

В. Н. ИВАНОВ, В. М. КОВТОНЮК, к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ "Орион"
E mail: ivan@tsua.net, nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
12.12 2005 г.

Оппонент д. т. н. Р. В. КОНАКОВА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ GaAs-ДИОДОВ ГАННА ДЛЯ ДИАПАЗОНА КОРОТКИХ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ДЛИН ВОЛН

Разработанная технология позволила создать диоды Ганна, работающие на частоте до 80 ГГц с КПД до 4% и выходной мощностью 40 мВт.

Диоды Ганна, выполненные из эпитаксиальных структур GaAs типа n^+-n-n^+ , при работе в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн имеют, во-первых, низкую эффективность преобразования постоянной мощности в СВЧ-мощность (доли процента) и, во-вторых, ограничение устойчивой генерации на основной гармонике 60 ГГц. Причина в том, что домен зарождается в пролетной области на некотором расстоянии от катода. Это расстояние определяется длиной пролета электрона в активной области, на которой он приобретает энергию порядка 0,3 эВ, и лежит в пределах от 0,5 до 0,8 мкм, что уже сравнимо с длиной слоя пролета домена (n -слоя) 1—1,6 мкм.

Для улучшения характеристик диодов Ганна в коротковолновом диапазоне длин волн было предложено создать на катодном контакте энергетический барьер, который способствовал бы увеличению энергии электронов до 0,3 эВ на очень коротком расстоянии. Эта техника известна как инжекция горячих электронов. (Имеется ряд полупроводниковых структур, которые можно использовать в качестве инжекторов. Они включают в себя градиентные тройные соединения AlGaAs, плоские легированные барьеры, двугорбые барьеры, барьеры Шоттки.)

Простая конструкция катодного контакта с инжектирующим барьером не будет эффективной, поскольку критическое поле (более 10^6 В/см), генерируемое прямым смещением, формирует слой обеднения в области переноса длиной порядка 160 нм. Горячие электроны будут терять часть энергии при пересечении инжектора и слоя обеднения.

Значительное уменьшение толщины слоя обеднения достигается размещением высоколегированного n^+ -слоя между резкой границей инжектора и областью пролета. Поскольку толщину n^+ -слоя формируют значительно меньшей, чем длина свободного пробега электронов, то большинство горячих электронов будут проходить ее без каких-либо потерь энергии.

Группы AT & Bell Labs (США) и GEC Research (США) [1] исследовали в качестве инжектора горячих электронов слои AlGaAs. Здесь энергия инжек-

тирующих электронов равна разности энергий дна зон проводимости между GaAs и AlGaAs; обычно она равна 200—300 мэВ и зависит от количества Al.

Конструкция катодного контакта представляла собой слой нелегированного $Al_xGa_{1-x}As$ с линейным градиентом x , который увеличивался от 0 до 0,3. Электроны через такой барьер инжектируются с энергией порядка 0,25 эВ, близкой к энергии рассеяния в L -долину. Толщина инжектирующего слоя составляла 50 нм. Между инжектирующим слоем и пролетной областью выращивался n^+ -слой с концентрацией носителей более 10^{18} см $^{-3}$ и толщиной 5 нм.

Изготовленные диоды Ганна с таким катодным контактом обеспечивали на основной гармонике 90 ГГц КПД порядка 4% и выходную мощность 80 мВт, а на частоте 94 ГГц — КПД 2,4% и выходную мощность 58 мВт.

Одним из недостатков этих диодов является их относительно высокая стоимость вследствие применения дорогих исходных материалов.

В НИИ «Орион» разработана более перспективная технология получения диодов Ганна из GaAs (с катодным контактом инжекции горячих электронов на основе AuGe—TiB $_2$ —Au к эпитаксиальной структуре типа $n-n^+$), работающих в диапазоне частот от 60 до 80 ГГц.

Особенностями технологии являются:

- формирование контакта Au—Ge—TiB $_2$ —Au с инжекцией горячих электронов;
- изготовление кристаллов по групповой технологии;
- корпусирование в металлокварцевый корпус;
- контроль СВЧ-параметров диода.

Формирование контакта с инжекцией горячих электронов. Многослойный контакт Au—Ge—TiB $_2$ —Au формировался на поверхность эпитаксиальной структуры GaAs типа $n-n^+$ с концентрацией носителей от $3 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Контакты наносились методом магнетронного распыления, послойно, в одном технологическом цикле без нарушения вакуума. Установка, в которой наносился контакт, представляла собой модернизированную установку УВН-75Р с безмасляной откачкой. Слои, формирующие контакт, наносились в атмосфере аргона при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Исследования зависимости параметров контакта и его морфологии показали, что оптимальные резуль-

таты получают при толщине слоев 0,18 мкм золота, 0,03 мкм германия, 0,1 мкм диборида титана и 0,2 мкм золота, формируемых термической обработкой в водороде при температуре порядка 500°C. Оже-спектроскопия показывает, что слой TiB₂ является прекрасным диффузионным барьером для Au, Ge, Ga и As вплоть до 600°C [2, 3].

Вольт-амперные характеристики при напряжениях смещения ниже порогового линейны и симметричны в области температур от +100°C до -100°C. Отклонение от симметричности наблюдается при температурах ниже -100°C. По температурным зависимостям сопротивления определялась высота барьера контакта. Она находилась в пределах 0,24—0,26 эВ.

Изготовление кристаллов. В основу изготовления кристаллов была положена групповая технология изготовления мезоструктур с интегральным золотым теплоотводом со стороны катодного контакта [4]. Кристаллы изготавливались из эпитаксиальных структур арсенида галлия типа $n-n_6^+-n^{++}$. Концентрация носителей в n -слое равнялась $(0,8...1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщина n -слоя составляла 1,5—2 мкм.

На поверхности n -стороны эпитаксиальной структуры формировался многослойный контакт AuGe-TiB₂-Au и затем гальванически селективно осаждался слой золота толщиной порядка 60 мкм и диаметром каждого элемента 400 мкм. Со стороны n^{++} -слоя проводилось химико-динамическое травление пластины в травителе NH₄OH-H₂O₂-H₂O до толщины порядка 20 мкм. Затем формировался омический контакт AuGe-TiB₂-Au.

Методом фотолитографии изготавливались мезоструктуры диаметром порядка 80 мкм. На рис. 1 приведена фотография матрицы с мезоструктурами.

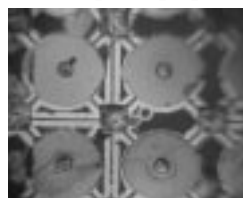


Рис. 1. Матрица с мезоструктурами

После изготовления матрицы на приборе Л2-56 снимались вольт-амперные характеристики, по которым определялись пороговые напряжения и пороговые токи. Для диодов, работающих в диапазоне 60—80 ГГц, отбирались пластины с мезоструктурами, у которых пороговое напряжение находилось в области 0,8—1,2 В. Пороговый ток подгонялся травлением мезоструктур до значения не менее 0,8 А. Затем из матрицы вырубались кристаллы, которые монтировались в корпус.

Изготовление корпуса и сборки диода. Для достижения рабочей частоты диодов Ганна необходимо, чтобы резонансная частота корпуса превосходила рабочую частоту диода, по крайней мере, на несколько десятков ГГц. Поэтому монтаж кристалла производился в металлокварцевый корпус. В качестве диэлектрика корпуса использовались кварцевые столбики размерами 0,5×0,3×0,5 мм, металлизированные с двух сторон (0,5×0,3 мм). Эти столбики приваривались по 4 шт. методом термокомпрессии к золотым

шайбам диаметром 1,2 мм и толщиной 0,02 мм. Внешний вид кварцевой втулки представлен на рис. 2.

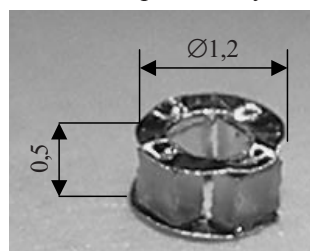


Рис. 2. Кварцевая втулка

Кварцевая втулка приваривалась к медному основанию, покрытому слоем золота толщиной 3 мкм. Кристалл с золотым теплоотводом монтировался в корпус при помощи пайки золотогерманиевым припоем. Верхний контакт кристалла соединялся с верхним контактом металлокварцевой втулки крестообразным выводом. После этого производилось измерение порогового тока $I_{\text{пор}}$ кристалла и дополнительным травлением мезоструктуры достигалось получение $I_{\text{пор}} = 0,5 \text{ А}$, затем диод закрывали крышкой.

Измерение СВЧ-характеристик диодов. Измерения СВЧ-характеристик диодов производились на стенде, блок-схема которого приведена на рис. 3, в измерительной камере. Измерительная камера представляла собой отрезок волновода сечением 1,8×3,6 мм, замкороженный с одной стороны подвижным поршнем. Питание диода осуществлялось через фильтр низких частот. Настройка диода на определенную частоту и максимальную мощность производилась перемещением поршня и перемещением диода по высоте волновода.

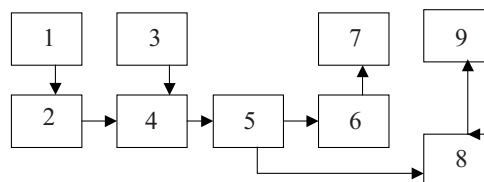


Рис. 3. Структурная схема измерения СВЧ-параметров диодов:

1 — источник питания 13PP-30-30-004; 2 — вольтамперметр М2038; 3 — вольтметр В7-40; 4 — генератор для измерения параметров диодов; 5 — волноводный тракт; 6 — преобразователь приемный ПП-13; 7 — измеритель мощности М3-75; 8 — анализатор спектра С4-27; 9 — частотомер электронный ЧЗ-66

На рис. 4 представлены типичные зависимости мощности диода P от частоты F и температуры измерительного генератора T . Максимальный перепад

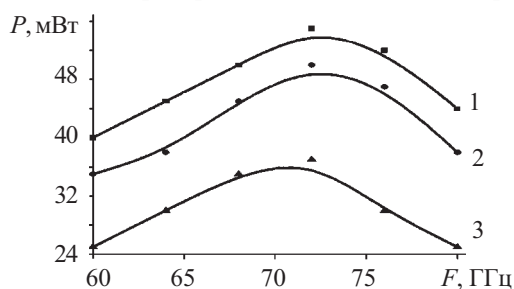


Рис. 4. Типичная зависимость выходной мощности диода от частоты:

1 — при $T = -50^\circ\text{C}$; 2 — при нормальных климатических условиях; 3 — при $T = +60^\circ\text{C}$

мощности в диапазоне температур от $+60^{\circ}\text{C}$ до -50°C не превышал 40%. Максимальная мощность диодов на частоте 80 ГГц равнялась 42 мВт при эффективности порядка 4%. Диоды стабильно запускались при температуре -70°C .

Разработанная технология изготовления корпусов диодов с кварцевыми втулками позволяет получить емкость корпуса 0,04 пФ, обеспечивающую резонансную частоту корпуса диода выше 150 ГГц.

Таким образом, подтверждено, что многослойная система $\text{Au—Ge—TiB}_2\text{—Au}$ с толщинами 0,18—0,03—0,1—0,2 мкм формирует к арсениду галлия *n*-типа с концентрацией носителей $(0,3 \dots 1)10^{16} \text{ см}^{-3}$ контакт с барьером высотой 0,24—0,26 эВ.

Использование групповой технологии изготовления кристаллов мезаструктур и корпусирования в металлокварцевый корпус позволили создать диоды

Ганна с катодным контактом из $\text{Au—Ge—TiB}_2\text{—Au}$, работающие в частотном диапазоне 60—80 ГГц на основной гармонике с КПД порядка 4% и выходной мощностью 40 мВт.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Spooner H., Couch N. R. Advances in hot electron injector Gunn // GEC J. Res.— 1989.— Vol. 7, N 1.— P 34—45.
2. Пат. 8493 України. Напівпровідниковий надвисокочастотний діод Ганна з арсеніду галію / В. М. Иванов, В. М. Ковтонюк, Ю. С. Николаенко.— 2005.— Бюл. № 8.
3. Миленин В. В., Конакова Р. В., Иванов В. Н. и др. Особенности формирования и термостабильность многослойных невыпрямляющих контактов к *n*-GaAs с антидиффузионным барьером на основе TiB_x и Mo // Журнал технической физики.— 2000ю— Т. 70, вып. 11.— С. 80—85.
4. Яцуненко А. Г., Ковтонюк В. М., Иванов В. Н., Николаенко Ю. Е. Слаботочные диоды Ганна на основе арсенида галлия для КВЧ-аппаратов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре— 2005.— № 3.— С. 46—48.