

**И. П. Стороженко, А. Н. Ярошенко, Ю. В. Аркуша**  
 Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина  
 4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина  
 E-mail: [storozhenko.igor@gmail.com](mailto:storozhenko.igor@gmail.com)

**ДИОДЫ ГАННА НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННЫХ InBN И GaBN**

Использование варизонных полупроводников позволяет увеличить эффективность и выходную мощность диодов Ганна. В соединениях InBN и GaBN, в отличие от других тройных полупроводниковых нитридов, энергетический зазор между долинами можно уменьшить до нуля, что дает возможность найти оптимальное распределение BN-компоненты в варизонных соединениях для диодов Ганна. В статье представлены результаты численных экспериментов по генерации электромагнитных колебаний в диапазоне 0,03...0,7 ТГц с помощью  $n^+-n-n^+$ -диодов Ганна на основе варизонных полупроводниковых соединений InBN и GaBN при различном распределении BN. Показано, что максимальная эффективность и выходная мощность генерации происходит при пиковом содержании BN у катодного контакта 30 % для InBN- и 33 % для GaBN-диодов Ганна при длине варизонного слоя, равной 0,6...0,8 мкм. При оптимальном распределении BN варизонные InBN- и GaBN-диоды Ганна по эффективности генерации и выходной мощности превосходят GaN-, InN-диоды в 1,07÷3,44 раза и варизонные AlGaN- и AlInN-диоды в 0,93÷1,69 раза. Потребляемая мощность варизонных InBN и GaBN диодов на 11–19 % меньше потребляемой мощности InN-, GaN- и AlInN-диодов. Результаты исследования расширяют знания о физических процессах переноса носителей заряда в сложных полупроводниковых структурах и могут быть использованы для технологических разработок новых быстродействующих приборов на основе полупроводниковых нитридов. Ил. 5. Табл. 2. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** диод Ганна, варизонный полупроводник, нитрид галлия, нитрид индия, нитрид бора, междолинный перенос электронов, доменная неустойчивость, терагерцевый диапазон.

Приборы на основе варизонных полупроводников, работающие на эффекте междолинного переноса электронов (МПЭ), имеют более высокие значения эффективности генерации (КПД) и выходной мощности при меньшей потребляемой мощности по сравнению с традиционными диодами Ганна (ДГ) [1]. Это обстоятельство важно для решения проблемы использования полупроводниковых нитридов в приборах, работающих на эффекте МПЭ. К таким материалам относятся GaN, AlN и InN [2]. Экспериментальной СВЧ-генерации на эффекте МПЭ, насколько нам известно, в научных публикациях отмечено не было. Основными проблемами, не позволяющими получить СВЧ-генерацию, являются отвод тепла от активной области прибора [2–4] и эффективный разогрев электронного газа у катодного контакта. Методики, дающие возможность решить эту проблему в ДГ на основе GaAs, выявились малоэффективными для полупроводниковых нитридов. Одним из направлений в области создания ДГ является использование варизонных полупроводниковых соединений, которые позволяют в некоторой степени преодолеть необходимость разогрева электронного газа у катода ДГ.

В публикациях [3, 5, 6] исследована работа диодов Ганна на основе варизонных соединений AlInN, GaInN и AlGaN. Расчеты показывают, что по выходной мощности, эффективности генерации и предельной рабочей частоте (0,9÷1,3 ТГц) при оптимальной длине варизонного слоя такие диоды превосходят InN-, GaN- и AlN-ДГ.

Одним из важных критериев, влияющих на работу варизонных ДГ, является энергетический зазор между  $\Gamma$ -долиной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной  $\Delta_{ij}$  в области катодного

контакта [7]. Например, в варизонном соединении AlN-InN минимальный энергетический зазор ограничен снизу величиной  $\Delta_{\Gamma U} = 0,7$  эВ, соответствующей AlN, а в GaN-InN –  $\Delta_{\Gamma U} = 1,35$  эВ (GaN). В самом InN минимальный энергетический зазор  $\Delta_{\Gamma A} = 1,68$  эВ. Вызывает интерес случай, позволяющий уменьшать энергетический зазор между долинами вплоть до тепловой энергии электронов. Такую возможность дает InBN-InN-переход для InN-диодов и GaBN-GaN для GaN [8]. Следует отметить значительное рассогласование кристаллических решеток в парах BN-InN и BN-GaN, что приводит к дополнительным напряжениям в кристалле [9, 10]. Однако в настоящее время эти соединения являются технологически доступными [9–11].

Цель данной работы – исследовать влияние содержания BN в области катодного контакта на неустойчивость тока и выходные характеристики InN- и GaN-диодов.

**1. Постановка задачи и параметры.** Полупроводники GaN, InN существуют в двух модификациях: вюрцит и цинковая обманка. Рассматривается только модификация вюрцит (гексагональная кристаллическая решетка). В наших расчетах учитывались  $\Gamma$ ,  $A$  и  $U$  энергетические минимумы [1, 8] (табл. 1).

Таблица 1  
 Минимумы зоны проводимости

$\epsilon_{\min}$ , эВ	GaN	InN	BN
$\Gamma$	3,39	2	8,5
$U$	4,74	4,5	6,6
$A$	5,49	3,68	5

Рассматриваются диоды  $n^+-n-n^+$ -структуры на основе тройных варизонных соединений

InN-InBN-InN и GaN-GaBN-GaN. Схема зоны проводимости исследуемого  $n^+ - n - n^+$ -ДГ представлена на рис. 1. Длина активной области диода  $l_a$  равнялась 2,5; 0,8 и 0,4 мкм, концентрация электронов в ней  $3 \cdot 10^{16}$ ,  $8 \cdot 10^{16}$  и  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Температура кристаллической решетки считалась постоянной равной 300 К.

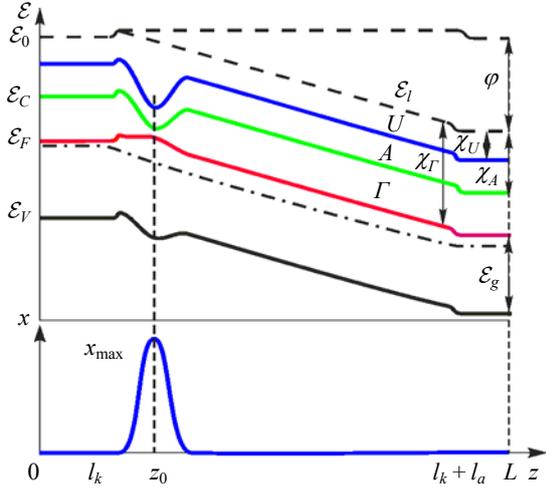


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма и распределение бинарной компоненты  $x$  в варизонном  $\text{In}_{1-x}\text{B}_x\text{N}$ -,  $\text{Ga}_{1-x}\text{B}_x\text{N}$ -ДГ

Схема зоны проводимости и распределение бинарной компоненты  $x$  в варизонном  $\text{In}_{1-x}\text{B}_x\text{N}$ -,  $\text{Ga}_{1-x}\text{B}_x\text{N}$ -ДГ представлены на рис. 1. На схеме обозначено:  $\mathcal{E}_0$  – уровень вакуума при отсутствии внешних сил;  $\mathcal{E}_l$  – уровень вакуума с внешними силами (локальный);  $\mathcal{E}_C$  – дно зоны проводимости (энергетический минимум  $\Gamma$ -долины);  $\mathcal{E}_F$  – энергетический уровень Ферми;  $\mathcal{E}_V$  – потолок валентной зоны;  $\mathcal{E}_g$  – ширина запрещенной зоны;  $\Gamma$  – энергетический минимум  $\Gamma$ -долины;  $U$  – энергетический минимум  $U$ -долины;  $A$  – энергетический минимум  $A$ -долины;  $\chi$  – энергия электронного сродства;  $\varphi$  – потенциал внешних сил;  $z$  – координата;  $l_k$  – длина катода;  $l_a$  – длина активной зоны.

Процентное содержание BN в  $\text{In}_{1-x(z)}\text{B}_x(z)\text{N}$  и  $\text{Ga}_{1-x(z)}\text{B}_x(z)\text{N}$  задается распределением Гаусса

$$x(z) = x_{\max} \exp\left\{-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (1)$$

где  $x_{\max}$  – максимум содержания BN в тройных соединениях (рис. 1),  $\sigma$  – длина переходного (варизонного) слоя между разными полупроводниками;  $z_0$  – координата, определяющая местоположение переходных слоев в диоде (в данном случае граница катодного контакта);  $z$  – пространственная координата.

Необходимо с помощью численных экспериментов получить оптимизированные по напря-

жению питания зависимости эффективности СВЧ-генерации от частоты для разных значений длин активной области и варизонного слоя, а также оптимальное распределение бинарной компоненты BN в диодах.

**2. Методика исследования.** Исследования проводились с помощью трехуровневой модели МПЭ в варизонных полупроводниках, основанной на решении кинетического уравнения Больцмана для случая, смещенного максвелловского распределения электронов [5]. Модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений непрерывности (1), плотности тока (2) и баланса энергии для каждой из  $\Gamma$ ,  $U$  и  $A$  неэквивалентных долин зоны проводимости полупроводника (3), а также уравнения Пуассона (4):

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial j_i}{\partial z} - \frac{n_i}{\tau_{n,ij}} - \frac{n_i}{\tau_{n,i\kappa}} + \frac{n_j}{\tau'_{n,ji}} + \frac{n_\kappa}{\tau'_{n,\kappa i}}; \quad (2)$$

$$j_i = n_i \mu_i \left( eE + \frac{\partial \chi_i}{\partial z} \right) + \kappa_b \mu_i \left( \frac{3n_i T_i}{2m_i} \frac{\partial m_i}{\partial z} - \frac{\partial(n_i T_i)}{\partial z} \right); \quad (3)$$

$$\frac{3}{2} \kappa_b \frac{\partial n_i T_i}{\partial t} = j_i E + \frac{j_i}{e} \frac{\partial \chi_i}{\partial z} - \frac{5}{2} \kappa_b \frac{1}{e} \frac{\partial(j_i T_i)}{\partial z} - \frac{3}{2} \kappa_b \left( \frac{n_j T_j}{\tau'_{\varepsilon,ji}} + \frac{n_\kappa T_\kappa}{\tau'_{\varepsilon,\kappa i}} - \frac{n_i T_i}{\tau_{\varepsilon,i}} \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial z} = 4\pi e(n_i + n_j + n_\kappa - n_0), \quad (5)$$

где индексы  $i, j$  и  $\kappa$  определяют три неэквивалентные долины. Уравнения (1)–(3) записаны для  $i$ -долины. Здесь  $n_i$ ,  $\mu_i$ ,  $m_i$ ,  $J_i$ ,  $T_i$  соответственно концентрация, подвижность, эффективная масса, плотность тока и температура электронов в  $i$ -долине;  $\tau_{n,ij}$ ,  $\tau_{\varepsilon,ij}$  – время релаксации концентрации и энергии электронов при междолинном переходе из  $i$ - в  $j$ -долину;  $\tau_{\varepsilon,i}$  – время релаксации энергии электронов в  $i$ -долине;  $\chi_i$  – энергия, необходимая для перевода электронов с энергетического минимума  $i$ -й долины до локального уровня вакуума;  $E$  – напряженность электрического поля;  $n_0$  – концентрация ионизированных доноров;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $e$  – модуль заряда электрона;  $\kappa_b$  – постоянная Больцмана;  $t$  – время;  $z$  – координата. Средняя плотность тока в диоде определяется как сумма средних в трех долинах. Система уравнений (2)–(5) решалась численным методом (встречная прогонка). Моделируется ситуация, когда на диод прикладывается синусоидальное напряжение с постоянной составляющей, что соответствует помещению диода в одноконтурный резонатор. Выходные характеристики оптимизировались для разных частот по напряжению смещения и амплитуде первой гармоники. Вычисления эффективности генерации диодов проводились для второго и третьего периодов колебаний.

**3. Энергетические и частотные характеристики.** Важной особенностью ДГ на основе варизонных полупроводников является зависимость выходных характеристик от длины варизонного слоя  $\sigma$ . Возникновение колебаний тока в InN и GaN-ДГ  $n^+-n-n^+$ -структуры с активной областью микронных размеров связано с формированием и дрейфом обогащенных слоев [2]. Выходная мощность и эффективность работы приборов с доменной неустойчивостью, как правило, выше. Для ее реализации необходимо у катодного контакта сформировать область локального уменьшения энергетического зазора между долинами [5, 7]. В варизонных InBN-ДГ с таким же профилем легирования даже при незначительном содержании BN ( $x_{\max}$ ) в окрестности катода в активной области возникают дрейфующие домены, а при  $x_{\max} > 0,32$  формируется статический домен.

Причиной доменной неустойчивости является высокая концентрация электронов в боковых долинах в области катода. Это происходит благодаря уменьшению энергетического зазора между долинами в локальной области у катодного контакта. При увеличении содержания BN энергетический зазор между Г-долиной и боковыми долинами уменьшается, а концентрация электронов в боковых долинах у катода растет. Это в свою очередь приводит к перераспределению электронов в варизонной области и появлению электрического домена. Если к диоду приложить прямое напряжение, то домен начнет расти и смещаться к аноду, т. е. дрейфовать. Когда энергетический зазор между долинами меньше тепловой энергии электронов, то домен является статичным. Границы между режимами являются несколько условными, поскольку на границах режимов нельзя однозначно классифицировать возникающую неустойчивость заряда [8].

Диоды на основе варизонного GaBN не имеют каких-либо отличительных особенностей при формировании и дрейфе неустойчивостей заряда по сравнению с InBN приборами.

Доменный тип неустойчивости в InBN и GaBN определяет более высокие значения эффективности генерации и выходной мощности по сравнению с однотипными  $n^+-n-n^+$ -приборами на основе InN и GaN (рис. 2 и 3). При увеличении содержания BN пиковые значения эффективности генерации и выходной мощности возрастают благодаря оптимизации формирования и дрейфа доменов (рис. 4). Это увеличение приводит к уменьшению оптимальной частоты генерации. Например, при изменении  $x_{\max}$  от 0 до 0,30 в InBN-ДГ оптимальная частота уменьшается с 90 до 70 ГГц и в GaBN-ДГ с 70 до 60 ГГц.

Для всех типов ДГ максимальная эффективность генерации падает при уменьшении дли-

ны активной области, однако существенное снижение КПД происходит, когда  $l_a$  становится меньше 0,8 мкм (рис. 2 и 3).

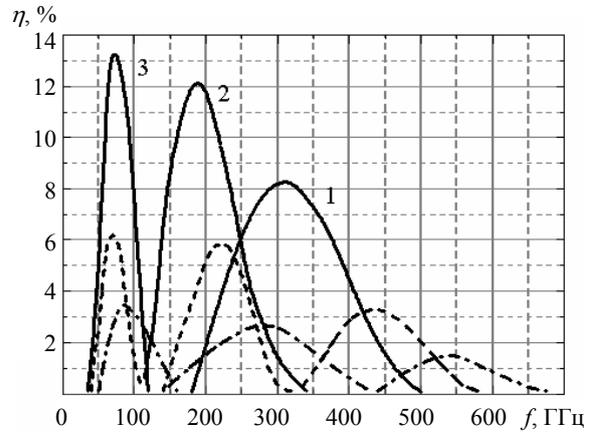


Рис. 2. Зависимость эффективности генерации от частоты при разной длине активной области ДГ: 1 – 0,4; 2 – 0,8; 3 – 2,5 мкм. Непрерывные линии – InBN-ДГ, пунктирные – AlInN-ДГ и штрихпунктирные InN-ДГ

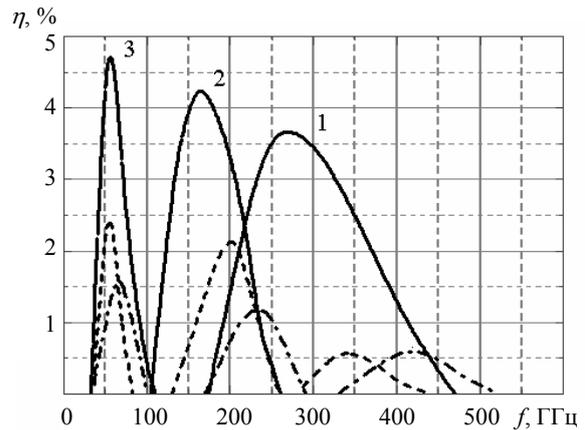


Рис. 3. Зависимость эффективности генерации от частоты при разной длине активной области ДГ: 1 – 0,4; 2 – 0,8; 3 – 2,5 мкм. Непрерывные линии – GaBN-ДГ, пунктирные – AlGaIn-ДГ и штрихпунктирные GaN-ДГ

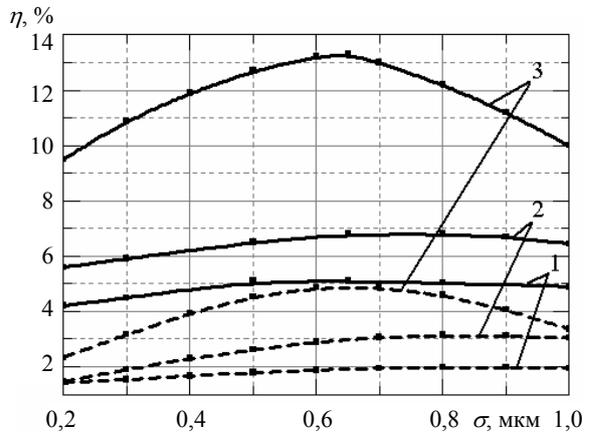


Рис. 4. Зависимость пиковых значений эффективности генерации от длины варизонного слоя в ДГ при  $l_a = 2,5 \text{ мкм}$  и разных значениях  $x_{\max}$ : 1 – 0,10; 2 – 0,20; 3 – 0,30. Непрерывные линии – InBN-ДГ, пунктирные – GaBN-ДГ

Пиковые значения КПД однотипных приборов длиной 0,8 и 2,5 мкм практически одинаковые. Это связано с хорошими инерционными свойствами InN и GaN.

Наибольшие пиковые значения эффективности диодов с  $l_a$ , равной 2,5 и 0,8 мкм, имеет InBN-ДГ. Например, при  $l_a = 2,5$  мкм в InBN-ДГ КПД составляет 13,2 %, а для GaBN – 4,9 %. Предельная граничная частота InBN-ДГ составляет 0,5 ТГц, а GaBN-ДГ – 0,47 ТГц.

Сравнительный анализ выходных характеристик (рис. 2, 3 и табл. 2) показывает, что исследуемые GaBN- и InBN-ДГ превосходят однотипные приборы на основе GaN и InN в зависимости от длины активной области по КПД в 3,06÷3,78 раза, AlGaIn- и AlInN-ДГ в 2÷2,07 раза. Потребляемая мощность InBN- и GaBN-ДГ на 11–19 % меньше, чем у InN, GaN, AlInN-ДГ.

Таблица 2

Пиковые значения эффективности генерации и соответствующие им частоты диодов на основе разных соединений

Длина активной области, мкм					
2,5		0,8		0,4	
$W$	$f$	$W$	$f$	$W$	$f$
Вт·см <sup>-2</sup>	ГГц	Вт·см <sup>-2</sup>	ГГц	Вт·см <sup>-2</sup>	ГГц
InBN					
14,1·10 <sup>5</sup>	70	12,2·10 <sup>5</sup>	180	3,2·10 <sup>5</sup>	320
GaBN					
4,5·10 <sup>5</sup>	60	3,9·10 <sup>5</sup>	160	2,8·10 <sup>5</sup>	280
AlInN					
8,3·10 <sup>5</sup>	70	6,3·10 <sup>5</sup>	220	2,0·10 <sup>5</sup>	440
GaInN					
5,6·10 <sup>5</sup>	92	4,3·10 <sup>5</sup>	274	2,4·10 <sup>5</sup>	520
AlGaIn					
4,8·10 <sup>5</sup>	55	3,6·10 <sup>5</sup>	200	1,8·10 <sup>5</sup>	340
GaN					
4,2·10 <sup>5</sup>	66	2,8·10 <sup>5</sup>	230	1,3·10 <sup>5</sup>	420
InN					
4,1·10 <sup>5</sup>	85	4,6·10 <sup>5</sup>	278	1,4·10 <sup>5</sup>	540

Оптимальное значение длины переходных слоев полупроводников  $\sigma$  слабо зависит от максимума содержания BN в соединениях  $x_{\max}$  (рис. 4). В InBN-ДГ ( $l_a = 2,5$  мкм) при увеличении  $x_{\max}$  от 0,1 до 0,3 оптимум  $\sigma$  уменьшается с 0,72 до 0,65 мкм. В GaBN-ДГ ( $l_a = 2,5$  мкм) при таком же увеличении  $x_{\max}$  оптимум  $\sigma$  уменьшается с 0,81 до 0,65 мкм.

Отметим, что для InBN- и GaBN-ДГ оптимальное содержание BN также слабо зависит от длины переходных слоев полупроводников  $\sigma$  (рис. 5, 6). Например, оптимальное значение  $x_{\max}$  в InBN-ДГ при увеличении  $\sigma$  от 0,2 до 1,0 мкм уменьшается всего с 0,31 до 0,30. Если  $x_{\max}$  становится больше оптимального значения, то КПД стремительно уменьшается, достигая 0 при  $x_{\max} = 0,33$ . Прекращение СВЧ-генерации связано

с формированием статических доменов. В GaBN-ДГ статические домены формируются при немного большем содержании BN –  $x_{\max} = 0,35$ .

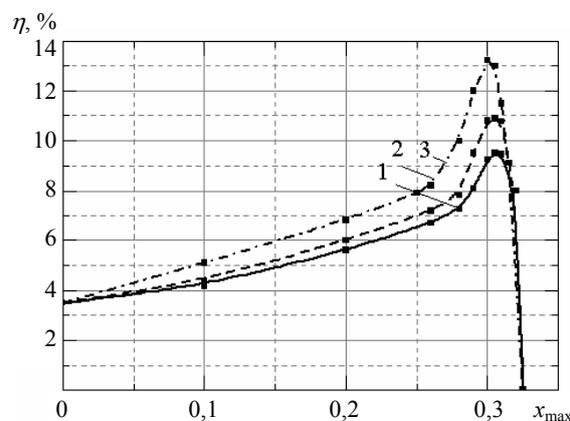


Рис. 5. Зависимость пиковых значений эффективности генерации от максимального содержания BN в InBN-ДГ при  $l_a = 2,5$  мкм и разной длине  $\sigma$ : 1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,65 мкм

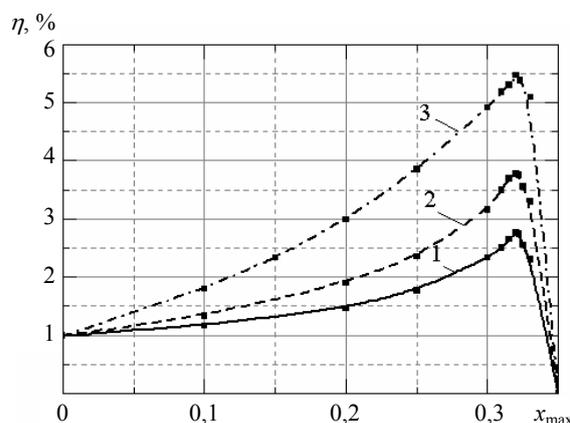


Рис. 6. Зависимость пиковых значений эффективности генерации от максимального содержания BN в GaBN-ДГ при  $l_a = 2,5$  мкм и разной длине  $\sigma$ : 1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,65 мкм

При уменьшении длины активной области  $l_a$  оптимум максимального содержания BN остается приблизительно постоянным, а оптимальная длина варизонного слоя  $\sigma$  уменьшится (для  $l_a$  равной 2,5, 0,8 и 0,4 мкм оптимум  $\sigma$  соответственно составляет 0,65, 0,30 и 0,15 мкм)

Существенного уменьшения потребляемой мощности добиться не удалось. Например, для оптимального режима ( $l_a = 2,5$  мкм) потребляемая мощность InBN-ДГ –  $1,06 \cdot 10^6$  Вт·см<sup>-2</sup>, GaBN-ДГ –  $0,91 \cdot 10^6$  Вт·см<sup>-2</sup>, InN-ДГ –  $1,18 \cdot 10^6$  Вт·см<sup>-2</sup>, AlInN-ДГ –  $1,30 \cdot 10^6$  Вт·см<sup>-2</sup>, AlGaIn-ДГ –  $1,31 \cdot 10^6$  Вт·см<sup>-2</sup>.

**Выводы.** Таким образом, в варизонных InBN- и GaBN-диодах Ганна в зависимости от содержания BN могут формироваться обогащенные слои, движущиеся и статические домены.

Оптимальное содержание BN  $x_{\max}$  в InBN-ДГ составляет 0,3, и оно постоянно при длине варизонного слоя 0,65 мкм ( $l_a = 2,5$  мкм), 0,3 мкм ( $l_a = 0,8$  мкм), 0,15 мкм ( $l_a = 0,4$  мкм). В GaBN –

$x_{\max}$  составляет 0,33, и оно также постоянно при длине варизонного слоя 0,65 мкм ( $l_a = 2,5$  мкм), 0,3 мкм ( $l_a = 0,8$  мкм), 0,10 мкм ( $l_a = 0,4$  мкм). При уменьшении длины активной области уменьшается эффективность генерации, а частотный диапазон работы ДГ увеличивается.

При оптимальном распределении BN варизонные GaBN- и InBN-ДГ превосходят по КПД и выходной мощности однотипный GaN-, InN-ДГ в 1,07÷3,44 раза и варизонный AlGaN-, AlInN-ДГ в 0,93÷1,69 раза.

Потребляемая мощность варизонных InBN- и GaBN-ДГ незначительно меньше, чем у InN-, GaN-ДГ и варизонных AlInN-, AlGaN-ДГ.

Преимущество варизонных InBN- и GaBN-ДГ перед аналогичными AlInN- и AlGaN-ДГ обеспечивается возможностью реализовать оптимальный энергетический зазор между неэквивалентными долинами в области катода в случае InBN- и GaBN-ДГ.

#### Библиографический список

1. *Storozhenko I. P.* Influence of the Variband-layer thickness on the energy and frequency characteristics of  $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$  Gunn diodes / I. P. Storozhenko, Yu. V. Arkusha, E. D. Prokhorov // *J. of Communications Technology and Electronics*. – 2006. – 51, N 3. – P. 352–358.
2. *Стороженко И. П.* Перспективы использования диодов Ганна на основе GaN, AlN и InN / И. П. Стороженко, Ю. В. Аркуша // *Радиофизика и электрон.* – 2011. – 2(16), № 1. – С. 58–63.
3. *Temperature effect on the submicron AlGaIn/GaN Gunn diodes for terahertz frequency / Lin'an Yang, Wei Mao, Qingyang Yao, Qi Liu et al.* // *J. of Appl. Phys.* – 2011. – 109, iss. 2. – P. 109–114 (024503).
4. *First Observation of Bias Oscillations in GaN Gunn Diodes on GaN Substrate / O. Yilmazoglu, K. Mutamba, D. Pavlidis, T. Karaduman* // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2008. – 55, iss. 7. – P. 1563–1567.
5. *Storozhenko I. P.* Graded-gap AlInN Gunn Diodes / I. P. Storozhenko, A. N. Yaroshenko, M. V. Kaydash // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2012. – 15, N 2. – P. 176–180.
6. *Оценка энергетических характеристик варизонных GaInN диодов Ганна с омическими контактами / И. П. Стороженко, М. В. Кайдаш, А. Н. Ярошенко, Ю. В. Аркуша* // *Вісн. Харків. нац. ун-ту. Сер. Радиофізика та електрон.* – 2012. – № 1010, вип. 20. – С. 39–43.
7. *Стороженко И. П.* Особенности возникновения и дрейфа волн объемного заряда в приборах с междолинным переносом электронов на основе варизонного  $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$  / И. П. Стороженко // *Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* – X., 2007. – 12, № 1. – С. 243–249.
8. *Варизонные GaBN и InBN диоды Ганна / И. П. Стороженко, А. Н. Ярошенко, В. И. Магда, Ю. В. Аркуша* // *Вісн. Харків. нац. ун-ту. Сер. Радиофізика та електрон.* – 2012. – № 1010, вип. 20. – С. 44–47.
9. *Electronic Structure and Related Properties of Tetrahedrally Bonded Wide-Band-Gap Materials Containing Early Elements of the Periodic Table / W. R. L. Lambrecht, C. H. Lee, K. Kim et al.* // *Wide Band Gap Electronic Materials. NATO ASI Series*. – 1995. – Vol. 1. – P. 335–372.
10. *Desrosiers* Growth of GaBN ternary solutions by organometallic vapor phase epitaxy / A. Y. Polyakov, M. Shin, M. Skowronsk et al. // *J. of Electronic Materials*. – 1997. – 26, iss. 3. – P. 237–242.

11. *Effective mass properties of  $\text{Al}_{1-x}\text{B}_x\text{N}$  ordered alloys: a first-principles study / R. de Paiva, R. A. Nogueira, S. Azevedo, J. R. Kaschny* // *Appl. Phys. A*. – 2009. – 95, iss. 3. – P. 655–659.

Рукопись поступила 15.01.2014.

I. P. Storozhenko, A. N. Yaroshenko, Yu. V. Arkusha

#### INBN AND GaBN GRADED GAP GUNN DIODES

Graded-gap semiconductors can increase the efficiency and output power of Gunn generators. In InBN and GaBN compounds, unlike other ternary semiconductor nitrides, the energy gap between the valleys can be reduced to zero, which gives the opportunity to find the optimal distribution of the BN component in graded gap compounds for Gunn diodes. The paper presents the results of numerical experiments on the oscillation generation in the range of 0.03...0.7 THz using the  $n^+-n-n^+$  Gunn diodes based on InBN and GaBN graded gap semiconductor compounds at different BN distribution. It is shown that the maximum efficiency and output power of generation occur at the maximal BN content near the cathode contact and a length of graded-gap layer of 0.6...0.8  $\mu\text{m}$ . At optimal BN distribution graded-gap semiconductor InBN- and GaBN-Gunn diodes for efficiency and output power exceed GaN-, InN-diodes in 1.07÷3.44 times and AlGaN- and AlInN-diodes in 0.93÷1.69 times. Power consumption of graded-gap InBN- and GaBN-diodes is 11–19 % less than the power consumption of InN-, GaN- and AlInN-diodes. Findings of study extend the knowledge about the physical processes of carrier transfer in complex semiconductor structures and can be used for technological designing of new high-speed devices based on semiconductor nitrides.

**Key words:** Gunn diode, graded-gap semiconductor, gallium nitride, indium nitride, boron nitride, intervalley electron transfer, domain instability, terahertz range.

I. П. Стороженко, О. М. Ярошенко, Ю. В. Аркуша

#### ДІОДИ ГАННА НА ОСНОВІ ВАРИЗОННИХ InBN I GaBN

Використання варизонних напівпровідників дозволяє збільшити ефективність і вихідну потужність діодів Ганна. У сполуках InBN і GaBN, на відміну від інших потрійних напівпровідникових нітридів, енергетичний зазор між долинами можна зменшити до нуля, що дає можливість знайти оптимальний розподіл BN-компоненти у варизонних сполуках для діодів Ганна. У статті наведено результати числових експериментів з генерації електромагнітних коливань у діапазоні 0,03...0,7 ТГц за допомогою  $n^+-n-n^+$ -діодів Ганна на основі варизонних напівпровідникових сполук InBN і GaBN при різному розподілі BN. Показано, що максимальна ефективність і вихідна потужність генерації відбувається при піковому вмісті BN у катодного контакту 30 % для InBN- і 33 % для GaBN-діодів Ганна при довжині варизонного шару, який дорівнює 0,6...0,8 мкм. При оптимальному розподілі BN варизонні InBN- і GaBN-діоди Ганна по ефективності генерації і вихідній потужності перевищують GaN-, InN-діоди в 1,07÷3,44 рази і варизонних AlGaN- і AlInN- діоди в 0,93÷1,69 рази. Споживна потужність варизонних InBN- і GaBN-діодів на 11–19 % менше споживної потужності InN-, GaN- і AlInN-діодів. Результати дослідження розширюють знання про фізичні процеси переносу носіїв заряду в складних напівпровідникових структурах і можуть бути використані для технологічних розробок нових швидкодіючих приладів на основі напівпровідникових нітридів.

**Ключові слова:** діод Ганна, варизонний напівпровідник, нітрид галію, нітрид індію, нітрид бору, міждолинний перенос електронів, доменна нестійкість, терагерцовий діапазон.