

УДК 621.382.2

ВЛИЯНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ И ИНЕРЦИОННОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ДИОДАМИ НА ОСНОВЕ GaAs

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,

4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина, Тел.(0572) 7051262

Поступила в редакцию 15 мая 2010 г.

Исследуется коэффициент преобразования частоты (КПЧ) диодами с междолинным переносом электронов на основе GaAs в широком диапазоне частот. Показано, что при пороговых напряжениях КПЧ при подвижности $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ больше КПЧ при подвижности $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (отсутствие ОДП) в 5 раз. При дальнейшем увеличении напряжения отношение КПЧ при подвижности $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ к КПЧ при подвижности $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ уменьшается (при 10 - 12 кВ/см составляет порядка 2, а при 20 - 30 кВ/см отношения КПЧ близко к единице). Учтена инерционность перераспределения электронов между долинами зоны проводимости GaAs. Показано, что преобразование частоты на проводимости диодов из GaAs возможно на частотах, превосходящих максимальную частоту генерации диодов в режиме однородного поля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: GaAs-диоды, дрейфовая скорость, инерционность, коэффициент преобразования частоты, максимальные частоты.

Досліджується коефіцієнт перетворення частоти (КПЧ) діодами з міждолинним перенесенням електронів на основі GaAs у широкому діапазоні частот. Показано, що при порогових напругах КПЧ при рухливості $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ більше КПЧ при рухливості $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (відсутність НДП) в 5 разів. При подальшому збільшенні напруги відношення КПЧ при рухливості $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ до КПЧ при рухливості $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ зменшується (при 10 - 12 кВ/см становить порядку 2, а при 20 - 30 кВ/см відношення КПЧ близькі до одиниці). Враховано інерційність перерозподілу електронів між долинами зони провідності GaAs. Показано, що перетворення частоти на провідності діодів з GaAs можливо на частотах, перевищуючу максимальну частоту генерації діодів в режимі однорідного поля.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: GaAs-діоди, дрейфова швидкість, інерційність, коефіцієнт перетворення частоти, максимальні частоти.

Coefficient frequency conversion (KFC) diodes with intervalley transfer of electrons based on GaAs in a wide range of frequencies is investigated. It is shown that the threshold voltages of the KFC in mobility $8000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ (GaAs) more than the KFC in $1000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ mobility (without NDC) in 5 times. At the further increase voltages in the mobility ratio of KFC $8000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ to KFC for $1000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ mobility decreases (at 10 - 12 kV/cm is about 2, at 20 - 30 kV/cm ratio KFC close to unity). Take into account the inertia of the redistribution of electrons between the valleys of the conduction band of GaAs. It is shown that the transformation frequency conductivity GaAs diodes is possible at frequencies exceeding the maximum frequency of generation in the diode mode of a uniform field.

KEYWORDS: GaAs diodes, drift speed, lag, coefficient frequency conversion, maximum frequencies.

В предыдущих работах [1, 2], посвященных коэффициенту преобразования частоты (КПЧ), определяемому механизмом проводимости полупроводника, исследования проводились с использованием статических зависимостей скорость-поле GaAs и нитридов при максимальных значениях подвижностей электронов. Не указывалась частота, на которой проводились исследования (частотный диапазон определялся как диапазон работы диодов в режиме с ограничением накопления объемного заряда ОНОЗ). На самом деле низкополевые подвижности в материалах диодов могут быть различными и кроме того с увеличением частоты начинает проявляться инерционность перераспределения электронов между долинами зоны проводимости, что может существенно изменить значения КПЧ в диапазоне частот.

Цель настоящей работы – выяснить, как влияет низкополевая подвижность и ОДП в GaAs на КПЧ и как влияет инерционность на КПЧ при увеличении частоты, на каких максимальных частотах можно получить положительный КПЧ.

ЗАВИСИМОСТЬ КПЧ ОТ ПОДВИЖНОСТИ И ОДП

В расчетах без учета инерционности использовались зависимости скорость-поле для GaAs в виде [3, 4]

$$V(E) = [\mu_0 E + v_s (\frac{E}{E_0})^4] / [1 + (\frac{E}{E_0})^4], \quad (1)$$

где μ_0 – низкополевая подвижность, E_0 – пороговая напряженность электрического поля, V_s – скорость насыщения.

Умножение исследуется в режиме с ограничением накопления объемного заряда (ОНОЗ) с однородным электрическим полем в диоде и симметричной зависимостью скорость-поле (при умножении в диоде действует напряженность электрического поля разной полярности).

В режиме умножения на диод подается сигнал с определенной частотой и амплитудой: $E(t) = E_0 + E_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$, где E_0, E_1 – постоянная составляющая и амплитуда входного сигнала. За счет нелинейности характеристики $V(E)$ ток через диод имеет сложную форму, содержащую высшие гармоники. Выделение гармоники осуществлялось контуром, настроенным на частоту гармоники. Амплитуды постоянной составляющей, первой и n-ой гармоники тока определяются из разложения формы тока через диод $I(t)$ в ряд Фурье.

Постоянная составляющая тока через диод и амплитуды гармоник могут быть записаны и в виде:

$$J(t) = J_0 + J_g(1) \sin(\omega t + \varphi_1) + J_g(2) \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + J_g(n) \sin(n\omega t + \varphi_n), \tag{2}$$

$$J_g(n) = \sqrt{J_{gs}(n)^2 + J_{gc}(n)^2}, \quad \text{tg} \varphi_n = \frac{J_{gc}(n)}{J_{gs}(n)} \tag{3}$$

$$J_0 = \frac{1}{T} \int_0^T J(t) dt, \quad J_{gs}(n) = \frac{2}{T} \int_0^T J(t) \sin n\omega t dt, \quad J_{gc}(n) = \frac{2}{T} \int_0^T J(t) \cos n\omega t dt, \tag{4}$$

$$J_g(n) = \frac{1}{T} \int_0^T J(t) \sin\left\{n\omega t + \frac{\pi}{2}(n+1)\right\} (-1)^n dt \tag{5}$$

Коэффициент преобразования частоты КПЧ или коэффициент полезного действия (это отношение мощности на n-ой гармонике к поступающей на диод к мощности первой гармоники) определяется для формул (5) в виде:

$$\text{КПЧ}_n(\eta) = \frac{E_n \cdot \int_0^T J(t) (-1)^n \sin\left[n\omega t + \frac{\pi}{2}(n+1)\right] dt}{\int_0^T J(t) E(t) dt} \cdot 100\% \tag{6}$$

или для формул (2) – (4) в виде
$$\text{КПЧ} = \frac{J_g(n) \cdot E_g}{J_g(1) \cdot E_1} \cdot 100\% \tag{7}$$

Поскольку преобразование в большинстве случаев происходит на второй и реже на третьей гармонике приводим результаты для этих гармоник для GaAs.

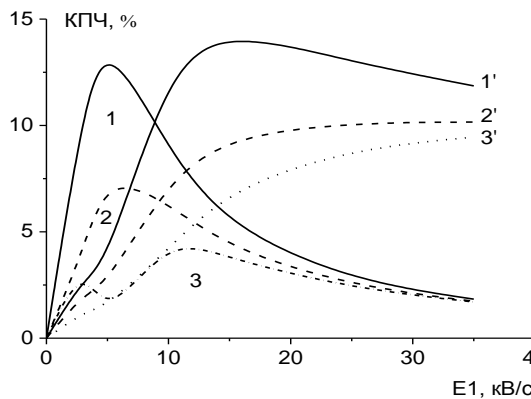


Рис.1. Зависимость КПЧ на второй и третьей гармониках от входной амплитуды при $E_2=0,3E_1$ и $E_0=2$ кВ/см, материал GaAs:
 1 – $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, 2 – $3000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$,
 3 – $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (вторая гармоника),
 1' – $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, 2' – $3000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$,
 3' – $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (третья гармоника)

Зависимости КПЧ (E_1) показаны на рис. 1. Зависимость скорость-поле на низких частотах записывается в виде (1) с $\mu_0 = 8 \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $E_0 = 4 \text{ кВ/см}$, $V_s = 10^7 \text{ см/с}$. Диод имел параметры $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $L = 10^3 \text{ см}$, $S = 10^4 \text{ см}$.

Как видно из рис. 1 наличие участка ОДП на второй гармонике повышает КПЧ в три раза (при сравнении КПЧ при подвижности $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и подвижности $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Максимум КПЧ при подвижности $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ наблюдается при амплитудах первой гармоники порядка 3 - 5 кВ/см, а при подвижности $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ – 11 - 13 кВ/см. Эффективность преобразования частоты при ОДП и без ОДП существенно зависят от напряженности электрического поля E_1 . Так при пороговых напряжениях КПЧ при подвижности $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

больше КПЧ при подвижности $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (отсутствие ОДП) в 5 раз. При дальнейшем увеличении напряженности E отношение КПЧ при подвижности $8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ к КПЧ при подвижности $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ уменьшается (при 10 - 12 кВ/см составляет порядка 2, а при 20 - 30 кВ/см отношения КПЧ близки к единице). Это обусловлено тем, что основной вклад в форму тока через диод при таких напряжениях вносит насыщение ВАХ, а не ОДП. Таким образом, расчеты показывают, что увеличение КПЧ происходит на участках ОДП.

Аналогичная картина наблюдается на третьей гармонике. При пороговой напряженности кривая с участком ОДП в 2 раза выше кривой без ОДП. При напряженностях электрического поля 15 кВ/см, когда наблюдается максимум КПЧ на третьей гармонике он больше по сравнению с зависимостью без ОДП примерно тоже в 2 раза. При дальнейшем увеличении напряженности отношение КПЧ при различных подвижностях уменьшается. Без смещения $E_0 = 0$ наибольший КПЧ на нечетных гармониках, при смещении – на четных.

ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННОСТИ

С увеличением частоты зависимости $V(E)$ начнут отличаться от статических зависимостей и будут представлять гистерезисные кривые. При увеличении напряженности электрического поля средняя скорость электронов будет больше средней скорости электронов, соответствующей статической зависимости $V(E)$, а при уменьшении напряженности электрического поля меньше средней скорости электронов, соответствующей статической зависимости $V(E)$ [5]. Соответствующим образом должно меняться и ОДП GaAs и нитридов и эффективность умножения в режиме однородного поля.

Для определения влияния частоты на КПЧ использовались частотные зависимости $V(E)$, рассчитанные многочастичным методом Монте-Карло [6] для GaAs. При расчетах использовалась следующая модель GaAs. Электроны при разогреве электрическим полем переносятся из Γ -долины, расположенной в центре зоны Бриллюэна, в боковые долины L и X, расположенные по энергии над Γ -долиной. Все переносы электронов между долинами учтены при расчете частотных зависимостей $V(E)$. В расчетах учитывались все существенные механизмы рассеяния электронов: акустическое, полярное оптическое, примесное, пьезоэлектрическое, междолинное и эквивалентное междолинное. Пьезоэлектрическое рассеяние в [7] оказывает влияние на зависимости скорость-поле при постоянной напряженности электрического поля и, естественно, будет влиять и на частотную зависимость эффективности генерации. Во всех долинах учитывалась непараболичность [8]. Все параметры, необходимые в расчетах для GaAs, были взяты из литературы [9].

В режиме умножения в диоде действует напряженность электрического поля $E(t) = E_0 + E_1 \sin \omega t$ при $E_0 \ll E_1$. Рабочая точка в течение периода колебаний перемещается по гистерезисной зависимости $V(E)$ соединения во время положительной и отрицательной напряженности электрического поля. Ток через диод определяется в виде: $I(t) = enV(E(t))$. Для определения эффективности преобразования, например, на n -ой гармонике необходимо ток $I(t)$ разложить в ряд Фурье и определить постоянную составляющую тока и амплитуды первой гармоники, второй гармоники и третьей гармоники. При исследовании частотных зависимостей КПЧ выделение второй или третьей гармоник происходило аналогично расчетам проведенным для статической зависимости $V(E)$.

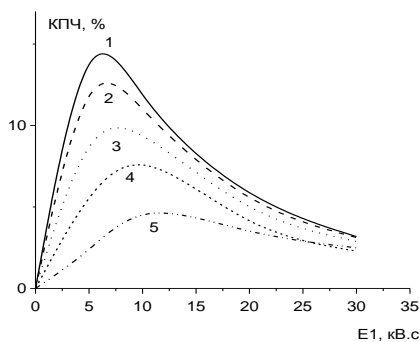


Рис.2. Зависимость коэффициента преобразования частоты на второй гармонике от амплитуды первой (входной) гармоники от частоты при $E_2 = 0,3E_1$ и $E_0 = 2 \text{ кВ/см}$ (GaAs):

- 1 - 10 ГГц,
- 2 - 50 ГГц,
- 3 - 100 ГГц,
- 4 - 200 ГГц,
- 5 - 400 ГГц

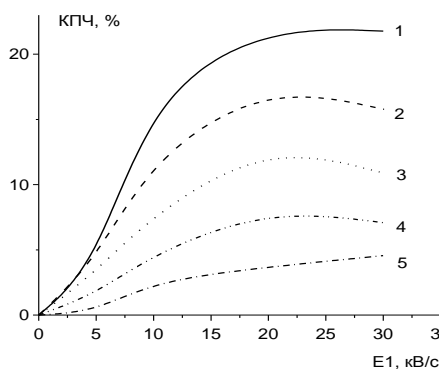


Рис.3. Зависимость коэффициента преобразования частоты на третьей гармонике от амплитуды первой (входной) гармоники от частоты при $E_2 = 0,3E_1$ и $E_0 = 2 \text{ кВ/см}$ (GaAs):

- 1 - 10 ГГц,
- 2 - 50 ГГц,
- 3 - 100 ГГц,
- 4 - 200 ГГц,
- 5 - 400 ГГц

Зависимость эффективности преобразования частоты от частоты для GaAs при различных амплитудах входного сигнала показана на рис. 2, 3. Из анализа зависимостей следует:

1. Подвижность в слабом электрическом поле и отрицательная дифференциальная проводимость влияют на КПЧ и на второй и на третьей гармониках. Высокий КПЧ на второй гармонике наблюдается при напряженностях электрического поля близких к пороговым. По мере увеличения амплитуды первой гармоники напряженности электрического поля E_1 КПЧ при всех значениях подвижности или ОДП сближаются и при больших E_1 становятся одинаковыми. В последнем случае КПЧ определяется скоростью насыщения зависимости $V(E)$.

2. На третьей гармонике максимум КПЧ наблюдается при 5-6 пороговых напряженностях электрического поля, но он также зависит от подвижности и ОДП.

3. КПЧ на второй и третьей гармониках зависит от частоты входного сигнала. Чем выше частота, подаваемая на диод, тем больше проявляется инерционность перераспределения электронов между долинами зоны проводимости, тем больше гистерезис описывает зависимость $V(E)$ и тем меньше становится КПЧ.

4. КПЧ наблюдается на частотах, которые могут намного превосходить максимальную частоту генерации в режиме однородного поля в данном материале (GaAs). Для умножения ведь нужна только нелинейность зависимости скорость-поле, а нелинейность будет проявляться на частотах, где генерации не может быть по определению. Для GaAs максимальная частота генерации в режиме однородного поля составляет порядка 100...120 ГГц, а умножение частоты, как показано выше, возможно и на частотах 200 ГГц и выше.

Некоторое несовпадение КПЧ на рис. 1 и рис. 2, 3 обусловлено некоторым различием зависимостей $V(E)$ по аппроксимациям вычисленных методом Монте-Карло.

Аналогичные результаты качественно характерны и для GaN, нитридов и их соединений.

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

— показано, что коэффициент преобразования частоты на проводимости диодов из арсенида галлия в режиме однородного поля на низких частотах достигает значений – на второй гармонике 12%, на третьей 15% при максимальной подвижности и максимальном ОДП; при увеличении амплитуды входного сигнала КПЧ уменьшается на всех гармониках;

— показано, что при увеличении частоты входного сигнала КПЧ уменьшается вследствие изменения зависимостей скорость поле GaAs, обусловленных инерционностью перераспределения носителей между долинами зоны проводимости GaAs;

— основной вывод, следующий из проведенных исследований преобразование частоты на проводимости диодов из GaAs возможно на частотах, превосходящих максимальную частоту генерации диодов в режиме однородного поля.

Следует отметить, что КПЧ на генерирующих диодах из GaAs будут отличны от КПЧ, полученных на диодах из GaAs в режиме однородного электрического поля, что может быть обусловлено прежде всего несимметричностью характеристик диодов. Это требует отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боцула О.В., Павленко Д.В., Прохоров Э. Д., Генерация гармоник при ударной ионизации в ОНОЗ диодах на основе GaN. // Вестник ХНУ имени В.Н.Каразина, радиофизика и электроника. 2008, № 806, вып.12, с. 65-69.
2. Прохоров Э.Д., Боцула О.В., Грищенко И. А., Умножение частоты при ударной ионизации диодами с МПЭ на основе AlN, InN. // Вестник ХНУ имени В.Н.Каразина, Радиофизика и электроника. 2009, № 883, вып.15, с.30-34.
3. 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 111nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries. // IEEE Transaction on Electron Devices. 2001, v.48, No.3, pp.535-542.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, М. Мир, 1984, т.2, 456 с.
5. Прохоров Э.Д., Белецкий Н.И. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов, Харьков. Вища школа, 1982, 144 с.
6. Иващенко В. М., Митин В. В. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте – Карло. К: Наукова думка, 1990, 192 с.
7. Б. Ридли, Квантовые процессы в полупроводниках, М.: Мир, 1986. 304 с.
8. J. C. Cao, X.L. Lei Nonparabolic multivalley balance – equation approach to impact ionization: Application to wurtzite GaN, The European Physical Journal B. 1999, Vol.7. P.79-83.
9. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, URL, <http://www.ioffe.rssi.ru>, Semiconductor, GaAs, GaN.