

Быстродействующие бескорпусные ρ - i - n -диоды

Новая

технология изготовления

В.Тихонюк,
В.Бражник

В статье рассказывается о новой технологии изготовления быстродействующих бескорпусных ρ - i - n -диодов с балочными выводами и малыми потерями на СВЧ, реализуемой на базе кремниевых мембран. Технология предусматривает получение методом химико-динамического травления кремниевого слоя (5–10 мкм), достаточно большого по площади (до 20 см²) и равномерного по толщине. Благодаря тому, что слой получают в центральной области пластины, она приобретает вид полупроводниковой мембраны. Электрические параметры создаваемых на основе этой технологии бескорпусных ρ - i - n -диодов с малым временем переключения и мощностью управления сравнимы с параметрами лучших зарубежных аналогов и даже превосходят их.

Развитие СВЧ-микронэлектроники идет по пути постоянного расширения номенклатуры функциональных СВЧ-устройств для связанной и измерительной аппаратуры нового поколения. Значительное место среди них занимают устройства дискретного управления амплитудой и фазой СВЧ-сигнала на полупроводниковых переключаемых приборах. Наибольшими техническими возможностями среди них обладают диоды с ρ - i - n -структурой [1]. Для совершенствования малогабаритных комплексов радиоэлектронной аппаратуры, построенных на базе гибридных интегральных схем (ГИС) СВЧ, важное значение имеют бескорпусные ρ - i - n -диоды, которым присущи высокое быстродействие [2] и малые токи управления.

Быстродействие устройств на ρ - i - n -диодах (например, модуляторов СВЧ-сигнала) определяется формулой управляющего импульса, постоянной времени входных цепей и инерционностью диодов. Снижение инерционности ρ - i - n -диодов — наиболее важная задача при создании СВЧ-устройств с временем переключения не более 10 нс. Обеспечить значения электрических параметров диодов, в том числе сопротивлений высокочастотных потерь и времени перехода из режима прямого смещения (времени обратного восстановления), наряду с режимом управления, можно путем оптимизации полупроводниковой структуры прибора, а именно, получением высокого градиента концентрации легирующей примеси на ρ - i и i - n переходах и малой ширины базовой i -области (W_i). Сильная зависимость времени обратного восстановления ($\mathcal{E}_{\text{вос обр}}$) от W_i (по квадратичному закону [3]) наблюдается при достаточно тонкой базе, если при этом преобладает рекомбинация накопленных носителей заряда на тыловом контакте диода. Тонкая базовая область позволяет также сократить фазу установления импеданса диода при его

переключении в режим прямого смещения.

Применение ρ - i - n -диодов в различных по назначению устройствах определяет необходимость реализации разных величин емкости (C_d), которая составляет десятые и сотые доли пикофард. При достаточно малых значениях емкости (ниже 0,03 пФ) требования к конструированию быстродействующего диода существенно возрастают.

В зарубежной практике [2,4,5,] для изготовления быстродействующих переключаемых ρ - i - n -диодов в основном используются эпитаксиальные кремниевые структуры с высокоомным ($\tau 50...100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) эпитаксиальным слоем, выращенным на монокристаллической подложке с удельным

сопротивлением менее $10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Снижение добавочного сопротивления СВЧ-потерь, вносимого подложкой, достигалось частичным удалением кремния методами химической и электрохимической обработки.

Разработан широкий набор быстродействующих ρ - i - n -диодов в корпусном и бескорпусном исполнении. Промышленное изготовление отечественных приборов данного класса сдерживалось отсутствием серийного производства достаточно высокоомного эпитаксиального кремния. Для создания быстродействующих ρ - i - n -диодов с малым током управления ($I_{\text{пр}}$), непосредственно встраиваемых в ГИС, было решено использовать

Основные параметры предлагаемых диодов в сравнении с лучшими зарубежными аналогами

Основные параметры диодов	Обозначение	Обозначение ρ - i - n -диода и его лучшего зарубежного аналога				
		КА551А-3, СССР	110НД-100, СССР	КА551А-3, СССР	110НД-100, СССР	КА551А-3, СССР
		(КА551А-3)	США		США	
Емкость диода, пФ	C_d	0,06-0,12	0,12-0,15	$\leq 0,02$	0,02	0,07-0,14*
Прямое сопротивление, Ом	$r_{\text{пр}}$	$\leq 3,0$	1,7	3,0	$\leq 4,0$	$\leq 3,0$ *
Прямой ток управления, мА	$I_{\text{пр}}$	3,0	10,0	20,0	50,0	5,0
Прямое падение напряжения, В	$U_{\text{пр}}$	$\leq 0,85$	$< 0,9$	$< 1,1$	$< 1,1$	$< 1,0$ *
Накопленный заряд, нКл	$Q_{\text{нк}}$	$\leq 0,2$	---	$\leq 1,0$	7,5	$< 0,4$ *
Напряжение пробоя, В	$U_{\text{проб}}$	50	≥ 30	≥ 80	≥ 100	≥ 50 *
Время обратного восстановления, нс	$t_{\text{вос обр}}$	$\leq 2,0$	$\leq 2,0$	$\leq 10,0$	$\leq 40,0$	$\leq 10,0$ *
Мощность рассеивания, Вт	$P_{\text{рас}}$	0,25(1,0)	0,20	0,20	0,25	0,25*

* Данные приведены для одной ρ - i - n -структуры в приборе

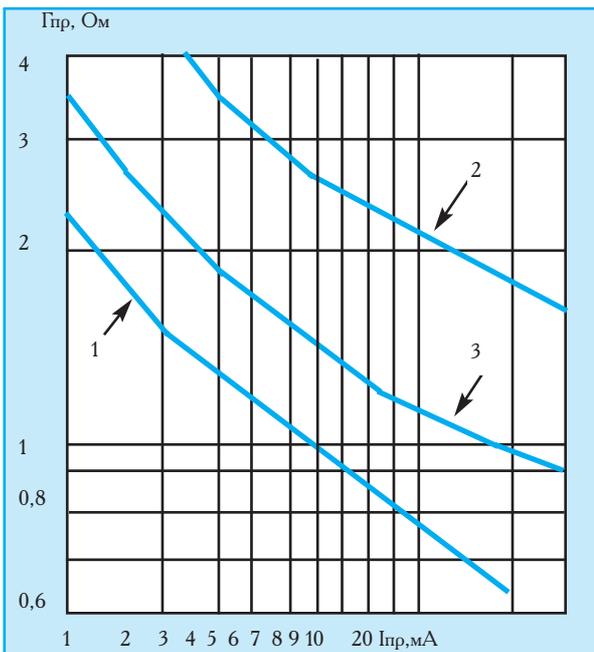


Рис. 1 Типичные зависимости прямого сопротивления СВЧ-потерь $p-i-n$ -диодов от прямого тока управления: 1 — для диодов КА547А-3 и КА551А-3; 2 — для диода КА553А-3; 3 — для диодной пары КА558А-3

выпускаемые пластины монокристаллического кремния с удельным сопротивлением 100...250 Ом·см, в которых методом химическо-динамического травления (ХДТ) формировался очень тонкий (~4...10 мкм) слой достаточно большой площади (до 20 см²), имеющий высокую равномерность по толщине. Слой получали в центральной области пластины, благодаря чему она приобретала вид полупроводниковой мембраны [6].

Одно из важных достоинств мембранной конструкции пластины — освобождение его тонкого рабочего слоя от механического носителя и технологический доступ с обеих сторон — было использовано при разработке $p-i-n$ -диодов с электрическими выводами балочного типа. Найдено несколько технических решений, касающихся получения равномерного по толщине рабочего слоя кремниевых мембран, формирования тонких областей донорного (n^+) и акцепторного (p^+) типа проводимости на противоположных сторонах мембраны методом одновременного легирования, процессов фотолитографии на профилированной поверхности мембраны с использованием фигурных фотошаблонов, нанесения слоев диэлектрических покрытий, получения матрицы локальных мембран заданной формы на рабочем слое основной мембраны. В результате создана унифицированная технология изготовления бескорпусных быстродействующих $p-i-n$ -диодов с балочными выводами. Их электрические параметры в сравнении с зарубежными аналогами приведены в таблице.

такими же электрическими параметрами (кроме рассеиваемой мощности) и предназначен для параллельного включения в СВЧ ГИС. Диод КА553А-В-3 имеет малую величину емкости при обратном смещении ($C_d \approx 0,02$ пФ) вследствие ряда особенностей его конструкции.

Существующие $p-i-n$ -диоды с малой величиной емкости, базирующиеся на поверхностно-ориентированной конструкции, обладают рядом существенных недостатков, в частности большим прямым током управления (50...100 мА), повышенным прямым сопротивлением СВЧ-потерь, невысоким быстродействием при переключении (~25 нс). Поэтому для повышения быстродействия $p-i-n$ -диодов была использована цилиндрическая геометрия кристалла.

Переключательный диод КА558А-Б-3 имеет три балочных вывода и полупроводниковую структуру $n-i-p-i-n$ -типа. Конструктивно он выполнен в виде двух $p-i-n$ -мезаструктур, электрически включенных навстречу друг другу, и по существу представляет собой интегральную диодную пару с общим средним выводом. Разработанные ранее

Графические зависимости изменения прямого сопротивления СВЧ-потерь ($G_{пр}$), накопленного заряда ($Q_{нк}$) и времени обратного восстановления ($t_{вос}$, обр.) от соответствующих токов управления показаны на рис. 1—3.

Диод КА547А-Г-3, предназначенный для последовательного включения в передающую микрополосковую линию, представляет собой кремниевый кристалл типа мезаструктуры дисковой геометрии с двумя золотыми балочными выводами, расположенными с противоположных сторон кристалла. Такое выполнение обеспечивает удобство монтажа диода в СВЧ-микросхему.

Диод КА551А-Г-3, разработан на основе диода КА547А-Г-3. Он обладает

переключательные СВЧ-приборы с $n-i-p-i-n$ -структурой [7] типа КА508А,Б имеют большую ширину i -области и очень низкое быстродействие (~40 мкс). Таким образом, прибор КА558А-Б-3 — единственный быстродействующий СВЧ-элемент, имеющий структуру $n-i-p-i-n$.

Целесообразность изготовления диодов с $n-i-p-i-n$ -структурой определяется прежде всего схемотехническими условиями при реализации управляющих СВЧ-устройств как волноводного, так и гибридно-интегрального типа. Прежде всего это требования к топологическому положению элементов схемы, характеру подвода управляющего сигнала, взаимному расположению коммутирующих $p-i-n$ -структур и идентичности их параметров, которая определяет функциональную симметрию отдельных участков схемы.

Особое внимание было уделено идентичности электрических параметров обоих полупроводниковых кристаллов. Это достигается одинаковой толщиной кремниевого слоя в зоне расположения кристаллов, равной площадью перекрытия верхнего и нижних участков металлизации (балочных выводов), а также одинаковыми условиями формирования каждой мезаструктуры химическим травлением. Получение равной площади у обоих кристаллов при

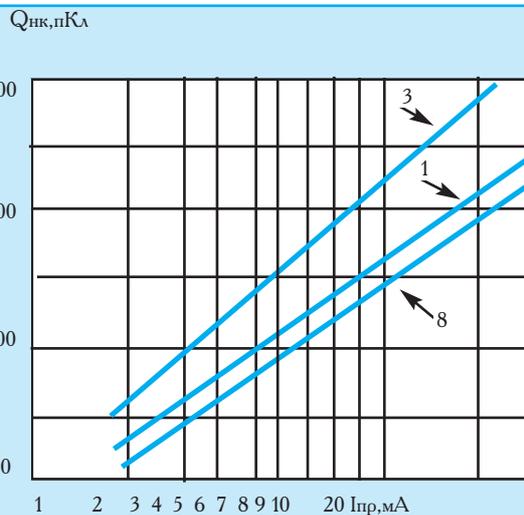


Рис. 2. Типичные зависимости величины накопленного заряда в базе $p-i-n$ -диодов для прямого тока управления: 1 — для диодов КА547А-3 и КА551А-3; 2 — для диода КА553А-3; 3 — для диодной пары КА558А-3

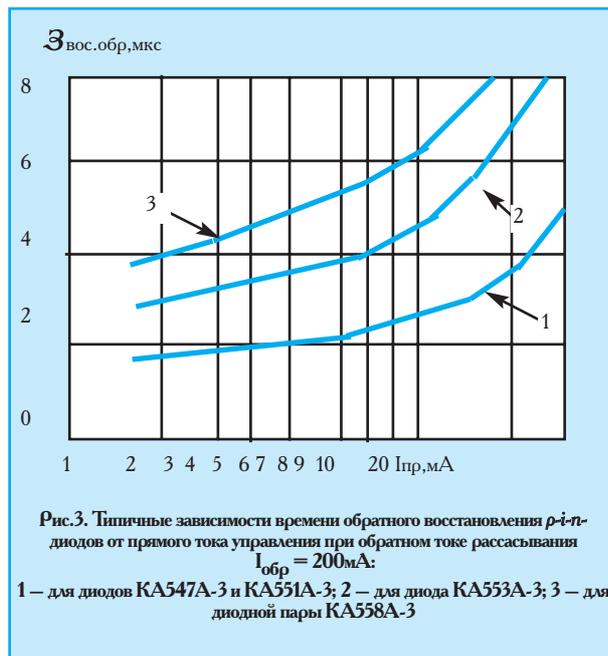
групповом изготовлении приборов в значительной мере определяется точностью совмещения фотошаблонов с обеих сторон кремниевой мембраны на операции фотолитографии. **Прибор КА558А-Б-3 не имеет зарубежного аналога.**

Разработанная серия быстродействующих переключательных $p-i-n$ -диодов с балочными выводами не исчерпывает всех возможностей

использования тонких полупроводниковых мембран. В настоящее время уже созданы экспериментальные образцы быстродействующих $p-i-n$ -диодов с прямым током управления 1мА, время переключения которых — не более 1нс в принятом режиме управления. Эти приборы найдут применение в новейших образцах микроэлектронной СВЧ-аппаратуры.

Литература

1. Л.С. Либерман, Б.В. Сестрорецкий, В.А. Шпирт, Л.М. Якубень. Полупроводниковые диоды для управления СВЧ-мощностью. — Радиотехника, 1972, т.27,5, с.9-24
2. В.И. Стафеев, А.А. Туриханов. Обзоры по электронной технике: $p-i-n$ -диоды для высокоскоростной модуляции мощности СВЧ-сигналов. — М., 1981. Вып.10 Сер.1 Электроника СВЧ
3. Г.Б. Дзехцер, О.С. Орлов. $p-i-n$ -диоды в широкополосных устройствах СВЧ. — М.: Сов. Радио, 1970
4. Пат. 4051507 (США)
5. Пат. 4097890 (США)
6. К.В. Пелевин, В.И. Тихонюк, В.В. Петровиц. Обзоры по электронной технике: Технологические особенности получения тонких полупроводниковых мембран с высокой однородностью по толщине. — М., 1981. Вып.1. Сер.10. Микроэлектронные устройства



Новая самосовмещенная технология изготовления полевых транзисторов

Новый процесс изготовления полевых транзисторов на базе полупроводниковых соединений, разработанный в Калифорнийском университете, облегчит создание ИС с чрезвычайно высокой плотностью упаковки на арсениде галлия и фосфиде индия. При разработке самосовмещенного процесса изготовления полевых транзисторов с субмикронным затвором и однослойной металлизацией ставились задачи изготовления приборов с субмикронными топологическими элементами методами оптической литографии. Разработка самосовмещенной структуры позволила создать полевые транзисторы с низким напряжением в точке перегиба. Благодаря минимальному зазору между областью затвора и истоком в самосовмещенном приборе сопротивление его мало.

Ключевой элемент технологии — “ложный” затвор, изготовленный из двуоксида кремния или нитрида кремния с помощью стандартного процесса оптической литографии. На начальных этапах формирования структуры транзистора он играет ту же роль, что и обычный. Обычный затвор имел Т-образную форму с шириной широкой части 1 мкм и узкой — 0,4 мкм. В качестве материала контактов, осаждаемого поверх выращенных рекристаллизованных областей стока и истока, использовался вольфрам (вместо контактов из сплава золото-германий).

Технология совместима с любыми полупроводниковыми соединениями и может применяться для изготовления любых типов полевых транзисторов. Она дешевле и проще существующих. С ее помощью в Калифорнийском университете изготовили на арсениде галлия-индия полевой транзистор с затвором на основе модулированного гетероперехода (JHFET) длиной 0,4 мкм. Частота отсечки транзистора равна 45 ГГц, максимальная частота — 80 ГГц. Технология может быть использована для создания ИС с высокой плотностью размещения элементов, содержащих полевые и биполярные транзисторы с гетероструктурой (НВТ). Разработчики успешно объединили n -канальный полевой транзистор с затвором на основе $p-n$ -перехода с $p-p$ -транзистором НВТ-типа; p -область затвора служила и эмиттером биполярного прибора. Ведутся работы по созданию транзисторов с длиной затвора 0,2-0,1 мкм на максимальную частоту до 450 ГГц.

Electronic Engineering Times, 1996, N926, pp.41,44.

Дайджест

