



*В. Иоффе*

## Полупроводниковые приборы на основе модуляции площади электродов

*Стремительное развитие микроэлектроники в первую очередь обусловлено непрерывным совершенствованием элементной базы. Как известно, лидируют в этой области американские, японские и южнокорейские фирмы. Несмотря на мрачные прогнозы есть шанс войти в число лидеров и у отечественной микроэлектроники. Подтверждение тому — интереснейшие разработки, которые все еще рождаются на российской земле. Одну из них сегодня представляет нашим читателям автор ряда перспективных изобретений В.М. Иоффе. Российские инвесторы и изготовители пока молчат, хотя в данном случае молчание может обернуться для них отнюдь не золотом, а в очередной раз упущенной выгодой.*

**Н**овый метод создания полупроводниковых приборов строится на применении полупроводниковых структур с анизотропными физическими свойствами: неоднородно легированных полупроводников либо полупроводниковых слоев переменной толщины. Уникальные электрофизические характеристики изготавливаемых этим методом изделий позволяют говорить о возникновении нового класса полупроводниковых приборов. Так, производимые на его основе варикапы значительно превосходят существующие как по коэффициенту перекрытия, так и по возможности выбора функциональной зависимости емкости от напряжения. Управляемые линии передачи позволяют модулировать СВЧ-сигналы, а также осуществлять настройку, частотную перестройку и согласование большого числа СВЧ-устройств.

Трансформаторы емкости, с помощью которых можно усиливать сигналы, превосходят транзисторы по уровню передаваемых мощностей благодаря снижению температурных ограничений (емкость не нагревается). Кроме того, отсутствует электронное ограничение по мощности, связанное с конечной скоростью перемещения носителей заряда и напряжением пробоя полупроводниковых структур.

Собственно транзисторы по новому методу можно изготовить с любой заранее заданной передаточной характеристикой, в том числе линейной. Такие устройства не шунтируют входные и выходные цепи.

Некоторые приборы, изготовленные новым способом, уже защищены патентами РФ, другие находятся на стадии патентования. Патентоспособность положенных в их основу технических решений подтверждена результатами патентных исследований и

экспертиз. Это создает хорошие перспективы для их широкомасштабного внедрения в промышленность.

Остановимся кратко на конструктивно-технологических особенностях отдельных приборов.

**Варикапы с любым заранее заданным видом вольт-фарадной характеристики при сверхбольшом ( $\sim 10^2-10^4$ ) отношении  $C_{max}/C_{min}$**

Типичная конструкция варикапа представляет собой полупроводниковую пленку на сильнолегированной подложке. Подложка имеет противоположный по сравнению с пленкой тип проводимости. На пленке и подложке созданы контакты для внешнего напряжения. При определенной полярности управляющего напряжения в полупроводнике формируется обедненный основными носителями заряда слой (эквивалент диэлектрической прослойки в обычном конденсаторе) зависит от напряжения смещения и распределения легирующей примеси в

чески сложно формировать примесный профиль с заданным распределением по толщине пленки. Более того, многие важные зависимости  $C(U)$  нереализуемы при практически любом примесном профиле.

2. Минимальное значение емкости варикапов определяется напряжением пробоя.

Классический варикап эквивалентен конденсатору переменной емкости, у которого при подаче управляющего напряжения изменяется расстояние между обкладками. Мы предлагаем варикап, аналогичный конденсатору, у которого изменяется как расстояние между обкладками, так и их площадь. Это позволяет создавать приборы с практически любой заданной вольт-фарадной характеристикой.

На рис. 1 приведен один из вариантов реализации варикапа (варактора). Прибор содержит область  $p^+$ -типа (подложку) с омическим контактом к ней, пленку  $n$ -типа толщины  $d$  и омический контакт (токоотвод) по периметру рабочего участка пленки. На рабочем участке пленки ( $0 \leq x \leq X_{max}, 0 \leq z \leq F(x)$ ) посредством ионной имплантации сформирован неоднородный профиль распределения донорной примеси  $N_D(x, y)$ , причем имплантационная доза возрастает от  $X_{max}$  к 0. За пределами рабочего участка пленка слабо легирована и при нулевом внешнем смещении на  $p-n$ -переходе полностью обеднена основными носителями заряда. По мере увеличения запирающего напряжения на переходе область пространственного заряда (ОПЗ) заполняет рабочий участок пленки. При этом размер области нейтральности  $H(U)$  и эффективная площадь пластин конденсатора  $S$  непрерывно уменьшаются:

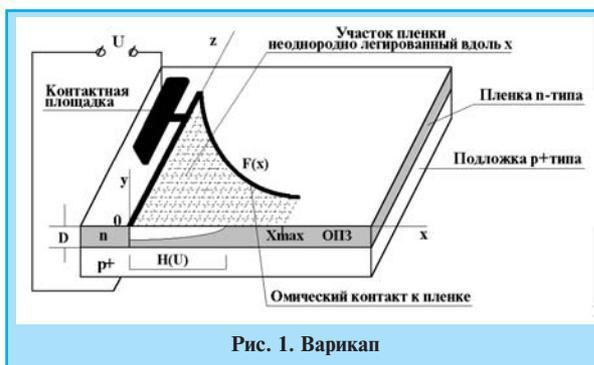


Рис. 1. Варикап

пленке. Следовательно, вольт-фарадная характеристика варикапа обусловлена только распределением примесей  $N_D(x, y)$ . Такая конструкция обладает двумя основными недостатками:

1. Невозможно реализовать заранее заданную зависимость емкости от напряжения  $C(U)$ , поскольку технологи-

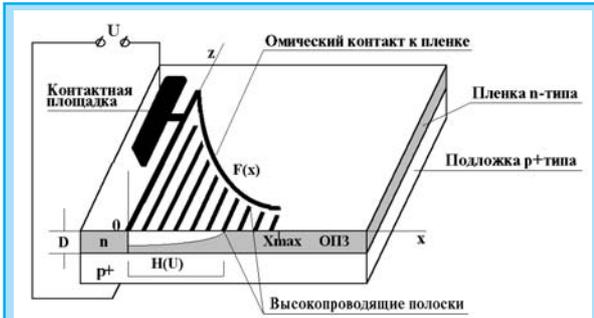


Рис. 2. Вариап с высокой добротностью

$$S = \int_0^{H(U)} F(x) dx + S_k,$$

где  $S_k$  — площадь омического контакта над ОПЗ. Чтобы получить необходимую зависимость емкости от напряжения, варьируют (вместе или отдельно) три параметра —  $F(x)$ ,  $d(x)$ ,  $N_i(x,y)$ . Таким образом, сложная техническая проблема формирования заданного профиля распределения примесей сведена к простой задаче нанесения маскирующего покрытия определенной формы.

Понижение добротности прибора из-за большого объемного сопротивления области нейтральности полупроводника устраняется созданием на поверхности рабочего участка пленки вдоль направления  $z$  полосок с высокой проводимостью. Полоски имеют зазор относительно токоотвода и образуют с пленкой омический контакт (рис. 2).

Нежелательное влияние поверхностных эффектов можно преодолеть, сформировав на поверхности слой диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) или изолирующего полупроводника (например, в виде  $p-n$ -перехода). Чтобы коэффициент перекрытия по емкости был максимальным, следует минимизировать площадь омического контакта  $S_k$ . Если контактная площадка имеет относительно большие размеры, ее выносят на диэлектрический слой.

Характеристики прибора определяются уравнениями:

$$C(U) = \epsilon_s \int_0^{H(U)} \frac{F(x)}{R(x,U)} dx \quad (1)$$

$H(U)$  определяется из условия:  $D(H) = R(x,U)$ . В свою очередь  $R(x,U)$  определяется из уравнения:

$$U + U_k = -\frac{q}{\epsilon_s} \int_0^R Ni(x,y) dy, \quad (2)$$

где  $C(U)$  — зависимость емкости от напряжения;  $R(x,U)$  — толщина ОПЗ;

$H(U)$  — размер области нейтральности в направлении  $x$ ;  $\epsilon_s$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $q$  — элементарный заряд;  $U_k$  — встроенный потенциал барьера.

Проанализируем ряд предлагаемых конструкций варикапов.

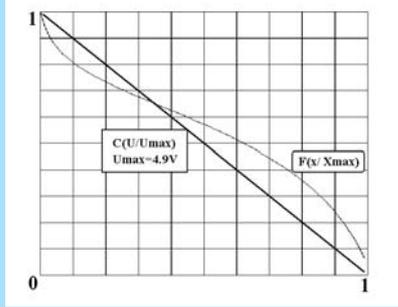


Рис. 3. Расчетная форма рабочего участка пленки варикапа с линейной вольт-фарадной характеристикой  $C(U) \sim 1 - U/U_{max}$

**Пример 1.** По многим причинам интерес представляют линейные варикапы. В частности, их использование в качестве параметрических диодов в резонансных контурах исключает расстройку контура, поскольку среднее значение емкости варикапа не зависит от амплитуды гармонических сигналов на нем. На рис. 3 приведена расчетная форма рабочего участка пленки варикапа с линейной вольт-фарадной характеристикой  $C(U) \sim 1 - U/U_{max}$ . Прибор получен посредством ионной имплантации фосфора с энергией 200 кэВ в слаболегированную пленку кремния

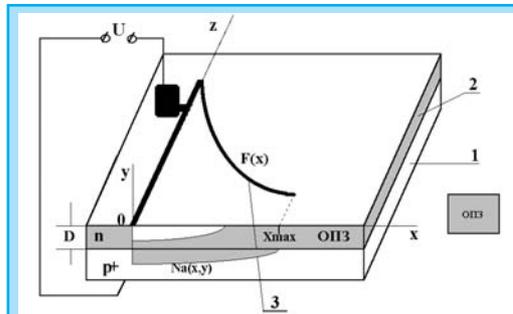


Рис. 4. Вариап с однородно легированной пленкой на неоднородно легированной подложке

нансных контурах исключает расстройку контура, поскольку среднее значение емкости варикапа не зависит от амплитуды гармонических сигналов на нем. На рис. 3 приведена расчетная форма рабочего участка пленки варикапа с линейной вольт-фарадной характеристикой  $C(U) \sim 1 - U/U_{max}$ . Прибор получен посредством ионной имплантации фосфора с энергией 200 кэВ в слаболегированную пленку кремния

$n$ -типа толщиной 0,6 мкм. Доза имплантации линейно падает вдоль  $x$  от  $10^{12}$  до  $1,54 \cdot 10^{11}$  ионов/см<sup>2</sup>.

Проведем оценку добротности прибора при отсутствии высокопроводящих полосок (рис. 1), пренебрегая постоянной составляющей тока через закрытый  $p-n$ -переход (в данном случае  $Q$  — отношение емкостного сопротивления варактора к сопротивлению растекания  $R$ ).

Если  $H(U) \gg F$ , то  $Q = 1/(wCR)$ ;  $R \approx F \cdot r/(D \cdot H(U))$ , где  $D$  — средняя толщина пленки;  $H(U)$  — размер области нейтральности в направлении  $x$ ;  $F$  — среднее значение  $F(x)$  на промежутке  $0 \leq x \leq H(U)$ ;  $r$  — среднее удельное сопротивление пленки в области нейтральности;  $w$  — угловая частота.  $C \approx \epsilon_s (F \cdot H(U)/D + S_k/D)$ ; при  $S_k \ll F \cdot H(U)$   $Q \approx (D/F)^2 / (\epsilon_s \cdot r \cdot w)$ . Аналогично, при  $F \gg H(U)$ ,  $Q \approx (D/H(U))^2 / (\epsilon_s \cdot r \cdot w)$ .

Если  $H(U) \gg F$ , то при наличии полосок  $R \approx \rho \Delta / (D \cdot H(U))$ , где  $\Delta$  — величина зазора между полосками и токоотводом,  $\rho$  — удельное сопротивление пленки. Значит,  $Q \approx D^2 (\epsilon_s \cdot F \cdot r \cdot w)$ . Таким образом, наличие проводящих полосок повышает добротность в  $F/\Delta$  раз.

**Пример 2.** Вариап, представленный на рис. 4, содержит однородно легированную пленку, размещенную на неоднородно легированной подложке. Степень легирования подложки увеличивается в пределах рабочего участка вдоль  $x$ . делами рабочего участка подложка сильно легирована. Для получения таких подложек кристалл полупроводника неоднородно легируется в процессе роста (по методу Чохраль-

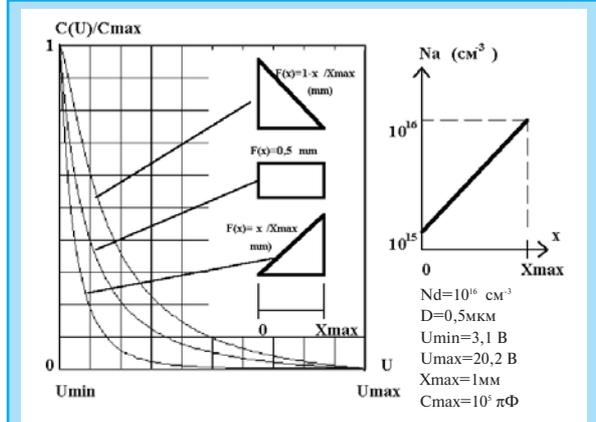


Рис. 5. Зависимость емкости от напряжения для рабочих участков различной формы

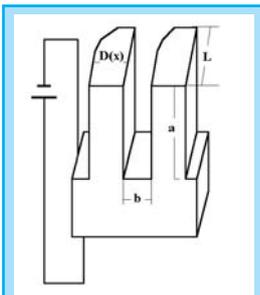


Рис. 6. Варикап с периодической структурой

ского), а затем разрезается на пластины вдоль оси.

Толщина области пространственного заряда в подложке монотонно уменьшается. По мере увеличения запирающего напряжения ОПЗ постепенно заполняет весь рабочий участок пленки. Эффективная площадь пластин конденсатора непрерывно уменьшается. Подложка и пленка изготовлены из одного полупроводникового материала. Тогда по

$$C(U) = \epsilon_s \int_0^{H(U)} \frac{F(x)}{R(x, U)} dx$$

$$U + U_k = -\frac{q}{\epsilon_s} \int_0^{R_1} N_d(x, y) y dy + \frac{q}{\epsilon_s} \int_0^{R_2} N_a(x, y) y dy;$$

аналогии с (1), (2)

$$\int_0^{R_1} N_d(x, y) y dy = \int_0^{R_2} N_a(x, y) y dy$$

Уравнение электронейтральности:  
 $R = R_1 + R_2; H(U) = x$  при  $R_1 = D$ .

Здесь  $R_1, R_2$  — толщина ОПЗ в пленке и в подложке соответственно,  $N_d(x, y)$  — распределение примесей в подложке,  $N_d(x, y)$  — распределение примесей в пленке.

На рис. 5 приведены расчетные зависимости емкости от напряжения для варикапов с однородно легированной пленкой кремния толщиной 0,5 мкм и концентрацией донорной примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  при неоднородно легированной подложке. Концентрация акцепторов в подложке линейно меняется в пределах рабочего участка пленки от  $10^{15}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Зависимости представлены для рабочих участков различной формы: двух треугольных ( $F(x) = 1 - x/X_{max}$ ,  $F(x) = x/X_{max}$  (мм)) и прямоугольного ( $F(x) = 0,5$  мм). При  $X_{max} = 1$  мм  $C_{max}$  составляет  $10^5$  пФ.

**Пример 3.** Изменяемый параметр — толщина пленки. Варикап представляет собой периодическую структуру (рис. 6), на верхней поверхности которой сформирован барьер Шоттки. Он изготовлен методом анизотропного травления из однородно легированного полупроводника. На нижней по-

верхности выполнен омический контакт. Расчетная форма сечения периодической структуры для линейной зависимости  $C(U)$  приведена на рис. 7.

**Пример 4.** Изменяемый параметр —  $F(x)$ . В конструкции варикапа использована однородно легированная клинообразная полупроводниковая пленка (рис. 8). Формы рабочих участков пленки для различных зависимостей  $C(U) \sim (1 - U/U_{max})^n$ ,  $n = 1, 2, 3$  ( $U_{max} = q \cdot N_i \cdot D_{max}^2 / 2\epsilon_s - U_k$ ;  $D_{max}$  — максимальная толщина клина) представлены на рис. 9. Клин формируют методом эпитаксиального наращива-

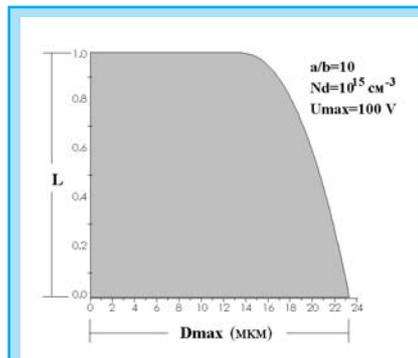


Рис. 7. Расчетная форма сечения периодической структуры для линейной зависимости  $C(U)$

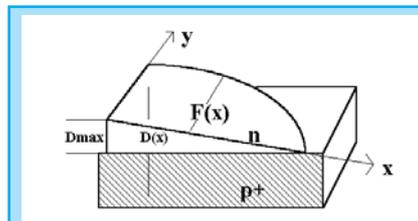


Рис. 8. Варикап с клинообразной однородно легированной пленкой

ния пленки на ориентированную соответствующим образом подложку с последующим анизотропным травлением пленки.

### Управляемые конденсаторы (трансформаторы емкости)

По аналогии с транзисторами (трансформатором сопротивлений), выходное сопротивление которых регулируется источником сигнала во входной цепи, можно создать трансформатор емкости — прибор с управляемой выходной емкостью.

В виде примера рассмотрим управляемый конденсатор (рис. 10). Прибор содержит  $p-n$ -переход (возможен вариант с барьером Шоттки).  $p-n$ -переход образуют сильнолегированная область  $p^+$ -типа и пленка  $n$ -типа. Пленка легирована неоднородно, степень легирования возрастает от  $X_{max}$  к 0. По мере увеличения на переходе запирающего напряжения область пространственного заряда (ОПЗ) постепенно заполняет всю пленку, при этом размер области нейтральности  $H(U)$  и эффективная площадь пластин конденсатора непрерывно уменьшаются. Если  $C(t)$  — зависимость величины управляемой емкости от времени,  $Q$  — заряд емкости, то напряжение на управляемой емкости  $U_c = Q/C(t)$ .

Управляемые конденсаторы можно с успехом применять в усилителях. При небольших изменениях величины напряжения на  $p-n$ -переходе, ток через управляемую емкость составит

$$I = \frac{d}{dt} (C(t) \cdot U_0).$$

Зависимость напряжения на управляемой емкости от степени ее модуля-

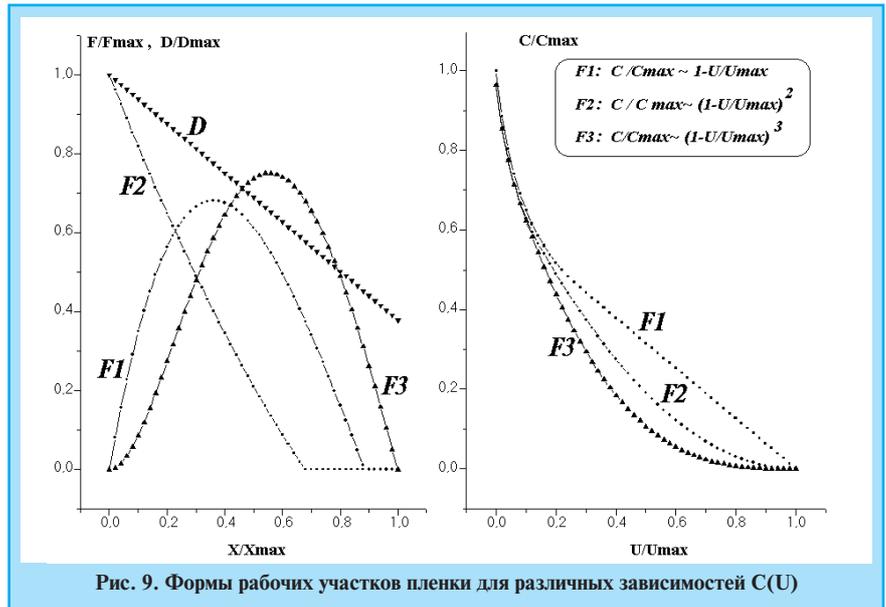


Рис. 9. Формы рабочих участков пленки для различных зависимостей  $C(U)$

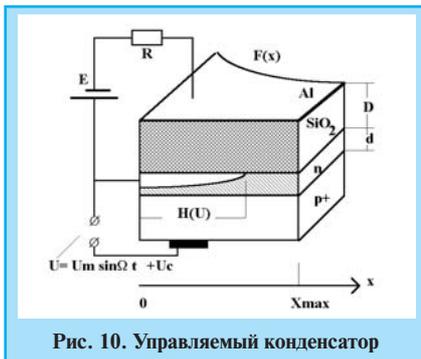


Рис. 10. Управляемый конденсатор

ции представлена на рис. 11.

Заметим, что добротность управляемой емкости примерно в  $D/d$  раз выше добротности соответствующего варикапа.

### Управляемые линии передачи

Недостаток всех линий передач заключается в том, что их волновое сопротивление и длину невозможно регулировать внешним источником напряжения. Это затрудняет миниатюризацию, настройку и частотную перестройку СВЧ-устройств. Предлагаемый подход позволяет создавать управляемые линии передачи. На рис. 12 приведен один из вариантов такого устройства с изменяемым волновым сопротивлением.

Прибор представляет собой диэлектрик ( $\text{SiO}_2$ ) с нанесенными на него проводящими полосками. Поверх полосок (3), расположенных вдоль длины линии задержки, сформирован эпитаксиальный слой поликристаллического кремния  $n$ -типа (1), образующий с полосками омический контакт. Слой поликристаллического кремния неоднородно легирован вдоль ширины линии (вдоль направления  $z$ ). Степень легирования уменьшается с ростом  $z$ . Над слоем поликристаллического кремния создана область  $p$ -типа (2) с омическим контактом, которая образует с областью (1)  $p$ - $n$ -переход либо барьер Шотки. По мере увеличения запирающего напряжения  $U$  размер области нейтральности  $H(U)$  в полупроводнике  $n$ -типа непрерывно уменьшается (вдоль  $z$ ). Эффективная ширина линии  $W$  уменьшается вслед за  $H(U)$  с дискретностью, равной ширине проводящей полоски (3). В результате волновое сопротивление линии увеличивается пропорционально  $1/H(U)$ .

Линии передачи с изменяемой длиной устроены аналогично, но проводящие полоски (3) расположены поперек длины линии (вдоль  $z$ ). Слой поликристаллического кремния (1) неоднородно легирован вдоль длины линии, и степень его легирования уменьшается с

ростом  $x$ . По мере увеличения запирающего напряжения  $H(U)$  уменьшается. При этом дискретно уменьшается и эффективная длина линии  $L$ .

Чтобы устранить нежелательное влияние емкостной связи между областями (6) и (2),  $p$ - $n$ -переход (барьер Шотки) может быть сформирован в на-

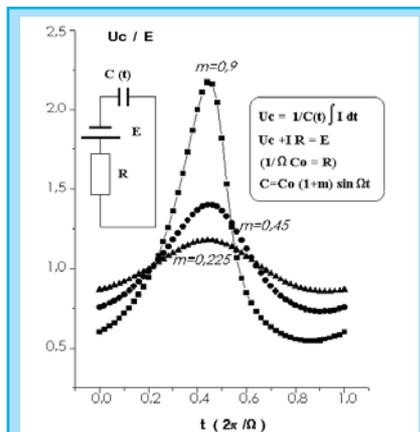


Рис. 11. Зависимость напряжения на управляемой емкости от степени модуляции

чале и в конце линии (рис. 13). Допустимо его размещение и на продолжении проводящих участков (3) за пределами диэлектрической прослойки (5).

Другой способ исключить нежелательное влияние емкостной связи — неоднородное легирование как  $n$ -, так и  $p$ -области  $p$ - $n$ -перехода. Тогда по мере роста управляющего напряже-



Рис. 12. Управляемая линия передачи

ния размер области нейтральности в  $p$ -области уменьшается так же, как и в  $n$ -области.

### Транзисторы

Предлагаемый подход можно использовать и при создании транзисторов. Рассмотрим один из вари-

антов такого прибора (рис. 14). На слаболегированный полупроводниковый  $n$ -слой (5) нанесены проводящие полоски (3) и (6). Над слоем (5) сформирован эпитаксиальный неоднородно легированный слой  $n$ -типа (1) с омическим контактом. Концентрация примеси убывает в сторону увеличения  $x$ . Поверх слоя (1), имеющего омический контакт с полосками (3), создана область (2), образующая с ним либо  $p$ - $n$ -переход, либо барьер Шотки.

По мере увеличения запирающего напряжения  $U$  источника (9) размер области нейтральности  $H(U)$  непрерывно уменьшается. Вместе с ней уменьшается эффективная ширина  $W$  омического контакта к области (1). Дискретность изменения  $W$  равна ширине одной полоски (3).

В данном случае проводящие полоски сформированы на одной из поверхностей пластины (5). Очевидно, что, сформировав полоски и на другой поверхности этой пластины, а поверх них — неоднородно легированный (поперек полосок)  $p$ - $n$ -переход, при подаче на него напряжения можно также варьировать эффективную площадь контакта.

Заметим, что зависимость сопротивления прибора между омическим контактом и областью (6) от величины управляющего напряжения определяется выбором формы области, на которой выполнены проводящие полоски (3), и профилем легирования  $p$ - $n$ -перехода (барьера Шотки). Если сопротивление нужно изменять в широких пределах, а размер контактной площадки к области (1) соизмерим с размерами прибора, контактная площадка может быть вынесена на диэлектрический слой. При малом диапазоне изменения сопротивления проводящие участки (3) непосредственно соединяют с омическим контактом к

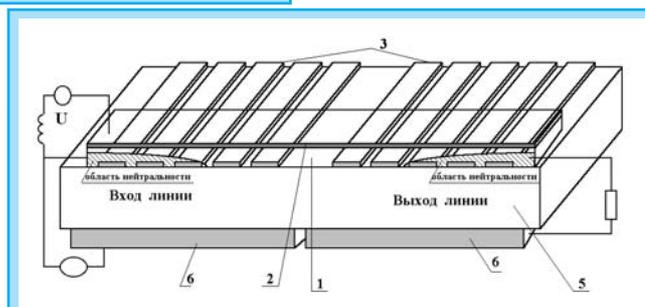


Рис. 13. Вариант устранения паразитной емкостной связи в управляемой линии передачи

области (1). Тогда эффективная площадь контактов управляемого резистора изменяется на величину, равную

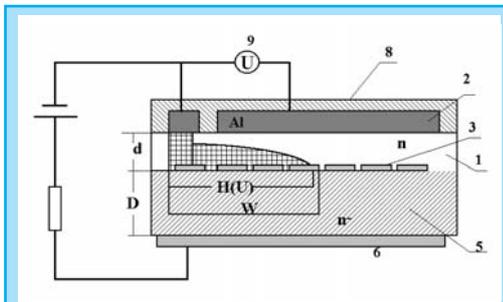


Рис. 14. Транзистор

площади зазоров между полосками (3).

**Транзисторы с высоким выходным сопротивлением и любой, в том числе линейной, передаточной характеристикой**

На рис. 15 представлено усилительное устройство на основе транзистора, в котором степень легирования области эмиттера (3) растет от  $X_0$  к 0. Поверх эмиттера выполнен управляющий электрод (4) с омическим контактом. Металлический или полупроводниковый управляющий электрод образует с эмиттером барьер Шотки либо  $p-n$ -переход. При подаче запирающего напряжения на переход “управляющий электрод — эмиттер” по крайней мере часть рабочей области полностью обедняется основными носителями заряда. По мере увеличения запирающего напряжения  $U$  размер области нейтральности  $H(U)$  и эффективная площадь эмиттера  $S(U)$  непрерывно уменьшаются, в результате чего пропорционально уменьшается ток эмиттера и коллектора  $I_k \sim S(U)$ . Зависимость тока эмиттера и коллектора от

$$S(U) = \int_0^{H(U)} F(x) dx, \quad (3)$$

напряжения определяется функциональной зависимостью размера области эмиттера  $F(x)$ :

где  $x$  — координата в плоскости поверхности эмиттера.

Задавая ту или иную форму области эмиттера, можно менять зависимость коллекторного тока от напряжения. Очевидно, что аналогичный эффект достигается при однородно легированном по площади эмиттере, если

эмиттерная область имеет переменную толщину.

Ток эмиттера должен превышать ток базы. Значит, область эмиттера необходимо легировать сильнее, чем область базы. Либо для эмиттера следует выбирать полупроводниковый материал с большей шириной запрещенной зоны, чем у материала базы.

Следующий этап в развитии этой конструкции — структура с чередованием сильнолегированных участков в области эмиттера (рис. 16). В неоднородно легиро-

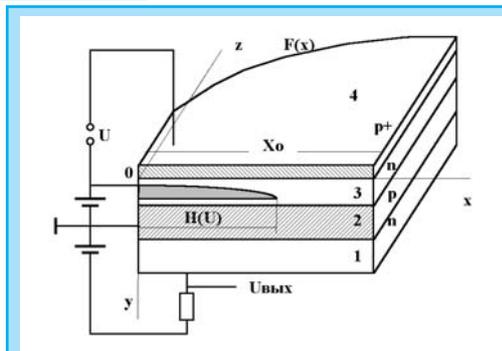


Рис. 15. Усилительное устройство на основе транзистора

ванной области эмиттера дополнительно сформировано большое число проводящих участков (10) из сильнолегированного материала с тем же типом проводимости, что и у материала эмиттера. Участки размещены на некотором расстоянии от омического контакта (11) и вспомогательной высокопроводящей области (9), созданной по периметру области эмиттера. Работа транзистора в этом случае аналогична работе транзистора, рассмотренного выше. По мере увеличения запирающего напряжения  $U$  размер области нейтральности вдоль  $x$  уменьшается. Сильнолегированные участки, которые оказываются внутри обедненной области, как бы отсекаются от эмиттера. Такая конструкция позволяет:

- расширить диапазон допустимых напряжений (напряжение пробоя толстых слаболегированных переходов су-

щественно выше, чем у сильнолегированных);

- снизить емкость «управляющий электрод-эмиттер», применяя более толстые эмиттеры;

- повысить коэффициент усиления транзистора (возможно управление эффективной площадью эмиттера при значительно меньших входных напряжениях);

- снизить объемное сопротивление эмиттера.

Объемное сопротивление эмиттера без проводящих участков пропорционально  $\rho \cdot \Delta F / (D \cdot x_0)$ . При наличии же участков (10) оно пропорционально  $\rho / (D \cdot x_0)$  ( $F$  — среднее значение  $F(x)$ ,  $\rho$  — величина среднего удельного сопротивления области нейтральности эмиттера,  $\Delta$  — величина зазора между полосками (10) и областью (9),  $D$  — средняя толщина области эмиттера). Таким образом, применение структуры с высокопроводящими полосками позволяет снизить объемное сопротивление эмиттера в  $F/\Delta$  раз.

Минимальная эффективная площадь эмиттера определяется площадью омического контакта и вспомогательной области (9). Для ее уменьшения необходимо выносить на диэлектрический слой. Заметим, что управлять эффективной площадью можно, даже если область эмиттера однородна по степени легирования и толщине. В этом случае, в отличие от прибора, представленного на рис. 15, неоднородно легируют полупроводниковый управляющий электрод (противоположного с эмиттером типа проводимости).

Зависимость тока эмиттера и коллектора от напряжения определяется формой области эмиттера  $F(x)$ . Задав определенный вид этой зависимости (например, линейный), можно рассчитать необходимую форму области эмиттера. Предположим, что область эмиттера легирована много слабее области

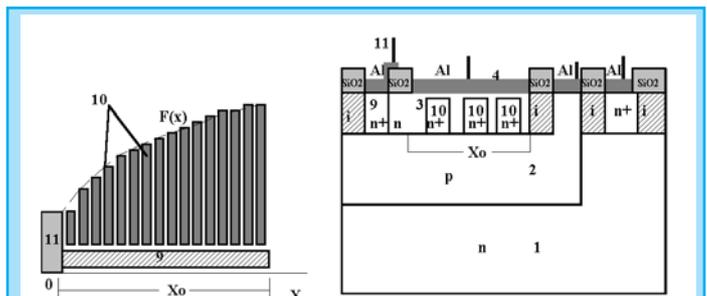


Рис. 16. Транзисторная структура с чередованием сильнолегированных участков в области эмиттера

базы. Тогда, пренебрегая падением на-

$$U + U_k + U_{k2} - U_2 = q/\epsilon_s \int_0^{D(H(U))} Ni(H(U), y) dy, \quad (4)$$

пряжения в базовой области, для на-

пряжения перекрытия\* запишем:  
где  $U_2$  — внешнее напряжение между базой и эмиттером,  $U_{k2}$  — встроенный потенциал перехода «эмиттер-база»,  $U_k$  — встроенный потенциал перехода «управляющий электрод-эмиттер».

В качестве примера приведем реше-

ние уравнений (3, 4) для линейной за-

\* Минимальное внешнее напряжение  $U$  на переходе «управляющий электрод-эмиттер», при котором в сечении  $H(U)$  наступает полное обеднение эмиттера основными носителями заряда

висимости  $S(U) \sim U$ .

При однородном профиле легирова-

ния и линейно изменяющейся вдоль  $x$  толщине области эмиттера  $D(x) \sim x_0 - x$ , интегрируя (4), получим:  
 $U + U_k + U_{k2} - U_2 \sim (x_0 - x)^2$ . Линейные изменения напряжения должны приводить к линейному уменьшению эффек-

тивной площади:  
 $dU \sim -(x_0 - x) = -F(x) dx$ ;  
 $F(x) = -dU/dx \sim x_0 - x$ . Следовательно, форма области эмиттера — треугольная.

При однородной толщине пленки  $D(x) = D$  и линейно спадающей вдоль  $x$  до-зе имплантации

$U + U_k + U_{k2} - U_2 \sim x_0 - x$ . Для линейного транзистора  $dU \sim -I = -F(x) dx$ ,

$F(x) = -dU/dx \sim I$ . В данном случае форма области эмиттера — прямоугольная.

Рассмотренные приборы изобре-

тены автором статьи в 1994—1995 годах при участии А.И. Максимова. Автор также выражает благодарность А.И. Сарцеву за помощь в создании приборов.  
Более подробно приборы описаны в заявках на патенты РФ №94017290, 94029163, 94036362, 95100940, 951-15427, 95100940, 95119306, 95121127, 95121291, 95119346, 96101332, а также в международных заявках РСТ

### Представляем автора статьи

**ИОФФЕ Валерий Моисеевич** окончил физико-технический факультет Новосибирского электротехнического института в 1974 году. По окончании вуза работал в Институте физики полупроводников СО РАН, а затем — в Новосибирском электротехническом институте (ныне НГТУ). Основная сфера профессиональной деятельности — численные методы решения различных физических задач. Изобретательской деятельностью активно занимается с 1994 года. Координаты для связи: 630064, Новосибирск, ул. Новогодняя д.16, кв.16, тел. (8-3832)46-93-13, тел./факс:(8-3832) 21-75-06.

### Новые технологии — новые материалы

### Дайджест

Переход к технологии изготовления ИС с 0,25-мкм топологическими нормами не вызвал больших проблем. Однако следующую вершину — 0,18-мкм технологией — вряд ли удастся покорить столь легко. По мнению экспертов, полупроводниковая промышленность столкнется с проблемой освоения новых материалов, ранее не встававшей столь остро. Согласно оценкам, для изготовления ДОЗУ емкостью 1 Гбит или сопоставимых с ними по сложности (17 млн. транзисторов на кристалле) логических схем в технологический процесс необходимо ввести от пяти до восьми новых материалов, что может потребовать модификации почти всех технологических операций. При этом темпы внедрения новой технологии должны быть предельно высокими: появление первых образцов схем с 0,18-мкм топологическими нормами ожидают уже в 1999 году.

Для изготовления таких схем необходимы диэлектрические материалы с более высокими, чем у используемых сейчас, значениями диэлектрической проницаемости. В качестве возможного материала диэлектрика конденсаторов ИС, особенно высокочастотных, рассматривается пентооксид тантала, давно применяющийся при изготовлении дискретных конденсаторов. По мнению одного из руководителей консорциума Sematech П. Вазудива, полупроводниковая промышленность легко освоит отработанную технологию обработки этого материала на имеющемся оборудовании. Но для изготовления схем ДОЗУ емкостью 1 Гбит и выше могут потребоваться материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью, такие как титанат бария-стронция (BST) или цирконата-титаната свинца (PZT). Некоторые японских фирмы уже начали использовать BST при формировании конденсаторов схем емкостью 1 Гбит.

Независимо от выбора нового материала изготовителям придется освоить технологию осаждения сверходнородных по толщине пленок (для обеспечения высокого быстродействия толщина пленки не должна превышать 1 мкм). Существующее оборудование способно осажать пленки любого из указанных выше материалов. Но чтобы достичь требуемой однородности толщины, его необходимо усовершенствовать.

Для увеличения быстродействия и плотности размещения элементов будущих ИС алюминиевая металлизация будет заменена медной, что может снизить издержки производства. При двойной дамасской обработке промежуточного медного покрытия одновременно будут формироваться межсоединения и заполняться сквозные отверстия, что позволит отказаться от применяемого сейчас для их заполнения вольфрамового штырька. Кроме того, плотность размещения медных токопроводящих линий на кристалле скорее всего будет выше, чем алюминиевых, благодаря чему сократится число слоев металлизации и снизится стоимость изделия.

Одна из основных проблем медной металлизации — диффузия меди в подложку при термообработке кристалла. Чтобы избежать этого, температура процесса осаждения не должна превышать 600°C. При сухом травлении медного покрытия необходимо следить за тем, чтобы плазма не повредила затвор вследствие накопления зарядов ионов, туннелирующих через металлическую пленку.

Медные соединительные линии могут наноситься электролитически. Этот процесс дешевле используемых сейчас методов химического осаждения из газовой фазы. Правда, электролитическое осаждение покрытий до сих пор не применялось при изготовлении ИС, поэтому предстоит провести квалификационные испытания этого процесса. Консорциум Sematech в сотрудничестве с крупнейшими поставщиками оборудования для осаждения тонких пленок уже добился первых успехов при нанесении медных покрытий на полупроводниковую подложку. Вероятно, фирмы, входящие в консорциум, вскоре приступят к изготовлению первых опытных образцов схем с медными соединительными линиями. Скорее всего, это будут логические ИС.

При переходе к медной металлизации необходимо найти новые материалы для формирования барьерного слоя, предотвращающего миграцию меди в слой диэлектрика. Сейчас разработчики изучают возможность применения нитрида титана, нитрида тантала и нитрида тантала-кремния. Sematech совместно с Корнельским университетом получил патент на изготовление барьерного слоя на базе пленки кобальта-вольфрама.

Semiconductor Business News, Sept., 1997, <http://techweb.cmp.com/sbn/pub/0997/metal.htm>