

**О. В. Боцула, К. Г. Приходько, В. А. Зозуля**

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,*

*4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина*

E-mail: [oleg.botsula@mail.ru](mailto:oleg.botsula@mail.ru)

### УДАРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ В КОРОТКИХ ДИОДАХ НА ОСНОВЕ $Al_xGa_{1-x}N$

Освоение миллиметрового и терагерцевого диапазонов является одной из актуальных задач радиофизики. Однако на сегодняшний день набор активных элементов, способных работать в указанных диапазонах, ограничен. Ударная ионизация в широкозонных нитридных соединениях является быстротекущим процессом и может быть использована в активных элементах указанных диапазонов. В данной работе исследуется перенос заряда в коротких (с длиной активной области менее 0,3 мкм) диодных структурах на основе  $Al_xGa_{1-x}N$  с целью определения условий возникновения и особенностей ударной ионизации, а так же ее влияния на характеристики приборов. Показана возможность получения локализованной области с высокой напряженностью электрического поля, достаточной для возникновения ударной ионизации и управления ею путем изменения распределения состава  $Al_xGa_{1-x}N$  по длине диода. Результатом исследований является определение основных закономерностей развития ударной ионизации в предельных диодных структурах. Они являются ориентиром для дальнейшего детального анализа физических процессов и практической реализации таких структур. Ил. 8. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** диоды, ударная ионизация, гетеропереход, варизонный слой, домен, напряженность электрического поля.

Получение высоких рабочих частот в твердотельных активных элементах и, в частности, возможность их работы в терагерцевом диапазоне предопределили необходимость поиска возможных путей повышения их быстродействия.

Решение данной проблемы достигается посредством уменьшения размеров элементов и сокращения времени пролета носителей заряда, а также путем поиска эффективных механизмов, обеспечивающих их функционирование.

Например, для диодов с междолинным переносом электронов (МПЭ) уменьшение времени начального набора энергии, необходимой для перехода в боковые долины зоны проводимости, достигается посредством формирования специального катодного контакта, например,  $n^-$ - $n$ -контакта с большой напряженностью электрического поля [1], или использованием гетероструктур [2]. Более сложной задачей является уменьшение времени перехода электрона из боковых долин зоны проводимости в центральную (обратные переходы), которое, как правило, превышает время прямого перехода. На сегодняшний день практически единственным способом решения данной проблемы является поиск материалов, в которых указанные времена минимальны. По этим параметрам наиболее подходящими являются азотосодержащие соединения ( $GaN$ ,  $AlN$ ,  $InN$  и т. д.). Большинство нитридов – прямозонные полупроводники, причем эффективная масса электрона в боковых долинах зоны проводимости больше по сравнению с эффективной массой в центральной долине, а минимумы боковых долин достаточно удалены от центральной долины, что приводит к выраженному МПЭ. Время перехода электронов из центральной долины в боковые мало. Например, в  $GaN$  оно составляет  $\sim 2 \cdot 10^{-13}$  с, что на порядок меньше, чем в  $GaAs$ , который традиционно используется для диодов Ганна.

Целый ряд полезных качеств нитридных соединений делают их перспективными материалами как для создания диодов с МПЭ, способных генерировать электромагнитные колебания в терагерцевом диапазоне [3, 4], так и других активных элементов, обладающих высоким быстродействием.

Одним из интересных эффектов в приборах на основе широкозонных материалов, в том числе и нитридных соединений, является ударная ионизация (УИ). Время развития УИ в широкозонных материалах может принимать значения порядка  $10^{-14}$  с [5], что делает этот механизм привлекательным при конструировании активных элементов терагерцевого диапазона. Ударная ионизация наблюдается в основном в длинных диодах в десятки и сотни микрон. Однако она возможна и в достаточно коротких диодах при высоких импульсных перенапряжениях. Например, УИ может возникать в диодах на основе  $GaN$  с длиной активной области менее 0,3 мкм [5]. В этом случае длина диода соизмерима с характерными длинами релаксации носителей по импульсу и энергии.

Целью данной работы является исследование особенностей развития УИ в коротких диодах и изучение ее влияния на формирование их характеристик.

**1. Структура диодов и математическая модель их анализа.** Рассматриваемые диоды представляют собой  $n^+n^-n^+$ -структуры с общей длиной  $L = 640$  нм и длиной активной области ( $n$ -область) менее 300 нм. Концентрации носителей заряда в  $n^-$ - и  $n$ -областях различаются более чем на порядок.

В результате на границе раздела  $n^-$ - и  $n$ -областей формируется стабильная область с большой напряженностью электрического поля (статический домен), способствующая развитию УИ в диоде.

Ударная ионизация в коротких диодах имеет ряд особенностей. Во-первых, в них ярко проявляется ее нелокальный характер, а во-вторых, в таких диодах УИ в большей степени зависит от энергии электрона, чем от величины напряженности электрического поля [6]. В таких условиях можно оказывать влияние на развитие УИ путем формирования соответствующего профиля потенциальной энергии за счет использования различных полупроводниковых материалов (рис. 1).

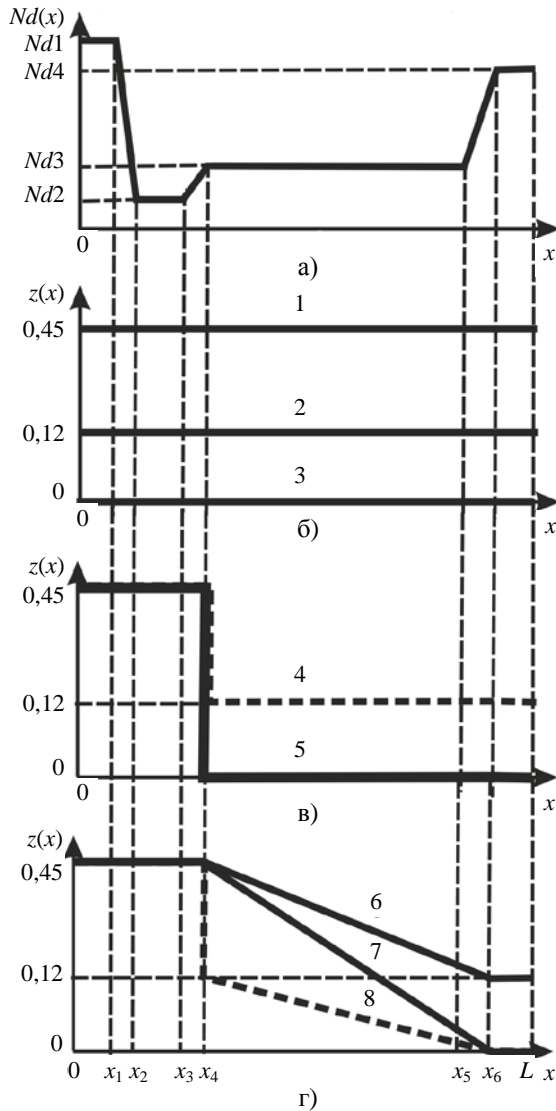


Рис. 1. Профиль легирования (а), распределение состава  $Al_zGa_{1-z}N$  по длине диода  $z(x)$  (б–г)

С этой целью рассматривались диоды на основе соединения  $Al_zGa_{1-z}N$  с однородным и неоднородным распределением состава  $z(x)$  (рис. 1, б–г, кривые 1–8).

Для корректного учета инерционных и нелокальных эффектов, связанных с изменением энергии электронов в столь коротких диодах, моделирование процесса переноса носителей заряда

проводилось с использованием многочастичного метода Монте-Карло. Была рассмотрена трехдолинная модель зоны проводимости с учетом нижней  $\Gamma$ - и верхних  $\Gamma_1$ - и  $M-L$ -долин. Закон дисперсии электронов  $E_e(k)$  взят в виде:

$$E_e(1 + \alpha E_e) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент непараболичности;  $m^*$  – эффективная масса электрона;  $\hbar$  – редуцированная постоянная Планка. Валентная зона учитывалась зоной тяжелых дырок  $\Gamma_{V1}$ .

Все аспекты моделирования электронов выбраны аналогично работам [7, 8].

Значения параметров  $Al_zGa_{1-z}N$ , используемых при моделировании, приведены в таблице.

Параметр		$Al_zGa_{1-z}N$
Постоянная решетки, Å		$3,189 - 0,089z$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>		$(6,15 - 2,92z) \cdot 1000$
Статическая диэлектрическая постоянная		$8,9 - 0,5z$
Высокочастотная диэлектрическая постоянная		$5,35 - 0,58z$
Энергия полярных оптических фононов, эВ		$0,092 + 0,0113z$
Скорость звука, м/с		$6560 + 2500z$
Акустический деформационный потенциал, эВ	$\Gamma$	10,1
	$\Gamma_1$	10,1
	$M-L$	10,1
	$\Gamma_{V1}$	10,1
Эффективная масса, $m^*/m_e$	$\Gamma$	$0,2 + 0,11z$
	$\Gamma_1$	0,4
	$M-L$	$0,6 - 0,1z$
Энергетические минимумы долин, эВ	$\Gamma$	$3,5 + 2,65z + 0,05z^2$
	$\Gamma_1$	$5,4 + 1,3z$
	$M-L$	$5,5 + 1,4z$
Коэффициент непараболичности, эВ <sup>-1</sup>	$\Gamma$	$(1 - m_{\Gamma}^*)^2 / \epsilon_{\Gamma}$
	$\Gamma_1$	0,065
	$M-L$	0,029
	$\Gamma_{V1}$	0
Междолинный деформационный потенциал, эВ/м	$\Gamma - \Gamma_1$	$10^{11}$
	$\Gamma - M-L$	$10^{11}$
	$\Gamma_1 - M-L$	$10^{11}$
	$ML - ML$	$10^{11}$
Энергия междолинных фононов, эВ		$0,06584 + 0,009915z$
Электронное сродство, эВ		$3,58 + 0,49z$
Пьезоэлектрическая постоянная, Кл/м <sup>2</sup>		$0,033 + 0,061z$
Оптический деформационный потенциал, эВ/м		0,9
Энергия оптических фононов, эВ		$0,092 + 0,0113z$
Число эквивалентных долин	$\Gamma$	1
	$\Gamma_1$	1
	$M-L$	6

Учитывались рассеяние на деформационном потенциале акустических и оптических фононов, полярное оптическое рассеяние, рассеяние на ионизированных примесях и сплавном потенциале (в  $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ ). Процессы рассеяния рассматривались в рамках изотропной аппроксимации.

Особенностью использованной модели являлся учет различия свойств материала в каждой ячейке пространственной дискретизации. Уравнения для эволюции во времени координаты  $\vec{r}$  и волнового вектора электрона  $\vec{k}$  в такой структуре определяются уравнениями [8]:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\vec{p}(t)}{m^* \sqrt{1 + \frac{2\alpha}{m^*} p^2(t)}}; \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -e\nabla(\varphi + \Delta E_C(x)) + \frac{E_e}{m^*} \frac{\nabla m^* + E_e \nabla(m^* \alpha)}{1 + 2\alpha E_e}, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $\varphi$  – электростатический потенциал, определяемый путем решения двумерного уравнения Пуассона с помощью многосеточного метода. Ударная ионизация учитывается аналогично работе [7]. Параметры полупроводника соответствуют работам [7, 9].

Чтобы обеспечить указанный выше порядок расположения долин зоны проводимости во всех частях диода, молярная доля Al в соединении  $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  выбиралась в диапазоне 0...0,45, что соответствует изменению ширины запрещенной зоны 3,5...4,69 эВ (рис. 2).

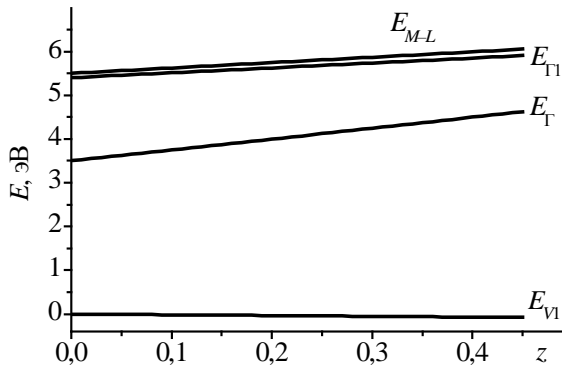


Рис. 2. Положение долин зоны проводимости и валентной зоны в зависимости от молярной доли  $z(x)$  в  $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$

Рассматривались три однородных по составу диода с молярной долей алюминия  $z = 0,45; 0,12; 0$  (рис. 1, б, кривые 1–3).

Для структур с неоднородным составом (рис. 1, в, г) область в промежутке от 0 до  $x_4$  представляет собой полупроводник  $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$ . В структурах, представленных кривыми 4, 5 (рис. 1, в), в точке  $x_4$  расположен гетеропереход, за которым следует однородный по составу слой. При выбранных значениях  $z$  по обе стороны гетеро-

перехода величина разрыва зоны проводимости в гетеропереходе равна: для диода 4 –  $\Delta E_C = 0,87$  эВ; для диода 5 –  $\Delta E_C = 1,19$  эВ.

В структурах, представленных на рис. 1, в кривыми 6, 7, содержание алюминия в соединении  $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  при  $x > x_4$  монотонно убывает (варизонный слой). Этот вариант диода интересен тем, что при соответствующих условиях за счет квазиэлектрических полей варизонного слоя дырки в полупроводнике  $n$ -типа могут двигаться к аноду аналогично электронам [10].

Последний вариант диода (рис. 1, г, распределение 8) содержит как гетеропереход, так и варизонный слой.

Для всех рассмотренных вариантов диодов: длина области пониженной концентрации составила 80 нм;  $x_1 = 140$  нм;  $x_2 = 160$  нм;  $x_3 = 240$  нм;  $x_4 = 260$  нм;  $x_5 = 280$  нм;  $x_6 = 500$  нм;  $N_{d1} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{d2} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{d3} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_{d4} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (рис. 1, а).

**2. Статические характеристики диодов.** Проводящие свойства рассмотренных диодов определяются двумя факторами: свойствами статического катодного домена и УИ. До начала УИ все приложенное к диоду напряжение падает в области катодного домена. На рис. 3 приведены распределения напряженности электрического поля в диодах с различным составом, полученные без учета и с учетом УИ при напряжении 20 В. Кривые 1, 2 соответствуют однородному по составу диоду на основе  $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$ , кривые 3, 4 – диоду с варизонным слоем (рис. 1, г, распределение 7), кривые 5, 6 – диоду с гетеропереходом (рис. 1, в, распределение 5).

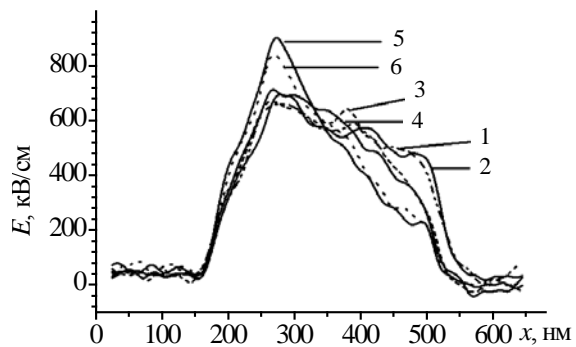


Рис. 3. Распределение электрического поля в диоде при напряжении  $U = 20$  В и различных законах распределения состава  $z(x)$ : сплошная линия – без учета УИ, прерывистая линия – с учетом УИ

Максимальное электрическое поле для всех рассмотренных диодов располагается на границе  $n^-$ -областей. Однако распределение поля имеет существенные качественные отличия. Так, для однородного по составу диода катодный

статический домен расширяется в сторону анодного контакта, в результате чего происходит заполнение доменом всего пространства между  $n^-$ - $n$ -переходом и анодом. Таким образом, можно говорить о том, что в однородных по составу коротких диодах очень трудно локализовать домен у  $n^-$ - $n$ -перехода, а значит, и использовать эту область для разогрева электронного газа.

На рис. 4 показаны графики зависимости плотности тока от напряжения для однородных по составу  $Al_zGa_{1-z}N$ -диодов с молярной долей алюминия  $z = 0,45; 0,12; 0$ .

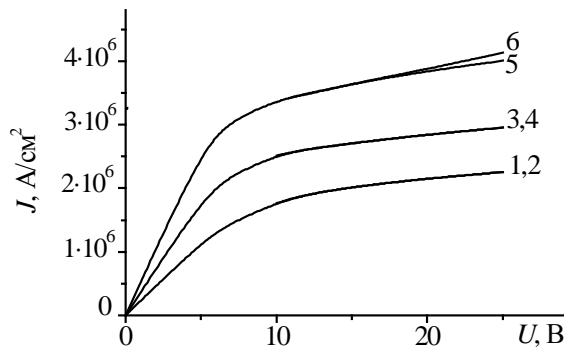


Рис. 4. Графики зависимости плотности тока от напряжения для однородных  $Al_zGa_{1-z}N$ -диодов с молярной долей Al: кривые 1, 2 –  $z = 0,45$ ; кривые 3, 4 –  $z = 0,12$ ; кривые 5, 6 –  $z = 0$ ; кривые 1, 3, 5 – без УИ; кривые 2, 4, 6 – с УИ

Из приведенных графиков видно, что в  $Al_zGa_{1-z}N$ -диодах в выбранном диапазоне приложенных напряжений УИ проявляется только в диоде на основе GaN, в котором ширина запрещенной зоны наименьшая.

Как следует из рис. 3, из всех рассмотренных диодных структур наилучшая локализация домена наблюдается в диоде с гетеропереходом (рис. 4, кривые 5, 6). На рис. 5 показаны графики зависимости плотности тока от напряжения для диодов с гетеропереходом и для сравнения приведены характеристики однородных по составу  $Al_zGa_{1-z}N$ -диодов.

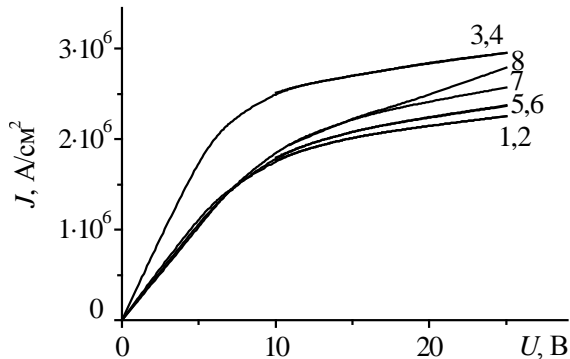


Рис. 5. Графики зависимости плотности тока от напряжения для  $Al_zGa_{1-z}N$ -диодов с молярной долей Al: кривые 1, 2 –  $z = 0,45$ ; кривые 3, 4 –  $z = 0,12$ ; кривые 1, 3, 5, 7 – без УИ; кривые 2, 4, 6, 8 – с УИ

Кривые 5, 6 соответствуют диоду с гетеропереходом  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N/Al_{0,12}Ga_{0,88}N$  (рис. 1, в, распределение 4), кривые 7, 8 – диоду с гетеропереходом  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N/GaN$  (рис. 1, в, распределение 5).

Видно, что плотность тока в диодах с гетеропереходом не превышает величину плотности тока в однородных по составу диодах на основе  $Al_{0,12}Ga_{0,88}N$  и при малых напряжениях соответствует плотности тока  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$ -диода. По мере увеличения напряжения и разогрева электронного газа различие в характеристиках растет.

Наиболее существенные отличия наблюдаются в характеристиках диода с гетеропереходом  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N/GaN$ , в котором отмечается рост тока, обусловленный УИ, и самый низкий порог развития УИ среди всех рассмотренных структур.

По степени локализации поля, как видно из рис. 3, диоды с варизонным слоем занимают промежуточное положение между диодом с однородным составом и диодами с гетеропереходом.

На рис. 6 показаны графики зависимости плотности тока от напряжения для диодов с варизонным слоем (рис. 1, г, распределения 6, 7) и диода с варизонным слоем и гетеропереходом (рис. 1, г, распределение 8), а для сравнения приведены характеристики однородного по составу  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$ -диода (кривая 1) и диода с гетеропереходом  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N/GaN$  (кривые 6, 7).

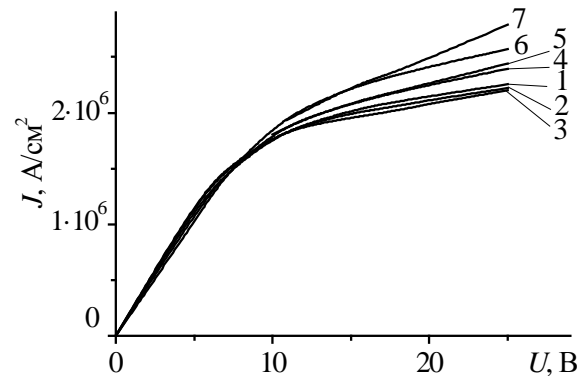


Рис. 6. Графики зависимости плотности тока от напряжения: кривые 1–4, 6 – без УИ; кривые 5, 7 – с УИ

Кривая 2 соответствует диоду с варизонным слоем  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N-Al_{0,12}Ga_{0,88}N$ , кривая 3 – диоду с варизонным слоем  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N-GaN$  (в обоих случаях УИ не наблюдается).

Существенным моментом для диодов с варизонным слоем является отсутствие УИ. В тоже время УИ наблюдается в диоде с варизонным слоем и гетеропереходом (рис. 6, распределения 4, 5).

**3. Нелокальные эффекты и энергетическое распределение электронов.** Нелокальность УИ, связанная с набором электроном энер-

гии, а также с введением гетероперехода и (или) варизонного слоя, приводит к тому, что УИ в рассматриваемом диоде возникает за областью с максимальной напряженностью электрического поля катодного статического домена, а ее положение определяется законом распределения состава  $z(x)$ .

На рис. 7 показано распределение по длине диода числа актов УИ, выраженное в относительных единицах (число актов УИ, деленное на максимальное число актов среди всех рассмотренных структур). Число актов УИ максимально в диоде с однородным составом (кривая 1) и превышает число актов в диоде с гетеропереходом (кривая 2). Однако в первом диоде УИ возникает в анодной области, где сопротивление диода минимально, и вызывает меньший рост тока, чем во втором диоде.

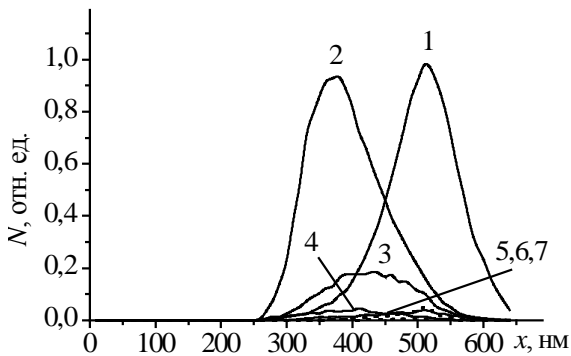


Рис. 7. Распределение по длине диода числа актов УИ в диодах,  $U = 25$  В: кривая 1 – однородный на основе GaN; кривая 2 – с гетеропереходом  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N/GaN$ ; кривая 3 – с варизонным слоем и гетеропереходом; кривая 4 – с гетеропереходом  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N/Al_{0,12}Ga_{0,88}N$ ; кривые 5–7 – остальные диоды

Очевидно, что интенсивность УИ и положение области, в которой она происходит, можно контролировать за счет выбора закона изменения состава в диодной структуре.

Распределение кинетической энергии электронов и средней энергии в  $\Gamma$ -долине и верхних долинах для диода с гетеропереходом  $Al_{0,45}Ga_{0,55}N/GaN$  приведено на рис. 8 (в верхней части – без учета УИ, в нижней части – с учетом УИ).

В диоде с гетеропереходом набор электронами энергии, необходимой для УИ, происходит в домене сильного поля на длине порядка 100...150 нм ( $\sim 300$  нм от катода). На большем удалении от катода УИ уменьшает число баллистических электронов, пролетающих через диод без столкновений, и тем самым уменьшает среднюю энергию в  $\Gamma$ -долине.

На расстояниях более чем 350 нм от катода, что совпадает с центром области с максимальной интенсивностью УИ (рис. 7, кривая 2), заметно уменьшение средней кинетической энергии электрона в верхней долине зоны проводи-

мости. Происходит остывание электронного газа, что говорит о том, что в рассмотренных коротких диодах УИ играет роль механизма релаксации энергии электронов, альтернативного междолинному рассеянию.

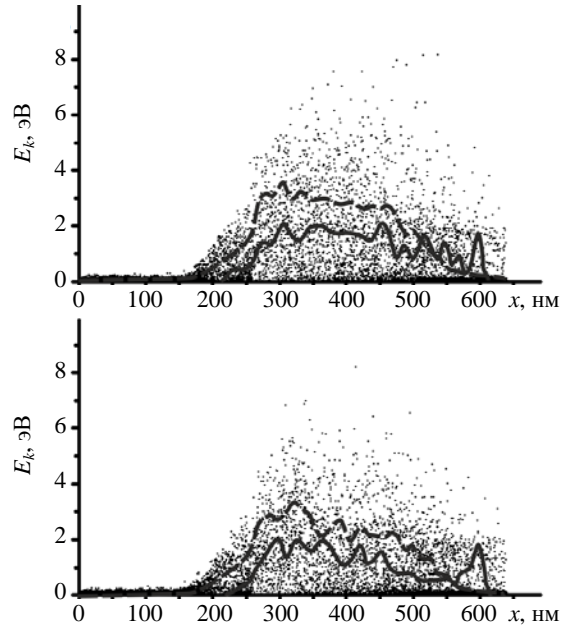


Рис. 8. Распределение кинетической энергии электронов и средней кинетической энергии в  $\Gamma$ -долине (прерывистая линия) и верхних долинах (сплошная линия)

**Выводы.** Таким образом, в результате проведенных расчетов показано, что в коротких (с длиной активной области менее 300 нм) диодах на основе  $Al_zGa_{1-z}N$  с неоднородным распределением состава возможно получение локализованной области с высокой напряженностью электрического поля, достаточной для возникновения УИ.

Наилучшие результаты по возникновению УИ получены для диода с гетеропереходом, в котором разрыв зоны проводимости максимальный.

В рассмотренных диодах УИ носит локальный характер и не приводит к лавинному пробую. Сочетая резкие гетеропереходы с варизонными областями, можно влиять на интенсивность и положение области локализации УИ. Это создает возможность формирования необходимого фазового сдвига между током и напряжением, что может быть использовано для получения генерации электромагнитных колебаний, в том числе и в диодах с МПЭ.

Наиболее перспективно использование варизонных структур, которые могут обеспечить однонаправленный вывод электронов и дырок в анод, что даст возможность избежать накопления дырок в активной области и способствовать быстрому восстановлению состояния диода до

предпробойного. Для этих целей больше подходят нитридные соединения, содержащие In ( $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ). Структуры на основе таких соединений, аналогичные рассмотренным, являются более сложными для анализа и будут рассмотрены в дальнейшем.

#### Библиографический список

1. Monte-Carlo simulation of diodes with a cathode static domain / E. D. Prokhorov, O. V. Botsula, A. V. Dyadchenko, I. A. Gorbunov // 23<sup>rd</sup> Int. Crimean Conf. Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2013): proc. – 2013. – Vol. 1. – P. 139–140.
2. Botsula O. V. Heterostructure-based diode with the cathode static domain / O. V. Botsula, K. H. Prykhodko // 9<sup>th</sup> Int. Kharkiv Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW 2016): proc. – 2016. – P. E25(1)–E25(4).
3. Aleskseev E. Microwave potential for GaN-based Gunn devices / E. Aleskseev, D. Pavlidis // Electronic Lett. – 2000. – 36, N 2. – P. 176–178.
4. Large-signal analysis of terahertz generation in submicrometer GaN Diodes / E. A. Barry, V. N. Sokolov, K. W. Kim, R. J. Trew // IEEE Sensors Journal. – 2010. – 10, Iss. 2. – P. 765–771.
5. Acharyya A. Potentiality of IMPATT Devices as THz Source / A. Acharyya, J. P. Banerjee // IETE J. Res. – 2013. – 59, Iss. 2. – P. 118–127.
6. Levinshtein M. Breakdown phenomena in semiconductors and semiconductor devices / M. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein // Selected topics of electronic and system. – 36. – Singapore: World Scientific Publ., 2005. – 208 p.
7. Influence of impact ionization on oscillation efficiency of short GaN-based diodes / O. V. Botsula, E. D. Prokhorov, D. S. Svergun, K. H. Prykhodko // 24<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2014): proc. – 2014. – Vol. 1. – P. 143–144.
8. Botsula O. V. Static Characteristics of the Graded Gap and Heterojunction Diodes Containing the Cathode Static Domain / O. V. Botsula, K. H. Prykhodko // 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS 2016): proc. – P. 163–166.
9. Vurgaftman I. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys / I. Vurgaftman, J. R. Meyer, L. R. Ram-Mohan // J. Appl. Phys. – 2001. – 89, N 11. – P. 5815–5875.
10. Ильин В. И. Квазиэлектрические поля в полупроводниках и полупроводниковых структурах / В. И. Ильин // Соросский образовательный журн. – 2001. – 7, № 11. – С. 109–115.

Рукопись поступила 14.11.2016.

O. V. Botsula, K. H. Pryhodko, V. A. Zozulia

#### IMPACT IONIZATION IN SHORT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -BASED DIODES

The development of millimeter and terahertz wave ranges is one of the main objectives of radiophysics. However, there are not many active elements that can operate in those ranges. Impact ionization in wide gap semiconductors is a fast process and can be used in active elements operating in these ranges. In this paper the charge transfer in short diodes (the length of the active area is less than  $0.3 \mu\text{m}$ ) is considered. The purpose of the study is to determine the appearance conditions and peculiarities of impact ionization. The influence of impact ionization on device characteristics is determined. The possibility of creating localized high electric field region is shown. The field magnitude is enough for obtaining impact ionization. It is a possibility to operate the impact ionization by changing the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  composition distribution along the diode. The result of the study is the determination of properties of impact ionization in the proposed structures. They can be used for further detailed analysis of physical processes of the structures and their manufacturing.

**Key words:** diodes, impact ionization, heterojunction, graded gap layer, domain, electric field strength, impedance.

О. В. Боцула, К. Г. Приходько, В. О. Зозуля

#### УДАРНА ІОНІЗАЦІЯ В КОРОТКИХ ДІОДАХ НА ОСНОВІ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Освоєння міліметрового і терагерцового діапазонів є однією із актуальних задач радіофізики. Проте на сьогодні набір активних елементів, що здатні працювати у вказаних діапазонах, є обмеженим. Ударна іонізація в широкозонних нітридних сполуках представляє собою швидкоплинний процес і може бути використана в активних елементах зазначених діапазонів. У цій роботі досліджується перенесення заряду в коротких (з довжиною активної області менше  $0,3 \mu\text{м}$ ) діодних структурах на основі  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  з метою визначення умов виникнення та особливостей ударної іонізації, а також її вплив на характеристики приладів. Показано можливість отримання локалізованої області з високою напруженістю електричного поля, достатньою для виникнення ударної іонізації та керування нею шляхом зміни розподілу складу  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  по довжині діода. Результатами досліджень є визначення основних закономірностей розвитку ударної іонізації в запропонованих діодних структурах. Вони є орієнтиром для подальшого детального аналізу фізичних процесів та практичної реалізації таких структур.

**Ключові слова:** діоди, ударна іонізація, гетеро-перехід, варізонний шар, домен, напруженість електричного поля.