

# Противоречивая микроэлектроника

**История развития техники есть история возникновения и разрешения технических противоречий. Попытка проследить линии, по которым происходило развитие основного конструктивного элемента современной радиоэлектроники (печатных плат) была сделана автором в статье [1]. При этом использовались элементы теории решения изобретательских задач (ТРИЗ), разработанной в середине прошлого века Г. С. Альтшуллером. Линии развития другого основного конструктивного элемента (интегральных схем) не менее противоречивы [2]. О некоторых этапах этого пути и рассказывается в статье.**

**Владимир Уразаев,**  
к. т. н.

urazaev@yandex.ru

## Издали

Бурное развитие микроэлектроники, наблюдаемое в последние годы, стало возможным благодаря совершенствованию техники. Первым шагом к возникновению микроэлектроники был переход от электронных вакуумных ламп к твердотельным приборам, изготавливаемым из материалов с полупроводниковыми свойствами.

Лидерство в изобретении транзистора принадлежит сотрудникам лаборатории Bell Telephone Laboratories (1948 г.). Первые транзисторы создавались на основе германия, были точечными, имели нестабильные характеристики, недостаточную надежность, очень высокий уровень шумов и... очень дорогими.

Переход от точечных транзисторов к плоскостным (планарные технологии), так же как и переход от германия к кремнию, был осуществлен фирмой Texas Instrument Incogration в 1953 году. Применение кремния позволило резко увеличить мощность транзисторов. Освоение групповой технологии изготовления транзисторов, основанной на использовании диффузии, позволило значительно уменьшить их себестоимость. Тогда же стало ясно, что электронные лампы доживают последние дни.

Первая интегральная схема, а именно с интегральными схемами ассоциируется ныне понятие «микроэлектроника», была выполнена фирмой Fairchild Semiconductor в 1961 году. Эта интегральная схема представляла собой триггер, состоящий из четырех

биполярных транзисторов и двух резисторов. В 1963-м фирма RCA выпустила первую интегральную логическую схему, включающую 16 МОП-транзисторов. И процесс пошел... Быстрому распространению интегральных схем способствовали групповые планарные технологии, отработанные в производстве транзисторов.

## Какие бывают интегральные схемы

По способу изготовления и получаемой структуре различают два принципиально разных типа интегральных микросхем: полупроводниковые и пленочные [2]. По ряду причин главенствующее положение занимают полупроводниковые микросхемы, представляющие собой основу современной микроэлектроники.

*Полупроводниковая интегральная схема* — это микросхема, элементы которой выполнены в приповерхностном слое полупроводниковой подложки. Технология их изготовления основана на легировании полупроводниковой (кремниевой) пластины поочередно донорными и акцепторными примесями, в результате чего под поверхностью образуются тонкие слои с разным типом проводимости и *p-n*-переходы. При этом отдельные слои используются в качестве резисторов, а *p-n*-переходы предназначены для реализации диодов и транзисторов. Локальное легирование осуществляется с помощью масок, причем роль маски обычно выполняет пленка двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ), покрывающая поверхность кремниевой пластины. «Окна» в этой пленке гравировались специальными методами. Фрагмент структуры полупроводниковой интегральной схемы приведен на рис. 1.

*Пленочная интегральная схема* — это микросхема, чьи элементы выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность диэлектрической подложки (стекло, керамика и др.). В зависимости от толщины пленок различают тонкопленочные (1–2 мкм) и *толстопленочные* (10–20 мкм и выше) интегральные схемы. В толстопленочных технологиях используются пасты различного состава, в тонкопленочных технологиях пленки осаждаются на подложку из газовой

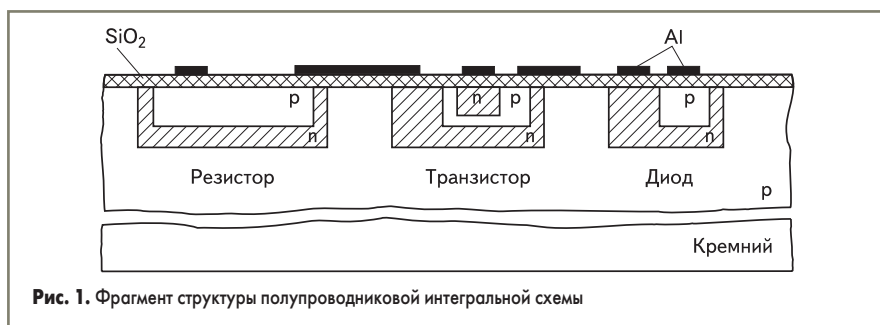


Рис. 1. Фрагмент структуры полупроводниковой интегральной схемы

фазы. Пленочные микросхемы содержат только пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и т. д.), поскольку получить в пленках активные компоненты (транзисторы) пока еще не удалось. Как следствие, такие микросхемы функционально очень ограничены.

В ответ на подобные ограничения появились гибридные интегральные схемы, которые представляют собой комбинацию пленочных пассивных элементов и активных компонентов, расположенных на общей диэлектрической подложке. Дискретные активные компоненты, входящие в состав таких интегральных схем, называют еще и навесными. Известны и другие «смешанные» микросхемы.

Если «сделать наоборот», то получится так называемая совмещенная интегральная схема. Это микросхема, в которой активные элементы выполнены в приповерхностном слое полупроводникового кристалла, а пассивные нанесены на предварительно изолированную поверхность кристалла в виде пленок.

Что же объединяет данные типы микросхем? Групповые планарные технологии их изготовления. Говорят, планарные (плоскостные) технологии — величайшее научно-техническое достижение XX века и их следует изучать в школе, как учат падежи и историю Древней Греции [3]. Микротехнологии — это комплекс групповых прецизионных планарных технологий, разработанных для производства изделий микроэлектроники. Сущность таких технологий проста по смыслу и одновременно сложна по содержанию. Она определяется чередованием целого ряда сложных уникальных процессов [4]. Эти технологии непрерывно модернизировались, но принципы, на которых они основаны, оставались неизменными. Какие же технические противоречия приходилось преодолевать в процессе модернизации этих технологий, по каким законам происходило их развитие?

### Гонка за разрешением

Нет, не за разрешением сделать что-нибудь. Под разрешением понимается точность формирования заданного рельефа (рисунка) микросхем. Чем выше точность, тем выше плотность упаковки отдельных элементов внутри микросхемы, тем больше количество логических элементов, размещаемых на единице площади микросхемы, и, соответственно, выше ее функциональные возможности.

В технологии изготовления интегральных микросхем очень важное место принадлежит маскам, обеспечивающим локальный характер напыления, легирования, травления, а в некоторых случаях и эпитаксии. Любая маска есть совокупность отверстий (окон). Как их получить? Решением этой задачи занимается литография. Литография (от греческого lithos — «камень» и gráphō — «пишу», «рисую») — способ формирования рельефа (рисунка) в слое металла, диэлектрика или полупроводника [5]. Процесс литографии осуществляется с использованием резистов, чувствительных к внешнему облучению и способных при этом переходить в нерастворимое устойчивое к действию

травителей состояние (негативные) или, наоборот, разрушаться (позитивные).

Основная характеристика процесса литографии — разрешающая способность, то есть способность отдельно воспроизводить мелкие элементы рисунка. Обычно разрешающая способность оценивается по минимальной ширине воспроизводимой линии и определяется преимущественно способом экспонирования и длиной волны воздействующего излучения. Теоретики говорят, что предел разрешающей способности — половина длины волны экспонирующего излучения. Всему виной — дифракция света. Практика подтверждает эти теоретические предпосылки. По мере увеличения требований к уровню разрешения литографического процесса длина волны используемого излучения становится все меньше.

Оптическая литография или фотолитография обычно использует излучение с длиной волны  $\lambda = 0,36-0,45$  мкм. Если поделить пополам это значение, мы получим теоретически возможное разрешение рисунка микросхемы. На практике оно будет чуть хуже (1–2 мкм). Такой уровень разрешающей способности достаточен для получения большей части современных печатных плат (носителей микросхем), но уже недостаточен для большинства современных интегральных микросхем. Маленький шаг вперед позволило сделать использование глубокого ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 0,2-0,3$  мкм). Появилась возможность воспроизводить элементы с размерами 0,5–0,8 мкм и менее. Большой шаг вперед позволило сделать использование иных, более коротковолновых излучений (рентгенолитография, электролитография).

Рентгенолитография ( $\lambda = 0,2-0,5$  нм) — один из наиболее высоко разрешающих методов литографии. Она позволяет получить рисунок с размерами элементов 0,1 мкм и менее.

Электронная литография обладает наиболее высокой разрешающей способностью. Дебройлевская длина волны электрона (да, электрон это еще и волна) менее 0,1 нм. И эффекты дифракции, ограничивающие разрешающую способность электронной литографии, очень малы. Но имеются и другие осложняющие факторы, например, рассеяние электронов в слое резиста, их отражение от подложки, поэтому реально достижимый уровень разрешения хуже. Наибольшее практическое значение получила сканирующая электронная литография. Ее основное достоинство — отсутствие специальных шаблонов для создания требуемой топологии интегральных схем.

И все же, говорят, что возможности твердотельной электроники приближаются к своему пределу. А лимитирующей стадией являются именно процессы литографии. Размер составляющих элементов микросхем уменьшается каждые 3 года с коэффициентом 0,7 [2]. По другим данным (закон Мура) плотность упаковки элементов микроэлектроники должна удваиваться каждые 1,5–2 года. Для достижения все более высокого уровня разрешения может быть использована «вилка» между теоретически возможным и реально достижимым

уровнем разрешения внутри каждого метода литографии. Но для этого требуются новые материалы, новое оборудование и еще многое другое. Да и теоретически возможные пределы достижения высокого разрешения — не беспредельны.

65-нм технологии — реалии современной твердотельной электроники. Отработаны, но пока еще преимущественно в лабораториях, и технологии 45–50 нм. А что же дальше? Дальше, скорее всего, произойдет переход на качественно иной уровень. Кривая S-образного развития твердотельной электроники приближается к своему пределу. Впереди — другая электроника. Химические, биологические и иные варианты микросхем будущего позволят реализовать принципиально новый уровень разрешения — уровень, соизмеримый с линейными размерами атомов и молекул. Экспериментальных образцов создано уже более чем достаточно. Вопрос лишь в том, когда это количество перейдет в качество.

### А как совместить?

Для многослойных конструкций, а интегральные микросхемы именно таковы, проблема разрешения превращается и в проблему совмещения рисунков в отдельных слоях. В технологических циклах изготовления диодов, транзисторов, а тем более интегральных микросхем в целом, процесс фотолитографии используется многократно (отдельно для получения базовых слоев, эмиттеров, омических контактов и т. д.). При этом возникает проблема совмещения фотошаблонов. Обычно в фотошаблонах применяются специальные реперные знаки, которые переходят в рисунок. Для того чтобы сформировать следующий слой, их аккуратно совмещают под микроскопом с реперными знаками следующего фотошаблона. И так далее, до 15–20 раз. С каждым разом ошибка совмещения все более увеличивается и о высокой точности изготовления микросхем остается только мечтать.

Уход от шаблонов к сканирующей, например электронной сканирующей литографии, позволил существенно повысить уровень разрешения. Сущность сканирующей электронной литографии заключается в том, что сфокусированный пучок электронов, в соответствии с заданной программой, перемещают по поверхности пластины. Таким способом осуществляется «гравирование» отверстий в резисте или даже непосредственно в окисном слое. Но и этот метод далеко не идеален. Хотя бы потому, что так называемые люфты имеются в любом, даже самом высокопрецизионном оборудовании.

Стремление к идеальности отразилось в названии еще одного способа совмещения — самосовмещение, который уже нашел практическое применение в технологиях изготовления микросхем [2]. В данном способе все-таки используются маски. Следовательно, по отношению к сканирующей электронной литографии делается шаг назад. Но в качестве масок для получения последующих элементов используются... ранее полученные элементы.

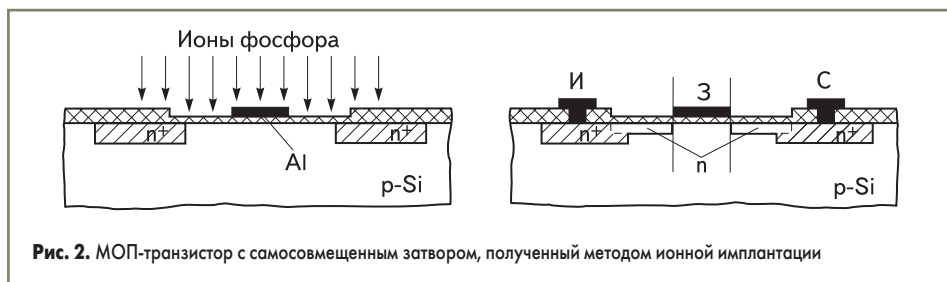


Рис. 2. МОП-транзистор с самосовмещенным затвором, полученный методом ионной имплантации

Не правда ли, очень красивый способ повышения идеальности технической системы путем использования ее внутренних ресурсов? Самосовмещение применяется в изопланарной технологии и в технологии изготовления МОП-транзисторов с самосовмещенным затвором (рис. 2).

Для реализации технологии самосовмещенных затворов пришлось всего лишь изменить последовательность технологических операций. Слои истока (и) и стока (с) транзистора наносятся не до, а после нанесения слоя затвора (з). Как следствие, появляется возможность использовать затвор в качестве маски для получения истока и стока. Поэтому края слоя затвора и слоев истока и стока будут практически совпадать, а их перекрытие отсутствовать. Существенное уменьшение емкостей перекрытия позволило примерно на порядок (!) повысить быстродействие МОП-транзисторов.

**Травить — не травить**

Травление — одна из типовых операций, используемых в технологии изготовления интегральных микросхем, и в первую очередь полупроводниковых микросхем. В общем случае речь идет об использовании специальных жидкостей для общего или локального химического удаления поверхностного слоя твердого тела на заданную глубину. Известны и другие, преимущественно механические, способы изменения рельефа поверхности твердого тела. Но по ряду причин жидкие травители пока используются чаще всего. Они обеспечивают достаточно высокую прецизионность «гравировки» по глубине. Изменяя технологические параметры

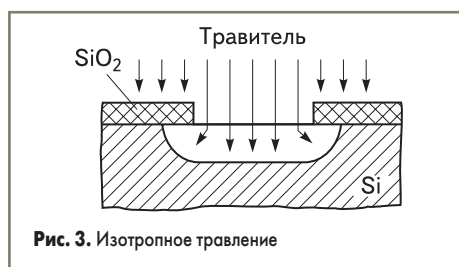


Рис. 3. Изотропное травление

этого процесса, можно с достаточно высокой точностью регулировать толщину удаляемого слоя (вплоть до мономолекулярного слоя!). А вот с прецизионностью метода «гравирования» в плоскости кристалла существуют определенные проблемы и ограничения.

Характерная особенность локального травления (травления через защитную маску) — подтравливание (рис. 3) Травление происходит не только в нужном направлении (перпендикулярно поверхности кристалла), но и в ненужном (вдоль плоскости кристалла — под маску). В результате размер отверстия отличается от размера «окна» в маске. Причем отличие тем больше, чем больше его глубина. Поскольку микроминиатюризация микросхем носит явный анизотропный характер (размеры углублений в плоскости уменьшаются быстрее, чем их глубина), количественные изменения переходят в качественные. Изотропное травление в микросхемах с высоким уровнем разрешения становится принципиально непригодным.

Как сделать, чтобы травление в одном направлении происходило с большей скоростью, чем в другом (шаг назад от ИКР)? А еще лучше, как сделать, чтобы травление происходило в одном направлении и не происходило в дру-

гом направлении (ИКР)? ИКР — идеальный конечный результат.

Для этой изобретательской задачи уже найдено решение. В последние годы широко стали использоваться методы анизотропного травления. В основу данного решения положен известный физико-химический эффект: скорость химической реакции травления зависит от кристаллографического направления. Кристалл кремния (кристалл с кубической решеткой) имеет три кристаллографические плоскости (100, 110, 111) (рис. 4.)

Логично, что наименьшая скорость травления характерна для того направления, где плотность расположения атомов кремния максимальна (111), а наибольшая для того, где плотность расположения атомов минимальна (100). Травление идет параллельно плоскости (111), которая оказывается как бы «непроходимой» для травителя. Поэтому при анизотропном травлении наружные размеры углублений практически совпадают с размерами «окон» в маске (рис. 5).

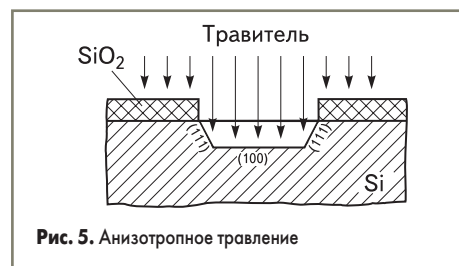


Рис. 5. Анизотропное травление

**Изоляция без изоляции**

Выбор кремния в качестве базового материала для изготовления полупроводниковых интегральных схем обусловлен многими причинами. Одна из них — он легко окисляется до оксида кремния (SiO<sub>2</sub>), который является прекрасным изолятором. Кварцевое стекло — это тоже SiO<sub>2</sub>.

В интегральных схемах с высокой степенью интеграции обычно не удается спроектировать разводку таким образом, чтобы избежать пересечений. Как следствие, используется многослойная или многоуровневая разводка. В качестве изолятора традиционно применяются оксиды кремния или (в некоторых случаях) оксид алюминия.

Диэлектрики предназначены и для изоляции между собой отдельных радиоэлементов, расположенных в полупроводниковой микросхеме по соседству (рис. 6).

Термическое окисление кремния — одна из основных операций изготовления полупроводниковых микросхем. Поверхность кремния обычно покрыта естественной окисной пленкой. Однако ее толщина (около 5 нм) слишком мала. Для увеличения этой толщины существуют искусственные методы. Термическое окисление кремния проводится при температуре чуть выше 1000 °С в атмосфере кислорода (сухое окисление) или в смеси кислорода с парами воды (влажное окисление). Причем толщина диэлектрического покрытия увеличивается до десятых долей мкм. В алюминооксидной технологии изоляцию между соседними проводниками осуществляют слои

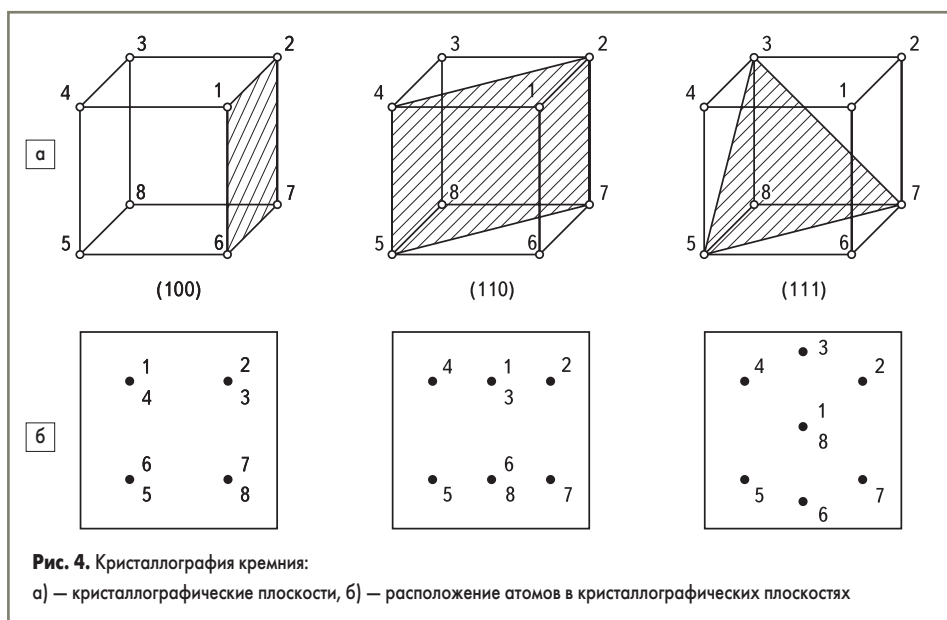


Рис. 4. Кристаллография кремния: а) — кристаллографические плоскости, б) — расположение атомов в кристаллографических плоскостях

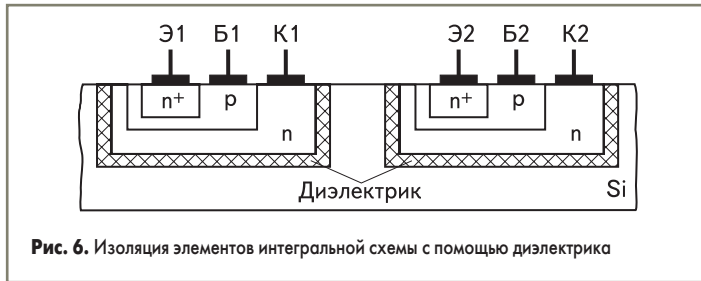


Рис. 6. Изоляция элементов интегральной схемы с помощью диэлектрика

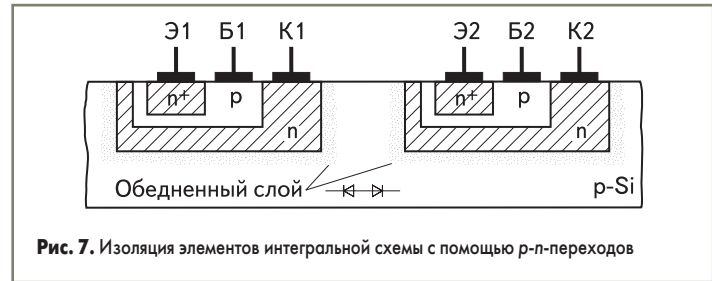


Рис. 7. Изоляция элементов интегральной схемы с помощью p-n-переходов

«пористого»  $Al_2O_3$ , между слоями — слой «плотного»  $Al_2O_3$ , получаемого при анодировании первичного слоя алюминия.

В обоих случаях для образования изолирующего слоя используются внутренние ресурсы системы (кремний и алюминий). На первый взгляд «дармовые» внутренние ресурсы, которые могут обеспечивать изоляцию, истощены. Психологическая инерция уводит к гораздо менее идеальным решениям.

Какие другие материалы могут создавать изоляцию? Полимеры. Но большинство полимеров недостаточно термостойки и поэтому не могут быть использованы в технологии изготовления микросхем. Правда, есть одно исключение — фторсодержащие полимеры. Например, поли-тетрафтор-*n*-ксилилен термостабилен при температуре более 450 °С. А технология его нанесения на поверхность удивительно похожа на вакуумные технологии, используемые в твердотельной микроэлектронике [6].

Психологическая инерция увела к полимерам человека, который специализируется в области химии и физики полимеров. А вот специалисты другого рода (схемотехники), скорее всего, лишены такого рода психологической инерции. Препятствие пути электрическому току, — а именно таким образом можно иначе сформулировать задачу, выполняемую диэлектриком, — можно иными способами. Для решения этой задачи схемотехники используют... обычные диоды. Вот вам и подсказка, позволяющая разрешить физическое противоречие изобретательской задачи:

Физическое противоречие этой задачи.

ФП: Изоляция должна быть и изоляции не должно быть.

Способ разрешения этого противоречия показан на рис. 7.

Из рисунка следует, что изоляция *p-n*-переходом сводится к реализации между изолируемыми элементами двух встречновключенных диодов. Обедненный слой *p-n*-перехода, особенно при большом обратном смещении, имеет очень высокое удельное сопротивление, близкое к удельному сопротивлению диэлектрика. Изоляция *p-n*-переходом очень хорошо вписывается в общий технологический цикл изготовления биполярных схем.

Такой способ изоляции имеет и свои недостатки (наличие обратных токов, наличие барьерных емкостей и др.). Однако это всего лишь подтверждает известную истину: улучшение одной характеристики системы неизбежно приводит к ухудшению каких-то других характеристик. Но, несмотря на это, такой способ «изоляции без изоляции» уже нашел свою нишу в производстве изделий микроэлектроники.

### Действие — антидействие

В полупроводниковых интегральных схемах металлизация призвана обеспечить «омические контакты» со слоями полупроводника, а также межсоединения. В отличие от печатных плат основным материалом, используемым для металлизации, в данном случае является алюминий. Удельное сопротивление алюминия меньше, чем у меди, но он обладает прекрасной адгезией к оксиду кремния, хорошо сваривается с тем же алюминием или золотом (внешние выводы) и т. д.

По ряду причин пленку первичного алюминия нельзя просто напылить на поверхность кремния. Алюминий вжигают в кремний при температуре близкой к той, при которой получается эвтектический сплав Al-Si. Поэтому поверхностный слой кремния легируется алюминием, который по отношению к кремнию является акцептором. Как следствие, атомы алюминия в приповерхностном слое создают *p*-слой. Как предотвратить образование ненужных *p-n*-переходов в *n*-слоях?

Эту задачу удалось выполнить с помощью типового приема разрешения технических противоречий — «использовать предварительно напряженное действие». Суть приема в следующем: объекту заранее придается изменение, противоположное недопустимым или нежелательным рабочим изменениям [7]. Отличие лишь в том, что данный принцип был сформулирован Г. С. Альтшуллером на основе анализа преимущественно «механических» изобретений. Поэтому в его названии и фигурирует «механический» термин — «напряжение».

Электротехническая интерпретация использования этого приема такова [2]. Чтобы избежать образования приповерхностного *p*-слоя, область *n*-слоя вблизи контакта дополнительно легируют донорными примесями, превращая ее в *n*<sup>+</sup>-слой (рис. 8). Концентрации алюминия становится недостаточно для образования *p*-слоя, и *p-n*-переход не образуется. Что и требовалось доказать!

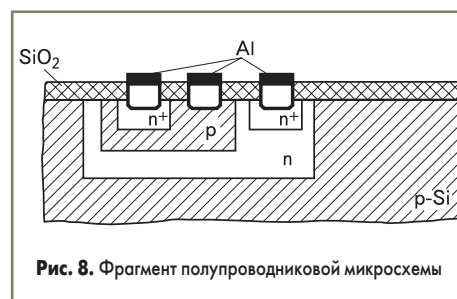


Рис. 8. Фрагмент полупроводниковой микросхемы

### Сделать наоборот

Схемотехника в какой-то мере искусство. Дело в том, что одну и ту же функционально законченную схему можно получить самыми разнообразными способами, с использованием различных радиоэлементов.

В электрических схемах, реализованных на базе дискретных радиоэлементов, разработчики обычно отдают предпочтение пассивным радиоэлементам. Активные радиоэлементы, особенно транзисторы, намного дороже. Поэтому оптимизация электрической схемы сводится к уменьшению их числа.

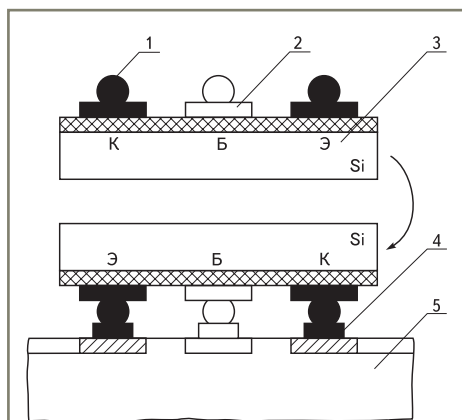
В микроэлектронике главенствующее положение занимает не стоимость отдельных радиоэлементов, а стоимость совокупности таких радиоэлементов (интегральной схемы в целом). С этой точки зрения желательно разместить в кристалле как можно больше радиоэлементов. Можно разместить максимальное количество тех элементов, у которых меньшая площадь. А такую площадь имеют активные радиоэлементы. Поэтому схемотехнические решения на интегральных схемах выполняются по принципу «сделать наоборот». Предпочтение отдается активным радиоэлементам (транзисторам, диодам), а количество пассивных радиоэлементов (резисторов и, особенно, конденсаторов) сводится к минимуму.

В гибридных интегральных схемах в качестве «навесных» радиоэлементов применяются бескорпусные диоды, транзисторы... и бескорпусные интегральные схемы. Традиционный вариант установки таких радиоэлементов на материнскую интегральную схему предусматривает использование проволочных выводов радиоэлементов. После фиксации радиоэлементов эти выводы соединяются с контактными площадками, чаще всего — методом компрессионной термосварки. Проволочные выводы выходят за границы кристалла, увеличивая его реальную площадь. А как же быть с микроминиатюризацией?

В идеале реальная площадь не должна выходить за пределы, ограниченные периметром кристалла. Сделать это удалось, перевернув кристалл вверх ногами. Выводы таких радиоэлементов выполняются в виде шариков. На рис. 9 показано, каким образом монтируется на подложку бескорпусной транзистор с матричными выводами.

Шарики (1), изготовленные из золота, меди или сплава олова и сурьмы, связаны с контактными площадками транзистора (2), а через них — с эмиттером, базой или коллектором. Контактные столбики (4) подложки делаются из того же материала. Соединение шариков со столбиками (транзистора с подложкой)





**Рис. 9.** Монтаж бескорпусного транзистора с шариковыми выводами:

- 1 — шарики,
- 2 — контактные площадки транзистора,
- 3 — транзистор,
- 4 — контактные столбики подложки,
- 5 — подложка

проводится методом перевернутого монтажа (flip-chip). Кристалл транзистора переворачивается вверх ногами (шариками вниз) и устанавливается на контактные столбики подложки. Для обеспечения прочного соединения используется термокомпрессия.

Метод перевернутого монтажа позволяет существенно сэкономить площадь подложки гибридной интегральной схемы, и не только интегральной схемы. Тот же метод активно применяется и в надсистеме. Для интегральных схем надсистема — печатная плата. Использование микросхем с матричными выводами — одно из основных направлений увеличения плотности межсоединений в печатных узлах [8].

Еще больше сэкономить площадь печатной платы помогут, точнее, уже помогают многокристальные модули. Реальный пример: новое технологическое поколение упаковки чипов — System-in-Package (SIP) [9]. Решения на основе SIP-технологий находят широкое применение в различных сегментах рынка, в частности, в бытовой электронике (цифровые камеры и видеокamеры, автомобильная электроника, медицина, средства телекоммуникации, военная и авиационно-космическая техника). Конструктивные решения многокристальных модулей, созданные по этой технологии, разнообразны. Представьте себе, что на рис. 9 изображен не транзистор, а микромодуль. Так вот, если на этот микромодуль установить еще один микромодуль, а на него еще один и т. д., то получится многокристальный модуль в виде своеобразной этажерки микромодулей (Stacked Package).

### Вред в пользу

Перспективы транзисторов когда-то оценивались не очень высоко. От своих предшественников (электронных вакуумных ламп) на начальной стадии они отличались высокой стоимостью, недостаточной надежностью, нестабильными характеристиками. Высокий уровень шумов ни в коей мере не компенсировал значительное снижение массогабаритных

характеристик радиоаппаратуры, изготовленной на базе твердотельных приборов. Транзисторные приемники в 70-х годах прошлого века изрядно шумели, особенно на солнышке. Почему?

Причин много. Об одной из них расскажем подробнее. Если глубоко не вникать в физику процессов, то можно сказать, что с увеличением температуры концентрация неосновных носителей проводимости возрастает очень резко (квадратичная зависимость), то есть несравненно быстрее, чем концентрация основных носителей проводимости. Так, в кремнии с увеличением температуры на 50 °С концентрация неосновных носителей увеличивается примерно на 3 порядка! Как следствие, это негативно влияет на полупроводниковые приборы и интегральные схемы, работа которых базируется на неосновных носителях.

За увеличение концентрации неосновных носителей отвечают еще и свет, и разного рода ионизирующие излучения. Не случайно при ликвидации последствий Чернобыльской аварии вся робототехника, как отечественного, так и зарубежного производства вышла из строя в течение нескольких часов. Кремний — он везде кремний!

И все же это отрицательное свойство полупроводниковой техники в некоторых случаях можно обратить себе на пользу — например, для изготовления фоточувствительных приборов, дозиметров излучения и др. [5].

Удалось использовать во благо и другое вредное явление. Для начала уточним, что такое анод и катод. Анод (от греческого *ánodos* — «движение вверх», «восхождение») — электрод электронного или электротехнического прибора, характеризующийся тем, что движение электронов во внешней цепи направлено от него. Анод соединяется с положительным полюсом. Противоположностью аноду является катод. Катод (от греческого *káthodos* — «ход вниз», «возвращение») — электрод электронного или электротехнического прибора, характеризующийся тем, что движение электронов во внешней цепи направлено к нему. Катод соединяется с отрицательным полюсом источника тока.

В гальванотехнике в качестве катода обычно используется деталь, на которую наносится металлическое покрытие (частный случай — печатная плата). В этом смысле катод — вечен. При проведении технологического процесса он только «прибавляет в весе».

В электровакуумных (газоразрядных) приборах катод служит источником электронов. Для того чтобы технические характеристики таких приборов не изменялись во времени, не должен изменяться и сам катод. Поэтому в газоразрядных приборах используется нормальный тлеющий разряд. И все же «вечных» катодов не существует. Кроме электронов из него в большей или меньшей степени «выбиваются» и нейтральные атомы.

Этот недостаток в гипертрофированном виде превратился в достоинство и нашел применение в технологии изготовления тонкопленочных интегральных микросхем (катодное

напыление). В качестве катода здесь выступает напыляемое вещество, а анодом является подложка микросхемы с ее держателем. Сначала установка для напыления вакуумируется до  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст. Затем в нее вводится очищенный нейтральный газ (аргон) до давления  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  мм рт. ст. После подачи высокого напряжения (2–3 кВ) между катодом и анодом возникает аномальный тлеющий разряд, при котором положительные ионы газа выбивают из катода нейтральные атомы. Эти атомы и осаждаются на подложке.

### В тесноте да не в обиде

В своей книге [10] Г. С. Альтшуллер приводит задачу под названием «Термометр для долгоносиков».

Суть этой задачи: большим термометром нужно измерить температуру маленького жука-долгоносика.

Решение: нужно взять обыкновенный стакан, заполнить его этими жучками и вставить в него термометр.

Решение основано на использовании системного перехода. Сто жучков-долгоносиков, собранных вместе, образуют новую систему, обладающую новыми свойствами.

Новую систему, обладающую новыми свойствами, образуют и отдельные радиоэлементы, собираясь в едином целом — в интегральной схеме. Смежные радиоэлементы расположены очень близко, на расстояниях, измеряемых долями мкм. На таких малых расстояниях различия электрофизических свойств материала малы (маловероятны). Следовательно, и мал (маловероятен) разброс параметров смежных элементов. Параметры смежных элементов коррелированы и, самое главное, корреляция сохраняется и при изменении температуры. В электрических схемах, реализованных из дискретных радиоэлементов, такая корреляция возможна только в мечтах.

### Метрология

В микроэлектронике чаще всего возникает необходимость измерения не температуры «жучков», а их электрических характеристик, или, иначе, получения этих характеристик с заданной степенью точности. Как это делается?

Поговорим подробнее об использовании типового приема разрешения технических противоречий, который называется «частично недостающее или частично избыточное действие». Этот прием используется в тех случаях, когда по тем или иным причинам получить требуемое действие сразу либо невозможно, либо очень сложно.

Данный прием используется «наверху» — в макротехнологиях. При проведении влагозащиты на печатный узел вначале наносят избыточное количество лака, а затем избыток удаляется с поверхности печатного узла центробежными силами (при центрифугировании) [11]. Для чего это делается? Не проще ли нанести на поверхность столько лака, сколько нужно? Тем более что сверхвысокой точности по толщине покрытия

не требуется. Причина в ином. Зазоры между микросхемами и поверхностью печатной платы становятся все меньше и меньше. А вязкость лака довольно большая. Попасть под микросхему без посторонней помощи ему сложно. Вязкость лака можно снизить, сократив содержание полимерного (олигомерного) связующего, но при этом уменьшится и толщина слоя наносимого покрытия. Для получения нужной толщины покрытия потребуются сделать намного больше слоев, да и экология «обидится»: в атмосферу улетит во много раз больше вредных органических растворителей. Разрешение физического противоречия (вязкость лака должна быть большой и не должна быть большой) осуществляется с помощью указанного типового приема.

«Внизу» проблема иная. В какой-то степени она имеет отношение к тому же разрешению рисунка микросхемы. Бывает так, что оптимальный уровень разрешения достаточен для реализации микросхемы в целом, но в то же время в этой микросхеме имеются элементы, которые необходимо выполнить с очень высокой точностью, например высокопрецизионные резисторы. Если микросхему полностью изготавливать с такой сверхвысокой точностью, она будет очень дорогой. Вот вам и недостаток групповых технологий. Нет в жизни совершенства! Очередное физическое противоречие: микросхема должна изготавливаться с высокой точностью и микросхема не должна изготавливаться с высокой точностью.

Это противоречие разрешается аналогичным способом. Технология реализуется таким образом, что номинал элемента (резистора) изначально получается всегда больше, чем нужно. А затем избыточную площадь этого элемента удаляют. Данное противоречие может быть разрешено (точнее, разрешается) и с использованием других типовых приемов.

Номиналы радиоэлементов определяются и толщиной наносимых пленок. Для резистивных пленок оказался пригодным метод «свидетеля» [2]. Свидетель (в ТРИЗ — посредник) — вспомогательный, не входящий в структуру тонкопленочной интегральной схемы слой, расположенный на периферии и напыляемый одновременно с рабочими слоями. Такой слой заранее снабжают двумя внешними выводами, через которые осуществляется контроль сопротивления свидетеля в процессе напыления. Геометрические размеры свидетеля известны. Поэтому, когда сопротивление достигает необходимого значения, напыление прекращается. Одинаковость условий напыления рабочего слоя и слоя свидетеля гарантирует получение одинаковой толщины.

В другом способе кроме «посредника» дополнительно используется явление резонанса. Свидетель — тонкая кварцевая пластина, которая через внешние выводы подсоединяется к колебательному контуру генератора. Резонансная частота кварцевой пластины однозначно связана с ее толщиной. В процессе напыления изменяется толщина пластины. Как

следствие, изменяется частота генератора. Изменение частоты можно легко измерить и в нужный момент остановить процесс напыления.

#### Литература

1. Уразаев В. Г. Линии развития печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3.
2. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. М.: Лаборатория базовых знаний. 2001.
3. [http://science.ng.ru/magnum/2000-06-21/5\\_micro.html](http://science.ng.ru/magnum/2000-06-21/5_micro.html)
4. Цветков Ю. Микротехнология — универсальная основа производства современной электроники // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 4.
5. Электроника: Энциклопедический словарь // Гл. ред. В. Г. Колесников. М.: Сов. энциклопедия. 1991.
6. Ширшова В. Технология влагозащиты и электроизоляции изделий РЭА полипараксилиленом // Компоненты и технологии. 2002. № 2.
7. Альтшуллер Г. С. Как научиться изобретать. Тамбов: Тамбовское книжное издательство. 1961.
8. Медведев А. М. Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера. 2005.
9. Карпентер К., Вардман Я. Технология SIP выходит в свет // Печатный монтаж. 2006. № 2.
10. Альтов Г. С. И тут появился изобретатель. М.: Детская литература. 1984.
11. Уразаев В. Г. Влагозащита печатных узлов. М.: Техносфера. 2006.