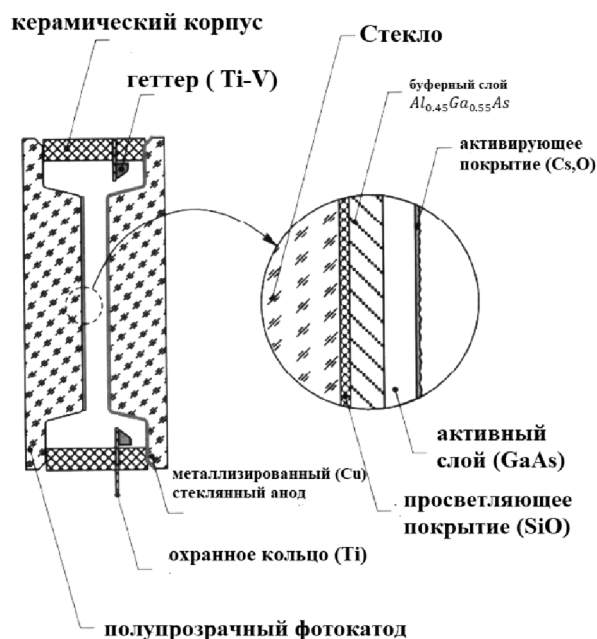


Рис. 86. Конструкция GaAs-фотодиода
и фрагмент полупрозрачного $p^+-\text{GaAs}$ (Cs, O) фотоанода

а также для генерации электронных пучков с высокой спиновой поляризацией и узким энергетическим разрешением. Одна из наиболее успешных научных школ по физике и технологии полупроводниковых систем с эффективным ОЭС и фотокатодов для приборов ночного видения создана в ИФП СО РАН под руководством д-ра физ.-мат. наук, профессора **А. С. Терехова**.

На рис. 85 представлена диаграмма энергетических зон вблизи поверхности кристалла p^+ -GaAs со слоем (Cs, O) O), а на рис. 86 представлена конструкция p^+ -GaAs (Cs, O)-фотодиода со схематическим изображением на фрагменте разреза полупрозрачного p^+ -GaAs (Cs, O)-фотокатода. GaAs- и GaN-фотокатоды являются основной частью современных электронно-оптических преобразователей (ЭОП) 3-го и 3⁺-поколений в видимой и УФ-частях спектра соответственно. Первые два поколения ЭОП использовали менее эффективные кислородно-серебряно-цезиевые, мультищелочные, фотокатоды. Основными составляющими ЭОП 3-го поколения кроме A_3B_5 -фотокатода являются микроканальная пластина (МКП), обеспечивающая усиление фототока до 10^4 и более, и люминофорный экран, собранные в единый ансамбль, поддерживающий экстремально высокий вакуум (лучше 10^{-9} Па) и возможность высоковольтного питания для МКП. Рисунок 87 представляет высоковакуумную установку для сборки фотоэлектронных приборов в металлокерамических корпусах с фотокатодами на основе кристаллов A_3B_5 (1), внешний вид ЭОП на основе p^+ -GaAs (Cs, O)-фотокатодов (2) и результаты измерения квантовой фотоэффективности p^+ -GaAs (Cs, O)-фотокатода по его площади (3).

Рисунок 88 демонстрирует внешний вид ЭОП на основе p-GaN (Cs,O)-фотокатода и спектр его квантовой эффективности в УФ-диапазоне спектра. Данный тип ЭОП носит название «солнечно-слепых», поскольку чувствительность в видимой области спектра значительно снижена. Регистрация УФ-изображений открывает новые возможности для обнаружения термозащищенных и скрытых объектов, а также при изучении космических образований в астрофизике и при решении задач экологии. Атомные перестройки и фотоэмиссионные процессы в ЭОП на основе p-GaN (Cs,O) подробно исследованы в работах А. А. Пахневич с соавт.²⁵

²⁵ Пахневич А. А., Бакин В. В., Язьков А. В. и др. Энергетическое распределение фотоэлектронов, эмитированных из p-GaN(Cs,O) с эффективным отрицательным сродством // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. Вып. 10. С. 592–596; Пахневич А. А., Бакин В. В., Шайблер Г. Э., Терехов А. С. Эмиссия баллистических фотоэлектронов из p-GaN(Cs,O) с эффективным отрицательным сродством // Физика твердого тела. 2007. Т. 49. Вып. 11. С. 1976–1980.

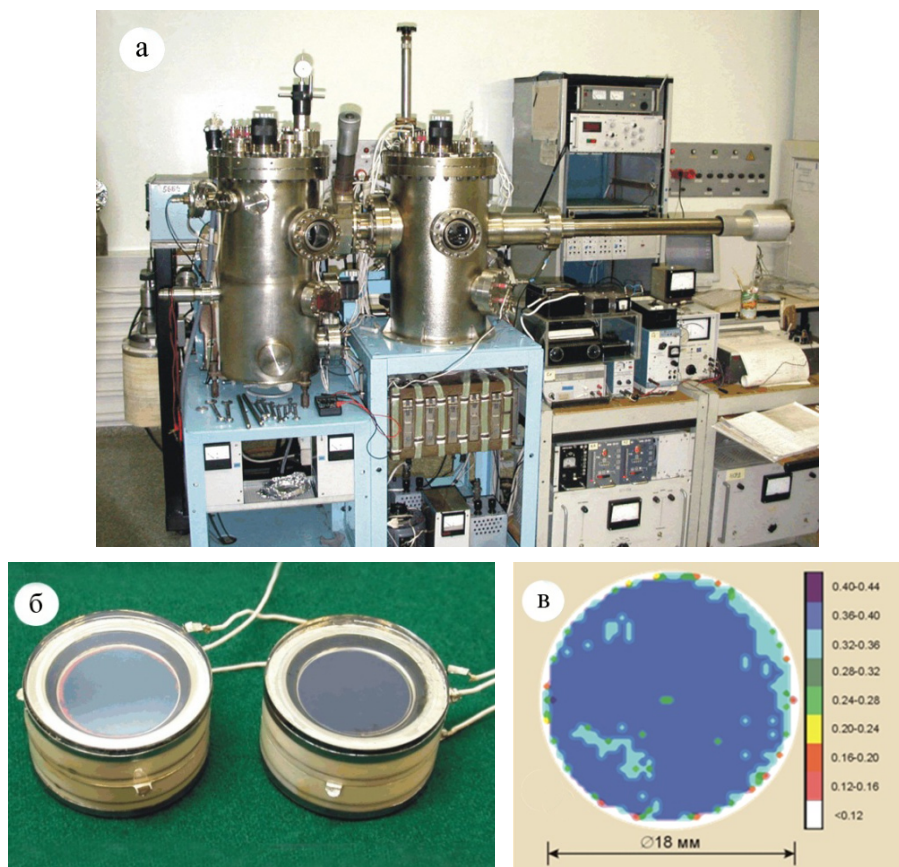


Рис. 87. Высоковакуумная установка для сборки фотоэлектронных приборов (а), внешний вид ЭОП на основе p^+ -GaAs (Cs, O)-фотокатодов (б) и результаты измерения квантовой фотоэффективности p^+ -GaAs (Cs, O)-фотокатода по его площади (в)

В отличие от ФПУ на основе квантовых ям и микроболометрических матриц, которые регистрируют собственное тепловое излучение объектов, приборы ночного видения на основе ЭОП являются усилителями яркости, при этом источником освещения изучаемых объектов является слабая подсветка со стороны ночного звездного неба, лунный свет и т. д. В настоящее время качество изображения «ночных» сцен при уровне освещенности $\sim 10^{-3}$ люкс с помощью современных приборов ночного видения практически не уступает качеству изображений при высоких уровнях естественной освещенности в дневное время $\sim 10^2$ – 10^3 люкс дневными оптико-электронными системами. Стандартные ЭОП 3-го поколения характеризуются коэффициентом усиления яркости от 10^3 до $7,5 \cdot 10^3$, имеют разрешение 64 штрих/мм и дальность наблюдения в несколько сотен метров.

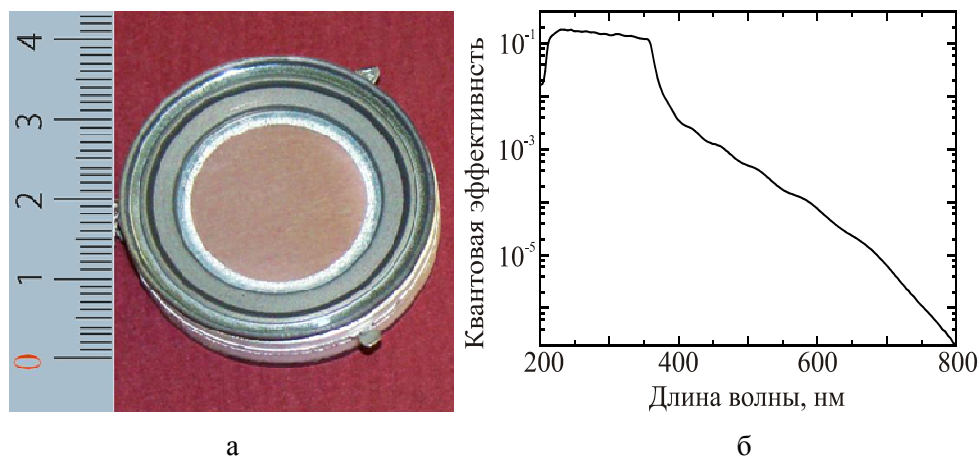


Рис. 88. Планарный вакуумно-полупроводниковый УФ-фотоприёмник на основе ЭОП с полупрозрачным фотокатодом $p\text{-GaN}(\text{Cs},\text{O})/\text{AlN}/\text{c-Al}_2\text{O}_3$ (а) и спектр квантовой эффективности $p\text{-GaN}(\text{Cs},\text{O})$ фотокатода (б)

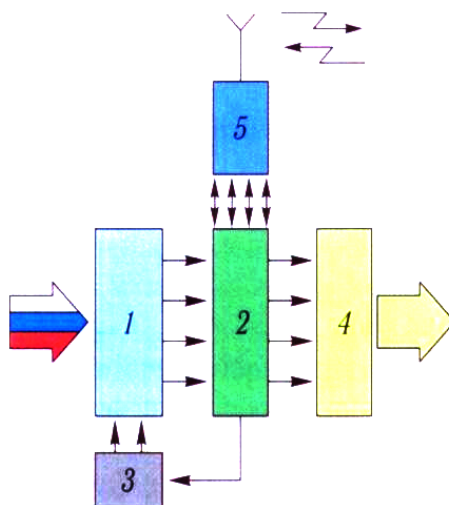


Рис. 89. Структурная схема «интеллектуального» ЭОП.
Пояснения в тексте

Одним из важнейших направлений развития элементной базы для создания высокоэффективных приборных комплексов и систем ночного видения является создание «интеллектуальных» ЭОП, чувствительных в широкой спектральной области от УФ (длина волны $\lambda = 0,2\text{--}0,3$ мкм) до ближнего ИК ($\lambda = 0,93\text{--}1,7$ мкм) с высокой квантовой эффективностью 80 % в УФ, 40 % в видимой, 20 % в ближней ИК-областях спектра. При этом планируется электронное изображение после усиления МКП считывать с помощью электронно-чувствительных кремниевых

ПЗС- или КМОП-матриц, интегрированных в сверхвысоковакуумный объем нового поколения ЭОП. Структурная схема «интеллектуального» ЭОП приведена на рис. 89 и состоит из пяти функциональных модулей: 1 – ЭОП интегрированный со считывающей кремниевой матрицей; 2 – микропроцессор для цифровой обработки изображений; 3 – электронный блок управления кремниевой матрицей и высоковольтным импульсным источником питания МКП; 4 – микродисплей; 5 – модуль приема и передачи видеоинформации. «Интеллектуальный» ЭОП для ИК-области спектра создается на основе гетероструктуры InP/InGaAsP, а для УФ-области спектра – на основе GaN-фотокатода²⁶.

Эпитаксиальные структуры CdHgTe: фотоприемники и квантовые системы

Тройное соединение $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в настоящее время и на ближайшие годы является безусловным лидером среди других полупроводниковых материалов, используемых для инфракрасных глубокоохлаждаемых гибридных фотоприемных матриц [13–15]. Их преимуществом является высокое значение температурной чувствительности и возможность работать при высокой кадровой частоте. На основе этого материала изготавливаются МФПУ для коротковолнового ИК-диапазона 1–3 мкм ($x = 0,6\text{--}0,7$), средневолнового 3–5 мкм ($x \sim 0,3$) и длинноволнового 8–12 мкм ($x \sim 0,2$) ИК-диапазонов. Новые преимущества предоставляет применение метода молекулярно-лучевой эпитаксии при выращивании гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (ГЭС МЛЭ КРТ). В этом случае оказывается возможным применение методов атомной инженерии для управления не только толщиной и составом выращиваемых слоев, но и для управления профилем распределения химического состава ГЭС МЛЭ КРТ по толщине выращиваемых гетероэпитаксиальных структур, как это показано на рис. 90 [10, с. 401–425].

Реализация данной концепции при выращивании ГЭС МЛЭ КРТ позволила получить гетероэпитаксиальные структуры с предельно высоким временем жизни носителей заряда 1–3 мкс в n -КРТ (для $x = 0,22$ при $T = 77$ К) и обеспечить тем самым высокое значение фоточувствительности фотодиодов и фоторезисторов на основе ГЭС МЛЭ КРТ за счет уменьшения рекомбинации носителей при создании потенциальных барьеров у поверхности и границе раздела с подложкой (рис. 90, 1). При создании проводящего слоя на внутренней границе раздела удалось

²⁶ Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. М.: Физматгиз, 2014. 276 с.

уменьшить продольное сопротивление КРТ в матричных ФПУ (рис. 90, 2). Создание слоя с увеличенной шириной запрещенной зоны («пика») непосредственно вблизи p - n -перехода позволяет понизить величины темнового и фоновых токов при сохранении пороговой мощности фотодиодов и эффективно использовать кремниевые мультиплексоры с заданной величиной времени накопления сигнала (рис. 90, 3).

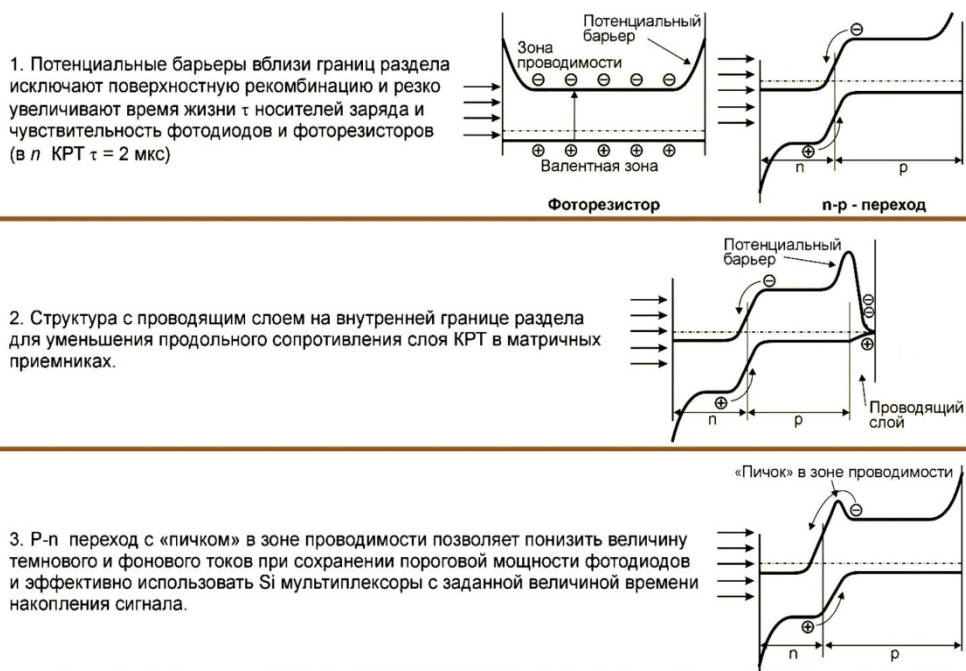


Рис. 90. Атомная инженерия гетероэпитаксиальных структур кадмий-ртуть-теллур при выращивании методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Разработка и создание серии установок МЛЭ для выращивания гетероэпитаксиальных структур кадмий-ртуть-теллур проведены в ИФП СО РАН под руководством чл.-корр. РАН **К. К. Свиташева** и профессора **С. И. Стенина** при активном участии большого коллектива научных сотрудников, инженеров, разработчиков и технологов, среди которых необходимо выделить д-ра физ.-мат. наук **Ю. Г. Сидорова**, д-ра физ.-мат. наук **М. В. Якушева**, канд. физ.-мат. наук **С. А. Дворецкого**, канд. физ.-мат. наук **Н. Н. Михайлова** и многих других. Представленная на рис. 91 многокамерная высоковакуумная установка МЛЭ «Обь-М» включает специально сконструированный модуль выращивания ртутьсодержащих твердых растворов, в котором однородность состава по площади пластины обеспечивается соосным расположением

молекулярных источников, обеспеченных кольцевыми рассеивателями. Высокая однородность молекулярных потоков позволяет отказаться от вращения подложки в пользу непрерывного контроля процесса роста *in situ* за счет встроенного автоматизированного лазерного эллипсометра, разработанного и созданного в лаборатории ИФП СО РАН, возглавляемой канд. физ.-мат. наук **С. В. Рыхлицким**. Именно автоматизированный эллипсометрический контроль толщины и состава выращиваемых слоев с нанометровым разрешением по толщине обеспечивает высокое качество и необходимые параметры выращиваемых структур ГЭС МЛЭ КРТ. Критически важным для выращивания совершенных гетероэпитаксиальных структур оказался также выбор ориентации подложки (013) [14].



Рис. 91. Почетный председатель ученого совета ИФП СО РАН, Нобелевский лауреат академик Ж. И. Алфёров (второй слева) знакомится с работой установки выращивания ГЭС МЛЭ КРТ «Обь-М»

На основе структур ГЭС МЛЭ КРТ в ИФП СО РАН совместно с предприятиями отрасли изготавливаются матричные фотоприемные устройства с размерностью 640×512 и 2048×2048 элементов (рис. 92, а, б). Гистограмма разности температур, эквивалентной шуму фотоприемника 640×512 элементов на ГЭС МЛЭ КРТ, и пример теплового изображения, полученного с его помощью, представлены на рис. 92, в, г.

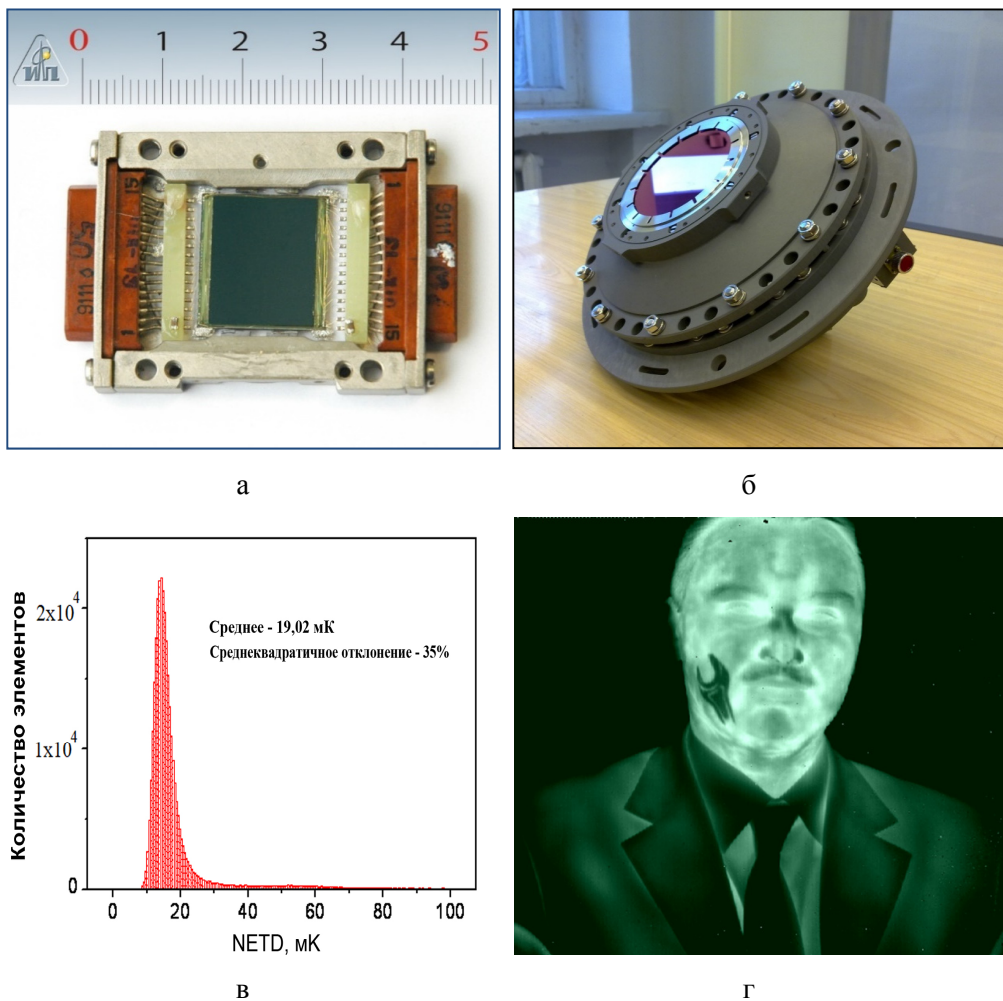


Рис. 92. Матричные фотоприемные устройства формата 640×512 (а) и 2048×2048 (б) на основе ГЭС МЛЭ КРТ, созданные совместно с АО «НЗПП-Восток». Гистограмма разности температур (NETD), эквивалентной шуму фотоприемника 640×512 элементов на ГЭС МЛЭ КРТ (в), и пример теплового изображения, полученного с его помощью (г)

Успехи в развитии технологии получения ГЭС МЛЭ КРТ позволили создать новый класс квантовых структур на основе квантовых ям HgTe и подробно исследовать фото-, термоэлектрические явления и квантовые эффекты в двумерных электронно-дырочных и квазитрехмерных системах, включая топологические изоляторы двумерные полуметаллы. По-видимому, исторически одним из первых явилось исследование переходов из состояния квантово-холловской жидкости

в состояние изолятора в двумерной электронном газе HgTe-квантовых ям и переходов плато-плато в условиях квантового эффекта Холла²⁷. Рисунок 93 представляет результаты измерения продольного и холловского сопротивлений в зависимости от магнитного поля для HgTe-квантовой ямы толщиной 21 нм. Детальное изучение особенностей этих переходов свидетельствует о намного более сложном характере квантовых свойств двумерного электронного газа в HgTe-квантовых ямах по сравнению с 2D-электронным газом в квантовых ямах в кремнии и кристаллах A_3B_5 .

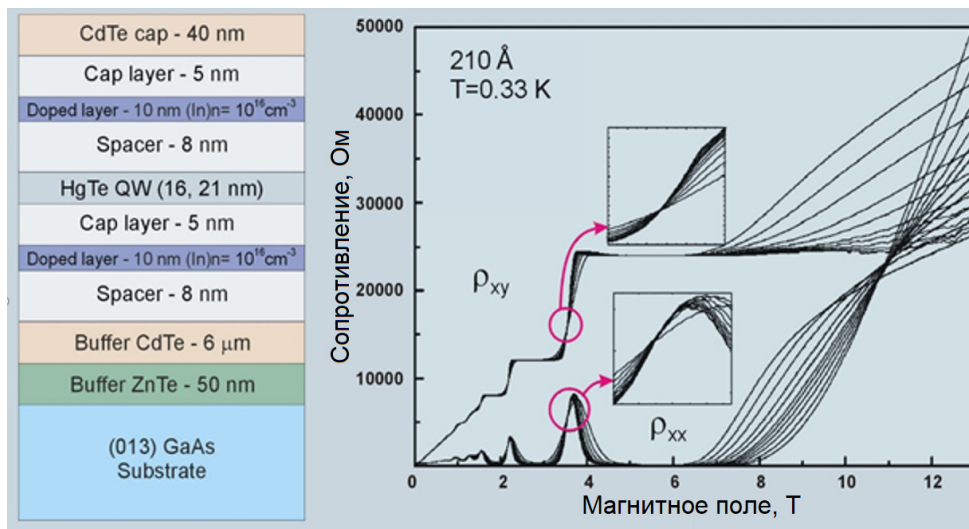


Рис. 93. Продольное ρ_{xx} - и холловское ρ_{xy} -сопротивления в зависимости от магнитного поля для HgTe-квантовой ямы толщиной 21 нм при температурах измерения (снизу вверх) 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2 и 3 К. Увеличенные области соответствуют переходам плато-плато. Слева – схематическое изображение поперечного среза исследуемой структуры

В дальнейшем выяснилось, что энергетический спектр HgTe-квантовой ямы принципиальным образом зависит от ее толщины d (рис. 94), и условно его можно разделить на области с $d < d_c$, где реализуется прямозонный двумерный изолятор. При $d_c = (6,3\text{--}6,5)$ нм дисперсионные кривые для электронов и дырок пересекаются, при этом энергетический зазор исчезает и реализуется линейный («графеноподобный») закон дисперсии в зависимости $E(k)$, как это показано на

²⁷ Ольшанецкий Е. Б., Sassine S., Квон З. Д. и др. Quantum Hall liquid-insulator and plateau-to-plateau transitions in a high mobility 2DEG in a HgTe quantum well // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. Вып. 9–10. С. 661–665.

вставке к рис. 94²⁸. Важным является то обстоятельство, что перенос заряда в этом случае осуществляется безмассовыми фермионами Дирака. При дальнейшем увеличении $d > d_c$ HgTe-квантовая яма представляет собой двумерный изолятор уже с инвертированными зонами (двумерный топологический изолятор) и при $d > (14-16)$ нм возникает полуметаллическое состояние, вызванное перекрытием дырочных зон H_1 (зона проводимости) и H_2 (валентная зона). Таким образом, HgTe-квантовая яма в зависимости от толщины имеет принципиально различные зонные структуры и связанные с ними электрофизические свойства²⁹.

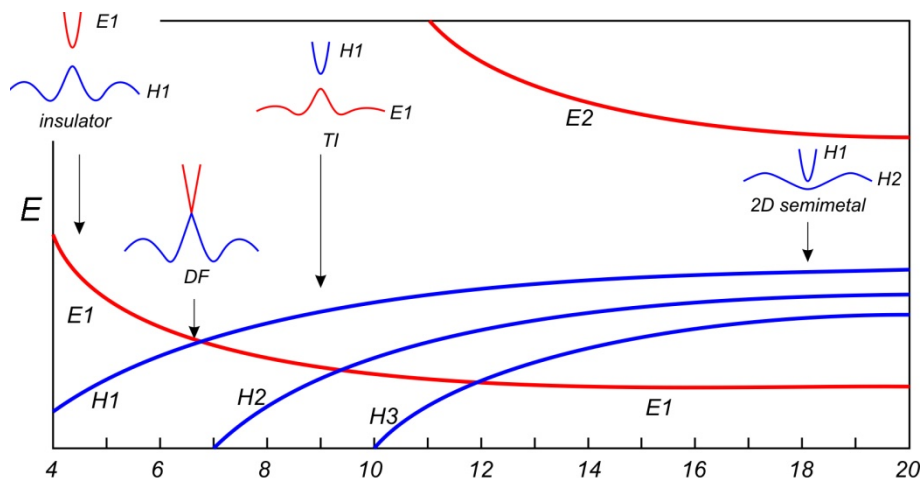


Рис. 94. Энергетический спектр HgTe-квантовой ямы в зависимости от ее толщины d в гетероэпитаксиальной системе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Наиболее необычным свойством квантовых ям HgTe является одновременное сосуществование в равновесии высокоподвижных носителей заряда в виде двумерных электронов и двумерных дырок. Для проведения магнитотранспортных и транспортных явлений в таких структурах методами стандартной фотолитографии изготавливались образцы в виде холловских мостиков с металлическими затворами на их поверхности, которые по сути представляли собой полевые транзисторы с HgTe-квантовыми ямами (рис. 95, а).

²⁸ D'yakonov M. I., Khaetskii A. V. Size quantization of the holes in a semiconductor with a complicated valence band and of the carriers in a gapless semiconductor // Sov. Phys. JETP. 1982. V. 55. № 5. P. 917–920.

²⁹ Квон З. Д., Савченко М. Л., Козлов Д. А. и др. Фото- и термоэлектрические явления в двумерных топологических изоляторах и полуметаллах на основе HgTe квантовых ям (Миниобзор) // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. Вып. 3. С. 174–186.

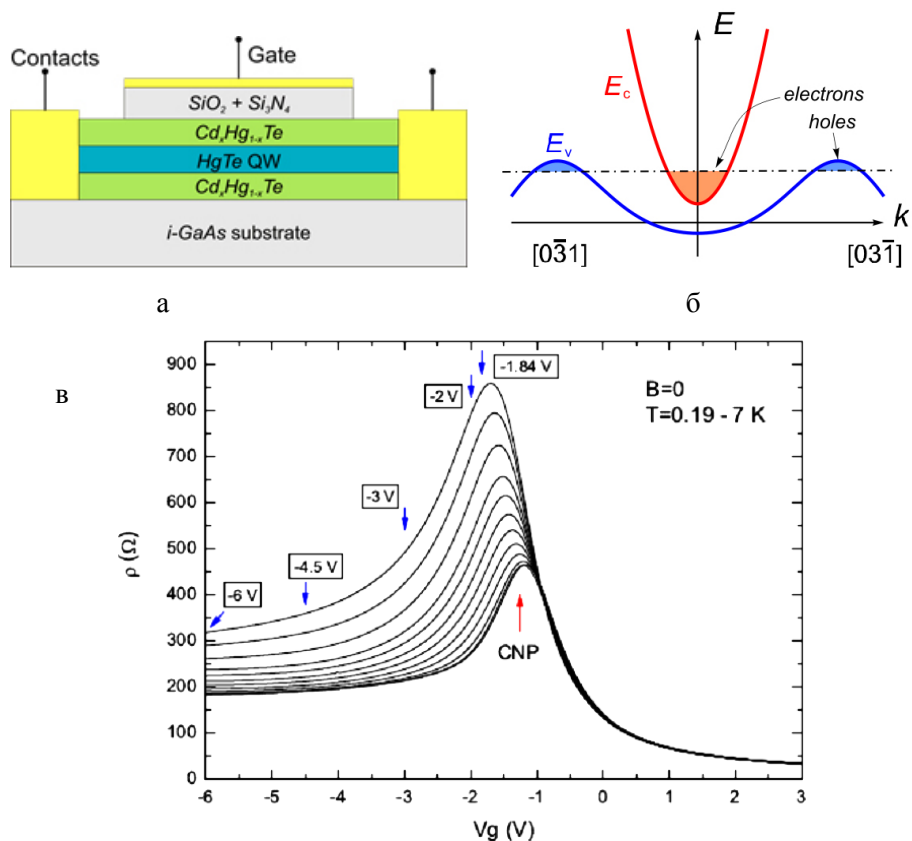


Рис. 95. Поперечный срез структуры с HgTe-квантовой ямой и затвором на поверхности (а); энергетический спектр $E(k)$ электронно-дырочной системы в HgTe-квантовой яме при $d > (14\text{--}16)$ нм (б); зависимость сопротивления от затворного напряжения в нулевом магнитном поле в диапазоне температур 0,19–7 К (в). CNP – точка зарядовой нейтральности

Предполагаемый вид закона дисперсии в такой электронно-дырочной системе при $d > (14\text{--}16)$ нм представлен на рис. 95, б, а ряд особенностей классического магнитотранспорта в такой системе, связанных с положительным магнитосопротивлением и знакопеременным эффектом Холла, обусловлены одновременным существованием электронов и дырок³⁰. Изучение зависимости сопротивления электронно-дырочной системы от затворного напряжения в нулевом магнитном поле в диапазоне температур 0,19–7 К показало асимметрию температурной зависимости от затворного напряжения (рис. 95, в), что объяс-

³⁰ Квон З. Д., Ольшанецкий Е. Б., Козлов Д. А. и др. Двумерная электронно-дырочная система в квантовой яме на основе HgTe // Письма в ЖЭТФ. 2008. № 87. Вып. 9. С. 588–591.

няется сильным межчастичным рассеянием электронов и дырок в двумерном полуметалле по механизму Ландау³¹. В полуметаллических квантовых ямах с $d > (14\text{--}16)$ нм при приложении продольного магнитного поля обнаружен переход металл-диэлектрик, что предположительно обусловлено образованием экситонного диэлектрика³².

Наиболее интересное физическое свойство ГЭС МЛЭ КРТ с HgTe-квантовыми ямами при $d > d_c$ состоит в существовании двумерного топологического изолятора (ТИ), в котором имеется делокализованная зона поверхностных состояний, и данная система является едва ли не единственной в настоящее время, в которой существование ТИ надежно установлено. Особенности закона дисперсии для двумерного ТИ на основе HgTe-квантовых ям состоят в линейном дираковском спектре краевых токовых состояний и параболическом спектре объемных состояний³³. В HgTe-квантовых ямах при $d = 14$ нм установлено ТИ-состояние, в котором транспорт по краевым состояниям осуществляется на расстояние около 1 мм при температуре менее 1 К³⁴. Получены свидетельства существования квантового эффекта Холла в квазитрехмерной пленке HgTe толщиной 100 нм³⁵.

Важное практическое значение ГЭС МЛЭ КРТ с HgTe-квантовыми ямами критической толщины квантовой ямы (около 6,3 нм для «нулевой» температуры) состоит в возможности получения стимулированного излучения на рекордной для данной гетероструктуры длине волны 20 мкм и возможности создания лазеров, работающих при длинах волн 25–60 мкм. При этом энергетический спектр носителей становится линейным («графеноподобным»). Изменением толщины или тонкой перестройкой температуры можно варьировать ширину запрещенной зоны. Таким образом было получено стимулированное излучение вплоть

³¹ Олышанецкий Е. Б., Квон З. Д., Энтин М. В. и др. Процессы рассеяния в двумерном полуметалле // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89. Вып. 6. С. 338–342.

³² Олышанецкий Е. Б., Квон З. Д., Гусев Г. М. и др. Индуцированный продольным магнитным полем переход двумерный полуметалл-диэлектрик в квантовых ямах на основе HgTe // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. Вып. 4. С. 268–271.

³³ Квон З. Д., Козлов Д. А., Олышанецкий Е. Б. и др. Топологические изоляторы на основе HgTe // Успехи физ. наук. 2020. Т. 190. Вып. 7. С. 673–692.

³⁴ Olshanetsky E. B., Kvon Z. D., Gusev G. M. et al. Persistence of a two-dimensional topological insulator state in wide HgTe quantum wells // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. № 12. P. 126802.

³⁵ Олышанецкий Е. Б., Квон З. Д., Кобылкин С. С. и др. Квантовый эффект Холла в квазитрехмерной пленке HgTe // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 93. Вып. 9. С. 584–587.

до длины волны 20 мкм (рис. 96) и продемонстрирована принципиальная возможность создания лазеров, работающих в диапазоне длин волн до 60 мкм в непрерывном режиме при температуре значительно выше температуры жидкого азота³⁶.

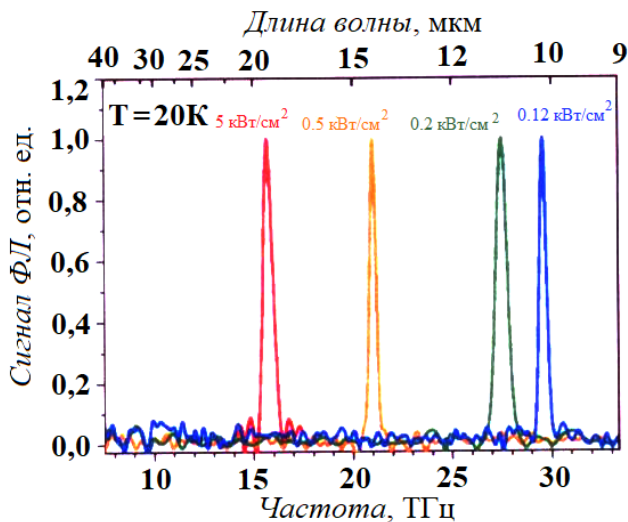


Рис. 96. Спектры стимулированного излучения в волноводных образцах с квантовыми ямами при $T = 20$ К. Указаны пороговые интенсивности оптической накачки

Графен: открытие, свойства и перспективы применения

Графен (*graphene*) представляет собой двумерную аллотропную модификацию углерода, образованную монослоем sp^2 -гибридизированных атомов углерода, объединенных в гексагональную двумерную кристаллическую решетку посредством σ - и π -связей (рис. 97). Отличается большой механической прочностью, рекордным значением теплопроводности ($5 \cdot 10^3$ Вт/м $\cdot$ К⁻²) и высокой подвижностью носителей заряда [16]. Модуль Юнга графена составляет около 1 ТПа, а прочность превышает прочность стали (в 10 раз) и алмаза. Подвижность носителей заряда в графене при комнатной температуре составляет 10^5 см²/В $\cdot$ с, что на три порядка превышает подвижность заряда в кремнии. Проводимость графена сравнима с проводимостью меди. Графен обладает рекордной прозрачностью 98 %, химической инертностью и биосовместимостью.

³⁶ Morozov S. V., Rumyansev V. V., Faddeev M. A. et al. Stimulated emission from HgCdTe quantum well heterostructures at wavelength up to 19.5 μ m // Applied Physics Letters. 2017. V. 111. P. 192101.

Электрофизические свойства графена на поверхности окисленного кремния впервые исследованы группой сотрудников во главе с А. К. Геймом и К. С. Новоселовым в 2004 г.³⁷ Основная часть авторов – из Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов (ИПТМ) РАН (п. Черноголовка Московской области), поэтому ИПТМ РАН с полным правом может считаться родоначальником этого открытия. Напомним, что **А. К. Гейм** и **К. С. Новоселов** в 2010 г. были удостоены Нобелевской премии с формулировкой «за передовые опыты с двумерным материалом – графеном».

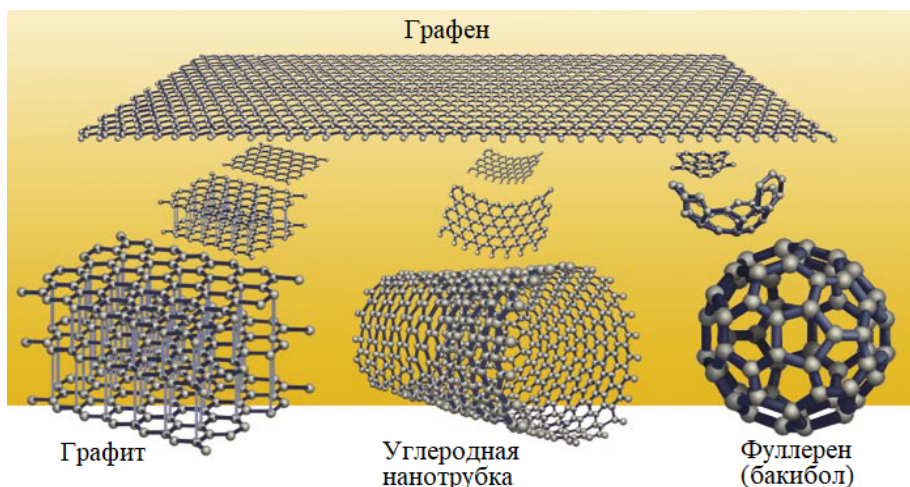


Рис. 97. Аллотропные модификации углерода

Согласно теоретическим исследованиям, проведенным еще в 1947 г.³⁸ и подтвержденным многочисленными экспериментальными данными, графен является первым из известных двумерным кристаллом, в котором отсутствует запрещенная зона, закон дисперсии энергетического спектра электронов и дырок имеет линейный характер, а эффективная масса носителей заряда равна нулю вблизи точки соприкосновения энергетических зон. Носители заряда в графене описываются не привычным в физике твердого тела уравнением Шредингера, а гамильтонианом дираковского вида $H = -i\hbar v_F \sigma \nabla$, где $v_F \sim c/300 \sim 10^6$ м/с – фермиевская скорость, c – скорость света, σ – матрица Паули. Благодаря этому в графене стало возможным исследовать квантовые релятивистские явления, часть из которых нереализуема даже в физике высоких

³⁷ Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science. 2004. V. 36. P. 666–669.

³⁸ Wallace P. R. The Band Theory of Graphite // Phys. Rev. 1947. V. 71. № 9. P. 622–634.

энергий³⁹. Уникальность электронных свойств графена, обусловленная безмассовым характером фермионов Дирака, дает возможность для исследований в области квантовой электродинамики⁴⁰. Необычное свойство квантового транспорта в графене состоит в предсказании эффекта Клейна, при котором электрон преодолевает с вероятностью, равной единице, любые потенциальные барьеры при нормальном падении⁴¹.

Рассмотрим экзотические электронные свойства графена, исходя из особенностей его зонной структуры и следуя материалам лекций академика РАН **В. Б. Тимофеева** [17]. На рис. 98 приведена структура энергетических зон графена с указанием зоны проводимости и валентной зоны и зонные конусы в точках К и К' зоны Бриллюэна (на вставках). Точка касания зонных конусов называется точкой Дирака, в которой эффективная масса электрона обращается в ноль, и их транспортные свойства становятся похожими на свойства безмассовых частиц, таких как фотоны, но имеющих электрический заряд.

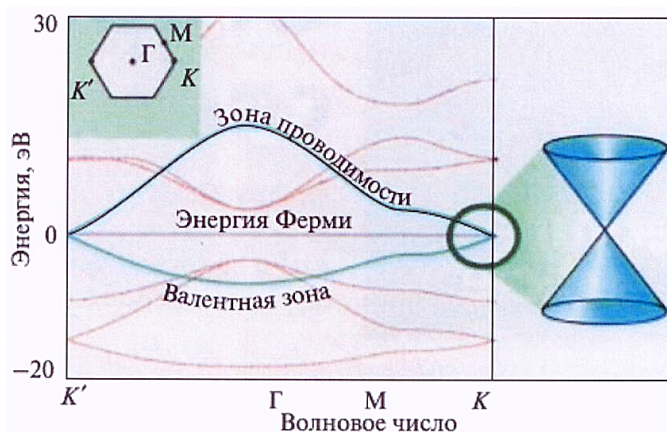


Рис. 98. Структура энергетических зон графена

Выдающимся результатом явилось наблюдение квантового эффекта Холла в графене при комнатной температуре в случае больших магнитных полей не менее 20 Т⁴².

³⁹ Морозов С. В., Новоселов К. С., Гейм А. К. Электронный транспорт в графене // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178. Вып. 7. С. 776–780.

⁴⁰ Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // Nature Letters. 2005. V. 438. № 10. P. 197–200.

⁴¹ Katsnelson M. I., Novoselov K. S., Geim A. K. Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene // Nature Physics. 2006. V. 2. P. 620–625.

⁴² Novoselov K. S., Jiang Z., Zhang Y. et al. Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene // Science. 2007. V. 315. P. 137.

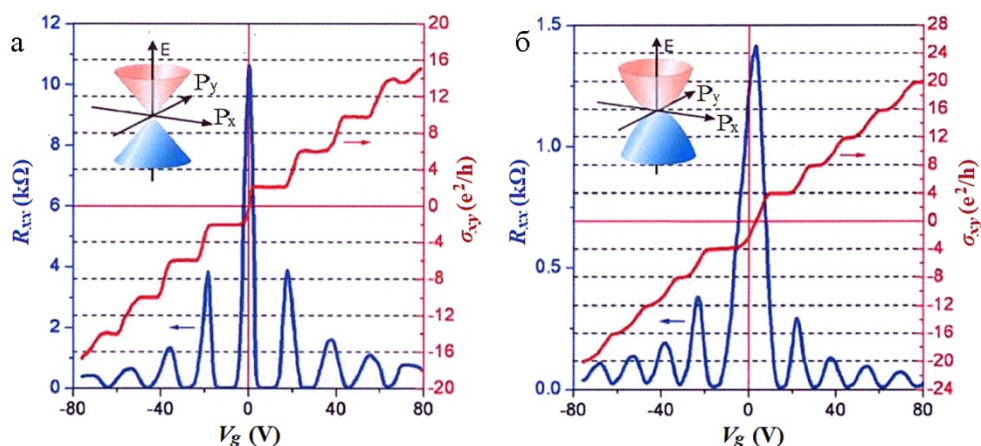


Рис. 99. Квантовый эффект Холла: *a* – в монослойном графене; *б* – в двухслойном графене. Экспериментальные зависимости продольного сопротивления R_{xx} и σ_{xy} при магнитном поле $B = 13$ Т и $T = 4$ К. На вставках показаны схематические изображения зонной структуры

На рис. 99 представлено продольное электросопротивление R_{xx} и холловская проводимость σ_{xy} в зависимости от затворного напряжения V_g графеновой структуры. Измерения выполнены на холловских структурах графена на окисленной поверхности кремния с использованием металлического затвора.

В монослойном графене квантовый эффект Холла (КЭХ) имеет вид непрерывных эквидистантных ступеней в холловской проводимости σ_{xy} , которая проходит через ноль в точке электронейтральности (точки Дирака), где меняется тип проводимости с электронной при позитивном значении V_g на дырочную при негативном значении V_g . Последовательность плат имеет ожидаемую для целочисленного КЭХ высоту ступенек, но сдвинутую по сравнению с обычным КЭХ на $1/2$ постоянной Клитцинга h/e^2 , так что в графене наблюдается «полуцелый» КЭХ. Пик продольного сопротивления R_{xx} при $V_g = 0$ свидетельствует о существовании нулевого уровня Ландау, заполняемого наполовину электронами из зоны проводимости и наполовину дырками из валентной зоны [17]. В слоях графена, синтезированных на кремниевой поверхности карбида кремния, продемонстрирована возможность создания стандартов электросопротивления на основе квантового эффекта Холла с рекордной точностью $\sim 10^{-9}$ при $T = 300$ мК и $\sim 10^{-8}$ при $T = 4,2$ К⁴³.

⁴³ Tzalenchuk A., Lara-Avila S., Kalaboukhlov A. et al. Towards a quantum resistance standard based on epitaxial grapheme // Nature Nanotechnology Letters. 2010. V. 5. P. 186–189.

Одной из проблем, препятствующих широкому практическому применению монослойного графена, например, при создании полевых транзисторов в современной микро- и нанoeлектронике, является отсутствие запрещенной зоны. В этом случае не представляется возможным получить существенное изменение электросопротивления при изменении затворного напряжения, т. е. реализовать состояния, пригодные для двоичной логики. Одно из возможных решений проблемы создания транзисторных структур на графене было предложено за счет использования узких полосок графена шириной 20 нм. В этом случае благодаря квантоворазмерному эффекту удастся реализовать диэлектрическое состояние графеновой нанополоски при комнатной температуре и управление электросопротивлением нанополоски за счет затворного напряжения⁴⁴. Другую возможность предоставляет использование двойных атомных слоев графена. В этом случае оказывается возможным электростатическая перестройка ширины запрещенной зоны на величину до 250 мэВ. Отмечается, что в сочетании с уникальными транспортными свойствами систем на основе графена предлагаемый контроль запрещенной зоны графена открывает новые перспективы для создания наноустройств⁴⁵.

Отметим также двухслойные графеновые структуры, в которых слои развернуты друг относительно друга на небольшие $\sim 1,1^\circ$ так называемые магические углы. В этих структурах скорость электронов падает почти до нуля и на месте точки Дирака возникает плоская диссипативная энергетическая зона с большой плотностью электронных состояний и большой эффективной массой носителей заряда (рис. 100). В такого рода «скрученных» графеновых структурах обнаружено сверхпроводящее состояние с температурой перехода 1,7 К. Сверхпроводимость графеновых бислоев связывается с образованием куперовских пар при взаимодействии несогласованных по фазе оптических фононов в слоях графена⁴⁶.

⁴⁴ Chen Z., Lin Y.-M., Rooks M., Avouris P. Graphene Nano-Ribbon Electronics // *Physica E*. 2007. V. 40. № 2. P. 228–232.

⁴⁵ Zhang Y., Tang T., Girit C. et al. Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer grapheme // *Nature Letters*. V. 459. P. 820–823.

⁴⁶ Cao Y., Vatem V., Fang S. et al. Unconventional superconductivity in magic-angle grapheme superlattices // *Nature*. 2018. V. 556. P. 43–50; Ирхин В. Ю., Скрыбин Ю. Н. Точки Дирака, спиноны и спиновая жидкость в «повернутом» двухслойном графене // *Письма в ЖЭТФ*. 2018. Т. 107. Вып. 10. С. 684–688.

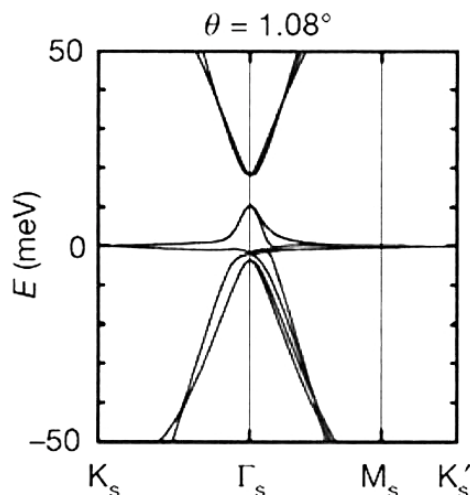


Рис. 100. Образование плоской зоны в двухслойном графене при повороте слоев на магический угол $\theta = 1,08^\circ$. K_s и K'_s – волновые векторы точек Дирака в минизонах Бриллюэна для каждого из слоев

Экспериментально продемонстрирована сверхвысокая чувствительность графеновых структур к регистрации небольших концентраций газов. На основе графена изготовлен газовый сенсор с чувствительностью на уровне 1 ppb (одна частица на миллиард) к концентрации молекул NO_2 ⁴⁷. Необычные свойства графеновых структур, связанные с особенностями зонной структуры двумерных кристаллов, открывают широчайшие и пока мало исследованные возможности применения графена в решении задач создания принципиально нового поколения устройств нанoeлектроники и нанoфотоники. Важным при этом является значительный прогресс, достигнутый в технологиях получения графеновых структур. Если в первых экспериментах использовались технологии микромеханического расщепления графита, то в настоящее время разработана рулонная технология промышленного производства 30-дюймовых графеновых листов с помощью осаждения из газовой смеси CH_4/H_2 на гибкой медной подложке с последующим переносом на другие типы подложек⁴⁸. Разработаны также технологии получения

⁴⁷ Лебедев А. А., Лебедев С. П., Новиков С. Н. и др. Сверхчувствительный газовый сенсор на основе графена // Журн. техн. физики. 2016. Т. 86. Вып. 3. С. 135–139.

⁴⁸ Bae S., Kim H., Lee Y. et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes // Nature Nanotechn. Letters. 2010. V. 5. P. 574–578.

многих других двумерных кристаллов – графан (гидрогенизованный графен CH_n), фторографен, силицен, фосфорен, германен, нитрид бора BN, MoS_2 , NbSe_2 , Ca_2N и др. Наконец, недавно методами динамической ковалентной химии была синтезирована новая разновидность графена – sp - sp^2 -гибридизация углерода под названием графин, γ -graphyne⁴⁹.

Квантовые биты в моноизотопном кремнии

Предыдущие разделы пособия были посвящены во многом полупроводниковым материалам, элементной базе и технологиям классических компьютеров, оперирующих классическими состояниями булевой алгебры «0» и «1» и использующих архитектуру фон Неймана для компьютеров – управляющая микросхема, запоминающее устройство для хранения данных и команд, устройство для ввода-вывода информации. Переход к использованию квантовых явлений в нанoeлектронике, к молекулярной электронике и нанотехнологиям не меняет базисных принципов работы современных компьютеров, которые по сути остаются классическими.

В 1980 г. **Ю. И. Манин**⁵⁰ и в 1982 г. **Р. Фейнман**⁵¹ обратили внимание, что каждое состояние квантовой системы из L двухуровневых квантовых элементов, позднее получивших название квантовых битов – кубитов, в отличие от классической, может находиться в когерентной суперпозиции из 2^L булевых состояний. В отличие от классических компьютеров при проведении вычислений в квантовом компьютере отдельным шагом совершается унитарная операция над L -кубитовой суперпозицией, тогда как в классическом компьютере такая операция потребовала бы 2^L элементарных шагов. Изменение квантового состояния системы, производимое квантовым процессором, касается всех 2^L базовых состояний одновременно. Данное обстоятельство является проявлением квантового параллелизма, приводящему к существенному ускорению вычислительного процесса. В этом заключается одно из главных преимуществ квантовых компьютеров по сравнению с классическими цифровыми компьютерами [18]. Квантовый компьютер благодаря своим качествам квантового параллелизма способен разложить 250-значное число на простые множители не за 800 тысяч лет,

⁴⁹ Hu Y., Wu C., Pan Q. et al. Synthesis of γ -graphene using dynamic covalent chemistry // Nature Synthesis. 2022. V. 1. P. 449–454.

⁵⁰ Манин Ю. И. Вычислимое и невычислимое. М.: Сов. радио, 1980. 128 с.

⁵¹ Feynman R. Simulating physics with computers // Intern. J. Theor. Phys. 1982. V. 21. № 6/7. P. 467–488.

как современные самые мощные классические ЭВМ, а за 30 минут благодаря открытому **П. Шором** квантовому алгоритму⁵².

Р. Фейнман⁵³ предложил первую схему квантового обратимого компьютера, состоящую из элементов с двумя состояниями в качестве вычислительного базиса. Организацию квантовых обратимых унитарных логических операций над кубитами предполагалось осуществить с помощью контролируемых внешних воздействий, которыми могли бы управлять классические компьютеры. Принципиальная схема работы квантового компьютера может быть представлена на рис. 101.



Рис. 101. Схема архитектуры квантового компьютера.

Спинорные символы "0" означают разные кубиты в исходных состояниях, обозначенных номерами 1, 2, 3, ..., L (перечисление от 1 до L).

Основной его частью является квантовый регистр – совокупность некоторого числа L -кубитов. До ввода информации в компьютер все кубиты регистра должны быть приведены в основные базисные (булевы) состояния. Эта операция называется подготовкой начального состояния, или инициализацией. Далее каждый кубит можно подвергнуть селективному воздействию, например с помощью импульсов внешнего электромагнитного поля, которое переведет основные базисные состояния определенных кубитов в неосновные булевы состояния, а весь регистр в суперпозицию базисных состояний, задающую представление числа $n = \sum n_i 2^i$. При вводе информации в квантовый компьютер состояние входного регистра с помощью импульсных воздействий преобразуется в когерентную суперпозицию базисных состояний $|\psi(0)\rangle = \sum c_n |n\rangle$.

⁵² Shor P. W. Algorithms for Quantum Computation. Discrete Logarithms and Factoring // Proc. of the 35th Annual Symposium on Foundation of Computer Science. IEEE Computer Society Press. Nov. 1994. P. 124–134.

⁵³ Feynman R. P. Quantum Mechanical Computers // Foundation of Physics. 1986. V. 16. № 6. P. 507–531.

В таком виде информация подвергается воздействию квантового процессора, выполняющего последовательность квантовых логических операций, определяемому в отсутствие влияния окружения унитарным преобразованием $U(t)$, действующим на состояние всего регистра. К моменту времени t в результате преобразований исходное квантовое состояние становится новой суперпозицией вида $|\psi(t)\rangle = \sum c_n U_{mn}(t) |n\rangle$. Ввод данных и исполнение алгоритма вычислений выполняется с помощью одно- и двухкубитовых вентилей. Запись результатов вычисления в конечном квантовом состоянии и его считывание (*readout*) осуществляется измерением состояний всех кубитов.

Совокупность всех операций на входе квантового компьютера, формирующих исходные состояния, а также воздействий, осуществляющих унитарные локальные преобразования, соответствующие алгоритму вычислений, способы подавления потери когерентности квантовых состояний и исправления случайных ошибок играет здесь ту же роль, что и программное обеспечение (*software*) в классическом компьютере.

При выборе конкретной схемы квантового компьютера необходимо решить три основные проблемы: выбрать физическую систему – элементную базу, которая позволит иметь в компьютере достаточное количество управляемых кубитов; определить физический механизм, определяющий взаимодействие между кубитами; определить способ селективного управления кубитами и измерения их состояния на выходе. Все это вместе взятое представляет собой аппаратное обеспечение (*hardware*) квантового компьютера. При практическом воплощении аппаратного обеспечения рассматривается следующее:

- использование энергетических уровней ионов, захваченных ионными ловушками, созданными в вакууме с помощью электрических и магнитных полей определенной конфигурации, при лазерном охлаждении ионов до микрокельвиновых температур;

- использование ядерных спинов и методов ядерного магнитного резонанса (ЯМР);

- использование электронных спинов и методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР);

- использование макроскопических квантовых состояний сверхпроводящих элементов;

- использование спиновых или орбитальных состояний в квантовых точках;

- использование сверхпроводниковых туннельных джозефсоновских переходов;

- использование квантовых электродинамических полостей в фотонных кристаллах.

Проблемы реализации квантового компьютера подробно рассмотрены академиком РАН **К. А. Валиевым**⁵⁴.

Рассмотрим систему из двух кубитов на примере спина электрона или ядра в экспериментах по ЯМР или ЭПР. Спин электрона часто изображают в виде волчка с осью вращения, направленной вдоль или против направления магнитного поля. Эти направления спина эквиваленты логическим «единице» и «нулю» (рис. 102). Импульс радиочастотного электромагнитного поля определенной интенсивности переводит электрон из одного спинового состояния в другое. Импульс меньшей интенсивности ориентирует спин в промежуточное суперпозиционное состояние. В состоянии суперпозиции два кубита могут находиться уже в четырех суперпозиционных состояниях – 00, 01, 10 и 11, представляя сразу уже четыре числа. На n кубитах в силу принципа квантового параллелизма можно выполнять вычисления над 2^n числами параллельно. Используя всего несколько сотен кубитов, можно представить одновременно больше чисел, чем имеется атомов во Вселенной! Реализация квантовомеханических суперпозиционных состояний является фундаментальным отличием квантового бита от классических битов полупроводниковых полевых транзисторов.

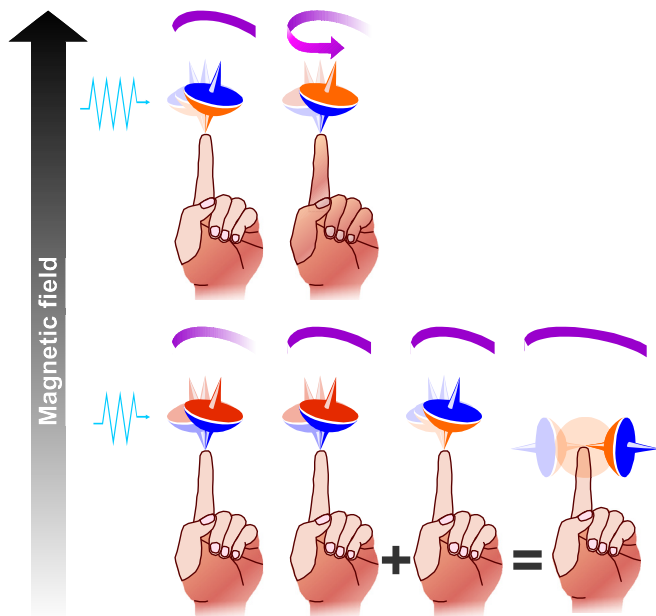


Рис. 102. Спиновые состояния электрона как квантовый бит

⁵⁴ Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // Успехи физ. наук. 2005. Т. 175. Вып. 1. С. 3–39; см. также [18].

Рисунок 103 демонстрирует в качестве примера реализацию элемента квантовой логики – «управляемое не» (CNOT), при котором реориентация спина под воздействием импульса радиочастотного излучения электрона происходит (или не происходит) в зависимости от спинового состояния контрольного электрона.

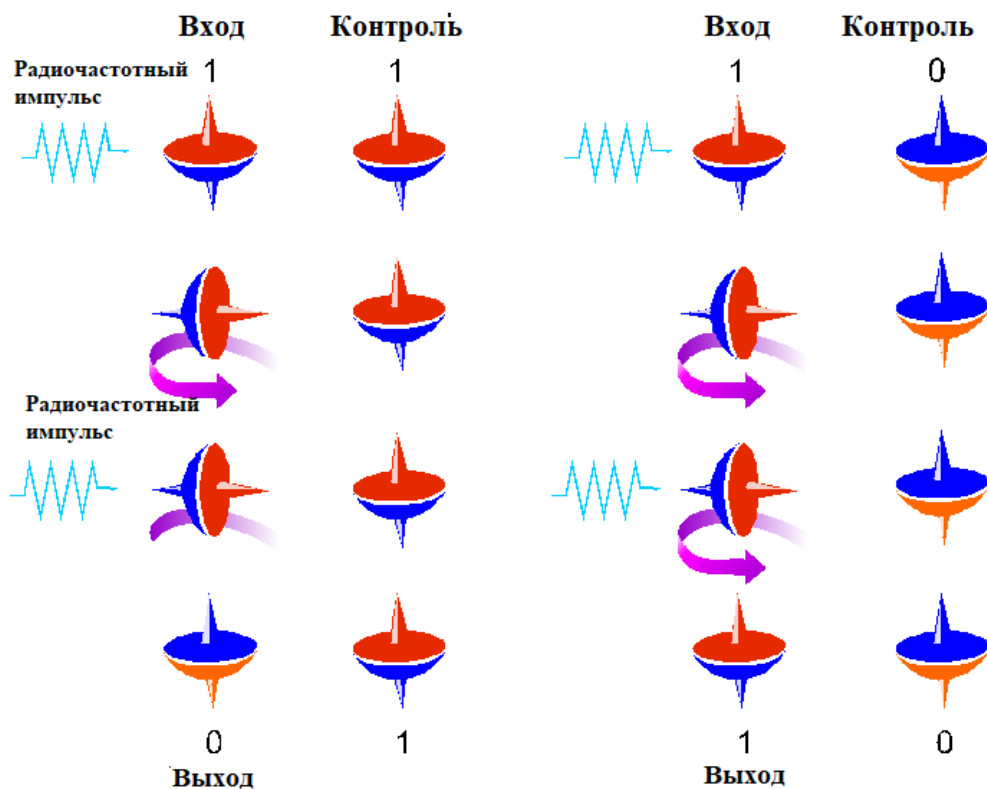


Рис. 103. Квантовая логика – «управляемое не» (CNOT)

Конструкция ЯМР квантового компьютера на основе полупроводникового моноизотопного кристалла ^{28}Si с упорядоченным расположением изотопов ^{31}P , обладающих ядерным спином $\frac{1}{2}$ и использующихся в качестве кубитов, предложена в работе В. Е. Kane⁵⁵. В этом варианте предполагается использовать низкие температуры $T < 0,1$ К и постоянное магнитное поле $B > 2$ Т, в результате чего электроны донорных атомов ^{31}P занимают только нижнее спиновое состояние. Каждый донорный атом ^{31}P с ядерным спином – кубит – предлагается расположить упорядоченным образом и с необходимой точностью под управ-

⁵⁵ Kane В. Е. A silicon-based nuclear spin quantum computer // Nature. 1998. V. 393. № 5. P. 133–137; см. также [18].

ляющим металлическим затвором **A**, отделенным от поверхности кремния тонким диэлектриком оксида кремния (рис. 104). Электрическое поле затвора **A** изменяет распределение электронной плотности и соответственно изменяет резонансную частоту ядерного спина за счет его сверхтонкого взаимодействия с электронным спином. **A**-электроды управляют резонансной частотой ядерно-спинового кубита и осуществляют однокубитные операции.

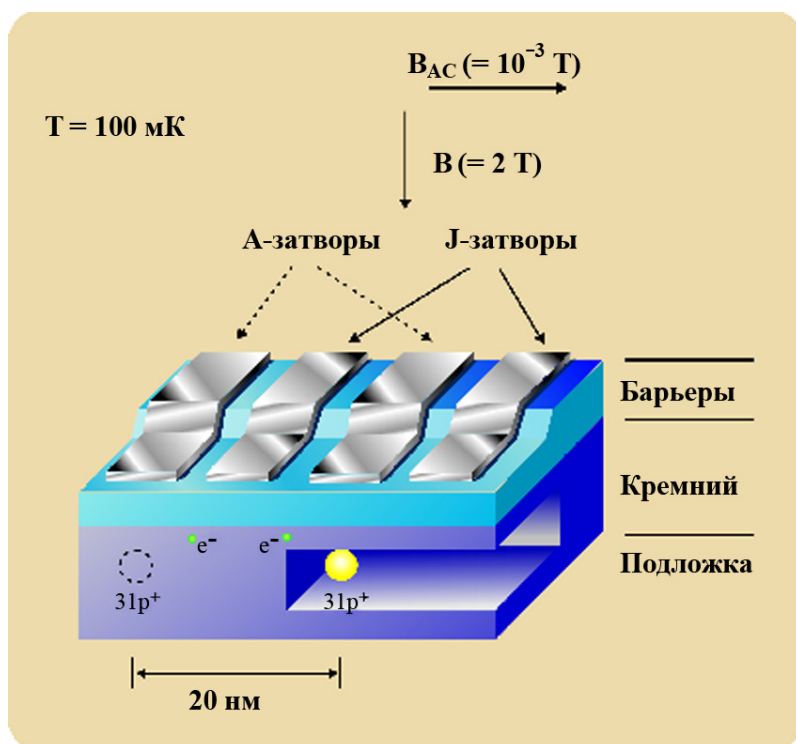


Рис. 104. Схематическое изображение фрагмента квантового компьютера на ионах ^{31}P в моноизотопическом монокристалле ^{28}Si

Расположенные между **A**-затворами на расстоянии 10–20 нм **J**-затворы управляют взаимодействием электронов соседних ядерных спинов атомами ^{31}P , что позволяет осуществлять (или не осуществлять) переворот спина одного из электронов в зависимости от состояния спина второго электрона, т. е. выполнять двухкубитные операции. Для исключения взаимодействия ядерных спинов атомов ^{31}P матрица кремния и оксид кремния должны быть очищены от изотопа ^{29}Si , который содержится в естественном кремнии в количестве 3,7 %, или должны быть использованы другие бесспиновые материалы. Измерение состояния ядерного спина атомов ^{31}P осуществляется при измере-

нии состояния электронного спина за счет одноэлектронной емкостной техники при переносе зарядов между А-электродами. Проведение таких измерений оказывается возможным за счет времени релаксации спина, которое в системе Si:P может достигать рекордных значений в тысячи секунд [9, 18].

Предложенная конструкция квантового компьютера позволяет реализовать квантовое вычислительное устройство с практически неограниченным числом кубитов. В последние годы достигнуты зримые успехи в получении обогащенных на 99,999 % монокристаллов ^{28}Si ⁵⁶, в выращивании методом газового химического осаждения обогащенных эпитаксиальных слоев 99,992 ^{28}Si на 300 мм подложках кремния ⁵⁷ и в выращивании эпитаксиальных слоев ^{28}Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии из сублимационных источников ^{28}Si с высокой изотопной чистотой ⁵⁸.

Вместе с успехами нанотехнологий при получении кремниевых микросхем с проектными нормами в несколько нанометров это дает надежду на скорое интегрирование в крупномасштабное производство спиновых кубитов в кремнии и решение проблемы создания квантового компьютера на кремнии. Этот вывод подтверждается результатами недавних работ по изучению спиновых состояний в кремниевых структурах, изготовленных обычными методами КМОП-кремниевых технологий. Реализован двухкубитный квантовый процессор с операционной точностью, превышающей 99 % в изотопически чистой квантовой яме толщиной 5 нм в $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ -гетероструктуре с остаточной концентрацией ^{28}Si 800 ppm (частей на миллион) ⁵⁹. Осуществлено квантовое неразрушающее считывание спина электронов в кремнии с помощью вспомогательного (*ancilla*) квантового бита с 99 %-й точностью ⁶⁰.

⁵⁶ Abrosimov N. D., Aref'ev D. G., Bekker P. et al. A new generation of 99,999 % enriched ^{28}Si single crystals for the determination of Avogadro's constant // *Metrologia*. 2017. V. 54. P. 599–606.

⁵⁷ Mazzochi V., Sennikov P. G., Bulanov A. D. et al. 99,992 % ^{28}Si CVD grown epilayer on 300 mm substrates for large scale integration of silicon spin qubits // *J. Cryst. Growth*. 2019. V. 509. P. 1–7.

⁵⁸ Деточенко А. П., Денисов С. А., Дроздов М. Н. и др. Эпитаксиально выращенные моноизотопные слои Si, Ge и твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: получение и некоторые свойства // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Т. 50. Вып. 3. С. 350–353.

⁵⁹ Mills A. R., Guinn C. R., Gullans M. J. et al. Two-qubit silicon quantum processor with operation fidelity exceeding 99 % // *Science Advances*. 2022. V. 8. P. 5130.

⁶⁰ Yoneda J., Takeda K., Noiri A. et al. Quantum non-demolition readout of an electron spin in silicon // *Nature Communications*. 2020. V. 11. P. 1144.

Ранее с помощью стандартной КМОП-технологии создан двухзатворный транзистор с дырочной проводимостью в канале. При низкой температуре первый затвор формирует квантовую точку, кодирующую дырочный спиновый кубит, второй затвор формирует квантовую точку для считывания состояния первого кубита. Электрический контроль состояния кубитов с приложением микроволновой модуляции демонстрирует работоспособность указанной двухкубитовой системы и возможность ее масштабирования⁶¹.

Среди других вариантов реализации квантового компьютера (или квантового симулятора для решения отдельных задач) следует ожидать их создание на квантовых точках и/или сверхпроводниковых элементах [18]. На рис. 105 в качестве примера показан квантовый компьютер фирмы IBM из 50 сверхпроводниковых кубитов, работающий при температуре менее 10 мК, что обеспечивает время когерентности квантовых состояний 90 мкс.

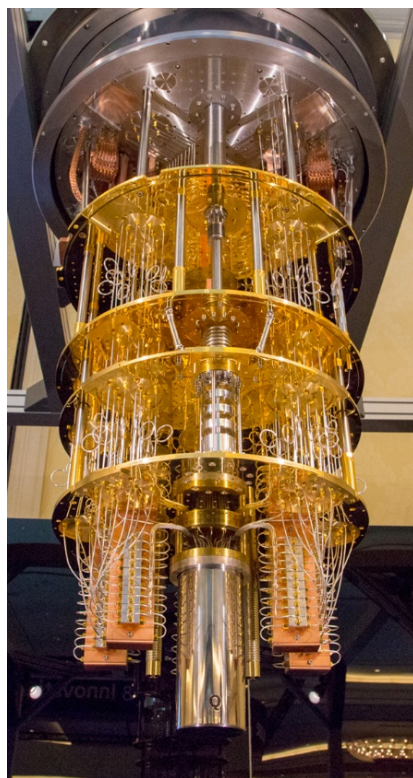


Рис. 105. Квантовый компьютер фирмы IBM из 50 сверхпроводниковых кубитов, работающий при температуре менее 10 мК (в нижней части). Температура в верхней части помещаемого в гелиевый криостат прибора составляет 4 К

⁶¹ Mourand A., Jehl X., Kotecar-Patil D. et al. A CMOS silicon spin qubit // Nature Communications. 2016. V. 7. P. 13575.

Инфраструктура полупроводниковых нанотехнологий

Инфраструктура полупроводниковых нанотехнологий в Новосибирском государственном университете, Сибирском отделении РАН и в Новосибирском академгородке опирается на центры коллективного пользования (ЦКП) «Наноструктуры» в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (руководители – акад. РАН **А. В. Латышев** и канд. физ.-мат. наук **Д. В. Щеглов**) и на ЦКП «Высокие технологии и аналитика наносистем» (ЦКП «ВТАН», руководитель канд. физ.-мат. наук **П. В. Гейдт**) в Аналитическом и технологическом исследовательском центре физического факультета (АТИЦ) НГУ. Эти ЦКП работают на принципах взаимного сотрудничества, наличия взаимодополняющего уникального и дорогостоящего оборудования и обеспечивают проведение НИОКР с применением следующих современных диагностических, аналитических и технологических методов.

1. Сканирующая зондовая микроскопия.
2. Растровая электронная микроскопия.
3. Просвечивающая электронная микроскопия.
4. Рентгеновская дифрактометрия.
5. Спектрометрия в широком (0,19–2000 мкм) диапазоне длин электромагнитных волн.
6. Спектральный анализ от терагерцового до микроволнового диапазона.
7. Эллипсометрия.
8. Электрофизические измерения.
9. Пробоподготовка и локальная модификация нанообъектов.

Технологическая база ИФП СО РАН обеспечивает получение полупроводниковых наноструктур на кристаллах Si, Ge, A_3B_5 , A_2B_6 и их соединений методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Под руководством д-ра физ.-мат. наук **О. П. Пчелякова** в ИФП СО РАН разработана линейка отечественных автоматических сверхвысоковакуумных установок нового поколения для молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых многослойных гетеросистем, в том числе для организации их производства в условиях открытого космоса (см. рис. 44).

Имеется комплекс оборудования для оптической, электронной, зондовой, ионной и штамповой (*nanoimprinting*) нанолитографии (см. рис. 45). Среди диагностических методов укажем просвечивающую электронную микроскопию атомного разрешения (см. рис. 46), сканирующую туннельную микроскопию (рис. 106) и рамановскую

спектроскопию (рис. 107). На рис. 108 представлен быстродействующий спектральный эллисометрический комплекс «Эллипс-БСЭЖ», разработанный и произведенный в ИФП СО РАН под руководством д-ра техн. наук **С. В. Рыхлицкого**.

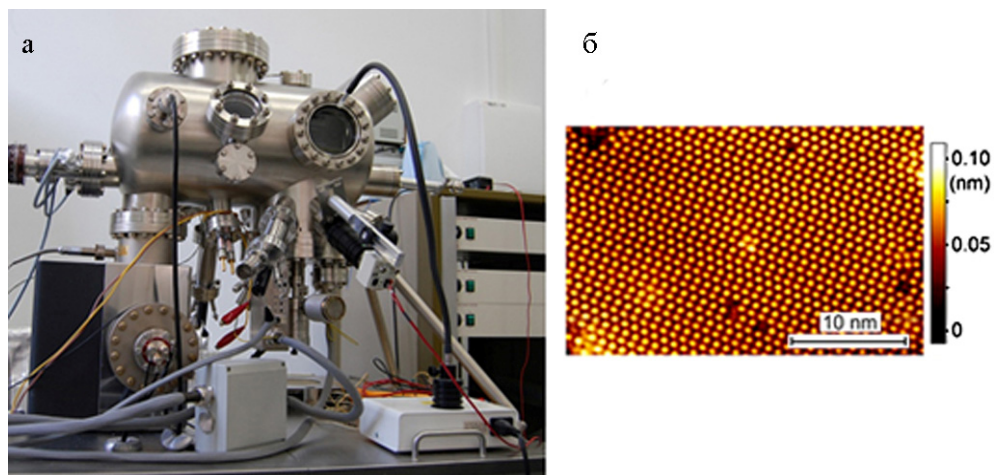


Рис. 106. Экспериментальная сверхвысоковакуумная установка, оснащённая СТМ (а); СТМ-изображение чистой поверхности германия с ориентацией (111) и реконструкцией с (2×8) (б)



Рис. 107. Доктор физ.-мат. наук В. А. Володин (справа) демонстрирует возможности спектрометра комбинационного рассеяния света Т64000 (в центре) в ЦКП «ВТАН» НГУ студентам физического факультета НГУ



Рис. 108. Быстродействующий спектральный эллипсометрический комплекс «Эллипс-БСЭК»

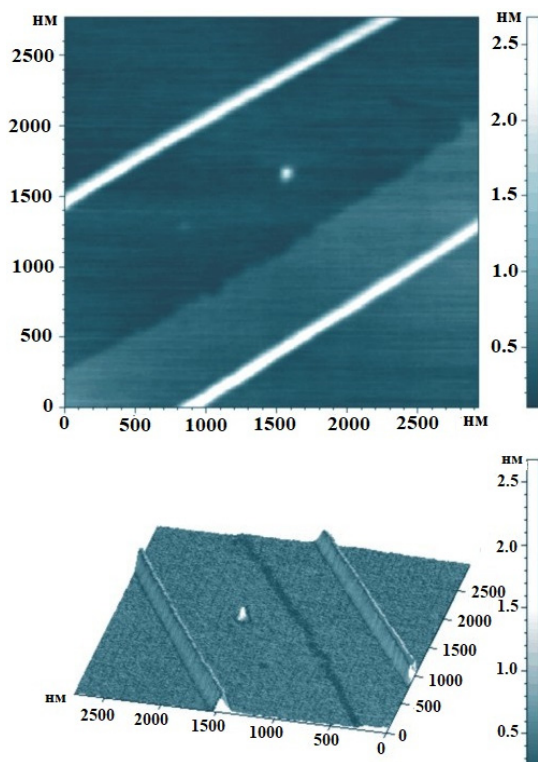


Рис. 109. Двухмерное и трехмерное изображения линий и точки (в центре), полученных методом анодного окисления на поверхности кремния (111). В качестве реперной линии выступает ступень моноатомной высоты 0,314 нм в центральной части фото

ЦКП «Наноструктуры» обладает полным набором стандартов для наноизмерений от квантового эффекта Холла (стандарт электросопротивления Ом) и одноэлектронных транзисторных наноструктур (стандарт электрического заряда Kl) до нанометрового стандарта на основе монокристаллических ступеней на поверхности кремния (111) высотой 0,314 нм (рис. 109) [19].

Мощным методом исследования электронной зонной структуры и конфигурации поверхности Ферми двумерных кристаллических материалов на поверхности твердых тел является метод фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением – ФЭСУР (Angle Resolved Photo Emission Spectroscopy – ARPES). В качестве примера на рис. 110 приведены экспериментальные дисперсионные зависимости $E(k)$, полученные методом ФЭСУР для поверхности (111) топологического изолятора на поверхности кристалла Bi_2Se_3 и демонстрирующие практически идеальный конус Дирака⁶².

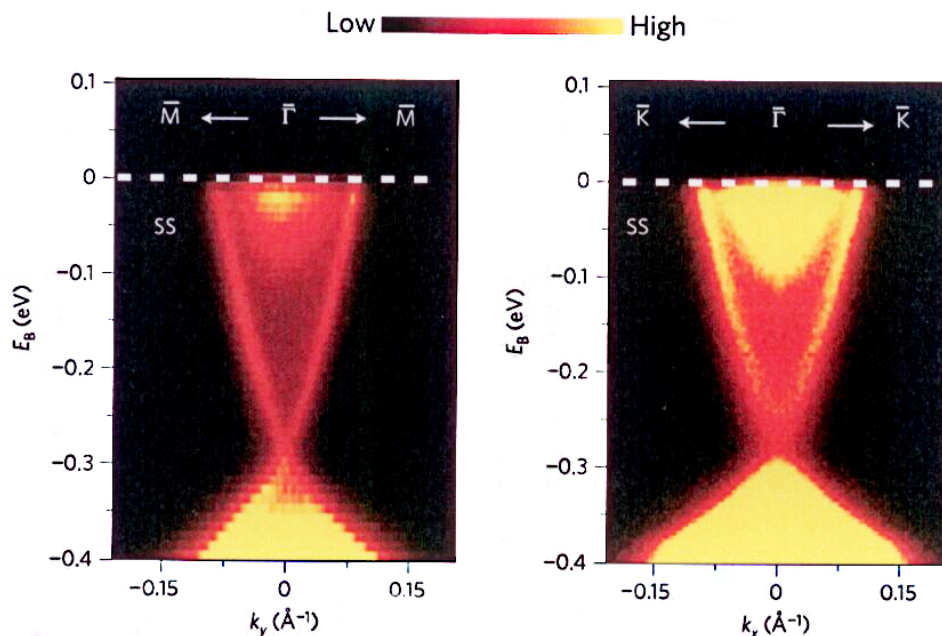


Рис. 110. Экспериментальные дисперсионные зависимости $E(k)$, полученные методом ФЭСУР для поверхности (111) топологического изолятора на поверхности кристалла Bi_2Se_3

⁶² Xia Y., Qian D., Hsieh D. et al. Observation of a large-gap topological-insulator class with a single Dirac cone on the surface // Nature Physics. 2009. V. 235. P. 398–402.

Эта методика реализована в ЦКП «Наноструктуры» ИФП СО РАН на СВВ-установке ФЭСУР ARPES FlexPS фирмы SPECS, оснащенной полусферическим анализатором энергий электронов с многоканальным 2D-КМОП-детектором электронов и встроенным электростатическим дефлектором (левая сторона установки на рис. 111).

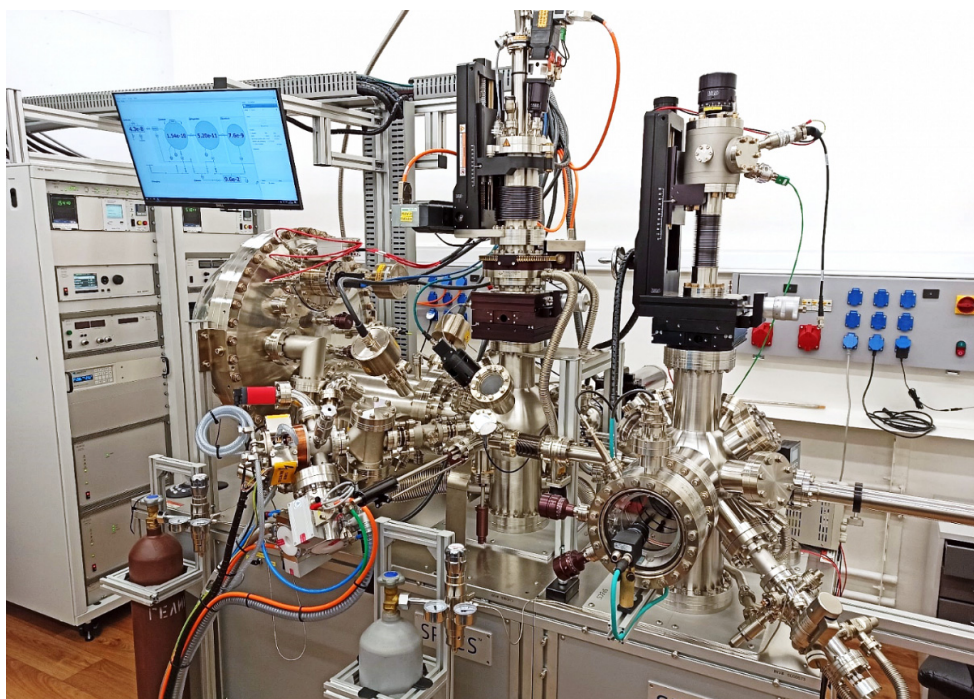


Рис. 111. Внешний вид СВВ-установки ФЭСУР ARPES FlexPS

С помощью СВВ-установки ФЭСУР исследованы физико-химические свойства и электронная структура поверхности трехмерных топологических изоляторов на основе халькогенидов и халькогалогенидов висмута и сурьмы, в частности исследовано открытие энергетической щели в области точки Дирака при осаждении кобальта на поверхность (0001) топологического изолятора BiSbTeSe_2 ⁶³. Большие перспективы для

⁶³ Кавеев А. К., Банщиков А. Г., Терпицкий А. Н. и др. Раскрытие энергетической щели в области точки Дирака при осаждении кобальта на поверхность (0001) топологического изолятора BiSbTeSe_2 // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54. Вып. 9. С. 859–863; Голяшов В. А. Физико-химические свойства и электронная структура поверхности трехмерных топологических изоляторов на основе халькогенидов и халькогалогенидов висмута и сурьмы: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников. Новосибирск: ИФП СО РАН, 2022. 94 с.

исследований в этой практически важной области исследования электронной структуры и спиновых явлений в квантовых полупроводниковых и твердотельных наносистемах открываются со строительством сибирского синхротронного кольцевого источника фотонов (СКИФ) и его оснащении исследовательской станцией ФЭСУР с использованием спиновых детекторов.

В ЦКП «ВТАН» АТИЦ ФФ НГУ имеется комплекс приборов и оборудования специализированного технологического назначения: гиротронные и магнетронные нагревательные установки, магнетронные напылительные станции и т. п.

Более полную информацию об организации работы и возможностях ЦКП «Наноструктуры» можно найти на сайте Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН <https://www.isp.nsc.ru>. Информация о ЦКП «ВТАН» находится на сайте АТИЦ ФФ НГУ <https://research.nsu.ru/ru/organisations/аналитический-и-технологический-исследовательский-центр-высокие-т/persons/>, на национальном сайте ЦКП <https://ckp-rf.ru/ckp/3209/>⁶⁴.

Список литературы

1. Стельбанс Л. С. Физика полупроводников. М.: Сов. радио, 1967. 452 с.
2. Лосев О. Опередивший время. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. 432 с.
3. Ржанов А. В. След на Земле. Солдат, Ученый, Учитель / Отв. ред. член-корр. РАН И. Г. Неизвестный. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 443 с.
4. Ржанов А. В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М.: Наука, 1971. 480 с.
5. Гриценко В. А., Исламов Д. Р. Физика диэлектрических пленок. Новосибирск: ИФП СО РАН, 2017. 351 с.
6. Лидер российской микроэлектроники – ОАО «НИИМЭ и Микрон». М.: Междунар. объедин. биогр. центр, 2014. 391 с.
7. Двуреченский А. В., Качурин Г. А., Нидаев Е. В., Смирнов Л. С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. 208 с.
8. Алфёров Ж. И. Физика и жизнь. М.; СПб.: Наука, 2001. 287 с.

⁶⁴ См. также: Гейдт П. В., Аржанников А. В., Асеев А. Л. и др. Аналитический и технологический исследовательский центр «Высокие технологии и наноструктурированные материалы» ФФ НГУ: история, становление и достигнутые результаты // Сиб. физ. журн. 2022. Т. 17. № 3. С. 66–88.

9. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 494 с.

10. Юбилейный сборник избранных трудов ИФП СО РАН / Отв. ред. А. В. Латышев, А. В. Двуреченский, А. Л. Асеев. Новосибирск: Параллель, 2014. 843 с.

11. Принц В. Я. Самоформирующиеся прецизионные 3D-наноструктуры для будущих приборов наноэлектроники и наномеханики // Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. ред. А. Л. Асеев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 85–120.

12. Гутаковский А. К., Латышев А. В., Чувилин А. Л. Структура дефектов и границ раздела в полупроводниковых гетеросистемах. Новосибирск: Параллель, 2016. 261 с.

13. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.

14. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / Отв. ред. С. П. Сеница. Новосибирск: Наука, 2001, 375 с.

15. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. М.: Физматкнига, 2010. 125 с.

16. Katsnelson M. I. Graphene: Carbon in Two Dimensions. N. Y.: Cambridge University Press, 2020. 366 p.

17. Тимофеев В. Б. Возбуждения в двумерных сильно коррелированных электронно-дырочных системах. М.: Изд. дом МЭИ, 2014. 168 с.

18. Валиев К. А., Кокин А. А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 352 с.

19. Щеглов Д. В., Федина Л. И., Латышев А. В. Кремниевая метрология в развитии нанотехнологий. Новосибирск: Параллель, 2018. 184 с.

20. Pasemann M., Pchelykov O. P. Direct observation of the atomic structure of interfaces in the systems Si-SiO₂ and Ge-GeO₂ // J. Crystal Growth. 1982. V. 58. P. 288–289.

21. Maex K., Baklanov M. R., Shamiryan D. et al. Low dielectric constant materials for microelectronics // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. P. 8793–8841.

22. Килби Д. С. Возможное становится реальным: изобретение интегральных схем // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172. № 9. С. 1102–1109.

23. Louber N., Hook T., Montanini P. et al. Stacked nanosheet gate-all-around transistor to enable scaling beyond FinFET // Proc. Symp. on VLSI Technology. 2017. June.

24. Diefendorf K. The Russians are Coming // Microprocessor Report. 1999. V. 13. P. 1–7.

25. Попов В. П., Асеев А. Л., Володин В. П., Марютин В. И. Перспективы применения структур кремний-на-изоляторе в микро-, нано-электронике и микросистемной технике // Микросистемная техника. 2002. Вып. 9. С. 23–29.

26. Наумова О. В., Антонова И. В., Попов В. П. и др. КНИ-нано-транзисторы: перспективы и проблемы реализации // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. Вып. 10. С. 1253–1259.

27. Реутов В. Ф., Ибрагимов Ш. Ш. Способ изготовления тонких пластин кремния: Авторское свидетельство СССР на изобретение № 1282757, 30.12.1983.

28. Bruel M. Patent USA № 5 374 564, 1995.

Благодарности

Благодарю коллег по работе в ИФП СО РАН и НГУ за многолетнее плодотворное сотрудничество. Их фамилии указаны в соответствующих разделах пособия. Выражаю особую благодарность академикам РАН Г. Я. Красникову, А. В. Латышеву, М. П. Федоруку и члену-корреспонденту РАН А. В. Двуреченскому за поддержку при написании пособия и ценные замечания. Благодарю канд. физ.-мат. наук П. В. Гейдта и А. О. Гейдт за помощь при подготовке настоящего учебного пособия.

Учебное издание

Асеев Александр Леонидович

ПОЛУПРОВОДНИКИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Редактор С. В. Исакова
Верстка О. А. Тенекеджи
Обложка Е. В. Неклюдовой

Подписано в печать 26.01.2023 г.
Формат 70х100/16. Уч.-изд. л. Усл. печ. л.
Тираж 150 экз. Заказ №
Издательско-полиграфический центр НГУ.
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2