

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

Украина, г. Киев, НИИ "Орион"  
E-mail: ivan@tsua.net

Дата поступления в редакцию  
15.01 2007 г.

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

## ДИОДЫ ГАННА ИЗ GaAs С КАТОДНЫМ КОНТАКТОМ, ИНЖЕКТИРУЮЩИМ ГОРЯЧИЕ ЭЛЕКТРОНЫ

*Показаны преимущества диодов Ганна с катодными контактами из AuGe-TiB<sub>2</sub>-Au, инжектирующими горячие электроны, по сравнению с диодами Ганна с омическими контактами.*

Диоды Ганна, изготовленные из эпитаксиальных структур GaAs типа  $n^+ - n - n^{++}$  широко применяются в генераторах различного назначения, в частности, в генераторах КВЧ-терапии [1]. Однако на основной гармонике они работают на частотах до 60 ГГц. При относительной простоте построения генераторов и низких значениях амплитудно-модулированных и частотно-модулированных шумов такие диоды Ганна отличаются и рядом недостатков:

- низкой эффективностью преобразования постоянной мощности в мощность СВЧ;
- относительно сильной зависимостью генерируемой мощности от температуры;
- неустойчивостью генерации при низких температурах, требующих повышения рабочего напряжения для разогрева диода Ганна.

Причиной этого является наличие так называемой «мертвой зоны» (т. е. зоны длиной  $l$ , необходимой для приобретения электроном под действием электрического поля  $E$  энергии порядка 0,3 эВ для перехода в состояние с низкой подвижностью), расположенной непосредственно после катодного контакта в пролетной области. В зависимости от концентрации носителей  $n$  и температуры пролетной области  $l$  может принимать значения от 0,25 до 0,8 мкм и проявляется в цепи СВЧ как паразитное сопротивление, ведущее к снижению эффективности диода. Наличие «мертвой зоны» обуславливает быстрое падение генерируемой мощности на основной гармонике на частотах от 45 до 60 ГГц, где длина пролетной области лежит в пределах 1,3—2,0 мкм.

Эффект проявления «мертвой зоны» можно практически исключить, если каким-то образом инжектировать в пролетную область диода электроны с энергией, близкой к энергии междолинного перехода, т. е. порядка 0,31 эВ. С этой целью разработан и используется ряд неомических катодных контактов к диодам Ганна, которые позволяют инжектировать горячие электроны [2]:

- контакты с гетеропереходом на основе AlGaAs с градиентной прослойкой;

- контакты на основе плоских легированных барьеров;
- контакты с инжекцией горячих электронов на туннельном переходе  $p^{++} - n^{++}$ ;
- контакты на основе барьеров Шоттки.

Кристаллы первого вида, как правило, выращивают на установках молекулярно-лучевой эпитаксии, что значительно удорожает технологию их получения. Контакты второго, третьего и четвертого видов трудновоспроизводимы технологически.

В НИИ «Орион» разработаны конструкция и технология формирования катодного контакта с инжекцией горячих электронов на основе AuGe-TiB<sub>2</sub>-Au, свободные от указанных недостатков. Эти контакты формируются непосредственно на поверхности  $n$ -слоя эпитаксиальной структуры арсенида галлия типа  $n - n^+$  [3, 4]. Формирование катодного контакта непосредственно на поверхности активного  $n$ -слоя дает значительное преимущество по отводу тепла из пролетной области диода. Это снижает рабочую температуру мезаструктуры диода Ганна, что, в свою очередь, повышает надежность диода Ганна.

Были рассчитаны и экспериментально доработаны толщины слоев компонентов контакта, а также режимы термической обработки. Высота барьера контакта, определенная по температурной зависимости сопротивления контакта, для концентрации носителей в арсениде галлия  $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$  находилась в пределах 0,24—0,26 эВ. Инжектирование горячих электронов с энергией, близкой к энергии междолинного перехода 0,31 эВ, приводит к формированию стабильного домена вблизи катодного контакта. Таким образом, практически исключается «мертвая зона» и стабилизируется длина области пролета, т. к. при этом условия длина области пролета слабо зависит от напряжения смещения. Слабая зависимость длины пролетной области от напряжения смещения обуславливает генерирование мощности на частоте, задаваемой внешним резонатором начиная от напряжений смещения, равных  $(1,2 - 1,5)U_{\text{пор}}$ .

Диод Ганна с катодным контактом, инжектирующий горячие электроны, обладает улучшенной температурной стабильностью по сравнению с диодами с традиционными омическими контактами. Это обусловлено тем, что изменение энергии электронов за счет изменения температуры среды мало по сравнению с энергией, приобретаемой электронами при прохождении барьера. Большая эффективность преобра-

зования постоянной мощности в мощность СВЧ диодов с катодом, инжектирующим горячие электроны, по сравнению с традиционными диодами объясняется исключением из СВЧ-цепи паразитного сопротивления, обусловленного «мертвой зоной».

В НИИ «Орион» разработана базовая конструкция чипов диода Ганна с катодными контактами, инжектирующими горячие электроны, и технология их изготовления. Разработаны конструкции диодов Ганна для работы в четырех рабочих диапазонах частот: 17,44—25,86 ГГц, 25,86—37,5 ГГц, 37,5—53,76 ГГц, 53,76—78,0 ГГц.

Чипы, используемые в различных частотных диапазонах, различаются только длиной пролетной области и диаметром мезаструктуры. В качестве теплоотвода используется золотой диск толщиной 60 мкм с малым уровнем механических напряжений, изготавливаемый по интегральной технологии.

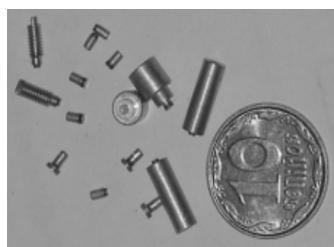


Рис. 1. Диоды Ганна различного назначения

В зависимости от рабочего диапазона частот диоды имеют различные линейные размеры корпусов и их конструкцию (см. рис. 1).

Типичные характеристики зависимости выходной СВЧ-мощности от рабочей частоты диодов с катод-

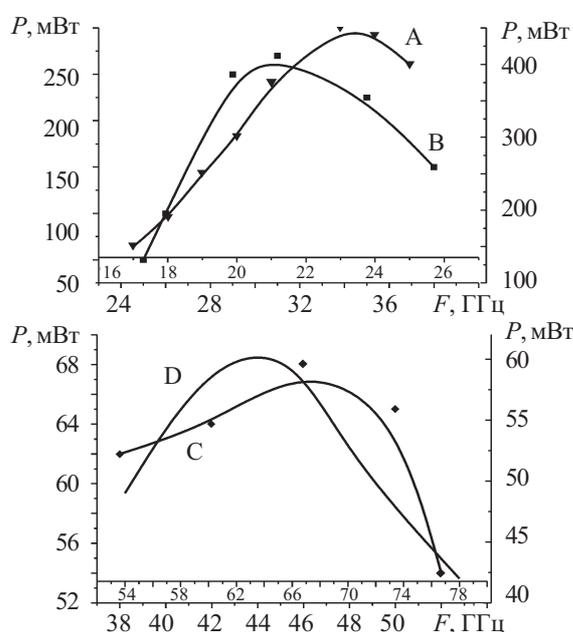


Рис. 2. Зависимость выходной СВЧ-мощности от рабочей частоты диода Ганна:

A — диапазон частот 17,44—25,86 ГГц, выходная мощность 100—450 мВт,  $U_{\text{раб}}=6,5$  В,  $I_{\text{раб}}=0,83$  А; B — диапазон частот 25,86—37,5 ГГц, выходная мощность 50—300 мВт,  $U_{\text{раб}}=4,5$  В,  $I_{\text{раб}}=0,55$  А; C — диапазон частот 37,5—53,76 ГГц, выходная мощность 54—68 мВт,  $U_{\text{раб}}=3,6$  В,  $I_{\text{раб}}=0,35$  А; D — диапазон частот 53,76—78 ГГц, выходная мощность 41—61 мВт,  $U_{\text{раб}}=3$  В,  $I_{\text{раб}}=0,4$  А

ными контактами, инжектирующими горячие электроны, приведены на рис. 2.

На базе НИИ «Орион» серийно изготавливаются и поставляются потребителям диоды Ганна с рабочими частотами до 42 ГГц и ряд высокостабильных генераторов на фиксированные частоты и генераторы с электрически перестраиваемой частотой, в которых используются эти диоды. Генераторы отличаются хорошей температурной стабильностью и устойчивой работой при температуре на корпусе генератора от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$  при неизменном рабочем напряжении диода Ганна, соответствующем максимальной выходной СВЧ-мощности.

На рис. 3 показана зависимость выходной мощности от частоты генератора с электрической перестройкой частоты при различных температурах. Перепад выходной мощности таких генераторов при изменении температуры на корпусе генератора от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$  составляет 1,2—1,5 дБ.

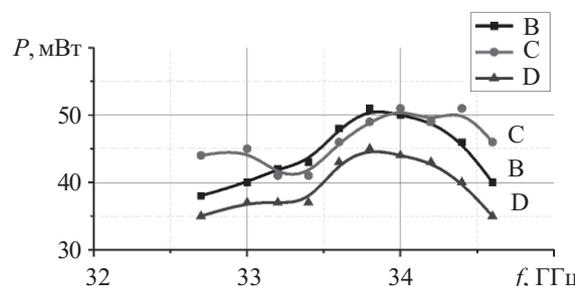


Рис. 3. Зависимость выходной СВЧ-мощности от частоты генератора с электрической перестройкой частоты при различной температуре на корпусе генератора ( $U_{\text{раб}}=7,5$  В,  $I_{\text{раб}}=0,41$  А):

B — нормальные климатические условия; C —  $-50^{\circ}\text{C}$ ; D —  $+75^{\circ}\text{C}$

Таким образом, использование диодов Ганна с катодным контактом из  $\text{AuGe-TiB}_2\text{-Au}$ , инжектирующим горячие электроны, дает преимущества по сравнению с использованием традиционных диодов Ганна с омическими контактами при применении их в СВЧ-генераторах в качестве активных элементов:

- более высокая эффективность (4—8% в зависимости от рабочего диапазона частот);
- улучшенная температурная стабильность;
- способность к устойчивой работе при рабочих температурах от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$  без применения дополнительных устройств для поддержания работоспособности.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. 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.
2. Spooner H., Couch N. R. Advances in hot electron injector Gunn // GEC J. Res.— 1989.— Vol. 7, N 1.— P. 34—45.
3. Пат. 8493 України. Напівпровідниковий надвисокочастотний діод Ганна з арсеніду галію / В. М. Иванов, В. М. Ковтонюк, Ю. Е. Николаенко.— 2005.— Бюл. № 8.
4. Иванов В. Н., Ковтонюк В. М., Николаенко Ю. Е. Технология изготовления GaAs-диодов Ганна для диапазона коротких миллиметровых длин волн // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006.— № 5.— С. 5—7.