

## Технологии СБИС

К. Валиев, А. Орликовский

## Основные тенденции развития

Статья знакомит читателей с основными тенденциями в развитии технологии СБИС, включая литографию, заводы будущего, интеграцию технологических процессов, кластерное оборудование. Ее авторы не ограничиваются рассмотрением тенденций, которые уже находят воплощение в практике. Благодаря широте научного кругозора им удается как бы заглянуть за горизонт общепризнанных путей решения стоящих проблем. В этом номере журнала публикуется первая часть статьи.

**Литография.** Основным процессом в технологии интегральных схем, определяющим минимальный размер элемента на кристалле, максимальный размер кристалла, производительность и стоимость технологии, остается литография. В настоящее время ведущие компании, производящие интегральные схемы, реализуют кристаллы площадью 400 мм<sup>2</sup> (для логических схем) и 200 мм<sup>2</sup> (для схем памяти) при минимальном топологическом размере 0,35 мкм. На рис. 1 приведен график вероятной динамики изменения основных технологических характеристик УБИС: минимального топологического размера, размера кристалла со схемой динамической оперативной памяти (ДОЗУ) и емкости однокристалльного ДОЗУ [1]. Предполагается, что к 2007 году минимальный топологический размер будет снижен до 0,1 мкм, а емкость ДОЗУ увеличена до 16 Гбит. Соответственно, размер кристалла достигнет 1000 мм<sup>2</sup>. Стоимость производства, приведенная к 1 см<sup>2</sup> кристалла, изменится незначительно (с 4 долл./см<sup>2</sup> в 1993–1995 годах до 3,5 долл./см<sup>2</sup> в 2007 году), а доля операций литографии в общей стоимости производства сохранится на уровне 35%.

По мнению большинства специалистов, вплоть до минимального размера 0,1 мкм доминирующей останется **оптическая литография**, обеспечивающая высокую производительность и разрешающую способность процесса на больших кристаллах.

Для размеров, меньших 0,1 мкм, альтернативу оптической составляют электронная, ионная и рентгеновская литография [2]. **Электронная литография**, основанная на сканировании луча по пластине, широко применяется для производства масок, но за исключением, быть может, ранних

стадий разработок и ИС специального применения не используется для прямого нанесения рисунка на пластину из-за чрезвычайно низкой производительности.

**В рентгеновской контактной литографии** (пластина на расстоянии 5–50 мкм от маски) изображение маски переносится на пластину в масштабе 1:1. Экспонируемая область соответствует размерам одного кристалла, так что вся пластина должна быть обработана кристалл за кристаллом, как в классической оптической установке пошагового экспонирования (степпере). Обычно в экспериментальных установках используются источники излучения на длины волн 0,4–2,0 нм.

Перспективными источниками рентгеновского излучения считаются компактные синхротронные накопительные кольца диаметром от 1 до 5 м. Несмотря на огромные средства, вложенные в разработку, технология рентгеновской литографии до настоящего времени остается на стадии исследований [3].

Интенсивные работы ведутся в области создания установок **проеционной рентгеновской литографии** в диапазоне длин волн излучения 13–18 нм, в так называемом мягком рентгеновском или экстремально глубоком ультрафиолетовом излучении [4,5]. Выбор этого диапазона диктуется двумя факторами: возможностью построения объектива, обеспечивающего пространственное разрешение лучше 0,1 мкм и глубину фокуса более 0,5 мкм за счет создания многослойных изображающих зеркал нормального падения с высокими коэффициентами отражения (60–65%) (рис. 2). Относительно недорог (по сравнению с накопительным кольцом синхротрона) лазерно-плазменный источник мягкого рентгеновского излучения. В качестве альтернативы оптической системе рассматриваются степпер с уменьшением изображения маски, а также установки экспонирования при синхронном сканировании маски и подложки (степпер-сканер). Разрабатываются рентгенорезисты с необходимой чувствительностью и контрастом для этого диапазона длин волн.

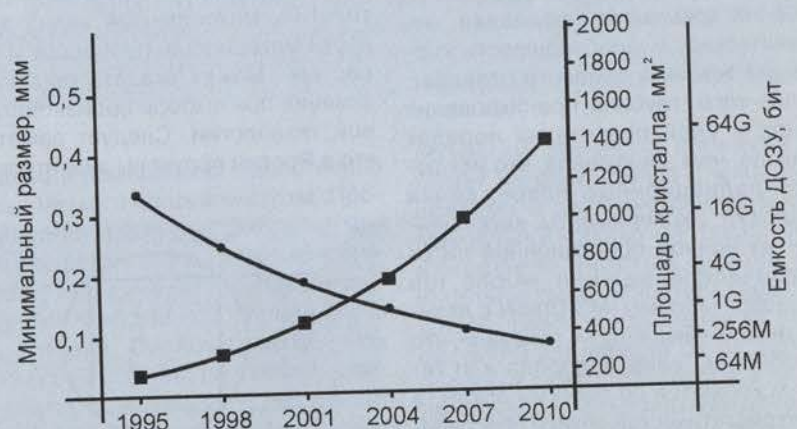


Рис. 1. Вероятная динамика изменения основных технологических характеристик кремниевых интегральных схем: минимального топологического размера (●) площади кристалла для динамической оперативной памяти (■)



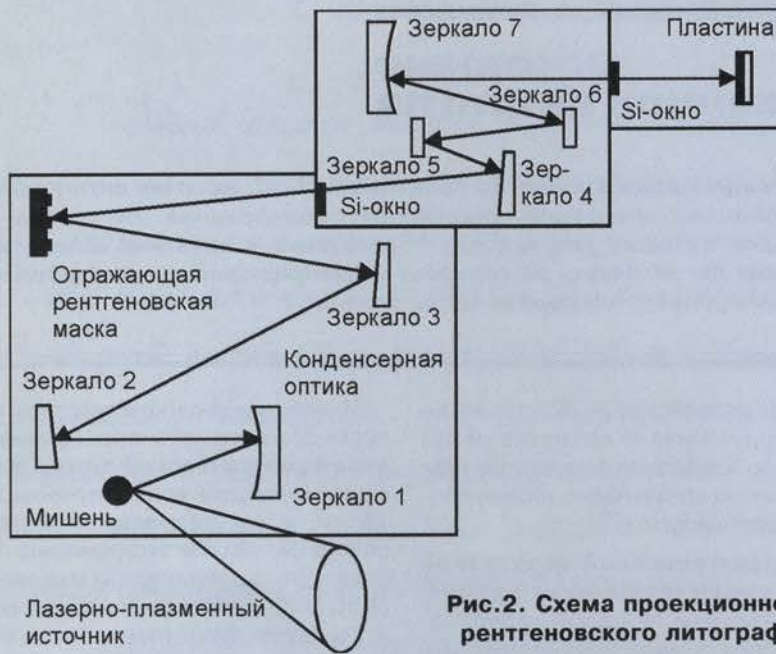


Рис.2. Схема проекционного рентгеновского литографа

Не исключено, что **проекционная ионно-пучковая литография** окажется предпочтительнее для формирования элементов шириной менее 0,12–0,1 мкм [6]. Этот метод позволяет использовать электростатическую оптику для экспонирования изображения маски на пластину с уменьшением. Возможно также электронно-лучевое совмещение проецируемого изображения на пластине с нанометровой точностью. Благодаря малой длине волны заряженных частиц (например, ионы водорода  $H^+$  с энергией 100 кэВ имеют длину волны  $10^{-4}$  нм) разрешение ограничено не длиной волны частиц, а искажениями, вносимыми оптической системой. По сравнению с электронами рассеяние ионов, например в РММА-слое на кремниевой подложке, незначительно, и необходимость коррекции эффекта близости отпадает. Более того, глубина проникновения ионов в слой резиста на порядок меньше, чем электронов, что исключает радиационные повреждения подложки. Эксперименты, выполненные на ионной проекционной литографической машине «Alpha Ion Projection» фирмы IMS GmbH с пятикратным уменьшением, показали, что в поле линз ионы водорода или гелия ускоряются до энергии 55 кэВ, а электростатическая оптика обеспечивает экспонирование поля  $8 \times 8 \text{ мм}^2$  [6]. Достигнуто суб-0,1 мкм разрешение, большая глубина фокуса

(~100 мкм), электронно-лучевое совмещение, высокая производительность (около 60 пластин диаметром 200 мм в час) при отсутствии радиационных повреждений подложки. По мнению авторов, некоторые сложности вызывает то, что маска и пластина должны находиться в вакууме. Однако, на наш взгляд, это гармонирует с главной тенденцией в развитии оборудования (снижение рабочих давлений) и не может рассматриваться как недостаток.

В попытке предсказать лидирующую технологию суб-0,1 мкм литографии нужно иметь в виду, что ведущие фирмы развивают рентгеновскую литографию около двух десятилетий. Накопленный задел в области материалов, процессов и подсистем может оказать решающее влияние при выборе производственной технологии. Следует заметить, что в России получены значительные

результаты в исследованиях ионно-пучковой и рентгеновской литографии.

Для **литографии с минимальным размером 0,25 мкм**, которая будет внедрена в производство в 1998 году, развивается концепция пошагового (кристалл за кристаллом) экспонирования со сканированием светового пятна по кристаллу (step-and-scan technology) [7]. Длина волны излучения лежит в области глубокого ультрафиолета и равна 248 нм. Эта концепция использует все достоинства традиционного степпера. Степпер-сканнер сканирует пятно света по кристаллу с четырехкратным уменьшением изображения по отношению к маске. После обработки одного кристалла пластина перемещается на один шаг, равный размеру кристалла, и процесс экспонирования повторяется. Необходимость применения такого подхода вызвана катастрофическим увеличением стоимости проектирования, материалов и производства оптических линз при увеличении проецируемого поля. Так, стоимость степпера каждого нового поколения возрастает приблизительно на 50%: с 4 млн. долл. для установки с 0,35 мкм разрешением до 7 млн. долл. для 0,18 мкм системы. Из рис.3 видно, что при экспонировании изображения на кристалл одного и того же размера —  $25 \times 33 \text{ мм}$  — сканирование позволяет уменьшить диаметр поля с 42 до 25 мм.

Степпер-сканнер модели Microscan II (MSII) — результат пятилетнего сотрудничества консорциума Sematech и фирмы Silicon Valley Group Lithography Systems (SVGL) — успешно используется для производства схем с правилом проектирования 0,35 мкм. В 1993 году консорциум Sematech модифицировал установку и технологию литографии в области глубокого ультрафиолета (минимальный размер 0,25 мкм). Новая

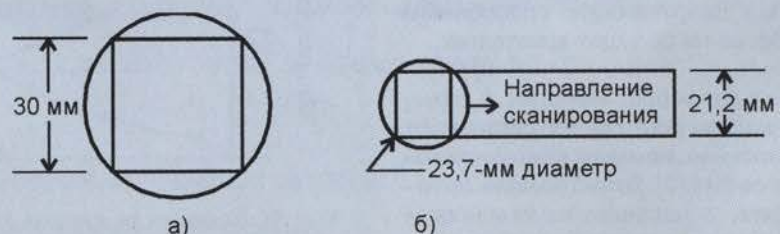


Рис.3. Сравнение проецируемых полей для степпера (а) и степпера-сканнера (б)



модификация MSII рассчитана на поле 22,0x32,5 мм и производительность 55 пластин в час.

На основе этого сканнера-степпера в лаборатории Линкольна Масчусетского технологического института (МТИ) впервые была сделана попытка реализовать **литографию с минимальным размером 0,18мкм** с использованием эксимерного лазера ArF (длина волны излучения 193,4нм) [8]. Предполагается, что в производство новая технология будет внедрена между 1998 и 2002 годами.

Аналогичные установки выпускает компания Nikon — еще один ведущий поставщик литографического оборудования. Фирма разработала два степпера — с источником излучения на i-линии (0,35мкм) и в глубоком УФ диапазоне (248 нм). Установка нового поколения модели NSR-S201A является степпером-сканнером и рассчитана на длину волны 248нм (источник — KrF эксимерный лазер). В дальнейшем планируется ее модифицировать за счет применения источника на длину волны 193нм (ArF эксимерный лазер).

В табл. 1 приведены требования к литографическим процессам 2010 года (эта и последующие таблицы приведены по отчету «National Technology Roadmap for Semiconductor», SIA, 1994).

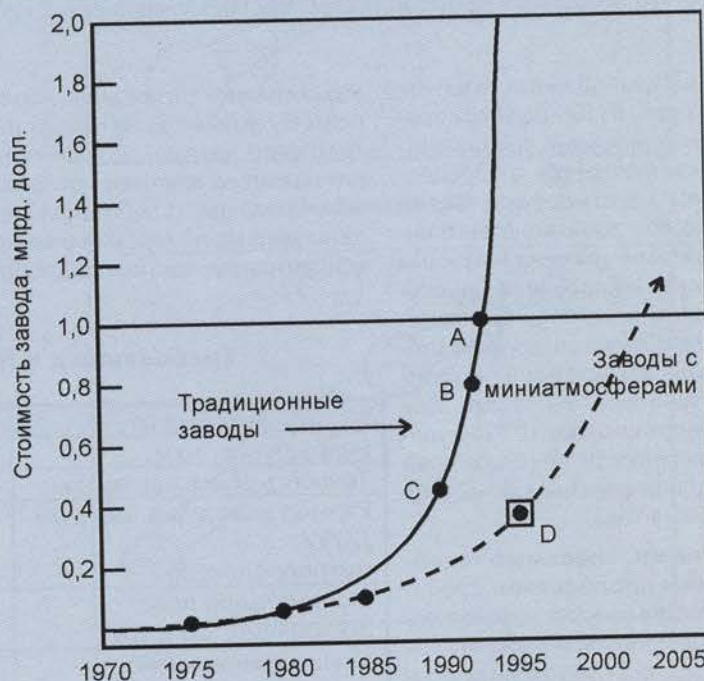
Потребители будут стремиться использовать литографическое оборудование следующих поколений в составе кластерных систем — фотокластеров, т.е. полностью интегрированных автоматизированных фотолитографических линий. Создание таких кластерных линий — очень сложная проблема из-за высочайших требований к уровню загрязнений. Надежность фотокластеров должна обеспечивать не более одного отказа на 300 ч наработки при приемлемой стоимости.

**Заводы будущего.** Затраты на ввод в строй завода с традиционной структурой чистых помещений по классу 1, выпускающего ИС ДОЗУ емкостью 64Мбит с минимальными размерами элементов 0,35мкм при ежемесячной производительности 25 тыс. пластин диаметром 200мм, в 1993 году составили 1 млрд. долл. Усложнение интегральных схем ведет к катастрофическому росту за-

трат на освоение производства на заводе с традиционной архитектурой (рис. 4). Поэтому ведущие компании рассматривают в качестве альтернативы заводы с так называемыми миниатмосферами в местах обработки пластин и транспортом последних в замкнутых сверхчистых объемах. При этом оборудование может быть раз-

залось, это сокращает затраты на ввод в строй завода с той же производительностью, что и у традиционного предприятия 1995 года более чем в пять раз: с 2 млрд. до 400 млн. долларов [9].

**Интеграция технологических процессов.** Идея интеграции техно-



**Рис. 4. Изменение стоимости традиционных заводов с чистыми комнатами и заводов с минисредами:**

**А** — завод по производству ИС ДОЗУ емкостью 64Мбит с минимальным размером (MP) 0,35мкм, производительностью 25 тыс. пластин диаметром 200мм в месяц,

**В** — завод по производству ИС ДОЗУ емкостью 16Мбит с MP 0,50мкм, производительностью 20 пластин диаметром 200мм в месяц,

**С** — завод по производству ИС ДОЗУ емкостью 1Мбит с MP 0,8мкм, производительностью 20 тыс. пластин диаметром 150мм в месяц,

**Д** — завод с миниатмосферой для транспорта пластин при производстве логических ИС с MP 0,35 мкм, производительностью 15 тыс. пластин диаметром 200мм в месяц

мещено в помещениях существенно более низкого класса чистоты. Преимущества изоляции пластин в миниатмосферах были продемонстрированы на примере 10 экспериментальных заводов, размещенных в США и Азии. В чистых помещениях по классу 1000 там достигают уровня чистоты, эквивалентного классу 0,1. Сегодня уже можно говорить о переходе от сверхчистых помещений с «людьми в скафандрах» к чистым помещениям с «пластинами в сверхчистых миниатмосферах». Как ока-

логических процессов логически вытекает из идеи завода с миниатмосферами и реализуется с помощью замкнутых в хорошо контролируемой атмосфере (чистый воздух или инертные газы, например сверхчистый N<sub>2</sub>, диапазон давлений от атмосферного для воздуха до 10<sup>-4</sup>Тор для инертных газов) транспортных линий, переносящих пластины между технологическими установками. Это должно привести к увеличению выхода годных и снижению стоимости производства. Главный стимул для ин-

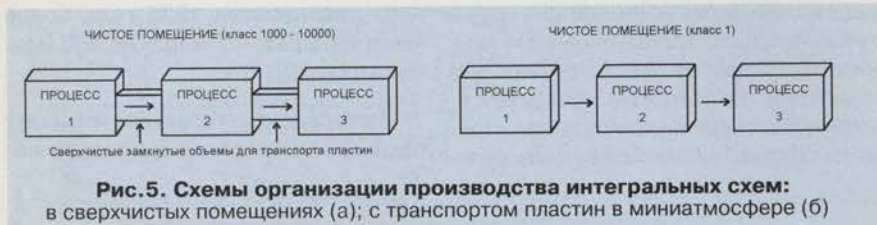


теграции технологических процессов — возможность контроля уровня за-

ловушки частиц. Такие ловушки характеризуются локализованными

ла зависимости от режимов работы реактора, что, по всей видимости, объясняется только степенью загрязненности атмосферы чистых комнат. Концентрация основной доли частиц обнаруживала квадратичную зависимость от расхода газа. Известны примеры оптимизации конструкции электродов РИТ реактора, например путем создания искусственных ловушек для электростатического захвата частиц за периферией пластины и очистки тем самым плазмы над пластиной. [12].

Простой расчет показывает, что загрязнение пластины диаметром 150 мм одной частицей диаметром 0,5мкм в течение 1мин травления или нанесения покрытия эквивалентно ее пребыванию в течение такого же



загрязнения пластин. Данный тезис иллюстрирует рис. 5 [10]. Если при традиционной организации производства пластина передается от процесса к процессу в атмосфере чистой комнаты, то при производстве с интегрированными технологическими процессами транспорт пластин осуществляется в ограниченных, замкнутых объемах с чистой, хорошо контролируемой атмосферой. Например, при транспорте пластин при давлении инертного газа  $10^{-3}$  Тор уровень загрязненности приблизительно равен одной реактивной частице на  $10^6$  молекул газа.

**Загрязнения, вносимые технологическими процессами.** Требования к качеству очистки рабочей поверхности пластины чрезвычайно высоки (табл.2). В этих условиях особое значение приобретает контроль загрязнений, вносимых технологическими установками, в частности чистыми газами или жидкостями, и частицами, формируемыми в ходе процесса. Например, процессы травления, распыления, имплантации и др. способны загрязнять пластины тяжелыми металлами и прочими примесями за счет распыления стенок камеры и держателей пластин. Так, традиционное реактивно-ионное травление (РИТ) не удовлетворяет некоторым требованиям к уровню вносимых загрязнений. Из-за относительно высоких давлений при РИТ в радиочастотном разряде ( $0,1$  Тор) плазма становится дополнительным источником загрязнений.

В ряде работ [11—13] показано, что на границе «плазма—область пространственного заряда» обнаруживаются взвешенные загрязняющие частицы. Они распределены на границе области пространственного заряда неравномерно и сжимаются в трехмерные структуры, идентифицированные как электростатические

максимумами потенциала плазмы и поэтому активно захватывают или отталкивают частицы. Большинство из них падает на пластину после выключения разряда. В работе [11] приведены данные измерений размеров и концентрации частиц, падающих на

### Требования к литографическим процессам

| Параметр                                       | 1995г.  | 2001г.  | 2007г.  | 2010г.  |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Разрешение, мкм                                | 0,35    | 0,18    | 0,10    | 0,07    |
| Точность совмещения, нм                        | 100     | 50      | 30      | 20      |
| Размер кристалла, мм x мм ДОЗУ микропроцессора | 10 x 10 | 15 x 30 | 22 x 44 | 28 x 50 |
| Минимальное поле экспозиции, мм x мм           | 16 x 16 | 19 x 19 | 23 x 23 | 25 x 25 |
| Минимальное число масок, шт                    | 22 x 22 | 26 x 30 | 26 x 44 | 28 x 50 |
| Диаметр пластины, мм                           | 18      | 20      | 22      | 24      |
|  | 200     | 300     | 400     | 400     |

### Требования к качеству очистки рабочей поверхности пластины

| Параметр                         | 1995г.             | 2001 г.              | 2007г.             | 2010г.             |
|----------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Разрешение, мкм                  | 0,35               | 0,18                 | 0,10               | 0,07               |
| Плотность частиц, $m^{-2}$       | 1400               | 500                  | 200                | 150                |
| Размер частиц, $мкм^2$           | >0,12              | >0,06                | >0,03              | >0,02              |
| Эффективность удаления частиц, % | 95                 | 95                   | >95                | >95                |
| Плотность металлов, $см^2$       |                    |                      |                    |                    |
| Al, Ga                           | $1 \times 10^{11}$ | $2,5 \times 10^{10}$ | $5 \times 10^9$    | $< 5 \times 10^9$  |
| Fe, Ni, Cu, Zn, Na               | $5 \times 10^{10}$ | $1 \times 10^{10}$   | $5 \times 10^9$    | $5 \times 10^9$    |
| Органика, атомов $C/см^2$        | $1 \times 10^{14}$ | $3 \times 10^{13}$   | $5 \times 10^{12}$ | $3 \times 10^{12}$ |

пластину после реактивного ионного травления в смеси  $SF_6/Ar$  в триодном реакторе промышленного типа модели Tegal MCR-1 в диапазоне давлений от 20 до 140мТор. Основная доля частиц имела размеры от 0,2 до 0,7мкм. Регистрировались также частицы размером до 50мкм, концентрация которых не обнаружи-

времени в чистой комнате класса 2000. Таким образом уровень загрязнений зависит не только от процесса, но и от времени пребывания пластины в технологическом реакторе [14].

Стремление уменьшить уровень загрязнений делает необходимым совершенствование как самих тех-

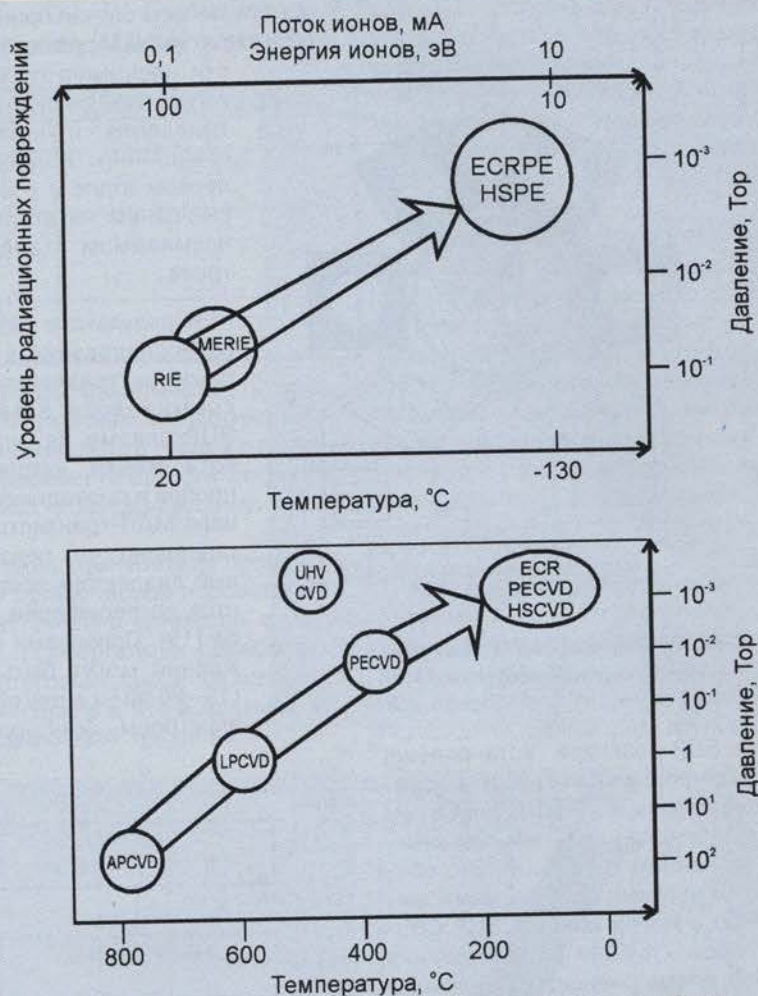
нола  
рудо  
ния  
тем  
плас  
На  
мы,  
мен  
на  
оса  
гран  
пла  
эле  
нан  
нат  
поз  
тра  
чес  
10  
чен  
ио  
вь  
10  
пе  
ко  
пр  
пл  
с.  
с  
т  
с  
S  
г  
е  
:



нологических процессов, так и оборудования путем снижения давления в рабочих реакторах, а также температуры и времени обработки пластины.

На рис. 6 представлены диаграммы, иллюстрирующие тенденции изменения процессов и оборудования на примере процессов травления и осаждения из газовой фазы. Из диаграмм видно, что применение СВЧ плазмы, возбуждаемой в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), или геликонного плазмы позволяет реализовать процессы травления и осаждения диэлектрических пленок при давлениях  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  Тор. Это на два порядка ниже, чем при традиционном реактивном ионном травлении. Одновременно высокая плотность плазмы ( $10^{11}$ — $10^{12}$  см $^{-3}$ ) позволяет снизить температуру подложки при осаждении до комнатной. Следует заметить, что применение геликонного источника плазмы еще не вышло из стадии исследований.

При травлении в плотной плазме с низкой средней энергией ионов температуру подложки приходится снижать до  $130^{\circ}\text{C}$  (например, для SF), что увеличивает анизотропию процесса и дополнительно уменьшает радиационные повреждения подложки при травлении [15]. Низкая энергия ионов, падающих на подложку ( $\sim 10$  эВ), как оказалось, дает не только преимущества, но и обуславливает определенные трудности в достижении высокой анизотропии при травлении. В числе причин, ограничивающих анизотропию, относительно широкие угловые распределения ионов и высокая концентрация изотропных трансляционно горячих атомов, сравнимая с концентрацией относительно анизотропных ионов [16, 17]. Удовлетворительным решением проблемы оказалось охлаждение подложки до температур около  $-150^{\circ}\text{C}$ . Резкое улучшение анизотропии травления кремния и селективности по отношению к резисту (приблизительно до 20 при травлении в SF) объясняется тем, что при скорости травления, ограниченной доставкой реагента, латеральная скорость травления снижается с уменьшением температуры поверхности. При этом преобладают ионностимулированные реакции на горизонтальных поверхностях (дне канавки).



**Рис. 6. Тенденции совершенствования процессов и оборудования плазмохимического травления**

RIE — реактивное ионное травление, MERIE — реактивное ионное травление, усиленное магнитным полем, ECRPE — плазмохимическое травление в условиях электронного циклотронного резонанса, HSPE — плазмохимическое травление из геликонного источника (а);

осаждение из газовой фазы (APCVD — химическое осаждение из газовой фазы при атмосферном давлении, LPCVD — то же при пониженном давлении, PECVD — плазмостимулированное осаждение из газовой фазы, UHV CVD — сверхвысоковакуумное осаждение из газовой фазы, ECR PECVD — то же в плазме, возбуждаемой в условиях электронного циклотронного резонанса, HSCVD — то же геликонной плазмы (б))

**Дефекты, вносимые технологическими процессами.** Еще одна проблема — дефекты, вносимые процессом в приповерхностный слой кремния и в тонкий подзатворный диэлектрик. Установлено, что плазмостимулированное образование электрически активных дефектов и проникновение фтора и водорода, вызывающего деактивацию примеси (бора), наблюдается до глубин 30—50 нм. Толщина сильно нарушенного слоя достигает 3 нм. Поверх-

ность кремния загрязняется фторуглеродными соединениями, включая полимерные, например (CF $_2$ ) $_n$ . Другой тип дефектов, вносимых плазмой, — встроенный заряд на поверхности подзатворного оксида, появляющийся из-за локальной зарядовой неоднородности плазмы, что приводит, как правило, к снижению электрической прочности оксида.

В ряде работ, например [15], исследовались радиационные дефекты в кремнии, подвергнутом травле-





**Рис.7. Пример архитектуры кластерной системы**

нию в ЭЦР-реакторе. Установлено, что травление вносит глубокие уровни, концентрация которых более чем на два порядка ниже, чем при реактивном ионном травлении. Это объясняется низкими характерными значениями энергий ионов в ЭЦР СВЧ-реакторах. Глубина проникновения атомов фтора зависит от величины смещения подложки и без смещения составляет несколько единиц нанометров. Для уменьшения загрязнения поверхности атомами металлов (Fe, Ni и др.) в конструкции ЭЦР источника плазмы используются кварцевые защитные экраны, снижающие почти на два порядка концентрацию вносимых на поверхность пластины атомов металлов из-за распыления стенок реактора.

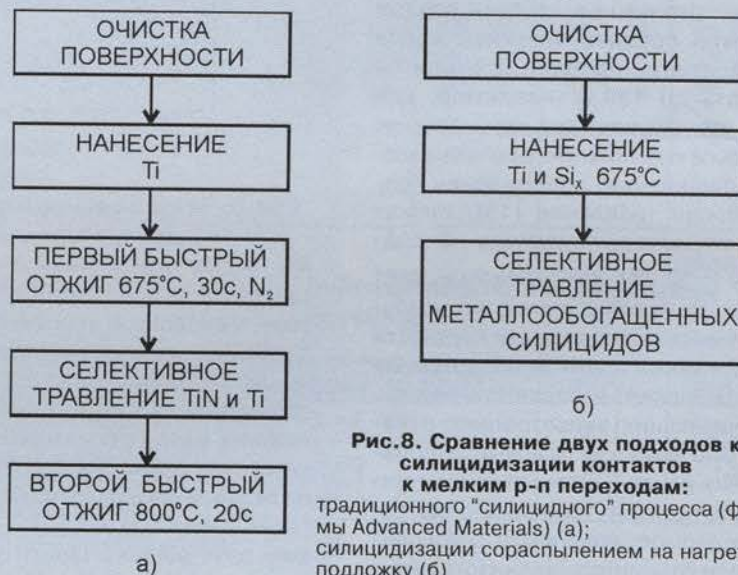
Изучалось также воздействие ЭЦР-плазмы на подзатворный диэлектрик (зарядовые эффекты) [18]. Установлено, что напряжение пробоя образцов, обработанных в ЭЦР-плазме, выше, а токи утечки ниже, чем у образцов, подвергнутых реактивному ионному травлению. Важной особенностью ЭЦР-реактора, как, впрочем, и большинства реакторов нового поколения с плотной плазмой, является то, что пластина удалена из зоны формирования плазмы. Это должно снижать повреждение плазмой тонкого подзатворного диэлектрика при формировании затвора путем анизотропного травления поликремния. Тем не менее и в

данном случае принимаются меры предосторожности, например проводится двухэтапная процедура травления: с небольшим смещением подложки на первом этапе и с нулевым смещением на втором, так называемом этапе перетрава.

В результате детального исследования влияния режимов травления поликремниевых затворов в ЭЦР-плазме на значения тока утечки, напряжения пробоя и проводимости канала МДП-транзистора установлено, что подзатворный диэлектрик повреждается по периферии затвора [19]. Причинами повреждений могут быть ионы (12–20 эВ) и энергетичные электроны, бомбардирую-

в приповерхностной области оксида. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия показала, что приповерхностный слой после облучения разориентирован. Глубина нарушенного слоя зависит от энергии и глубины проникновения ВУФ-излучения, которая в плазме указанных газов была максимальной для He и составляла приблизительно 1,5 нм. Для субмикронных структур с толщинами подзатворного диэлектрика порядка 10 нм влияние ВУФ-излучения может быть существенным. В табл. 3 приведены требования к подзатворному диэлектрику в зависимости от минимального топологического размера.

При столь сложных требованиях к структуре транзистора каждая технологическая операция должна быть проверена на предмет наличия вносимых в подзатворный диэлектрик дефектов. Средний выход годных на современном заводе по производ-



**Рис.8. Сравнение двух подходов к силицидации контактов к мелким p-n переходам:** традиционного "силицидного" процесса (фирмы Advanced Materials) (а); силицидации сораспылением на нагретую подложку (б)

щие поверхность оксида при травлении, а также ультрафиолетовое излучение плазмы. С этой точки зрения интересны результаты изучения радиационных повреждений диоксида кремния, вызванных вакуумным УФ излучением плазмы Ar, He, Kr, Xe и O<sub>2</sub> в ЭЦР- и геликоновых источниках [20].

Показано, что облучение диоксида кремния в плазме вызывает увеличение скорости его последующего травления в HF, что объясняется формированием нарушенного слоя

стимулирующего состава. Вклад интегральных схем составляет 85–90%. Если считать, что общее число операций равно 250, то допустимый брак на каждой операции не должен превышать 0,15%. Ясно, что процессы, обеспечивающие обработку пластин без повреждений, позволяют уменьшить такие потери. Глубоко субмикронные технологии потребуют до 20–30 операций литографии и 20–30 операций удаления резиста методом сухого травления. Последнее подчеркивает актуальность проблемы снижения радиа-



## Требования к подзатворному диэлектрику МДП-структуры

| Параметр                              | 1995 г.   | 2001 г.   | 2007 г. | 2010 г. |
|---------------------------------------|-----------|-----------|---------|---------|
| Разрешение, мкм                       | 0,35      | 0,18      | 0,10    | 0,07    |
| Длина канала, эффективная, мкм        | 0,28-0,35 | 0,14-0,18 | <0,10   |         |
| Толщина подзатворного диэлектрика, нм | 7-12      | 4-5       | <4      |         |
| Электрическая прочность, МВ/см        | >4        | >5        | >6      |         |

ционностимулированных дефектов в подзатворном диэлектрике.

При этом нужно иметь в виду, что значения исходного давления (до напуска реактивных газов) в таких установках снижаются до  $10^{-7}$  Тор (против  $10^{-3}$  Тор в установках РИТ), что существенно снижает уровень загрязнений и содержание реактивных примесей ( $H_2$ ,  $O$ ,  $O_2$  и т.п.).

Следует отметить, что в России создан большой научный и практический задел в области создания источников плотной низкотемпературной плазмы [21–23] и ее применения в технологии интегральных схем.

**Кластерное оборудование.** Естественным развитием идеи интеграции технологических процессов является создание кластерного оборудования. Его концепция заключается в том, что две или более технологические установки объединяются в кластер, в котором пластина с помощью робота последовательно переводится из одной камеры в другую в условиях относительно высокого вакуума. Главная цель создания кластерных систем — удешевление производства путем сокращения капитальных затрат на оборудование и увеличения выхода годных кристаллов со схемой на больших пластинах. Это достигается благодаря применению более совершенных технологических процессов, снижению уровня загрязнений, обеспечению более эффективных путей транспорта пластин, упрощению и уменьшению длительности процесса, а также исключению постоперационного контроля пластин, точнее, замене его мониторингом процессов и включению в состав оборудования детекторов моментов окончания процессов.

Итак, потенциальные достоинства кластерного оборудования заключаются в следующем:

- лучшая равномерность обработки от пластины к пластине;
- высокий выход годных в результате снижения плотности дефектов, связанных с загрязняющими частицами;
- низкие температуры процессов и (или) более чистые процессы, что снижает уровень примесей в материалах, подвергаемых обработке;
- интеграция процесса и средств его мониторинга, что исключает постоперационный контроль;

стерные системы для целого ряда интегрированных процессов, например для реализации полицидного процесса, металлизации [24], формирования многоуровневого затвора (stacked gate) МДП-транзистора [25], сухого травления многослойных структур и т.п.

На рис. 7 приведен пример организации кластера, в центре которого размещен робот, последовательно перемещающий пластину из грузочной в технологические камеры. Избранные для кластерирования процессы должны быть совместимы по уровню давлений, вносимых загрязнений (проблема взаимозагрязнения технологических камер) и другим параметрам.

Хотя не все ожидаемые от кластерных установок преимущества уже продемонстрированы, есть основания полагать, что они будут реализованы. На этом пути предстоит преодолеть целый ряд трудностей:

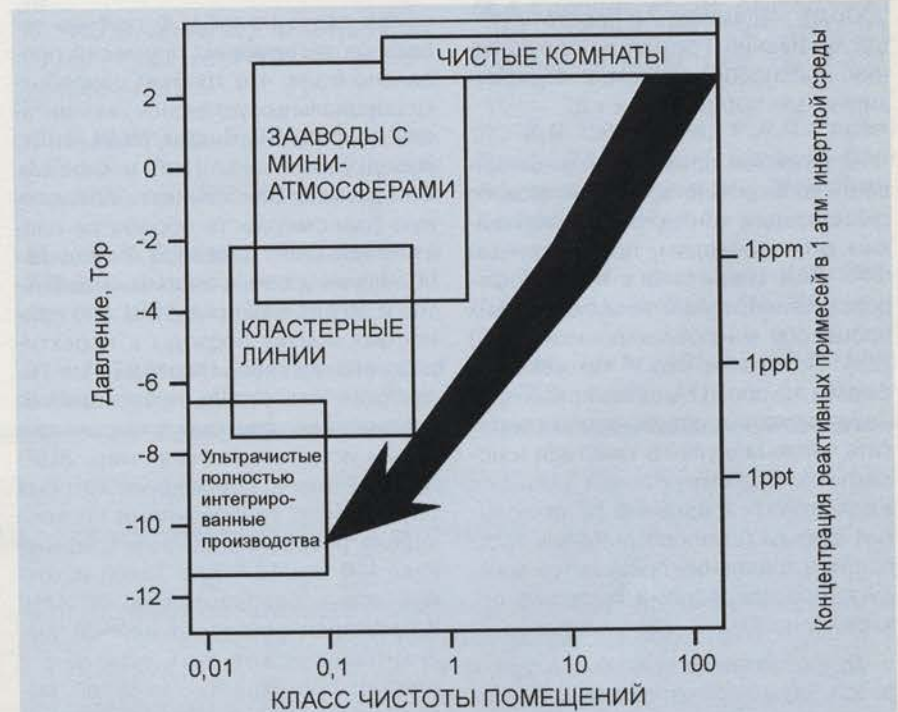


Рис. 9. Диаграмма соответствия давлений и уровня загрязнений при обработке пластин на различных этапах развития полупроводникового производства интегральных схем

- полная автоматизация процесса;
- ускорение загрузки-выгрузки;
- уменьшение размеров и снижение стоимости оборудования.

В настоящее время в лабораториях многих фирм изучаются кла-

увеличить производительность некоторых процессов, исключить процессы с жидкими средами (ввести сухие технологии), разработать быстрые термические процессы, подтвердить высокое качество обработки одной пластины большого диаметра (>



## Требования к параметрам легированных областей МДПТ

| Параметр  | 1995г.             | 2001г.           | 2007г.           | 2010г.           |
|---|--------------------|------------------|------------------|------------------|
| Разрешение, мкм   | 0,35               | 0,18             | 0,10             | 0,07             |
| Эффективная длина канала, мкм   | 0,28-0,35          | 0,14-0,18        | < 0,10           |                  |
| Глубина залегания переходов сток/исток (С/И), мкм                                   | 0,1-0,2            | 0,07-0,13        | < 0,07           | < 0,05           |
| Глубина залегания примеси в канале, нм  | 70-150             | 30-80            | 15-45            | 10-30            |
| Поверхностная концентрация в канале, см <sup>-3</sup>                               | 10 <sup>18</sup>   | 10 <sup>19</sup> | 10 <sup>20</sup> | 10 <sup>20</sup> |
| Поверхностная концентрация под контактами С/И, см <sup>-3</sup>                     | > 10 <sup>20</sup> |                  |                  |                  |
| Суммарная концентрация загрязняющих частиц на поверхности пластины, м <sup>-2</sup> | 1400               | 500              | 200              | 150              |
| Минимальный размер детектируемых частиц, мкм  | 0,12               | 0,06             | 0,03             | 0,02             |

200мм), надежность и простоту обслуживания и ремонта оборудования, приспособляемость к модернизируемым процессам и т.д.

В качестве примера можно привести усовершенствованный процесс силидизации контактов к супермелким р-п переходам, предложенный ФТИ РАН совместно с Фраунгоферовским институтом технологических процессов микроэлектроники (ФРГ) [26]. По сравнению с технологией фирмы Advanced Materials новый процесс позволяет существенно сократить число модулей в кластере и исключить промежуточный процесс жидкостного травления (в технологии фирмы Advanced Materials жидкостное травление проводится между двумя операциями быстрого отжига) (рис.8).

Другой пример нового подхода к разработке процессов для кластерного оборудования — создание новых типов установок ионной имплантации для формирования супермелких р-п переходов. В соответствии с законами масштабирования глубина залегания р-п перехода по мере уменьшения горизонтальных размеров МДП-транзистора должна уменьшаться. Требования к областям стока и истока и к глубинам залегания легирующей примеси в канале в зависимости от минимального топологического размера указаны в табл.4.

Как видно из табл. 4, глубина залегания легирующих примесей предельно мала, что требует разработки специальных установок имплантации ионов с энергиями, равными по порядку величины 1кэВ и меньше. Они должны обеспечивать предельную равномерность обработки пластин большого диаметра и предельно низкий уровень вносимых дефектов и загрязняющих частиц. Это полностью меняет подходы к проектированию установок, которые из гигантских «монстров» превращаются в компактные системы с широкопучковым источником (например, ЭЦР-плазма) ионов, применение которых обусловлено требованиями низкого уровня рабочего давления в источнике ( $10^{-3}$  —  $10^{-5}$  Тор). Такой источник ионов разработан во ФТИАН. Компактная установка ионной имплантации может быть включена в кластер, состоящий из модулей, выполняющих такие технологические операции, как вскрытие окон под имплантацию, имплантация, очистка поверхности, быстрый термический отжиг и, возможно, нанесение двуокиси кремния.

Кластерные установки имеют соответствующие международным стандартам (в зависимости от размера пластин) порты загрузки-выгрузки и присоединения технологических модулей, что позволяет объединять их в станции и, в итоге, пол-

ностью интегрированную систему производства ИС [27]. Поскольку применение кластерных систем существенно смягчает требования к чистоте окружающей среды, создание кластерных минифабрик будет, образно говоря, возвратом к «производству в гараже» (много лет назад фирма Intel организовала производство первых микропроцессоров в здании бывшего гаража), что, помимо перечисленных достоинств, позволит приборостроительным предприятиям значительно сократить сроки своих разработок.

**За горизонтом.** В основу полностью интегрированных производственных линий будущего будут положены три основных принципа:

- ультрачистые процессы в ультрачистой среде (сверхвысокий вакуум);
- формирование атомарно плоской и ультрачистой поверхности пластины, свободной от природного оксида, частиц, органических и металлических загрязнений;
- прецизионный контроль (мониторинг) параметров процессов, и, как следствие, их полная автоматизация [28].

Прообразом подобных линий являются многокамерные установки молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), включающие камеры загрузки и разгрузки, очистки поверхности пластин, ростовые камеры, камеры нанесения металлических и диэлектрических пленок, имплантации и т.п., а также аналитические средства контроля процессов на месте их проведения (in situ). Примером такой установки может служить многокамерная машина МПЭ с системой загрузки и транспорта пластин, несколькими камерами высоковакуумного осаждения из газовой фазы (ОГФ), быстрого термического ОГФ, ОГФ из металлоорганических соединений, осаждения распылением, хранения пластин и анализа поверхности [29]. На рис. 9 приведена диаграмма соответствия давлений и уровня загрязнений при обработке пластин на различных этапах развития производства интегральных схем.

Развитие полностью интегрированных производственных линий и одновременно космической техники, возможно, позволит в далеком будущем вынести такие заводы в открытый космос («заводы-спутники»). Эта идея привлекательна хотя бы потому, что в открытом космосе может быть достигнут исходный вакуум порядка  $13^{-13}$  —  $10^{-14}$  Тор.

1. M. D. nology

2. K. A. ной л. Гл. ред.

3. S. Radiat. pp. 33.

4. C. H. H. C. конф. 94". 3. ря. Ч.

5. P. 1994

6. A. et al. troni ber- strac

7. G. Solid. No. 6

8. M. Solid. No.

9. I. ogy

10. IBN No.



1. **M.D. Levenson.** *Solid State Technology.* 1995, vol.38, No.2, pp.57–66
2. **К.А. Валиев.** Физика субмикронной литографии. — М., "Наука", Гл.ред. физ.-мат. лит., 1990 г., 528 с
3. **S. Goto, K. Sugishima, Y. Ban.** *Radiat. Phys. Chem.* 1995, vol.45, No.3, pp.333–348
4. **С.В. Гапонов, Ю.Я. Платонов, Н.Н. Салащенко.** Труды Российской конференции "Микроэлектроника-94". Звенигород, 28 ноября–3 декабря. Часть 1, с.5–6
5. **P.N. Dunn.** *Solid State Technology.* 1994, vol.37, No.6, pp.49–56
6. **A. Bruckner, E. Cekan, W. Fallmann et al.** Russian conference "Microelectronics'94", Zvenigorod, 28 November–3 December 1994. Book of abstracts, part 1, pp.35–44
7. **G.B. Elder, L.C. Litt, J.G. Maltabes.** *Solid State Technology.* 1995, vol.38, No.6, pp.51–58
8. **M. Hibbs, R. Kunz, M. Rothschild.** *Solid State Technology.* 1995, vol.38, No.7, pp.69–78.
9. **P. Castrucci.** *Solid State Technology.* 1995, vol.38, No.1, pp.49–56.
10. **G.W. Rudolf, D.T. Bordonaro.** *IBM J. Res. Develop.* 1992, vol.36, No.2, pp.233–276
11. **M.M. Smadi, G.Y. Kong, S.E. Beck.** *J. Vac. Sci. Technol. B10(1), Jan/Feb., 1992, pp.30–36*
12. **G.S. Selwyn, E.F. Patterson,** *J. Vac. Sci. Technol. A10(4), Jul/Aug. 1992, pp.1053–59*
13. **G.S. Selwyn.** *Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1, No.6B, June 1993, vol.32, pp.3068–3073*
14. **J.F. O'Hanlon, H.G. Parks.** *J. Vac. Sci. Technol.* 1992, vol.A 10, No.4, pp.1863–1868
15. **Ю.П. Барышев, К.А. Валиев, М.Н. Золотухин и др.** Труды ФТИАН. "Проблемы субмикронной технологии". Том 6 под ред. А.А. Орликовского. 1993 г., с.34–48
16. **Y. Gotoh, T. Kuhe, Sh. Tachi.** *Jpn. J. Appl. Phys.* 1993, vol.32, pp. 3035–39
17. **T.J. Sommerer, M.J. Kushner.** *J. Appl. Phys., vol.70(3), Aug. 1991, pp.1240–1251*
18. **K.W. Whang, S.H. Lee, H.J. Lee.** *J. Vac. Sci. Technol. A10(4), Jul/aug. 1992, pp.1307–12*
19. **P.K. Gadgil, T.D. Mantei, X.C. Mu.** *J. Vac. Sci. Technol. B12(1), Jan/Feb. 1994, pp. 102–111*
20. **T. Tatsumi, S. Fukuda and S. Kadomura.** *Jpn. J. Appl. Phys.* 1994, vol.33, pp.2175–78
21. **Ю.В. Гуляев, Р.К. Яфаров.** Пре-принт АН СССР. Институт радиотехники и электроники. М., 1988, №14(489), 44с
22. **К.А. Валиев, А.А. Орликовский, Ю.П. Барышев и др.** Труды ФТИАН, Проблемы субмикронной технологии. Том 8 под ред. А.А. Орликовского, 1994 г., с.3–21
23. **С.Ю. Шаповал.** Труды Российской конференции "Микроэлектроника-94". 28 ноября–3 декабря 1994, Звенигород. 1994. Том.1, с.65–66, **А.А. Балыченко, Д.А. Назаров, В.В. Привезенцев.** Там же, с.55–56
24. **K. Derbyshire.** *Solid State Technology.* 1994, vol.37, No. 12, pp.45–49
25. **J.A. Coriale.** *Solid State Technology.* 1994, vol.37, No.9, pp.44–48
26. **I.V. Kasko, A.G. Vasiliev, M.A. Kononov et. al.** Materials for advanced metallization. MAM-95, Radebel, Germany, 1995, pp.31–32
27. **Е.В. Дмитриев, Г.Х. Сатаров.** Труды Российской конференции "Микроэлектроника-94", 28 ноября–3 декабря 1994
28. **T. Ohmi.** *Proceedings of the IEEE,* 1993, vol.81, No.5, pp.716–689
29. **M. Liehr.** *Proc. SPIE.* 1989, vol.1186, p.144

## Представляем авторов номера

**Валиев Камиль Ахметович.** Доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук и Академии наук Татарстана. Лауреат Ленинской премии 1974 года. и Государственной премии Азерб. ССР 1976 года. С 1964 по 1977 год руководил организацией производства и разработкой интегральных схем, возглавляя НИИ молекулярной электроники (г. Зеленоград). Специалист в области физики и технологии субмикронных интегральных схем — новой элементной базы вычислительной техники. Автор ряда монографий и более 500 научных трудов. С 1989 года директор Физико-технологического института и председатель президиума Научного центра по фундаментальным проблемам вычислительной техники и систем управления РАН.

**Орликовский Александр Александрович.** Доктор технических наук. Работал в ФИАН (1981–1983) ИОФАН (1983–1989). В настоящее время заведующий лабораторией микроструктурирования и субмикронных приборов ФТИРАН. Профессор Московского физико-технического института. Автор более 300 научных работ, в том числе монографии и учебных пособий. Профессиональные интересы лежат в области физических основ процессов глубоко субмикронной технологии кремниевых интегральных схем, гетерозепитаксии на кремнии и нанотехнологии.