

К. ф-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ, В. В. БАСА-
НЕЦ, В. Н. ИВАНОВ, В. А. КРИВУЦА,
В. А. ФЕСУНЕНКО, А. В. ЦВИР

Дата поступления в редакцию
14.09 1998 г. — 17.05 1999 г.
Оппонент С. П. КОСТЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

КОНТАКТНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ДИОДАХ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Применена металлизация на основе силицидов, нитридов и боридов тугоплавких металлов при разработке генераторных и переключаемых диодов.

The metallization on silicides, nitrides and borides base of refractory metals during development generator and switching diodes has been used.

Как известно, контактные системы во многом определяют не только электрофизические параметры полупроводниковых приборов, но и их эксплуатационные характеристики, в частности, такие как надежность и радиационная стойкость. В последнее время при разработке полупроводниковых приборов наряду с традиционными (никель, титан, палладий, платина и др.) используются контактные системы на основе силицидов, нитридов и боридов тугоплавких металлов [1, 2].

В настоящей работе представлены результаты исследований кремниевых ИМРАТТ-диодов, арсенид-галлиевых генераторных диодов Ганна и кремниевых переключаемых диодов миллиметрового диапазона длины волны с контактными системами на основе тугоплавких металлов.

Конструкции диодных структур и схемы их изготовления разрабатывались таким образом, чтобы заблокировать нежелательные процессы массопереноса и сформировать диодные чипы, в которых контактные системы надежно соединяются с полупроводниковой мезаструктурой с одной стороны и с элементами корпуса с другой стороны. Чипы монтировались в фирменные металлорубиновые корпуса.

Параллельно исследовались наиболее вероятные механизмы деградации диодов в условиях длительной эксплуатации в экстремальных режимах. Установлено, что одним из основных и фундаментальных механизмов катастрофической деградации ИМРАТТ-диодов и диодов Ганна является массоперенос материала теплосток (Au, Cu) через барьерный слой в активные области диодов и проплавление рабочих областей [3]. Проплавление обусловлено созданием многокомпонентных эвтектических сплавов с температурой плавления в области 300–400°C [4]. Другим важным механизмом катастрофической деградации может быть нарушение адгезии в контактной системе или на границе «металл—полу-

проводник». Это может приводить к обрыву контакта или к увеличению электрического и теплового сопротивлений при частичном нарушении адгезии.

ИМРАТТ-диоды. Разработаны конструкция и технология изготовления диодного чипа в виде обращенной мезаструктуры $p^+ - p - n - n^+$ -типа на интегральном теплостокке.

В процессе эксплуатации температура рабочей области мезаструктуры ($n - p$) достигает 200–250°C [5], что обуславливает чрезвычайно высокие требования к надежности контактных систем и технологии монтажа диодного чипа в корпус. С учетом этого создавались барьерные слои (TiN, TiB₂) толщиной 1000–2000 Å между интегральным теплостокком и p^+ -областью. Минимальные значения переходных электрического и теплового сопротивлений при максимальной адгезии обеспечивались созданием тонкого (300–500 Å) слоя силицида палладия или силицида титана на границах контактных систем и полупроводника. Исследовались диоды с контактными системами металлизации типа Si – Pd₂Si – TiN – Au, Si – Ti – TiB₂ – Mo – Au и Si – Pd₂Si – Ti – Pd – Au. Барьерные слои TiN создавались методом термоионного реактивного синтеза, слои TiB₂ — магнетронным распылением мишеней стехиометрического состава.

Технологическая схема разрабатывалась для реализации диодного чипа в виде обращенной мезаструктуры $p^+ - p - n - n^+$ -типа на интегральном теплостокке. В качестве исходного материала использовались кремниевые эпитаксиальные структуры $p^+ - n - n^+$ -типа. Конструктивно мезаструктуры представляли собой кремниевую шайбу толщиной 8–12 мкм и диаметром 25–40 мкм для диодов непрерывного режима работы (100–200 мкм для импульсного режима работы). Интегральный теплосток представлял собой медный позолоченный диск толщиной 80–100 и диаметром 500 мкм. Верхний контакт (к n^+ -области) представлял собой золотой диск толщиной 3–5 мкм (рис. 1, где Au₁ и Au₂ — слои золота, нанесенные, соответственно, напылением в вакууме и методом электрохимического осаждения).

Соединение контактных систем мезаструктуры с элементами конструкции металлорубинового корпуса осуществлялось методами низкотемпературной термодиффузионной и термокомпрессионной сварки. Диодные чипы монтировались в фирменные

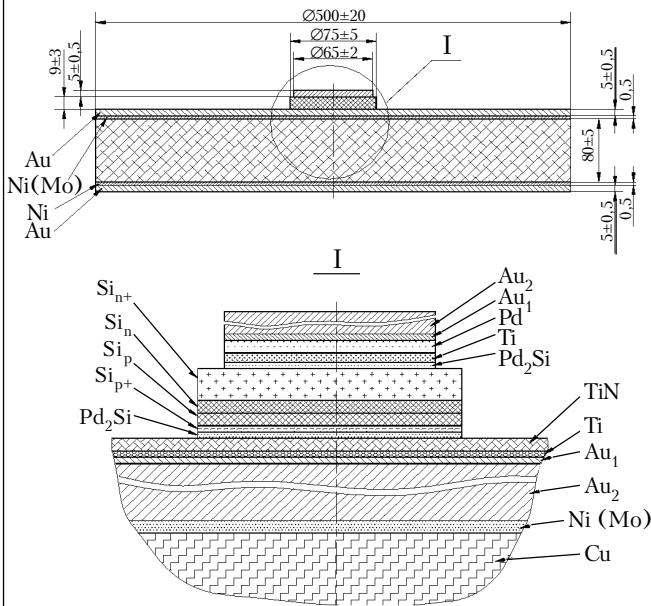


Рис. 1. Чип кремниевого IMPATT-диода

металлорубиновые корпуса (рис. 2). Технология изготовления диода предусматривает возможность дотравливания мезаструктуры в корпусе до требуемых значений диаметра.

Параметры изготовленных диодов приведены в табл. 1. Диоды обеспечивали генерацию СВЧ-мощ-

Таблица 1

Характеристики генераторных и усилительных IMPATT-диодов

| Рабочий диапазон частот, ГГц | 33...37 | 58...62 | 92...96 | 120...140 |
|-----------------------------------|-------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| Емкость корпуса, пФ | 0,2 | 0,16 | 0,12; 0,15 | 0,08 |
| Размеры рубиновой втулки, мм | 1,2×0,7×0,4 | 0,9×0,55×0,3 | 0,5×0,2×0,15 0,8×0,4×0,2 | 0,4×0,2×0,15 |
| Непрерывный режим работы | | | | |
| Минимальная мощность, мВт | 200...300 | 150...200 | 70...100 | 20...50 |
| Пробивное напряжение, В | 34...40 | 20...26 | 13...16 | 10...12 |
| Постоянный рабочий ток, мА | 80...150 | 100...150 | 150...200 | 200...270 |
| Постоянное рабочее напряжение, В | 40...50 | 26...32 | 16...21 | 10...15 |
| Емкость диода ($U_{обр}=0$), пФ | 1,3...2,0 | 0,8...1,2 | 0,7...0,9 | 0,6...0,8 |
| Импульсный режим работы | | | | |
| Минимальная мощность, мВт | 10...20 | 10 | 10 | 5 |
| Пробивное напряжение, В | 34...40 | 20...26 | 13...16 | 10...12 |
| Рабочий ток, А | 8...15 | 10...15 | 10...18 | 10...18 |
| Емкость диода ($U_{обр}=0$), пФ | 10...26 | 8...12 | 6...8 | 6...8 |

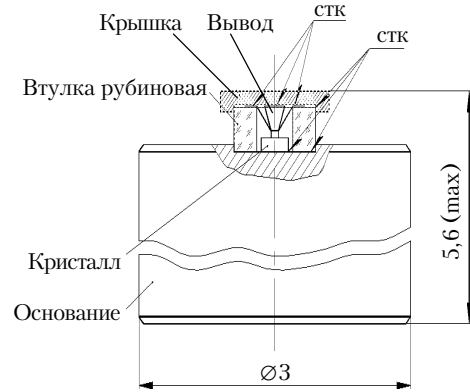


Рис. 2. Конструкция кремниевого IMPATT-диода миллиметрового диапазона: стк — сварка термокомпрессионная

ности 200—400 мВт в непрерывном режиме в диапазоне частот 50...60 ГГц и 100...20 мВт в диапазоне частот 90...140 ГГц при температуре $p-n$ -перехода порядка 200°C. В импульсном режиме работы диоды обеспечивали мощность 10—20 Вт в диапазоне частот 33...99 ГГц. Адгезионная прочность контактных систем на разрыв составляла 400—600 кгс/см². Характерные значения теплового сопротивления диодов не превышали 60°C/Вт при диаметре мезаструктуры 35—40 мкм. Полученные данные свидетельствуют о хороших комплексных характеристиках диодов.

Проведены исследования стабильности параметров диодов с рабочим диапазоном частот 58...62 ГГц при эксплуатации в форсированных режимах и температурах $p-n$ -перехода 335, 355 и 375°C. Испытания проводились при каждой температуре до выхода из строя половины испытываемых диодов (медианное время). Диоды испытывались в непрерывном режиме при пропускании обратного тока величиной 130 мА (при таком токе диоды в СВЧ-модуле генерировали мощность 200—250 мВт).

По результатам испытаний определялась энергия активации частоты отказов. Медианное время для температуры 335°C составляло 1055 ч, для температуры 355°C — 429 ч, для температуры 375°C — 79 ч. Энергия активации частоты отказов, вычисленная по этим результатам, составила величину 2,2 эВ. Это значение существенно выше, чем для металлизации на основе палладия (1 эВ) и платины (1,6 эВ) [6]. Экстраполяция на рабочие температуры диодов 250 и 220°C дает время безотказной работы диодов $5,6 \cdot 10^5$ ч и $3,4 \cdot 10^6$ ч, соответственно.

Исследована радиационная стойкость диодов при облучении их γ -кван-

Таблица 2

Характеристики переключаемых быстродействующих диодов непрерывного режима работы

| | | | | |
|--|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Рабочий диапазон частот, ГГц | 33...37 | 38...78 | 92...96 | 120...140 |
| Емкость диода ($U_{обр}=10$ В), пФ | 0,3...0,4 | 0,25...0,35 | 0,12...0,15 | 0,1...0,13 |
| Время переключения СВЧ-мощности, нс | 1...3 | 1...3 | 5...10 | 5...10 |
| Прямое сопротивление потерь (при $I_{пр}=10$ мА), Ом | 1...2 | 1...2,5 | 1,5...3 | 1,5...3 |
| Пробивное напряжение, В | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Постоянный рабочий ток, мА | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Емкость корпуса, пФ | 0,2 | 0,16 | 0,08 | 0,08 |
| Размеры рубиновой втулки, мм | 1,2×0,7×0,4 | 0,9×0,55×0,3 | 0,4×0,2×0,15 | 0,4×0,2×0,15 |
| Предельная непрерывная СВЧ-мощность в рабочей полосе частот (при температуре 60–70°C), мВт | 250 | 200 | 200 | 150 |

тами дозой до 10^8 рад. Указанные дозы γ -радиации не приводят к заметным изменениям параметров IMPATT-диодов.

Быстродействующие переключаемые $p-i-n$ -диоды. Диодный чип переключаемого диода представляет собой обращенную мезаструктуру $p^+ - n - p^+$ -типа на интегральном теплостокке. В качестве исходных материалов использовались эпитаксиальные структуры кремния $n - n^+$ -типа. Толщина рабочей области мезаструктуры составляла 1,5 – 10 мкм.

Исследовались диоды с контактными системами металлизации типа Si – Pd₂Si – Ti – Au и SiPd₂Si – TiN – Au. Конструкция переключаемых диодов аналогична конструкции IMPATT-диодов. Параметры диодов приведены в табл. 2.

Прямое сопротивление потерь диодов на частоте 10 ГГц при прямом токе 10 мА составляет 1 – 3 Ом, время восстановления обратного сопротивления при переключении с прямого тока 10 мА на обратное напряжение 10 В – 2 – 18 нс. Диоды обеспечивают в миллиметровом диапазоне потери пропускания 0,7 – 1,5 дБ, потери запираания – более 30 дБ и время переключения СВЧ-сигнала – 1 – 10 нс.

В процессе эксплуатации быстродействующие переключаемые диоды практически не перегреваются, причиной дестабилизации параметров могут быть кратковременные электрические перегрузки. Исследования диодных структур путем моделирования режимов эксплуатации при повышенных температурах корпуса (150°C) показали высокую стабильность параметров. Диоды 5-миллиметрового диапазона в циклическом режиме (переключение с

прямого тока 20 мА на обратное напряжение 15 В с частотой 50 ГГц) испытывались при температуре 150°C в течение 2000 ч, при этом ухода электрических параметров и отказов не наблюдалось. Ускоренные (в 500 раз) испытания (энергия активации частоты отказов 1,0 эВ [6], рабочая температура $p - n$ -перехода 50°C) показали время безотказной работы диодов 10^6 ч.

Облучение диодов γ -квантами дозой до 10^8 рад показало их высокую радиационную стойкость. Указанные дозы γ -радиации приводят к уменьшению накопленного заряда диодов до 25%, к стабилизации ВАХ в режиме лавинного пробоя, а также

к повышению температуры теплового пробоя на 50 – 70°C. Полученные результаты позволяют использовать радиационную обработку кремниевых переключаемых диодов γ -квантами для улучшения некоторых электрофизических параметров диодов.

Диоды Ганна. Конструкция чипов диода Ганна представляет собой обращенную мезаструктуру $M - n - n^+ - n^{++}$ -типа на золотом интегральном теплостокке (рис. 3). В качестве исходного материала ис-

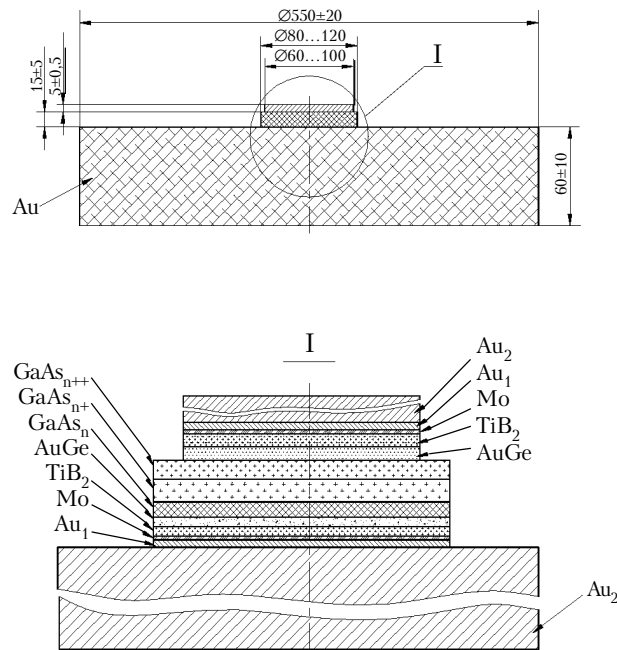


Рис. 3. Чип арсенидгаллиевого диода Ганна

Характеристики генераторных диодов Ганна непрерывного режима работы

| | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Рабочий диапазон частот, ГГц | 17...26 | 26...37,5 | 37,5...54 | 53...78 | 40...78 | 60...100 |
| Минимальная непрерывная мощность, мВт | 25...300 | 10...100 | 10...60 | 10...50 | 10...50 | 10...50 |
| Постоянное рабочее напряжение, В | 5...7 | 4...6 | 3...5 | 2,5...4 | 4...7 | 4...6 |
| Постоянный рабочий ток, А | 0,25...1,2 | 0,15...1,2 | 0,15...1,2 | 0,15...1,2 | 0,15...1,2 | 0,25...1,2 |
| Емкость корпуса, пФ | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Индуктивность корпуса, нГн | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Размеры рубиновой втулки, мм | 1,2×0,7×0,4 | 1,2×0,7×0,4 | 0,9×0,5×0,3 | 0,9×0,5×0,3 | 0,9×0,5×0,3 | 0,5×0,3×0,3 |

пользовались эпитаксиальные структуры арсенида галлия $n-n^+-n^{++}$ -типа. Контактные системы к n - и n^{++} -областям создавались методом магнетронного напыления слоев $Si-Ge-Au-TiB_2-Mo-Au$ с последующим вплавлением в потоке водорода. Диодные чипы монтировались в паяные металлорубиновые корпуса (рис. 4). Параметры диодов приведены в табл. 3.

Проведены предварительные испытания диодов 8-миллиметрового диапазона на надежность в форсированном режиме при температуре корпуса 100°C в течение 1000 ч. Диоды испытывались при токе 1,0 А (при таком токе диоды в СВЧ-модуле генерировали мощность 250–300 мВт). При этом ухода параметров и отказов не наблюдалось. Ускоренные (в 400 раз) испытания (энергия активации частоты отказов 1,8 эВ [6], рабочая температура кристалла 200°C) показали время безотказной работы диодов $4 \cdot 10^5$ ч.

Результаты предварительных испытаний диодов Ганна показали уровень их надежности, сравнимый с кремниевыми IMPATT-диодами.

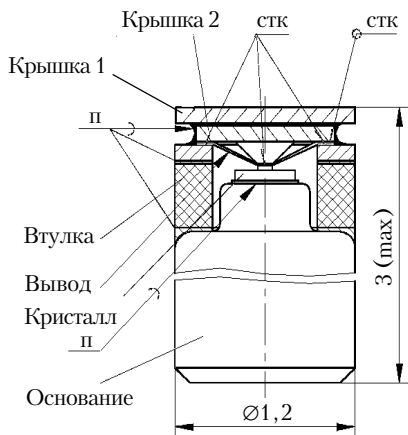


Рис. 4. Конструкция диода Ганна миллиметрового диапазона:
стк — сварка термокомпрессионная; п — пайка

Параметры диодов Ганна стабильны при облучении интегральными дозами γ -радиации до 10^8 рад.

* * *

Проведенные исследования показали перспективность использования контактных систем на основе силицидов, нитридов и боридов тугоплавких металлов для создания СВЧ-диодов с повышенной надежностью для длительной эксплуатации при повышенных температурах.

Радиационная стойкость диодов с указанными контактными системами при воздействии γ -радиации величиной 10^8 рад достаточно высока.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Eftekhari G. Reactively sputtered titanium nitride Schottky contacts on n -GaAs and their thermal stability // Semicond. Sci. Technol. — 1966. — Vol. 11. — P. 285.
2. Иванов В. Н., Коваленко Л. Е., Сумская Т. С. и др. Морфология и структура плавких омических контактов к электронному арсениду галлия // Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы. — 1988. — Вып. 4. — С. 36.
3. Конакова Р. В., Кордош П., Тхорик Ю. А. Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов. — Киев: Наук. думка, 1986.
4. Makara V. A., Boltovets M. S., Pasechny V. A., Rudenko O. V. Barrier properties of different multilayer metallization systems / Proceedings of the International Metallography Conference, 10–12 May 1995, Colmar, France. — P. 423–428.
5. Конакова Р. В., Тхорик Ю. А., Прима Н. А., Соловьев Е. А. Распределение температуры и напряжений при микроплазменном пробое ЛПД-диодов с барьером Шоттки / Тез. докл. Междунар. конф. «Современные проблемы физики полупроводников». — Нукус, Узбекистан, 1997. — С. 60.
6. Надежность полупроводниковых приборов в системе 20 г — 400 М // Кэнкюсе. Кэнкю дзюциека хококу. — 1985. — Т. 24, № 10. — С. 2311.