

Сегодня и завтра наноэлектроники

Ключевые слова: микро- и наноэлектроника, транзистор, фотолитография, молекулярно-лучевая эпитаксия, поверхность кристалла, монокристаллическая ступень.
Key words: micro and nanoelectronics, transistor, photolithography, molecular beam epitaxy, crystal surface, monoatomic step

А. В. ЛАТЫШЕВ

С самого своего рождения микро- и наноэлектроника развивается такими бешеными темпами, как никакая другая отрасль. И все это происходит буквально на наших глазах. К примеру, каждые два года мы в принципе должны выбрасывать свои сотовые телефоны и покупать новые, потому что элементная база реально меняется в два раза. Эту эмпирическую закономерность установил один из основателей корпорации Intel, Г. Мур в середине 1960-х гг. Согласно «закону» Мура, каждые два года число транзисторов на микросхеме удваивается. И этот «закон» до сих пор успешно работает, хотя с 2008 г. темп роста немного замедлился



ЛАТЫШЕВ Александр Васильевич – академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова (Новосибирск). Автор и соавтор 250 научных работ, из них 6 монографий и 9 патентов

© А. В. Латышев, 2019

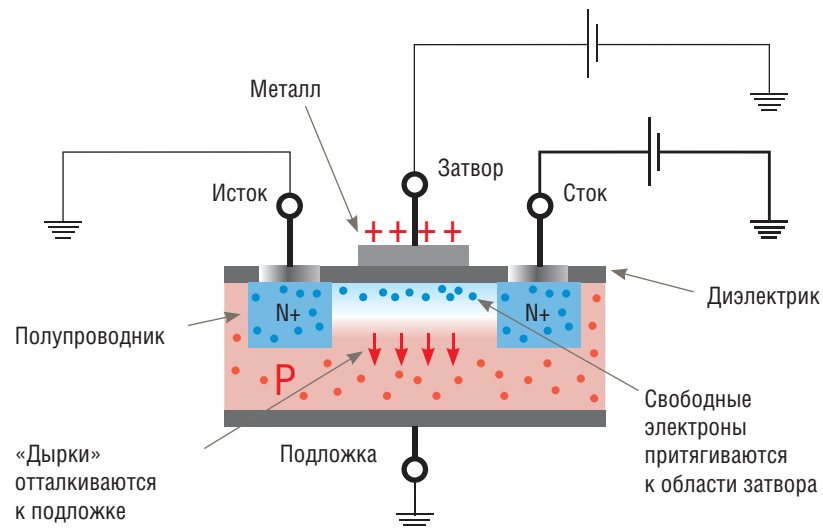
Сейчас количество транзисторов на одном чипе, одной ячейке микросхемы компьютера характерного размера 1 см², достигает несколько десятков миллиардов. Согласно данным официальной статистики, к 2015 г. минимальный размер транзистора по сравнению с 1971 г. уменьшился в 715 раз! Если бы, к примеру, железная дорога развивалась такими темпами, то мы бы сейчас от Москвы до Новосибирска доезжали за 4 минуты.

Все дело в том, что в микроэлектронике скорость процесса связана с геометрическим размером. Если у вас переключается транзистор большого размера, это аналогично тому, что вы заливаете и выливаете воду в бассейн – быстро не получится. А если взять, скажем, капельку, то ее можно «перебрасывать» с гораздо большей частотой. Так и здесь: чем меньше размер транзистора, меньше емкость, тем быстрее идут процессы. И когда размеры уменьшаются в два раза, частота наших процессов возрастает вдвое. Все тот же «закон» Мура.

Работа на будущее

Что позволило добиться таких успехов? В микроэлектронике есть критическая технологическая операция, связанная с задачей уменьшения линейных размеров элементов микросхем. Другими словами, получение структур с настолько малыми размерами, какие мы еще можем нарисовать. Одна из наиболее распространенных технологий «рисования» – *литография*. В полиграфии так называют способ печати, при котором краска с плоской печатной формы (камня) переносится под давлением на гладкую поверхность (бумагу).

Фотолитография в микро- и наноэлектронике – это формирование в специальном чувствительном слое, нанесенном на поверхность подложки, *рельефной маски*



У этого МДП-транзистора с индуцированным каналом N-типа есть только два состояния: открыт – закрыт

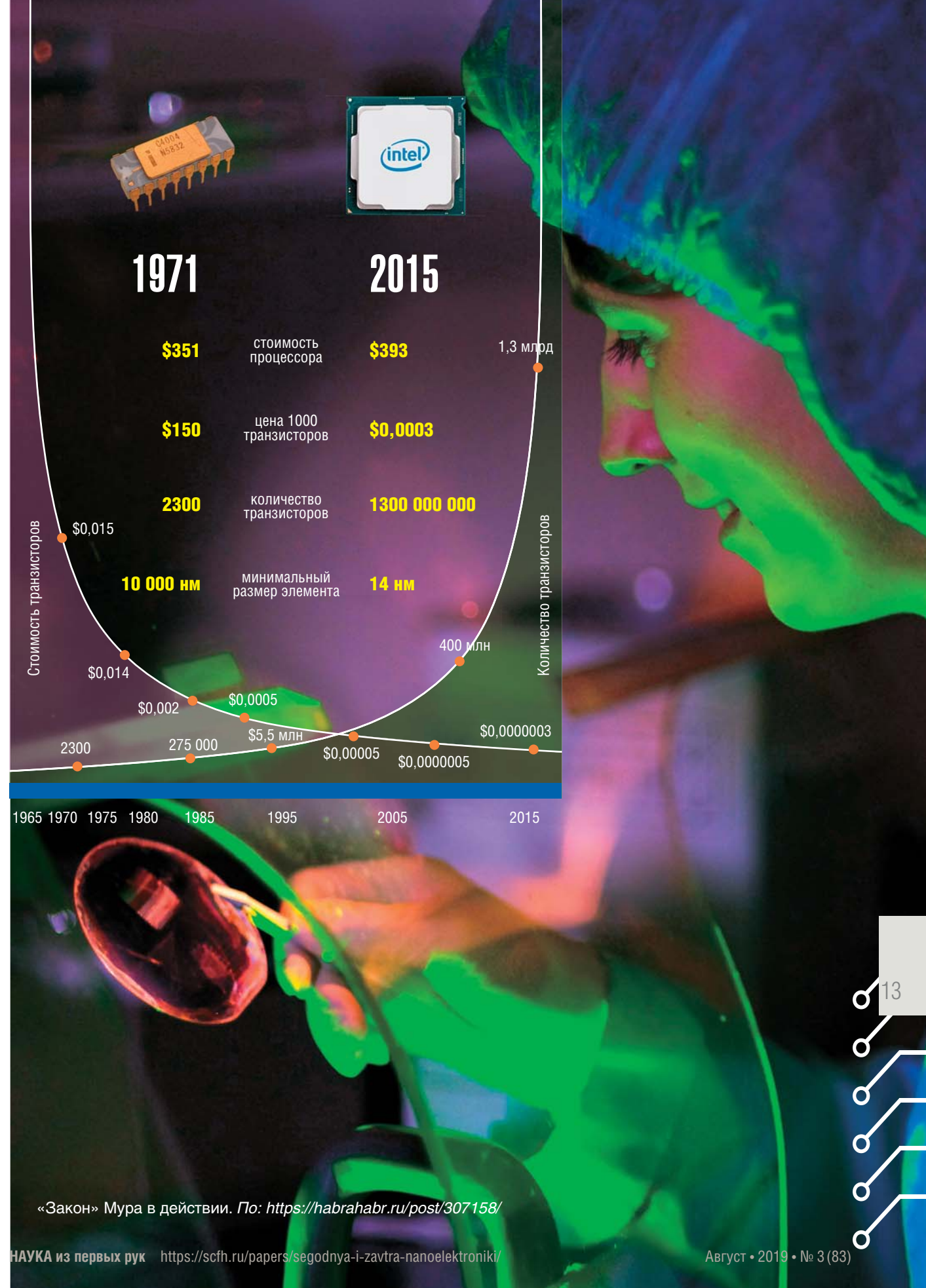
МИР В ДВОИЧНОМ КОДЕ

Все, чем мы сегодня пользуемся, – связь, компьютер, интернет – все это обеспечивает маленькая структура, которая называется транзистор. Биполярный транзистор, полупроводник, стандартная МДП-структура, металл-диэлектрик-полупроводник. У него есть два состояния: когда вы прикладываете напряжение на базу, то он, в зависимости от полярности, то пропускает, то не пропускает ток. Есть ток – нет тока, открыто – закрыто. По сути, это двоичный цифровой код «1–0», который сегодня используют все компьютеры.

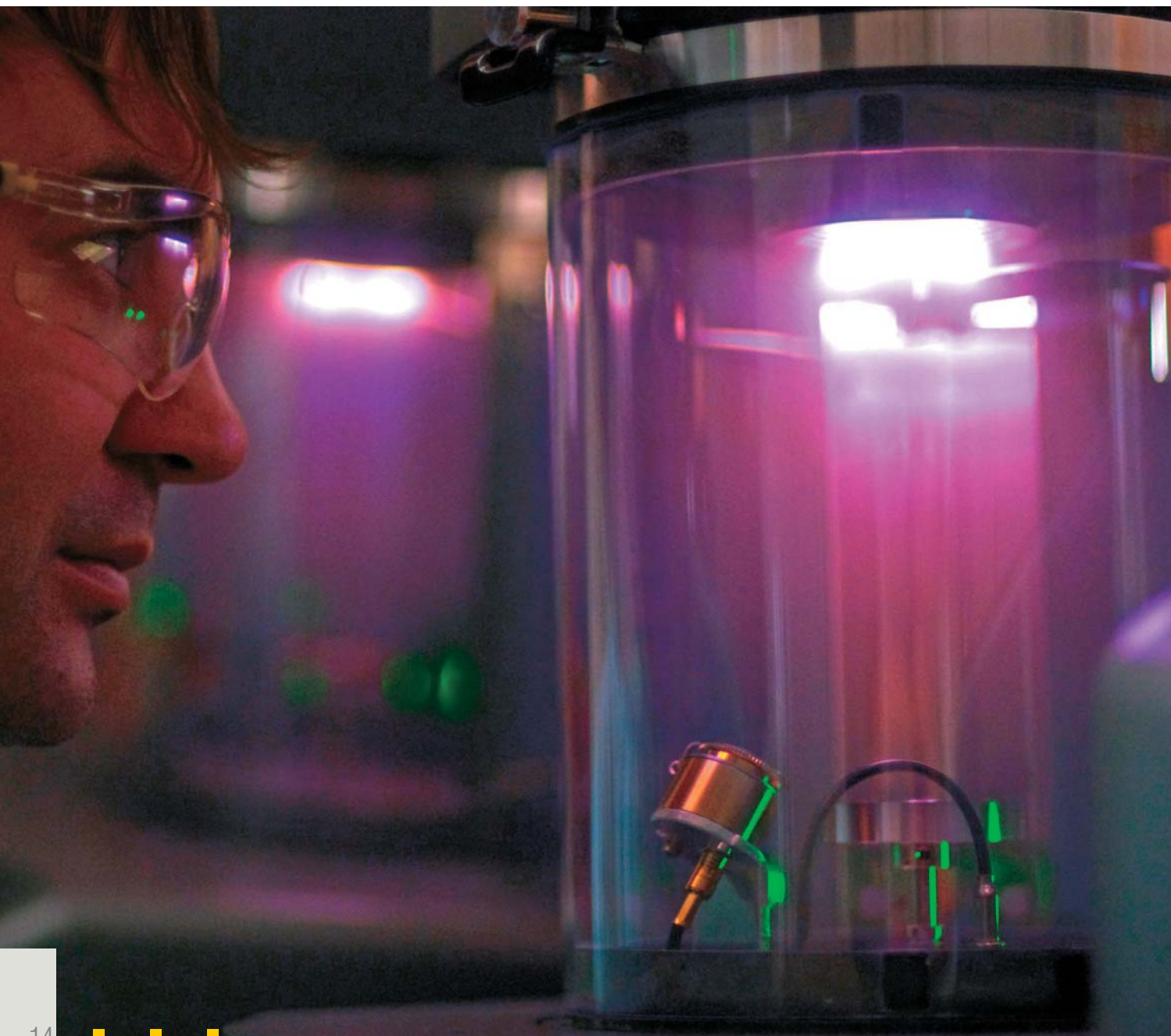
На пластине кремния собирают чип из миллиардов транзисторов, соединенных определенным образом. Когда мы нажимаем клавишу (например, чтобы набрать какую-нибудь букву), один транзистор подает сигнал другим, и они начинают «общаться» на языке «двоичного кода», в результате чего формируется определенная комбинация состояний, которая сохраняется в памяти. Процессы переключения транзисторов увидеть невооруженным глазом нельзя – это сложные разветвленные многоуровневые коммуникации электронных переключателей, которые не видны и в оптический микроскоп. В первой коммерческой микросхеме кроме кремния использовали несколько химических элементов, сейчас – практически вся таблица Менделеева

(рисунка), повторяющего топологию микросхемы. Используется практически тот же процесс, что и при проявке фотографий. Как будто на одну и ту же подложку экспонируют несколько фотопленок, поочередно их проявляют, протравливают, в образовавшиеся окна фотослоя напыляют подходящий материал, затем удаляют неэкспонированный фотослой – так получают микросхему. Только травят уже не в жидкости, а в газах или в плазме. Сейчас этот технологический процесс совершенствуется с огромной скоростью.

Когда однажды мне пришлось общаться с сотрудниками *Intel*, я узнал, что у них в размерном диапазоне уже есть задел на 15 лет вперед! То есть на самом деле они уже сейчас могли бы сделать огромный прорыв в изготовлении микросхем, но тогда у них не было бы «запаса» на будущее. Уже существуют

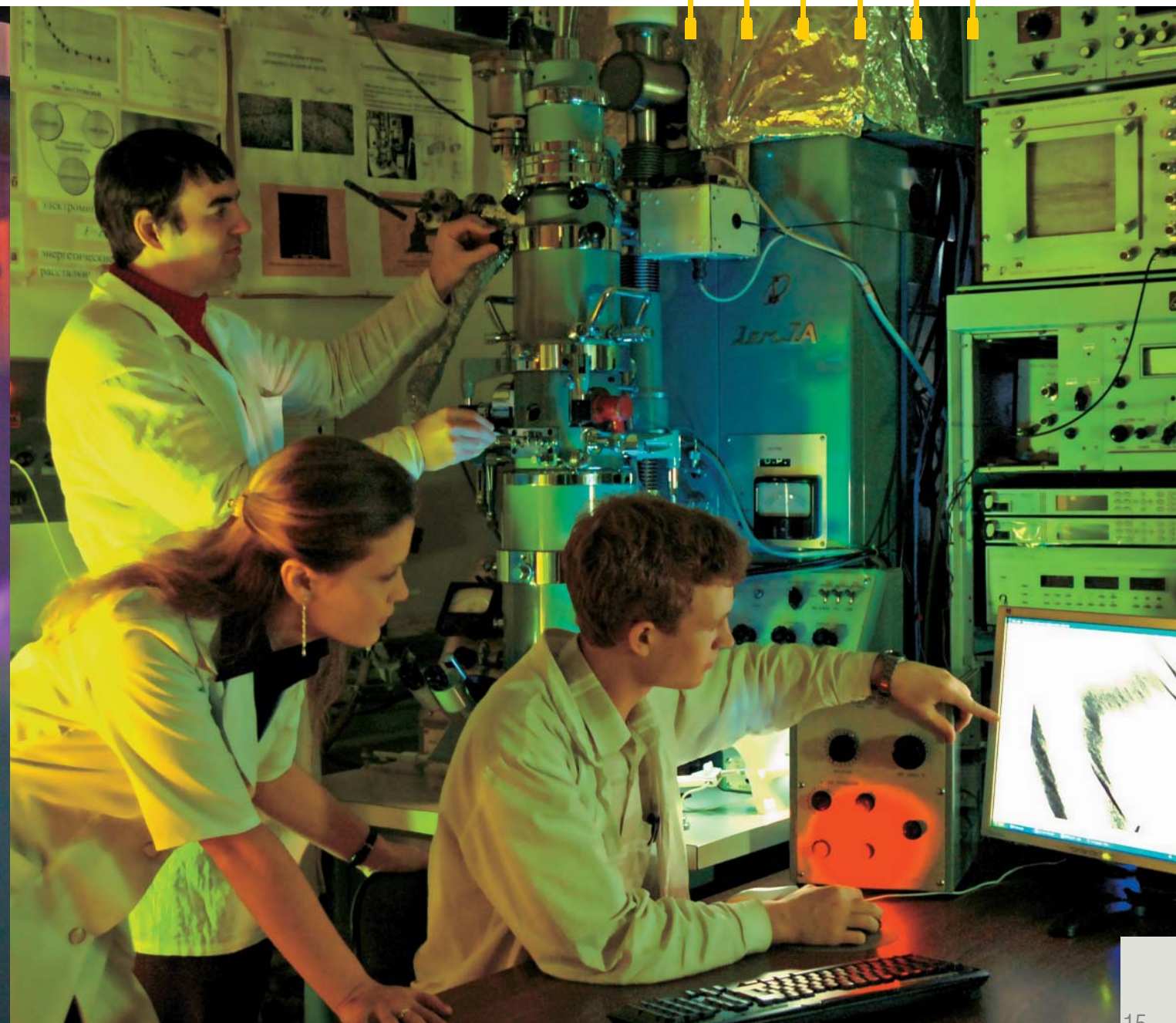


«Закон» Мура в действии. По: <https://habrahabr.ru/post/307158/>



14

В новосибирском Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН проводятся исследования в рамках основных тенденций развития полупроводниковой электроники. К ним относятся работы по уменьшению размера транзисторов и увеличению степени их интеграции, разработка новых материалов на основе гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур и однослойных пленок толщиной в один атомный слой. Активно идет работа по развитию электронной компонентной базы на новых физических принципах. Также проводятся работы, относящиеся к переходу от двумерной к трехмерной схемотехнической архитектуре полупроводниковой электроники



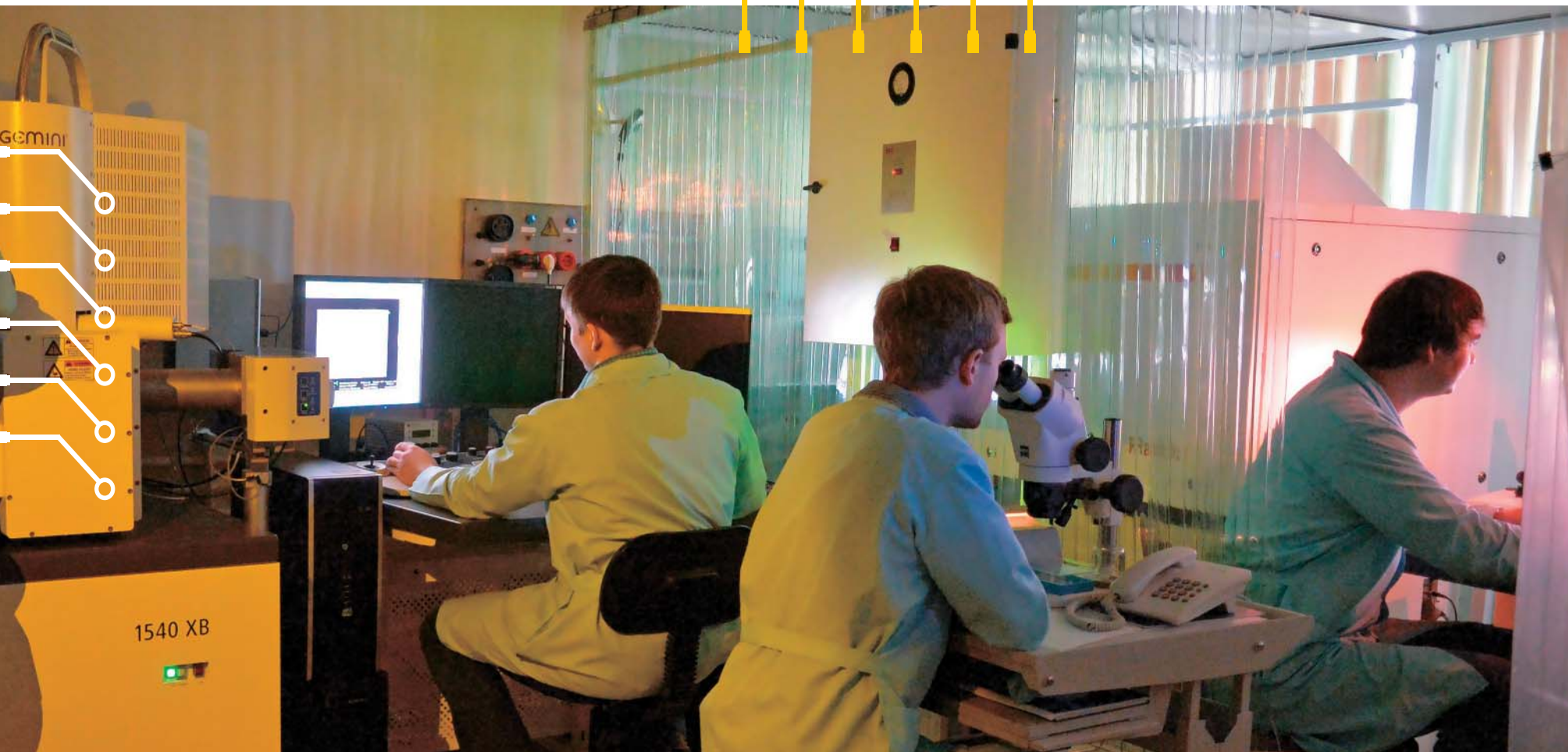
15

коммерческие фабрики, где производят кремниевые элементы размером 5 и 7 нм. В перспективе же идет к размеру одного атома!

Но мы забежали вперед, а на самом деле создание новой микросхемы начинается с ее разработки в дизайн-центре. До производства микросхемы инженеры проектируют будущий компьютер, созданный пока еще на виртуальной микросхеме – стараются работать на опережение. И только после этого начинается само производство, тесты, испытания, исправление ошибок...

Так появляются все новые и новые поколения работающих микросхем.

Человеческий мозг содержит около 200 млрд нервных клеток, которые соединяются друг с другом сотнями триллионов синапсов. Каждый такой синапс содержит около тысячи молекулярных «переключателей», своего рода аналоговых транзисторов. Один человеческий мозг по сложности равен примерно всей современной мировой ИТ-инфраструктуре (Micheva *et al.*, 2010). При сохранении таких темпов развития микроэлектроники



в 2035 г. одна микросхема будет содержать уже триллион транзисторов. И если так пойдет дальше, а я не вижу причин для остановки, то искусственный интеллект вполне может стать реальностью...

Единственное, в чем микросхемы пока точно проигрывают человеку, это в электропитании. С точки зрения потребления энергии мы намного более экономичны. Если создать искусственный мозг наподобие человеческого, то на его поддержание потребуются гигаватты энергии. Понадобятся атомные электростанции, которые будут работать всего лишь на один искусственный мозг, эквивалентный мозгу одного человека. Поэтому сейчас в этой области очень остро стоит задача уменьшения энергопотребления.

Да будет синий!

Разработки в области физики полупроводников позволили не только развить современную элементную базу информационных технологий, но и совершить прорыв в области энергосбережения, решив глобальную задачу – освещения.

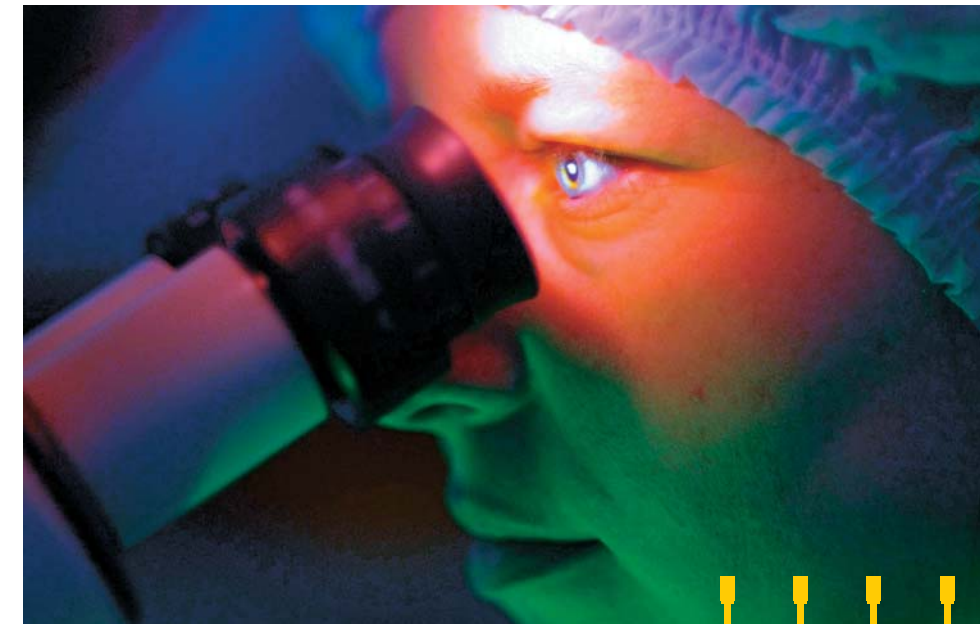
Самый простой способ получить свет – это разжечь костер. Много света, но и много тепла. Потом придумали электрическую лампочку с вольфрамовой спиралью в вакууме, накаливая до высокой температуры. Получили свет и вновь – тепло. Снова колоссальные потери энергии. Затем придумали энергосберегающие лампы с ртутьсодержащими элементами. Благодаря электрическому разряду в парах ртути возникает низкотемпературная плазма, которая преобразуется в ультрафиолетовое излучение. А люминофор, покрывающий внутреннюю поверхность трубки, преобразует его уже в видимый свет. У этих ламп до 75% энергии излучается в виде света. Это большой плюс, но есть и минусы. Например, мерцание.

Человеческая мысль не стояла на месте – появились светодиодные лампы. Полупроводниковый диод в принципе не нагревается. Нагрев – паразитное явление, связанное с тем, что мы не умеем делать хорошие полупроводники, в первую очередь это относится к границам раздела полупроводника. Но даже с учетом этой проблемы полупроводниковые элементы нагреваются много меньше, чем элементы других ламп.

Проведение электронно-микроскопических и литографических работ в ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН

Как известно, в полупроводниках есть два типа носителей противоположного заряда: p – «дырки» (положительного), n – электроны (отрицательного). Когда, приложив напряжение, мы создаем p-n-переход, то дырки пойдут в одну сторону, электроны – в другую. На границе раздела они могут встречаться и аннигилировать. При этом свет может выделяться, а может и нет. Рекомбинация может быть как излучательной, так и безызлучательной. И во втором случае вы ничего не увидите.

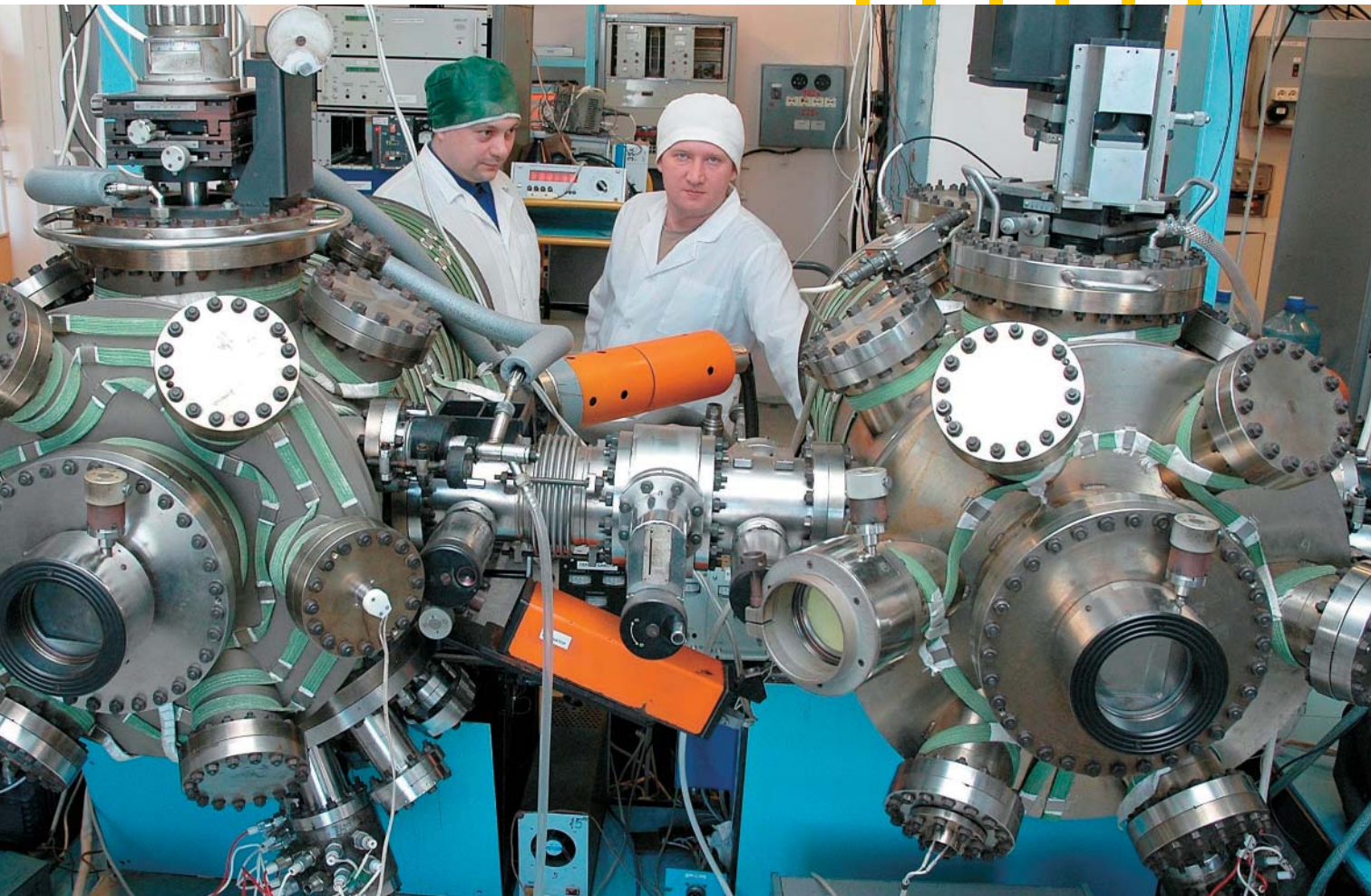
Чтобы появился свет, надо, чтобы у полупроводника была такая ширина запрещенной зоны, чтобы образовавшиеся фотоны имели длину волны, видимую глазу. Проблема в том, что такие материалы слишком дороги,



либо для них имеются еще какие-то ограничения, например, квантовая эффективность, внутренняя и внешняя. Внутренняя – это сколько фотонов появилось при аннигиляции одной пары на границе раздела. При этом эту границу нужно еще «дотащить» до края полупроводника, чтобы все засветилось, а дополнительные потери понизят эффективность. Если же в материале окажутся какие-то ненужные примеси или структурные дефекты, то вместо того, чтобы «делать свет», электронно-дырочные пары будут релаксировать другим способом.

В общем, все дело в материале полупроводника, который нужно тщательно подбирать. Именно в этом и была проблема создания синего светодиода. С красным светодиодом, а потом и с зеленым справились достаточно быстро, а вот синим занимались многие ученые, но безуспешно. Известные американские фирмы вложили в его разработку миллиарды долларов, но эти проекты были закрыты ввиду отсутствия результатов. Хироси Амано вспоминал, что, когда он в первый раз читал свой доклад о синем светодиоде, в зале было очень мало людей. Многие участники конференции просто не пришли, посчитав тему доклада бесперспективной.

Но японские ученые Исаму Акасаки, Хироси Амано и Сюдзи Накамура со всей присущей им настойчивостью продолжали внимательно и тщательно работать и, в конце концов, обнаружили ряд интересных явлений, способствующих созданию голубого светодиода.



связаны с развитием технологии *молекулярно-лучевой эпитаксии* (МЛЭ) – одной из основных в современной физике полупроводников и полупроводниковой электронике. МЛЭ представляет собой процесс послойного, контролируемого *эпитаксиального роста* различных соединений на уровне одного монослоя. Резкие границы раздела создаются за счет низкой скорости роста и резкого изменения потоков в условиях атомарной чистоты материалов в сверхвысоком вакууме.

Развитие современных МЛЭ нанотехнологий открыло возможности конструирования методами зонной инженерии и инженерии наноструктур с электронным спектром и свойствами, определяемыми квантово-механической природой элементарных

Установка для молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ – напыление различных материалов на плоские подложки в условиях сверхвысокого вакуума) была изготовлена и работает в ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН

возбуждений в твердом теле. Использование квантовых эффектов в полупроводниковых системах пониженной размерности – это принципиальная основа для повышения на несколько порядков степени интеграции, увеличения быстродействия и уменьшения потребляемой мощности полупроводниковых устройств в электронике нового поколения.

Все это – самые передовые полупроводниковые технологии создания низкоразмерных систем, но при этом и самые дорогостоящие. Японцы же ориентировались в первую очередь на промышленность, поэтому базировались на доступных, не требующих больших вложений методах. Поэтому их прорывной результат в виде «голубого луча» светодиода сразу же нашел широкое применение на практике.

Когда синий светодиод стал реальностью, он совершил революцию. Появились матричные дисплеи разных конструкций, в которых использованы все три светодиода. Они могут стоять рядом – все равно наш глаз этого не различит. Нам будет казаться, что светится

По словам Аmano, помогла и случайность. Обычно исследователи работали по стандартному алгоритму: выращивали нитрид-галлиевую структуру, создавали контакты, подавали напряжение, проводили измерения, а потом несли образец на электронную микроскопию, чтобы посмотреть, какая структура получилась. Но однажды в обычном порядке работы произошел сбой: образец сначала просмотрели на электронном микроскопе и лишь потом провели измерения. И обнаружили колоссальное усиление *люминесценции* (светимости) структур. Только через некоторое время они поняли, что причиной стало воздействие электронного пучка. И действительно, они нашли опубликованные работы, где сообщалось, что люминесценция некоторых материалов, подвергнутых подобной бомбардировке электронами, становилась ярче.

Используя этот эффект, удалось создать новую генерацию полупроводниковых структур, которые были более эффективны, хотя сначала и ненамного. Они пошли дальше. Традиционно для таких материалов в качестве легирующей примеси использовался цинк

и селен, но Аmano предложил применить магний, и голубой диод стал работать гораздо лучше.

Однако технология воздействия электронным пучком была далека от идеальной, особенно с точки зрения промышленного производства. К тому же облучение высокоэнергетическим потоком электронов приводило к появлению радиационных дефектов, которые ухудшали свойства фотодиода. В результате японцы создали установку эпитаксиального роста многослойных нитрид-галлиевых структур, основанную на промышленной *МОС-гидридной эпитаксии* – химическом осаждении металлоорганических соединений. В этой установке, на создание которой группа Аmano потратила много сил, полупроводниковые структуры выращивались в газовой среде, а вместо облучения использовался термический отжиг.

В нашем Институте физики полупроводников мы разрабатываем методы получения наноструктур с принципиально новыми возможностями для нано- и оптоэлектроники, средств связи, информационных технологий, измерительной техники и пр. Эти работы





Нобелевский лауреат Х. Аmano
в ИФП СО РАН. 2019 г.

При прогреве постоянным током до температуры сублимации кремния система атомных ступеней на поверхности Si(111) (справа, а) быстро трансформируется в кластеры – эшелон ступеней, которые на ОЭМ-изображении появляются в виде широких темных полос (б). Это изменение морфологии поверхности обратимо путем смены направления электрического тока, пропускаемого через образец

Точка пересечения

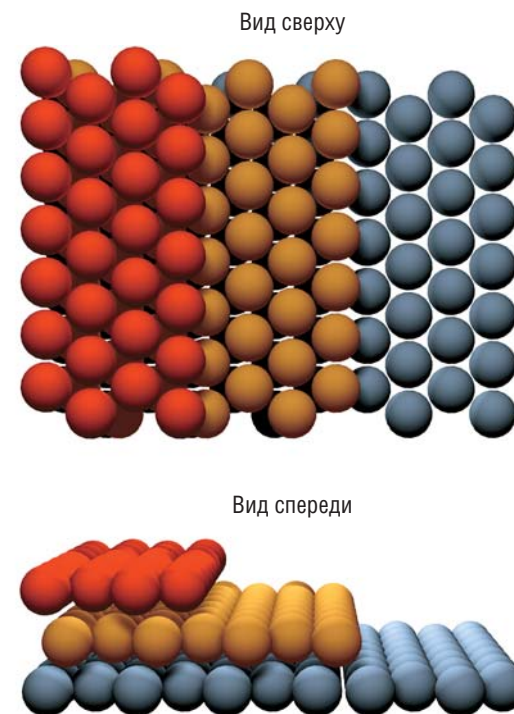
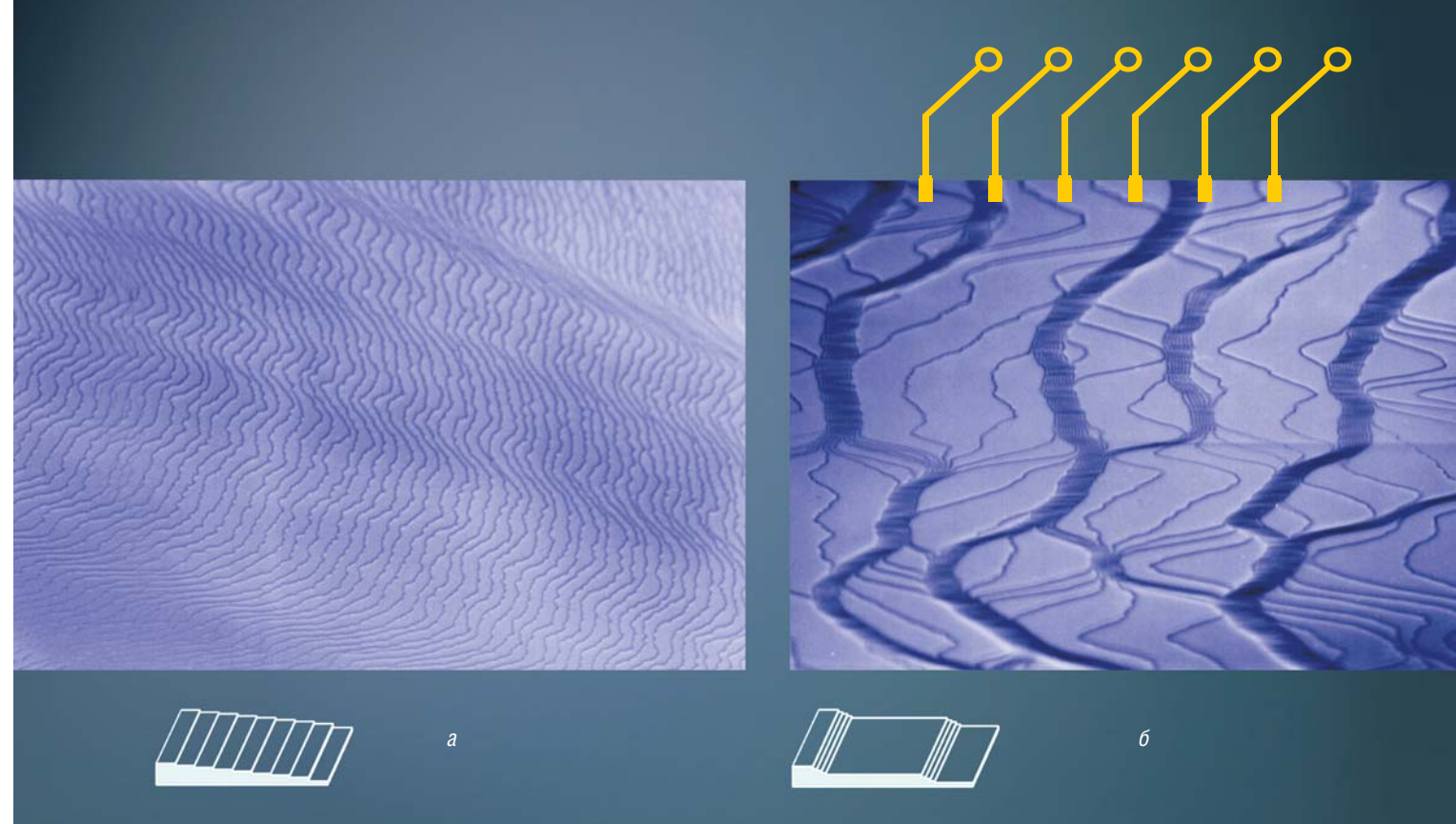
С Хироши Аmano я познакомился в 2015 г., когда в качестве почетного гостя Международного форума технологического развития «Технопром» он посетил наш институт, где провел целый день. Тогда-то мы и выяснили, что в далекие 1990-е мы могли «пересечься» в Японии.

В те годы я принимал участие в крупном мегапроекте под руководством профессора К. Яги из Токийского технологического университета, посвященном изучению поверхности и границ раздела полупроводниковых гетероструктур. В проекте принимали участие несколько университетов, в том числе и Национальный университет Нагои, где работал Аmano. В рамках проекта проходило много научных мероприятий, и, возможно, на каком-то из них мы могли повстречаться...

В Японию же я приехал потому, что в то время там работала группа, которая занималась исследованием процессов на поверхности полупроводника. И они очень заинтересовались *эффектом эшелонирования атомных ступеней*, который мы тогда открыли. Нас с Аmano объединяет то, что мы оба хорошо понимаем, как важно все, что происходит на поверхности полупроводника во время его роста. Увидеть и проконтролировать эти процессы на атомном уровне гораздо легче в вакууме, а не в газовой фазе, где их трудно изучать детально. Конечно, есть еще моделирование, но в любом случае в этом направлении мы продвинулись дальше, чем наши японские коллеги. И когда Аmano впервые посетил наш институт, то был потрясен, увидев то, что мы делаем.

Фокус совместных интересов нашего института и организации, которую представляет Аmano, – низкоразмерные системы, двумерный электронный газ и т. д. Это область, в которой мы работаем и которая пересекается с областью научных интересов Аmano и его коллег. Нас же привлекает промышленная ориентированность исследований японских ученых. У нас в стране подобной тематикой занимается ограниченное число научных групп. И, за исключением нашего института, это, как правило, фундаментальные исследования, не имеющие никакого отношения к практике, – так легче добиться результата.

одна точка, и в зависимости от пропорции красного, синего и зеленого мы увидим разные цвета. Сейчас, если научиться печатать подобные структуры дешево, как на бумаге, можно даже выпускать газету, которая будет чуть-чуть светиться.



Атомные ступени на поверхности кремния формируются за счет выхода плотно упакованных атомами плоскостей кристаллической решетки. Вверху – схематическое изображение различных видов встраивания атомов в ступень при их осаждении на поверхность

ЭФФЕКТ ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ АТОМНЫХ СТУПЕНЕЙ

В кристалле все атомы строго упорядочены в виде трехмерной решетки в соответствии с типом химической связи. В простейшем случае такая решетка состоит из элементарных «кубиков», в углах и на гранях которых располагаются атомы. Теоретически кристалл можно разрезать так, чтобы получить в результате идеальную атомно-гладкую поверхность. Но реальная поверхность разрезанного кристалла будет состоять из кусочков атомно-гладких участков поверхности, разделенных атомными ступенями. Такая структура появляется за счет выхода на поверхность плоскостей кристаллической решетки, в которых повышена плотность атомов. В случае кремния расстояние между ступенями близко к размерам самого атома, поэтому ступени и называют «атомными».

При прогреве постоянным током до температур сублимации система атомных ступеней на чистой поверхности кремния становится нестабильной (Латышев, Асеев и др., 1988; Латышев, Красильников и др., 1988; Lатышев *et al.*, 1989; 1991; 1994). При определенных условиях она очень быстро трансформируется в кластеры ступеней, или эшелон по аналогии с железнодорожным составом. Это состояние обратимо.

Позже стало ясно, что возникновение подобного нанорельефа является общим проявлением процесса самоорганизации поверхности, поскольку наблюдается в самых разных условиях: при эпитаксии, росте кристаллов и даже внутри твердого тела при твердофазной кристаллизации. А поскольку физические свойства объектов с размерами от 1–100 нм могут фантастически отличаться от их макроаналогов, это явление может быть использовано для создания приборов и устройств, работающих на других физических принципах. По: (Латышев, Федина, 2015)



Аmano руководит своим центром, где сейчас проводятся исследования с *нитрид-галлиевыми* гетероструктурами, которыми мы тоже занимаемся. Вырастить подобные кристаллы очень трудно – требуются громадные давления, чуть ли не 30 атмосфер. Но можно выращивать их тонким монокристаллическим слоем с помощью эпитаксиальных методов, о которых говорилось выше и которыми мы хорошо владеем. Пока у японцев результаты не слишком впечатляющие, но они понимают, что их можно улучшить за счет применения методов молекулярно-лучевой эпитаксии.

Сам Аmano сейчас отходит от классических светодиодов – его больше интересует область их практического применения. Например, в ультрафиолетовых облучателях для воды. Для Японии это очень актуальная проблема, так как пресной воды там мало, а благодаря потеплению климата обострилась проблема бактериального загрязнения воды. Требуется постоянное обеззараживание, а пока самый простой, доступный и не очень приятный способ – обыкновенная хлорка.

Еще один интерес – беспроводное энергоснабжение с помощью микроволнового излучения, например,

Профессор Х. Аmano вместе с российским коллегой, академиком А. В. Латышевым, директором ИФП СО РАН. Слева – К. Аmano, супруга проф. Аmano

на основе все тех же нитрид-галлиевых гетероструктур. Предполагается, что с помощью СВЧ мы сможем подзаряжать суперконденсаторы в наших мобильных устройствах. Ведь если из современного телефона вытащить аккумулятор, сколько он будет весить? Основной вес наших сотовых телефонов приходится на батарею и защитное стекло. Ведь, благодаря успехам полупроводниковой электроники, самое главное в них – микросхема – практически ничего не весит...

Заканчивая визит в научную столицу Сибири, Хироси Аmano увез пакет конкретных предложений о взаимовыгодном сотрудничестве с новосибирскими учеными. Его основные пункты были прописаны еще в прошлом году в меморандуме, заключенном между Нагойским университетом и Институтом физики полупроводников СО РАН. Они касаются наших работ по низкоразмерным системам на основе

материалов АЗВ5, А2В6 и четвертой группы (германий, кремний), а также исследований атомных процессов на поверхности и границах раздела полупроводников и анализа дефектов в эпитаксиальных структурах.

Также была заключена договоренность об обмене студентами по программам мобильности между Новосибирским государственным университетом и Нагойским университетом. Это очень важно, так как эволюция научных школ невозможна без движения и даже турбулентии. Это понимаем мы, это понимает «мастер» светодиодов Аmano. Сам он сейчас ищет пути сделать свой светодиод многократно мощнее, чтобы многократно расширить его возможности приносить пользу человечеству.

Литература

Асеев А.Л. *Нанотехнологии: вчера, сегодня, завтра* // НАУКА из первых рук. 2008. Т. 23. № 5. С. 24–41.

Латышев А.В., Асеев А.Л. *Моноатомные ступени на поверхности кремния*. Новосибирск: издательство СО РАН, 2006. 242 с.

Латышев А.В., Фелина Л.И. *Прогулка по атомным ступеням, или Как перейти от фундаментальных исследований на поверхности к измерениям в мире нано* // НАУКА из первых рук. 2015. Т. 60. № 6. С. 48–59.

Latyshev A. V., Aseev A. L., Krasilnikov A. B., Stenin S. I. *Transformations on clean Si(111) stepped surface during sublimation* // Surf. Sci. 1989. V. 213. N. 1. P. 157–169.

В публикации использованы фото С. Зеленского, Д. Щеглова, В. Яковлева и Р. Мельгунова

