

## ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК И УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ В GAN-ДИОДАХ

О. В. Боцула, Д. В. Павленко, Э. Д. Прохоров

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина*  
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина  
E-mail: [Eduard.D.Prohkorov@univer.khakov.ua](mailto:Eduard.D.Prohkorov@univer.khakov.ua)

Рассматривается ударная ионизация в диодах на основе GaN. Показано, что при развитии ударной ионизации в диодах указанные соединения перспективны для работы в см и мм диапазонах (напряжения сверх порогового 3...5 при КПД до 11...13 %). Показано, какие эффективности генерации можно получить при генерации гармоник диодами на GaN. Рассматривается умножение частоты при ударной ионизации в диодах на основе GaN. Показано, что при развитии ударной ионизации в диодах на основе GaN коэффициент преобразования частоты существенно возрастает и составляет, например, на 2-й гармонике до 40 %. Ил. 6. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** GaN-диоды, эффективность генерации, отрицательная дифференциальная проводимость.

Зависимости дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля  $v(E)$  и тока через диод с междолинным переносом электронов (МПЭ), в том числе нитридов (GaN, InN, AlN), имеют участок отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП). Возникновение ударной ионизации при больших напряженностях электрического поля в GaN-диодах приводит к возрастанию концентрации носителей в диоде и резкому росту тока через диод, что создает дополнительную нелинейность вольтамперной характеристики (ВАХ), которая влияет на генерацию гармоник и умножение частоты.

**1. Зависимости  $v(E)$  и ВАХ GaN-диодов.** Проведем оценки для GaN-диодов в режиме ограничения накопленного заряда (ОНОЗ). Умножая  $v(E)$  на заряд электрона и концентрацию электронов в GaN, получим зависимость тока через образец от напряженности электрического поля в образце  $I(E) = env(E)$ , где  $n$  – концентрация электронов в диоде;  $v(E)$  – дрейфовая скорость электронов в GaN, равная [1]

$$v(E) = \frac{\mu_n E + v_S (E/E_{\text{пор}})^{7,2}}{1 + 6,2(E/E_{\text{пор}})^{0,8} + (E/E_{\text{пор}})^{7,2}}, \quad (1)$$

где  $\mu_n = \mu_+$  – низковолевая подвижность;  $v_S$  – скорость насыщения характеристики скорость – поле;  $E_{\text{пор}}$  – пороговая напряженность электрического поля. 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 для GaN.

Диапазон частот, на которых может реализоваться ОНОЗ-режим в GaN из критерия существования такого режима [2]:

$\frac{\varepsilon}{4\pi e n \mu_+} \ll T < \frac{(2...3)\varepsilon}{4\pi e n \mu_-}$ , где  $\varepsilon \sim 8,9$  – диэлектрическая проницаемость GaN;  $\mu_+ \sim 300...1400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  – дифференциальная подвижность электронов в GaN на начальном участке зависимости  $v(E)$  определяется концентрацией;  $\mu_- \sim -60...70 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  – отрицательная дифференциальная подвижность в GaN на участке ОДП. Для концентрации  $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  диапазон существования ОНОЗ-режима запишется в виде  $5 \text{ ГГц} < f \ll 60...180 \text{ ГГц}$ .

При больших напряженностях электрического поля ток через образец насыщается. Если при определенных перенапряжениях на образце возникают такие напряженности  $E$ , при которых начинается ударная ионизация, то ток через образец будет расти. Это обусловлено увеличением концентрации подвижных носителей, и в частности, электронов. Подвижность электронов в GaN намного больше подвижности дырок. В связи с этим можно полагать, что вклад электронной составляющей тока при ударной ионизации – определяющий. Электронная составляющая при ударной ионизации будет равна

$$\Delta I(E) = e \Delta n v(E), \quad (2)$$

где  $\Delta n$  – увеличение концентрации электронов в образце при ударной ионизации, равное

$$\Delta n(E) = n_0 \int_0^L \alpha_n(E) dx,$$

где  $\alpha_n(E)$  – коэффициент ударной ионизации для электронов в диффузионном или дрейфовом приближениях [3, 4, 5]. Тогда вольтамперная характеристика GaN-диода в ОНОЗ-режиме будет равна

$$I(E) = en_0 v(E) \left[ 1 + \int_0^L \alpha_n(E) dx \right]. \quad (3)$$

Исходя из приведенной записи ВАХ, дрейфовая скорость не меняется, а меняется только концентрация электронов в зоне проводимости.

Для GaN критические напряженности для дрейфового приближения составляют 270 кВ/см ( $L = 0,1$  см), 310 кВ/см ( $L = 0,01$  см), 350 кВ/см ( $L = 0,001$  см), для диффузионного приближения 1150 кВ/см ( $L = 0,1$  см), 1250 кВ/см ( $L = 0,01$  см), 1350 кВ/см ( $L = 0,001$  см).

Возникает вопрос об инерционности процесса установления ударной ионизации в диоде, поскольку от него зависит, будут ли справедливы ВАХ GaN-диола с учетом ударной ионизации. Характеристики справедливы при частотах изменения напряженности электрического поля, период которых больше времени установления ВАХ за счет ударной ионизации и времени рассасывания сгенерированных носителей. Ударная ионизация должна возникнуть в период времени, когда напряженность электрического поля в диоде превышает  $E_{кр}$  (рис. 1), что приведет к увеличению тока через диод. В остальной части периода, в течение которого напряженность электрического поля ниже  $E_{кр}$ , созданные в процессе ударной ионизации электроны и дырки должны выйти из образца. Этим ограничивается частота входного сигнала и гармоники.

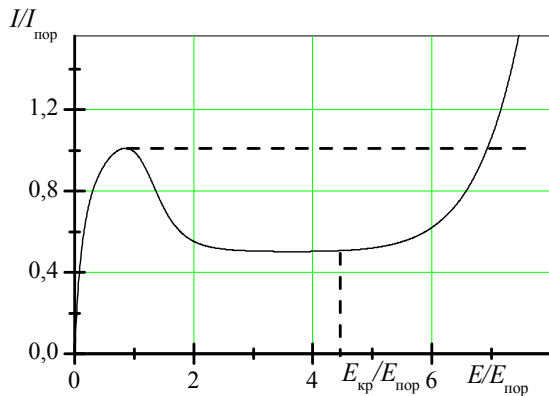


Рис. 1. Вольтамперные характеристики GaN-диола для  $\mu = 1400$  см<sup>2</sup>/(В·с) с учетом ударной ионизации в диффузионном приближении для длины диода 0,001 см,  $n = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>

На самом деле процессы генерации носителей и их рассасывания намного сложнее: во-первых, генерация носителей и ток через диод могут запаздывать по отношению к приложенной напряженности электрического поля. Во-вторых, сгенерированные носители не успевают полностью выйти из диода, поскольку напряженность электрического поля в течение периода меняет знак, и носители начинают дрейфовать в противоположном направлении. Это приведет к гистерезису ВАХ диода в области ударной ионизации как при положительной напряженности электри-

ческого поля, так и при отрицательной. Все это значительно усложняет оценки эффективности умножения частоты. В проводимой ниже оценке гистерезисные явления не учитываются.

Как показано в работе [6], установление ударной ионизации происходит с постоянной  $\tau / 2(1 - \int_0^L \alpha_n(E) dx)$ , где  $\tau = L / v_s$ . Это значит, что для 10-мкм образца при слабой ударной ионизации ( $\int_0^L \alpha_n(E) dx \rightarrow 0,1$ ) развитие ударной ионизации и тока через диод происходят с постоянной  $\tau / (2 \dots 1,8) \cong (0,31 \dots 0,34) \cdot 10^{-10}$  с, что соответствует частоте  $\sim 29 \dots 32$  ГГц, время  $\tau \sim 0,6 \cdot 10^{-10}$  с.

Таким образом, диапазон частот для 10-мкм диода при работе в рассматриваемом режиме с учетом возможности реализации ОНОЗ-режима ( $n \sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, 5...180 ГГц), справедливости  $v(E) (< 100$  ГГц) и времени развития ударной ионизации ( $< 30$  ГГц) составляет 5...30 ГГц. Именно на этих частотах и рассматривается генерация гармоник и умножение частоты диодами на основе GaN.

Экспериментальные времена установления ударной ионизации на 750-мкм образцах GaAs при концентрациях  $5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> составляли 50...100 нс при длительности периода колебаний 4...5 нс, что подтверждает сделанные выше оценки [7].

**2. Генерация гармоник.** Большие значения КПД как на основной частоте, так и на гармониках можно получить в случае реализации диффузионного приближения для ударной ионизации в GaN-диоде.

В режиме генерации в одноконтурном резонаторе в диоде действует напряженность электрического поля  $E(t) = E_0 + E_1 \sin \omega t$  при  $E > E_{пор}$  и соотношении амплитуд  $E_0 - E_1 > 0$ .

Эффективность генерации на 1-й гармонике ограничена ударной ионизацией и составляет, как показано ранее,  $\sim 11 \dots 13$  %.

Если необходимо получить генерацию на гармонике, то диод должен работать в сложном резонаторе, включающем резонаторы на 1-й и  $n$ -й гармонике. Для получения генерации на 2-й гармонике в диоде должна действовать напряженность электрического поля в виде

$$E(t) = E_0 + E_1 \sin \omega t - E_2 \cos 2t. \quad (4)$$

Напряженность электрического поля в диоде на высших гармониках запишется таким образом:

$$E(t) = E_0 + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin \left[ n \omega t + \frac{\pi}{2} (n+1) \right] (-1)^n. \quad (5)$$

При необходимости получить максимальный КПД на  $n$ -й гармонике следует оптимизировать амплитуды и 1-й, и  $n$ -й гармоник. Здесь возможны два режима: генерация на частотах гармоник и генерация гармоник при работе диода на основной частоте.

На рис. 2 показано, что введение 2-й гармоники в сигнал напряженности в диоде приводит к увеличению эффективности генерации на 1-й гармонике. При этом на 2-й гармонике при малых напряженностях, близких к пороговым, тоже наблюдается генерация, которая при увеличении напряженности выше  $4 \cdot 10^5$  В/см переходит в поглощение. То же самое происходит и в присутствии 4-й гармоники. Поскольку зависимость  $\nu(E)$  поле в нашем рассмотрении не зависит от частоты, то максимальные эффективности генерации на 1-й гармонике в присутствии высших гармоник несколько уменьшаются с увеличением частоты, но не становятся меньше эффективности генерации на 1-й гармонике в отсутствие высших (рис. 2). При этом генерация на гармониках или очень незначительная, или ее вообще нет. В этом случае можно говорить об оптимальной генерации на основной частоте в присутствии гармоник.

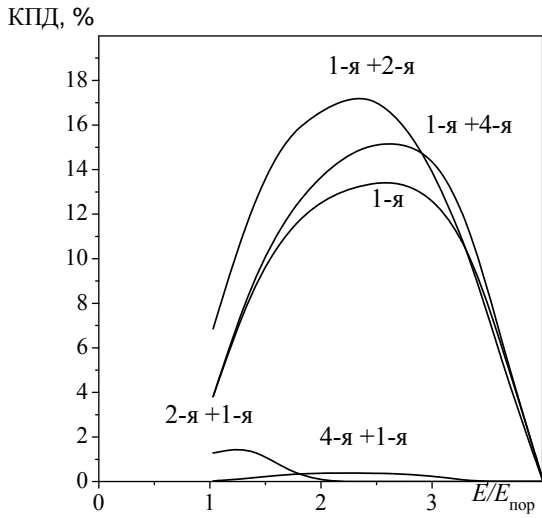


Рис. 2. Эффективность генерации GaN-диодом на 1-й гармонике в отсутствие 2-й (1-я), на первой гармонике в присутствии 2-й и 4-й гармоники; ниже показаны КПД на 2-й и 4-й гармониках при максимальной эффективности на 1-й гармонике

Максимум эффективности генерации на гармониках соответствует минимуму эффективности генерации на 1-й гармонике. При этом генерация на 1-й гармонике или очень незначительная, или ее вообще нет – происходит поглощение. Такую ситуацию можно характеризовать как генерацию на частотах гармоник. Эффективность генерации на частотах гармоник из-за отсутствия инерционности системы будет такой же, как и на 1-й гармонике (рис. 3).

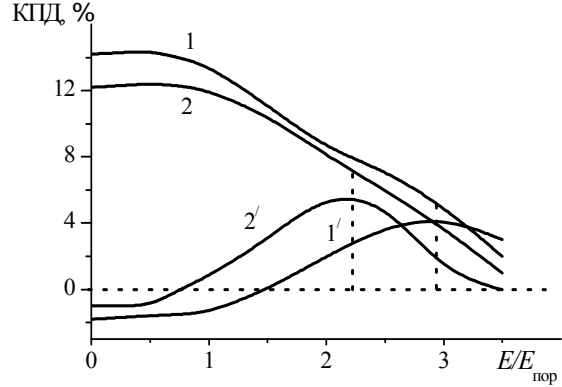


Рис. 3. Эффективность генерации в зависимости от амплитуды 2-й гармоники  $E_2$ : 1 – 1-я гармоника при  $E_0 = 2,5 E_{пор}$ ,  $E_1 = 2 E_{пор}$ ; 1' – вторая гармоника; 2 – 1-я гармоника при  $E_0 = 1,75 E_{пор}$ ,  $E_1 = 1,25 E_{пор}$ ; 2' – 2-я гармоника

Нас интересует такая ситуация, при которой КПД на 1-й гармонике есть всегда и он не становится меньше КПД на высших гармониках (диод генерирует на 1-й гармонике, а не поглощает; именно за счет генерации на 1-й гармонике существуют высшие гармоники). Такую ситуацию можно характеризовать как генерацию гармоник при работе диода на основной частоте. При этом мощность и КПД на 1-й гармонике должны быть большими мощности и КПД на  $n$ -й гармонике.

В этом случае возможны такие соотношения амплитуд гармоник, при которых генерируются и 1-я, и 2-я гармоники в примерно равных соотношениях по эффективности генерации (один из вариантов показан на рис. 4 при значениях напряженности электрического поля, близких к пороговым  $\sim 250$  кВ/см).

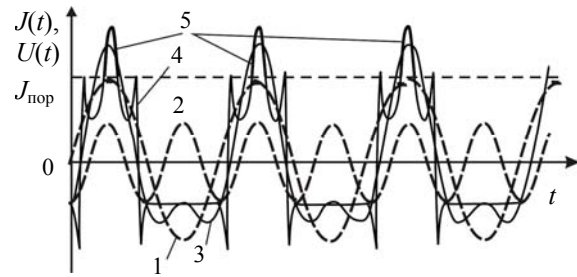


Рис. 4. Форма тока и напряженности электрического поля в GaN-диоде при действии на диоде 1-й гармоники (1), 2-й гармоники (2), суммарной напряженности электрического (3) тока через диод (4). Ток, превышающий пороговое значение тока (5), обусловлен заходом напряженности электрического поля на участок ВАХ, определяемый ударной ионизацией

Другой вариант перераспределения мощности и эффективности генерации между гармониками в зависимости от амплитуды 2-й гармоники показан на рис. 5. Видно, что при определенных амплитудах  $E_2$  наблюдается максимум КПД на 2-й гармонике, при этом КПД на 1-й гармонике выше, чем на 2-й. Это и соот-

ветствует ситуации, когда происходит оптимальная генерация на гармониках. То же наблюдается на 4-й и 6-й гармониках. Следует отметить, что КПД генерации на четных гармониках выше, чем на нечетных.

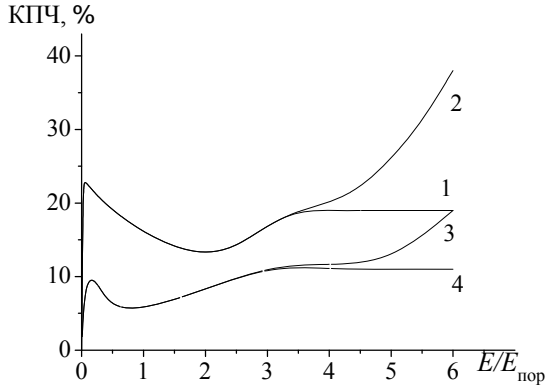


Рис. 5. Зависимость коэффициента преобразования частоты на 2-й гармонике от амплитуды 1-й гармоники при отношении амплитуды 2-й гармоники к 1-й 0,5 (1, 2) и 0,3 (3, 4) при нулевом постоянном смещении: 1, 4 – без учета ударной ионизации; 2, 3 – с учетом ударной ионизации

Максимальные эффективности генерации на гармониках в режиме генерации гармоник уменьшаются с увеличением номера гармоники, что характерно для любого сложного во времени сигнала (в нашем случае тока через диод  $J[E(t)]$ ).

Значения эффективностей генерации на гармониках зависят существенным образом от зависимости  $v(E)$ , а точнее, от минимальной скорости дрейфа рассматриваемого соединения. Если зависимость  $v(E)$  будет иметь  $v_{\min} \sim 1,2 \cdot 10^7$  см/с (см. рис. 3, кривая 2) по сравнению с рассмотренным выше значением  $v_{\min} \sim 1,6 \cdot 10^7$  см/с, то эффективности генерации на гармониках увеличатся на 20...30 %.

**3. Умножение частоты.** В режиме умножения на диод подается сигнал с определенной частотой и амплитудой. За счет нелинейности ВАХ GaN-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  $n$ -й гармоники

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n (-1)^n \sin \left[ n\omega t + \frac{\pi}{2} (n+1) \right]. \quad (6)$$

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

$$\text{КПЧ} = \frac{U_n \int_0^T J(t) (-1)^n \sin \left[ n\omega t + \frac{\pi}{2} (n+1) \right] dt}{\int_0^T J(t) U(t) dt}. \quad (7)$$

Зависимость тока от напряженности электрического поля на GaN-диоде показана на рис. 1 (концентрация  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>,  $L = 10^{-3}$  см).

Максимальная дрейфовая скорость и максимальный ток через диод при пороговых напряженностях электрического поля с последующими их уменьшениями обусловлены междолинным переносом электронов ( $E_{\text{пор}} \sim 200$  кВ/см).

При напряженностях электрического поля более 500 кВ/см возникает ударная ионизация зона – зона и ток через диод начинает возрастать. На диоде действует напряженность электрического поля, определяемая входным сигналом, и напряженность электрического поля соответствующей гармоники. Форма напряженности электрического поля 1-й и 2-й гармоник, суммарной напряженности и форма тока через диод показаны на рис. 4.

Во время действия в диоде максимальной суммарной напряженности электрического поля рабочая точка заходит на участок ВАХ, обусловленный ударной ионизацией. Чем больше суммарная амплитуда, тем больше амплитуда тока, обусловленного ударной ионизацией.

КПЧ на 2-й гармонике показан на рис. 5. Следует отметить, что данные приведены для оптимальных соотношений амплитуд гармоник (задается амплитуда 1-й гармоники, а затем находится амплитуда 2-й гармоники, при которой получается максимальное значение КПЧ).

При значениях напряженности электрического поля, близких к пороговым и выше порогового, КПЧ растет, а затем уменьшается при выходе на участок насыщения дрейфовой скорости электронов. При выходе напряженности электрического поля на участок ВАХ с ударной ионизацией КПЧ быстро возрастает, что обусловлено большой нелинейностью ВАХ на этом участке. Нами рассмотрено умножение при токах через диод при ударной ионизации, превышающих пороговое значение примерно в 1,2 раза. При больших токах возможен пробой, образование S-образности на ВАХ и др. Максимальные напряженности электрического поля на диоде не должны превышать значений, при которых ток через диод выше порогового примерно в 1,2 раза  $J(U_1 + U_2) < J_{\text{пор}}$ .

На рис. 5 и 6 приведены зависимости КПЧ от амплитуды входного сигнала (1-й гармоники) с учетом ударной ионизации и без ее учета.

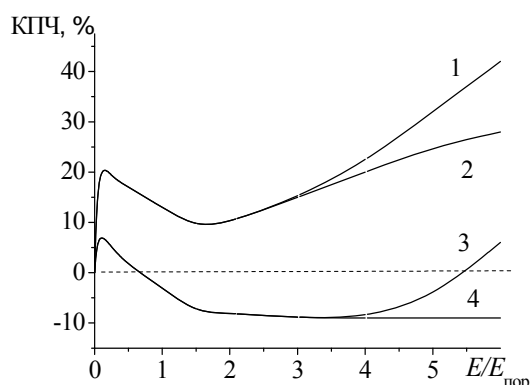


Рис. 6. Зависимость КПЧ на 3-й гармонике от амплитуды 1-й гармоники при отношении амплитуды 3-й гармоники к 1-й 0,5 (1, 2) и 0,3 (3) при нулевом постоянном смещении; 2, 4 – без учета ударной ионизации; 1, 3 – с учетом ударной ионизации

Видно, что ударная ионизация начинает влиять на КПЧ, начиная с напряженностей электрического поля более 500 кВ/см, и увеличивает его значение почти в два раза. Данные приведены для амплитуды 2-й и 3-й гармоник, в два раза меньших амплитуды 1-й гармоники. При меньших соотношениях амплитуд значения КПЧ уменьшаются (с увеличением отношения амплитуд КПЧ непрерывно возрастает при заданной амплитуде 1-й гармоники). Все данные на рисунках приведены при нулевом постоянном смещении  $U_0 = 0$ .

Следует отметить, что наибольший КПЧ при отсутствии ударной ионизации ( $E < 500$  кВ/см) соответствует напряженностям вблизи пороговой напряженности электрического поля, здесь ВАХ диода имеет наибольшую нелинейность, а при дальнейшем увеличении напряженности КПЧ падает из-за насыщения дрейфовой скорости электронов.

**Выводы.** Таким образом, в результате проведенных исследований можно заключить:

- ударная ионизация в GaN-диодах уменьшает ширину ВАХ и ограничивает максимальные амплитуды действующей напряженности электрического поля в диоде. Поэтому при работе на 1-й гармонике максимальный КПД диодов на GaN не превышает 13 %;

- присутствие напряженности электрического поля 2-й и высших гармоник в напряженности электрического поля в диоде приводит к увеличению КПД на 1-й гармонике на 15...20 %. При этом на высших гармониках возможна как генерация, так и поглощение;

- максимум эффективности генерации на гармониках соответствует минимуму эффективности генерации на 1-й гармонике. При этом генерация на 1-й гармонике или очень незначительная, или ее вообще нет – происходит поглощение. Такую ситуацию можно характеризовать как генерацию на частотах гармоник;

- при генерации на 1-й гармонике возможна эффективная генерация на 2-й и высших гармониках, при этом эффективность генерации на 1-й гармонике уменьшается, но должна оставаться больше эффективности генерации на гармониках (в этом случае можно говорить о генерации гармоник ОНОЗ-диодом);

- существуют оптимальные амплитуды гармоник, при которых наблюдается максимальная эффективность генерации на этих гармониках за счет перекачки мощности с 1-й гармоники;

- ударная ионизация в GaN-диодах приводит к резкому росту тока через диод, что значительно увеличивает нелинейность характеристики диода;

- при напряженностях электрического поля в GaN-диоде до 500 кВ/см КПЧ обусловлен нелинейностью ВАХ за счет междолинного переноса электронов и составляет в максимуме порядка 20 % на 2-й и 3-й гармониках;

- при напряженностях электрического поля в GaN-диоде более 500 кВ/см КПЧ обусловлен нелинейностью ВАХ за счет ударной ионизации и междолинного переноса электронов и составляет в максимуме порядка 40 % на 2-й и 3-й гармониках (при амплитуде 2-й гармоники, в два раза меньшей амплитуды 1-й гармоники).

1. Farahmand M., Garetto C., Bellot E. et al. Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the 111-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2001. – 48, No. 3. – P. 535–542.
2. Зу С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х т. – М.: Мир, 1984. – Т. 2. – 456 с.
3. 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: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2006. – 11, № 2. – С. 291–297.
4. Павленко Д. В., Прохоров Э. Д. Влияние ударной ионизации на работу ОНОЗ-диодов на основе  $\text{AlN}$ ,  $\text{GaN}$ ,  $\text{InN}$  // Вестн. Харьков. нац. ун-та им. В. Н. Каразина. Радиофизика и электроника. – 2007. – № 756. – С. 109–112.
5. Pavlenko D. V., Prokhorov E. D. Influence of impact ionization on operation efficiency of  $\text{InN}$ ,  $\text{GaN}$ ,  $\text{AlN}$  LSA diodes // Proc. of 6 Int. symposium «Physics and engineering of MM and SubMM waves». – Kharkov, 2007. – 2. – P. 623–625.
6. Боцула О. В., Павленко Д. В., Прохоров Э. Д. Генерация гармоник при ударной ионизации в ОНОЗ-диодах на основе GaN // Вестн. Харьков. нац. ун-та им. В. Н. Каразина. Радиофизика и электроника. – 2008. – № 806. – С. 65–69.
7. Прохоров Э. Д., Шалаев В. А. Исследование закономерностей ударной ионизации в домене СЭП диодов Ганна // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. – 1972. – Вып. 9. – С. 3–8.

## HARMONIC GENERATION AND FREQUENCY MULTIPLICATION IN CASE OF IMPACT IONIZATION IN THE GAN DIODES

O. V. Botsula, D. V. Pavlenko, E. D. Prokhorov

The impact ionization in GaN diodes has been considered. The considered compounds are perspective for using in mm and sub-mm wave range with impact ionization evolution in the diodes (bias voltage is excess over limit voltage five times and efficiency value is 11...13 %) have been demonstrated. The possibilities value of oscillation efficiency in harmonic oscillation modes due to GaN diodes has been demonstrated. The frequency multiplication due to impact ionization in GaN diodes has been considered. If impact ionization takes place, coefficient of frequency

transformation increases and reaches, for example, 40 % for second harmonic.

**Key words:** GaN diodes, oscillation efficiency, negative difference conductivity.

ГЕНЕРАЦІЯ ГАРМОНІК І МНОЖЕННЯ  
ЧАСТОТИ ПРИ УДАРНІЙ  
ІОНІЗАЦІЇ В GAN-ДІОДАХ

О. В. Боцула, Д. В. Павленко, Е. Д. Прохоров

Розглядається ударна іонізація в діодах на основі GaN. Показано, що при розвитку ударної іонізації в діодах

вказані сполуки є перспективними для роботи в см і мм діапазонах (напруги перевищують порогову в 3...5 разів при ККД до 11...13 %). Показано, які ефективності генерації можна одержати при генерації гармонік діодами на GaN. Розглядається множення частоти при ударній іонізації в діодах на основі GaN. Показано, що при розвитку ударної іонізації в діодах на основі GaN коефіцієнт перетворення частоти істотно зростає й становить, наприклад, на 2-й гармоніці до 40 %.

**Ключові слова:** GaN-діоди, ефективність генерації, негативна диференційна провідність.

*Рукопись поступила 23 декабря 2008 г.*