

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, Тел. (0572) 7051262

Поступила в редакцию 15 ноября 2008 года

Рассматривается умножение частоты при ударной ионизации в диодах с МПЭ на основе GaN. Показано, что при развитии ударной ионизации в диодах на основе GaN коэффициент преобразования частоты существенно возрастает и составляет, например, на второй гармонике до 40%.

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

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 GaN диодах может увеличить коэффициент преобразования частоты на гармониках. Оценки проведем на основе анализа GaN 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.

Рассмотрим зависимости дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля в GaN (модификация вюрцита) $v(E)$, близкая к зависимости, рассмотренной в [1]. Умножая $v(E)$ на заряд электрона и концентрацию электронов в GaN, получим зависимость плотности тока через образец от напряженности электрического поля в образце $J(E) = env(E)$, где n – концентрация электронов в диоде (в рассмотрении концентрация принималась равной 10^{15} см^{-3}):

$$v(E) = \{\mu_n E_{\text{пор}} + v_s (E / E_{\text{пор}})^{7.2}\} / [1 + 6.2(E / E_{\text{пор}}) + (E / E_{\text{пор}})^{7.2}] \quad (1)$$

где μ_n – низковольтная подвижность, равная $300 \dots 1400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, v_s – скорость насыщения характеристики скорость-поле, равная $1,6 \dots 1,9 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, $E_{\text{пор}}$ – пороговая напряженность электрического поля ($\sim 200 \text{ кВ/см}$). Время перехода электронов из центральной долины в боковые в GaN составляют $\sim 2 \cdot 10^{-13} \text{ с}$. 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.

Оценим диапазон частот, на которых может реализоваться ОНОЗ режим в GaN из критерия существования такого режима $\frac{\varepsilon}{4\pi en\mu_n} \ll T < \frac{(2 \dots 3)\varepsilon}{4\pi en\mu_-}$, где $\varepsilon \sim 8,9$ – диэлектрическая проницаемость GaN, μ_n – дифференциальная подвижность электронов в GaN на начальном участке зависимости скорость-поле, $\mu_- \sim -60 \dots -70 \cdot \text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ – отрицательная дифференциальная подвижность в GaN на участке отрицательной дифференциальной проводимости [2]. Для концентрации $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ диапазон существования ОНОЗ режима запишется в виде: $5 \text{ ГГц} < f < 180 \text{ ГГц}$.

При больших напряженностях электрического поля ток через образец насыщается [3]. 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:

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

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

$$\Delta n = n_0 \int_0^L \alpha_n(E(x)) dx \quad (3)$$

где $\alpha_n(E)$ – коэффициент ударной ионизации для электронов в диффузионном или дрейфовом приближениях [4, 5, 6]. Тогда вольтамперная характеристика диода в ОНОЗ режиме будет равна:

$$J(E) = en_n v(E) \left[1 + \int_0^L \alpha_n(E(x)) dx \right] \quad (4)$$

Исходя из приведенной записи ВАХ следует, что при больших напряженностях электрического поля 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) [4].

Возникает вопрос об инерционности процесса установления ударной ионизации в диоде, поскольку от него зависит будут ли справедливы ВАХ GaN-диода с учетом ударной ионизации. Характеристики справедливы при значениях периода напряженности электрического поля в диоде большего времени установления ВАХ за счет ударной ионизации и времени рассасывания сгенерированных носителей. Ударная ионизация должна возникнуть во время, когда напряженность электрического поля в диоде превышает $E_{кр}$ (рис.1), что приведет к увеличению тока через диод, в остальную часть 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.

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 электрического 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 [7], установление ударной ионизации происходит с постоянной $\tau/2(1 - \int_0^L \alpha(x) dx)$, где $\tau = L/v_s$. Это значит, что для 10 мкм образца при слабой ударной ионизации

$(\int_0^L \alpha(x) dx \rightarrow 0,1)$ развитие ударной ионизации и тока через диод происходят с постоянной $\tau/(2 \dots 1,8) \approx (0,31 \dots 0,34) \cdot 10^{-10}$ 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 образца для работы в рассматриваемом ОНОЗ режиме с учетом возможности реализации ОНОЗ режима ($n \sim 10^{15}$ см⁻³, 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 диодами на основе GaN.

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 -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:

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

Зависимость тока от напряженности электрического поля на GaN-диоде показана на рис .1 (концентрация $\sim 10^{15}$ см⁻³, $L = 10 \cdot 10^{-4}$ см). Максимальная дрейфовая скорость и максимальный ток через диод при пороговых напряженностях электрического поля с последующими их уменьшениями обусловлены междолинным переносом электронов ($E_{пор} \sim 200$ 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 первой гармоники, второй гармоники, суммарной

напряженности и форма тока через диод показаны на рис. 2. 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.

Коэффициент преобразования частоты на второй гармонике (КПЧ) показан на рис. 3. Следует отметить, что данные приведены для оптимальных соотношений амплитуд гармоник (задается амплитуда первой гармоники, а затем находится амплитуда второй гармоники, при которой получается максимальное значение КПЧ). При значениях напряженности электрического поля, близких к пороговым и выше порогового КПЧ рас-

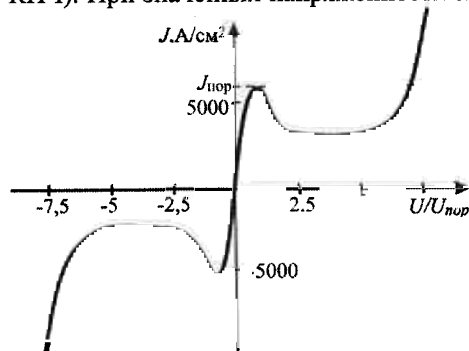


Рис.1 Зависимость тока от напряжения для GaN-диода с учетом междолинного переноса электронов и ударной ионизации зона-зона, $\mu_n \approx 1400 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

тет, а затем уменьшается при выходе на участок насыщения дрейфовой скорости электронов. При выходе на 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 не превышающих пороговое примерно в 1,2 раза. При больших токах возможен пробой,

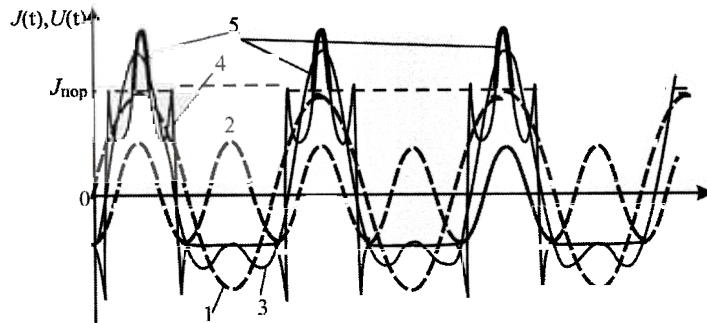


Рис. 2. Форма тока и напряженности электрического поля в GaN-диоде при действии на диоде первой гармоники (1), второй гармоники (2), суммарной напряженности электрического (3). Ток через диод (4). Ток, превышающий пороговое значение тока (5), обусловлен заходом напряженности электрического поля на участок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

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 $J(U_1 + U_2) < 1,2J_{\text{пор}}$.

На рис.3 и рис.4 приведены зависимости КПЧ от амплитуды входного сигнала (первой гармоники) с учетом ударной ионизации и без учета 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 второй и третьей гармоник в два раза меньших амплитуды первой

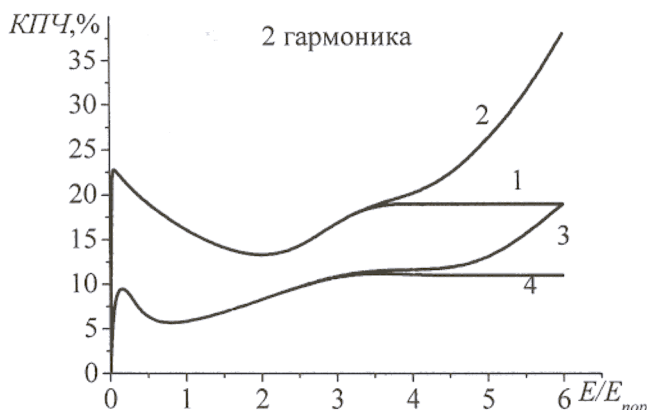


Рис.3. Зависимость КПЧ на второй гармонике от амплитуды первой гармоники при отношении амплитуды второй гармоники к первой 0,5 (1,2) и 0,3 (3,4) при нулевом постоянном смещении: 1,4 – без учета ударной ионизации, 2,3 – с учетом ударной ионизации, $\mu_n \approx 1400 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

гармоники. При меньших соотношениях амплитуд значения КПЧ уменьшаются (с увеличением отношения амплитуд КПЧ непрерывно возрастает при заданной амплитуде первой гармоники). Все данные на рис.3 и 4 приведены при нулевом постоянном смещении $U_0 = 0$.

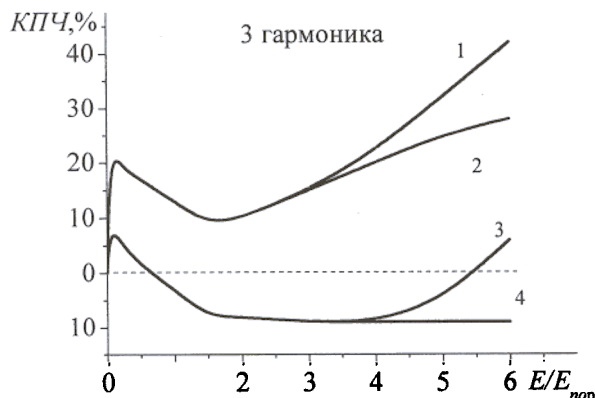


Рис.4. Зависимость КПЧ на третьей гармонике от амплитуды первой гармоники при отношении амплитуды третьей гармоники к первой 0,5 (1,2) и 0,3 (3,4) при нулевом постоянном смещении: 2,4 – без учета ударной ионизации, 1, 3 – с учетом ударной ионизации, $\mu_n \approx 1400 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Следует отметить, что наибольший КПЧ при отсутствии ударной ионизации ($E < 500 \text{ кВ/см}$) 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

1. Ударная ионизация в GaN-диодах уменьшает ширину ВАХ диодов и ограничивает максимальные амплитуды действующей напряженности электрического поля в диоде. При этом возникает резкий рост тока через диод, что значительно увеличивает нелинейность характеристики диода..

2. При напряженностях электрического поля в диоде до 500 кВ/см КПЧ обусловлен нелинейностью ВАХ за счет междолинного переноса электронов и составляет в максимуме порядка 20% на второй и третьей гармониках.

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

4. Диапазон частот, в котором может реализоваться рассмотренная выше ситуация, определяется частотной зависимостью скорость-поле, частотным диапазоном реализации ОНОЗ режима и временем установления ударной ионизации в рассматриваемых структурах. Так для 10 мкм образца GaN этот диапазон составляет от 5 ГГц до 30 ГГц.

Таким образом, использование ударной ионизации в GaN-диодах при соответствующих напряженностях электрического поля позволяет увеличить КПЧ вдвое по сравнению с режимом отсутствия ударной ионизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maziar Farahmand, Carlo Garetto, Enrico Bellotti, Kevin Brennan, Michele Ghioano, 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, № 806, вып.12, с. 65-69.