

И.К. Кикоин

Журнал Квант 1986 №2

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 50
ББК 22
К38

К38 **Кикоин И.К.**
Журнал Квант 1986 №2 / И.К. Кикоин – М.: Книга по Требованию, 2024. – 68 с.

ISBN 978-5-458-31024-6

Журнал Квант 1986 №2

ISBN 978-5-458-31024-6

© Издание на русском языке, оформление
«УОУО Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

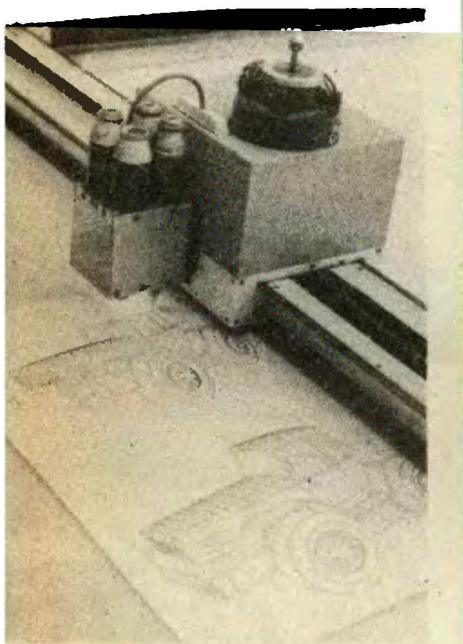
Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

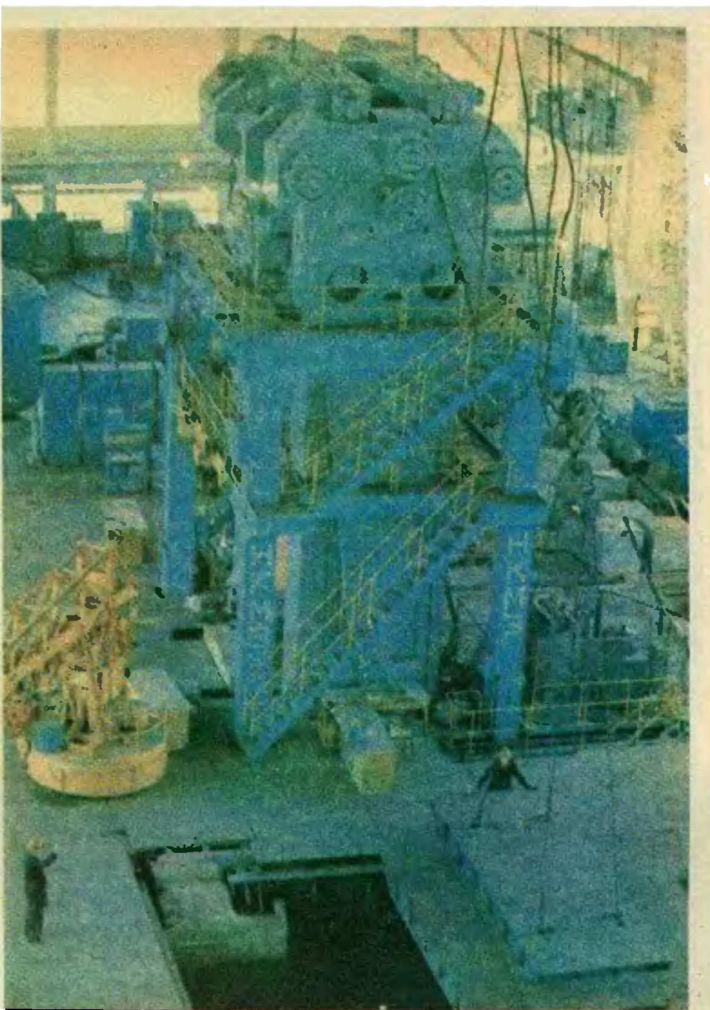
Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

На этой и следующих страницах помещены фото рафии, иллюстрирующие некоторые достижения науки и техники в нашей стране



1 ↑ 2 ↑



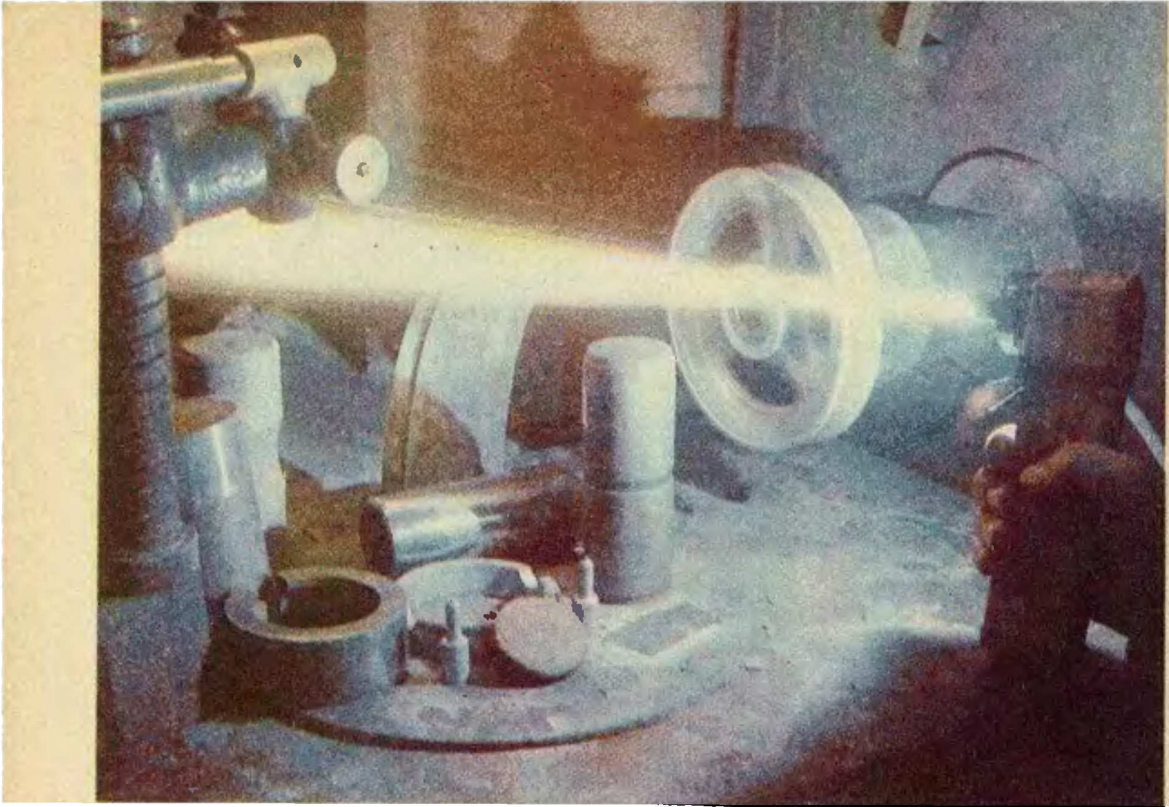
3 ↓



1. Чертежи будущего трактора создаются графопостроителем, входящим в комплекс ЕС-7054. ЭВМ позволяет за несколько секунд рассчитать и изобразить объект в любом ракурсе.

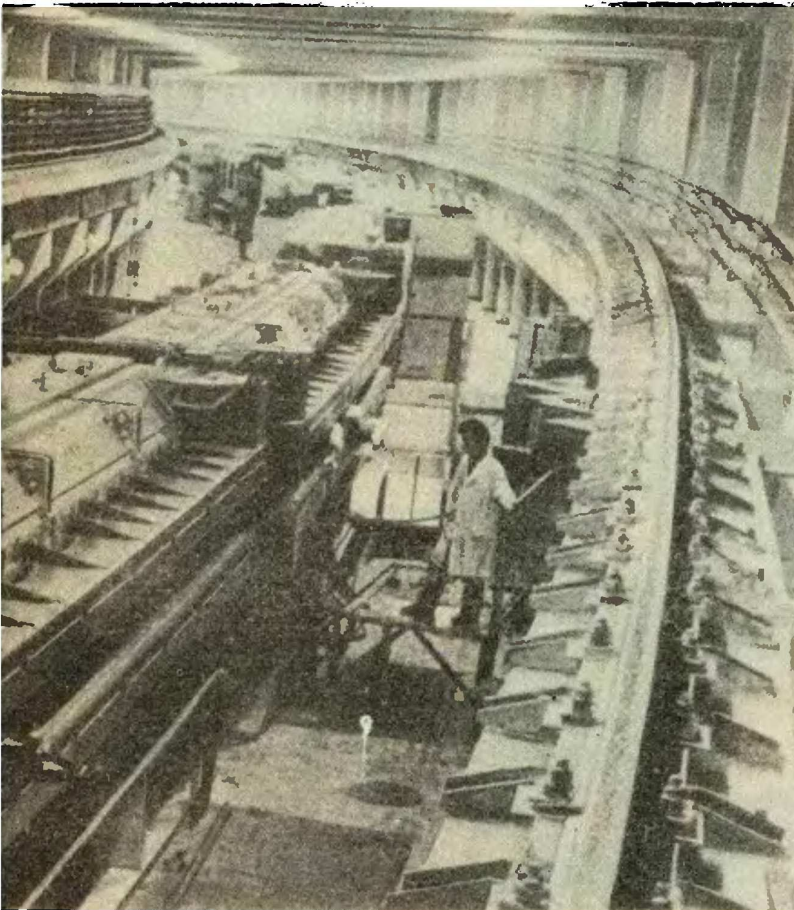
2. Мощный гидравлический пресс, используемый для создания высоких давлений при получении промышленных алмазов.

3. В этой установке протекает процесс, с помощью которого ученые моделируют фотосинтез: под действием света в растворе должны образоваться соединения с большим запасом химической энергии.



4.

5.



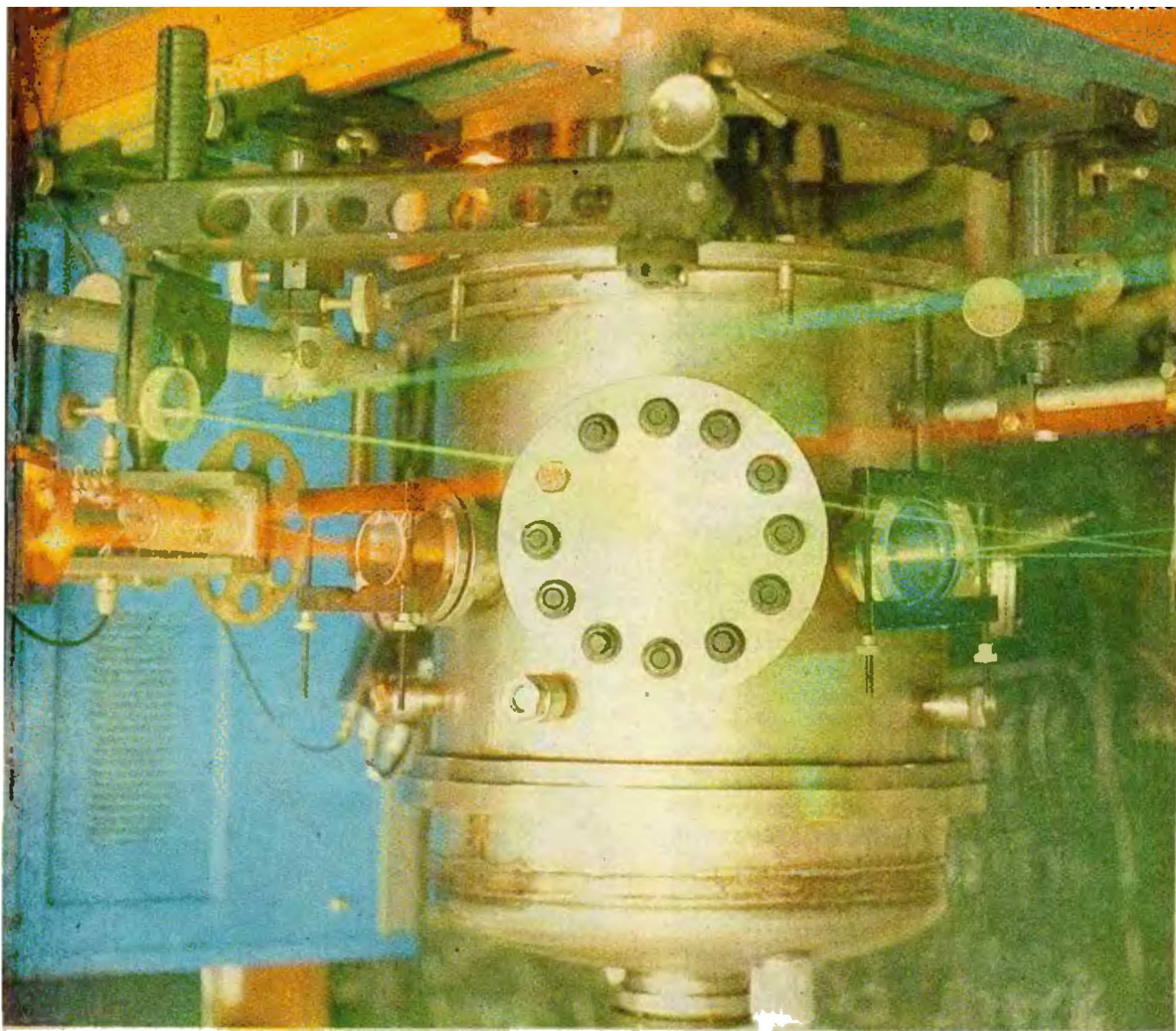
4. Так производят плазменное напыление на детали сельскохозяйственных машин. Вырывающаяся из сопла плазма содержит тончайший порошок. Он с силой «нашлепывается» на деталь, устраняя поверхностные дефекты и придавая детали твердость и жаростойкость.

5. Внутренний вид Серпуховского ускорителя на 76 ГэВ. Недавно здесь была открыта новая частица — глюбол, с помощью которой физики надеются «заглянуть» вглубь частиц, еще вчера казавшихся элементарными.

6. Космическая станция «Вега» на испытательном стенде. В июне прошлого года две такие станции, направляющиеся к комете Галлея, передали на Землю цепную научную информацию о Венере.

7. Первая в мире опытно-промышленная установка У-25 с магнитогидродинамическим генератором проектной мощностью 20 мегаватт. На таких установках происходит прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

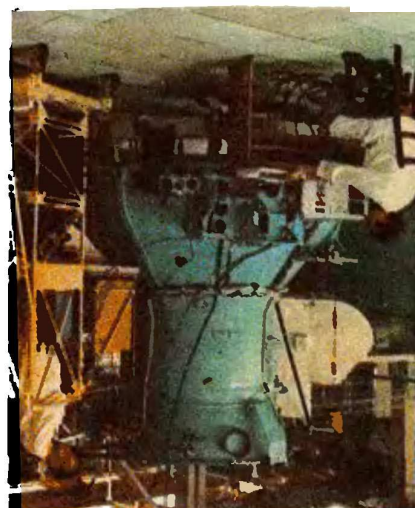
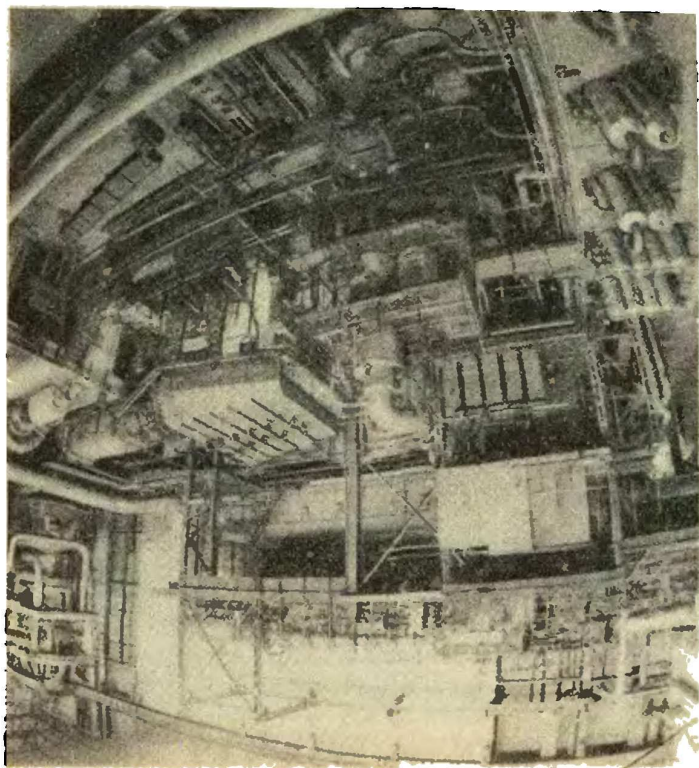
8. Одна из профессий заморозного луча — разделение изотопов. Различные изотопы



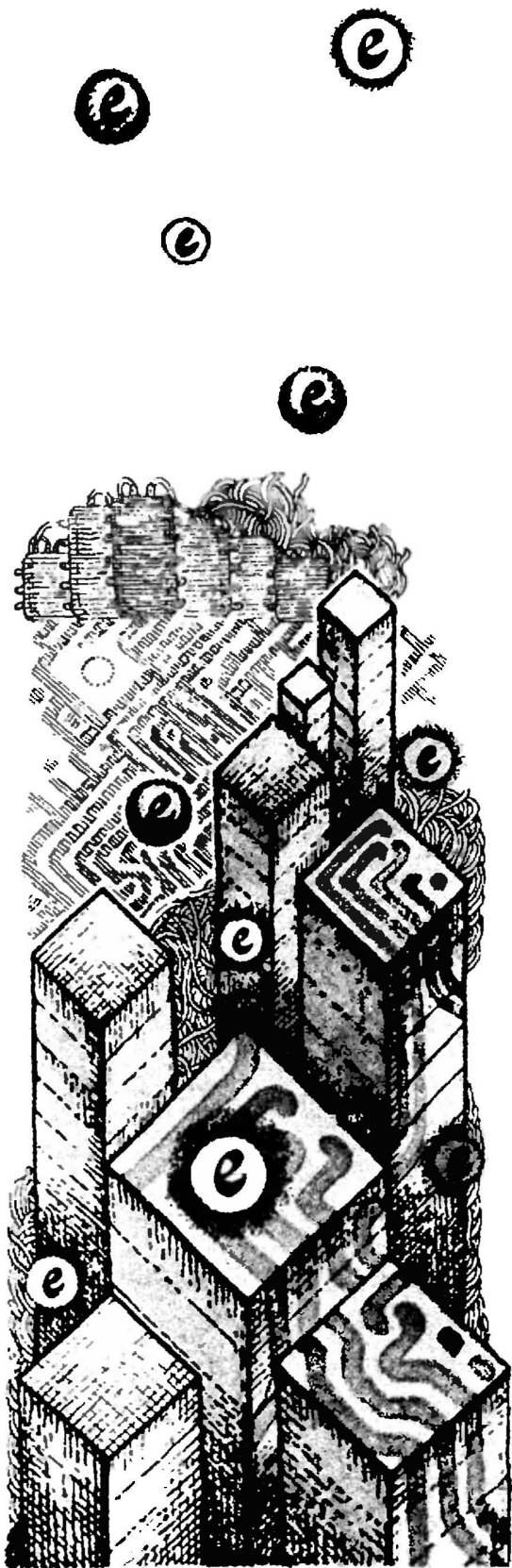
81

72

64



данного химического элемент
та поглощают оптическое из-
лучение излучательно (в оп-
ределенных интервалах ча-
стот). Для создания подхода
того излучения служит ла-
зер с газовой перестрой-
кой частоты.



Осуществить комплекс мероприятий по совершенствованию технологии производства. Расширить в двенадцатой пятилетке в 1,5—2 раза применение прогрессивных базовых технологий...

Организовать массовый выпуск персональных компьютеров. Обеспечить рост объема производства вычислительной техники в 2—2,3 раза. Высокими темпами наращивать масштабы применения современных высокопроизводительных электронно-вычислительных машин всех классов.

Из проекта Основных направлений экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года

Города для электронов

Кандидат технических наук
Д. Г. КРУТОГИН

Интегральные полупроводниковые схемы стали в последние годы основным структурным элементом твердотельной электроники. Даже опытный радиолюбитель теперь вместо сборки усилителя из деталей предпочитает использовать готовую микросхему. Тем более так поступают профессиональные конструкторы. В бытовой радиоаппаратуре, например в телевизоре, число микросхем достигает десятков, в специальной — сотен и тысяч штук на изделие. Многоэлементные интегральные схемы называются большими — сокращенно БИС. Применение таких схем оказывается особенно эффективным в вычислительной технике.*)

Как делаются микросхемы? Давайте проследим за основными этапами изготовления БИС, постараемся оценить трудности, и достижения в их технологии.

БИС под микроскопом напоминает своей четкой планировкой карту большого города. Вот и сравним построение БИС с возведением города, города для электронов.

* От редакции. Этим вопросам посвящен цикл статей под рубрикой «Полупроводниковые элементы вычислительной техники», который публикуется в «Кванте», начиная с 9-го номера 1985 года.

Что нам стоит город построить?

Сначала мы его нарисуем. Любое строительство начинается с общей идеи, с плана. И план, и детальные рабочие чертежи должен подготовить архитектор. Архитекторами БИС являются инженеры-схемотехники. Они создают и план всего «города» — электрическую схему БИС, и проект «типового квартала» — схему отдельного узла, и чертеж конкретного «дома» — основного элемента схемы — транзистора.

Электрическая схема БИС может содержать сотни, тысячи и даже сотни тысяч отдельных элементов — диодов, триодов, резисторов, конденсаторов. Чем больше разнотипных элементов, тем больше сложностей при последующем изготовлении схемы. Поэтому уже на этапе проектирования схему стоит упростить. Существенное упрощение достигается благодаря уникальным свойствам полупроводникового триода — транзистора. Оказывается, при различных способах включения его можно использовать или как диод, или как сопротивление (резистор), или как конденсатор с постоянной или регулируемой емкостью, или как собственно транзистор.

За счет такой универсальности транзистора можно всю электрическую схему представить как схему из транзисторов, работающих в том или ином режиме. На вид схема усложняется (да и какой радиолобитель поставит вместо резистора триод?), но таковы законы микроэлектроники — при технической реализации большой микросхемы это усложнение обернется упрощением технологического процесса: делать придется в общем однотипные элементы — транзисторы, соединяя их в схему токопроводящими дорожками (проводами).

Однако только по плану микросхемы не сделаешь, хотя и без плана не обойтись. Для начала работы нужен точный чертеж микросхемы — топологическая схема. «Топология» дословно — «описание места». На топологической схеме каждый элемент микросхемы, каждая часть транзистора или проводника обретает форму, размеры, положение. Топологическая схема — то же самое, что проект строительства; в отличие от плана, проект — уже руководство к дей-

ствию. Но между планом и проектом в архитектуре и строительстве стоят две науки о земле — география и геология; иначе говоря, проект, опять же в отличие от плана, должен быть «привязан» к месту строительства. Нельзя построить ни дом, ни квартал, не зная, на что будут опираться эти дома, куда потекут дождевые воды или подуют ветры. Архитектор большой микросхемы тоже должен думать о фундаменте, об опорной площадке БИС. От выбора фундамента во многом зависит и последующая технология строительства.

На чем стоит БИС?

Чаще всего в качестве строительной площадки для БИС используется пластина из монокристаллического особо чистого кремния. Чтобы ее получить, кремниевый монокристалл диаметром 100—150 мм и длиной 200—300 мм алмазной пилой нарезают на пластины толщиной 0,4—0,5 мм.

Полученные диски тщательно шлифуют и полируют алмазными же пастами до подлинно зеркального блеска. Но и блеск не радует технологов, ибо, несмотря на отсутствие царапин, поверхностные слои атомов кремния в пластине искажены, изуродованы контактом с частицами алмазного абразива. Как ни малы эти частицы (~0,1 мкм), они все-таки в сотни раз больше межатомных расстояний. Созданные ими в кристаллической решетке дефекты (вмятины, микроскопические трещины, сдвиги) неглубоки (по сравнению с толщиной пластины); но расположены они как раз там, где в готовой микросхеме должны двигаться электроны. Для них эти дефекты — то же, что ямы и горы строительного мусора на городских магистралях. Говорить об интенсивном движении в таких условиях не приходится.

Поэтому последняя обработка поверхности пластины — химическая полировка — «нежно» удаляет нарушенные слои кристалла полупроводника, растворяя их. После этого отполированную пластину тщательно моют в специально подготовленной деионизованной воде, сушат — и вот, наконец, стройплощадка для БИС готова.

За время обработки пластина похудела — теперь ее толщина 250—

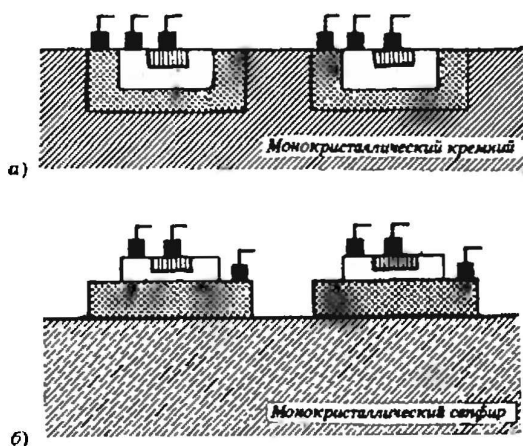


Рис. 1. Таков основной элемент интегральной схемы — транзистор — при «строительстве» на кремниевой пластине (а) и на фундаменте из сапфира (б).

300 мкм. Способ получения пластин не очень экономичен: алмазная пила толщиной 300 мкм, а затем шлифовка переводят в опилки более 60 % объема монокристаллического кремниевого слитка, полученного ценой немалых усилий и энергетических затрат. Да и толщина готовой пластины будет использована плохо. Полезная глубина, то есть толщина тех слоев, в которых потекут нужные нам токи, не превысит 1 мкм. Но сделать пластины более тонкими, к сожалению, нельзя — они будут разрушаться при обработке.

В качестве строительной площадки для БИС можно использовать пластинку диэлектрика — оксида алюминия (Al_2O_3), называемого в обиходе сапфиром. Пластинку сапфира полируют так же тщательно, как кремниевую, а затем на нее наносят монокристаллический слой кремния нужной толщины. Сапфир выбран в качестве подложки потому, что расположение атомов на поверхности кристалла сапфира при определенном направлении среза очень близко к структуре кристаллической решетки кремния. Это обстоятельство позволяет вырастить на поверхности сапфира тонкий кристаллический слой кремния — рабочую область будущего транзистора. Комбинация слоев «кремний на сапфире» — ее обозначают КНС — широко используется в технологии изготовления БИС. Она обладает важным преимуществом: сапфир — прекрасный диэлектрик, он обеспечивает пол-

ную электрическую изоляцию отдельных элементов схемы. С точки зрения топологии микросхемы эти элементы в кремниевой схеме подобны блиндажам, врытым в землю, а в КНС-структуре они подобны домикам (рис. 1).

В рамках нашей аналогии современная БИС эквивалентна городу из 100—150 тысяч домов-транзисторов с развитыми системами коммуникаций (дороги, электроснабжение и т. п.). Размеры этого города — от 2×3 мм до 6×8 мм. И на такой строительной площадке мы будем возводить все дома одновременно. Более того, на одной кремниевой пластине мы будем одновременно строить 100—150 БИС-городов (в зависимости от размеров пластины и площади микросхемы). Наша «городская» строительная площадка в натуральную величину выглядит примерно так, как на рисунке 2.

Возможно, у читателя возник вопрос: а почему бы не делать микросхему на кристалле размером, скажем, 15×15 мм — это ведь тоже немного для пластины диаметром 150 мм, а емкость БИС возрастет на порядок. Оказывается, на кристалле увеличенного размера почти наверняка найдется дефект атомной решетки, способный полностью вывести из строя БИС. На поверхности площадью $1—2$ см² даже у самой лучшей на сегодня пластины встречается хотя бы один дефект. Так что приходится довольствоваться «малым».

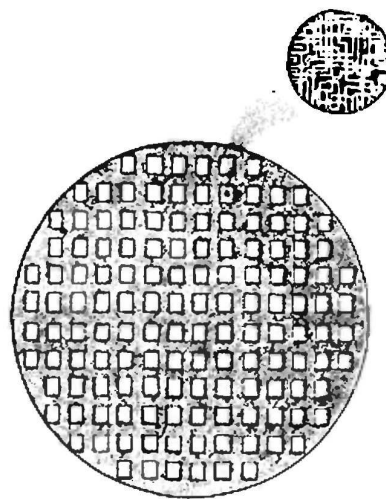


Рис. 2. Примерно так выглядит в натуральную величину «строительная площадка», на которой одновременно возводятся до сотни «городов» БИС. А чтобы разглядеть план отдельного «квартала», необходимо увеличить его в сотни раз.

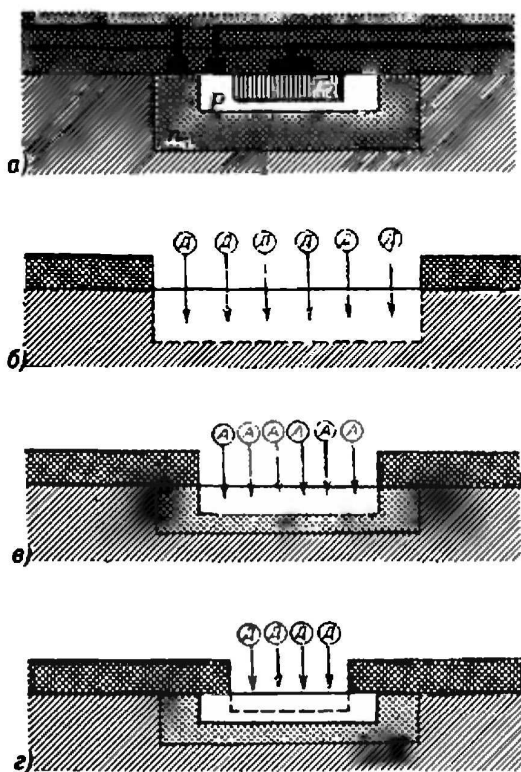


Рис. 3. Постепенно возводятся этажи дома-транзистора (а): сначала коллектор (б), потом база (в), потом эмиттер (г)...

Строить начинаем с ... окон

Итак, мы приступаем к строительству. Дома в нашем городе не низенькие. Посмотрите на рисунок 3,а: три «этажа» в рабочей области транзистора, два этажа металлической разводки да плюс несколько этажей межслойной изоляции; так что в доме-транзисторе по крайней мере 5—7 этажей.

Общее число операций, совершаемых при строительстве интегральной микросхемы, достигает сотни, но при этом некоторые операции повторяются многократно. Мы рассмотрим важнейшие моменты в процессе изготовления БИС.

Рабочие области транзистора — коллектор, база, эмиттер — образуются при легировании кремния соответствующими примесями элементов III и V групп периодической системы. Ввести в твердое тело чужеродные атомы можно, используя явление диффузии. Если пластину кремния нагревать в парах летучего соединения легирующего элемента — например, в парах BH_3 или AsH_3 , — то часть атомов В или As проникнет в кремний.

(Такой процесс называют диффузионным легированием.) Чтобы примеси проникали не всюду, а лишь в места, предусмотренные топологией БИС, надо защитить поверхность пластины экраном, непроницаемым для примесных атомов. В экране надо оставить «окна»: через них на очередной этап будут поступать «стройматериалы» — атомы примесей (доноры и акцепторы) будут проникать в кремний, формируя рабочие области транзистора (см. рисунок 3, б—г).

Таким экраном для кремния оказался его собственный оксид SiO_2 . Достаточно «толстый» слой оксида легко образуется на поверхности кремния при температуре около 1000°C ; он непроницаем для примесных атомов; устойчив при температуре диффузии; прочно держится на кремнии. Растворение SiO_2 в кислоте (травление) позволяет проделать в нем окна для последующей диффузии. (Далеко не всегда технологам так везет. Например, прекрасный полупроводниковый материал — арсенид галлия GaAs — не образует такого защитного слоя при окислении, и его экранирование превращается в отдельную проблему.)

Легко ли «прорубить окно»?

Прежде чем протравливать окна в SiO_2 , надо защитить от растворения остальную часть оксидной пленки (на этом этапе защитный слой сам нуждается в защите). Здесь включается важнейшая в технологии микроэлектроники процедура — фотолитография. Цель ее — «раскрыть» защитный слой SiO_2 в соответствии с топологической схемой БИС.

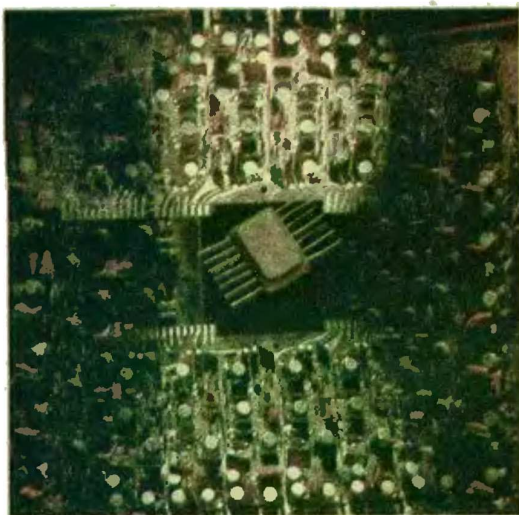
Фотолитография — это совокупность операций, связанных с применением светочувствительных составов, подобных тем, которые наносят на фотопленку или фотобумагу. Составы эти называют фоторезистами. Глагол «to resist» в английском языке означает «сопротивляться». Засвеченный фоторезист легко растворяется в травящих растворах, незасвеченный — «сопротивляется» травлению. (Можно подобрать и такой состав, который, наоборот, становится устойчивым после засвечивания.)

На специальной центрифуге жидкий резист тонким ровным слоем размазывается по поверхности окисленной пластины кремния и подсушивается

ется. Затем на пластину, так же как при обычной контактной фотопечати, накладывается стеклянная пластинка, в которой прозрачны лишь отдельные участки — на месте будущих окон. Эта пластинка называется фотошаблоном и заслуживает отдельного рассказа. Но сначала закончим разговор о кремниевой пластине. После наложения фотошаблона производят экспонирование (засвечивание). Экспонированные (через прозрачные окна) участки фоторезиста, растворяясь при травлении, открывают доступ травителю к пленке SiO_2 ; в ней образуются необходимые нам окна, то есть незащищенные участки поверхности чистого кремния, через которые будет идти диффузия. Фоторезист сделал свое дело, и теперь остатки его удаляют. Фотолитографирование, включающее нанесение, экспонирование, травление и удаление фоторезиста, на этом закончилось. Но после диффузии все надо будет начинать сначала.

Портрет будущей БИС

Кто вбивает первый колышек на будущей стройплощадке? Геодезист. Без геодезистов с их нивелирами и теодолитами не осуществить ни один строительный проект. Изготовление фотошаблона — это своего рода «геодезические работы» на микросхемной стройке.



Такова готовая БИС — город из множества домов-транзисторов, спрятанный в небольшую коробочку. Ее компактность и элегантность особенно бросается в глаза на фоне схем, построенных на основе прежних технологий.

Фотошаблоны — это «позтажные» планы, причем во всем БИС-городе нет двух одинаковых этажей. Размеры плана — приблизительно 5×5 мм. И на такой площадке надо «уложить» до 10^6 элементов. Выполнить подобную задачу без ошибок даже на чертеже удобных размеров, «увязать» чертежи соседних этажей БИС не в состоянии ни один самый аккуратный и старательный конструктор. Даже если бы такой человек нашелся, то слишком долго пришлось бы ему эту работу делать. Рабочие чертежи БИС проектируются на ЭВМ по специальным программам, а потом проверяются по не менее сложным контрольным программам. Готовый чертеж несколько раз переснимают с уменьшением на фотопластинки, доводя его размеры до «натуральной величины» — до размера микросхемы, и многократно размножают, с тем чтобы готовый фотошаблон соответствовал площади кремниевой пластины и позволял экспонировать на нее сразу несколько десятков, а то и сотен «изображений» микросхемы.

Таким образом, фотошаблон — это микротрафарет для разметки этажей. И сколько этажей — столько и фотошаблонов.

Когда белый свет не мил

Если на площадке размером 5×5 мм нужно разместить 10^6 транзисторов, то каждому из них отводится менее 25 мкм^2 . Область эмиттера — самая маленькая рабочая область в транзисторе — должна иметь размеры около $2 \times 3 \text{ мкм}$; ширина металлических проводников — порядка 1 мкм . Возникает вопрос: с какой точностью можно выдержать эти размеры при «строительстве»?

Прежде всего они должны быть соблюдены при изготовлении фотошаблонов. Точность, которую обеспечивает метод фотолитографии, ограничена длиной волны света, используемого при экспонировании. При падении света на край щели в шаблоне происходит дифракция. Как известно, из-за дифракции границы геометрической тени всегда несколько размыты. Четкость изображения зависит от длины волны света — чем меньше длина волны, тем лучше качество изображения. В этом плане синий и фиолетовый свет предпочтительнее, чем

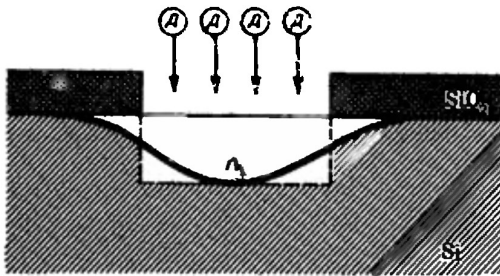


Рис. 4. Вот к чему приводит боковая диффузия: за пределами рабочей области (коллектор, база, эмиттер) концентрация примеси не сразу спадает до нуля, а постепенно.

красный. А чтобы нарисовать полоску шириной 1 мкм с точностью хотя бы $\pm 0,1$ мкм, видимый свет (длина волны от $8 \cdot 10^{-7}$ м до $4 \cdot 10^{-7}$ м, то есть от 0,8 мкм до 0,4 мкм) вообще не годится. Можно использовать более короткие электромагнитные волны, например, рентгеновские; но этот метод, называемый рентгенолитографией, имеет свои неудобства.

Обнадеживающие перспективы сулит «засвечивание» резиста электронным лучом — так называемая электронная литография. Электронный пучок движется по шаблону примерно так же, как по экрану телевизора или осциллографа. Отклоняющие системы могут переместить его в любую точку шаблона, а управляя «яркостью» пучка, можно регулировать засветку резиста. Конечно, здесь используются уже не фотоэмульсия, а специальные вещества, разрушаемые электронным пучком.

Оказалось, что электронная засветка слоя оксида кремния ускоряет его травление в кислоте в несколько раз. Это позволяет отказаться от резистных масок и формировать окна прямо в оксидном защитном слое. Пучок электронов нужно сделать необычайно узким и перемещать с точностью до 0,1—0,2 мкм, постоянно регулируя яркость. Какой оператор, даже работающий с микроскопом, выполнит эту задачу одинаково успешно миллионы раз по всей площади подложки? Никакой. Эту работу можно доверить только ЭВМ, сопряженной с электронно-лучевым прожектором. (Вот, кстати, пример срачивания ЭВМ с исполнительным агрегатом!) Заложенный в ее памяти проект шаблона, ранее ею же и рассчитанный, ЭВМ превращает в графариет для разметки БИС. При этом повышается точность изготовления окон.

Шаблоны — главный планировочный инструмент микросхемной технологии; благодаря им БИС-строительство из индивидуального становится массовым, или, как говорят специалисты, групповым.

Будем считать, что шаблоны изготовлены, с их помощью на пластине кремния в защитном слое оксида проделаны окна, и мы можем приступать к формированию рабочих областей.

Атомы отпускаются поштучно

Диффузионное легирование, о котором говорилось выше, широко применяется в микроэлектронике. Основное достоинство этого метода — его простота. Но есть у него и недостатки. Вот один из них: атомы примесного элемента, попадающие через окна в решетку кремния, движутся в общем хаотически и, значит, не обязательно перпендикулярно плоскости пластины. В результате вместо ожидаемой четкой формы области коллектора, такой, как на рисунке 3, б, мы получим нечто иное (рис. 4). Искаженные боковые области $p-n$ -перехода ухудшают параметры схемы. Другой недостаток диффузионного легирования: концентрация вводимых примесей ограничена. При определенном значении концентрации наступает насыщение; предел растворимости некоторых примесей в кремнии очень мал.

Распределение примеси по глубине кристалла при диффузионном легировании всегда оказывается таким, как показано на рисунке 5, и изменить его так, чтобы за пределами рабочей области концентрация примеси резко падала, не удастся. Вот поэтому на смену диффузионному легированию пришел процесс, называемый ионной имплантацией, или ионным внедрением. Суть его в том, что легирующие примесные ионы разгоняются в вакууме электрическим полем и, имея значительную скорость, обрушиваются на мишень — пластину кремния. Чем выше энергия ионов, тем глубже проникают они внутрь мишени («глубже» — на доли микрона). Число примесных ионов легко контролировать по величине тока, создаваемого ими в полете. Изменяя направление ионного пучка электрическим или магнитным полем, можно добиться равномерного распределения примеси по нужной площадке. При

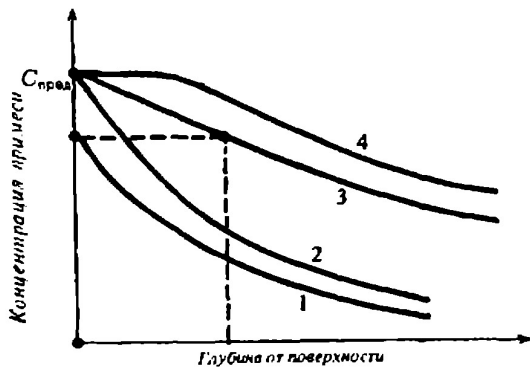


Рис. 5. Распределение концентрации примеси по глубине при диффузионном легировании. Красными линиями обозначен желательный профиль концентрации. Изменяя начальную концентрацию примеси на поверхности (сравните кривые 1 и 2), температуру (для кривой 2 она меньше, чем для 3) или продолжительность процесса диффузии (для кривой 3 в несколько раз меньше, чем для 4), можно получить необходимую концентрацию на заданной глубине.

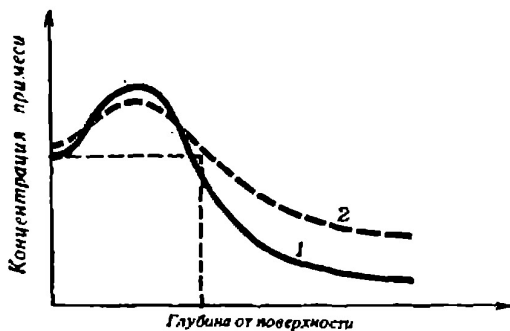


Рис. 6. При ионной имплантации распределение концентрации по глубине зависит от энергии и дозы ионов (кривая 1). Максимальная концентрация может превышать предельное значение, характерное для процесса диффузии. Пунктирная кривая 2 показывает распределение примеси после обработки, устраняющей поверхностные дефекты ионной бомбардировки.

ионной имплантации практически нет бокового проникновения, и профиль распределения примеси по глубине (рис. 6) получается более выгодным, чем при диффузионном легировании.

У метода ионной имплантации есть и свои неприятные стороны. Ионы примеси обычно входят в решетку с энергиями в сотни тысяч электрон-вольт, и за каждым ионом остается след причиненных им разрушений — сдвинутых или выбитых со своих равновесных положений атомов кристалла. При больших дозах имплантации приповерхностные слои материала так искажаются, что теряют подобие кристаллической структуры, становятся аморфными. Чтобы отчасти вос-

становить порядок, пластину приходится подвергать дополнительной обработке.

Легирование полупроводников методом ионной имплантации позволяет существенно повысить плотность упаковки транзисторов в микросхеме (за счет точного выполнения заданных размеров рабочих областей).

Транзистор у телефона

Итак, последовательным повторением операций защиты поверхности, нанесения масок и легирования мы создали плотную упаковку транзисторов на пластине БИС. Однако самой схемы у нас пока нет. Мы построили много отдельных домов, но это еще не город. Необходима система коммуникаций; к домам-транзисторам надо подвести энергопитание и линии связи. Делают это опять-таки с помощью фотолитографии. На поверхность кристалла наносят металлическую разводку и контактные площадки. Разводка сложных микросхем бывает и неоднослойной; тогда «этажность» растет за счет слоев разводки и слоев изоляции.

Сечение «проводка» металлической разводки — порядка 1×2 мкм. Представьте, какой бедой обернется для БИС попадание под слой металла ничтожной микронной пылинки, заметить которую можно только в микроскоп!? Обрыв цепи выведет из строя участок схемы, а может быть, и всю схему целиком. Не менее опасно попадание пылинки в рабочую область при легировании. Чтобы этого не случилось, в цехах, где «собирают» микросхемы, день и ночь борются за чистоту. Мощнейшие фильтры отлавливают пылинки, каждый работник прежде, чем попасть в цех, проходит под воздушным «обеспыливающим» душем, несколько раз в день проводится влажная уборка. Внутри такого чистого цеха есть особо чистая комната, в которой установлены герметичные боксы — в них и рождаются микросхемы.

Главным источником возможного загрязнения и вообще самым ненадежным звеном в технологическом процессе является человек. Даже при максимальной добросовестности он может ошибиться, допустить неточность. К чему это приведет? Пусть каждую из сотни операций по сборке БИС человек выполняет с надежностью 99%. Какая часть готовой продукции будет гарантировано надежна? Микросхема калькулятора дает ответ за секунды: $0,99^{100} \approx 0,36$ — чуть больше трети.

Поэтому очень нужно отстранить человека от непосредственного участия в изготовлении микросхемы. Решение этой задачи — еще один шаг на пути усовершенствования технологии БИС.

(Окончание см. на с. 20)