

С. П. КОСТЕНКО

Украина, г. Одесса, Гос. академия холода

Дата поступления в редакцию
10.09 1998 г. — 27.01 1999 г.

Оппонент д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН

ТЕНДЕНЦИИ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ КАК ПЕРСПЕКТИВА ПОЯВЛЕНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Свойства исходных материалов → технологическое воздействие → новые структуры с уникальными свойствами → новые электронные компоненты.

The properties of initial materials → engineering action → new structures with unique properties → new electronical components

По данным Госкомстата Украины, опережающими темпами развивается телефонизация страны. Вводятся в эксплуатацию новые телефонные станции импортного и отечественного производства. И те, и другие выполнены на зарубежных электронных компонентах, и все большее значение приобретает оценка перспективности тех или иных компонентов, изготовленных на конкретных материалах по тем или иным технологиям. С другой стороны, появление новых материалов и технологий делают возможным создание новых компонентов и — на их базе — аппаратуры с новыми возможностями.

Мировой рынок электроники 1998 года представлен на **рис. 1** [1]. Такие сегменты рынка как, например, телекоммуникации, коммуникации и радары составляют соответственно 8 и 10,7% от общего мирового рынка электроники. За последнее десятилетие в западных странах интенсивно развиваются цифровые сети с комплексными услугами стандарта ISDN (Integrated services digital network). Первая реализация широкополосной сети ISDN относится к началу 1990-х годов. Но прежде изготовителям оборудования предстояло принять ряд важнейших решений. Им пришлось выбирать электронные компоненты из огромного разнообразия микросхем, предлагаемых различными фирмами-изготовителями [2, 3 и др.]. Эта проблема до сих пор не снята с повестки дня.

Появление цифровой сети связи создает для изготовителей полупроводниковых приборов и микросхем новые рынки сбыта. Но, кроме того, цифровые сети предполагают наличие большого числа компьютеров, терминалов для передачи данных по всему миру. Это также гарантирует увеличение рынка интегральных микросхем и других электронных

и иных компонентов. И хотя основным материалом для изготовления электронных компонентов остается кремний, разработчики систем давно уже [4, 5] полагают, что арсенид галлия перестанет быть материалом только военного назначения. Следует сказать, что для названных целей арсенид галлия — не единственный материал. В этой группе находится и фосфид индия, т. е. материалы группы A^3B^5 и твердые растворы на их основе. «Забытый» разработчиками

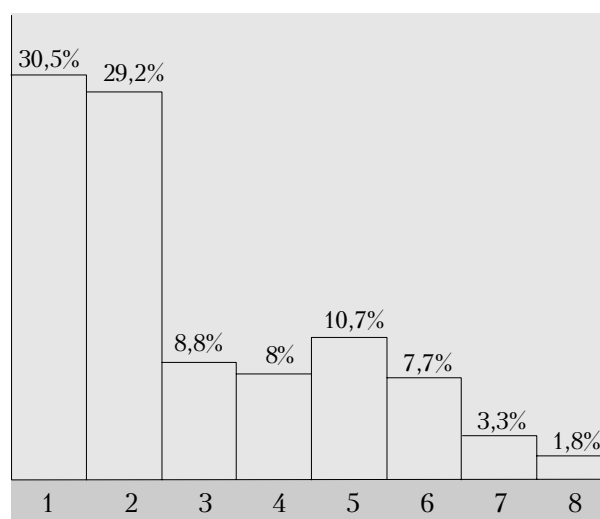


Рис. 1. Мировой рынок электроники:

1 — электронная обработка данных; 2 — компоненты; 3 — бытовая электроника; 4 — телекоммуникации; 5 — коммуникации и радары; 6 — контроль и измерения; 7 — медицинская и промышленная электроника; 8 — офисное оборудование

германий вновь оказался перспективным, но уже в виде твердых растворов, например, $Si_{1-x}Ge_x$ [6].

Кстати, возвращение материала в новом структурном качестве в перечень перспективных — одна из основных тенденций в современном материаловедении. Ранее считалось, что кремний не является излучающим материалом. Однако в Ноттингеме (Великобритания) в 1990 г. на конференции ESSDERC'90 одним из разработчиков [7] были продемонстрированы пластины кремния, светящегося в видимой области спектра.

Еще одной современной тенденцией является интенсивный синтез композитных материалов [8], полимеров, сверхпроводящих органических материалов для молекулярной электроники и биоэлектроники [9].

Революцию в электронике произвела цифровая техника, но окружающий нас мир является аналоговым. Изменения в окружающей среде (температура, давление, скорость потоков сред, концентрация газовых компонентов и т. д.) являются аналоговыми и неэлектрическими. Тем не менее их необходимо контролировать, преобразовывать в управляющие электрические сигналы, и все большее значение приобретают датчики, играющие роль посредников между аналоговыми субъектами и субъектами цифровыми. Поэтому еще одной тенденцией в современном приборостроении является применение технологий интегральной микроэлектроники (и, соответственно, материалов) в производстве датчиков.

И, наконец, одной из глобальных тенденций создания новых материалов и структур является непрерывное движение «вниз по шкале размерностей» [10].

ПРЕДЕЛ, СТРЕМЯЩИЙСЯ К НУЛЮ

За последнее десятилетие оборудование и технология наблюдения и манипулирования веществом достигли атомного уровня. В апреле 1990 года сотрудники корпорации IBM (Сан-Хосе, Калифорния), используя растровый туннельный микроскоп, сфор-



Рис. 2. Аббревиатура названия фирмы на поверхности кремниевой пластины (димеры атомов расположены с промежутками 7,7 Å)

мировали на поверхности название своей компании из атомов ксенона. В 1996 г. сканирующий туннельный микроскоп использовался для «написания» на атомарном уровне аббревиатуры Office of Naval Research University Research Initiative (рис. 2) на поверхности кремниевой пластины ориентации (100), пассивированной водородом посредством электронно-стимулированной десорбции атомов водорода [11].

Используя метод молекулярно-лучевой эпитаксии [12], можно выращивать слои любой толщины, вплоть до моноатомных, с заданным химическим составом и концентрацией примесей. Этот метод в основном используется для выращивания различных многослойных и периодических структур типа квантовых сверхрешеток. Удерживаемые в этих слоях за счет изменения ширины запрещенной зоны электроны теряют одну степень свободы: толщина слоев сверхрешеток — несколько моно-

атомных слоев (10–20 Å). Узкая полоса, «вырезанная» из такой плоскости, становится одномерным проводом. Сведение к минимуму длины такого одномерного провода приводит к появлению нульмерной точки.

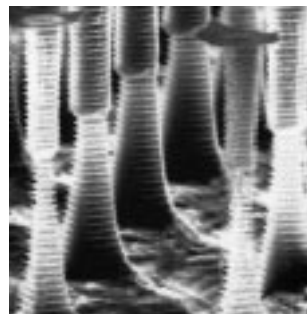


Рис. 3. Микролазеры, изготовленные методом ионного травления сверхрешеток [13]

Разработчики телекоммуникационных сетей требуют от производителей электронных компонентов все более эффективные лазеры для перекачки информации. На рис. 3 представлена микрофотография миниатюрных лазеров, излучающих с поверхности столбиков диаметром 1 мкм, высотой ~6 мкм. Лазеры изготовлены фирмой Bell Communications Research (Ред-Бэнке, Нью-Джерси) путем вытравливания столбиков ионными пучками на пластине со сверхрешетками. Материалы слоев для сверхрешеток: арсенид алюминия и арсенид галлия, арсенид алюминия — галлия, селенид и теллурид цинка.

Лазеры состоят более чем из 30 слоев арсенида алюминия, арсенида галлия. Слои выполняют функцию зеркал, отражающих «свет» квантовой ямы, которая расположена посередине. В верхней части столбиков должны быть сформированы электрические контакты. Пучок света испускается через прозрачную подложку в основании столбиков.

Структуры с подобными свойствами, сформированные травлением на кремнии, обеспечивают излучательную способность кремния в видимой области спектра. Травлением создаются микропоры в поверхностном слое, за счет чего и реализуются квантовые ямы.

В последнее время появилось новое научное направление — *термоионика*. На основе полупроводниковых материалов, например A^4B^6 , формируются сверхрешетки, представляющие собой системы охлаждения (например для микролазеров) [14].

Нульмерные или квантовые точки можно реализовать также в виде скопления атомов — кластеров. Кластеры разных размеров имеют физические свойства, отличающиеся от свойств объемных тел. Например, они обладают повышенной твердостью, способностью поглощать и излучать свет определенных частот, сорбировать газовые молекулы определенного сорта (т. е. избирательной сорбционной способностью) и т. д.

Существуют различные способы получения кластеров. В наших исследованиях мы получали кластеры

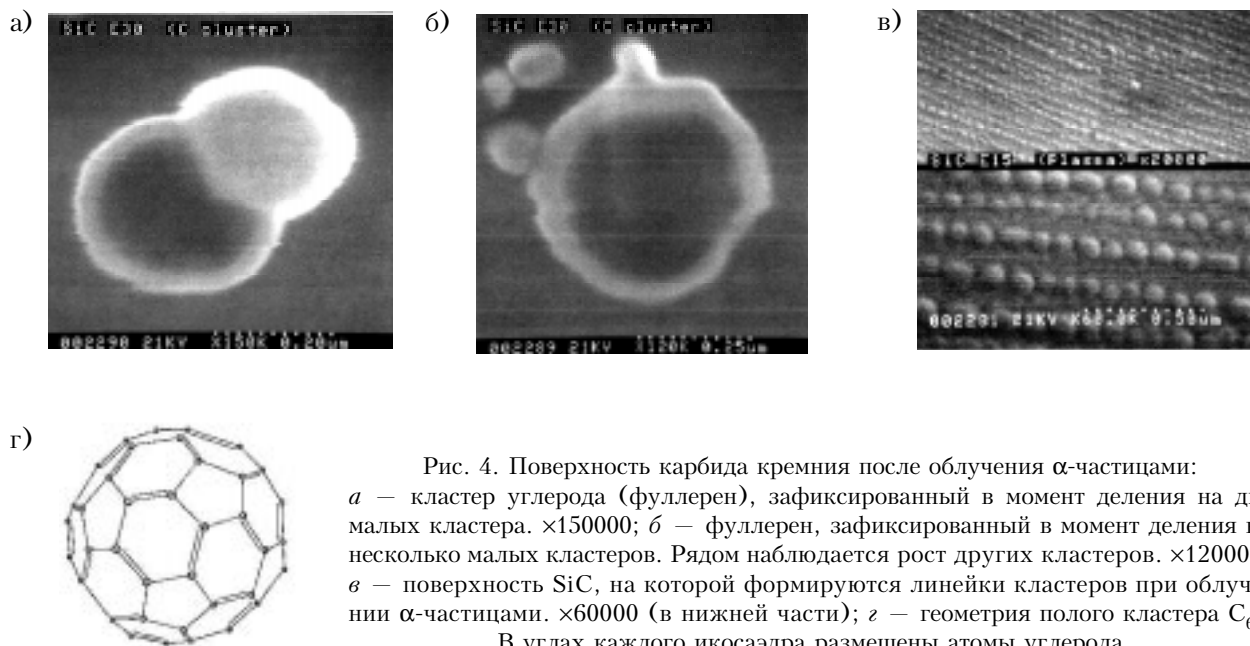


Рис. 4. Поверхность карбида кремния после облучения α -частицами: *a* — кластер углерода (фуллерен), зафиксированный в момент деления на два малых кластера. $\times 150000$; *б* — фуллерен, зафиксированный в момент деления на несколько малых кластеров. Рядом наблюдается рост других кластеров. $\times 120000$; *в* — поверхность SiC, на которой формируются линейки кластеров при облучении α -частицами. $\times 60000$ (в нижней части); *г* — геометрия полога кластера C_{60} . В углах каждого икосаэдра размещены атомы углерода

посредством создания предпосылок для самоформирования таких систем. Главным условием для начала самоформирования кластеров на поверхности твердого тела является задание доминанты взаимодействия между ближним окружением. В качестве доминанты взаимодействия выбирали зарядовое взаимодействие. Технически это можно осуществить за счет облучения поверхности частицами пренебрежимо малых размеров и большого положительного заряда. Такими частицами были α -частицы из источника ^{238}Pu , в котором исключен вылет иных продуктов радиоактивного распада, кроме α -частиц.

На рис. 4 представлены полученные автором микрофотографии поверхности карбида кремния, на которой после облучения α -частицами сформировались кластеры различных размеров, именуемые фуллеренами.

Если внутри таких кластеров поместить ионы металлов, например, калия, натрия, рубидия, то данные структуры окажутся сверхпроводящими. Слои таких кластеров, допированных атомами щелочных металлов, наращивали на подложки арсенида галлия в университете штата Миннесота. Такие структуры позволяют реализовать полевые транзисторы со сверхпроводящими электродами.

Аналогичным способом (воздействием α -частиц) нами были получены кластеры металлического галлия на CdGa_2Se_4 , кластеры Pd на поверхности бинарной системы $\text{Ag}_x\text{Pd}_{1-x}$ [15,16].

Данные кластеры обладают избирательной сорбционной способностью, что делает их весьма привлекательными для использования в качестве чувствительных слоев химических датчиков.

Как видно из микрофотографий, размеры кластеров отличаются друг от друга. Естественно, и их свойства также различны. Это обстоятельство является существенным препятствием на пути их прак-

тического применения. Отклонения слишком велики для электронных или оптических устройств, чувствительных элементов датчиков, где требуются группы идентичных кластеров. Как сказал сотрудник Bell Laboratories Майкл Стейгеруолд по вопросу решения этой проблемы, «Есть множество способов, о которых можно мечтать, но нам потребуется дополнительное вдохновение». Нашим ученым потребуется еще дополнительное оборудование и финансирование...

Еще одним перспективным направлением в материаловедении является *изотопическая инженерия* [17, 18], также позволяющая изготавливать сверхрешетки и нульмерные точки. В этих работах предлагается концепция построения электронных устройств для оптоэлектроники, микроэлектроники на основе создания изотопических по отношению к атомам основной матрицы локальных областей, содержащих изотопы атомов. Например, используя несколько сверхтонких слоев SiO_2 , но с разными изотопами $^{28}\text{Si}^{16}\text{O}_2$ и $^{30}\text{Si}^{18}\text{O}_2$, можно получить оптический микропровод с полным внутренним отражением. Для удержания изотопов внутри квантовой ямы требуются (по расчетам автора [18]) минимум 5 нм, т. е. размер, сопоставимый с квантовой точкой. Автор не указывает на технологию, позволяющую реализовать данную идею. По-видимому, есть несколько вариантов, из которых наиболее очевидны два: разделять изотопы с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии либо создавать локальные изотопические участки посредством нейтронного легирования.

Одна из современных тенденций в материаловедении — применение радиационных методов для синтеза новых материалов. Одновременно следует упомянуть о лазерных и плазменных технологиях,

характеризующих тенденции развития рассматриваемого направления.

БУДЕТ ЛИ ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАТЬСЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА?

Со времени открытия радиоактивности данное явление использовалось для исследований структуры и свойств материалов. (Другим направлением продолжает оставаться исследование самого явления радиоактивности, но это относится к области физических задач, а не технологических.)

В течение последних 20 лет физиков многих стран мира привлекала проблема получения сверхтяжелых элементов [19]. В результате этих исследований были изменены многие представления о принципах синтеза сверхтяжелых элементов, которые могут быть экстраполированы и на другие группы атомов. Например, было установлено, что стабильность новых элементов обусловлена, прежде всего, микроструктурой их протонных и нейтронных систем, а не макроскопическими свойствами, определяющими стабильность более легких ядер. Последним этапом в развитии нуклеосинтеза стал метод «холодного слияния» ядер, в котором массы частиц и энергия бомбардировки должны быть тщательно определены, чтобы возбуждение вновь образующихся ядер было минимальным.

К этому следует добавить открытие новых видов радиоактивности [20], одним из главных моментов которого является наблюдаемая кластерная радиоактивность — слияние трех α -частиц в углерод-14 и испускание ядер неона-24. Это открытие было сделано С. П. Третьяковой с сотрудниками (Лаборатория ядерных исследований, Дубна) и — независимо — Прайсом (В. Price). Им же совместно с коллегами из Беркли было обнаружено испускание магния-28 ядром урана-234. Оказалось, что этот тип ядер, уран-238, испускает три типа кластеров — гелий, неон и магний.

Кластерная радиоактивность — не единственное достижение 1984—1988 годов. Еще одно — обнаружение холодного деления. В этом процессе ядро распадается на два невозбужденных ядра, поэтому ядерные фрагменты от холодного деления имеют форму более близкую к сферической, чем фрагменты при обычном делении.

Эти открытия весьма примечательны, потому что Пондс С. и Флейшман М. в марте 1989 года сообщили об открытии ими холодного ядерного синтеза. Это событие носило скандальный характер. Ведущий специалист в области высокотемпературной проводимости Чу и старшина американских ядерных физиков Теллер высказались следующим образом: «Информация, которой мы располагаем, не позволяет объяснить эффекты как результат только артефактов, оборудования или человеческой ошибки» [21].

Научный мир раскололся на два лагеря. Практически каждый день публиковались результаты все но-

вых доказательств существования холодного ядерного синтеза. С не меньшим энтузиазмом противопоставлялись аргументы, что такого не может быть. Бурные столкновения сторонников и противников «cold fusion» («холодного ядерного синтеза») сегодня резко пошли на убыль. Обсуждать эту тему в научных кругах считается дурным тоном. Тем не менее Япония выделила крупную сумму для исследований в этой области. В США, где официально не финансируются любые работы в этом направлении, в 1996 г. в Техасе во второй раз проводилась конференция по трансмутационным реакциям при низких энергиях. Исследователей по-прежнему привлекает возможность получения в однородном объеме легированных областей за счет низкотемпературной трансмутационной реакции. На следующий год [22] в США публикуется еще одна работа по холодному ядерному синтезу. Видимо, точку в этом вопросе ставить рано.

Актуальной является разработка детекторов излучения на основе различных новых материалов. Эти работы относятся к сенсорному направлению. В сентябре 1998 г. на 28-й европейской конференции «ESSDERC'98» было представлено несколько докладов, посвященных детекторам в микросхемном исполнении, например [23].

В течение нескольких десятилетий практически не публиковались зарубежные работы, посвященные технологическим операциям с использованием явления радиоактивности. Отсутствие публикаций не является признаком отсутствия интереса к данному направлению как технологическому, по созданию новых материалов. И имеется в виду не только лишь нейтронное легирование. В отраслевых институтах и КБ бывшего СССР интенсивно проводились исследования по использованию радиоактивности в технологических целях. Однако в серийном производстве технологическое воздействие радиоактивными частицами было реализовано только в Ивано-Франковске (Украина). Это направление во все времена считалось секретным. Но с недавних пор такие работы стали публиковать. Например, интенсивно исследовался и продолжает исследоваться эффект «малых доз» [24], применяемый в технологии производства полупроводниковых приборов. В НИИПП г. Томска (Россия) этот метод, по-видимому, уже применяется в серийном производстве.

Анализируя программы сентябрьских 1998 года международных конференций, например, UCPSS'98 в Бельгии по сверхчистой обработке кремниевых поверхностей (для целей микроэлектроники) или ежегодную международную конференцию Общества исследований материалов MRS 1998 Spring Meeting в Сан-Франциско (Калифорния), приходишь к тому же выводу: зарубежные производители материалов, электронных компонентов и микросхем используют явления радиоактивности только лишь для исследовательских и метрологических целей. Как технологические операции эти явления используются в некоторых странах СНГ.

Причины здесь субъективные (например, радиобоязнь, приверженность к традиционным процессам) и объективные. Среди последних необходимо выделить чисто технический и технико-экономический аспекты. Первый заключается в том, что очень сложно разделить поток частиц, нужных для технологической операции, и другие продукты ядерного распада. Успех в Ивано-Франковске был обусловлен российскими достижениями. Суть этих достижений заключалась в создании «чистых» источников α -частиц из плутония-238 на уровне изобретений. Это свидетельствует, на мой взгляд, о мировом лидерстве российских ядерных физиков. Они были вынуждены изобретать, находя применение оружейному плутонию в мирных целях.

Технико-экономический аспект возникает при другом варианте применения частиц высоких энергий. На сегодняшний день нет таких ускорителей частиц, которые было бы экономически целесообразно использовать для целей микроэлектроники. Известны весьма затратные эксперименты по выращиванию полупроводниковых материалов в космосе, однако эти исследования революции не произвели.

Резюмируя сказанное, вряд ли с уверенностью можно сказать «да» явлениям радиоактивности в технологиях будущего, хотя интерес к ним не ослабевает.

ВВЕРХ ПО ЛЕСТНИЦЕ, ВЕДУЩЕЙ К МИНИМУМУ

Названия многих докладов конференции ESSDRC'98 (28th European Solid State Device Research Conference, 8–10 сентября 1998 года) отражают современные тенденции в микроэлектронике, главная из которых — уменьшение длины канала полевого транзистора. Например, доклад Кларка (США) «Последние достижения в устройствах на основе широкозонных материалов для мощных микроволновых применений», доклад Трютмана «Суперчип, или как мы используем 100 миллионов тран-

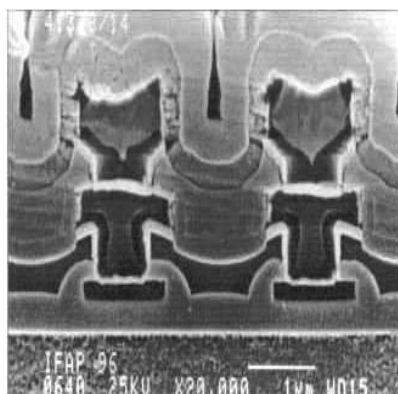


Рис. 5. Поперечное сечение полевого транзистора с длиной канала 580 нм вдоль контактных стеков. Толщина подзатворного диэлектрика 12,5 нм. (Фото предоставлено фирмой Thesys GmbH, Германия)

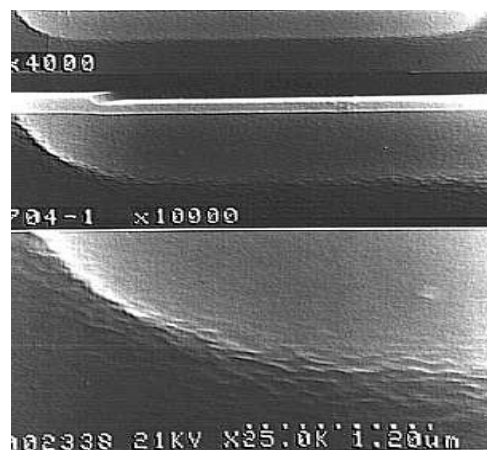


Рис. 6. Поперечное сечение диффузионной области транзистора с длиной канала 2,5 мкм, изготовленного в Ивано-Франковске. Видно изменение структуры диффузионной области, особенно в области границы $p-n$ -перехода

зисторов», «Транспортные свойства $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ стека в качестве подзатворного диэлектрика в CMOS-процессе» (группа компаний из Франции), «Высококачественное исполнение 0,13 мкм CMOS-технологии с классической архитектурой» и «Кремний-германиевые устройства» (Philips Research Laboratories, Netherlands), «100-нанометровой длины затвор n -SiGe HNMOSFET-транзистора» (авторы из нескольких университетов Англии), «130 нм вертикальные PMOS транзисторы с P+Poly-затвором» (Siemens и Рурский университет) и т. п.

Особенностью современной технологии микроэлектроники являются сверхтонкие слои для подзатворного диэлектрика. На сегодняшний день это слои окислов тугоплавких металлов типа тантала, вольфрама, слои нитридов, карбидов (рис. 5). По-видимому, следует ожидать появления и боридов. При этом рассматривается уменьшение толщины диэлектрика затвора с 4,5 нм до 2,5 нм. Проблемы, с которыми сталкиваются производители электронных компонентов, связаны с воспроизведением на большой площади (диаметр кремниевых пластин 300 мм) равномерной стехиометрической структуры каждого слоя, толщина которого состоит из нескольких монослоев атомов. Одновременно необходимо полностью устранять межоперационные слои, например, фоторезиста. Это технологические вопросы.

Существуют также проблемы физические, связанные с реструктуризацией поверхностных слоев (в которых происходят электронные процессы) в результате технологических воздействий. Изменения структуры оказывали влияние и при больших размерах канала (рис. 6), однако при минимизации размеров они становятся доминирующими. При производстве микросхем по мере уменьшения линейных размеров элементов необходимо использовать для фотолитографии излучение все меньшей длины, т. е. все большей энергии. Какое же излучение должно быть при подходе к размерам канала менее

0,07 мкм! (Подробности об этой технологии 2000 года можно узнать в Internet на сайте Texas Instruments.)

При использовании высокоэнергетических воздействий повышается вероятность возникновения разного рода дефектов, которые могут нарушить работу микросхем. То есть — брак! Однако не стоит торопиться с выводами. Например, в представленном недавно суперкомпьютере Tegamas, разработанном при участии компании Hewlett-Packard, имеется более 200 000 дефектов. При этом Tegamas прекрасно функционирует и показывает на некоторых приложениях в 100 раз большую производительность по сравнению с самыми быстрыми рабочими станциями Hewlett-Packard. За счет архитектуры, схемных решений реализуется самоорганизующаяся система, позволяющая выбирать оптимальные пути функционирования.

Известно, что электроны в полупроводниках и других материалах взаимодействуют предпочтительнее с плоскостями, цепочками атомов, чем с отдельными атомами, кластерами, дефектами, включениями. Уменьшение размеров существенно изменяет баллистику электронов в канале. Снижается быстродействие, повышается пороговое напряжение. Последний параметр определяет качество электронных компонентов логических микросхем, и не только...

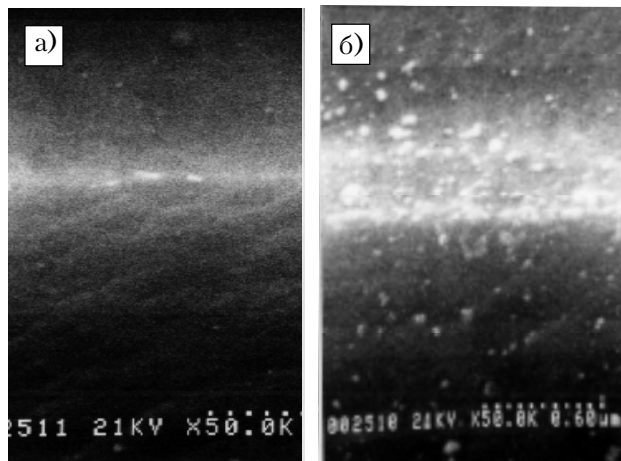


Рис. 7. Граница $p-n$ -перехода транзистора при облучении α -частицами:

a — в течение 25 мин; *b* — в течение 45 мин

Облучая микросхемы α -частицами, можно варьировать пороговое напряжение за счет изменения структуры диффузионных областей [25]. На рис. 7 (увеличение — $\times 50000$) представлены примеры изменения структуры $p-n$ -перехода для одной серии приборов и одной технологии при воздействии потока α -частиц различной длительности.

Помимо исследовательских задач, применение радиационной технологии при производстве БИС имеет экономический аспект — повышение процента выхода годных микросхем. К слову сказать, надежность облученных нами микросхем была выше, чем у необлученных. Аналогичные результаты по

надежности наблюдались и при реализации «эффекта малых доз». (Возможность исследовать облученные кристаллы наших устройств была любезно предоставлена А. П. Мамонтовым, НИИПП г. Томска.)

При реализации схемных решений с длиной канала ниже одного микрона на первый план выходят такие технологические операции как эпитаксия, ионно-плазменное травление, ионная имплантация. Требования к совершенству слоев толщиной в несколько атомных слоев предполагают сверхчистые процессы и материалы. Одновременно появляются требования к производителям электронных компонентов расширить рабочий температурный диапазон до 300°C и выше. В этом направлении получены положительные результаты [26].

Следует заметить, что тенденция эта не нова и прослеживается уже на протяжении около 20 лет, различны лишь технические решения и, соответственно, затраты. Традиционно применялись материалы типа «кремний на диэлектрике», классическим примером которого является технология «кремний на сапфире». Однако это решение только одного аспекта комплекса проблем. До сих пор проблемой остается деградация структур, вызванная электромиграционными явлениями. В этом случае следует рассматривать не только конечный результат — физическое разрушение, но и начальную фазу — сбой и ошибки в логических микросхемах при электромиграционных процессах.

Таким образом, одна из современных тенденций в материаловедении — синтез металлических систем, геометрия которых приближается к двумерной, способных сохранять свои параметры при возмущающих воздействиях и в течение длительного времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникает естественный вопрос — что же дальше?

В истории развития науки, включая и развитие материаловедения, микроэлектроники, существовал порог восприятия размерности исследуемых объектов. В 1970-х годах на лекциях по микроэлектронике можно было услышать, что пределом возможностей при изготовлении микросхем являются 1,5–2 микрометра, поскольку невозможно контролировать процессы формирования структур на этом уровне. При этом считалось, что этот уровень замечателен. Сегодня мы уже более спокойно воспринимаем длину канала в 100 нанометров, потому что наше восприятие уже подготовлено к меньшему порогу или горизонту, за которым находится НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ. Один из, на первый взгляд, тривиальных выводов, к которому приходят специалисты, длительное время изучающие состояние электронной промышленности, состоит в том, что история повторяется. Заглядывая за понятный нашему восприятию горизонт, мы опять не можем предугадать, что же дальше...

Три года назад в газете Financial Times было опубликовано интервью [27] с Кристофером Гальвиным (Christopher Galvin), президентом и исполнительным директором фирмы «Motorola». По его оценке, за текущий год объем продаж фирмы со-

ставил 27 млрд. долларов США за счет поиска и проработки новых рынков для технологических групп. Рассуждая о перспективах развития той или иной отрасли электроники, он сказал: «Никто не мог этого предвидеть... Нам приятно думать, что мы подготовили себя для узнавания следующих возможных сюрпризов». Вот так. Не предвидение, а — готовность к сюрпризам...

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. 25th Yearbook of World Electronic Data, 1973—1998. — Vol. 1—4 / Ed. by C. G. Wedgwood.
2. Розенберг Р. Пользователям предстоит решить критическую проблему выбора комплектов ИС для сети ISDN // Электроника. — 1986. — № 20. — С. 18—22.
3. Клиффорд Б. Фирма Intel приступает к выпуску набора микросхем для сети ISDN // Там же. — С. 22—28.
4. Коул Б. К. Накануне массового применения арсенид-галлиевых БИС // Там же. — № 19. — С. 18—26.
5. Klingsheim K., Flaten B. E., Kampenhoy E., Johannessen J. S. GaAs technology for digital space applications // Journal of the British Interplanetary Society. — 1988. — Vol. 41. — P. 301—306.
6. Орлов Л. К., Толмасов В. А., Потапов А. В. Гетероэпитаксия слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на $\text{Si}(100)$ методом GeH_4 - Si молекулярно-лучевой эпитаксии: кинетика роста и структурные исследования // Материалы электронной техники. — 1998. — № 2. — С. 30—34.
7. Keen J. M. Novel applications of porous silicon / 20th European Solid State Device Research Conference, Nottingham, 10—13 September, 1990. — Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New-York. — 1990. — P. 613—618.
8. Фистуль В. И. Почему полупроводниковые композиты еще не стали реальностью? // Материалы электронной техники. — 1998. — № 2. — С. 8—12.
9. Pool R. Making new materials with nature's help // Science. — 1989. — Vol. 246. — P. 1389.
10. Коркоран Е. Вниз по шкале размерностей // В мире науки. — 1991. — № 1. — С. 68—78.
11. Lyding J. W., Hess K. Deuterium treatment for improved hot carrier reliability of integrated transistors // Condensed Matter News. — 1996. — Vol. 5. — P. 8—10.
12. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под ред. Л. Ченга и К. Плога. — М.: Мир, 1989.
13. Scientific American. — November 1990. — Vol. 263, N 5.
14. Mahan G. D., Sofo J. O. and Bartkowiak M. Multilayer thermionic refrigerator and generator // Journal of Applied Physics. — 1998. — Vol. 83, N 9. — P. 4683—4689.
15. Avgustimov V. L., Bidnyk D. I., Kostenko S. P. et al. Multi-compound layers in multisensors // Sensors and Actuators. — 1992. — Vol. B, N 8. — P. 13—19.
16. Костенко С. П. Механизмы управляемого структурообразования поверхностей слоев Pd—Ag при облучении α -частицами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1998. — № 2. — С. 36—39.
17. Berezin A. A. Perspectives isotopic engineering // J. Phys. Chem. Solids. — 1989. — Vol. 50, N 1. — P. 5—8.
18. Berezin A. A. Localized electron levels in isotopically ordered crystals (isotopic quantum wells) // Phys. Stat. Sol. (b). — 1987. — Vol. 144. — P. 727—732.
19. Армбрустер П., Мюнценберг Г. Синтез сверхтяжелых элементов // В мире науки. — 1989. — № 7. — С. 16—23.
20. Sandulescu A. A new radioactivity // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 1989. — Vol. 15. — P. 529—554.
21. Teller R. P., Chu. «Boost» cold fusion // Science. — 1989. — Vol. 246. — P. 449.
22. Rabzi G. S. Low-temperature transmutation // Planetary Association for Clean Energy. Newsletter, 1997. — Vol. 9, N 1. — P. 18.
23. Connell B. O., Conneely C., Doyle J. et al. Performance of stacked PMOS dosimeters under bulk bias for use in realtime radiation dosimetry // 28th European Solid-State Device Research Conference, 8—10 September 1998, Bordeaux, France.
24. Chernov I., Mamontov A. Ordering of defective crystal structure by ionizing radiation (effect of small doses of radiation) // Program of the MRS 1998 Spring Meeting, San-Francisco, CA. — 1998. — P. 51.
25. Kostenko S. P. α -particle tracks in solids as a triggers of the self-formatational mechanism for the structures with predetermined behavior // Radiation Measurements. — 1997. — Vol. 28, N 1—6. — P. 77—80.
26. Pohl M., Aufinger K., Bock J. et al. DC and AC performance of Si and $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ bipolar transistors at temperatures up to 300°C // Program of 28th European Solid-State Device Research Conference, 8—10 September 1998, Bordeaux, France.
27. Taylor P. Ready for the next surprises / Financial times. Wednesday / Thursday, May 1996, P. 2.