

В. Н. ИВАНОВ, В. М. КОВТОНЮК, Н. С. РАЕВСКАЯ

Украина, г. Киев, НИИ "Орион"
E-mail: bms@i.kiev.uaДата поступления в редакцию
19.02 2004 г.Оппонент к. ф.-м. н. Ю. А. ЦВИРКО
(НИИ "Орион", г. Киев)РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИОДОВ ГАННА ДЛЯ КВЧ-ТЕРАПИИ*Рабочая частота 42 ГГц, выходная мощность больше 1 мВт при рабочем токе менее 120 мА, повышенный выход годных диодов.*

Наряду с приборами для КВЧ-терапии, выпускаемыми в Украине и России, широкое применение нашла аппаратура серии РАМЕД КВЧ, изготавливаемая в Днепропетровске Центром радиофизических методов диагностики и терапии при Институте технической механики НАНУ. В этой аппаратуре в качестве источника КВЧ-энергии применяются генераторы на диодах Ганна. Диоды Ганна должны иметь следующие параметры: работать на частоте 42 ГГц, иметь выходную мощность 1—2 мВт и рабочий ток менее 120 мА.

Частота диода определяется эффективной длиной n -слоя, т. е. расстоянием между точкой зарождения домена и анодом. Для частоты 42 ГГц это расстояние примерно равно 2,4 мкм.

При создании современных диодов Ганна в качестве материала используются эпитаксиальные структуры арсенида галлия типа n^+-n-n^+ , где слои n^+ являются контактными слоями, к которым формируется металлический контакт, n -слой является слоем зарождения и переноса домена.

Зарождение домена происходит на одной из неоднородностей внутри n -слоя или на границе перехода n^+-n (катоде), на которой поле превысит пороговое. Поскольку граница перехода n^+-n плавная, то зарождение домена происходит внутри n -слоя на некотором расстоянии от катода, и это расстояние не постоянно от структуры к структуре. Таким образом, физическая длина n -слоя, которая указывается в технических условиях на эпитаксиальную структуру арсенида галлия, не совпадает с эффективной длиной. Это создает трудности при выборе определенной эпитаксиальной структуры арсенида галлия для изготовления диодов Ганна, работающих на заданной частоте.

Решение проблемы равенства физической и эффективной длины n -слоя состоит в создании неоднородности на катоде, на которой должен зарождаться домен. Одним из способов создания такой неоднородности является формирование низкоомного омического металлического контакта непосредственно на поверхности n -слоя. Для этого нужно использовать эпитаксиальные структуры арсенида галлия $n-n^+$ -типа и подобрать соответствующий металлический контакт,

который бы формировал низкоомный омический контакт к n -слою с концентрацией носителей 10^{15} — 10^{16} см $^{-3}$, был стабильный во времени и при повышенных температурах, а также технологичный.

Широко применяется многослойный низкоомный омический контакт из пленок эвтектического сплава золота с германием — никель к арсениду галлия с концентрацией носителей $\geq 10^{18}$ см $^{-3}$ [1]. Но этот контакт имеет относительно высокое удельное сопротивление при концентрации носителей в арсениде галлия $\leq 10^{17}$ см $^{-3}$ и подвержен деградации при работе на повышенных температурах прибора.

Целью настоящей работы явился поиск конструкции и технологии изготовления диода, удовлетворяющего предъявленным требованиям.

Разработанный многослойный омический контакт из Ge—Au—TiB $_2$ —Au к n -GaAs с концентрацией носителей $\geq 10^{15}$ см $^{-3}$ [2] позволил использовать эпитаксиальные структуры GaAs $n-n^+$ -типа. Этот контакт имеет удельное сопротивление порядка 10^{-5} Ом·см 2 при $n \approx 10^{15}$ см $^{-3}$, стабилен во времени и при температурах до 450°C. Контакт наносился на поверхность n -слоя послойно методом магнетронного распыления в атмосфере Ar. Соотношение толщины пленок Ge и Au подбирались так, чтобы температура их сплава была порядка 700—800°C. Слой TiB $_2$ является диффузионным барьером для Ge, Au, Ga и As — по крайней мере, до 600°C.

Технологическая схема изготовления кристалла представлена на рис. 1. В качестве исходного материала для изготовления кристалла были выбраны эпитаксиальные структуры арсенида галлия типа $n-n_6^+-n^{++}$, выпускаемые по техническим условиям ЕТО 026.035ТУ, с длиной n -слоя 2,4—2,6 мкм и концентрацией носителей $(8...9) \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$.

На поверхность n -слоя методом магнетронного распыления в атмосфере Ar послойно наносились Ge, Au, TiB $_2$, Au толщиной 300, 1800, 1000 и 2000 Å, соответственно. Затем пластина с контактами подвергалась термической обработке в водороде при температуре 500°C в течение 1 мин. На готовой пластине методом фотолитографии и травления контактов формировалось окно диаметром 3 мм, в котором располагались тестовые мезаструктуры диаметром 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 и 180 мкм.

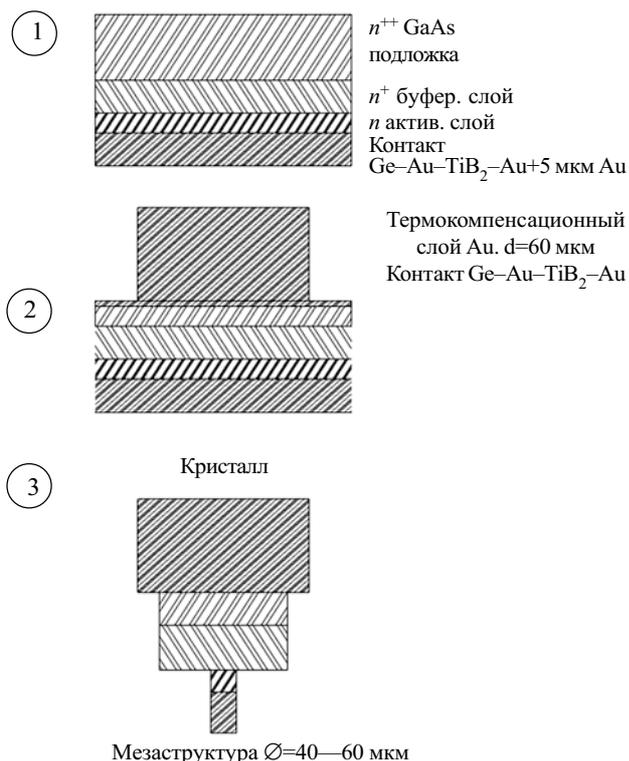


Рис. 1. Технологическая схема изготовления кристалла: 1 — эпитаксиальная структура $n-n^+-n^{++}$, на которую со стороны n -слоя сформирован омический контакт Ge-Au-TiB₂-Au + 5 мкм гальванического золота; 2 — произведено травление подложки до общей толщины 30 мкм, сформирован омический контакт Ge-Au-TiB₂-Au, на контакт селективно гальванически нанесен слой Au толщиной 60 мкм; 3 — кристалл с мезаструктурой порядка 40—60 мкм

На этих мезаструктурах исследовали вольт-амперные характеристики (ВАХ), проверяли линейность ВАХ, измеряли пороговое напряжение и пороговый ток. Годными считались пластины, имеющие линейную ВАХ и пороговое напряжение от 1,4 до 1,6 В. По величине порогового тока определялся диаметр мезаструктуры кристалла. Диаметр выбирался из тестовых структур, которые соответствовали току 100—150 мА. Как правило, эти диаметры равнялись 40—60 мкм.

После этих процедур на годные пластины со стороны контакта гальванически осаждался слой золота толщиной порядка 5 мкм.

Со стороны n^{++} (подложка, толщина которой 300—350 мкм) проводилось химико-динамическое травление в растворе (NH)₄OH-H₂O₂-H₂O 1:6:1 со скоростью 12—14 мкм в минуту до толщины 20—30 мкм. После этого со стороны подложки формировался такой же контакт, как и с n -стороны.

Методом фотолитографии на n^{++} -стороне формировалась матрица с окнами диаметром 350 мкм, которые соединялись перемычками шириной 10 мкм. В эти окна производилось селективное гальваническое осаждение слоя золота толщиной 50—60 мкм. Слои золота служат термокомпенсаторами для кристалла при его пайке на основание и при перепадах температуры во время работы прибора.

После наращивания термокомпенсирующего слоя методом фотолитографии формировались контактные площадки, совмещенные с термокомпенсирующими слоями, диаметром 40 или 60 мкм. Стравливали золотой слой, свободный от фоторезиста. Затем повторно методом фотолитографии создавали площадки, защищенные фоторезистом, диаметром 180 мкм, совмещенные с контактными площадками диаметром 40 или 60 мкм, и производили травление слоя TiB₂, слоя AuGe, сплавленного с GaAs, и GaAs до термокомпенсирующего слоя. Снимали фоторезист и стравливали TiB₂, слой AuGe, сплавленный с GaAs, и GaAs на глубину 3—4 мкм. Золотые контакты диаметром 40 или 60 мкм в этом случае служили маской. Таким образом, получали матрицу мезаструктур на термокомпенсирующих слоях золота, соединенных золотыми перемычками.

На готовой матрице производили измерение ВАХ прибором Л2-56 и определяли пороговое напряжение и ток при напряжении 2,5 В. Если пороговое напряжение лежало в области 1,4—1,6 В, а ток при рабочем напряжении 2,5 В был меньше или равен 0,12 А, то матрица считалась годной. Тогда производили вырубку кристаллов и собирали диоды.

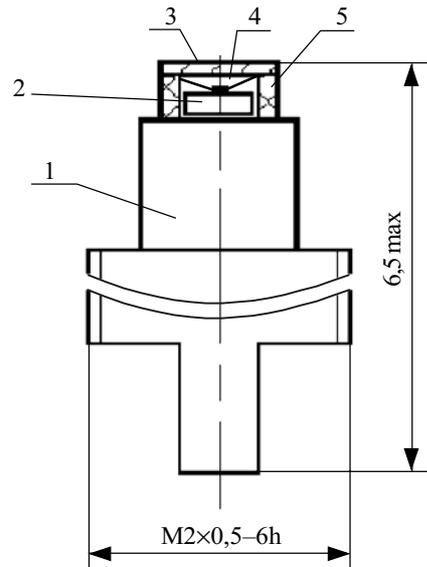


Рис. 2. Диод Ганна:
1 — основание; 2 — кристалл; 3 — крышка;
4 — вывод; 5 — рубиновая втулка

Диод, представленный на рис. 2, состоит из латунного основания, покрытого золотом толщиной 3 мкм. Для осуществления настройки генератора и крепления основание имеет резьбу M2×0,5. На основание методом термокомпрессии устанавливается рубиновая втулка диаметром 0,9 мм и высотой 0,3 мм. Внутри втулки к основанию припоем ПЗлГр-880 паяется кристалл. Верхний контакт кристалла разваривается золотой лентой, изготовленной из золотой проволоки диаметром 0,03 мм. Затем методом термокомпрессии приваривается медная, покрытая золотом, крышка диаметром 0,9 мм и толщиной 0,1 мм. Емкость корпуса диода примерно равна 0,11 пФ.

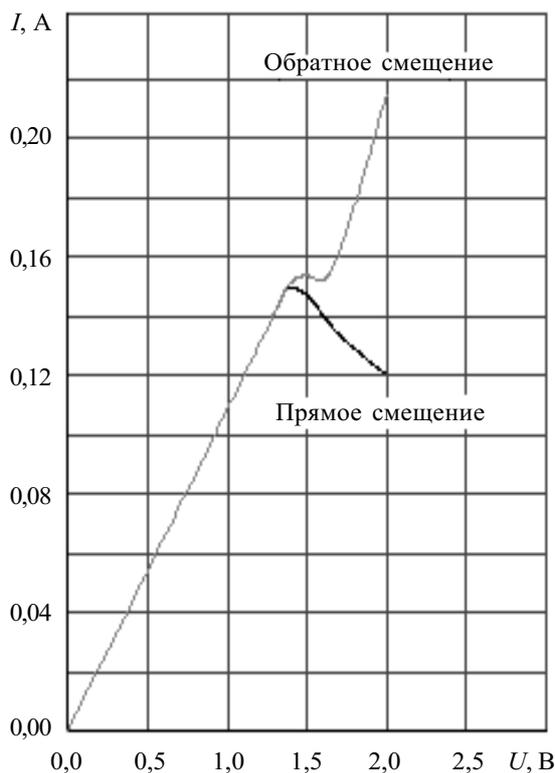


Рис. 3. Типичная ВАХ диода Ганна

На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики диода. Вольт-амперная характеристика линейна до напряжений $\pm 1,35$ В. При прямом напряжении смещения (на катод диода подается отрицательный потенциал) пороговое напряжение равно 1,4 В, и при увеличении напряжения выше порогового ток уменьшается. При обратном напряжении смещения (на катод диода подается положительный потенциал) пороговое напряжение увеличивается до 1,6 В, а при увеличении напряжения смещения наблюдается резкое увеличение тока и пробой. Это показывает, что при такой технологии формирования омического контакта на катоде образуется неоднородность, на которой формируется домен.

Измерение СВЧ-параметров диодов Ганна (рабочая частота $f_{\text{раб}}$, выходная мощность $P_{\text{вых}}$) проводилось стандартными методами на стенде, блок-схема которого представлена на рис. 4.

Конструкция измерительного генератора соответствует конструкции КВЧ-генератора (рис. 5).

Настройка генератора на требуемую частоту производилась подстроечным винтом и перемещением вдоль оси диода Ганна. Органами настройки генератора можно изменить рабочую частоту на 0,5 ГГц. Рабочая частота генератора зависит от реактивных параметров диода (емкость корпуса, индуктивность золотых выводов).

По результатам экспресс-измерений партии, собранной из кристаллов одной пластины, делается за-

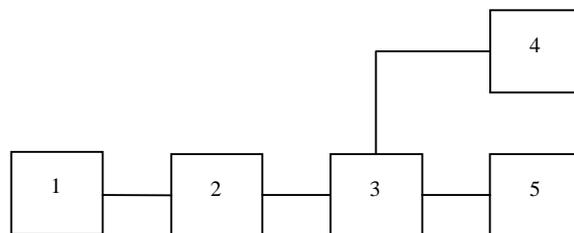


Рис. 4. Блок-схема измерения СВЧ-параметров диодов Ганна:

1 — измерительный генератор; 2 — аттенуатор; 3 — ответвитель; 4 — частотомер; 5 — измеритель мощности

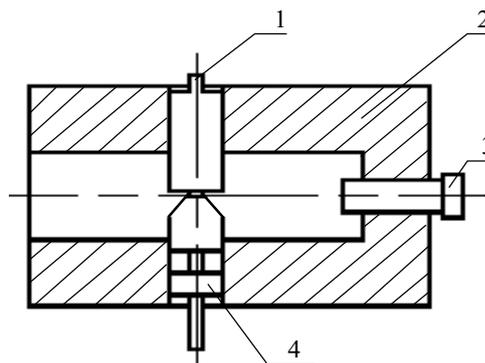


Рис. 5. Измерительный генератор:

1 — диод Ганна; 2 — корпус; 3 — подстроечный винт; 4 — фильтр НЧ

ключение о необходимости регулирования индуктивности золотого вывода (изменение длины и ширины). Регулированием индуктивности диода Ганна удается изменить $f_{\text{раб}}$ на 2 ГГц. Таким образом, подбираются реактивные параметры диода Ганна для получения в измерительном генераторе $f_{\text{раб}} = 42$ ГГц с $P_{\text{вых}} \geq 1,0$ мВт.

По результатам экспресс-исследования тестовой партии диодов Ганна собирается рабочая партия.

Таким образом, разработана технология изготовления кристаллов для диодов Ганна для работы на частоте 42 ГГц из эпитаксиальных структур типа $n-n^+-n^{++}$.

Разработанная технология сборки диодов Ганна позволяет путем подбора индуктивности вывода (наряду с подстройкой поршнем и перемещением диода в измерительном генераторе) настраивать диод на частоту 42 ГГц. При этом значительно повышается выпуск годных диодов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Vaca A. G., Ren F., Zolper J. C. et al. A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors // Thin Solid Films.— 1997.— Vol. 308—309.— P. 599—606.

2. Миленин В. В., Конакова Р. В., Иванов В. Н. и др. Особенности формирования и термостабильность многослойных невыпрямляющих контактов к n -GaAs с антидиффузионными барьерами на основе TiB_x и Mo // Журнал технической физики.— 2000.— Т. 70, вып. 11.— С. 80—85.