

**М. В. Кайдаш**

*Национальный фармацевтический университет  
53, ул. Пушкинская, Харьков, 61002, Украина  
E-mail: [storozhenko.igor@gmail.com](mailto:storozhenko.igor@gmail.com)*

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИЗОННЫХ AlInN ДИОДОВ ГАННА

По своим свойствам полупроводниковые нитриды являются перспективными материалами для быстродействующих твердотельных электронных приборов, в том числе работающих на эффекте междолинного переноса электронов. Однако, из-за ряда причин, в частности, большой потребляемой мощности и сложности отвода тепла из активной области прибора, в научной литературе отсутствуют сведения об экспериментальной генерации электромагнитных колебаний с помощью диодов Ганна на основе GaN или InN. В данном исследовании, во-первых, предлагается идея уменьшить потребляемую мощность и повысить эффективность диодов Ганна, во-вторых, проведены численные эксперименты по генерации с помощью диодов Ганна на основе варизонного AlInN, в-третьих, оптимизированы параметры и получены выходные характеристики диодов с разными катодными контактами в широком диапазоне частот. Работа диодов рассмотрена для гармонического и бигармонического режимов работы. Исследование показало, что варизонные AlInN диоды Ганна превосходят однотипные InN и AlN диоды по эффективности генерации, выходной мощности и предельной рабочей частоте, которая составила  $0,9 \div 1,3$  ТГц при длине активной области 0,15 мкм. Потребляемая мощность варизонных AlInN диодов на  $3 \div 20$  % меньше потребляемой мощности InN 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. 4. Табл. 3. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** диод Ганна, варизонный полупроводник, полупроводниковый нитрид, междолинный перенос электронов, субмиллиметровый диапазон, нитрид индия, нитрид алюминия.

Нитриды элементов III группы привлекают внимание как перспективные материалы для различных быстродействующих электронных приборов, в том числе приборов, работающих на эффекте междолинного переноса электронов (МПЭ). К таким материалам относятся AlN, InN и GaN. В целом ряде работ [1–5] проведены численные эксперименты по генерации электромагнитных колебаний субмиллиметрового (субмм) диапазона с помощью диодов Ганна (ДГ) на основе полупроводниковых нитридов. В них показана перспективность таких приборов до частот  $1 \div 2$  ТГц. В то же время экспериментальных исследований полупроводниковых нитридов выше порогового значения электрического поля крайне мало. Можно назвать только публикацию [6], где в импульсном режиме наблюдалась вольтамперная характеристика (ВАХ) выше порогового поля и проведены измерения отрицательной дифференциальной проводимости в GaN. Экспериментальной генерации на эффекте МПЭ, насколько нам известно, в научных публикациях отмечено не было. Основная проблема, не позволяющая получить генерацию, состоит в отводе тепла от активной области прибора [4, 5]. Второй важной нерешенной проблемой является разогрев электронного газа у катодного контакта. Способы, с помощью которых удавалось решить эту проблему в ДГ на основе GaAs или InP, оказались для полупроводниковых нитридов малоэффективными [4]. Одним из малоизученных направлений в области создания ДГ является использование варизонных полупроводниковых соединений, которые позволяют преодолеть необходимость в разо-

греве электронного газа у катода [7–9]. В соответствии с описанными выше проблемами по использованию полупроводниковых нитридов в ДГ и возможностью их решения с помощью варизонных полупроводников, целью данного исследования является изучение особенностей генерации электромагнитных колебаний ДГ на основе варизонного AlInN.

### 1. Постановка задачи и параметры.

Выбор соединения AlInN обусловлен следующими причинами. Из полупроводниковых нитридов с гексагональной кристаллической решеткой (модификация вюрцит) InN обладает максимальной пиковой дрейфовой скоростью электронов и минимальным значением пороговой напряженности электрического поля [1–5]. Соединение InN уступает GaN и AlN по инерционности МПЭ и вероятности перекрытия МПЭ ударной ионизацией. По оценкам [2, 4] InN-ДГ в миллиметровом и субмм диапазонах должны обладать лучшими характеристиками по сравнению с GaN- и AlN-ДГ. Для предотвращения перекрытия МПЭ ударной ионизацией целесообразно применять тройные соединения InGaN или InAlN, что увеличит ширину запрещенной зоны, но уменьшит подвижность электронов. Для повышения эффективности генерации (КПД) предпочтительно использовать варизонные соединения с возрастающим по координате энергетическим зазором между неэквивалентными долинами. В соединении AlN энергетический зазор между центральной долиной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной на 0,6 эВ меньше, чем GaN, что и определило выбор AlN для пары к InN.

В данном исследовании процентное распределение InN в соединении  $Al_{1-x(z)}In_{x(z)}N$  задается зависимостью

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

где  $x_1$  и  $x_2$  – предельное содержание InN на  $-\infty$  и  $+\infty$ ;  $z_0$  – координата центра варизонного слоя;  $l_v$  – длина варизонного слоя.

Необходимо с помощью численных экспериментов получить оптимизированные по напряжению питания зависимости эффективности генерации от частоты для разных значений длин активной области и варизонного слоя. Рассматривается работа ДГ с тремя различными профилями легирования (тип ДГ) –  $n^+n^-n^+$ ,  $n^+n^-n^-n^+$  и  $n^+n^-n^+n^-n^+$ . Схема зоны проводимости и распределение InN в  $n^+n^-n^+$ -ДГ представлены на рис. 1.

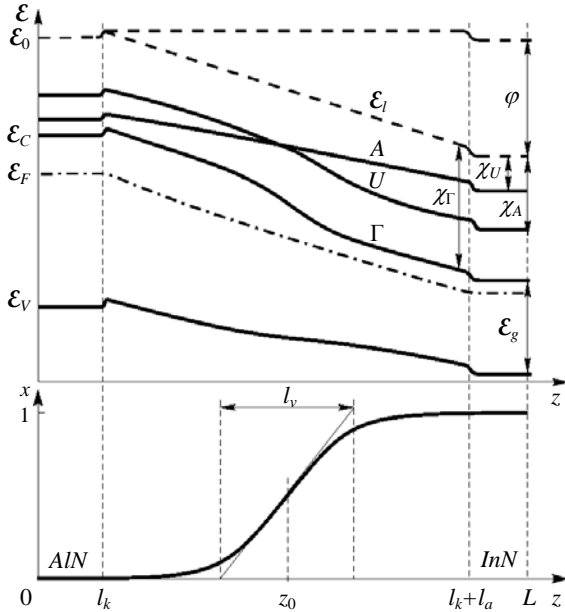


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма и распределение бинарной компоненты  $x$  в варизонном  $Al_{1-x(z)}In_{x(z)}N$ -ДГ

На схеме обозначено  $\epsilon_0$  – уровень вакуума при отсутствии внешних сил;  $\epsilon_l$  – уровень вакуума с внешними силами (локальный);  $\epsilon_c$  – дно зоны проводимости (энергетический минимум  $\Gamma$ - долины);  $\epsilon_f$  – энергетический уровень Ферми;  $\epsilon_v$  – потолок валентной зоны;  $\epsilon_g$  – ширина запрещенной зоны;  $\Gamma$ ,  $U$  и  $A$  – энергетический минимум  $\Gamma$ -,  $U$ - и  $A$ -долины;  $\chi$  – энергия электронного сродства;  $\phi$  – потенциал внешних сил;  $z$  – пространственная координата;  $l_k$ ,  $l_a$  и  $l_v$  – длина катода, активной зоны и варизонного слоя соответственно. Длина активной области  $l_a$  составила 0,4, 0,8 и 2,5 мкм с концентрацией ионизированных примесей  $n_0$  в ней равной  $10^{17}$ ,  $8 \cdot 10^{16}$  и  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  соот-

ветственно. Концентрация примесей в  $n^+$ -области  $n^-n^+$ -катода составила  $8 \cdot 10^{16}$  ( $l_a = 2,5$  мкм) и  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  ( $l_a \leq 0,8$  мкм), а в  $n^-$ -области на порядок меньше, чем в активной. Температура кристаллической решетки считалась постоянной  $T_0 = 300$  К.

**2. Методика исследования.** Исследования проводились с помощью трехуровневой модели МПЭ в варизонных полупроводниках, основанной на решении кинетического уравнения Больцмана для смещенного максвелловского распределения электронов [8]. Данная модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнений непрерывности (2), плотности тока (3) и баланса энергии (4) для каждой из трех неэквивалентных долин зоны проводимости полупроводника, а также уравнения Пуассона (5):

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

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

$$\frac{3}{2} \kappa_b \frac{\partial n_i T_i}{\partial t} = j_i E + \frac{j_i}{e} \frac{\partial \chi_i}{\partial z} - \frac{5}{2} \kappa_b \frac{1}{e} \frac{\partial (j_i T_i)}{\partial z} - \frac{3}{2} \kappa_b \left( \frac{n_j T_j}{\tau'_{\epsilon,ji}} + \frac{n_k T_k}{\tau'_{\epsilon,ki}} - \frac{n_i T_i}{\tau_{\epsilon,ii}} \right); \quad (4)$$

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

где индексы  $i, j$  и  $k$  определяют три неэквивалентные долины. Уравнения (2)–(4) 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;  $\tau_{n,ij}$ ,  $\tau_{\epsilon,ij}$  – время релаксации концентрации и энергии электронов при междолинном переходе из  $i$ - в  $j$ -долину;  $\tau_{\epsilon,i}$  – время релаксации энергии электронов в  $i$ -долине;  $\chi_i$  – энергия, необходимая, чтобы перевести электроны с энергетического минимума  $i$ -й долины до локального уровня вакуума;  $E$  – напряженность электрического поля,  $n_0$  – концентрация ионизированных доноров;  $\epsilon$  – 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. В наших расчетах учитывались  $\Gamma$ ,  $A$  и  $U$  энергетические минимумы [4]. Система уравнений (2)–(5) решалась численными методами. 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 характеристики.

В варизонных AlInN-ДГ независимо от профиля легирования реализуется режим с нарастающими волнами пространственного заряда – доменами, в отличие от InN-ДГ  $n^+-n-n^+$ -структуры, в которых формируются обогащенные слои. В целом же работа ДГ с разным профилем легирования на основе варизонного AlInN определяется теми же особенностями, что и ДГ на основе бинарных нитридов InN и AlN [4]. Следует обратить внимание, что при выбранном уровне легирования активной области линейные размеры сформированного домена больше активной зоны. Кроме того, домены проникают в анод на глубину порядка 100 нм, что приводит к смещению оптимальной частоты генерации в сторону меньших частот. Этот же недостаток характерен AlN- и InN-ДГ.

Особенностью ДГ на основе варизонных полупроводников является зависимость выходных характеристик от скорости изменения процентного содержания бинарных компонентов, которая в данном случае определяется длиной варизонного слоя  $l_v$ . Зависимости пиковых значений эффективности генерации от  $l_v$  разных типов ДГ имеют оптимумы (рис. 2).

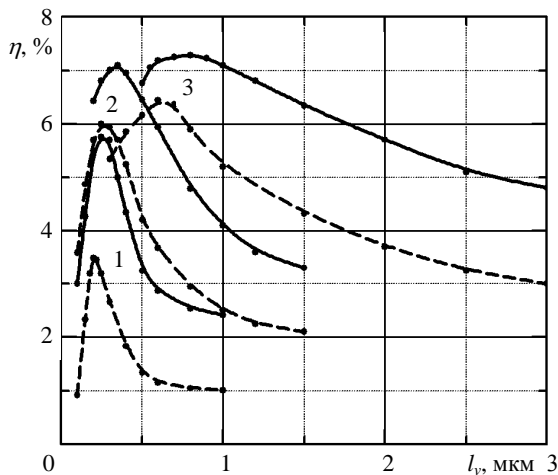


Рис. 2. Зависимость пиковых значений эффективности генерации Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N-ДГ от длины варизонного слоя при разной длине активной области: 1 – 0,4 мкм; 2 – 0,8 мкм; 3 – 2,5 мкм. Непрерывные линии –  $n^+-n^-n-n^+$ -ДГ, пунктирные –  $n^+-n-n^+$ -ДГ

Оптимальная длина варизонного слоя, при которой КПД максимален, зависит от типа катодного контакта, длины активной области и концентрации ионизированных примесей в ней. Особенностью варизонных AlInN-ДГ является то,

что оптимальная длина варизонного слоя меньше длины активной области (табл. 1) в отличие от AlGaAs- [9] или InGaAs-ДГ [10], у которых она приблизительно равна длине активной области.

Таблица 1  
Оптимальная длина Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N варизонного слоя

| Тип диода                   | Длина активной области, мкм |      |      |
|-----------------------------|-----------------------------|------|------|
|                             | 2,5                         | 0,8  | 0,4  |
| Длина варизонного слоя, мкм |                             |      |      |
| $n^+-n-n^+$                 | 0,63                        | 0,26 | 0,20 |
| $n^+-n^-n-n^+$              | 0,80                        | 0,35 | 0,30 |
| $n^+-n^-n^+-n-n^+$          | 0,72                        | 0,33 | 0,30 |

От длины варизонного слоя также зависит оптимальная частота генерации ДГ  $f_0$ . При увеличении  $l_v$  происходит незначительный рост  $f_0$ . Например, в  $n^+-n-n^+$ -ДГ с  $l_a = 2,5$  мкм при изменении  $l_v$  от 0,3 до 3 мкм  $f_0$  увеличивается с 68 до 72 ГГц. В таком же ДГ, но с  $l_a = 0,8$  мкм при изменении  $l_v$  от 0,1 до 1 мкм  $f_0$  возрастает с 199 до 223 ГГц. В ДГ с высокоомной неоднородностью ( $n^+-n^-$  и  $n^+-n^-n^+$ -катод) влияние  $l_v$  на выходные характеристики слабее.

Наибольшими пиковыми значениями КПД обладают  $n^+-n^-n-n^+$ -ДГ. Им немного уступают  $n^+-n^-n^+-n-n^+$  и  $n^+-n-n^+$ -ДГ.

Для всех типов ДГ максимальная эффективность генерации падает при уменьшении длины активной области (рис. 3, табл. 2). Существенное снижение КПД происходит, когда  $l_a$  становится меньше  $0,8 \div 0,6$  мкм. Пиковые значения КПД однотипных ДГ длиной 0,8 и 2,5 мкм практически одинаковые. Это связано с хорошими инерционными свойствами AlN и InN.

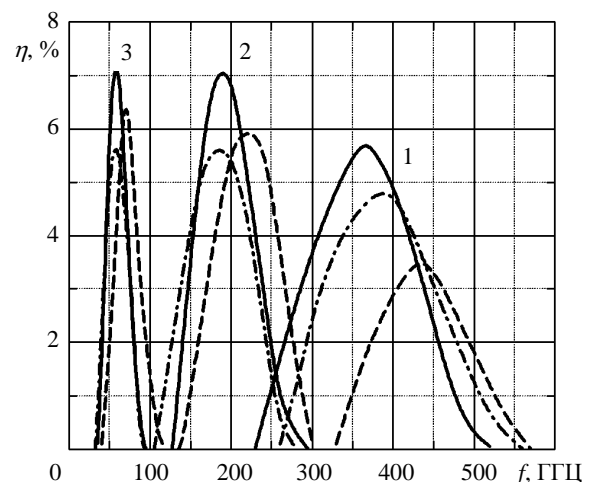


Рис. 3. Зависимость эффективности генерации от частоты при оптимальной длине варизонного слоя и разной длине активной области Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N-ДГ: 1 – 0,4 мкм; 2 – 0,8 мкм; 3 – 2,5 мкм. Непрерывные линии –  $n^+-n^-n-n^+$ -ДГ, пунктирные –  $n^+-n-n^+$ -ДГ и штрихпунктирные  $n^+-n^-n^+-n-n^+$ -ДГ

Зависимости эффективности генерации от частоты разных InN диодов представлены на рис. 4, Они близки к подобным характеристикам, полученным с помощью двухуровневой модели МПЭ в работе [4].

Таблица 2  
Максимальный КПД и соответствующая частота генерации Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N-, InN- и AlN-ДГ

| Тип катода                          | Длина активной области, мкм |                 |            |                 |            |                 |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
|                                     | 2,5                         |                 | 0,8        |                 | 0,4        |                 |
|                                     | $\eta, \%$                  | $f, \text{ГГц}$ | $\eta, \%$ | $f, \text{ГГц}$ | $\eta, \%$ | $f, \text{ГГц}$ |
| Al <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> N |                             |                 |            |                 |            |                 |
| $n^+$                               | 6,4                         | 70              | 5,9        | 220             | 3,49       | 440             |
| $n^+-n^-$                           | 7,3                         | 60              | 7,1        | 190             | 5,70       | 370             |
| $n^+-n^-n^+$                        | 5,7                         | 58              | 5,6        | 185             | 4,81       | 390             |
| InN                                 |                             |                 |            |                 |            |                 |
| $n^+$                               | 3,5                         | 85              | 2,7        | 277             | 1,54       | 540             |
| $n^+-n^-$                           | 5,9                         | 77              | 5,1        | 225             | 3,06       | 480             |
| $n^+-n^-n^+$                        | 5,1                         | 68              | 3,0        | 275             | 2,07       | 480             |
| AlN                                 |                             |                 |            |                 |            |                 |
| $n^+$                               | 1,1                         | 38              | 0,81       | 120             | 0,6        | 205             |
| $n^+-n^-$                           | 1,5                         | 34              | 1,3        | 115             | 1,0        | 200             |

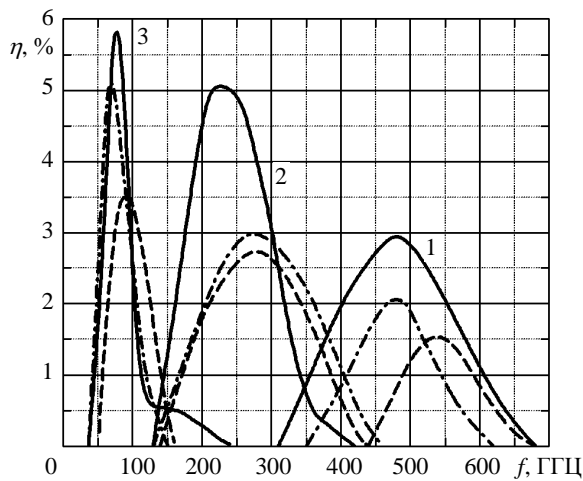


Рис. 4. Зависимость эффективности генерации от частоты при разной длине активной области InN-ДГ: 1 – 0,4 мкм; 2 – 0,8 мкм; 3 – 2,5 мкм. Непрерывные линии –  $n^+-n^-$ -ДГ, пунктирные –  $n^+-n^-n^+$ - и штрихпунктирные  $n^+-n^-n^-n^+$ -ДГ

Сравнительный анализ InN- и варизонных AlInN-ДГ показывает, что AlInN-ДГ превосходят однотипные приборы на основе InN в зависимости от длины и типа катода по КПД в  $1,11 \div 2,32$  и по выходной мощности в  $1,36 \div 1,95$  раза. Потребляемая мощность AlInN-диодов в  $0,80 \div 1,29$  раза больше, чем InN-диодов. При этом уменьшение потребляемой мощности на 3–20 % имеет место только в ДГ  $n^+-n^-n^-n^+$ - и  $n^+-n^-n^-n^-n^+$ -структуры при  $l_a \leq 0,8$  мкм. Следует отметить, что ДГ на основе полупроводниковых нитридов имеют высокие, по сравнению с GaAs, значения выходной мощности (табл. 3), на что также обращалось внимание в публикации [2, 6].

Таблица 3  
Плотность потока выходной мощности Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N-ДГ

| Тип катода                          | Длина активной области, мкм |                   |                  |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------|
|                                     | 2,5                         | 0,8               | 0,4              |
|                                     | W<br>Вт·см <sup>-2</sup>    |                   |                  |
| Al <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> N |                             |                   |                  |
| $n^+$                               | $8,3 \cdot 10^5$            | $6,3 \cdot 10^5$  | $2,0 \cdot 10^5$ |
| $n^+-n^-$                           | $11,3 \cdot 10^5$           | $10,5 \cdot 10^5$ | $4,1 \cdot 10^5$ |
| $n^+-n^-n^+$                        | $8,2 \cdot 10^5$            | $8,1 \cdot 10^5$  | $4,5 \cdot 10^5$ |
| InN                                 |                             |                   |                  |
| $n^+$                               | $4,1 \cdot 10^5$            | $4,6 \cdot 10^5$  | $1,4 \cdot 10^5$ |
| $n^+-n^-$                           | $7,4 \cdot 10^5$            | $6,4 \cdot 10^5$  | $2,2 \cdot 10^5$ |
| $n^+-n^-n^+$                        | $5,86 \cdot 10^5$           | $4,7 \cdot 10^5$  | $2,3 \cdot 10^5$ |
| AlN                                 |                             |                   |                  |
| $n^+$                               | $2,0 \cdot 10^5$            | $1,2 \cdot 10^5$  | $1,1 \cdot 10^5$ |
| $n^+-n^-$                           | $2,7 \cdot 10^5$            | $2,5 \cdot 10^5$  | $1,6 \cdot 10^5$ |

Оптимальные частоты генерации InN-ДГ на 22 % выше, чем варизонных AlInN-ДГ.

Характеристики AlN-ДГ (табл. 2, 3) в рассмотренном диапазоне частот уступают AlInN- и InN-ДГ по эффективности, выходной и потребляемой мощности, а также по оптимальной частоте генерации.

Варизонные ДГ обладают еще одной особенностью: благодаря возрастающей координатной зависимости энергетического зазора между неэквивалентными долинами от приложенного к ДГ напряжения зависит длина области дрейфа неустойчивости заряда в варизонном слое [11]. При возрастании приложенного к диоду напряжения длина области дрейфа растет, а частота колебаний тока уменьшается. При этом с ростом частоты оптимальное питающее напряжение уменьшается. В InN-ДГ  $n^+-n^-n^-n^+$ -структуры также имеет место похожий эффект, но он связан с неоднородным распределением напряженности электрического поля в  $n^-$ -контакте, а не с энергетическим зазором. В отличие от InN-, в AlN-ДГ  $n^+-n^-n^-n^+$ -структуры данный эффект не обнаружен.

Работа InN-, AlN- и варизонных AlInN-ДГ была рассмотрена также в бигармоническом режиме, когда в приложенном к диоду напряжении присутствуют основная и вторая гармоники, что соответствует помещению диода в двухконтурный резонатор. При генерации основной гармоники в двухконтурном резонаторе эффективность генерации и выходная мощность возрастает незначительно. Относительное увеличение КПД составляет 5–6 %. Генерация второй гармоники затруднена из-за больших размеров доменов. Условия, когда в активной области существуют две неустойчивости заряда, найдены не были, поэтому можно предположить, что генерация второй гармоники возможна в режиме умножения частоты или в режиме однородного поля.

Оценки, проведенные для диодов с  $l_a = 0,2$  мкм, и характер зависимости КПД от длины активной области и частоты показывают, что для варизонных AlInN-диодов минимальная длина активной области может составлять около 0,15 мкм и предельная рабочая частота  $0,9 \div 1,3$  ТГц. Минимальная длина активной области InN диодов составляет около 0,35 мкм и предельная частота  $0,7 \div 0,8$  ТГц.

**Выводы.** Варизонные AlInN-ДГ, у которых в активной области состав изменяется от AlN к InN, могут эффективно работать в режиме генерации вплоть до частот  $0,9 \div 1,3$  ТГц. В однотипных InN-ДГ частотный предел составляет  $0,7 \div 0,8$  ТГц. Причиной большего частотного предела работы варизонных ДГ является возрастающая зависимость от координаты энергетического зазора между Г-долиной и ближайшей к ней по энергии боковой долиной.

Абсолютный максимум пиковых значений КПД и выходной мощности варизонных AlInN-ДГ достигается при оптимальной длине варизонного слоя. В зависимости от длины активной области и профиля легирования оптимум длины варизонного слоя составляет  $0,2 \div 0,8$  мкм.

Варизонные AlInN-ДГ превосходят однотипные InN-ДГ по эффективности генерации и выходной мощности, но уступают по оптимальной частоте генерации. Координатная зависимость распределения AlN в AlInN-ДГ приводит к росту амплитуды колебания плотности тока, выходной мощности и эффективности генерации. Повышение среднего значения содержания AlN в варизонном тройном соединении влечет за собой уменьшение средней плотности тока и оптимальной частоты генерации. Однако при этом увеличивается напряжение питания, поэтому заметного уменьшения потребляемой мощности не происходит. Потребляемая мощность AlInN-ДГ с высокоомной неоднородностью у катода и длиной активной области менее 0,8 мкм только на 3–20 % меньше, чем в однотипных InN-диодах.

В рассмотренном диапазоне частот AlN-ДГ уступают InN- и варизонным AlInN-ДГ по КПД, выходной и потребляемой мощности, а также по оптимальной частоте генерации из-за меньших значений подвижности электронов, отрицательной дифференциальной проводимости и большей пороговой напряженности электрического поля в AlN по сравнению с InN.

При генерации основной гармоники в двухконтурном резонаторе относительное увеличение эффективности генерации и выходной мощности составляет 5–6 %. Генерация второй гармоники затруднена из-за больших размеров доменов. Генерация второй гармоники возможна в режиме умножения частоты или в режиме однородного поля.

## Библиографический список

1. *Sevik C.* Efficiency and harmonic enhancement trends in GaN-based Gunn diodes: Ensemble Monte Carlo analysis / C. Sevik, C. Bulutay // *App. Phys. Let.* – 2004. – **85**, N 17. – P. 3908–3910.
2. *Aloise G.* Performance study of nitride-based Gunn diodes / G. Aloise, S. Vitamov, V. Palankovski // *NSTI-Nanotech.* – 2011. – **2**, N 6. – P. 599–602.
3. *Macpherson R. F.* Simulation of gallium nitride Gunn diodes at various doping levels and temperatures for frequencies up to 300 GHz by Monte Carlo simulation, and incorporating the effects of thermal heating / R. F. Macpherson, G. M. Dunn and N. J. Pilgrim // *Semicond. Sci. Technol.* – 2008. – **23**, N 5. – P. 055005.
4. *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.
5. *Temperature effect on the submicron AlGaIn/GaN Gunn diodes for terahertz frequency / Lin'an Yang Wei Mao, Qingyang Yao, Qi Liu et al.* // *J. App. Phys.* – 2011. – **109**, iss. 2. – P. 109–114.
6. *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.
7. *The use of linearly graded composition AlGaAs injectors for intervalley transfer in GaAs: theory and experiment / N. R. Couh, P. H. Beton, M. J. Kelly et al.* // *Solid State Electron.* – 1988. – **31**, N 4. – P. 613–616.
8. *Storozhenko I. P.* Simulation of transferred electron devices with linearly graded composition of 3–5 threefold semiconductor in active zone / I. P. Storozhenko, E. D. Prokhorov, Yu. V. Arkusha // *Intern. J. Infrared and Millimeter Waves.* – 2004. – **25**, N 6. – P. 879–890.
9. *Стороженко И. П.* Диоды Ганна на основе варизонного  $Al_{x(c)}Ga_{1-x(c)}As$  с различными катодными контактами / И. П. Стороженко // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2006. – **11**, № 2. – С. 186–197.
10. *Storozhenko I. P.* Influence of the Variband-layer thickness on the energy and frequency characteristics of  $In_{x(c)}Ga_{1-x(c)}As$  Gunn diodes / I. P. Storozhenko, Yu. V. Arkusha, E. D. Prokhorov // *J. Communications Technol. and Electron.* – 2006. – **51**, N 3. – P. 352–358.
11. *Стороженко И. П.* Резонансные частоты диодов Ганна на основе варизонных полупроводниковых нитридов / И. П. Стороженко // *Радиофизика и электрон.* – 2012. – **3(17)**, № 3. – С. 79–82.

*Рукопись поступила 20.11.12 г.*

М. В. Кайдаш

## CHARACTERISTICS OF AlInN GRADED-GAP GUNN DIODES

Semiconductor nitrides are promising materials for high-speed solid-state electronic devices, including those based on the intervalley electron transfer effect. However, due to various reasons, for instance, high power consumption and difficulties of heat removing out of the device active region, the research literature contains no information on the experimental generation of electromagnetic oscillations by means of Gunn diodes based on GaN or InN. The paper presents the following results: firstly, we have proposed the idea how to reduce power consumption and to increase the Gunn diodes efficiency; secondly, we have carried out the numerical experiments on the generation of oscillations by means of Gunn diodes based on graded-gap AlInN, and thirdly, we have optimized the parameters and got the output characteristics of

diodes with different cathode contacts in a wide range of frequencies. We have analyzed both harmonic and biharmonic operating modes of the diodes. We have found out that graded-gap AlInN Gunn diodes outperform InN- and AlN-diodes of the same type by generation efficiency, output power and cutoff operating frequency which equaled  $0.9 \div 1.3$  THz at the active region length of  $0.15 \mu\text{m}$ . Power consumption of graded-gap AlInN-diodes is  $3 \div 20$  % less than power consumption of InN-diodes. Results of our study extend the knowledge of the physical processes of charge transport in complex semiconductor structures and can be useful for the development of new high-speed devices based on semiconductor nitrides.

**Key words:** Gunn diode, graded-gap semiconductor, semiconductor nitride, intervalley electron transfer, submillimeter range, indium nitride, aluminum nitride.

М. В. Кайдаш

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИЗОННИХ AlInN ДІОДІВ ГАННА

За своїми властивостями напівпровідникові нітриди є перспективними матеріалами для швидкодіючих тердотільних приладів, у тому числі на ефекті міждолинного переносу електронів. Однак, через низку причин, зокрема, великої спо-

живаної потужності і складності відведення тепла від активної області приладу, в науковій літературі відсутні дані про експериментальну генерацію електромагнітних коливань за допомогою діодів Ганна на основі GaN або InN. У даному дослідженні, по-перше, пропонується ідея зменшення споживаної потужності і підвищення ефективності діодів Ганна, по-друге, проведено числові експерименти по генерації за допомогою діодів Ганна на основі варизонного AlInN, в-третьєх, оптимізовано параметри й отримано вихідні характеристики діодів з різними катодними контактами в широкому діапазоні частоту Роботу діодів розглянуто для гармонічного і бігармонічного режимів роботи. Дослідження показало, що варизонні AlInN діоди Ганна перевищують однотипні InN і AlN діоди по ефективності генерації, вихідній потужності і граничній робочій частоті, яка складає  $0,9 \div 1,3$  ТГц при довжині активної області  $0,15 \mu\text{m}$ . Споживана потужність варизонних AlInN діодів на  $3 \div 20$  % менша споживаної потужності InN діодів. Результати дослідження розширюють знання про фізичні процеси перенесення 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, напівпровідниковий нітрид, міждолинний перенос електронів, субміліметровий діапазон, нітрид індію, нітрид алюмінію.