

ХАРАКТЕРИСТИКИ GaN-InN ДИОДОВ ГАННА В БИГАРМОНИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Стороженко И. П., Аркуша Ю. В., Пискун А. А., Ярошенко А. Н.
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
тел.: 057-7051262, e-mail: storozhenko_igor@mail.ru

Аннотация — Рассчитаны энергетические характеристики диодов Ганна разной длины на основе варизонного соединения GaN-InN в бигармоническом режиме. Изучено влияние длины переходной области между GaN и InN, концентрации электронов и типов катодного контакта на эффективность диодов на разных частотах. Показано, что в GaN-InN диоды Ганна на второй гармонике могут эффективно работать в терагерцовом диапазоне.

I. Введение

Нитриды элементов III группы привлекают внимание исследователей во многих лабораториях мира как перспективные материалы для быстродействующих электронных приборов. К таким материалам относятся, прежде всего, GaN, AlN и InN. Транспортные свойства этих соединений всесторонне исследованы только численными методами. Пиковые значения дрейфовой скорости электронов и соответствующие им значения напряженности электрического поля в этих полупроводниках больше, чем в GaAs и InP. Это говорит о перспективности GaN, AlN и InN для приборов, работающих на эффекте междолинного переноса электронов (МПЭ) с целью повышения их предельных рабочих частот [1]. Однако достоверных экспериментальных исследований полупроводниковых нитридов выше порогового значения электрического поля в научных публикациях нами не обнаружено. Анализ частотных возможностей этих материалов в достаточной степени не исследован даже теоретически. Следует отметить, что до настоящего времени экспериментальной СВЧ-генерации на эффекте МПЭ с помощью приборов, созданных на основе полупроводниковых нитридов, насколько нам известно, не получено. Для коротких диодов Ганна (ДГ) актуальной проблемой остается эффективный разогрев и термализация электронного газа. Эта проблема особенно остро встает в ДГ на основе полупроводниковых нитридов [1]. Одним из способов ее решения является применение варизонных соединений [2].

Таким образом, уровень изученности транспортных свойств и существование нерешенных проблем по использованию полупроводниковых нитридов в приборах с МПЭ требует тщательного изучения частотных возможностей и других особенностей работы диодов Ганна на основе GaN, AlN и InN. В нашей статье произведен анализ работы ДГ на основе варизонного GaN-InN модификации вюрцит в бигармоническом режиме.

Выбор направления изменения состава полупроводника в активной зоне от GaN к InN обусловлен тем, что ДГ с возрастающей зависимостью $\Delta(z)$ более эффективны, чем диоды на основе пространственно однородных по составу полупроводников [2].

II. Основная часть

В исследовании используется трехтемпературная Г-А-U модель ДГ на основе варизонного $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{N}$. Рассмотрены ДГ с n^+-n и n^+-n^-n катодными контактами. Длина активной области составляла 2.5, 0.8 и 0.4 мкм. Работа ДГ моделируется в двухконтурном

резонаторе в импульсном режиме работы при температуре кристаллической решетки 300 К. В GaN ближайшей к Г долине является U-долина в InN — A-долина. Энергетический зазор между Г и U долиной в GaN составляет 1,35 эВ и между Г и A долиной в InN — 1,68 эВ (табл. 1).

Табл. 1. Минимумы зоны проводимости полупроводниковых нитридов

Table 1. Minima of conditions band of semiconductor nitrides

E_{\min} , эВ	GaN	InN	AlN
Г	3,39	2	6,2
U	4,74	4,5	6,9
A	5,49	3,68	7,2

У катодного контакта, где зарождаются неустойчивости заряда, энергетический зазор Δ между Г-долиной и ближайшей к ней боковой долиной в GaN-InN является возрастающей функцией координаты. Процентное содержание бинарных компонент $x(z)$ в соединении $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{N}$ задавалось соотношением:

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

где l_v — длина варизонного слоя ($l_v = 1/x'(z_0)$); z_0 — координата центра симметрии варизонного слоя (центр активной области), для которой $x(z_0) = 0,5$.

Оценка идеализированного ОНОЗ-режима на основе динамической зависимости $V(E)$ и результаты численных расчетов ДГ в резонансно-пролетном режиме показывают, что диоды на основе полупроводниковых нитридов обладают высокими предельными частотами генерации $1 \div 2$ ТГц [1]. В соответствии со степенью инерционности наибольшую предельную частоту генерации в ОНОЗ-режиме должен иметь AlN, затем GaN и InN. Наибольшую же эффективность генерации следует ожидать в приборах на основе InN, GaN и AlN [2] (табл. 2).

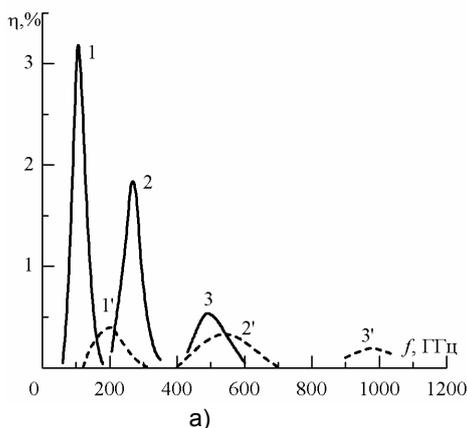
Табл. 2. Максимальная эффективность и оптимальная частота генерации разными диодами Ганна

Table 2. Maximum efficiency and optimum oscillation frequency of different Gunn diodes

Длина Length	InN		GaN		AlN	
	η_{\max} , %	f , GHz	η_{\max} , %	f , GHz	η_{\max} , %	f , GHz
$n^+ - n - n^+$						
2.5 μm	4.2	76	1.6	65	1.2	44
0.8 μm	3.5	260	1.2	230	0.7	130
0.4 μm	2.0	450	0,6	410	0.5	200
$n^+ - n^- - n - n^+$						
2.5 μm	7.4	65	2.3	62	1.8	32
0.8 μm	7.2	190	2.2	220	1,3	114
0.4 μm	4.0	440	1.3	380	1.0	190

Однако следует обратить внимание на низкие (по сравнению с GaAs) значения подвижности электронов вблизи пороговой напряженности поля E_t в InN, GaN и AlN, что увеличивает максвелловское время релаксации, а значит, повышает инерционность приборов.

Из InN, GaN и AlN наиболее перспективным для ДГ субмм диапазона является InN (табл. 2). Однако в приборах на основе InN велика вероятность перекрытия МПЭ ударной ионизацией зона-зона. Поэтому



для ДГ более предпочтительно тройное соединение $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, в частности варизонное. Зависимости эффективности генерации от частоты n^+-n^- и $n^+-n^-n^-$: GaN-InN ДГ представлены на рис. 1.

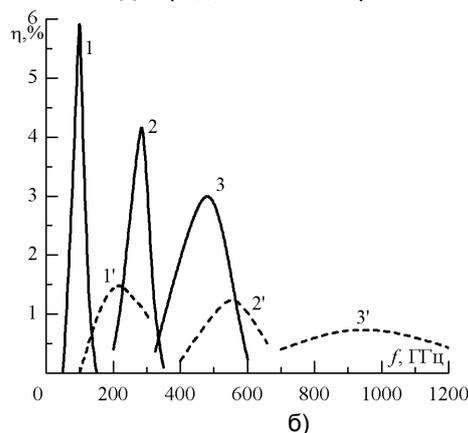


Рис. 1. Зависимость эффективности генерации от частоты GaN-InN ДГ с n^+-n^- (а) и $n^+-n^-n^-$ (б) катодными контактами в бигармоническом режиме при разной длине активной области l_a ($nl_a=5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$): 1, 1' — $l_a = 2.5 \text{ мкм}$; 2, 2' — $l_a = 0.8 \text{ мкм}$; 3, 3' — $l_a = 0.4 \text{ мкм}$. Непрерывные кривые соответствуют генерации основной гармонике, пунктирные — второй гармонике.

Fig. 1. Dependence of generating efficiency vs. frequency of GaN-InN Gunn diodes with n^+-n^- (a) and $n^+-n^-n^-$ (б) cathode contacts in biharmonic mode at different length of thy active area l_a ($nl_a=5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$): 1, 1' — $l_a = 2.5 \text{ мкм}$; 2, 2' — $l_a = 0.8 \text{ мкм}$; 3, 3' — $l_a = 0.4 \text{ мкм}$. The continuous lines denote the main harmonic generating, the dotted ones — the 2nd harmonics

Максимальный КПД сильно зависит от концентрации электронов в активной области (рис. 2). Это говорит, о том, что критерий Камера для нитридов больше, чем в GaAs. Оценки показывают, что критическое значение параметра nl_a в InN составляет $3,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, в GaN — $6,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, в AlN — $9,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (для сравнения в GaAs — $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$).

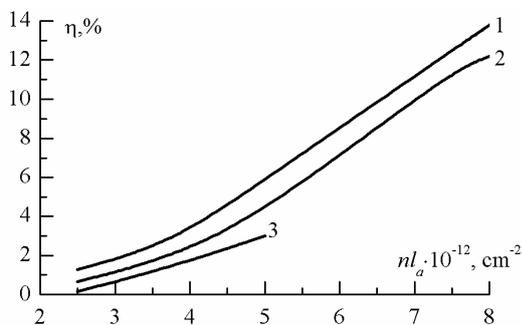


Рис. 2. Зависимость КПД от параметра nl_a в $n^+-n^-n^-$: GaN-InN ДГ: 1 — $l_a = 2.5 \text{ мкм}$; 2 — $l_a = 0.8 \text{ мкм}$; 3 — $l_a = 0.4 \text{ мкм}$.

Fig. 2. Dependence of efficiency factor vs. nl_a parameter in $n^+-n^-n^-$: GaN-InN Gunn diode: 1 — $l_a = 2.5 \text{ мкм}$; 2 — $l_a = 0.8 \text{ мкм}$; 3 — $l_a = 0.4 \text{ мкм}$

Максимальный КПД и соответствующая ему рабочая частота увеличиваются при уменьшении длины варизонного слоя l_v , если $nl_a > 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Оптимальное значение l_v (максимум КПД) составляет $0.25 \div 0.4 \text{ мкм}$. При уменьшении nl_a характер зависимости КПД от l_v постепенно меняется на противоположный.

III. Заключение

Диоды Ганна на основе тройного варизонного соединения $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в импульсном режиме могут эффективно работать на основной гармонике в субмм-диапазоне частот, а на высших гармониках, в частности на второй, в терагерцовом диапазоне.

Критическое значение критерия Крамера в InN, GaN и AlN, а также в тройных соединениях, созданных на их основе в несколько раз превышает соответствующие значение в GaAs и InP. Для реализации в GaN-InN ДГ режима с дрейфующими доменами необходимо, чтобы $nl_a > 4 \div 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Для $nl_a > 4 \div 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ оптимальная длина варизонного слоя в GaN-InN ДГ составляет $0.25 \div 0.4 \text{ мкм}$.

Диоды Ганна на основе варизонного соединения GaN-InN по максимальным значениям КПД и соответствующим им частотам уступают InN, но превосходят GaN-диоды.

Вместе с тем остается не решенной основная проблема приборов с МПЭ на основе полупроводниковых нитридов — эффективный отвод тепла.

IV. Список литературы

- [1] Стороженко И. П., Аркуша Ю. В. Перспективы использования диодов Ганна на основе GaN, AlN и InN. // Радиофизика и электроника. 2011. Т. 2 (16). № 1. С. 58—63.
- [2] Стороженко И. П., Аркуша Ю. В., Животова Е. Н. Диоды Ганна на основе варизонных полупроводников // КрыМи-Ко'2010: материалы конф. Севастополь, 2010. С. 202—203.

GaN-InN GANN DIODES CHARACTERISTICS IN BIHARMONIC MODE

Storozhenko I. P., Arkusha Yu. V., Piskun A. A. Yaroshenko A. N.

V. N. Karazin Kharkov National University 4, Svoboda Sq., Kharkov, 61077, Ukraine

Abstract — The results of researches of power characteristics for Gunn-diode on the base of the alloy variband semiconductor GaN-InN with different active lengths in the biharmonic mode are presented. The influence of the region between GaN and InN length, cathodes contact and frequency on the diodes efficiency is studied. The possibility of efficient operation for Gunn diodes on the second harmonic in terahertz's range is shown.