

Полупроводниковые приборы на основе модуляции площади электродов.

Варикапы с любым наперед заданным видом C/V характеристики при сверхбольшом ($\sim 10^2 - 10^4$) отношении S_{\max}/C_{\min} .

Типичная конструкция варикапа представляет собой полупроводниковую пленку, которая размещена на сильнолегированной подложке с противоположным по сравнению с пленкой типом проводимостью. Пленка и подложка снабжены контактами для подачи внешнего напряжения. При определенной полярности управляющего напряжения формируется слой полупроводника, обедненный основными носителями заряда. Толщина обедненного слоя (эквивалент диэлектрической прослойки в обычном конденсаторе) зависит от напряжения смещения и распределения легирующей примеси в пленке. Недостатки типичной конструкции:

1. Невозможно реализовать наперед заданную зависимость емкости варикапа от напряжения $C(U)$ в силу технологической сложности формирования примесного профиля с наперед заданным распределением по толщине пленки и по той причине что часть важных для практического использования варикапов зависимостей $C(U)$ не реализуется ни при каком физически реальном распределении примеси.

2. Минимальное значение емкости варикапов определяется напряжением пробоя.

Классический варикап эквивалентен конденсатору переменной емкости, у которого при подаче управляющего напряжения изменяется расстояние между обкладками.

С целью устранения имеющихся недостатков предлагается варикап, который эквивалентен конденсатору переменной емкости у которого при подаче на него напряжения изменяется как расстояние между обкладками, так и площадь обкладок, что технологически легко позволяет реализовать практически любую наперед заданную зависимость емкости от напряжения.

Обратимся к фигуре 1, поясняющей принцип работы и устройство одного из вариантов предлагаемого варикапа, на которой изображен вариктор, содержащий область $p+$ типа (подложку) с омическим контактом к ней, пленку n -типа с толщиной D , омический контакт (токоотвод), выполненный по периметру рабочего участка пленки. На рабочем участке пленки ($0 \leq x \leq X_{\max}, 0 \leq z \leq F(x)$) в пленке ионным легированием создан неоднородный профиль распределения донорной примеси $Ni(x,y)$, причем имплантационная доза возрастает от X_{\max} к 0. За пределами рабочего участка пленки пленка слабо легирована и полностью обеднена основными носителями заряда при нулевом запирающем внешнем смещении на переходе. По мере увеличения запирающего напряжения на переходе область пространственного заряда (ОПЗ) постепенно заполняет рабочий участок пленки, при этом размер области нейтральности $H(U)$ и эффективная площадь пластин конденсатора S непрерывно уменьшаются:

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

где S_k - площадь омического контакта над ОПЗ. Для реализации необходимой зависимости емкости от напряжения можно варьировать 3 параметра $F(x)$, $D(x)$, $Ni(x,y)$ как каждый в отдельности так и все вместе. В отличие от обычного варикапа, у которого зависимость емкости от напряжения определяется только видом распределения примесей $Ni(x,y)$. Причем сложная техническая проблема формирования распределения примесей заданного вида заменяется простой задачей формирования маскирующего покрытия заданной формы.

Недостаток описанного прибора - низкая добротность ввиду большой величины объемного сопротивления области нейтральности полупроводника устраняется введением полосок, имеющих высокую проводимость, которые выполнены на поверхности рабочего участка пленки вдоль направления z с зазором относительно токоотвода и образуют с пленкой омический контакт, (фигура 2).

Для устранения нежелательного влияния поверхности на последней может быть сформирован слой диэлектрика (SiO_2) или изолирующего полупроводника. Изолирующий полупроводник может быть выполнен в виде p - n перехода.

Для достижения максимальной величины коэффициента перекрытия по емкости необходимо минимизировать площадь омического контакта S_k , и выносить контактную площадку, которая может иметь относительно большие размеры на диэлектрический слой.

Уравнения:

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

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

$$V + Vk = q / \epsilon_s \int_0^R Ni(x, y) y dy \quad (2)$$

где $C(U)$ - зависимость емкости от напряжения; $R(x, U)$ - толщина ОПЗ, $H(U)$ - размер области нейтральности в направлении x ; ϵ_s - диэлектрическая проницаемость полупроводника; q - элементарный заряд; U_k - встроенный потенциал барьера.

По многим причинам интерес представляют линейные варикапы в частности при использовании их в

2

качестве параметрических диодов потому, что среднее значение емкости такого варикапа не зависит от уровня гармонических сигналов на нем и не происходит расстройки резонансных контуров в которые включены такие приборы. На фигуре 3 приведена расчетная форма рабочего участка пленки варикапа с линейной C/U характеристикой ($C(U) \sim 1-U/U_{max}$) полученного ионной имплантацией фосфора с энергией 200 keV в слаболегированную пленку Si n- типа толщиной 0,6 мкм и при линейно спадающей вдоль x дозе имплантации (от 10^{12} до $1,54 \cdot 10^{11}$ ионов/см²).

Проведем оценку добротности прибора при отсутствии высокопроводящих полосок (фигура 1), пренебрегая постоянной составляющей тока, который течет через запертый p-n переход. В этом случае добротность Q - есть отношение емкостного сопротивления варактора к сопротивлению растекания R. Рассмотрим случай, когда $H(U) \gg F$:

$$Q = 1 / (w C R); \quad R \approx F r / (D H(U));$$

где D - средняя толщина пленки, H(U) - размер в направлении x области нейтральности, F - среднее значение F(x) на промежутке $0 \leq x \leq H(U)$, r - среднее удельное сопротивление пленки в области нейтральности, w - угловая частота,

$$C \approx \epsilon_s (F H(U) / D + S k / D)$$

при $S k \ll F H(U)$

$$Q \approx (D / F)^2 / (\epsilon_s r w)$$

Аналогично, если $F \gg H(U)$, $Q \approx (D / H(U))^2 / (\epsilon_s r w)$.

Рассмотрим случай, когда $H(U) \gg F$ при наличии полосок :

$$R \approx \rho \Delta / (D H(U));$$

где Δ - величина зазора между полосками и токоотводом.

$$Q \approx D^2 / (\epsilon_s F \Delta r w);$$

то есть наличие проводящих полосок приводит к возрастанию добротности в F / Δ раз.

Ниже рассмотрим другие примеры интересные для практических применений.

Пример 2. Рабочий участок пленки может быть однородно легированным вдоль x и иметь однородную толщину в том случае, когда полупроводниковая подложка, образующая с пленкой p-n переход легирована неоднородно вдоль x (фигура 4). Варикап, представленный на фигуре 4, содержит однородно легированную пленку, размещенную на неоднородно легированной вдоль x подложке. Причем степень легирования подложки увеличивается в пределах рабочего участка вдоль x, а за пределами рабочего участка подложка сильно легирована. Толщина области пространственного заряда в подложке монотонно уменьшается с ростом x тем самым увеличивается с по мере увеличения x толщина области пространственного заряда в пленке. По мере увеличения запирающего напряжения на варикапе ОПЗ постепенно заполняет весь рабочий участок пленки. При этом эффективная площадь пластин конденсатора непрерывно уменьшается. Уравнения, описывающие варикап в случае, когда подложка и пленка изготовлены из одного полупроводникового материала, по аналогии с (1),(2) выглядят следующим образом:

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

$$V + V k = q / \epsilon_s \int_0^{R1} N d(x, y) y dy + q / \epsilon_s \int_0^{R2} N a(x, y) y dy$$

к которым добавляется уравнение электрической нейтральности для полупроводника:

$$\int_0^{R1} N d(x, y) dy = \int_0^{R2} N a(x, y) dy$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$H(U) = x \text{ при } R_1 = D$$

Здесь R_1, R_2 - Толщина ОПЗ в пленке и в подложке, соответственно, $N a(x, y)$ - распределение примесей подложке, $N d(x, y)$ - распределение примесей профиль в пленке.

В качестве иллюстрации на фигуре 5 приведены расчетные зависимости емкости от напряжения для варикапов с однородно легированной пленкой кремния с толщиной 0,5 мкм и с донорной концентрацией примесей 10^{16} см⁻³ при неоднородно легированной подложке, концентрация акцепторов в которой линейно меняется в пределах рабочего участка пленки от 10^{15} до 10^{16} см⁻³ в диапазоне напряжений от 3,1 до 20,2 В. 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 S_{max} составило 105 пФ.

Изготовление неоднородно легированных подложек:

Кристалл полупроводника неоднородно легируется в процессе роста (по методу Чохральского). После чего кристалл разрезается на пластины вдоль оси.

Пример 3. (Изменяемый параметр - толщина пленки).

Варикап выполнен из однородно легированного полупроводника в виде периодической структуры (Фигура 6), на верхней поверхности которой сформирован барьер Шоттки, на нижней поверхности выполнен омический

контакт. Расчетная форма сечения периодической структуры для линейной C/V зависимости приведена на фигуре 7. Структура изготавливается анизотропным травлением кремния.

Пример 4. (Изменяемый параметр - $F(x)$).

Варикап выполнен из однородно легированной полупроводниковой пленки в виде клина (Фигура 8), которая размещена на подложке с противоположным с пленкой типом проводимости. Формы рабочих участков пленки для различных зависимостей ($C(U) \sim (1-U/U_{max})^n$, $n=1,2,3$, $U_{max} = q N_i D_{max}^2 / 2e_s - Uk$, D_{max} - максимальная толщина клина.) представлены на фигуре 9. Клин изготавливается при помощи эпитаксиального наращивания пленки на ориентированную соответствующим образом подложку с последующим анизотропным травлением пленки.

Управляемые конденсаторы .

Широко известен конденсатор переменной емкости представляющий из себя механическое устройство, позволяющее перемещать относительно друг друга обкладки конденсатора. Очевидный недостаток такого прибора - инерционность механической перестройки.

В виде примера рассмотрим управляемый конденсатор, который содержит p-n переход (барьер Шоттки) с неоднородным вдоль направления x профилем легирования. На поверхности p-n перехода (барьера Шоттки) сформирован слой диэлектрика 1, на поверхности которого нанесен металлический слой 2 (Фигура 10). Рассмотрим p-n переход, содержащий сильнолегированную область p^+ типа с омическим контактом, на которой выполнена пленка n-типа с другим омическим контактом. В пленке ($0 \leq x \leq X_{max}$, $0 \leq z \leq F(x)$, $y \leq D$) сформирован неоднородный профиль распределения донорной примеси $N_i(x,y)$, причем степень легирования возрастает от X_{max} к 0. По мере увеличения запирающего напряжения на переходе область пространственного заряда (ОПЗ) постепенно заполняет всю пленку, при этом размер области нейтральности $H(U)$ и эффективная площадь пластин управляемого конденсатора, образованного между областью нейтральности пленки и металлическим слоем 2 непрерывно уменьшаются. Если $C(t)$ - зависимость величины управляемой емкости от времени, Q - заряд на управляемой емкости, то напряжение на управляемой емкости $U_2 = Q/C(t)$.

Пример 1. Параметрический усилитель с постоянным источником питающего напряжения.

Используется возможность изменения емкости между омическим контактом к пленке n-типа и проводящим участком 2 к которым подключен через нагрузку источник питающего напряжения с большим номиналом при помощи относительно небольшого питающего напряжения, поданного на p-n переход (Фигура 11). Расчетная зависимость величины напряжения на управляемой емкости от степени ее модуляции представлена на фигуре 12.

Пример 2. Управляемый конденсатор содержит p-n переход (барьер Шоттки) с неоднородным вдоль направления x профилем легирования. Причем p-n переход, содержащий сильнолегированную область p^+ типа с омическим контактом, на которой выполнена пленка n-типа с другим омическим контактом выполнен поверх проводящих полосок 3. Проводящие полоски сформированы на поверхности диэлектрика. На другой поверхности диэлектрика сформирован металлический слой 2. (Фигура 13). Проводящие полоски выполнены на рабочем участке ($0 \leq x \leq X_{max}$, $0 \leq z \leq F(x)$). В пленке ионным легированием создан неоднородный профиль распределения донорной примеси $N_i(x,y)$, причем имплантационная доза возрастает от X_{max} к 0. По мере увеличения запирающего напряжения на переходе область пространственного заряда (ОПЗ) постепенно заполняет рабочий участок пленки, при этом размер области нейтральности $H(U)$ и эффективная площадь пластин управляемого конденсатора, образованного между проводящими полосками 3 и металлическим слоем 2 непрерывно уменьшаются. Для исключения нежелательного влияния емкостной связи между областями 2 и p^+ областью p-n переход (барьер Шоттки) сформирован над незначительной частью полосок 3. Выбором формы рабочего участка $F(x)$ можно обеспечить необходимую зависимость емкости от напряжения, которая определяется уравнением:

$$C(U) = C_{min} + \epsilon_s / D \int_0^{H(U)} F(x) dx$$

где величина C_{min} определяется размерами омического контакта к пленке n-типа.

На фигуре 14 приведена расчетная форма рабочего участка управляемого конденсатора, который в LC контуре может быть использован в качестве идеального частотного модулятора ($C(U) = C_1 / (C_2 + U)^2$) при отношении $C_{max} / C_{min} = 5$, причем при линейно спадающей вдоль направления x степени легирования n области ($H(U) \sim X_{max} (1-U/U_{max})$).

При производстве полупроводниковых приборов посредством планарно-эпитаксиальной технологии все контакты, как правило, формируются на одной из поверхностей полупроводниковой пластины, причем контакты отделены друг от друга диэлектрической прослойкой (SiO_2). На Фиг. 15 представлен управляемый конденсатор выполненный посредством планарно-эпитаксиальной технологии. Который содержит проводящие полоски -3, проводящую полоску -6, слой диэлектрика -5, неоднородно легированную вдоль ширины прибора примесями n-типа область-1 с омическим контактом, область-2 с омическим контактом, которая образует с областью 1 p-n переход. На фигуре 15 изображены также источник управляющего напряжения -9, подключенный p-n переходу, источник входного сигнала -10. Причем полоски 3 выполнены из сплава золота и сурьмы (для формирования омического контакта с полупроводником n-типа). В качестве диэлектрика использована двуокись кремния. Омический контакт к p-области 2 выполнен из алюминия Омический контакт к n-области 1 (сильнолегированной в районе контакта) выполнен также из алюминия, полоска 6 выполнена также из алюминия. Все контакты друг от друга отделены защитным слоем двуокиси кремния -8. На предлагаемых управляемых конденсаторах могут быть построены генераторы усилители и смесители большой мощности, поскольку нет ограничений присущих у других полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов), связанных с пробоем достаточно тонкой области пространственного заряда p-n перехода.

Управляемые линии передачи.

К недостаткам всех линий передач относится то, что параметры линии передачи такие как волновое сопротивление и длина не регулируются внешним источником напряжения, что затрудняет миниатюризацию настройки и частотную перестройку большого числа СВЧ устройств.

Для пояснения работы управляемой линии передачи обратимся к фигуре 16, на которой приведен один из вариантов предлагаемой линии передачи, содержащий проводящие полоски -3, выполненные вдоль длины линии проводящую полоску -6, слой диэлектрика -5, неоднородно легированную вдоль ширины линии примесями n-типа область-1 с омическим контактом, область-2 с омическим контактом, которая образует с областью 1 p-n переход либо барьер Шоттки. На фигуре 13 изображены также источник управляющего напряжения -9, подключенный p-n переходу через дроссель -11, служащий для развязки цепей источника входного сигнала и управляющего напряжения по переменному току, источник входного сигнала -10. Поверх проводящих полосок 3 сформирован эпитаксиальный n-типа слой поликристаллического кремния 1, образующий с полоской 3 омический контакт. Причем слой

поликристаллического кремния 1 неоднородно легирован вдоль ширины линии (вдоль направления Z). Причем степень легирования уменьшается с ростом Z . Поверх слоя поликристаллического кремния сформирована область -2 с омическим контактом, которая образует с областью 1 p-n переход либо барьер Шоттки. По мере увеличения запирающего напряжения U (источника 9) на переходе размер вдоль Z области нейтральности в полупроводнике n-типа $N(U)$ непрерывно уменьшается. При этом эффективная ширина линии W с дискретностью равной ширине одной из полосок 3 повторяет $N(U)$, что приводит к пропорциональному увеличению волнового сопротивления линии ($\rho \sim 1/N(U)$).

Для пояснения работы линии передачи с изменяемой длиной обратимся к фигуре 17, которая содержит проводящие полоски - 3, выполненные вдоль ширины линии, проводящую полоску -6, слой диэлектрика -5, неоднородно легированную вдоль длины линии примесями n-типа область-1 с омическим контактом, область -2 с омическим контактом, которая образует с областью 1 p-n переход либо барьер Шоттки. На фигуре 17 изображены также источник управляющего напряжения - 9, подключенный p-n переходу через дроссель -11, служащий для развязки цепей источника входного сигнала и управляющего напряжения по переменному току, источник входного сигнала -10. Поверх проводящих полосок 3 сформирован эпитаксиальный n-типа слой поликристаллического кремния 1, образующий с полосками 3 омический контакт. Причем слой поликристаллического кремния 1 неоднородно легирован вдоль длины линии (вдоль направления X). Причем степень легирования уменьшается с ростом X . Поверх слоя поликристаллического кремния сформирована область - 2 с омическим контактом, которая образует с областью 1 p-n переход либо барьер Шоттки. По мере увеличения запирающего напряжения U (источника 9) на переходе размер вдоль X области нейтральности (в полупроводнике n-типа) $N(U)$ уменьшается. При этом эффективная длина линии L повторяет $N(U)$ с дискретностью равной ширине одной из полосок 3.

Для исключения нежелательного влияния емкостной связи между областями 6 и 2 p-n переход (барьер Шоттки) может быть сформирован над частью полосок 3. На фигуре 18 приведена линия передачи, которая содержит проводящие полоски - 3, выполненные вдоль длины линии, проводящую полоску -6, слой диэлектрика -5, неоднородно легированную вдоль ширины линии примесями n-типа область -1 с омическим контактом, область -2 с омическим контактом, которая образует с областью 1 p-n переход либо барьер Шоттки. На фигуре 18 изображены также источник управляющего напряжения - 9, подключенный p-n переходу через дроссель -11, служащий для развязки цепей источника входного сигнала и управляющего напряжения по переменному току, источник входного сигнала -10, сопротивление нагрузки 12, подключенное к выходу линии. Причем p-n переход (барьер Шоттки) выполнен в начале и в конце линии. Заметим, что p-n переход либо барьер Шоттки может быть сформирован на продолжении проводящих участков 3 за пределами диэлектрической прослойки 5.

Второй способ исключения нежелательного влияния емкостной связи между областями 6 и 2 заключается в том, что у p-n перехода неоднородно вдоль Z (X) легируются как n- область так и p- область. При этом по мере роста управляющего напряжения размер области нейтральности вдоль Z (X) в p-области уменьшается также как и в n-области.

Транзисторы

Рассмотрим работу полупроводникового прибора в качестве транзистора (фигура 19). В этом случае слой 5 должен обладать проводимостью. То есть либо слой 5 выполнен из диэлектрика с малой толщиной через который может протекать туннельный ток либо выполнен из проводящего в том числе полупроводникового материала. Проводимость проводящего материала должна быть достаточно низкой, чтобы не шунтировать область 1 p-n перехода (барьера Шоттки).

Для пояснения работы предлагаемого прибора обратимся к фигуре 19, на которой приведен один из вариантов содержащий n-типа область -1, неоднородно легированную вдоль X , с омическим контактом, область-2 с омическим контактом, которая образует с областью 1 p-n переход либо барьер Шоттки, проводящие полоски -3, слой -5, выполненный из слаболегированного полупроводника n-типа, проводящую полоску -6. На фиг. 19 изображены также источник управляющего напряжения - 9, подключенный p-n переходу, источник постоянного напряжения -13. Поверх проводящих полосок 3 сформирован эпитаксиальный n-типа слой кремния 1, образующий с полосками 3 омический контакт. Причем слой кремния 1 неоднородно легирован (вдоль направления X). Причем степень легирования уменьшается с ростом X . Поверх слоя кремния сформирована область - 2 с омическим контактом, которая образует с областью 1 p-n переход либо барьер Шоттки. По мере увеличения запирающего напряжения U (источника 9) на переходе размер вдоль X области нейтральности в полупроводнике n-типа ($N(U)$) непрерывно уменьшается. При этом эффективная ширина омического контакта к области 1 W с дискретностью равной ширине одной полоски 3 повторяет $N(U)$.

В рассмотренном случае проводящие полоски сформированы на одной из поверхностей пластины 5, которая обладает низкой проводимостью. Очевидно, что если на другой поверхности материала, который обладает низкой проводимостью, также сформировать полоски поверх которых сформировать неоднородно легированный (поперек полосок) p-n переход, то при подаче на него напряжения можно также варьировать эффективную площадь контакта.

Заметим что зависимость сопротивления прибора (между омическим контактом к области 6) от величины управляющего напряжения определяется выбором формы области, на которой выполнены проводящие полоски 3 и профилем легирования p-n перехода (барьера Шоттки). Если требуется изменение величины сопротивления прибора в больших пределах, то в том случае, когда размер контактной площадки к области 1 соизмерим с размерами прибора, контактная площадка может быть вынесена на сформированный диэлектрический слой. Если не требуется изменения величины сопротивления прибора между омическим контактом к области 1 и 6 в больших пределах, то проводящие участки 3 выполненные на поверхности области 1 непосредственно соединяются с омическим контактом к области 1. В этом случае эффективная площадь контактов управляемого резистора изменяется на величину равную площади зазоров между участками 3.

Транзисторы с высоким входным и выходным сопротивлением

с любым в том числе линейным видом передаточной характеристики.

Для пояснения работы транзистора обратимся к фигуре 20, на которой представлено усилительное устройство, содержащее транзистор, который включает в себя области коллектора -1, базы -2, эмиттера -3 и управляющего электрода - 4, легированные соответственно примесями p, p, n, p типа, с омическими контактами к ним. Усилитель на транзисторе содержит источник входного напряжения -5, источник прямого смещения между эмиттером и базой - 6, источник обратного смещения между коллектором и базой - 7, нагрузку -8. Причем область эмиттера, легирована неоднородно вдоль поверхностной координаты x . Поверх эмиттера ($y < 0$), сформированного в рабочей области ($0 \leq x \leq x_p$, $0 \leq z \leq F(x)$, $0 \leq y \leq D$), выполнен управляющий электрод, который изготовлен из полупроводникового материала противоположного с эмиттером типа проводимости, с омическим контактом к нему

либо из металла, образующего с эмиттером барьер Шоттки. Причем степень легирования возрастает от X_0 к 0. Причем по крайней мере часть рабочей области обедняется полностью основными носителями заряда при подаче запирающего напряжения на переход управляющий электрод-эмиттер до пробоя. По мере увеличения запирающего напряжения U на переходе эмиттер - управляющий электрод размер вдоль x области нейтральности $H(U)$ и эффективная площадь эмиттера $S(U)$ непрерывно уменьшается, что приводит к пропорциональному уменьшению тока эмиттера и коллектора ($I_k \sim S(U)$) и снимаемого с нагрузки I_8 выходного сигнала. При этом функциональная зависимость тока эмиттера и коллектора от напряжения определяется функциональной зависимостью размера области эмиттера $F(x)$ вдоль z

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

где x, z - прямоугольные координаты в плоскости поверхности эмиттера. То есть задавая ту или иную форму области эмиттера можно менять зависимость коллекторного тока от напряжения. Очевидно, что аналогичного изменения эффективной площади эмиттера можно добиться при однородном по площади легировании эмиттера если толщина области эмиттера неоднородна и также при неоднородной толщине и уровне легирования вдоль поверхностной координаты x . Для преобладания тока эмиттера над током базы необходимо преобладание степени легирования области эмиттера над областью базы. Либо эмиттер должен быть выполнен из полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны больше чем ширина запрещенной зоны полупроводника из которого выполнена область базы.

Если в неоднородно легированной области эмиттера сформировано дополнительно большое число проводящих участков 10 (фигура 21), которые выполнены из сильнолегированного материала того же типа проводимости, что и слаболегированная основа области эмиттера и участки 10 сформированы с зазором относительно омического контакта 11 и вспомогательной области 9, которая обладает высокой проводимостью (которая на фигуре 21 выполнена вдоль периметра области эмиттера) работа транзистора не отличается от вышеописанного случая. По мере увеличения запирающего напряжения U на переходе эмиттер - управляющий электрод размер области нейтральности вдоль x слаболегированной основы эмиттера (легированной неоднородно вдоль x), уменьшается. Те сильнолегированные участки 10, которые находятся внутри той части слаболегированной основы, которая полностью обеднена основными носителями заряда, как бы отсекаются от эмиттера. Все контакты отделены друг от друга диэлектрической прослойкой -12 (SiO_2). Конструкция транзистора с чередованием сильнолегированных слоев в неоднородно слаболегированной основе области эмиттера позволяет:

1. Расширить область подаваемых напряжений (электрический пробой толстых слаболегированных переходов наступает при существенно больших входных напряжениях чем у сильнолегированных).
2. Снизить емкость управляющий электрод-эмиттер путем формирования более толстых эмиттеров.
3. Повысить коэффициент усиления транзистора (возможно управление эффективной площадью эмиттера при существенно меньших входных напряжениях при тонкой неоднородно легированной основе).
4. Снизить объемное сопротивление эмиттера.

Очевидно, что объемное сопротивление эмиттера пропорционально $\sim \rho F / D / x_0$ в случае конструкции транзистора при отсутствии проводящих участков 10 и пропорционально $\sim \rho \Delta / D / x_0$ при наличии проводящих областей 10 (F - среднее значение $F(x)$), ρ - величина среднего удельного сопротивления области нейтральности эмиттера, Δ - величина зазора между полосками 10 и полоской 9, D - средняя толщина области эмиттера). То есть введение полосок позволяет снизить объемное сопротивление эмиттера в F/Δ раз.

Минимальная эффективная площадь эмиттера определяется площадью омического контакта и площадью вспомогательной полоски 9. С целью уменьшения величины минимальной эффективной площади эмиттера необходимо выносить контактную площадку эмиттера (которая может иметь относительно большую площадь) на диэлектрический слой.

Заметим, что изменения эффективной площади эмиттера можно добиться и при однородно легированной вдоль x области эмиттера имеющей однородную толщину. Для этого необходимо использовать управляющие электроды неоднородно легированные вдоль x . Для пояснения работы транзистора обратимся к фигуре 22, на которой представлено усилительное устройство, содержащее транзистор, который включает в себя области коллектора -1, базы -2, эмиттера -3 и управляющего электрода -4, легированные соответственно примесями p, p, n, p типа, с омическими контактами к ним. Усилитель на транзисторе содержит источник входного напряжения-5, источник прямого смещения между эмиттером и базой -6, источник обратного смещения между коллектором и базой -7, нагрузку -8. Причем эмиттер легирован однородно вдоль поверхностной координаты x . Поверх эмиттера ($y < 0$), сформированного в рабочей области ($0 \leq x \leq x_0, 0 \leq z \leq F(x), 0 \leq y \leq D$)), сформирован управляющий электрод, выполненный из полупроводникового материала противоположного с эмиттером типа проводимости с омическим контактом к нему. Степень легирования управляющего электрода увеличивается вдоль x при этом очевидно толщину области пространственного заряда (ОПЗ) в управляющем электроде с увеличением x уменьшается, тем самым увеличивается падение напряжения на области эмиттера (увеличивается вдоль x толщина области пространственного заряда в области эмиттера). Причем по крайней мере часть рабочей области обедняется полностью основными носителями заряда при подаче запирающего напряжения на переход управляющий электрод-эмиттер до пробоя. По мере увеличения запирающего напряжения U на переходе эмиттер - управляющий электрод размер вдоль x области нейтральности и эффективная площадь эмиттера непрерывно уменьшается, что приводит к пропорциональному уменьшению тока эмиттера и тока коллектора и снимаемого с нагрузки I_8 выходного сигнала. При этом функциональная зависимость тока эмиттера и коллектора от напряжения определяется функциональной зависимостью размера области эмиттера $F(x)$ вдоль z .

Поскольку функциональная зависимость тока эмиттера и коллектора от напряжения определяется функциональной зависимостью размера области эмиттера $F(x)$ вдоль z можно задавшись необходимой зависимостью (например линейной) коллекторного тока от напряжения подобрать под эту зависимость необходимую форму области эмиттера. В дальнейшем будем полагать, что слаболегированная основа области эмиттера легирована много слабее чем

область базы. Для напряжения перекрытия (минимального внешнего напряжения U на переходе управляющий электрод- эмиттер, при котором в сечении $H(U)$,у наступает полное обеднение эмиттера основными носителями заряда) в этом случае можно, пренебрегая падением напряжения в базовой области, записать:

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

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 решение (3,4) для линейной зависимости $S(U) \sim U$

а) при однородном профиле легирования области эмиттера, 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 эффективной площади:

$$dU \sim - (x_0 - x) = - F(x) dx, \quad F(x) = - dU/dx \sim x_0 - x$$

То есть в этом случае мы имеем треугольную форму области эмиттера.

б) при однородной толщине пленки ($D(x)=D$) и линейно спадающей вдоль x дозе имплантации (5) получим :

$$U + U_k + U_{k2} - U_2 \sim x_0 \cdot x$$

для линейного транзистора имеем:

$$dU \sim - 1 = - F(x) dx, \quad F(x) = - dU/dx \sim 1$$

То есть в этом случае мы имеем прямоугольную форму области эмиттера.

Заметим, что схема усилителя, изображенного на фигуре 20, может использоваться в качестве смесителя при включении дополнительного источника электрических колебаний в цепь между эмиттером и базой.

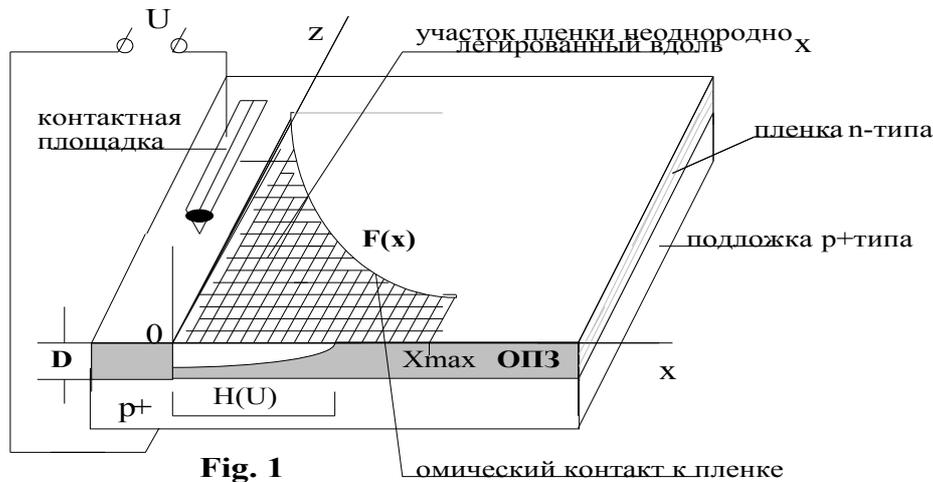


Fig. 1

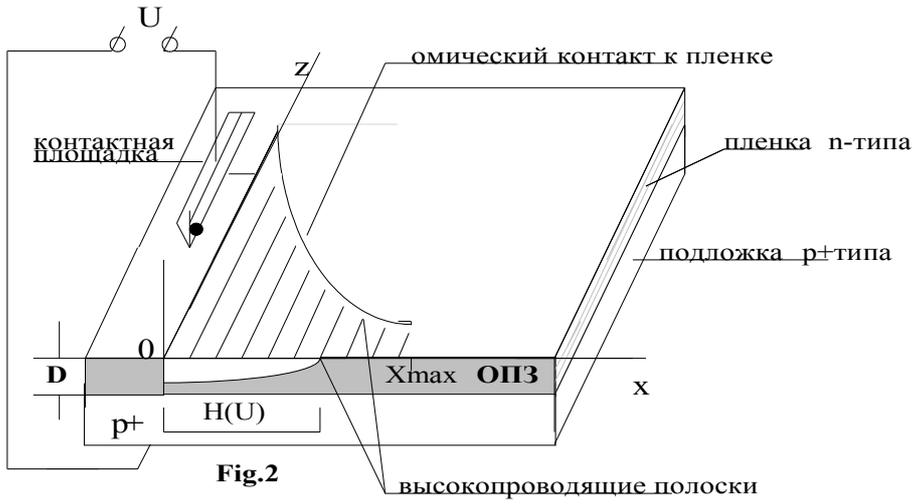


Fig.2

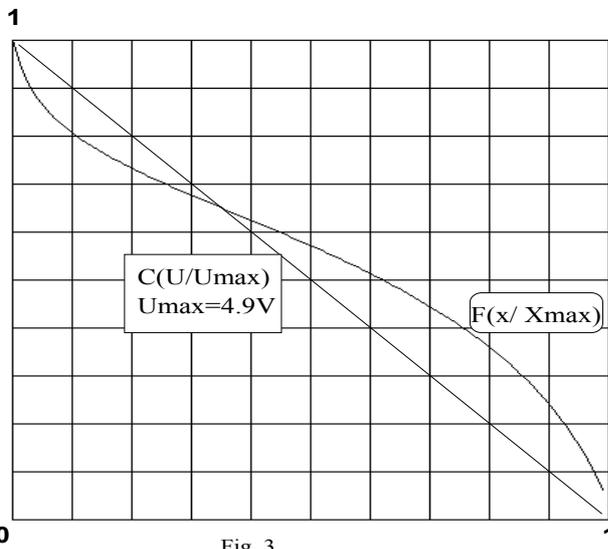


Fig. 3

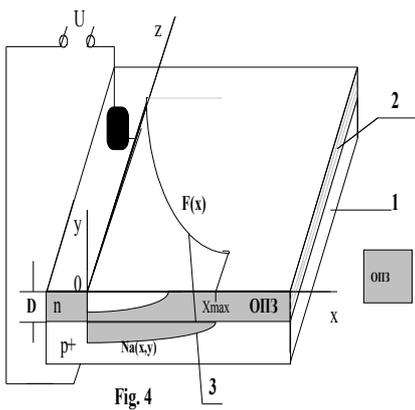


Fig. 4

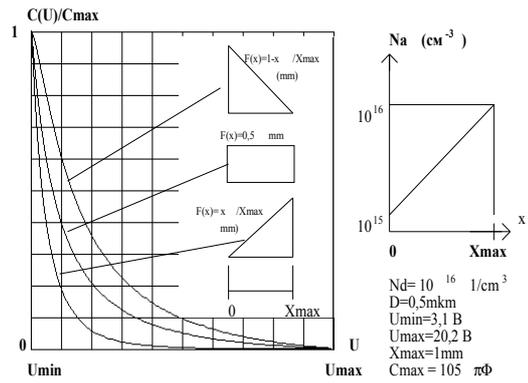


Fig. 5

$N_d = 10^{16} \text{ 1/cm}^3$
 $D = 0,5 \text{ mkm}$
 $U_{min} = 3,1 \text{ В}$
 $U_{max} = 20,2 \text{ В}$
 $X_{max} = 1 \text{ mm}$
 $C_{max} = 105 \text{ пФ}$

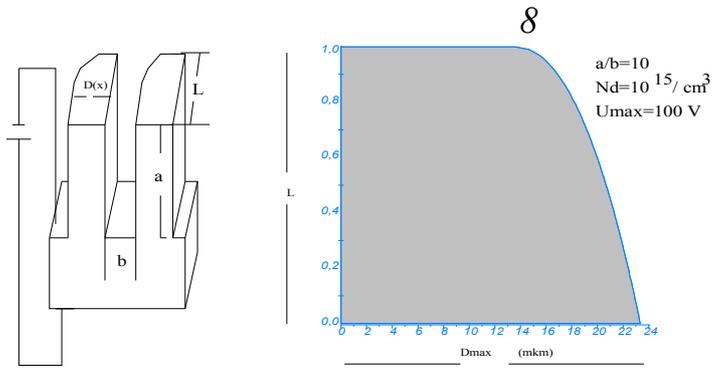


Fig. 6

Fig. 7

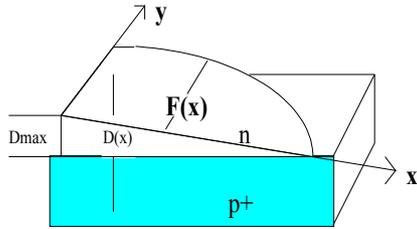


Fig. 8

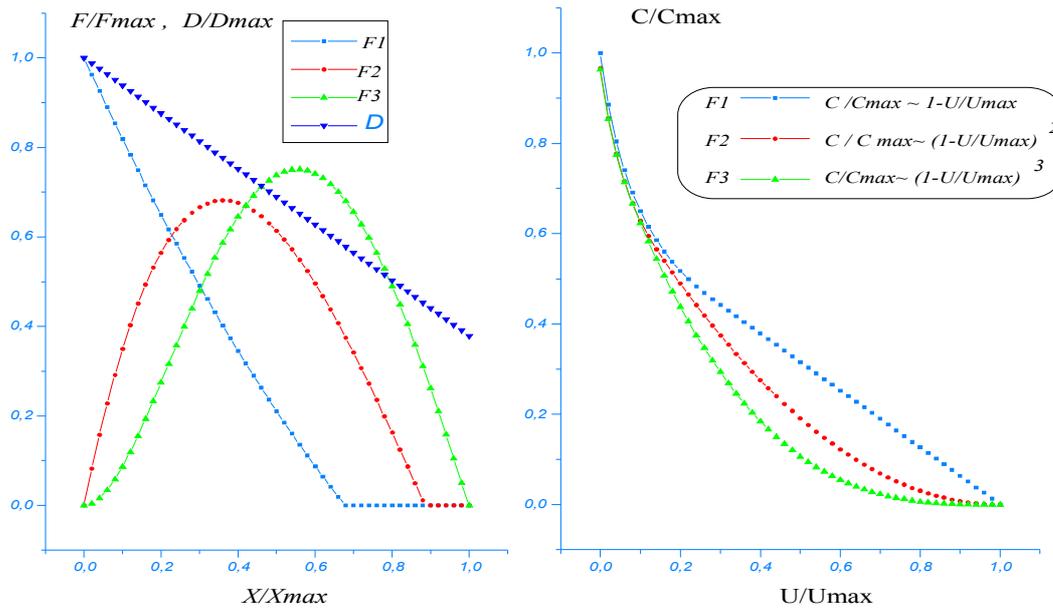


Fig. 9

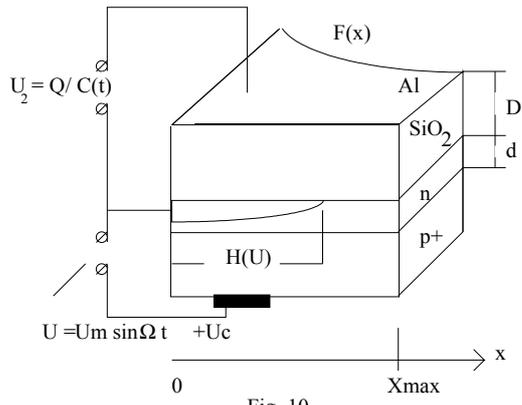


Fig. 10

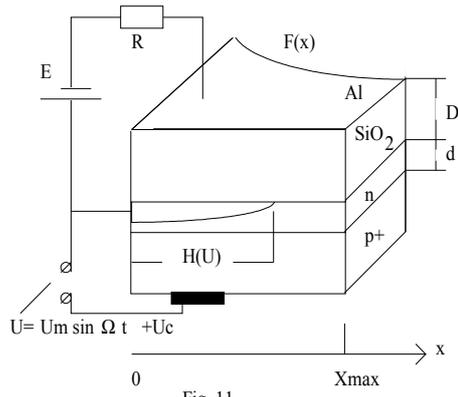


Fig. 11

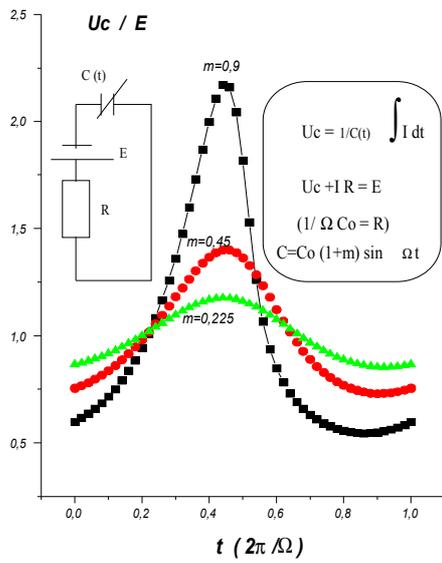


Fig. 12

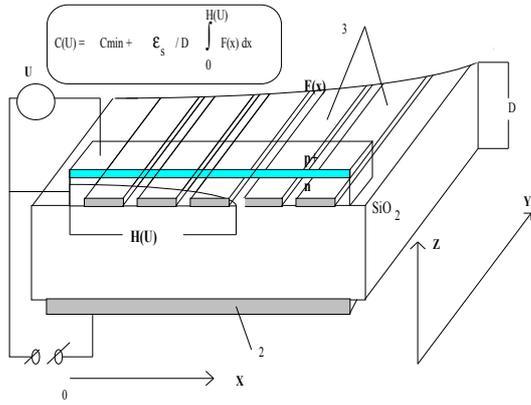


Fig. 13

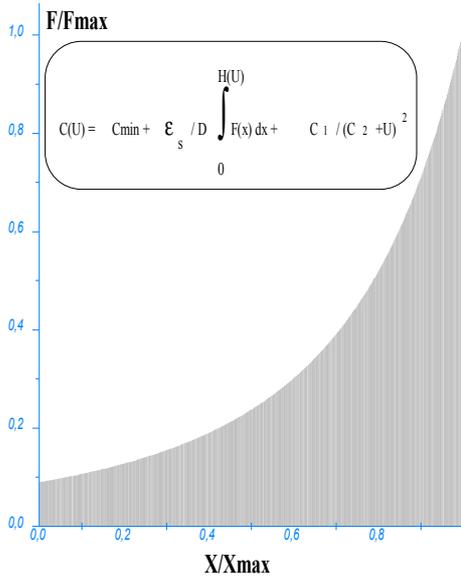


Fig. 14

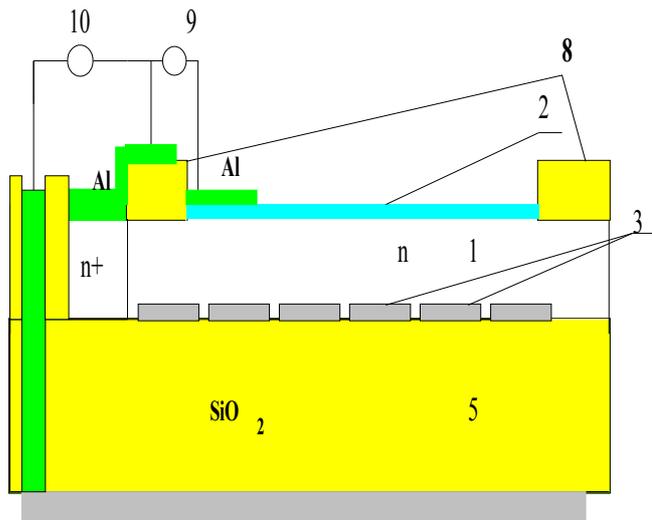


Fig. 15

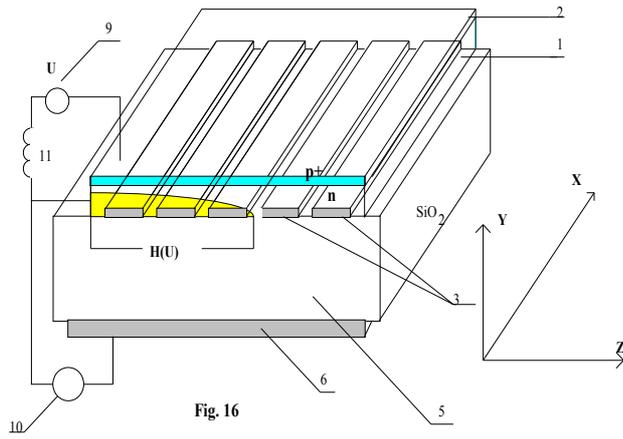


Fig. 16

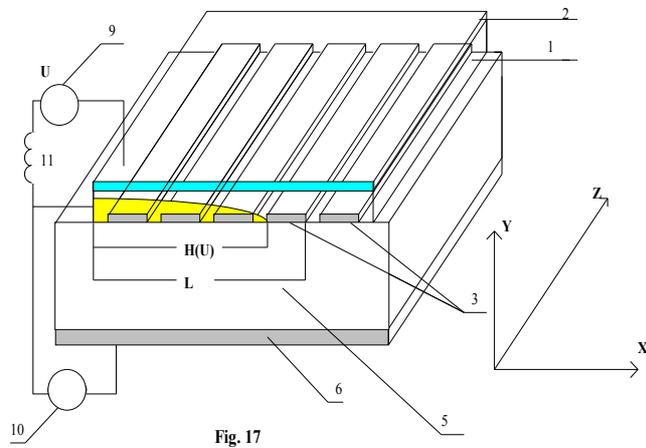


Fig. 17

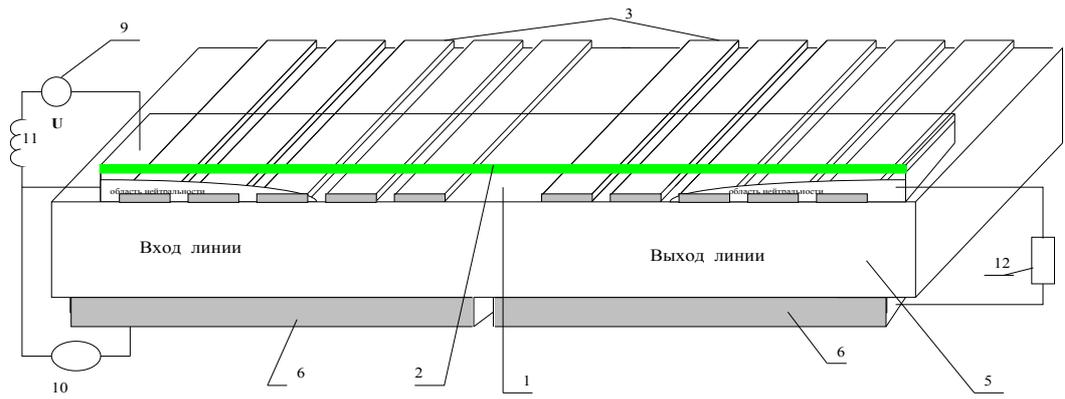


Fig. 18

