

**И. П. Стороженко, Е. Н. Животова\***

## О РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЕ ДИОДОВ ГАННА НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ $\text{AlGaAs}$ , $\text{GaPAs}$ И $\text{GaSbAs}$

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина  
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина  
E-mail: [storozhenko\\_igor@mail.ru](mailto:storozhenko_igor@mail.ru)*

*\*Национальный фармацевтический университет  
53, ул. Пушкинская, Харьков, 61002, Украина*

Изучено исчезновение дрейфующего домена в приборах на основе варизонных полупроводников. Показано, что длина области дрейфа домена и частота генерируемых колебаний тока в  $n^+-n-n^+$ -приборах на основе варизонных полупроводников зависит от приложенного к прибору напряжения. Найдены условия существования этого эффекта. Показано, что применение варизонных полупроводников позволяет увеличить ширину рабочего диапазона частот диодов Ганна. Проведен обзор варизонных полупроводников  $\text{A}_3\text{B}_5$  с подобным эффектом. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

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

Построение полупроводниковых генераторов мм диапазона с электронной перестройкой частоты представляет значительный интерес для многих применений. Достаточно отметить такое направление, как создание помехоустойчивых систем с частотной модуляцией в радиолокации и портативной измерительной аппаратуре. Для таких генераторов, помимо электронного управления резонансной частотой колебательного контура, необходимы активные элементы с широким диапазоном перестройки частоты. Ширина перестраиваемого частотного диапазона генераторов на диодах Ганна выше, чем на основе лавинно-пролетных диодов (ЛПД) [1, 2]. Это связано с тем, что модули отрицательного сопротивления полупроводниковой структуры диода Ганна в области максимальной мощности значительно больше, чем у ЛПД. В результате существенно снижается добротность эквивалентного резонансного контура диода, что определяет широкополосность перестройки частоты генератора. Вместе с тем частота генерируемых колебаний диодами Ганна в основном определяется только длиной активной области, скоростью дрейфа неустойчивости заряда и слабо зависит от внешних параметров, таких как приложенное к прибору напряжение. Ширина частотного диапазона работы  $n^+-n^-n-n^+$ - и  $n^+-n-n^+$ -диодов Ганна, нормированная к резонансной частоте  $\Delta f / f_0$ , составляет  $\approx 0,67$ . Для увеличения ширины диапазона частот диодов Ганна в публикациях [3, 4] предлагается использовать варизонные полупроводники. В экспериментальной работе [3] исследованы характеристики  $\text{GaP}_{x(z)}\text{As}_{1-x(z)}$ -диода, у которого в активной области  $x$  изменяется от 0,5 до 0. Диод в непрерывном режиме имел выходную мощность 20 мВт с КПД = 3 %. При этом частота генерации

убывала с увеличением приложенного к диоду напряжения  $U$ : при  $U = 3$  В частота электромагнитного излучения составила 30 ГГц; при  $U = 3,5$  В – 15 ГГц; при  $U = 5$  В – 8 ГГц. Менее удачной оказалась попытка повторить результаты работы [3] с помощью прибора на основе варизонного  $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ , проведенная в работе [4]. Генератор Ганна на основе  $\text{Al}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$  имел импульсную мощность  $0,5 \div 2$  Вт при КПД  $0,5 \div 1$  %, диапазон перестройки составил 0,6 ГГц.

Здесь следует отметить, что варизонные полупроводники в современных диодах Ганна применяются довольно редко и только с одной целью. Как правило, тонкий варизонный слой полупроводника или плавный гетеропереход используется в качестве катодного контакта. Такой катод позволяет уменьшить длину «холодной зоны», а также повысить выходную мощность и КПД [5–9]. Однако эффект увеличения ширины частотного диапазона работы диодов Ганна на основе варизонных полупроводников, отмеченный в работах [3–6], остается практически не изученной областью приборов с междолинным переносом электронов (МПЭ). Цель данной работы состоит в выявлении и объяснении тех физических процессов, которые приводят к увеличению рабочего диапазона частот диодов Ганна при использовании варизонных полупроводников.

**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 [5]. Данная модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнения непрерывности, плотности тока и баланса энергии для каждой из

трех неэквивалентных долин  $\Gamma$ ,  $L$  и  $X$ , а также уравнения Пуассона.

Изучаются  $n^+n-n^+$ -диоды Ганна на основе  $Al_{x(z)}Ga_{1-x(z)}As$ ,  $GaP_{x(z)}As_{1-x(z)}$  и  $GaSb_{x(z)}As_{1-x(z)}$  в импульсном режиме работы. Температура кристаллической решетки считалась постоянной, равной 300 К. Концентрация ионизированных доноров в  $n^+$ -области составляет  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и в  $n$ -области –  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Длина активной области 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 ( $l_v = |x_2 - x_1|/x'(z_0)$ );  $z_0$  – координата центра симметрии варизонного слоя, для которой  $x(z_0) = 0,5(x_2 + x_1)$ .

В соответствии с результатами работ [5, 6], увеличение ширины рабочего диапазона частот диодов Ганна на основе варизонных полупроводников имеет место в случае, если энергетический зазор  $\Delta(z)$  между  $\Gamma$ -долиной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной является возрастающей функцией координаты. Исходя из этого, изучалась работа диодов Ганна только на основе соединений, у которых  $\Delta(z)$  возрастает в активной области от катода к аноду, а именно  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As - GaAs$ ,  $GaP_{0,4}As_{0,6} - GaAs$  и  $GaSb_{0,05}As_{0,9} - GaAs$ . Предельное значение  $x(z)$  определялось минимумом  $\Delta_{\min} \approx 0,1 \div 0,15 \text{ эВ}$ .

Свободными параметрами являются:

- длина варизонного слоя  $l_v$ , которая определяет не только длину переходного слоя от одного полупроводника к другому, но и скорость изменения состава с координатой;
- длина активной области диода  $l_a$ ;
- координата центра симметрии варизонного слоя  $z_0$ ;
- приложенное к диоду напряжение  $U$ .

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

**2. Возникновение и дрейф доменов в варизонных приборах.** Проанализируем динамику неустойчивости заряда в варизонных  $n^+n-n^+$ -диодах Ганна для случая возрастающей зависимости  $\Delta(z)$ . Как было показано [6], в таких приборах при достаточном значении  $\Delta_{\min}$  реализуется доменный режим неустойчивости. Так как все параметры полупроводника и в первую очередь энергетический зазор  $\Delta$  изменяются с координатой, то пороговые значения напряженности поля возникновения (формирования)  $E_{\text{фор}}$  и исчезнове-

ния (диссипации)  $E_{\text{дис}}$  доменов в активной области варизонных диодов Ганна зависят от координаты. В случае возрастающего энергетического зазора между долинами  $\Delta(z)$  названные величины возрастают. С другой стороны, распределение напряженности поля  $E(z)$  в активной области  $n^+n-n^+$  варизонного диода неравномерно из-за зависимости  $\Delta(z)$ . Если  $\Delta(z)$  является возрастающей функцией и длина варизонного слоя превышает радиус экранировки Дебая, то напряженность электрического поля имеет максимум [6] (рис. 1).

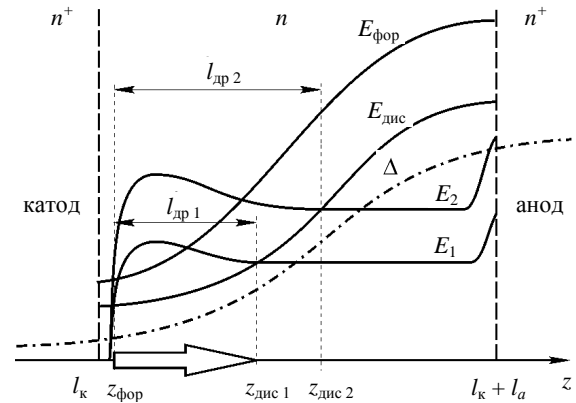


Рис. 1. Схематическое распределение напряженности электрического поля  $E_1$  и  $E_2$ , энергетического зазора между долинами  $\Delta$  в диоде для двух разных напряжений ( $U_1 < U_2$ );  $l_{\text{др}}$  – длина области дрейфа домена

В таких приборах возможна ситуация, когда напряженность поля у катода больше порогового значения возникновения домена, а на некотором удалении от катода – меньше порогового значения его исчезновения. В этом случае домены образуются у катодного контакта и дрейфуют в активной области до места, где поле становится равным пороговому значению их исчезновения ( $z = z_{\text{дис}}$ ). Там домен исчезает, а у катода образуется новый. На схеме рис. 1 область дрейфа доменов обозначена стрелкой. Результаты моделирования показали, что при малых значениях приложенного к диоду напряжения ( $U l_a^{-1} \approx 1,6 \div 5 \text{ кВ/см}$ ) домены действительно исчезают в активной области, не доходя до анодного контакта (рис. 2).

По мере увеличения приложенного к диоду напряжения средняя напряженность электрического поля в диоде растет (кривая  $E_2$  на рис. 1), что влечет за собой смещение координаты  $z_{\text{дис}}$  к аноду. Тем самым глубина проникновения доменов от катода в активную область или длина области дрейфа доменов (пролетная область)  $l_{\text{др}}$  управляется внешним полем. Чем выше внешнее поле, тем больше должна быть длина пролетной области и, соответственно, ниже частота колебаний. Пролетная (или резонансная) частота диода определяется длиной  $l_{\text{др}}$  и скоростью дрейфа доменов.

Обе величины зависят от приложенного к диоду напряжения. Следовательно, зависимость глубины проникновения доменов в активную область от внешнего поля должна определять частоту генерируемых колебаний тока.

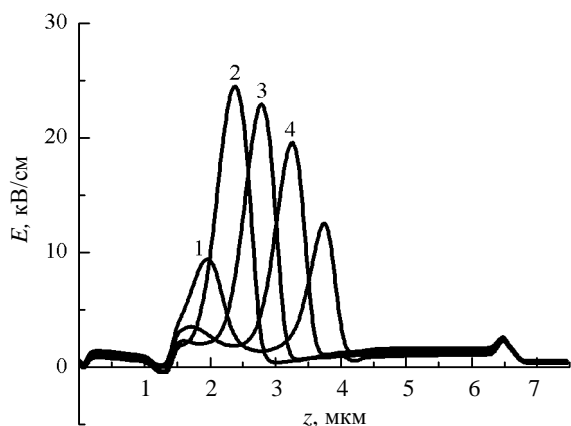


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  – GaAs-диоде в различные моменты времени в течение одного периода колебания  $T$  ( $f_0 = 33$  ГГц,  $U = 2$  В,  $z_0 - l_k = 1,2$  мкм,  $l_v = 2,4$  мкм  $l_a = 5$  мкм): 1 – 0; 2 –  $T/4$ ; 3 –  $T/2$ ; 4 –  $3T/4$

Следует обратить внимание, что длина активной области также оказывает влияние на длину пролетной области. Это объясняется тем, что в диодах Ганна микронной и особенно субмикронной длины напряженность электрического поля в активной области неоднородна также из-за близкого расположения катодного и анодного контактов. В области анодного  $n^+ - n$ -контакта

напряженность электрического поля выше, чем в активной области. С другой стороны, сильная зависимость  $\Delta(z)$  при  $\Delta_{\min} \approx 0,1 \div 0,15$  эВ приводит к формированию статических доменов [10]. Значит, возможна ситуация, когда домены дрейфуют только в области варизонного полупроводника, не доходя до анода. Такой случай наблюдается в достаточно длинных диодах (например,  $l_a = 5$  мкм), когда нет дополнительной («стимулирующей» дрейф домена) напряженности электрического поля анодного  $n - n^+$ -контакта. В более коротких диодах (например,  $l_a = 2,5$  мкм) из-за влияния  $n - n^+$ -контакта при прочих равных условиях домены «доходят» до анода, где исчезают.

**3. Зависимость частоты генерации от приложенного к диоду напряжения, длины и местоположения варизонного слоя.** Зависимость частоты собственных колебаний тока  $f_0$  от напряжения  $U$  в приборах на основе варизонных полупроводников существенно отличается от диодов на основе однородных по составу полупроводников (рис. 3, таблица). В последних приборах  $f_0$  незначительно возрастает с ростом напряжения, что связано с увеличением скорости дрейфа обогащенных слоев или доменов. Длина пролетной области остается постоянной, равной длине активной области. Зависимость  $f_0(U)$  быстро насыщается или имеет пологую вершину. Так как скорость дрейфа обогащенных слоев сильнее зависит от внешнего поля, чем скорость доменов, то ширина частотного диапазона ( $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ )  $n^+ - n - n^+$ -приборов больше, чем  $n^+ - n^- - n - n^+$ .

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

Материал	$l_a = 2,5$ мкм					$l_a = 5$ 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	
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As} - \text{GaAs}$	1,76	50,1	34,50	0,70	2,4	1,49	47,33	33,73	1,0	4,0
	2,36	47,6	32,88	0,70	2,2	1,79	46,0	30,6	1,0	4,5
	2,94	42,0	32,14	0,65	1,6	2,39	41,38	26,36	1,1	5,0
	3,5	37,81	32,0	0,80	1,4	2,98	37,62	22,8	1,2	5,0
	4,12	36,0	31,50	0,80	1,2	4,77	31,06	17,8	1,3	2,6
$\text{GaP}_{0,4}\text{As}_{0,6} - \text{GaAs}$	1,76	47,35	29,82	0,70	3,0	1,49	42,8	27,52	1,0	5,0
	2,36	38,63	29,2	0,75	2,0	2,39	35,83	20	1,1	5,0
	2,94	35,95	29,0	0,80	1,4	2,98	32,9	18,5	1,2	3,0
	4,12	31,96	27,31	0,90	1,1	4,77	25	16,8	1,6	2,2
$\text{GaSb}_{0,05}\text{As}_{0,95} - \text{GaAs}$	1,76	47,34	31	0,70	3,0	1,49	37,43	23,45	1,1	4,0
	2,35	34,65	27,9	0,70	1,4	2,39	25,38	16,58	1,3	2,4
	2,94	29,0	26,59	0,65	1,6	2,98	22,66	16,36	1,2	2,4
	4,12	23,7	22,6	0,70	0,75	4,77	18,07	15,88	1,4	1,8
GaAs	–	51,13	42	3,5	1,3	–	26,38	19,02	5	2
$\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$	–	36,8	30,45	2,4	1,4	–	16,7	13,56	5	2,3
$\text{GaSb}_{0,025}\text{As}_{0,975}$	–	31,98	26,38	2	0,9	–	15,77	13,81	2,5	1,5
$\text{GaP}_{0,2}\text{As}_{0,8}$	–	31,86	27,5	2,4	1,6	–	14,53	12,4	4	2,4

В варизонных приборах при увеличении приложенного к ним напряжения  $f_0$  вначале также незначительно возрастает из-за роста средней скорости дрейфа домена. Ширина этого интервала напряжения незначительна ( $\approx 0,1$  В). При дальнейшем увеличении напряжения на зависимость  $f_0(U)$  начинает сказываться возрастание длины пролетной области и  $f_0$  монотонно, почти линейно уменьшается с ростом напряжения. При напряжении, когда домены начинают достигать анодного контакта, зависимость  $f_0(U)$  насыщается.

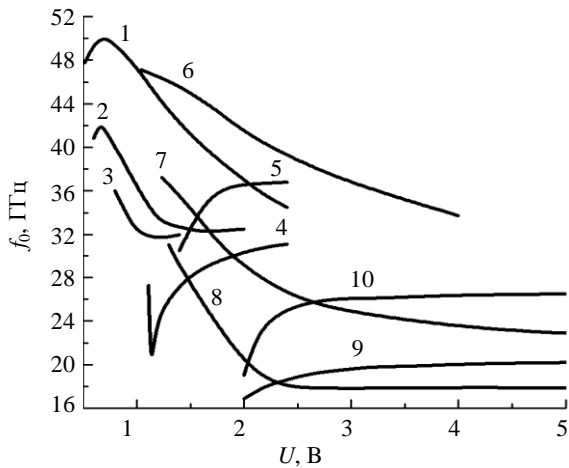


Рис. 3. Резонансная частота  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As} - \text{GaAs}$ -диодов при  $z_0 - l_k = 1,2$  мкм и разной длине варизонного слоя  $l_v$ : 1 – 5 –  $l_a = 2,5$  мкм; 6 – 10 –  $l_a = 5,0$  мкм; 1 –  $l_v = 1,76$  мкм; 2 – 2,94 мкм; 3 – 4,12 мкм; 4 –  $n^+ - n^- - n^- - n^- : \text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ ; 5 –  $n^+ - n^- - n^- : \text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ ; 6 –  $l_v = 1,49$  мкм; 7 – 2,98 мкм; 8 – 4,77 мкм; 9 –  $n^+ - n^- - n^- - n^- : \text{GaAs}$ ; 10 –  $n^+ - n^- - n^- : \text{GaAs}$

Следует отметить, что подобный эффект возможен и в  $n^+ - n^- - n^- - n^-$ -диодах на основе однородных по составу полупроводников (рис. 3, кривая 4). Однако в таких приборах он связан только со всплеском поля на высокоомной неоднородности. Пороговые значения возникновения и диссипации доменов постоянны. Ширина спадающего участка зависимости  $f_0(U)$  мала. Например, для  $\text{GaP}_{0,2}\text{As}_{0,8}$ - и  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ -диодов с  $l_a = 2,5$  мкм она составляет всего  $\approx 0,03$  В при изменении частоты на  $\approx 8$  ГГц. В диодах с  $l_a = 5$  мкм этот эффект не проявляется (рис. 3, кривая 9).

На зависимость  $f_0(U)$  варизонных приборов оказывает влияние длина  $l_v$  и месторасположение варизонного слоя в активной области относительно катода  $z_0 - l_k$ . При уменьшении  $l_v$  возрастают максимальное и минимальное значения  $f_0$  (рис. 3, таблица), а ширина рабочего диапазона частот  $\Delta f$  проходит через максимум (рис. 4).

При малых (менее  $0,5 \div 1$  мкм) и больших значениях  $l_v$  (более  $2 \div 3l_a$ ) эффект зависимости глубины проникновения домена в активную область от внешнего поля не проявляется и ширина частотного диапазона работы диодов незначительна. При больших значениях  $l_v$  это происходит

из-за слабой зависимости энергетического зазора  $\Delta$  и других параметров полупроводника от координаты. Распределение поля в активной области диода равномерно. Пороговые значения возникновения и диссипации домена не зависят от координаты. При малых значениях  $l_v$  область неоднородности полупроводника сосредотачивается в узкой полосе, локализованной в окрестности варизонного слоя. Область формирования доменов смещается к центру варизонного слоя и диапазон изменения длины пролетной области снижается.

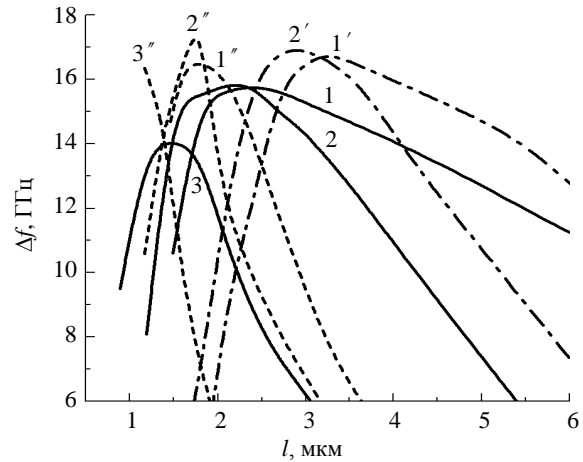


Рис. 4. Зависимость ширины частотного диапазона от длины варизонного слоя: 1, 1', 1'' –  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As} - \text{GaAs}$ ; 2, 2', 2'' –  $\text{GaP}_{0,4}\text{As}_{0,6} - \text{GaAs}$ ; 3, 3'' –  $\text{GaSb}_{0,05}\text{As}_{0,9} - \text{GaAs}$ . ----  $l_a = 2,5$  мкм,  $z_0 - l_k = 1,2$  мкм; —  $l_a = 5$  мкм,  $z_0 - l_k = 1,2$  мкм; - - -  $l_a = 5$  мкм,  $z_0 - l_k = 2,5$  мкм

Уменьшение  $l_v$  приводит к росту частоты колебаний тока во всем интервале напряжений. Первоначально при уменьшении  $l_v$  рост частоты происходит преимущественно только в области низких значений напряжения. Затем частота в основном растет в области высоких напряжений. Возрастание  $f_0$  при уменьшении  $l_v$  связано со следующими причинами:

- в области дрейфа домена увеличивается содержание GaAs, где подвижность электронов, а значит, скорость дрейфа домена выше, чем в тройных соединениях;

- уменьшается линейный размер домена, а значит, становится меньше минимальная длина пролетной области, что приводит к росту максимальной частоты.

Первоначально предполагалось, что максимальная резонансная частота должна ограничиваться только частотными свойствами материала, т. е. обратными временами релаксаций электронов, и при достаточном уровне легирования достигать предельных частот генерации варизонных  $n^+ - n^- - n^-$ -приборов [5]. Минимальное же значение частоты должна определять в основном только длина активной области. Однако, как выяснилось, верхняя граница частотного диапазона ограничи-

вается конечными размерами неоднородности концентрации электронов, возникающей благодаря зависимости  $\Delta(z)$  [6]. Уменьшить ее размеры только сокращением длины  $l_v$  не представляется возможным, потому, что при малых значениях  $l_v$  и  $\Delta_{\min}$  в варизонном слое формируется статический домен [10] и генерация прекращается. При этом чем меньше  $l_v$ , тем при меньшем напряжении домен становится статическим. Это является основной причиной и роста нижней границы частотного диапазона при уменьшении  $l_v$ , особенно в более длинных диодах. Например, в  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As} - \text{GaAs}$ -диоде при  $l_a = 5$  мкм,  $z_0 - l_k = 1,2$  мкм и  $l_v = 1,49$  мкм статический домен возникает при  $U \approx 4$  В (рис. 3, кривая б), в  $\text{GaP}_{0,4}\text{As}_{0,6} - \text{GaAs}$ -диоде при  $U \approx 6$  В. При тех же условиях в диодах с меньшей длиной активной области, т. е. при  $l_a = 2,5$  мкм, из-за влияния анодного контакта домен остается подвижным. Следовательно, при прочих равных условиях близкое расположение контактов является причиной того, что верхняя граница частотного диапазона работы приборов с  $l_a = 2,5$  мкм больше, чем с  $l_a = 5$  мкм. Повышение концентрации ионизированных доноров в активной области не приводит к заметному уменьшению линейного размера домена и повышению максимальной частоты. Здесь следует обратить внимание на еще одно обстоятельство, ограничивающее длину неоднородности. При уменьшении длины варизонного слоя подвижность электронов в активной области, притягивающей к гетеропереходу со стороны катодного контакта, значительно уменьшается, что увеличивает падение напряжения на этой области.

Оптимальная длина варизонного слоя, при которой ширина частотного интервала  $\Delta f$  максимальная, различна для диодов разной длины и на основе разных варизонных соединений, но в целом зависимости  $\Delta f$  от длины варизонного слоя  $l_v$  для разных диодов однотипны (рис. 4).

**Выводы.** Таким образом, отличительной чертой диодов на основе рассмотренных варизонных соединений является сильная возрастающая зависимость энергетического зазора  $\Delta$  от координаты и низкое его значение у катода ( $\Delta \approx 0,1$  эВ). По-видимому, это является основным условием существования в варизонных диодах Ганна эффекта зависимости глубины проникновения домена в активную область от приложенного к нему напряжения. Этот эффект позволяет внешним полем в широких пределах изменять резонансную частоту колебаний тока в диоде Ганна. Ширина частотной перестройки диода зависит от длины переходного слоя между полупроводниками, места его расположения и длины активной области. Можно предположить, что аналогичный эффект имеет место в диодах Ганна и на основе

других варизонных соединений с возрастающей зависимостью энергетического зазора между долинами. К ним можно отнести  $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P} - \text{InP}$ ,  $\text{In}_{0,93}\text{Al}_{0,07}\text{P} - \text{InP}$ ,  $\text{In}_{0,68}\text{B}_{0,32}\text{As} - \text{In}_{0,86}\text{B}_{0,14}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_{0,9}\text{B}_{0,1}\text{As} - \text{GaAs}$ ,  $\text{In}_{0,46}\text{Al}_{0,54}\text{Sb} - \text{In}_{0,85}\text{Al}_{0,15}\text{Sb}$ ,  $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{Sb} - \text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{Sb}$ ,  $\text{Al}_{0,79}\text{B}_{0,21}\text{N} - \text{AlN}$ ,  $\text{In}_{0,37}\text{Al}_{0,63}\text{As} - \text{In}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_{0,65}\text{B}_{0,35}\text{N} - \text{GaN}$ ,  $\text{In}_{0,63}\text{B}_{0,37}\text{N} - \text{InN}$ .

1. Касаткин Л. В. Характеристики корпусированных диодов Ганна в генераторах СВЧ / Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка, А. В. Швачка // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 2. – С. 6–11.
2. Касаткин Л. В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Л. В. Касаткин, В. Е. Чайка. – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.
3. 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.
4. Варизонный генератор Ганна с электронной перестройкой частоты на основе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  / А. К. Акимов, А. М. Зайцев, Е. П. Мороз, В. Е. Челноков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 7. – С. 20–22.
5. 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.
6. 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.
7. Couch N. R. High-performance graded AlGaAs injector GaAs Gunn diodes at 94GHz / N. R. Couch, H. Sponer, P. H. Beton // IEEE Electron Device Lett. – 1989. – 10, N 7. – P. 288–290.
8. 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.
9. Иванов В. Н. Диоды Ганна из GaAs с катодным контактом, инжектирующем горячие электроны / В. Н. Иванов, В. М. Ковтонок, Ю. Е. Николаенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – № 2. – С. 29–30.
10. Варизонные диоды со статическим доменом / И. П. Стороженко, Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, Ю. В. Аркуша // 18-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2008): материалы конф. – Севастополь, 2008. – Т. 1. – С. 141–142.

I. P. Storozhenko, E. N. Zhivotova

#### ABOUT RESONANCE FREQUENCY OF GUNN DIODES BASED ON GRADED-GAP SEMICONDUCTORS AlGaAs, GaPAs and GaSbAs

The disappearance of a drifting domain in devices based on graded-gap semiconductors is studied. It is shown that the length of a region of drift of a the domain and the frequency of generated current oscillation in the  $n^- - n - n^+$  devices based on graded-gap semiconductors depends on the voltage applied to the device. The conditions of existence of this effect are found. 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  $A_3B_5$  having a similar effect is given.

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

І. П. Стороженко, О. М. Животова

ПРО РЕЗОНАНСНУ ЧАСТОТУ ДІОДІВ ГАННА  
НА ОСНОВІ ВАРИЗОННИХ  
НАПІВПРОВІДНИКІВ AlGaAs, GaPAs I GaSbAs

Вивчено зникнення домену, що дрейфує в приладах на основі варизонних напівпровідників. Показано, що довжина області дрейфу домена і частота генерованих коливань

струму в  $n^+ - n - n^+$ -приладах на основі варизонних напівпровідників залежить від прикладеної до приладу напруги. Знайдено вимоги існування цього ефекту. Показано, що застосування варизонних напівпровідників дозволяє збільшити ширину робочого діапазону частот діодів Ганна. Проведено огляд варизонних напівпровідників  $A_3B_5$  з подібним ефектом.

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

*Рукопись поступила 03.12.10 г.*