

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИОДОВ ГАННА ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, РАБОТАЮЩИХ НА ЧАСТОТАХ ВЫШЕ 60 ГГц

В. М. Ковтонюк, В. Н. Иванов, к. т. н. Ю. Е. Николаенко

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»
E-mail: bms@i.kiev.ua, tashka@industry.gov.ua

Разработаны конструкция и перспективная технология изготовления диодов Ганна на эпитаксиальных структурах GaAs $n-n^+$ -типа с катодным контактом, инжектирующим горячие электроны. Исследованы моногармонический и бигармонический режимы работы на частотах выше 60 ГГц. Достигнуто значение КПД 1,2% для генераторов, работающих в бигармоническом режиме на рабочей частоте 94 ГГц.

Широкое применение диодов Ганна (ДГ) в радиотехнике обусловлено их высокой надежностью и простотой реализации устройств на их основе, а также низким уровнем собственных шумов. Особый интерес представляет использование диодов Ганна на частотах значительно выше 60 ГГц. Для решения этой проблемы усилия исследователей направлены на совершенствование структуры и конструкции диодов Ганна, применение новых материалов с эффектом Ганна, использование режимов генерирования на гармониках.

Верхняя граница частотного диапазона для ДГ из GaAs для структур типа n^+-n-n^+ , работающих на основной гармонике, лежит в пределах 60—70 ГГц, что обусловлено:

— технологическими трудностями изготовления эпитаксиальных структур GaAs с толщиной активного слоя ≤ 1 мкм из-за размытости границ легирования n^+-n и $n-n^+$, которые становятся соизмеримыми с толщиной активного слоя;

— наличием «мертвой зоны», т. е. части активной области, на которой электроны ускоряются до уровня энергии, достаточной для введения их в состояние с низкой подвижностью и формирования домена (глубина проникновения «мертвой зоны» в активный слой может достигать 0,25 мкм).

Для уменьшения влияния «мертвой зоны» на параметры ДГ на рабочих частотах в миллиметровом диапазоне длин волн на катодном контакте формируется энергетический барьер, через который в активную область инжектируются горячие электроны с энергией порядка 0,2—0,3 эВ. Такие контакты называются контактами с инжекцией горячих электронов [1, 2].

Целью настоящей работы является поиск и исследование новых конструкторско-технологических решений дальнейшего повышения частоты генерирования диодов Ганна из арсенида галлия.

Для этого в НИИ «Орион» разработана перспективная технология изготовления ДГ из GaAs с катодным контактом, инжектирующим горячие электроны, на основе AuGe–TiB₂–Au. В отличие от предыдущих разработок катодный контакт был сформирован на эпитаксиальных структурах типа $n-n^+$, генерирующих в рабочем диапазоне частот до 80 ГГц. Причем, многослойный контакт AuGe–TiB₂–Au формируется на поверхности активного слоя эпитаксиальной структуры GaAs, концентрация носителей в котором лежит в пределах от $3 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Контакты наносятся методом магнетронного распыления послойно, в одном технологическом цикле в атмосфере аргона при давлении $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

После нанесения контактов, эпитаксиальная структура GaAs подвергалась термической обработке в водородной среде. Исследования параметров контакта и его морфологии показали, что оптимальные результаты получены при толщине слоев Au — 0,18 мкм, Ge — 0,03 мкм, TiB₂ — 0,1 мкм и Au — 0,2 мкм. Исследование распределения элементов контакта и GaAs в приконтактной области методом электронной Оже-спектроскопии показали, что слой TiB₂ является хорошим антидиффузионным барьером для элементов контакта и арсенида галлия вплоть до 600°C [3]. Вольт-амперные характеристики контактов при напряжениях ниже порогового линейны и симметричны в диапазоне температур от –100 до +100°C. Высота барьера контакта

Оппонент
к. ф.-м. н. С. Д. ВОТРОПОДИН
(НИИ ПП, г. Томск)

«металл—полупроводник», определенная по температурной зависимости сопротивления контакта, находится в пределах 0,24—0,26 эВ.

Применение контактов с инъекцией горячих электронов позволяет повысить КПД ДГ до 4% на частотах ниже 80 ГГц. При дальнейшем увеличении рабочей частоты КПД ДГ падает из-за воздействия краевых эффектов и ограничения произведения $n_0 \times l$ (где n_0 — концентрация носителей в активном слое, l — длина активного слоя).

Исходя из этого, особый интерес вызывает бигармонический режим ДГ, при котором возможна генерация колебаний до 150 ГГц с КПД, определенным теоретически, до 1,8%. В НИИ «Орион» практически достигнуто значение КПД 1,2% для генераторов, работающих в бигармоническом режиме на рабочей частоте 94 ГГц.

Режим работы ДГ, его рабочий диапазон частот, мощность генерируемого сигнала, КПД определяются следующими основными параметрами эпитаксиальных структур GaAs:

- длиной активного слоя l ;
- концентрацией носителей n_0 ;
- видом профиля легирования активного слоя;
- типом контактов.

Для возникновения СВЧ-колебаний в ДГ длина активного слоя l и концентрация носителей n_0 в активном слое должны удовлетворять критерию Крэмера

$$n_0 l \geq \epsilon v_g \left(\frac{4\pi q}{\mu_d} \right), \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость GaAs;
 v_g — дрейфовая скорость электронов;
 q — заряд электрона;
 μ_d — дифференциальная подвижность.

Неравенство (1) эквивалентно условию $|\tau_{md}|/\tau_0 \leq 1$, где τ_{md} — максвелловское время релаксации объемного заряда; τ_0 — время пролета домена. Таким образом, устанавливается соотношение между временем формирования домена и временем пролета. Если произведение $n_0 \times l$ меньше некоторой величины, то домен не успевает сформироваться и генерация невозможна. Для GaAs $n_0 \times l \geq 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

В работе [4] проводились исследования с целью оптимизации параметров n_0 и l для ДГ, работающих на основной гармонике в частотном диапазоне 26—40 ГГц, а на второй гармонике — в диапазоне частот 52—80 ГГц. На **рис. 1** в графическом виде приведены результаты оптимизации параметров n_0 и l для мезаструктур диаметром 100 мкм, полученные авторами [4]. Нижний предел произведения $n_0 \times l$, исходя из условий достаточно малого времени формирования домена, устанавливается равным $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Верхний предел произведения $n_0 \times l$ обусловлен предельным разогревом активного слоя и равен $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Параметры n_0/l определяют омическое сопротивление мезаструктуры и также имеют ограничения сверху и снизу. Для того, чтобы произведение $n_0 \times l$ остава-

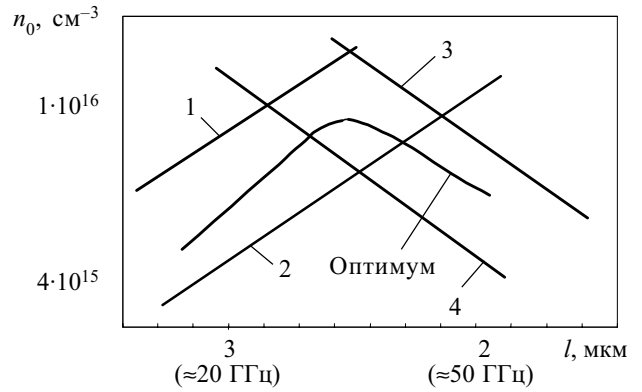


Рис. 1. Результаты оптимизации параметров n_0 и l для мезаструктур диодов Ганна диаметром 100 мкм:

1 — нижний температурный предел, $n_0 \times l = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; 2 — верхний температурный предел, $n_0 \times l = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; 3 — нижний предел контактного сопротивления 0,25 Ом, $n_0 \times l = \text{const}$; 4 — верхний предел контактного сопротивления 0,5 Ом, $n_0 \times l = \text{const}$

лось постоянным с увеличением n_0 необходимо уменьшать длину активного слоя, что приводит к уменьшению сопротивления мезаструктуры и, следовательно, к увеличению тока, проходящего через мезаструктуру, и рассеиваемой мощности.

С учетом этих условий для ДГ, работающего в диапазоне частот 26—40 ГГц по основной гармонике, были найдены параметры n_0 и l , при которых мощность сигнала на основной гармонике максимальна: $n_0 = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $l = 3 \text{ мкм}$, т. е. $n_0 \times l = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Для эффективной работы ДГ на второй гармонике большое значение имеет крутизна фронтов импульсов тока через диод. Крутизна переднего фронта зависит от скорости формирования слоя объемного заряда, которая пропорциональна концентрации носителей n_0 . Выходная мощность диода на второй гармонике пропорциональна мощности на основной гармонике. Из данных, приведенных в **таблице**, видно, что СВЧ-мощность растет с увеличением n_0 и значения произведения $n_0 \times l$.

Проводилось усреднение по 10 образцам с каждого массива.

Зависимость мощности ДГ на частоте 35 ГГц от произведения $n_0 \times l$

l , мкм	n_0 , 10^{15} см^{-3}	$n_0 \times l$, 10^{12} см^{-2}	Генерируемая мощность, мВт
3,0	4,4	1,32	24,0
2,95	4,51	1,33	30,0
3,1	4,71	1,46	45,0
2,8	5,56	1,55	68,0
2,85	5,58	1,39	76,0
3,0	5,4	1,62	80,0
3,05	5,44	1,66	90,0
2,9	5,79	1,68	108,0
3,1	5,55	1,72	125,0
2,85	6,28	1,79	135,0
3,0	6,13	1,84	152,0
2,9	6,48	1,88	180,0

Таким образом, для получения достаточно больших уровней мощности как на основной, так и на второй гармонике, необходимо применять эпитаксиальные структуры с $n_0 \geq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $n_0 \times l > 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Верхнее значение произведения $n_0 \times l$ ограничивается температурными условиями, и для технологии, применяемой в НИИ «Орион», составляет порядка $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Особые требования следует также предъявлять к корпусам ДГ. Для диодов, работающих в моногармоническом и бигармоническом режимах, одной из важнейших задач является снижение паразитных реактивных составляющих импедансов корпусов и исключение паразитных резонансов из рабочего диапазона частот на основной и второй гармониках. Разработанная конструкция ДГ представлена на **рис. 2**. Совершенствование корпуса идет по пути уменьшения емкости диэлектрической втулки (или изолятора) и уменьшения индуктивности выводов.

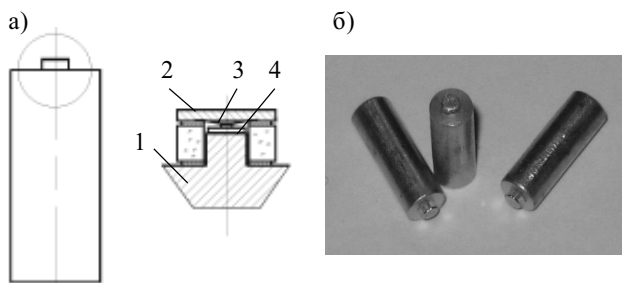


Рис. 2. Конструкция (а) и внешний вид (б) диода Ганна: 1 — позолоченный медный корпус с кварцевым изолятором; 2 — крышка диода; 3 — золотой вывод; 4 — кристалл

Снижения паразитной емкости корпуса можно достичь уменьшением внешнего диаметра диэлектрической втулки при постоянном внутреннем диаметре, увеличением высоты диэлектрической втулки, применением диэлектрика с меньшим значением ϵ (для монокристаллического кварца $\epsilon=3,5-4,5$).

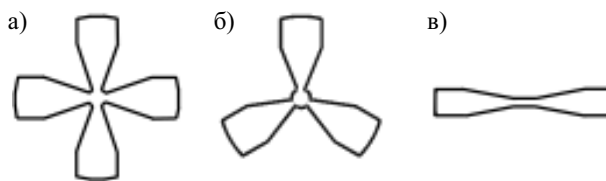


Рис. 3. Выводы из золота: а — четырехлепестковый; б — трехлепестковый; в — двухлепестковый

Уменьшение индуктивности корпуса достигается за счет применения вводов различной конфигурации (см. **рис. 3**).

Таким образом, совершенствование конструкции корпуса ДГ, применение бигармонического режима работы, использование эпитаксиальных структур GaAs с оптимальной концентрацией носителей и оптимальной длиной активного слоя, а также применение катодного контакта с инжекцией горячих электронов позволяет существенно расширить рабочий диапазон частот (до 150 ГГц) с приемлемым значением КПД диодов Ганна из GaAs (4—8% для моногармонического режима и до 1,5% для бигармонического режима).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Spooner H., Couch N. R. Advances in hot electron injector Gunn. // DEC J. Res.— 1989.— Vol. 7, N 1.— P. 34—45.
2. 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.
3. 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.
4. Device-package-circuit optimization of Gunn device at millimeter wave frequencies // Proc. 4th Biennial Elec. Eng. Cong.— 1973.— Vol. 4. Microwave, Semicond, Devices, Circuits and appl. Hnasa, N 4.— P. 155—164.

НОВЫЕ КНИГИ

Томаси У. Электронные системы связи. М.: Техносфера, 2007.— 1360 с.

Справочное руководство по современным средствам электросвязи охватывает различные аспекты технологий передачи и обработки информации, методов приема и генерации сигналов, аналоговой и цифровой модуляции, передачи по проводным и волоконно-оптическим линиям, распространения радиоволн, спутниковой, сотовой и радиорелейной связи, протоколов передачи данных, телефонии, коммутации и сигнализации.

При беспрецедентной широте охвата, материал изложен компактно, доступно, ясно и с тонким пониманием сути рассматриваемых вопросов, известной обычно только узкому кругу специалистов данного направления. В частности, обсуждаются достоинства и недостатки рассматриваемых технических решений, использованы поясняющие числовые примеры.

Издание предназначено для широкого круга читателей, включая радиолюбителей, студентов, преподавателей, разработчиков аппаратуры и проектировщиков. Особый интерес книга представляет для специалистов по системной интеграции услуг связи, предоставляя необходимую справочную информацию для комплексной оценки проектируемых сетей связи.