

УДК 621.382.2

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДОВ ГАННА НА ОСНОВЕ $Al_{1-x}In_xN$ ПРИ ИХ РАБОТЕ В РЕЗОНАТОРЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Аркуша Ю.В., Пискун А.А., Стороженко И.П.

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4  
тел. (057) 705-12-62

Поступила в редакцию 14 апреля 2010 г.

Приведены результаты исследования энергетических и частотных характеристик диодов Ганна на основе  $Al_{1-x}In_xN$  для различных значений концентраций примесей в активной области при их работе в двухконтурном резонаторе. Показано, что использование напряжения сложной формы приводит к увеличению эффективности генерации на основной гармонике по сравнению с работой в одноконтурном резонаторе. Увеличение концентрации примесей в активной области приводит к увеличению эффективности генерации как на первой, так и на второй гармонике. За счет эффективной работы на второй гармонике появляется возможность получения генерации до частот субмиллиметрового диапазона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** диод Ганна, дипольные домены, заряженные слои, пролетная частота, эффективность генерации.

Наведені результати дослідження енергетичних та частотних характеристик діодів Ганна на основі  $Al_{1-x}In_xN$  для різних значень концентрації домішок в активній області діода при їх роботі в двоконтурному резонаторі. Показано, що використання напруги складної форми призводить до збільшення ефективності генерації на першій гармоніці в порівнянні з роботою в одно контурному резонаторі. Зростання концентрації домішок в активній області призводить до зростання ефективності генерації як на першій, так на другій гармоніці. За рахунок ефективної роботи на другій гармоніці з'являється можливість отримання генерації до частот субміліметрового діапазону.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** діод Ганна, дипольні домени, заряджені шари, пролітна частота, ефективність генерації.

Results of research of power and frequency characteristics of Gunn diodes on the basis of  $Al_{1-x}In_xN$  for various values of concentration of impurity in active area in biharmonic regime are present. It is shown, that using of voltage of the complex form leads to increase of efficiency generation at the basic harmonic in comparison with work in harmonic regime. The increase of impurity concentration in active area leads to increase of efficiency generation both on the first, and on the second harmonic. At the expense of effective work on the second harmonic there is a possibility of reception of generation to frequencies of a submillimetric range.

**KEY WORDS:** Gunn diode, dipole domain, accumulation layers, transit frequency, efficiency generations

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из возможностей освоения коротковолновой части мм – и субмм - диапазонов электромагнитных волн диодами Ганна – исследование энергетических и частотных характеристик диодов на основе новых полупроводниковых материалов, в которых возможен эффект междолинного переноса электронов (МПЭ) и которые по своим характеристикам могут превосходить исследованные ранее материалы [1,2,3 и др.]. Кроме того, эффективная работа таких диодов в резонаторе сложной формы позволяет увеличить КПД генерации на основной гармонике и значительно расширить частотные возможности работы за счет генерации диодами на второй и выше гармониках. В последнее время объектом пристального изучения полупроводниковых материалов, в которых возможен эффект междолинного переноса электронов являются нитриды [4]. И одним из таких материалов является  $Al_{1-x}In_xN$ , который получается из двух бинарных соединений - из  $AlN$  и  $InN$ . Перспективность использования его для диодов Ганна основана на том, что минимальная скорость дрейфа электронов на зависимости  $V(E)$  примерно в 2 раза превышает (при содержании  $In$  порядка 80%) соответствующую скорость дрейфа электронов для  $GaAs$ . Известно, что в пролетном режиме работы диодов Ганна пролетная частота определяется именно этой скоростью дрейфа. Поэтому для одних и тех же длин активных областей диодов появляется возможность получения более высоких частот генерации. Постепенно сокращая длину активной области диодов и исследуя их энергетические характеристики с различной концентрацией примесей в активной области при их работе в двухконтурном резонаторе, можно таким образом определить частотные возможности работы диодов Ганна на основе этого полупроводника.

Цель данной работы – исследовать энергетические и частотные характеристики диодов Ганна на основе  $Al_{1-x}In_xN$  с дипольными доменами и заряженными слоями с различной длиной активной области и с различной концентрацией примесей в ней при их работе в двухконтурном резонаторе.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе исследования проведены с помощью двухтемпературной модели [1]. Система уравнений состоит из уравнений непрерывности, плотности тока, баланса энергий для каждой из долин зоны проводимости и уравнения Пуассона.

$$\frac{\partial n_i}{\partial x} + \frac{1}{q} \frac{\partial J_i}{\partial x} = -n_i A_i(T_i) + n_j A_j(T_j) \quad (1)$$

$$J_i = q n_i \mu_i E - \mu_i \frac{\partial(n_i T_i)}{\partial x} k \quad (2)$$

$$\frac{\partial(n_i T_i)}{\partial x} = \frac{2}{3} E J_i \frac{5}{3q} \frac{\partial(J_i T_i)}{\partial x} + \frac{2}{3} (T_j n_j C_j(T_j) - T_i n_i C_j(T_j)) \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{4\pi q}{\varepsilon} (n_i + n_j - n_0) \quad (4)$$

Для исследования выбран  $Al_{1-x}In_xN$ , так как по оценкам работы диода в режиме ОНОЗ частотный предел может достигать более 500 ГГц. В двухуровневой Г-Л модели использованы следующие основные параметры:

Таблица 1. Основные параметры полупроводников InN и AlN

Нитриды	InN	AlN
$E_g$ , эВ	1,89	6,2
$m_r$	$0,11 * m_0$	$(0,32-0,48) * m_0$
$\mu$ , $cm^2/(B * c)$	3200	135
$V_{max}$ , см/с	$4,3 * 10^7$	$1,7 * 10^7$
$V_{min}$ , см/с	$2,5 * 10^7$	$1,4 * 10^7$

Промежуточные значения основных параметров в зависимости от процентного содержания In определялись с помощью линейной аппроксимации при переходе от одного полупроводникового соединения к другому.

Рассматривались диоды Ганна с длиной активной области  $l_a = 2.5$  мкм и менее с высокоомной неоднородностью у катода ( $n^+ - n^- - n_0 - n^+$ -структура) и с однородно легированной активной областью ( $n^+ - n_0 - n^+$ -структура).

Энергетические характеристики диодов с МПЭ исследовались при приложении к образцу напряжения вида:

$$U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t - U_2 \cos(2\omega t) \quad (5)$$

с учетом действия первой и второй гармоники, что соответствует работе диода Ганна в двухконтурном резонаторе, один из контуров которого настроен на основную частоту, а второй – на частоту второй гармоники.

Выбор концентрации примесей  $n_0(x)$  для диодов различной длины был обусловлен выбором единого для всех длин соотношения  $n_0 l_a$ : для концентрации  $n1$  -  $n_0 l_a = 2,5 * 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , для концентрации  $n2$  -  $n_0 l_a = 4 * 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , для концентрации  $n3$  -  $n_0 l_a = 5 * 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , т.е. случая, когда в образце периодически возникают домены сильного поля и образец является генератором на пролетной частоте. Отыскание максимального значения КПД проводилось путем оптимизации  $U_0$ ,  $U_1$  и  $U_2$  на максимум КПД на различных частотах  $\omega$ .

В диодах с высокоомной неоднородностью распространяются дипольные домены. Максимумы эффективностей генерации (рис.1) на первой гармонике наблюдаются на пролетных частотах и составляют ~ 2.25% ( $l_a = 2.5$  мкм, концентрация  $n1$ ), ~ 3.23% ( $l_a = 2.5$  мкм, концентрация  $n2$ ), ~ 7.4% ( $l_a = 2.5$  мкм, концентрация  $n3$ ). При этом КПД генерации на второй гармонике для тех же значений длины активной области и концентрации примесей в ней соответственно ~0.61%, ~ 1.28% наблюдаются на удвоенной пролетной частоте.

Необходимо отметить некоторые особенности работы таких диодов. Для всех рассмотренных длин активных областей диодов частотные диапазоны работы на первой и второй гармониках пересекаются, т.е. эффективная работа таких диодов возможна в достаточно широком частотном диапазоне. Кроме того, увеличение концентрации примесей в активной области диодов приводит к увеличению эффективности

генерации как на первой, так и на второй гармониках и при этом максимумы эффективностей генерации смещаются в сторону более высоких частот. Пролетные частоты исследованных диодов отличаются от пролетных частот соответствующих диодов на основе GaAs. Как и предполагалось, это объясняется большими значениями минимальной скорости дрейфа на зависимости  $V(E)$ .

С уменьшением длины активной области диодов уменьшается эффективность генерации. Уменьшение КПД генерации в этом случае объясняется тем, что с уменьшением длины активной области увеличивается рабочая частота (пролетный режим) и все в большей степени сказываются инерционные эффекты междолинного перераспределения электронов.

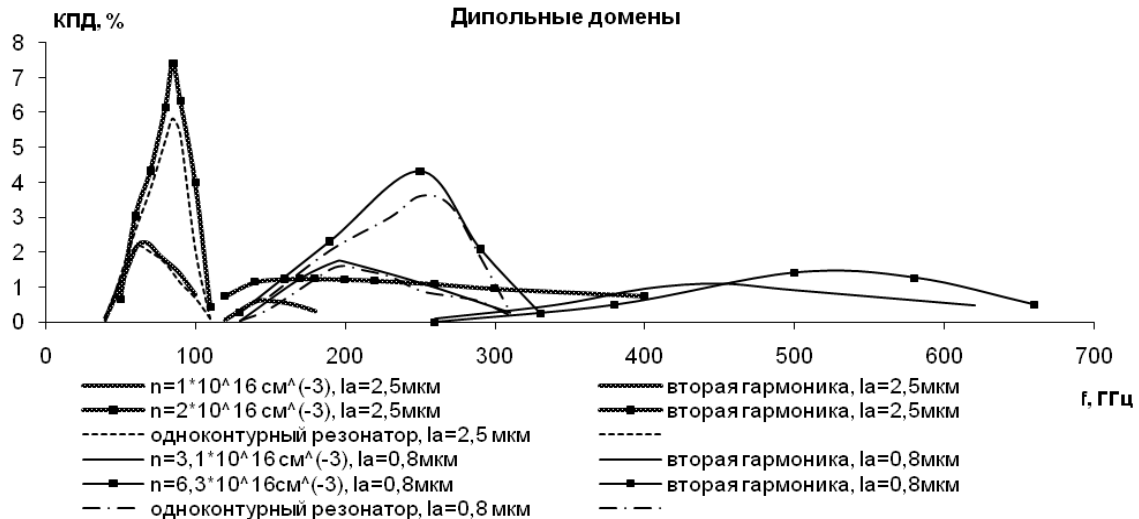


Рис.1. Зависимость КПД от частоты для диодов на основе  $\text{Al}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  с дипольными доменами для различных длин активных областей и концентрации примесей в них

В диодах с однородным профилем легирования распространяются заряженные слои, эффективность генерации которых меньше, чем у диодов с дипольными доменами. Как и в случае с дипольными доменами максимумы эффективности генерации наблюдаются на пролетных частотах (рис.2) и составляют  $\sim 1.7\%$  ( $l_a=2.5 \text{ мкм}$ , концентрация  $n_1$ ),  $\sim 2.23\%$  ( $l_a=2.5 \text{ мкм}$ , концентрация  $n_2$ ),  $\sim 3.22\%$  ( $l_a=2.5 \text{ мкм}$ , концентрация  $n_3$ ). При этом КПД генерации на второй гармонике для тех же значений длины активной области и концентрации примесей в ней соответственно  $\sim 0.48\%$ ,  $\sim 0.7\%$  и  $\sim 1.2\%$  наблюдаются на удвоенной пролетной частоте. Уменьшение эффективности генерации у диодов с заряженными слоями объясняется как и в диодах на основе GaAs наличием «мертвой зоны», т.е. расстояния, на котором электроны успевают набрать достаточную энергию для перехода в боковые долины.

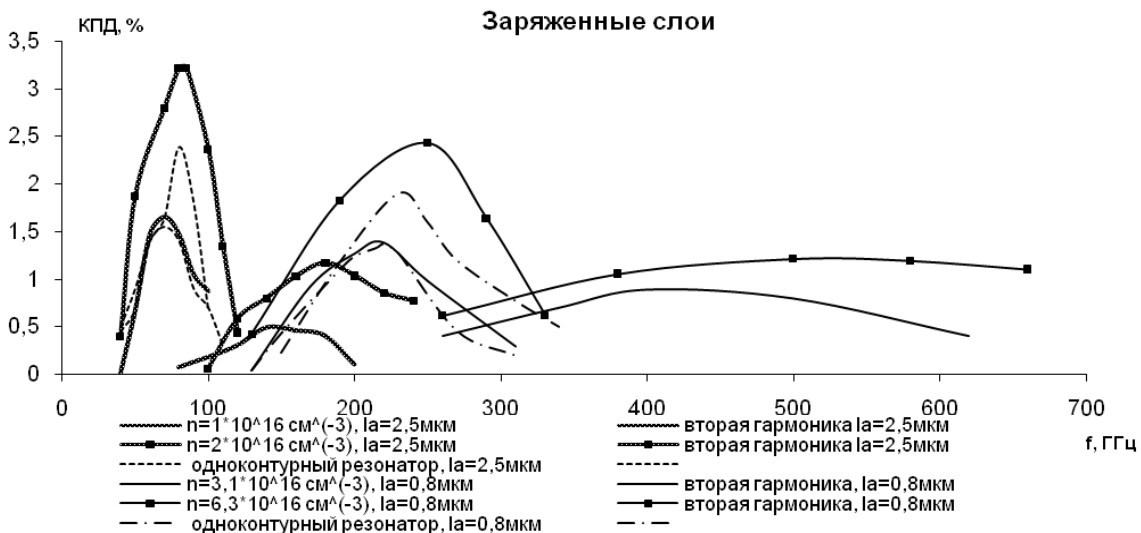


Рис.2. Зависимость КПД от частоты для диодов на основе  $\text{Al}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  с заряженными слоями для различных длин активных областей и концентрации примесей в них

Как и в случае диодов с дипольными доменами с уменьшением длины активной области эффективность генерации уменьшается, что также объясняется увеличением инерционных эффектов междолинного перераспределения электронов.

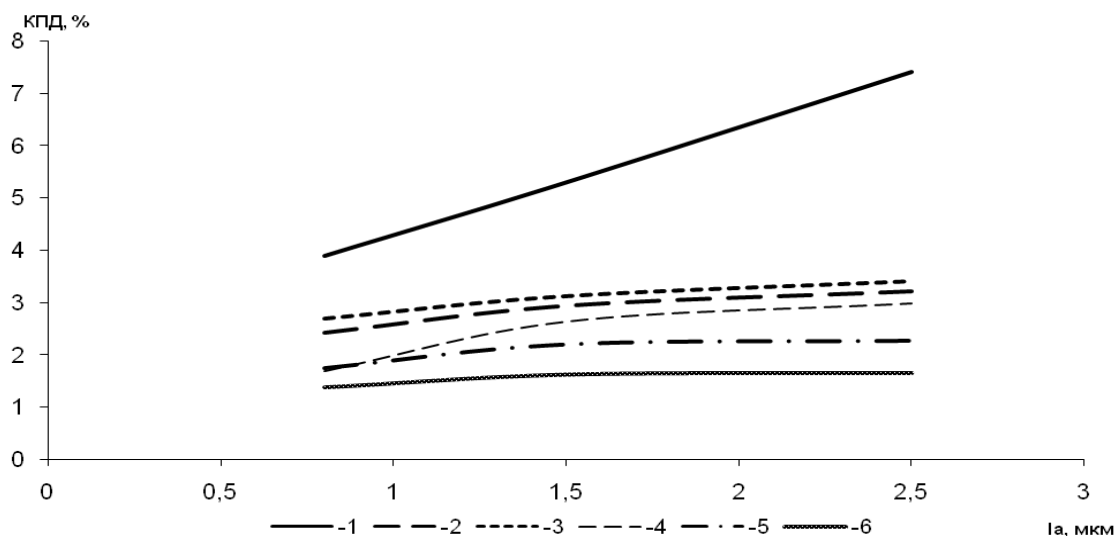


Рис. 3. Зависимость эффективности генерации диодов на основе  $Al_{1-x}In_xN$  с дипольными доменами (кривые 1,2,5) и с заряженными слоями (кривые 3,4,6) от длины активной области диодов для различных значений  $n_0I_a$

Несмотря на то, что исследованные диоды по частотным возможностям превосходят диоды Ганна на основе GaAs, по энергетическим характеристикам они им уступают. Это связано с тем, что отношение  $V_{max}/V_{min}$  на зависимости  $V(E)$  у  $Al_{1-x}In_xN$  хуже, чем аналогичное отношение для GaAs.

### ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что в диодах Ганна на основе  $Al_{1-x}In_xN$  в зависимости от типа катодного контакта могут распространяться дипольные домены или заряженные слои. Эффективность генерации у диодов с дипольными доменами выше, чем у диодов с заряженными слоями. Пролетные частоты таких диодов выше, чем пролетные частоты диодов на основе GaAs, что обусловлено большими значениями минимальной скорости дрейфа на зависимости  $V(E)$ ; эффективность генерации диодов Ганна на основе  $Al_{1-x}In_xN$  ниже, а частотные возможности выше. Частотные диапазоны работы исследованных диодов на первой и второй гармониках перекрываются для всех рассмотренных длин диодов. Увеличение концентрации примесей в активной области диодов приводит к увеличению эффективности генерации как на первой, так и на второй гармониках, что позволяет использовать данный полупроводниковый материал с целью освоения диодами Ганна субмиллиметрового диапазона электромагнитных волн.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркуша Ю.В., Дрогаченко А.А., Прохоров Э.Д. Влияние формы напряжения на энергетические характеристики диода Ганна с длиной активной области  $\sim 1$  мкм // Радиотехника и электроника, 1988, т.33, № 5, с. 1050-1054.
2. Аркуша Ю.В., Дядченко А.В., Прохоров Э.Д. Возможности генерации диодами Ганна на основе  $In_xGa_{1-x}As$  // Радиотехника и электроника, 1991, т.36, № 7, с. 1401-1104.
3. Аркуша Ю.В., Прохоров Э.Д., Стороженко И.П. Диоды Ганна миллиметрового диапазона на основе  $InP_{0,6}As_{0,4}$  // Радиотехника и электроника, 1994, т.39, № 11, с. 1816-1818.
4. J.A.Maiewsky, M.Stadele, and P.Vogl. *Electronic structure of ally strained wurtzite crystal GaN and AlN. Mat. Res.Soc.Symp. Proc. 449, 887-892 (1997).*