

**И. П. Стороженко**

*Национальный фармацевтический университет*

*53, ул. Пушкинская, Харьков, 61002, Украина*

E-mail: [storozhenko\\_igor@mail.ru](mailto:storozhenko_igor@mail.ru)

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ ДИОДОВ ГАННА НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НИТРИДОВ

Изучен дрейф доменов и колебания тока в приборах на основе варизонных полупроводниковых нитридов InGaN, AlGaN, AlInN, InBN, GaBN и AlBN. Показано, что применение варизонных полупроводников позволяет увеличить ширину рабочего диапазона частот диодов Ганна. Проведен обзор варизонных полупроводников  $A_3B_5$  с подобным эффектом. Ил. 3. Табл. 1. Библиогр: 7 назв.

**Ключевые слова:** диод Ганна, варизонный полупроводник, полупроводниковый нитрид, междолинный перенос, резонансная частота.

Полупроводниковые генераторы миллиметрового диапазона с электронной перестройкой частоты востребованы во многих областях. Для таких генераторов, помимо электронного управления резонансной частотой колебательного контура, необходимы активные элементы с широким диапазоном перестройки частоты. Одним из методов увеличения ширины рабочего диапазона частот диодов Ганна (ДГ) является использование варизонных полупроводников [1, 2]. Следует отметить, что варизонные полупроводники в современных ДГ применяются довольно редко с целью уменьшения длины «холодной зоны» и повышения выходной мощности и КПД [3]. Эффект увеличения ширины частотного диапазона работы ДГ на основе варизонных полупроводников, отмеченный в работах [1, 2], остается слабо изученной областью приборов с междолинным переносом электронов (МПЭ).

В работах [2, 4] показано, что увеличение ширины рабочего диапазона частот ДГ на основе варизонных полупроводников имеет место, если энергетический зазор  $\Delta(z)$  между  $\Gamma$ -долиной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной является возрастающей функцией координаты. В таких приборах длина области дрейфа доменов зависит от приложенного к диоду напряжения, что определяет резонансную частоту. При повышении напряжения растет длина области дрейфа доменов и падает частота, генерируемых колебаний тока. Обзор некоторых тройных варизонных полупроводников  $A_3B_5$ , применимых в ДГ для расширения их частотного диапазона, представлен в публикациях [4, 5]. Условия возникновения собственных колебаний тока в ДГ на основе варизонных полупроводников AlGaAs, GaPAs и GaSbAs изучены в [4], а на основе варизонных InGaP, InAlAs, InGaSb, InGaAs и InPAs в [5].

Цель данного исследования состоит в выявлении особенностей возникновения колебаний тока в ДГ на основе варизонных полупровод-

никовых нитридов  $Al_{1-x(z)}In_x(z)N$ ,  $Ga_{1-x(z)}In_x(z)N$ ,  $Al_{1-x(z)}Ga_x(z)N$ ,  $B_{1-x(z)}Al_x(z)N$ ,  $B_{1-x(z)}In_x(z)N$  и  $B_{1-x(z)}Ga_x(z)N$ .

**1. Методика, параметры и постановка задачи.** Исследования проводились с помощью трехуровневой модели МПЭ в варизонных полупроводниках, основанной на решении кинетического уравнения Больцмана для случая смещенного максвелловского распределения электронов [6]. Данная модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений непрерывности (1), плотности тока (2) и баланса энергии для каждой из трех неэквивалентных долин  $\Gamma$ ,  $U$  и  $A$  зоны проводимости полупроводника (гексагональная кристаллическая решетка [7]), а также уравнения Пуассона (4):

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

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

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

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

где индексы  $i$ ,  $j$  и  $k$  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;  $\tau_{n,ij}$ ,  $\tau_{E,ij}$  – время релаксации концентрации и энергии электронов при междолинном пе-

переходе из  $i$ - в  $j$ -долину;  $\tau_{E,i}$  – 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;  $k_b$  – постоянная Больцмана;  $t$  – время;  $z$  – координата. Средняя плотность тока в диоде определяется как сумма средних в трех долинах. Система уравнений (1)–(4) решалась численными методами.

Изучаются  $n^+n^-n^+$ -ДГ при постоянной температуре кристаллической решетки, равной 300 К. Концентрация ионизированных доноров в  $n^+$ -области составляет  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  и в  $n^-$ -области  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Следует отметить, что концентрация электронов в активной области рассматриваемых в данной работе диодов в 3 раза больше, чем в публикациях [4, 5]. Это связано с тем, что критерий неустойчивости Крамера в полупроводниковых нитридах выше, чем в таких полупроводниках, как GaAs и InP [7]. Длина активной области  $l_a$  равнялась 2,5 и 5,0 мкм. Изменение процентного содержания бинарных компонент в тройных соединениях задается зависимостью

$$x(z) = (x_1 - x_2) \left[ 1 + \exp\left(\frac{4(z - z_0)}{l_v}\right) \right]^{-1} + x_2, \quad (5)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – предельное содержание бинарной компоненты в тройных соединениях в  $-\infty$  и  $+\infty$ , соответственно;  $l_v$  – длина варизонного слоя ( $l_v = |x_2 - x_1| / x'(z_0)$ );  $z$  – пространственная координата;  $z_0$  – центр симметрии варизонного слоя, для которой  $x(z_0) = 0,5(x_2 + x_1)$ . Для всех случаев центр симметрии располагался на расстоянии 1,2 мкм от катода.

В соответствии с результатами работ [2, 4] изучалась работа ДГ только на основе соединений, у которых  $\Delta(z)$  является возрастающей функцией, а именно AlN–InN, AlN–GaN, GaN–InN, In<sub>0,7</sub>B<sub>0,3</sub>N–InN, Ga<sub>0,66</sub>B<sub>0,34</sub>N–GaN и Al<sub>0,8</sub>B<sub>0,2</sub>N–AlN (или Al<sub>0,8→1</sub>B<sub>0,2→0</sub>N). Предельное значение  $x$  в В<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N, В<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N и В<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>N определялось минимально возможным для МПЭ значением  $\Delta \approx 0,1 \div 0,15$  эВ.

Свободными параметрами являются:

- длина варизонного слоя  $l_v$ ;
- длина активной области диода  $l_a$ ;
- приложенное к диоду напряжение  $U$ .

Определяется, каким образом частота генерируемых колебаний тока  $f$  в диоде на основе разных варизонных полупроводников зависит от названных свободных параметров.

**2. Зависимость резонансной частоты от приложенного к диоду напряжения и протяженности варизонного слоя.** В ДГ на основе

полупроводниковых нитридов зависимость частоты собственных колебаний тока  $f$  от напряжения  $U$  является убывающей функцией (рис. 1).

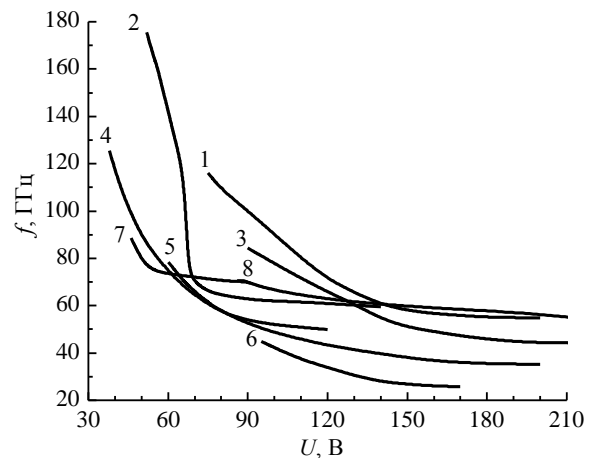


Рис. 1. Резонансная частота ДГ при  $l_a = 5$  мкм на основе разных соединений и разной длине варизонного слоя  $l_v$ : 1 – AlN–InN ( $l_v = 2,5$  мкм); 2 – GaN–InN ( $l_v = 1,5$  мкм); 3 – AlN–GaN ( $l_v = 1,5$  мкм); 4 – In<sub>0,7</sub>B<sub>0,3</sub>N–InN ( $l_v = 5$  мкм); 5 – Ga<sub>0,66</sub>B<sub>0,34</sub>N–GaN ( $l_v = 5$  мкм); 6 – Al<sub>0,8</sub>B<sub>0,2</sub>N–AlN ( $l_v = 5$  мкм); 7 – InN; 8 – GaN

На характер зависимости  $f(U)$  не влияет, какой полупроводник используется: варизонный или пространственно однородный. Это является отличительной чертой полупроводниковых нитридов. Во всех исследованных ранее в работах [4, 5] ДГ на основе пространственно однородных полупроводников  $f(U)$  – возрастающая, ограниченная сверху функция. Причины этого различия не исследовались. Возможно, это связано с хорошими инерционными свойствами полупроводниковых нитридов, большими значениями рабочих напряжений или проникновением доменов в область анода. Вместе с тем варизонные ДГ имеют диапазон резонансных частот больший, чем ДГ на основе однородных полупроводников. Например, при увеличении  $U$  резонансная частота ДГ с  $l_a = 5$  мкм на основе InN уменьшается на 20,2 %, In<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>N – на 26,2 %, а варизонного GaN–InN – на 65,1 %. В варизонных приборах при увеличении приложенного к ним напряжения  $f$  убывает из-за возрастания длины пролетной области. При напряжении, когда домены начинают достигать анодного контакта, зависимость  $f(U)$  насыщается (см. рис. 1).

На зависимость  $f(U)$  варизонных приборов влияет длина варизонного слоя  $l_v$ . Нижняя граница резонансной частоты  $f_{\min}$  слабо зависит от  $l_v$ . При ее уменьшении  $f_{\min}$  изменяется не более чем на 1÷2 ГГц (таблица) Верхняя граница резонансной частоты  $f_{\max}$  при изменении  $l_v$  проходит через максимум. Ширина частотного диапазона  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  и  $f_{\max}$  достигают своих наибольших значений при приблизительно одинаковой оптимальной длине варизонного слоя (рис. 2, 3).

Максимальные и минимальные значения резонансной частоты диодов Ганна и соответствующие им напряжения

Материал	$l_a = 2,5 \text{ мкм}$					$l_a = 5 \text{ мкм}$				
	$l_v$ , мкм	$f_{\max}$	$f_{\min}$	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$l_v$ , мкм	$f_{\max}$	$f_{\min}$	$U_{\max}$	$U_{\min}$
		ГГц		В			ГГц		В	
GaN-InN	0,3	179	88	36	140	0,8	172	59,7	52	80
AlN-InN	2,2	131	72	54	200	2,5	117	55,5	75	200
AlN-GaN	0,3	93	55	64	260	1,1	84,4	43,5	90	220
In <sub>0,7</sub> →1B <sub>0,3</sub> →0N	4,8	142	82	22	70	6,0	127	49	38	120
Ga <sub>0,66</sub> →1B <sub>0,34</sub> →0N	4,3	92	61	33	110	6,0	79	35,2	60	190
Al <sub>0,8</sub> →1B <sub>0,2</sub> →0N	3,5	57	34	46	120	5,0	46	25,8	95	170
InN	–	164	120	26	110	–	89	71	46	70
Ga <sub>0,5</sub> In <sub>0,5</sub> N	–	149	88	44	140	–	84	62,3	72	180
GaN	–	112	80	160	70	–	70,7	56	88	220
Ga <sub>0,5</sub> Al <sub>0,5</sub> N	–	87	57	70	260	–	49,9	23	110	220
Al <sub>0,5</sub> In <sub>0,5</sub> N	–	120	75	65	210	–	65	52,4	100	210
AlN	–	68	44	280	80	–	39,9	34,2	130	200
In <sub>0,85</sub> B <sub>0,15</sub> N	–	107	70	26	87	–	57,6	51,2	46	70
Ga <sub>0,83</sub> B <sub>0,17</sub> N	–	77	55	40	100	–	43,83	37,4	66	100
Al <sub>0,9</sub> B <sub>0,1</sub> N	–	49	41	55	110	–	26,5	23,1	100	160
Al <sub>0,3</sub> →0Ga <sub>0,7</sub> →1As [4]	1,8	50,1	34,50	0,7	2,4	2,2	43	25	1,1	5,0
GaP <sub>0,4</sub> →0As <sub>0,6</sub> →1 [4]	1,8	47,35	29,82	0,7	3,0	2,4	35,83	20	1,1	5,0
GaSb <sub>0,05</sub> →0As <sub>0,95</sub> →1 [4]	1,8	47,34	31	0,7	3,0	1,5	37,43	23,45	1,1	4,0
In <sub>0,38</sub> →0,45Al <sub>0,62</sub> →0,55As [5]	0,9	44,8	37,2	1,6	4,0	1,2	40,5	18,2	3,0	8,0
In <sub>0,48</sub> →1Ga <sub>0,52</sub> →0P [5]	1,5	50	41,4	1,1	5,0	3,6	36,5	26,5	1,6	8,0
In <sub>0,1</sub> →0,33Ga <sub>0,9</sub> →0,67Sb [5]	0,6	35	31	0,23	0,26	0,6	32,4	12,7	0,44	0,6

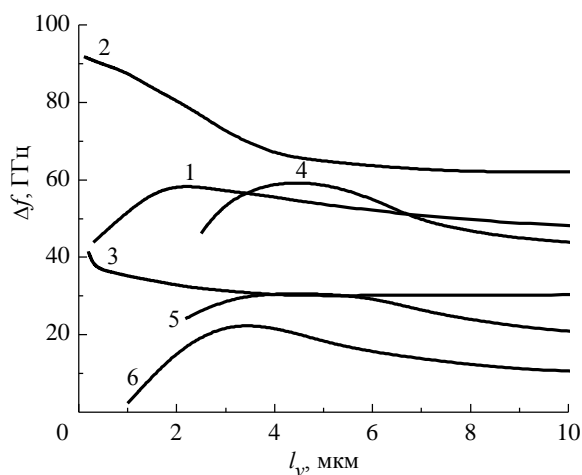


Рис. 2. Зависимость ширины частотного диапазона от длины варизонного слоя ДГ при  $l_a = 2,5 \text{ мкм}$  на основе разных варизонных соединений: 1 – AlN-InN; 2 – GaN-InN; 3 – AlN-GaN; 4 – In<sub>0,7</sub>B<sub>0,3</sub>N-InN; 5 – Ga<sub>0,66</sub>B<sub>0,34</sub>N-GaN; 6 – Al<sub>0,8</sub>B<sub>0,2</sub>N-AlN

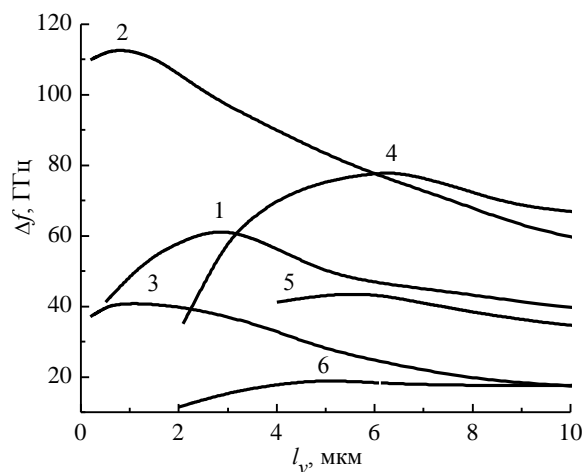


Рис. 3. Зависимость ширины частотного диапазона от длины варизонного слоя ДГ при  $l_a = 5 \text{ мкм}$  на основе разных варизонных соединений: 1 – AlN-InN; 2 – GaN-InN; 3 – AlN-GaN; 4 – In<sub>0,7</sub>B<sub>0,3</sub>N-InN; 5 – Ga<sub>0,66</sub>B<sub>0,34</sub>N-GaN; 6 – Al<sub>0,8</sub>B<sub>0,2</sub>N-AlN

Причины такого поведения верхней и нижней границ резонансной частоты от длины варизонного слоя раскрыты в публикации [4]. Следует обратить внимание на ДГ на основе BAlN, BInN и BGaN, у которых оптимальное значение  $l_v$  в несколько раз больше, чем в ДГ на основе InGaN, AlGaN, AlInN. Это связано с тем, что

в BAlN-, BInN- и BGaN-ДГ при выбранных значениях содержания BN и малых значениях  $l_v$  формируются статические домены, что приводит к отсутствию колебаний тока.

Нижняя частотная граница генерации определяется длиной активной области и свойствами материала. При уменьшении длины ак-

тивной области нижняя граница резонансной частоты ДГ возрастает (рис. 2, 3, таблица). Верхняя граница зависит от длины активной области в меньшей степени, чем нижняя. Поэтому  $\Delta f$  в ДГ с  $l_a = 5$  мкм немного больше, чем с  $l_a = 2,5$  мкм.

В соответствии с полученными данными ширина частотного диапазона ДГ на основе рассмотренных соединений уменьшается в ряду соединений GaN–InN,  $\text{In}_{0,7}\text{B}_{0,3}\text{N}$ –InN, AlN–InN, AlN–GaN,  $\text{Ga}_{0,66}\text{B}_{0,34}\text{N}$ –GaN и  $\text{Al}_{0,8}\text{B}_{0,2}\text{N}$ –AlN от 112 до 20 ГГц. Максимальное значение  $\Delta f = 112$  ГГц имеет GaN–InN–ДГ при  $l_a = 5$  мкм и  $l_v = 0,8$  мкм. Наибольшее значение верхней границы резонансной частоты  $f_{\max}$  также принадлежит GaN–InN–ДГ (таблица).

Среди варизонных полупроводниковых арсенидов, фосфидов и антимонидов, рассмотренных в публикациях [4, 5], наибольший частотный интервал 18,2...40,5 ГГц имеет  $\text{In}_{0,38\rightarrow 0,45}\text{Al}_{0,62\rightarrow 0,55}\text{As}$ -ДГ при  $l_v = 1,2$  мкм и  $l_a = 5$  мкм. Верхняя граница частотного диапазона для разных полупроводников при оптимальной длине варизонного слоя и  $l_a = 5$  мкм находится в интервале от 32 ГГц в  $\text{In}_{0,1\rightarrow 0,33}\text{Ga}_{0,9\rightarrow 0,67}\text{Sb}$ -ДГ до 43 ГГц в  $\text{Al}_{0,3\rightarrow 0}\text{Ga}_{0,7\rightarrow 1}\text{As}$ -ДГ. В диодах с  $l_a = 2,5$  мкм верхняя граница выше – от 31 ГГц в  $\text{In}_{0,1\rightarrow 0,33}\text{Ga}_{0,9\rightarrow 0,67}\text{Sb}$ - до 50 ГГц в  $\text{Al}_{0,3\rightarrow 0}\text{Ga}_{0,7\rightarrow 1}\text{As}$ - и  $\text{In}_{0,48\rightarrow 1}\text{Ga}_{0,52\rightarrow 0}\text{P}$ -ДГ. Нижняя граница частотного интервала ДГ с  $l_a = 5$  мкм для разных полупроводников лежит в интервале от 12 ГГц в  $\text{In}_{0,1\rightarrow 0,33}\text{Ga}_{0,9\rightarrow 0,67}\text{Sb}$ - до 25 ГГц в  $\text{Al}_{0,3\rightarrow 0}\text{Ga}_{0,7\rightarrow 1}\text{As}$ -ДГ.

Сравнительный анализ зависимостей  $f(U)$  и  $\Delta f(l_v)$  ДГ на основе других варизонных соединений  $\text{A}_3\text{B}_5$ , рассмотренных в публикациях [4, 5], показывает, что ДГ на основе полупроводниковых нитридов имеют большую ширину и границы частотного интервала.

**Выводы.** В ДГ на основе варизонных полупроводниковых нитридов с возрастающим энергетическим зазором между неэквивалентными долинами имеет место эффект зависимости глубины проникновения домена в активную область от внешнего поля. Этот эффект позволяет внешним полем в широких пределах изменять резонансную частоту колебаний тока в ДГ.

Ширина частотной перестройки диода зависит от длины переходного слоя между полупроводниками, длины активной области и свойств материала.

Наибольшее значение перестройки частоты 97 % 172...60 ГГц в диапазоне питающего напряжения 52...80 В имеет GaN–InN–ДГ при  $l_a = 5$  мкм и  $l_v = 0,8$  мкм, что больше, чем ДГ на основе однородных полупроводников у которых перестройка частоты составляет менее 27 %.

Таким образом, изученный эффект перспективен для создания широкодиапазонных генераторов с перестройкой частоты.

#### Библиографический список

1. *Marshak A. H.* Electrical current in solids with position-dependent band structure / A. H. Marshak, K. M. Van-Vliet // Solid state electronics. – 1978. – 21, N 2. – P. 417–422.
2. *Стороженко И. П.* Особенности возникновения и дрейфа волн объемного заряда в приборах с междолинным переносом электронов на основе варизонного  $\text{GaP}_{x(\text{e})}\text{As}_{1-x(\text{e})}$  / И. П. Стороженко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2007. – 12, № 1. – С. 243–249.
3. *High frequency investigation of graded gap injectors for GaAs Gunn diodes* / S. Montanari, A. Forster, M. I. Lepsa, H. Luth // Solid-State Electronics. – 2005. – 49, N 2. – P. 245–250
4. *Стороженко И. П.* О резонансной частоте диодов Ганна на основе варизонных полупроводников AlGaAs, GaPAs и GaSbAs / И. П. Стороженко, Е. Н. Животова // Радиофизика та електрон. – 2011. – 2(16), № 1. – С. 64–69.
5. *Стороженко И. П.* Резонансная частота диодов Ганна на основе варизонных полупроводников InGaP, InAlAs, InGaSb, InGaAs и InPAs / И. П. Стороженко, Е. Н. Животова // Техника и приборы СВЧ. – 2011. – № 2. – С. 34–38.
6. *Стороженко И. П.* Моделирование диодов Ганна на основе варизонных полупроводников / И. П. Стороженко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2003. – 8, № 2. – С. 287–294.
7. *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.

Рукопись поступила 03.02.2012.

I. P. Storozhenko

#### RESONANCE FREQUENCIES OF GUNN DIODES BASED ON NITRIDE GRADED-GAP SEMICONDUCTORS

The drifting domain and current oscillations in devices based on graded-gap semiconductors are studied. It is shown that the use of graded-gap semiconductors can increase the width of the working frequency of Gunn diodes. The review of graded-gap semiconductors  $\text{A}_3\text{B}_5$  having a similar effect is given.

**Key words:** Gunn diode, graded-gap semiconductor, nitride semiconductor, intervalley electron transfer, resonance frequency.

I. П. Стороженко

#### РЕЗОНАНСНІ ЧАСТОТИ ДІОДІВ ГАННА НА ОСНОВІ ВАРІЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ НІТРИДІВ

Вивчено дрейф доменів і коливання струму в приладах на основі варизонних напівпровідникових нітридів InGaN, AlGaIn, AlInN, InBN, GaBN і AlBN. Показано, що застосування варизонних напівпровідників дозволяє збільшити ширину робочого діапазону частот діодів Ганна. Проведено огляд варизонних напівпровідників  $\text{A}_3\text{B}_5$  з подібним ефектом.

**Ключові слова:** діод Ганна, варизонний напівпровідник, напівпровідниковий нітрид, міждолинний перенос, резонансна частота.