

УДК 621.382.2

ВЛИЯНИЕ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ

О. В. Боцула, К. Г. Приходько

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина, Тел.(0572) 7051262
E-mail: oleg.botsula@karazin.ua, kyrylo.prykhodko@karazin.ua
Поступила в редакцию 25 мая 2017 г.

Рассматривается работа диодов на основе соединений AlGaN и InGaN в режиме с ограничением накопления объемного заряда. Анализируется эффективность генерации диодов с учетом возможности возникновения ударной ионизации. Анализ работы диодов проводился с использованием метода Монте-Карло в приближении локальной зависимости скорости ударной ионизации от электрического поля. Определены максимальные эффективности генерации диодов на заданной частоте и частотный диапазон их работы. Получены энергетические характеристики диодов с различной длиной и составом материала. Молярная доля алюминия и индия менялась от 0 до 0,4. Показано, что ударная ионизация оказывает наибольшее влияние на работу InGaN – диодов и приводит к уменьшению эффективности их генерации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ударная ионизация, эффективность генерации, диапазон частот, широкозонный полупроводник, напряженность электрического поля.

Розглядається робота діодів на основі сполук AlGaN та InGaN в режимі обмеження накопичення об'ємного заряду. Аналізується ефективність генерації діодів із урахуванням можливості виникнення ударної іонізації. Аналіз роботи діодів проводився із використанням методу Монте-Карло у наближенні локальної залежності швидкості ударної іонізації від напруженості електричного поля. Визначені максимальні ефективності генерації діодів на заданій частоті та частотний діапазон їх роботи. Отримані енергетичні характеристики діодів з різною довжиною і складом матеріалу. Молярна частка алюмінію і індію змінювалась від 0 до 0,4. Показано, що ударна іонізація найбільше впливає на роботу InGaN – діодів та призводить до зменшення ефективності їх генерації.

КЛЮЧЕВІ СЛОВА: ударна іонізація, ефективність генерації, діапазон частот, широкозонний напівпровідник, напруженість електричного поля.

The operation of AlGaN and InGaN – based diodes in limited space accumulation regime is considered. The generation efficiency to obtain taking impact ionization into account is analyzed. The analysis of the diodes operation was performed using Monte Carlo technique. The impact ionization rate is described in local electric field approximation. The maximal generation efficiencies of diodes under specified frequency and there operation frequency ranges are determined. The energy characteristics have been obtained for different diode's lengths and material compositions. The Al and In fractions were changed from 0 to 0,4. The impact ionization is showed to effect strongly to operation of InGaN – based diodes and to lead to efficiency decreasing.

KEYWORD: impact ionization, generation efficiency, frequency range, wide band semiconductor, electric field strange.

ВВЕДЕНИЕ

Анализируя зависимость мощности от частоты для современных твердотельных приборов с использованием традиционных полупроводниковых материалов, можно отметить, что рабочие частоты приборов достигают отметки чуть более 300 ГГц при выходной мощности в единицы милливольт. Однако, обращает на себя внимание тот факт, что наибольшие мощности в несколько киловатт в см-диапазоне получены именно с помощью диодов, работающих в режиме ограничения накопления объемного заряда (ОНОЗ), на арсениде галлия [1]. Такие мощности реализуются при использовании длинных диодов и напряжения питания, действующего в течение короткого промежутка времени (~20-30 нс). Таким образом, для импульсной работы с высокими уровнями мощности ОНОЗ-диоды являются наиболее перспективными [2].

Одним из возможных решений в направлении повышения рабочей частоты приборов, работающих в ОНОЗ-режиме, является использование широкозонных полупроводников. Такие полупроводники в настоящее время находят все более широкое применение во многих оптоэлектронных и электронных приборах.

Среди широкозонных полупроводников самыми многообещающими являются SiC и нитриды (III). Известно, что приборы, основанные на SiC или GaN, по характеристикам намного превосходят приборы, основанные на GaAs или Si. Преимущество нитридов (III) можно использовать для создания активных элементов на частоты более 300 ГГц.

Целью данной работы является анализ работы ОНОЗ-диодов на основе тройных нитридных соединений AlGaN и InGaN с учетом возможного развития в них ударной ионизации.

МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Известно, что в ОНОЗ-режиме в диодах с междолинным переносом электронов в объеме полупроводника не успевает образовываться объемный заряд. Как правило, ОНОЗ-диод работает в резонаторе и напряжение на нем в течение большей части периода больше порогового напряжения, соответствующего началу участка с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). За это время в объеме не должен накопиться

объемный заряд, даже если какая-то доля заряда накопилась – она должна рассосаться за время, в течении которого напряжение меньше порогового. Условия реализации ОНОЗ-режима известны в литературе [2].

Диапазон частот, на которых может реализоваться ОНОЗ режим, определяется из критерия существования такого режима, и составляет при $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для InN [3] – $26 \text{ ГГц} < f \ll 3600 \text{ ГГц}$, для GaN [3] – $26 \text{ ГГц} < f \ll 3000 \text{ ГГц}$, для AlN [3] – $10 \text{ ГГц} < f \ll 1400 \text{ ГГц}$.

Следует отметить, что напряженности электрического поля в объеме нитридных полупроводников, соответствующие участку с ОДП, могут составлять сотни и тысячи кВ/см и достигать критических значений, при которых возможно развитие ударной ионизации в объеме. Возникновение ударной ионизации при больших напряженностях электрического поля приводит к возрастанию концентрации носителей и резкому росту тока через диод, что создает дополнительную нелинейность вольтамперной характеристики. [3]

Времена перехода электронов из центральной долины в боковые в нитридах составляют около $2 \cdot 10^{-13} \text{ с}$, что на порядок меньше, чем в GaAs. В результате, инерционность перераспределения электронов между долинами зоны проводимости проявляется на частотах более 100 ГГц. Поэтому аналитическую зависимость дрейфовой скорости от электрического поля можно использовать только для оценок на частотах до 100 ГГц, а для оценки работы диодов на более высоких частотах нужно использовать методы, учитывающие инерционность перераспределения носителей заряда. В качестве такого метода был выбран метод Монте-Карло. Параметры материала и детали расчета выбирались аналогично [4].

Ударная ионизация рассматривалась в предположении, что она протекает во всем объеме диода и находится на стадии зарождения. В этом случае ток через диод I не намного отличается от тока в отсутствие ударной ионизации I_0 ($\Delta I = I - I_0 \ll I_0$). Учитывая малые времена развития ударной ионизации в нитридах, можно считать процесс развития ударной ионизации независимым от частоты и при работе диода в режиме ОНОЗ использовать локальную зависимость коэффициентов ударной ионизации от электрического поля $\alpha(E)$ совместно с методом Монте-Карло. Таким образом, приращение тока ΔI и ток через диод можно представить в виде [5]:

$$\Delta I = I_0 \int_0^L \alpha(E(x)) dx, \quad (1)$$

$$I = I_0 \left(1 + \int_0^L \alpha(E(x)) dx \right). \quad (2)$$

Влияние резонатора учитывается заданием на диоде соответствующего напряжения в виде [2]

$$U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t, \quad (3)$$

где U_0 - напряжение питания, U_1 - амплитуда переменного напряжения (определяется действием резонатора), f - частота, на которую настроен резонатор. Эффективность генерации (η) или коэффициент полезного действия определяется в виде:

$$\eta = \frac{\int_0^T U_1(t) J(t) dt}{U_0 \int_0^T J(t) dt} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Выражения для $\alpha(E(x))$ в дрейфовом приближении берется в виде:

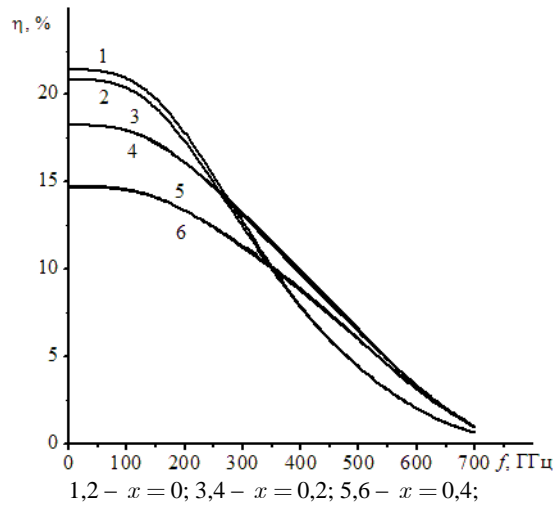
$$\alpha(E) = A \exp\left(-\frac{B}{E}\right). \quad (5)$$

Пороговое поле ударной ионизации в базовом материале (GaN) составляет величину порядка 3 МВ/см. Таким значениям наиболее соответствуют данные приведенные в табл. [6] для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$:

Таблица. Значение коэффициентов A и B .

	GaN	$\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$	$\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}$	$\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}$
$A, \text{ см}^{-1}$	$1,138 \cdot 10^7$	$1,5126 \cdot 10^7$	$2,0647 \cdot 10^7$	$1,7974 \cdot 10^7$
$B, \text{ МВ} \cdot \text{ см}^{-1}$	23,8933	31,6707	36,6251	37,7751

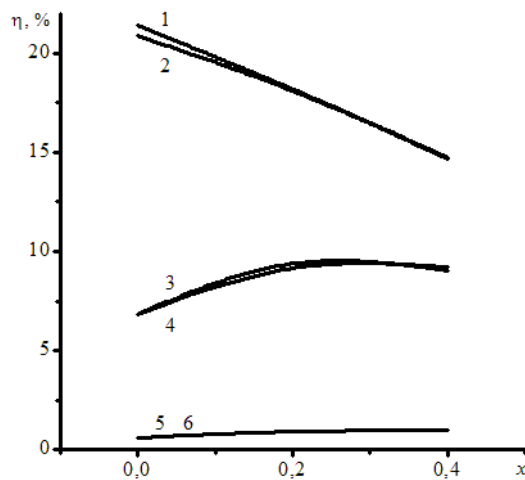
Для заданных значений U_0 , U_1 и частоты резонатора f определялась форма тока через диод $J(t)$. С использованием формулы (4), находилась величина η . Затем из полученных значений выбиралось наибольшее η . Максимальная эффективность вычислялась как с учетом, так и без учета ударной ионизации. Полученные зависимости максимального КПД от частоты для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -диодов показаны на рис. 1.



1,2 – $x = 0$; 3,4 – $x = 0,2$; 5,6 – $x = 0,4$;
1,3,5 – без ударной ионизации; 2,4,6 – с ударной ионизацией.
Рис. 1. Зависимость эффективности генерации диода на основе $Al_xGa_{1-x}N$ от частоты.

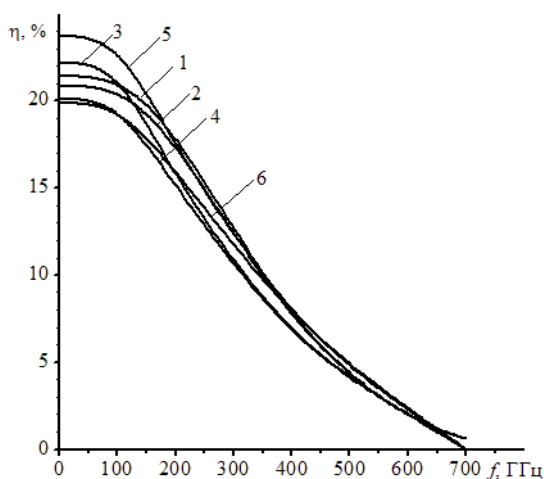
Максимальное значение КПД без учета ударной ионизации составляет при $x = 0$ – 22 %, $x = 0,2$ – 17 %, $x = 0,4$ – 14,5 %. Влияние ударной ионизации ослабляется с ростом содержания алюминия в составе соединения, причем, только при $x = 0$ заметно отличие в кривых, полученных с учетом и без учета УИ. Отличие наблюдается только при малых частотах сигнала. В этом случае максимум эффективности получается при больших величинах переменной составляющей U_1 .

С другой стороны, полученные результаты показывают, что $Al_xGa_{1-x}N$ является более высокочастотным материалом по сравнению с GaN. Наибольшая разница наблюдается при малом содержании Al, например между GaN и $Al_{0,2}Ga_{0,8}N$ и менее заметна, например, между $Al_{0,2}Ga_{0,8}N$ и $Al_{0,4}Ga_{0,6}N$. Это иллюстрируется зависимостями максимальной эффективности от молярной доли алюминия x (рис. 2).



1,2 – $f = 100$ ГГц; 3,4 – $f = 400$ ГГц; 5,6 – $f = 700$ ГГц;
1,3,5 – без ударной ионизации; 2,4,5 – с ударной ионизацией.
Рис. 2. Зависимость эффективности генерации диода на основе $Al_xGa_{1-x}N$ от содержания алюминия.

Зависимости максимального КПД от частоты для $In_xGa_{1-x}N$ -диодов с разным составом показаны на рис. 3. В этом случае видно, что влияние ударной ионизации усиливается с ростом содержания индия в составе соединения. Максимальное значение наблюдается на низких частотах и без учета ударной ионизации составляет для $x = 0$ – 21,4 %, $x = 0,2$ – 22,2 %, $x = 0,4$ – 23,7 %. С учетом ударной ионизации эффективность генерации при $x = 0,2$ падает до 20 %, а при $x = 0,4$ до 15,7 %. Очевидно, что дальнейшее увеличение содержания индия приведет к еще большему снижению КПД.



1,2 – $x = 0$; 3,4 – $x = 0,2$; 5,6 – $x = 0,4$;
1,3,5 – без ударной ионизации; 2,4,6 – с ударной ионизацией.

Рис. 3. Зависимость эффективности генерации диода на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ от частоты.

Из полученных результатов следует, что использование $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ является более перспективным в отсутствия ударной ионизации. Все приведенные выше результаты получены при длине области умножения $L = 10$ мкм. Таким образом, можно предположить, что при рассмотренном содержании индия для $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x=0..0,4$) для диодов с длиной меньше 10 мкм влияние ударной ионизации меньше, что позволит получать более высокие значения КПД, что иллюстрируется зависимостью, показанной на рис. 4.

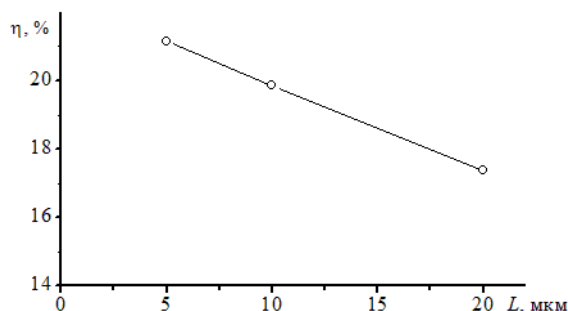


Рис. 4. Зависимость эффективности генерации диода на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ от его длины при содержании индия $x = 0,4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ диодов на основе соединений AlGaN и InGaN , работающих в режиме ОНОЗ, показал, что ударная ионизация в них может существенно сузить диапазон работы диода по напряженности электрического поля и уменьшить эффективность генерации. В особенности, это касается диодов на основе соединения $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}$, для которого при учете ударной ионизации при длине области умножения 10 мкм результаты расчета показали снижение КПД с 23,7% до 15,7%. Ожидается, что в диодах с большей длиной этот эффект будет более выражен, что сужает выбор возможных материалов на основе соединений нитридов (III), пригодных для работы диодов в ОНОЗ-режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Copeland J.A. LSA Oscillator diode theory. – J. Appl. Phys. / J.A. Copeland. – 1967. – Vol. 38. – P. 3096-3103.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С.Зи. – М.: Мир. – 1984. – Т.2. – 456 с.
3. Влияние ударной ионизации на эффективность генерации коротких диодов на основе GaN / Боцула О. В., Прохоров Э. Д., Свергун Д. С., Приходько К. Г. // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». – 2014. – № 10. – Вип. 22. – С. 62 – 65.
4. Botsula O.V. Impact ionization in short $\text{Al}_2\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -based diodes. / Botsula O. V., Pryhodko K. H., Zozulia V. A. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – Vol. 76, No. 1. – Pp. 61-71.
5. Боцула О.В. Генерация гармоник и умножение частоты при ударной ионизации в GaN-диодах. /Боцула О. В., Павленко Д. В., Прохоров Э. Д. // Радиофизика и электроника, ИРЭ НАНУ. – 2009. – Т. 14. – № 2. – С. 212–217.
6. Bulutay C. Electron Initiated Impact Ionization in AlGaIn Alloys Semicond//Sci. Technol./ C. Bulutay. – 2002. – №17. – P.59–62.