

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **15265**

(13) **С1**

(46) **2011.12.30**

(51) МПК

H 01L 21/331 (2006.01)

(54)

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА

(21) Номер заявки: а 20090596

(22) 2009.04.22

(43) 2010.12.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Снитовский Юрий Павлович; Нелаев Владислав Викторович; Ефремов Василий Андреевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) СНИТОВСКИЙ Ю.П. и др. // Микроэлектроника. - 2007. - Т. 36. - № 6. - С. 465-471.

RU 2025824 С1, 1994.

SU 460012, 1976.

SU 1145838 А1, 1993.

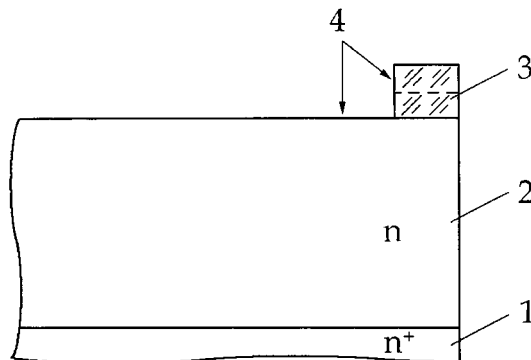
SU 1163763 А1, 1993.

US 3890163, 1975.

JP 61216362 А, 1986.

(57)

Способ изготовления транзистора, включающий формирование пленки диоксида кремния посредством термического окисления поверхности кремниевой подложки с эпитаксиальным слоем с последующим осаждением пиролитического диоксида кремния, вскрытие в комбинированном слое диоксида кремния окна под базовую область, выращивание на вскрытой поверхности пленки термического диоксида кремния, осаждение на нее фоторезиста, вскрытие в нем окон под охранное кольцо, легирование области охранного кольца путем ионного внедрения базовой примеси через пленку термического диоксида кремния по маске фоторезиста с окнами под охранное кольцо, диффузионный отжиг базовой примеси в нейтральной среде, вскрытие в пленке термического диоксида кремния эмиттерных окон для формирования базовой области, легирование базовой области путем ионного внедрения базовой примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через пленку термического диоксида кремния и в ее эмиттерные окна, диффузионный отжиг



Фиг. 1

базовой примеси в нейтральной среде, легирование эмиттерных областей путем ионного внедрения эмиттерной примеси в кремниевую подложку через эмиттерные окна в пленке термического диоксида кремния, диффузионный отжиг эмиттерной примеси в нейтральной среде, вскрытие контактных окон и формирование контактов к эмиттерной и базовой областям на основе алюминия с барьерным слоем молибдена, **отличающийся** тем, что перед нанесением пленки алюминия на поверхность кремниевой подложки с эпитаксиальным слоем с вскрытыми контактными окнами на эту поверхность наносят пленку молибдена толщиной h , осаждают на нее фоторезист, вскрывают в нем эмиттерные окна, дополнительно легируют эмиттерные области путем ионного внедрения эмиттерной примеси через пленку молибдена по маске фоторезиста с окнами под эмиттер дозой ионов эмиттерной примеси $0,5 \cdot 10^{14} - 6,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и энергией ионов такой, чтобы средний проективный пробег ионов был не меньше толщины h пленки молибдена, после нанесения пленки алюминия формируют разводку и осуществляют низкотемпературный отжиг контактов в нейтральной среде.

Изобретение относится к области микроэлектроники и может быть использовано в технологии изготовления приборов микроэлектроники, в частности СВЧ-транзистора по планарной технологии.

В заявляемом изобретении речь преимущественно идет о мощном биполярном СВЧ-транзисторе, наиболее широкой областью применения которого является его использование в СВЧ-генераторе с независимым возбуждением (усилитель мощности) с отсечкой коллекторного тока, который работает в существенно нелинейных режимах (классы В или С). Характерным для генераторного СВЧ-транзистора является то, что в нем сочетаются свойства мощного низкочастотного (НЧ) и высокочастотного (ВЧ) транзисторов, мало-мощного усилительного СВЧ-транзистора, а также быстродействующего импульсного транзистора. Все это в целом и определяет систему параметров этого класса транзистора. Совокупность параметров, входящих в систему, можно классифицировать в виде следующих основных групп: энергетические, малосигнальные, предельно допустимые, статические, тепловые, конструктивные [1].

Энергетические параметры транзистора (выходная мощность $P_{\text{вых}}$, коэффициент усиления по мощности $K_{\text{ур}}$, коэффициент полезного действия (КПД) коллектора η_k) сложным образом зависят от сочетания его конструктивных, тепловых и технологических характеристик [1, стр. 7].

Основными малосигнальными параметрами мощного генераторного СВЧ-транзистора являются граничная частота коэффициента передачи тока $f_{\text{гр}}$, емкость эмиттерного $C_{\text{Э}}$ и коллекторного $C_{\text{К}}$ переходов, постоянная времени цепи обратной связи на высокой частоте τ_k , а также критический ток коллектора $I_{\text{К кр}}$ [1, 2, 3]. Контролируемые статистические параметры - обратные токи эмиттерного $I_{\text{ЭБ0}}$ и коллекторного $I_{\text{КБ0}}$ переходов, а также статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21\text{Э}}$. Важным тепловым параметром является тепловое сопротивление переход-корпус $R_{\text{T п-к}}$. Этот параметр зависит от топологии активных областей транзисторной структуры, конструкции корпуса и характеристик входящих в него материалов, а также от режима работы транзистора [1, 2]. Основными предельно допустимыми параметрами рассматриваемого мощного СВЧ-транзистора являются пробивное напряжение перехода эмиттер-база $U_{\text{ЭБ0 проб}}$, пробивное напряжение перехода коллектор-база $U_{\text{КБ0 проб}}$ и пробивное напряжение перехода коллектор-эмиттер $U_{\text{КЭР проб}}$. Конструктивные параметры транзистора - индуктивности эмиттерного $L_{\text{Э}}$, базового $L_{\text{Б}}$ и коллекторного $L_{\text{К}}$ выводов транзистора в заявляемом изобретении не обсуждаются.

Особо нужно сказать о выходных вольт-амперных характеристиках этого класса приборов в схеме с общим эмиттером $I_K = f(U_{KЭ})$. В линейном режиме работы транзисторов (класс А) линейность усиления будет лучше для тех приборов, у которых нелинейные искажения выражены слабее [4, стр. 20, рис. 2а].

Необходимость получения высоких значений КПД η_K вызвана энергетическими соображениями. Низкие значения КПД означают уменьшение полезной выходной мощности и увеличение доли мощности, рассеиваемой транзистором и приводящей к его избыточному разогреву. Достижение высоких значений КПД связано с использованием всех трех областей (области насыщения, активной области и области отсечки тока коллектора) на семействе выходных вольт-амперных характеристик транзистора ($I_K = f(U_{KЭ})$). Поскольку энергетические параметры очень важны для устройств, в которых применяются мощные СВЧ-транзисторы (режим работы в классе В и С), следует полагать, что транзисторы, имеющие лучшие энергетические параметры ($P_{\text{вых}}$, η_K , $K_{ур}$), а также более высокие значения граничной частоты коэффициента передачи тока $f_{гр}$, более надежны при использовании их в режиме, когда транзисторный каскад работает в классах В или С [4, стр. 20].

При создании мощного СВЧ-транзистора необходимо удовлетворять противоречивым требованиям: с одной стороны, получению заданной частоты, а с другой - получению заданных величин мощности и усиления. Кроме того, следует отметить, что точный расчет основных параметров мощного СВЧ-транзистора является сложной задачей вследствие необходимости учета многочисленных физических явлений, связанных с перераспределением тока в транзисторной структуре. При этом основной задачей является достижение, с одной стороны, максимальной величины граничной частоты $f_{гр}$, КПД η_K , выходной мощности $P_{\text{вых}}$, критического тока коллектора $I_{K\text{кр}}$, а с другой - сведение к минимуму величин емкости эмиттерного $C_Э$ и коллекторного C_K переходов, а также постоянной времени цепи обратной связи на высокой частоте $\tau_K = r'_6 C_K$, где r'_6 - сопротивление базы [1].

Проблема КПД, являющаяся принципиальной для любых мощных устройств, в случае полупроводниковых приборов имеет дополнительный смысл: чем выше КПД, тем "легче при заданной выходной мощности тепловой режим прибора и тем выше его надежность" [5, стр. 29].

Кроме того, общим для всех полупроводниковых приборов является требование максимального снижения омических потерь в пассивных областях полупроводника и в контактах, в частности в омических контактах металл-полупроводник. Для того чтобы вклад этих потерь в выходные параметры приборов был мал, удельное переходное сопротивление контактов r_K не должно превышать 10^{-6} - 10^{-5} Ом·см² в приборах сантиметрового диапазона и 10^{-7} - 10^{-6} Ом·см² в приборах миллиметрового диапазона [5, стр. 30-31]. Создание таких контактов представляет собой самостоятельную серьезную задачу.

Специфическим условием повышения КПД транзисторов и приближения его к высоким предельным значениям ($\eta_{КА} = 50\%$, $\eta_{КВ} = 78\%$, $\eta_{КС} = 100\%$ при работе в классах А, В и С соответственно) является повышение его граничной частоты коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером $f_{гр}$ относительно рабочей частоты f и повышение пробивного напряжения транзистора, ограничивающего относительную амплитуду высокочастотных колебаний [5, стр. 31].

СВЧ-транзисторы, в том числе мощные СВЧ-транзисторы, имеют преимущественно гребенчатую или многоэмиттерную структуру в плане, однако технология их создания не отличается от обычной планарной технологии полупроводниковых приборов [6].

Для повышения выходной мощности, коэффициента усиления по мощности, граничной частоты коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером необходимо уменьшать ширину эмиттерной области, а для повышения критического тока коллектора - использовать эпитаксиальные структуры с меньшим значением удельного сопротивления эпитаксиального слоя $\rho_{э,с}$ [2]. Параметр $I_{K\text{кр}}$ позволяет оценить качество изготовления

BY 15265 C1 2011.12.30

СВЧ-транзистора [3]: чем выше величина $I_{K\text{кр}}$, тем выше качество их изготовления и выше коэффициент инжекции эмиттера γ .

К сожалению, реализация указанных принципиальных способов улучшения характеристик обсуждаемых транзисторов затруднительна вследствие ряда технологических проблем, а именно:

создание окон к базе и эмиттеру вследствие их малых размеров (~1-1,5 мкм) повышает требования к фотошаблонам и операциям фотолитографии и травления;

неодинаковая толщина диоксида кремния в эмиттерной и базовой областях транзистора, обуславливающая разные времена травления контактных окон, что создает трудности в удалении диоксида кремния из контактных окон и увеличивает вероятность закорачивания эмиттерного p-n-перехода материалом контакта;

снижение величины $\rho_{э,с}$ ведет к уменьшению пробивных напряжений коллектор-эмиттер $U_{KЭР\text{ проб}}$ и к увеличению емкости коллектора C_K .

Известен способ изготовления транзисторов, включающий формирование диоксида кремния на поверхности кремниевой подложки с эпитаксиальным слоем, вскрытие в диоксиде кремния окон под охранное кольцо (p⁺-пассивная база), легирование области охранного кольца путем ионного внедрения примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем сквозь окна в диоксиде кремния, диффузионный отжиг примеси в окислительной среде, вскрытие в пленке диоксида кремния окна под базовую область, легирование базовой области путем ионного внедрения примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем в окно в диоксиде кремния, диффузионный отжиг базовой примеси в окислительной среде, вскрытие в пленке диоксида кремния эмиттерных окон, легирование эмиттерных областей путем диффузии примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через эмиттерные окна в диоксиде кремния, диффузионный отжиг эмиттерной примеси в окислительной среде, удаление фосфор-силикатного стекла, вскрытие контактных окон и формирование контактов [7].

Недостаток такого способа связан со снижением надежности прибора: на поверхности базовой области концентрация примеси оказывается гораздо выше, чем в объеме (поскольку диффузия примеси в кремнии анизотропна), так что в базовую область примесь диффундирует глубже, а под край защитной маски (пленки диоксида кремния) - на меньшее расстояние. По этой причине в случае тонких диффузионных слоев (с глубиной залегания эмиттерного перехода ~0,1-0,2 мкм), когда диффузия под край защитной маски мала, использование открытого эмиттера приводит к резкому возрастанию вероятности короткого замыкания материалом контакта перехода эмиттер-база при проведении операции отжиг контактов [2].

Другой недостаток этого способа формирования транзистора связан с проявлением эффекта рассовмещения при создании на поверхности кремниевой подложки с эпитаксиальным слоем требуемого рисунка вследствие ошибки при совмещении фотошаблона "эмиттер" с рисунком, ранее созданным на поверхности кремниевой подложки с эпитаксиальным слоем. Это также приводит к снижению надежности транзистора, обусловленному увеличением брака вследствие короткого замыкания эмиттерного перехода материалом контакта.

Третий недостаток: боковые стенки эмиттерного перехода транзистора, сформированного таким способом, не просто пассивны, а приводят к отрицательному эффекту - снижению коэффициента передачи тока эмиттера $h_{21э}$ и граничной частоты коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером $f_{гр}$ [8]. Транзистор, сформированный таким способом, характеризуется невысоким значением КПД коллектора, большими величинами коллекторной C_K и эмиттерной $C_э$ емкостей, низким уровнем $U_{ЭБ0\text{ проб}}$, а также низким значением коэффициента инжекции эмиттера γ .

Известен способ изготовления мощных СВЧ-транзисторов, включающий формирование диоксида кремния на поверхности кремниевой подложки с эпитаксиальным слоем,

BY 15265 C1 2011.12.30

вскрытие в диоксиде кремния окон под охранное кольцо, легирование области охранного кольца путем ионного внедрения базовой примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через окна в диоксиде кремния, диффузионный отжиг базовой примеси в окислительной среде, вскрытие в пленке диоксида кремния окна под базовую область, легирование базовой области путем ионного внедрения примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через окно в диоксиде кремния, осаждение пиролитического диоксида кремния, диффузионный отжиг базовой примеси в окислительной среде, вскрытие в пленке диоксида кремния эмиттерных окон, легирование эмиттерных областей путем ионного внедрения примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через эмиттерные окна в диоксиде кремния, диффузионный отжиг эмиттерной примеси в нейтральной среде, вскрытие контактных окон и формирование контактов на основе алюминия с барьерным слоем молибдена [9, стр. 466-467, рис. 1].

Недостатком этого способа изготовления, как и предыдущего, является снижение надежности прибора, обусловленное возрастанием вероятности короткого замыкания материалом контакта перехода эмиттер-база при проведении операции отжиг контактов, и проявление эффекта рассовмещения, также приводящего к снижению надежности транзистора, обусловленному увеличением брака вследствие короткого замыкания эмиттерного перехода материалом контакта. Кроме того, недостаток этого способа изготовления транзисторов связан с тем, что в этом случае боковые стенки эмиттерного перехода не просто пассивны, а приводят и к отрицательному эффекту - снижению коэффициента усиления $h_{21э}$ и граничной частоты коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером $f_{гп}$ [8]. При этом КПД коллектора невысок, значения параметров $K_{ур}$, $P_{вых}$, $U_{ЭБО}$ проб низкие, а величины емкостей C_K и $C_Э$ высокие.

Из известных технических решений наиболее близким к предлагаемому является способ изготовления мощных СВЧ-транзисторов, включающий формирование пленки диоксида кремния путем термического окисления подложки с эпитаксиальным слоем с последующим осаждением пиролитического диоксида кремния, вскрытие в комбинированном слое диоксида кремния окна под базовую область, выращивание на вскрытой поверхности пленки термического диоксида кремния, осаждение на нее фоторезиста, вскрытие в нем окон под охранное кольцо, легирование области охранного кольца путем ионного внедрения базовой примеси через пленку термического диоксида кремния по маске фоторезиста с окнами под охранное кольцо, диффузионный отжиг базовой примеси в нейтральной среде, вскрытие в пленке термического диоксида кремния эмиттерных окон для формирования базовой области, легирование базовой области путем ионного внедрения примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через пленку термического диоксида и через ее эмиттерные окна, диффузионный отжиг базовой примеси в нейтральной среде, легирование эмиттерных областей путем ионного внедрения примеси через эмиттерные окна в пленке термического диоксида кремния, диффузионный отжиг эмиттерной примеси в нейтральной среде, вскрытие контактных "окон" и формирование контактов на основе алюминия с барьерным слоем молибдена [9, стр. 467-468, рис. 2].

Недостаток этого способа состоит в том, что поверхностная концентрация примеси в эмиттерах недостаточно высока [10, стр. 18], что не позволяет получить достаточно высокий коэффициент инжекции эмиттера и создать надежный невыпрямляющий контакт в силу наличия диоксида кремния на поверхности кремниевой подложки [11, 12] в эмиттерных контактных окнах перед операцией нанесения слоя молибдена, а также связан с тем, скорость рекомбинации неосновных носителей в зоне контакта молибден- n^+ -кремний мала. Первый из этих недостатков приводит к тому, что КПД такого транзистора оказывается недостаточно высоким, а второй - к тому, что частота $f_{гп}$ транзистора также недостаточно высока.

BY 15265 C1 2011.12.30

Задачей изобретения является создание способа изготовления транзистора с улучшенными как частотными, так и энергетическими характеристиками и, следовательно, повышенной надежностью.

Эта задача достигается тем, что в способе изготовления транзистора, включающем формирование пленки диоксида кремния путем термического окисления кремниевой подложки с эпитаксиальным слоем с последующим осаждением пиролитического диоксида кремния, вскрытие в комбинированном слое диоксида кремния окна под базовую область, выращивание на вскрытой поверхности пленки термического диоксида кремния, осаждение на нее фоторезиста, вскрытие в нем окон под охранное кольцо, легирование области охранного кольца путем ионного внедрения базовой примеси через пленку термического диоксида кремния по маске фоторезиста с окнами под охранное кольцо, диффузионный отжиг базовой примеси в нейтральной среде, вскрытие в пленке термического диоксида кремния эмиттерных окон для формирования базовой области, легирование базовой области путем ионного внедрения примеси в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через пленку термического диоксида и через ее эмиттерные окна, диффузионный отжиг базовой примеси в нейтральной среде, легирование эмиттерных областей путем ионного внедрения примеси через эмиттерные окна в пленке термического диоксида кремния, диффузионный отжиг эмиттерной примеси в нейтральной среде, вскрытие контактных окон и формирование контактов к эмиттерной и базовым областям на основе алюминия с барьерным слоем молибдена, перед нанесением пленки алюминия на поверхность кремниевой подложки с эпитаксиальным слоем с вскрытыми контактными окнами на эту поверхность наносят пленку молибдена толщиной h , осаждают на нее фоторезист, вскрывают в нем эмиттерные окна, дополнительно легируют эмиттерные области путем ионного внедрения эмиттерной примеси через пленку молибдена по маске фоторезиста с окнами под эмиттер-дозой ионов эмиттерной примеси $0,5 \cdot 10^{14}$ - $6,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и энергией ионов такой, чтобы длина среднего проективного пробега ионов была не меньше толщины h пленки молибдена, затем формируют разводку и осуществляют низкотемпературный отжиг контактов в нейтральной среде.

В данном способе изготовления биполярного транзистора повышение КПД коллектора достигается тем, что после проведения операции низкотемпературного отжига контактов снижается удельное переходное сопротивление ρ_k контактов молибден- n^+ -кремний (эмиттер). Эффект снижения удельного переходного сопротивления контактов при дополнительном имплантационном легировании области эмиттера через пленку молибдена с энергией ионов, соответствующих среднему проективному пробегу, не меньше толщины пленки молибдена, обусловлен следующими физическими процессами:

- 1) разрушением пленки естественного диоксида кремния на границе раздела молибден-кремний и установлением тесного контакта металл-полупроводник;
- 2) насыщением приповерхностного слоя эмиттерной области кремния дополнительным количеством внедряемой примеси того же типа, которой легирован кремний;
- 3) образованием атомов отдачи молибдена в приповерхностном слое (молибден-примесь n -типа проводимости) кремния в эмиттере;
- 4) образованием большого количества радиационных дефектов под действием как основного потока ионов фосфора, так и атомов отдачи молибдена, которые при достаточной дозе легирования образуют аморфизованный слой кремния. Низкотемпературная термообработка (отжиг) приводит к рекристаллизации аморфизованного слоя, активации $\sim 50\%$ примеси, внедренной через пленку молибдена, и атомов отдачи молибдена. При этом атомы молибдена создают примесные центры с глубокими уровнями, что в совокупности с остаточной дефектностью приповерхностных слоев кремния повышает скорость рекомбинации неосновных носителей в зоне контакта и ведет к повышению быстродействия транзистора ($f_{гр}$).

На фиг. 1-10 изображены этапы изготовления транзистора по предлагаемому способу.

ВУ 15265 С1 2011.12.30

Сущность изобретения поясняется фиг. 1-10, где 1 - кремниевая подложка с эпитаксиальным слоем 2, 3 - толстый (комбинированный) слой диоксида кремния, 4 - окно в диоксиде кремния 3 под базовую область, 5 - тонкий слой диоксида кремния, 6 - фоторезист, 7 - окна в фоторезисте, 8 - p^+ -пассивная база (охранное кольцо), 9 - эмиттерные окна в тонком слое диоксида кремния, 10 - область активной базы (p -тип), 11 - область пассивной базы (p^- -тип), 12 - эмиттерная область (n^+ -тип), 13 - контактные окна к базовой области, 14 - пленка молибдена толщиной h , 15 - фоторезист, 16 - окна в фоторезисте, 17 - пленка алюминия, 18 и 19 - контакты к эмиттерной 12 и базовой 8 областям соответственно.

Поверхность кремниевой подложки 1 с эпитаксиальным слоем 2 окисляют для получения термического диоксида кремния. На него осаждают пиролитический диоксид кремния, в результате чего формируется толстый слой диоксида кремния (комбинированный) 3. Затем фотолитографией с использованием фотошаблона "база" и травления удаляют толстый слой диоксида кремния 3, в пределах базовой области создают окно 4 под базовую область.

Внутри окна 4 выращивают тонкий слой диоксида кремния 5, на него наносится фоторезист 6 и в нем формируются окна 7 с использованием фотошаблона " p^+ -пассивная база" (охранное кольцо). В окна 7 проводят ионное внедрение бора. Снимают фоторезист 6 и проводят диффузионный отжиг бора в нейтральной среде для получения " p^+ -пассивной базы" (охранное кольцо) 8. Фотолитографией с использованием фотошаблона эмиттер и травления в тонком слое диоксида кремния 5 вскрывают эмиттерные окна 9 и проводят легирование базовой области путем ионного внедрения базовой примеси бора в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через выращенный диоксид кремния 5 и в эмиттерные окна 9 с последующим диффузионным отжигом бора в нейтральной среде для формирования области активной базы 10 (p -область кремния) и пассивной базы 11 (p^- -область кремния). Затем в эмиттерные окна 9 проводят легирование эмиттерных областей путем ионного внедрения фосфора с последующим диффузионным отжигом в нейтральной среде для формирования эмиттерных областей 12 (n^+ -тип). В последующем вскрывают контактные окна 13 для базовых областей 8 и наносят пленку молибдена 14 на поверхность кремниевой подложки 1 с эпитаксиальным слоем 2 и окнами к эмиттеру 9 и базе 13. Далее осаждают фоторезист 15 на пленку молибдена 14, фотолитографией с использованием фотошаблона эмиттер вскрывают в фоторезисте эмиттерные окна 16. Затем в эмиттерные окна 16 проводят дополнительное легирование эмиттерных областей 12 путем ионного внедрения фосфора через пленку молибдена 14 по маске фоторезиста с окнами под эмиттер. После удаления фоторезиста 15 наносят на пленку молибдена 14 пленку алюминия 17 [фиг. 9] с последующим формированием фотолитографией разводки (рисунок токопроводящих дорожек) 18 и 19 к эмиттерной 12 и базовой 8 областям кремния соответственно и проводят низкотемпературный отжиг контактов в нейтральной среде (500 °С в течение 5 мин в среде аргона) [фиг. 10].

Сущность изобретения заключается в дополнительном легировании эмиттерных областей транзистора посредством имплантации ионов эмиттерной примеси через пленку молибдена по маске фоторезиста с окнами под эмиттер дозой ионов эмиттерной примеси $0,5 \cdot 10^{14}$ - $6,2 \cdot 10^{14}$ см⁻² и энергией такой, чтобы средняя длина свободного пробега ионов была не меньше толщины пленки молибдена h , и осуществляют низкотемпературный отжиг контактов в нейтральной среде.

Дополнительное введение ионов фосфора в приповерхностную область эмиттера транзисторной структуры через пленку молибдена способствует улучшению его как частотных, так и мощностных характеристик, повышению надежности и коэффициента инжекции эмиттера. Посредством варьирования концентрации фосфора в приповерхностном слое эмиттерной области кремния от $6,5 \cdot 10^{19}$ до $1,4 \cdot 10^{20}$ см⁻³ представляется возможным изготовить транзисторы с улучшенными частотными и мощностными характеристиками, повышенной надежностью и более высоким коэффициентом инжекции. Это обусловлено

проведением операции низкотемпературной термообработки контактов транзисторной структуры в нейтральной среде после дополнительного легирования этой области, что приводит, с одной стороны, к снижению потерь в омических контактах молибден- n^+ -кремний за счет уменьшения переходного сопротивления контактов и, с другой стороны, к повышению скорости рекомбинации неосновных носителей в зоне контакта как за счет атомов отдачи молибдена, создающих примесные центры с глубокими уровнями, так и за счет остаточной дефектности приповерхностных слоев кремния.

Осуществление операции низкотемпературной термообработки в нейтральной среде приводит к рекристаллизации аморфизированного слоя, активации до ~60 % атомов примеси, имплантированных через пленку молибдена, и атомов отдачи молибдена. При этом отжиг контактов в нейтральной среде, например в аргоне, повышает электрическую активацию фосфора по сравнению с отжигом в других средах, например в вакууме.

Диапазон изменения дозы имплантируемых ионов фосфора $0,5 \cdot 10^{14}$ - $6,2 \cdot 10^{14}$ см^{-2} и их энергия, обеспечивающая средний проективный пробег ионов в кремнии не меньше, чем толщина пленки молибдена, являются оптимальными параметрами имплантации, обеспечивающими улучшение как частотных, так и энергетических характеристик формируемого транзистора.

Величина дозы, меньшая, чем $0,5 \cdot 10^{14}$ см^{-2} , при ионной имплантации ионов фосфора в эмиттерную область кремниевой транзисторной структуры не позволяет обеспечить концентрацию фосфора в приповерхностном слое, равную $6,5 \cdot 10^{19}$ см^{-3} - такой величины, начиная с которой, как показывают результаты эксперимента и двухмерного физического моделирования с использованием программного комплекса компании Silvaco [13], начинают улучшаться как энергетические, так и частотные характеристики транзистора, и, следовательно, повышаться его надежность.

При величине дозы большей, чем $6,2 \cdot 10^{14}$ см^{-2} , последующий низкотемпературный отжиг при 500°C в атмосфере аргона не приведет к достаточной рекристаллизации аморфизированного кремниевого приповерхностного слоя, а также к необходимой активации примеси, имплантированной через пленку молибдена. При этом доля электрически активного фосфора ниже, а удельное переходное сопротивление контакта молибден- n^+ -кремний (эмиттерная область) выше, чем при дозе $6,2 \cdot 10^{14}$ см^{-2} , что не обеспечивает улучшение энергетических и частотных характеристик транзистора. При таких высоких значениях дозы имплантации фосфора требуются более высокие температуры ($>550^\circ\text{C}$) и длительности отжига [12] для обеспечения указанных выше условий достаточной рекристаллизации аморфизированного кремниевого приповерхностного слоя и необходимой активации примеси, имплантированной через пленку молибдена, а также низкого переходного сопротивления контактов. Однако повышение температуры отжига приводит к деградации свойств контактов, а в случае мелких р-п-переходов - к отказам вследствие короткого замыкания молибдена с активной областью прибора и "размытию" сформированных мелких р-п-переходов.

Ионная имплантация фосфора в область границы раздела молибден-кремний повышает его концентрацию в приповерхностной области эмиттера, что позволяет получить транзисторы с улучшенными электрическими параметрами и более низкими значениями переходного сопротивления контактов. Это, как подтверждается результатами моделирования, может быть достигнуто прежде всего за счет выбора определенной дозы имплантации. Для предлагаемого способа изготовления биполярного транзистора доза имплантации должна находиться в диапазоне $(0,5 \dots 6,2) \cdot 10^{14}$ см^{-2} . Исследование влияния другого параметра ионной имплантации, энергии, показало, что значение энергии имплантации фосфора в приповерхностную область эмиттера, равное 100 кэВ, обеспечивает (при рассматриваемых технологических параметрах изготовления транзистора) разрушение пленки диоксида кремния в области границы раздела молибден-кремний, создание атомов отдачи молибдена в эмиттерной области, дополнительное подлегирование припо-

ВУ 15265 С1 2011.12.30

верхностной области кремния ионами той же примеси, которыми легирована эмиттерная область, и создание рекомбинационных центров.

Пример

Способ изготовления транзистора, в частности мощного планарного СВЧ n-p-n-транзистора типа КТ916А.

Поверхность кремниевой эпитаксиальной структуры типа 60 10КЭФ1.8/350ЭЖЭС0,01 с ориентацией (111) по ТУ48-4-298-74 окисляют в смеси водорода-кислорода на установке СДО 125/3-15 при температуре $T = 1150 \pm 1$ °С, в результате чего выращивается термический диоксид кремния толщиной 0,4 мкм. Затем осаждают на установке "Изотрон-1" пиролитический диоксид кремния толщиной 0,5 мкм методом разложения тетраэтоксисилана в кислороде при $T = 750 \pm 1$ °С в течение 20-40 мин. Уплотнение пиролитического диоксида осуществляют на установке СДО 125/3-15 при $T = 850 \pm 1$ °С во влажном кислороде в течение 25 мин. Затем в процессе фотолитографии (с использованием фотошаблона "база") вскрывают окно в полученном комбинированном диоксиде кремния толщиной 0,9 мкм (термический + пиролитический диоксиды кремния) под базовую область. Травление диоксида кремния осуществляют на установке ЩЦМ3.240.220 в смеси $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O} = 4:10:15$ в течение 15-20 мин. Далее внутри базовой области в сухом кислороде на установке СДО 125/3-12 в течение 90 мин при $T = 1150$ °С выращивают тонкий термический диоксид кремния до толщины $\sim 0,25$ мкм. Затем методом центрифугирования наносят фоторезист марки ФП РН7 толщиной примерно 0,8-1,1 мкм в течение 20-30 с. С использованием фотошаблона "охранное кольцо" формируют окна в фоторезисте под охранную область для имплантации через них ионов бора. Имплантационное легирование бором осуществляют на установке "Везувий-3М" с энергией $E = 100$ кэВ и дозой $D = 400$ мкКл/см² ($2,5 \cdot 10^{15}$ см⁻²). В качестве источника бора используют газ флюбор по ОСТ 6-02-4-83. Затем в плазме кислорода на установке "Плазма-600" в течение 7 ± 3 мин удаляют фоторезист и производят диффузионный отжиг бора на установке СДО-125/3-15 при температуре 1150 °С в течение 25 мин в среде аргона, в результате чего получают следующие параметры охранного кольца (p⁺-пассивной базы): $R_s = 40 \pm 5$ Ом/ и $x_j = 1,9 \pm 0,2$ мкм. Фотолитографией с использованием фотошаблона "эмиттер" в тонком термическом диоксиде кремния (0,25 мкм) и жидкостным травлением вскрывают эмиттерные окна для формирования базовой области - активной и пассивной - посредством ионной имплантации бора в кремниевую подложку с эпитаксиальным слоем через эмиттерные окна и через диоксид кремния с последующим диффузионным отжигом бора. В качестве источника бора используют газ флюбор по ОСТ 6-02-4-83, установка "Везувий-3М". Энергия ионов бора составляет $E = 55$ кэВ и доза $D = 20$ мкКл/см² ($1,25 \cdot 10^{14}$ см⁻²). Диффузионный отжиг бора при температуре 900 °С в течение 30 мин осуществляют в среде аргона на установке СДО 125/3-15. В результате получают следующие параметры базовой области: активная база - $R_s = 600$ Ом/ и $x_j = 0,36$ мкм; p-пассивная база $R_s = 1600$ Ом/ и $x_j = 0,20$ мкм. Затем через эмиттерные окна проводят ионную имплантацию фосфора из источника фосфор красный "ОСЧ 9-5" по ТУ-09-3507-79 на установке "Везувий-3М" с энергией 30 кэВ и дозой 700 мкКл/см² ($4,375 \cdot 10^{15}$ см⁻²) с последующим диффузионным отжигом фосфора в среде аргона при температуре 900 °С в течение 10 мин на установке СДО 125/3-15 с целью формирования эмиттера. Полученные параметры эмиттерной области: $R_s = 35$ Ом/ и $x_j = 0,18$ мкм. Затем вскрывают контактные окна к базовой области.

Молибденовую пленку толщиной 100 нм и поверхностным сопротивлением $R_s = 4 \pm 0,5$ Ом/ наносят магнетронным методом на установке УРМ3.279.017. Затем наносят методом центрифугирования фоторезист марки ФП РН7 толщиной 0,8-1,1 мкм в течение 20-30 с. С использованием фотошаблона "эмиттер" формируют эмиттерные окна в фоторезисте и через

BY 15265 C1 2011.12.30

них проводят ионную имплантацию фосфора с энергией $E = 100$ кэВ и дозой $D = 100$ мкКл/см² ($6,25 \cdot 10^{14}$ см⁻²).

Для корректного сравнения результатов измерения параметров транзисторов, у которых эмиттерная область была дополнительно легирована, кремниевая подложка с эпитаксиальным слоем была наполовину экранирована алюминиевой фольгой.

Далее в плазме кислорода удаляют фоторезист и наносят алюминиевую пленку, легированную никелем, методом термического испарения навески алюминиевой проволоки и никелевой проволоки в соотношении по массе (Al + 0,5 %Ni) на установке УВН-2М. Затем формируют 78-гребенчатую конфигурацию токопроводящих дорожек (разводка) методом фотолитографии и травления. Термообработку (отжиг) контактов производят при температуре 500 ± 1 °С в течение 5 мин в атмосфере аргона.

Одновременно с рабочими транзисторными структурами формировали тестовые структуры с областями для измерения удельного переходного сопротивления контакта ρ_k и проведения структурных исследований, имитирующих условия взаимодействия пленки молибдена с монокристаллическим кремнием p^+ -типа в контактных окнах. Измерения ρ_k проводили методом "переноса зонда" [15]. Структуру переходного слоя исследовали по методике, использованной в работах [16] и [17].

После проверки параметров на пластине (статические параметры) и проведения операции глубокого травления коллекторной стороны пластины с целью снижения теплового сопротивления переход-окружающая среда, скрайбирование и ломки пластины на кристаллы транзисторов КТ916А, кристаллы были посажены в корпуса типа КТ-16-2 на эвтектику золото-кремний, разварены выводы к контактным площадкам кристалла и корпуса транзистора и загерметизированы (по два параллельно соединенных кристалла в корпус). На собранных приборах, изготовленных по прототипу и по предлагаемому способу, были измерены электрические параметры.

Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Влияние технологии изготовления на параметры транзисторов КТ916А

Способ изготовления транзистора	Параметры				Контактная система Al-Mo-n ⁺ Si ^{*)} $\rho_k \times 10^{-5}$, Ом·см ²
	η_k , %	$R_{T\ n-k}$, °С/Вт	$f_{гр}$, ГГц		
			при $I_k = 1,5$ А	при $I_k = 2,8$ А	
Предложенный	93,2	3,5	5,3	5,10	1,0
По прототипу	79,8	4,7	2,0	1,85	2,8

*) Приведенные данные относятся к тестовым структурам.

Данные, представленные в таблице 1, показывают, что для транзисторов, изготовленных по предлагаемому способу, коэффициент полезного действия коллектора η_k и граничная частота $f_{гр}$ выше, а тепловое сопротивление $R_{T\ n-k}$ и удельное переходное сопротивление контакта ρ_k ниже, чем для приборов, изготовленных по прототипу, что подтверждает лучшие характеристики и надежность транзисторов, формируемых по предлагаемой технологии.

Таким образом, предложенный способ изготовления транзистора обеспечивает улучшение как частотных, так и энергетических характеристик транзистора за счет:

- повышения приповерхностной концентрации фосфора,
- разрушения пленки диоксида кремния в области границы раздела молибден-кремний, создания атомов отдачи молибдена в эмиттерной области,
- дополнительного подлегирования приповерхностной области кремния ионами той же примеси, которыми легирована эмиттерная область,

создания дополнительных центров рекомбинации неосновных носителей в зоне контакта молибден-кремний, что в совокупности с остаточной дефектностью приповерхностных слоев кремния повышает скорость рекомбинации неосновных носителей в зоне контакта.

ВУ 15265 С1 2011.12.30

В таблице 2 приведены результаты экспериментов и моделирования по исследованию зависимости параметров транзисторов, изготовленных по предлагаемому способу, в зависимости от дозы подлегирования области эмиттера через пленку молибдена.

Таблица 2

№ п/п	Доза D, см ⁻²	Концентрация фосфора, см ⁻³		Параметры транзистора			Контактная система Al-Mo-n ⁺ Si ρ _к , Ом·см ²
		C _s ×10 ¹⁹ , см ⁻³	C _{max} ×10 ²⁰ , см ⁻³	η _к , %	f _{гр1} (I _к = 1,5 А) / f _{гр2} (I _к = 2,8 А), ГГц	+ / - *	
1	<0,5·10 ¹⁴	5,8	7,13	79,8	2,2/2,05	-	2,7·10 ⁻⁵
2	0,5·10 ¹⁴	6,2	7,13	80,8	2,6/2,4	+	2,6·10 ⁻⁵
3	0,9·10 ¹⁴	6,5	7,14	82,2	3,6/3,2	+	2,4·10 ⁻⁵
4	1,5·10 ¹⁴	7,0	7,16	84,2	4,0/3,85	+	2,2·10 ⁻⁵
5	2,5·10 ¹⁴	7,9	7,19	86,7	4,4/4,25	+	2,1·10 ⁻⁵
6	4,0·10 ¹⁴	9,0	7,26	88,3	4,8/4,65	+	2,0·10 ⁻⁵
7	6,2·10 ¹⁴	10,8	7,35	93,0	5,3/5,16	+	1,0·10 ⁻⁵
8	>6,2·10 ¹⁴	13,8	7,51	50,6	5,2/5,0	-	2,0·10 ⁻⁴

* Задача изобретения выполняется (+) / не выполняется (-).

В отдельных экземплярах изготовленных транзисторов КТ916А проявляется эффект "умножения частоты", заключающийся в том, что величина f_{гр} возрастает в 10 и более раз в транзисторах, изготовленных по предложенному способу. Механизм, позволяющий объяснить полученные результаты, пока не выяснен. Однако экспериментально установлен диапазон дозы имплантационного подлегирования кремния фосфором, равный (1-7)·100 мкКл/см² (0,63-4,38)·10¹⁵ см⁻², в пределах которого происходит снижение величины ρ_к в системе молибден-n⁺-кремний после имплантационного легирования ионами фосфора и термообработки при 500 °С.

Таким образом, изготовленный по предлагаемому способу планарный мощный СВЧ-транзистор отличается повышенными значениями КПД и f_{гр} и, что принципиально важно, улучшение этих характеристик транзистора осуществляется без изменения геометрических размеров эмиттера, базы и коллектора, т.е. без изменения необходимого комплекта фотошаблонов.

Кроме того, использование транзисторов, изготовленных по предложенному способу, позволяет создавать устройства с улучшенными электрическими характеристиками и надежностью. Кроме того, биполярные ИС, Би-КМОП и монолитные СВЧ интегральные микросхемы с транзисторами, изготовленными по предложенному способу, также будут иметь улучшенные характеристики и более высокую надежность.

Источники информации:

1. Никишин В.И., Петров Б.К., Сынов В.Ф. и др. Проектирование и технология производства мощных СВЧ-транзисторов. - М.: Радио и связь, 1989. - С. 7-8.
2. Кремниевые планарные транзисторы / Под ред. А.Я. Федотова, 1973. - С. 236-263.
3. Зайцев А.А., Савельев Ю.Н. Генераторные СВЧ-транзисторы. - М.: Радио и связь, 1985. - 48 с.
4. Снитовский Ю.П. Изготовление мощных СВЧ-транзисторов с увеличенной площадью эмиттера // Электрон. техника. Сер. СВЧ-техника. - Выпуск 9-10. - 1992. - С. 20.
5. Тагер А.С. Перспективные направления полупроводниковой электроники СВЧ // Литовский физический сборник. - 1981. - Т. 21, № 4. - С. 24- 43.
6. Мазель Б.З., Пресс Т.П. Планарная технология кремниевых приборов. - М.: Энергия, 1974. - С. 10, 12-19.

7. White H.P., Thirston H.O. Characterization of Microwave transistors // Solid State Electronics. - Vol. 13, No 5. - 1970. - P. 523-542.

8. Snitovsky Yu. P. Lateral injection utilized for improving the performance of microwave bipolar transistors // Russian Microelectronics. - 2002. - Vol. 31, No 4. - P. 248-253.

9. Снитовский Ю.П., Нелаев В.В., Ефремов В.А. Новая технология изготовления мощного биполярного СВЧ-транзистора. Физическое моделирование // Микроэлектроника. - Т. 36, № 6. - 2007. - С. 465-471.

10. Завражнов Ю.В., Каганова И.И., Мазель Е.З. и др. Мощные высокочастотные транзисторы. - М.: Радио и связь, 1985. - С. 176.

11. Ohmi T. Ultra clean processing // Microelectronic Engineering. -Vol. 10, No 3-4. - 1991. - P. 171-174.

12. Sniang S.W., Chow T.P., Reihl R.F. The effect of phosphorus ion implantation in molybdenum/silicon contacts // J. Appl. Phys. - Vol. 52, No 6. - 1981. - P. 4027-4032.

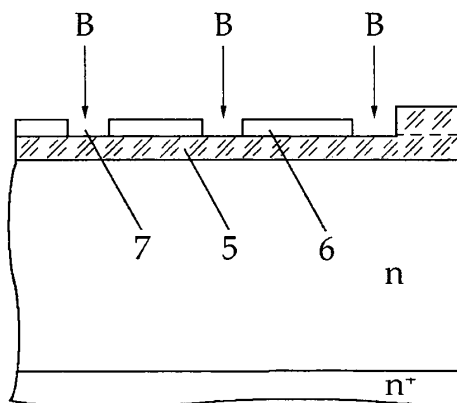
13. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. - М.: Мир, 1977. - 562 с.

14. <http://www.silvaco.com>

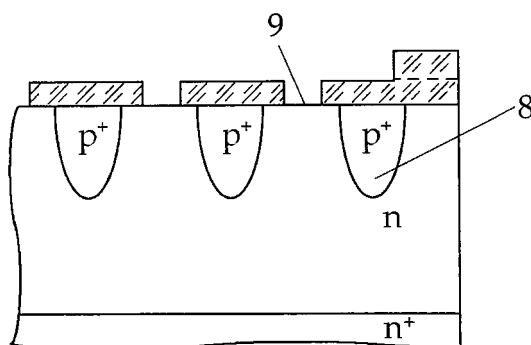
15. Нисков В.Я., Задэ В.В., Зайцева А.К., Стрельцова В.И. Измерение переходного сопротивления контактов на тонких слоях полупроводника // Приборы и техника эксперимента. - № 2. - 1971. - С. 240-242.

16. Гурский Л.И., Зеленин В.А., Бобченко Ю.Л. Особенности фазовых превращений в системе молибден-кремний, подвергнутой ионной бомбардировке // Физика и химия обработки материалов. - № 5. - 1984. - С. 72-75.

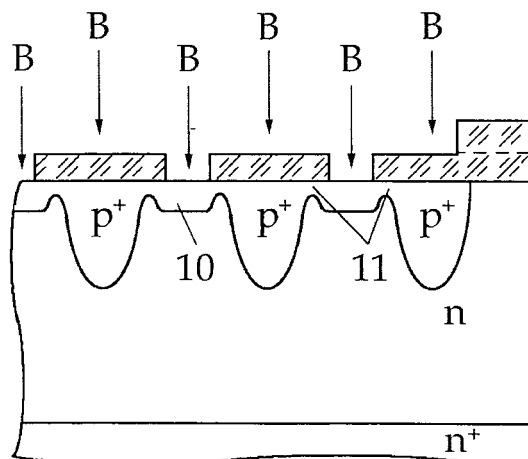
17. Бобченко Ю.Л., Цыбульская С.И., Леоненко О.Ф. Метод получения образцов металл-кремний химическим травлением для исследований на электронографе и электронном микроскопе // Приборы и техника эксперимента. - № 1. - 1986. - С. 214-216.



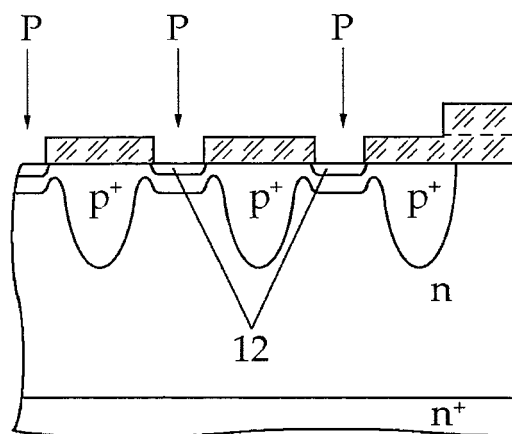
Фиг. 2



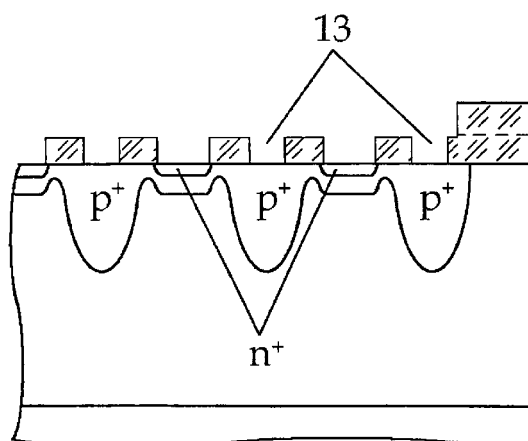
Фиг. 3



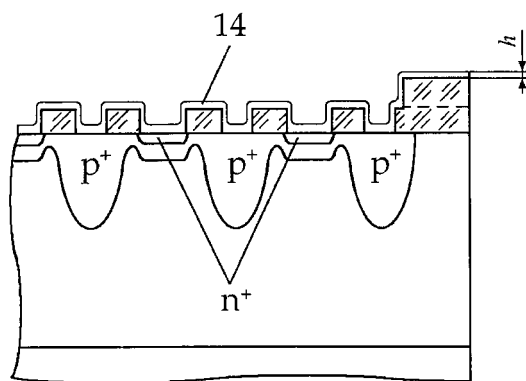
Фиг. 4



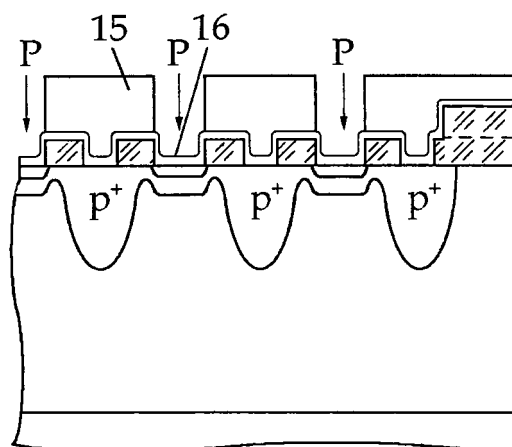
Фиг. 5



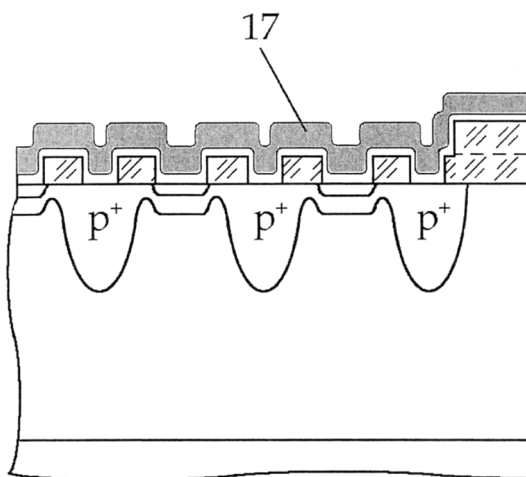
Фиг. 6



Фиг. 7

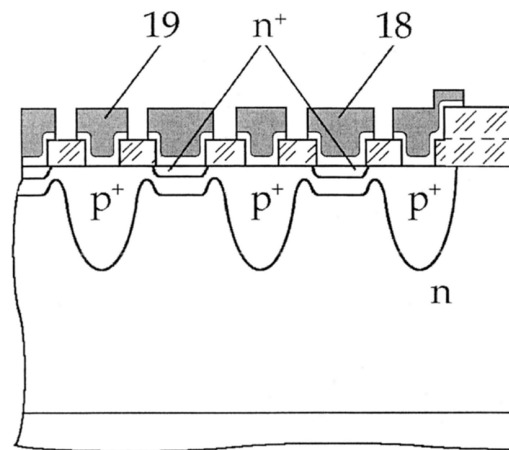


Фиг. 8



Фиг. 9

BY 15265 C1 2011.12.30



Фиг. 10