

УДК 621.382.2

УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ДИОДАХ С МЕЖДОЛИННЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ AlN, InN

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, И. А. Грищенко

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
61077, пл. Свободы, 4, Харьков, Украина, Тел.(0572) 7051262

E-mail: Eduard.D.Prohkorov@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 15 мая 2009 года

Рассматривается умножение частоты при ударной ионизации в диодах с МПЭ на основе InN, AlN. Вольтамперные характеристики диодов с МПЭ после участка ОДП имеет участок быстрого роста тока, обусловленного развитием ударной ионизации, что вносит дополнительную нелинейность и способствует улучшению в преобразовании частоты. Показано, что при развитии ударной ионизации в таких диодах коэффициент преобразования частоты существенно возрастает и составляет, например, на второй гармонике до 40%. Сравнение КПЧ всех трех соединений показывает, что ударная ионизация в диодах на основе нитридов способствует увеличению КПЧ на гармониках (2-ой, 3-ей) при амплитудах первой гармоники в несколько пороговых напряжений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: AlN, GaN, InN-диоды, коэффициент преобразования частоты, дрейфовая скорость, гармоники.

Розглядається помноження частоти при ударній іонізації в діодах с МПЕ на основі InN, AlN. Вольтамперні характеристики діодів с МПЕ після ділянки НДП мають ділянку швидкого зростання струму, обумовлену розвитком ударної іонізації, що вносить додаткову нелінійність та зумовлює покращення перетворення частоти. Показано, що при розвитку ударної іонізації в таких діодах коефіцієнт помноження частоти значно збільшується і становить, наприклад, на другій гармоніці до 40%. Порівняння КПЧ всіх трьох сполук показує, що ударна іонізація в діодах на основі нітридів сприяє підвищенню КПЧ на гармоніках (2-ій, 3-ій) при амплітудах першої гармоніки в декілька порогових напруг.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: AlN, GaN, InN-діоди, коефіцієнт помноження частоти, дрейфова швидкість, гармоніки.

Multiplication of frequency at impact ionization in intervalley transfer electron diodes on basis InN, AlN is considered. The current – voltage characteristics of intervalley transfer electron diodes have negative conductivity region and strong increasing current regions due to impact ionization that is nonlinearity and lead to transparent frequency. If impact ionization takes place, frequency transformation factor increases and reaches, for example, 40 % for second harmonic have being showed. The frequency transformation factor increases for second and third harmonic if first harmonic voltage amplitude is several threshold voltage if compare with frequency transformation factor for all nitride compounds.
KEY WORDS: AlN, GaN, InN diodes, frequency transformation factor, drift velocity, harmonics.

Ранее показано, что в ряде случаев ударная ионизация в доменах сильного поля диодов Ганна может способствовать увеличению мощности и КПД генераторов на высших гармониках. Это относится ко всем полупроводниковым материалам, включая нитриды.

Цель настоящего сообщения показать, что ударная ионизация в AlN, InN диодах может увеличить коэффициент преобразования частоты на гармониках. Оценки проведем на основе анализа работы диода в ОНОЗ режиме. Зависимость дрейфовой скорости и тока через диод от напряженности электрического поля имеют участок отрицательной дифференциальной проводимости (зависимости нелинейные). Возникновение ударной ионизации при больших напряженностях электрического поля приводит к возрастанию концентрации носителей в диоде и резкому росту тока через диод, что создает дополнительную нелинейность вольтамперной характеристики. Это и приводит к увеличению коэффициента преобразования частоты на гармониках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля $v(E)$ в AlN, InN (модификация вюрцита) могут быть записаны в виде[1]:

$$v(E) = \{ \mu_n E_{\text{пор}} + v_s (E / E_{\text{пор}})^{n_1} \} / [1 + a(E / E_{\text{пор}})^{n_2} + (E / E_{\text{пор}})^{n_1}] .$$

Для InN: μ_n – низкополевая подвижность, равная $3060 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (10^{16}см^{-3}), $2284 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (10^{17}см^{-3}), $1252 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ (10^{18}см^{-3}), v_s – скорость насыщения характеристики скорость-поле, равная $1,36\cdot 10^7 \text{ см/с}$ (10^{17}см^{-3}), $E_{\text{пор}}$ – пороговая напряженность электрического поля $\sim 52,42 \text{ кВ/см}$, $a = 2,26$, $n_1 = 3,8$, $n_2 = 0,6$.

Для AlN: μ_n – низкополевая подвижность, равная $657 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (10^{16}см^{-3}), $533 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (10^{17}см^{-3}), $313 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (10^{18}см^{-3}), v_s – скорость насыщения характеристики скорость-поле, равная $2,167\cdot 10^7 \text{ см/с}$ (10^{17}см^{-3}), $E_{\text{пор}}$ – пороговая напряженность электрического поля $\sim 447 \text{ кВ/см}$, $a = 8,72$, $n_1 = 17,36$, $n_2 = 0,85$.

Для GaN: μ_n – низкополевая подвижность, равная $1371 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (10^{16}см^{-3}), $990 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (10^{17}см^{-3}), $544 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ (10^{18}см^{-3}), v_s – скорость насыщения характеристики скорость-поле, равная $1,9\cdot 10^7 \text{ см/с}$ (10^{17}см^{-3}), $E_{\text{пор}}$ – пороговая напряженность электрического поля $\sim 220 \text{ кВ/см}$, $a = 6,19$, $n_1 = 7,2$, $n_2 = 0,78$.

Времена перехода электронов из центральной долины в боковые в GaN составляют $\sim 2 \cdot 10^{-13}$ с. и на порядок меньше, чем в GaAs. Из-за малых времен релаксации инерционность перераспределения электронов проявляется на частотах более 100 ГГц. Поэтому зависимость (1) можно использовать для оценок до 100 ГГц.

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 $25 \text{ ГГц} < f \ll 3600 \text{ ГГц}$, GaN $25 \text{ ГГц} < f \ll 3000 \text{ ГГц}$, AlN $10 \text{ ГГц} < f \ll 1400 \text{ ГГц}$ [2], для $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ частоты намного ниже.

При определенных перенапряжениях на образце возникают такие напряженности E , при которых начинается ударная ионизация и ток через образец будет расти. Это обусловлено увеличением концентрации подвижных носителей, и в частности – электронов.

Вольтамперная характеристика диода в ОНОЗ режиме будет равна [3]:

$$J(E) = en_0 v(E) \left[1 + \int_0^L \alpha_n(E(x)) dx \right]$$

где $\alpha_n(E)$ – коэффициент ударной ионизации для электронов в диффузионном или дрейфовом приближениях [4, 5, 6] в виде

$$\alpha(E) = A \cdot \exp(-B/E)^n,$$

где для дрейфового приближения InN $A=7,78 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$, $B=2,84 \cdot 10^6 \text{ В/см}$; $n = 1$;

GaN $A=8,46 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$, $B=5,1 \cdot 10^6 \text{ В/см}$; $n = 1$;

AlN $A=8,68 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$, $B=9,32 \cdot 10^6 \text{ В/см}$, $n = 1$ [4,5].

Исходя из приведенной записи ВАХ следует, что при больших напряженностях электрического поля дрейфовая скорость не меняется, а меняется только концентрация электронов в зоне проводимости. В результате ВАХ диода после участка ОДП имеет участок быстрого роста тока, что, как сказано выше, вносит дополнительную нелинейность и может способствовать улучшению в преобразовании частоты.

В режиме умножения на диод подается сигнал с определенной частотой и амплитудой. За счет нелинейности ВАХ диода ток через диод имеет сложную форму, содержащую высшие гармоники. Выделение гармоники осуществляется контуром, настроенным на частоту гармоники. В результате на диоде действует напряжение основной частоты ($n = 1$) и n -ой гармоники:

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1} U_n (-1)^n \sin \left[n\omega t + \frac{\pi}{2}(n+1) \right].$$

Амплитуда n -ой гармоники тока определяется из разложения формы тока $J(t)$ в ряд Фурье. Коэффициент преобразования частоты КПЧ или коэффициент полезного действия (это отношение мощности на n -ой гармонике к поступающей на диод мощности) определяется в виде:

$$КПЧ_n(\eta) = \frac{U_n \cdot \int_0^T J(t) (-1)^n \sin \left[n\omega t + \frac{\pi}{2}(n+1) \right] dt}{\int_0^T J(t) U(t) dt} \times 100\%.$$

Коэффициенты преобразования частоты на второй гармонике (КПЧ) для AlN, InN, GaN от амплитуды входного сигнала (первой гармоники) с учетом ударной ионизации и без учета ударной

ионизации показаны на рис. 1, 2, 3. Видно, что ударная ионизация начинает влиять на КПЧ начиная с напряженностей электрического поля, при которых начинает развиваться ударная ионизация, и существенно увеличивает его значение (почти в два раза для AlN, GaN, InN при $U_2 = 0,5U_1$).

Следует отметить, что данные приведены для соотношений амплитуд гармоник составляющих $0,5U_1, 0,4U_1, 0,3U_1$ амплитуды первой гармоники. При значениях напряженности электрического поля, близких к пороговым и выше порогового КПЧ растет, а затем уменьшается при выходе на участок насыщения дрейфовой скорости электронов $v(E)$. При выходе напряженности электрического поля на

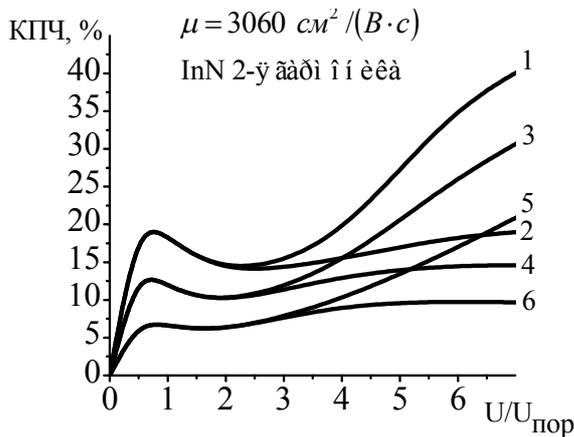


Рис.1. Зависимость КПЧ на второй гармонике для InN от амплитуды первой гармоники при отношении амплитуды второй гармоники к первой 0,5 (1,2), 0,4 (3,4) и 0,3 (5,6) при нулевом постоянном смещении: 2,4,6 – без учета ударной ионизации, 1,3,5 – с учетом ударной ионизации, $\mu_n \approx 3600 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

участок ВАХ с ударной ионизацией КПЧ быстро возрастает, что обусловлено большой нелинейностью

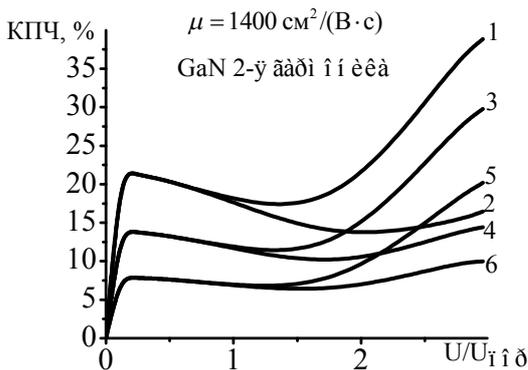


Рис.2. Зависимость КПЧ на второй гармониках для GaN от амплитуды первой гармоники при отношении амплитуды второй гармоники к первой 0,5 (1,2), 0,4 (3,4) и 0,3 (5,6) при нулевом постоянном смещении: 2,4,6 – без учета ударной ионизации, 1,3,5 – с учетом ударной ионизации, $\mu_n \approx 1400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

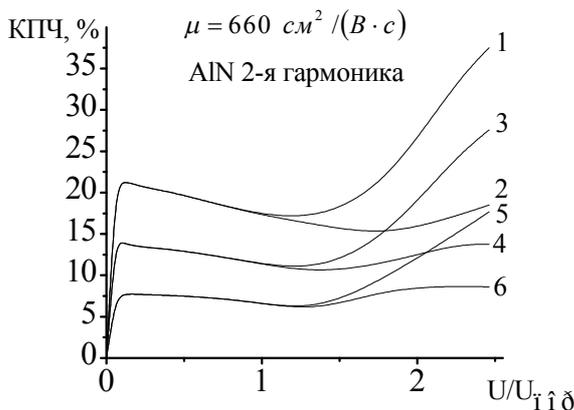


Рис.3 Зависимость КПЧ на второй гармонике для AlN от амплитуды первой гармоники при отношении амплитуды второй гармоники к первой 0,5 (1,2), 0,4 (3,4) и 0,3 (5,6) при нулевом постоянном смещении: 2,4,6 – без учета ударной ионизации, 1,3,5 – с учетом ударной ионизации, $\mu_n \approx 660 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

ВАХ на этом участке. Нами рассмотрено умножение при токах через диод при ударной ионизации не превышающих пороговое примерно в 1,2 раза ($J(U_1 + U_2) < 1,2J_{\text{пор}}$). При больших токах возможен пробой, образование S-образности на ВАХ и др.

Данные приведены для амплитуды второй гармоники составляющей $0,5U_1, 0,4U_1, 0,3U_1$ амплитуды первой гармоники. При уменьшении соотношения амплитуд значения КПЧ уменьшаются (с увеличением отношения амплитуд КПЧ возрастает при заданной амплитуде первой гармоники). Все данные на рисунках приведены при нулевом постоянном смещении $U_0 = 0$.

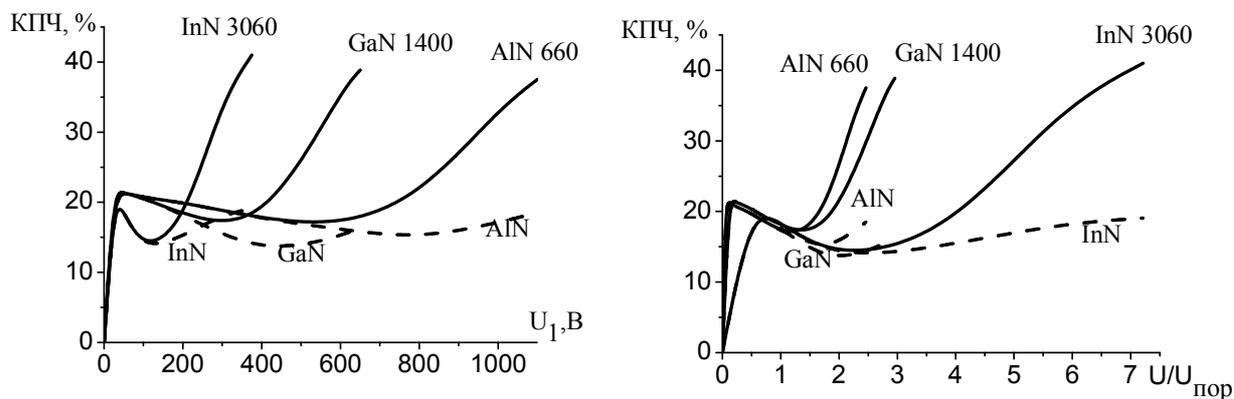


Рис.4 Зависимость КПЧ на второй гармонике для InN, GaN, AlN от амплитуды первой гармоники (А) и отношения амплитуды первой гармоники к пороговому напряжению (Б) при отношении амплитуды второй гармоники к первой 0,5 при нулевом постоянном смещении. Подвижности для InN 3060 $см^2/(В·с)$, для GaN 1400 $см^2/(В·с)$, для AlN 660 $см^2/(В·с)$ при $n=10^{16} см^{-3}$. Сплошные линии – с учетом ударной ионизации, штрих – без учета ударной ионизации

Следует отметить, что наибольший КПЧ при отсутствии ударной ионизации соответствует напряженностям вблизи пороговой напряженности электрического поля (для всех соединений не более 20% при $U_2 = 0,5U_1$), здесь ВАХ диода имеет наибольшую нелинейность, а при дальнейшем увеличении напряженности КПЧ падает из-за насыщения дрейфовой скорости электронов. На второй гармонике КПЧ как с ударной ионизацией так и без нее положителен и поглощения мощности нет

Зато на третьей гармонике при амплитудах первой гармоники превышающих пороговое наблюдается поглощение, возникновение ударной ионизации устраняет поглощение и приводит к увеличению КПЧ по сравнению с пороговым значением. Поглощение на третьей гармонике при отсутствии ударной ионизации обусловлено не оптимальными фазовыми соотношениями между первой и третьей гармониками.

ВЫВОДЫ

1. Ударная ионизация в диодах с МПЭ уменьшает ширину вольтамперных характеристик диодов и ограничивает максимальные амплитуды действующей напряженности электрического поля в диоде. В то же время она может быть полезно использована в режиме генерации гармоник.
2. Вольтамперные характеристики диодов с МПЭ после участка ОДП имеет участок быстрого роста тока, обусловленного развитием ударной ионизации, что вносит дополнительную нелинейность и способствует улучшению в преобразовании частоты.
3. Эффективность умножения частоты входного сигнала зависит от соотношения амплитуд входного сигнала и амплитуды гармоники. При соотношении амплитуд гармоник (2-ой, 3-ей) к амплитуде первой порядка 0,5 максимальный КПЧ составляет более 40%, что более чем в два раза превышает КПЧ при отсутствии ударной ионизации.
4. Существуют оптимальные амплитуды гармоник, при которых наблюдается максимальная эффективность генерации на этих гармониках, за счет перекачки мощности с первой гармоники
5. Сравнение КПЧ всех трех соединений показывает, что ударная ионизация в диодах на основе нитридов способствует увеличению КПЧ на гармониках (2-ой, 3-ей) при амплитудах первой гармоники в несколько пороговых (рис. 4). Необходимые для этого амплитуды первой гармоники для диодов на основе AlN, GaN, InN различны и обусловлены энергетическими зазорами между центральной Г-долиной в этих соединениях и боковыми L- долинами
6. Диапазон частот, в котором может реализоваться рассмотренное умножение определяется частотной зависимостью скорость-поле, частотным диапазоном реализации рассматриваемого режима и временем установления ударной ионизации в рассматриваемых структурах.
7. При дальнейшем рассмотрении умножения с учетом ударной ионизации необходимо учесть инерционность междолинного переноса электронов и инерционность процессов ударной ионизации

(учесть время развития ударной ионизации и время рассасывания носителей, возникших в результате ударной ионизации)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maziar Farahmand, Carlo Garetto, Enrico Belloti, Kevin Brennan, Michele Ghoano, Enrico Ghillino, Giovanni Ghione, John Albrecht, Paul Ruden, Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the 111-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries, IEEE Transaction on Electron Devices, 2001, v.48, No.3, pp.535-542.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, М.-Мир, 1984, т.2, 456 с.
3. Кэррол Дж. СВЧ генераторы на горячих электронах, М: Мир.-1972.
4. Павленко Д.В., Прохоров Э.Д. Ширина вольтамперных характеристик диодов Ганна на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Радиофизика и электроника, Харьков, ИРЭ НАНУ, 2006, т.11, №2, с.291-297.
5. Павленко Д.В., Прохоров Э.Д. Влияние ударной ионизации на работу ОНОЗ диодов на основе AlN, GaN, InN, Вестник ХНУ, Радиофизика и электроника, 2007, № 756, с. 109-112.
6. Pavlenko D.V., Prokhorov E. D. Influence of impact ionization on operation efficiency of InN, GaN, AlN LSA diodes, Proceedings 6 Int. symposium – “Physics and engineering of MM and SubMM waves”, Kharkov, MSMW-2007, 2007, т.2, 623-625.
7. Боцула О.В., Павленко Д.В., Прохоров Э. Д. Генерация гармоник при ударной ионизации в ОНОЗ диодах на основе GaN, Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, радиофизика и электроника, 2008, №834, вып. 13, с. 100-103.

© Прохоров Э.Д., Боцула О.В., Грищенко И.А., 2009.