

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

**ГЕНЕРАЦИЯ И УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ
ДИОДАМИ С ТУННЕЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ НА ОСНОВЕ GaAs**

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина
E-mail: e.d.prokhorov@mail.ru*

Исследуются вольт-амперные характеристики и эффективность генерации диодов с туннельными границами (ТГ) в структурах типа «сэндвич» на основе GaAs. Показано, как влияют сопротивления между контактами диодной структуры и сопротивления, включенные последовательно с ТГ, на эффективность генерации на основной частоте и частотах гармоник. Оценен частотный предел работы диодов с ТГ. Показана возможность генерации гармоник и умножения частоты на диодах с ТГ в диапазоне десяти-сотни гигагерц. Ил. 9. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: GaAs-диоды с туннельной границей, вольт-амперные характеристики, эффективность генерации, генерация гармоник, умножение частоты.

Исследуются диоды, в которых при определенных напряжениях между омическими контактами возникает отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) за счет туннелирования электронов через боковые границы диода. Принцип работы таких диодов описан в работах [1, 2]. В работе [2] исследованы импедансы таких структур и показано, что активная составляющая импеданса стремится к нулю для конкретных параметров диода на частотах, лежащих в коротковолновой части мм диапазона и в длинноволновой части субмм диапазона. Однако по зависимостям импеданса от частоты нельзя судить об эффективности генерации диодов в диапазоне частот, возможностях генерации гармоник и умножения частоты такими диодами. Выяснению этих возможностей и посвящена настоящая статья.

1. Эффективность генерации на 1-й гармонике. Рассматриваемые диоды с туннельной границей (ТГ) показаны на рис. 1. ОДП диода с ТГ образуется за счет тока ТГ [1, 2]. Далее рассматривается структура типа «сэндвич» (рис. 1) как более простая для анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) и эффективности генерации диодов с ТГ.

Для оценки ВАХ рассматриваемых структур можно воспользоваться представлением структуры типа «сэндвич» в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами. Приближенная эквивалентная схема такой структуры представляет собой проводимость ТГ, параллельно которой включена емкость ТГ. Последовательно с ТГ включено сопротивление R_2 , состоящее из сопротивления потерь R_s и сопротивления между ТГ и катодом. Сопротивление R_1 (сопротивление канала между анодом и катодом) включено параллельно ТГ и R_2 [3].

ВАХ диода на постоянном токе и напряжении находится из трансцендентного уравнения, составленного на основе эквивалентной схемы:

$$I(U) = I_{ТГ}(U - I_{ТГ}R_2) + U / R_1, \quad (1)$$

где U – приложенное к диоду напряжение; $I_{ТГ}(U)$ – зависимость тока через ТГ от напряжения на ТГ.

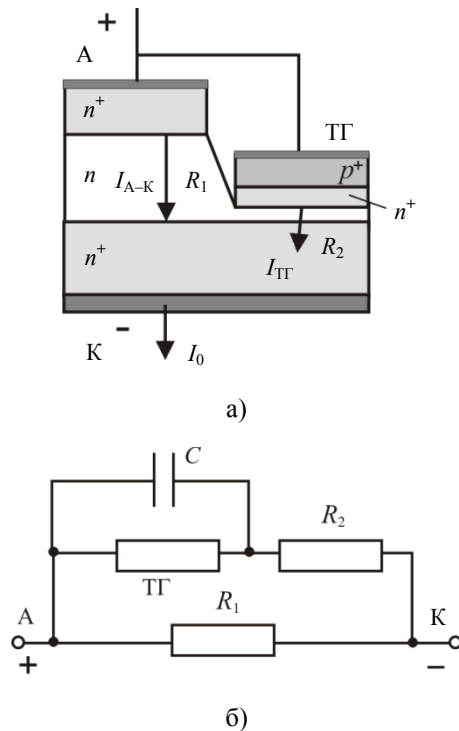


Рис. 1 Структура типа «сэндвич» на сильнолегированной подложке n^+ -GaAs (а) при прямом включении ТГ и эквивалентная схема диода с ТГ (б)

В уравнении (1) использовалась аппроксимация туннельного тока через ТГ (туннельный ток превосходит диффузионно-дрейфовые токи в тонких p^+-n^+ -переходах с толщиной $\sim 100 \dots 150 \text{ \AA}$) в виде [3–6]:

$$I_{ТГ}(U) = I_{\max} \frac{U}{U_{\max}} \exp\left(1 - \frac{U}{U_{\max}}\right) + I_{\max} \exp(A(U - U_{\max})) + I_s \exp\left(b \frac{eU}{kT} - 1\right), \quad (2)$$

где I_{\max} – максимальный туннельный ток через диод при напряжении U_{\max} ; I_{\min} – минимальный ток через диод при напряжении U_{\min} ; A – постоянная, характерная для избыточного тока конкретного полупроводникового материала; b – показатель роста диффузионного тока через переход; I_S – ток насыщения туннельного перехода без учета туннелирования [7].

Сопротивления равны:

$$R_1(U) = \frac{l_1^2}{enSv(U/l_1)}; \quad (3)$$

$$R_2(U_2) = \frac{l_2^2}{enSv(U_2/l_2)}. \quad (4)$$

где U_2 – напряжение на сопротивлении R_2 . Отметим, что $R_2 \ll R_1$, падение напряжения на нем мало, можно полагать R_2 постоянным при приложенных к нему напряжениях $U_2 \ll U_p$. В этом случае ограничения тока $I_{\text{ТГ}}(U)$ из-за насыщения дрейфовой скорости электронов через R_2 не происходит.

В режиме однородного поля в области анод–катод можно использовать аппроксимацию скорость–поле GaAs в виде [8]:

$$v(U/l) = \frac{\mu_n(U/l) + v_s(U/U_p)^4}{1 + (U/U_p)^4}, \quad (5)$$

где v_s – дрейфовая скорость насыщения в GaAs ($\sim 10^7$ см/с); U_p – пороговое напряжение; μ_n – низкополевая подвижность.

Решая трансцендентное уравнение (1), можно определить ВАХ диода с ТГ в зависимости от параметров ТГ и параметров всей структуры R_1 и R_2 .

По ВАХ определялись эффективности генерации. В режиме генерации в одноконтурном резонаторе на диоде действует напряжение $U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t$, учитывая $U_0 > U_{\max}$, при соотношении амплитуд $U_0 - U_1 > 0,5 U_{\max}$. Ток через диод разлагается в ряд Фурье и определяется постоянной составляющей тока и амплитуда 1-й гармоники. Для получения максимального значения эффективности генерации для задаваемого поля U_0 амплитуда 1-й гармоники U_1 оптимизируется.

Численные расчеты ВАХ диодов с ТГ при прямом смещении проводились при следующих параметрах (первый вариант): материал GaAs, $n = 10^{16}$ см $^{-3}$, $\mu_n = 7000$ см 2 /(В·с), площадь анодного контакта $S_1 = 10^{-6}$ см 2 , l_1 – расстояние между катодом и анодом (если $l_1 = 10^{-4}$ см, то сопротивление для указанных параметров при

напряжениях до 0,3 В составляет $R_1 \approx 10$ Ом), $I_{\max} = 0,2$ А, $U_{\max} = 0,1$ В, $I_S = 10^{-6}$ А, $b = 0,3$. Сопротивление R_2 при $l_2 = 10^{-5}$ см и $S_2 = 10^{-6}$ см 2 составляет менее 1 Ом. Емкость $C < 1$ пФ ($C = \epsilon\epsilon_0 S/L$, где L – толщина ТГ менее 10^{-6} см). Учет междолинного переноса влияет на ВАХ (рис. 2) и на эффективность генерации (рис. 3).

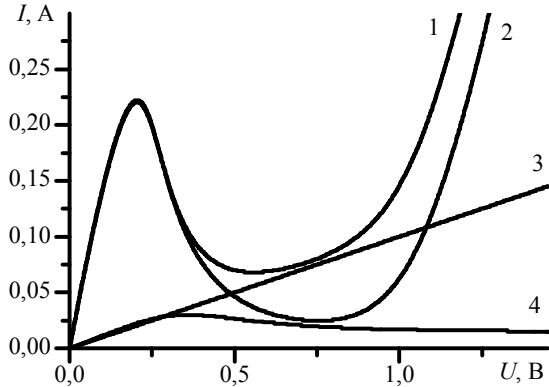


Рис. 2. ВАХ диода с ТГ для GaAs: 1 – общий ток при $R_1 = 10$ Ом; 2 – общий ток при $R_1 = f(U)$; 3 – ток через $R_1 = 10$ Ом; 4 – ток через $R_1 = f(U)$

Анализ зависимостей рис. 2 показывает, что учет междолинного переноса электронов в промежутке анод–катод приводит к увеличению отношения I_{\max} / I_{\min} , расширению области ОДП и увеличению эффективности генерации диодов. Диапазон генерации по напряжению составляет 0,2...0,7 В.

Таким образом, рассматриваемый диод с ТГ обладает регулируемой ВАХ с высоким КПД на 1-й гармонике при рассеиваемых мощностях для выше указанных параметров 20...200 мВт и полезной мощности 5...50 мВт.

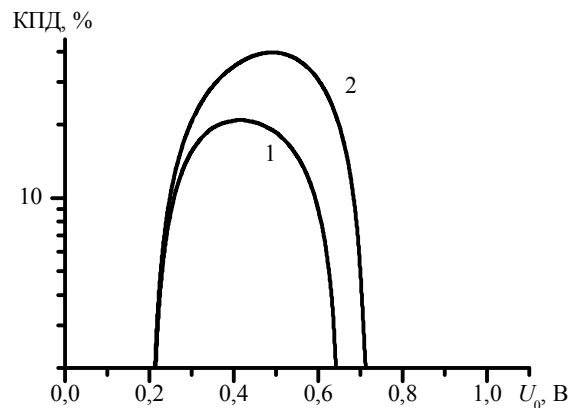


Рис. 3. Эффективность генерации при прямом включении диода с ТГ при R_1 : 1 – 10 Ом; 2 – $R_1 = f(U)$

2. Зависимости ВАХ и КПД от частоты.

С увеличением частоты определенную роль будет играть емкостное сопротивление $R = 1/\omega C$ ТГ, ко-

торое включено параллельно активной проводимости ТГ. С увеличением частоты через сопротивление R_2 будет протекать не только ток проводимости ТГ, но и емкостной ток. Тогда ток I_2 , протекающий через ТГ, емкость и сопротивление R_2 определяется из трансцендентного уравнения

$$I_2 = \frac{U - I_2 R_2}{Z_C} + I_{ТГ}(U - I_2 R_2). \quad (6)$$

Уравнение для ВАХ диода с ТГ запишем в виде

$$I(U) = I_2(U) + \frac{U}{R_1(U)}. \quad (7)$$

Решая уравнения (6)–(7), получаем частотные зависимости ВАХ и рассчитанные по этим зависимостям КПД (f). Для параметров диода с ТГ, приведенных выше, зависимости ОДП, максимального и минимального тока показаны на рис. 4, 5.

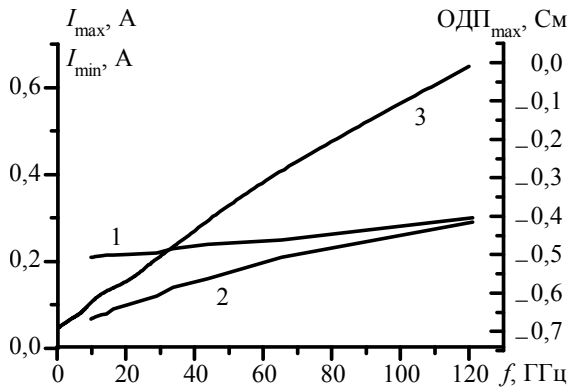


Рис. 4. Зависимости в диоде с ТГ от частоты для первого варианта параметров: 1 – $I_{\max}(f)$; 2 – $I_{\min}(f)$ и 3 – $ОДП_{\max}(f)$

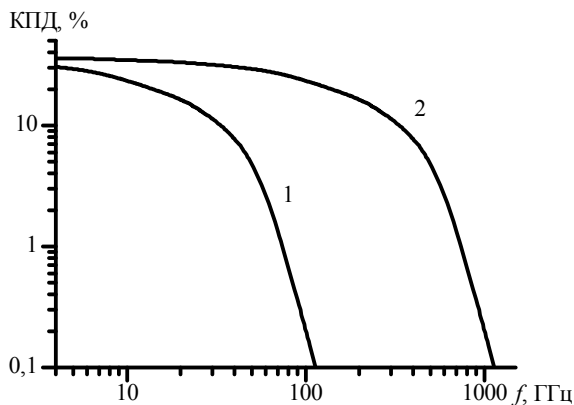


Рис. 5. Зависимость эффективности генерации от частоты для первого варианта параметров (1) и для второго (2)

Из анализа зависимостей следует, что при уменьшении емкостного сопротивления возрастают I_{\max} , U_{\max} , I_{\min} , а U_{\min} уменьшается, как и разница напряжений $U_{\min} - U_{\max}$ вплоть до исчезновения, а КПД на определенной частоте становится равным нулю (рис. 5).

Для увеличения частоты генерации необходимо уменьшение размеров диода с ТГ. Следует отметить, что в расчетах не учитывается инерционность туннельного механизма проводимости. Это обусловлено тем, что время туннелирования через барьер 1,45 эВм шириной 100...150 Å составляет $10^{-14} - 10^{-15}$ с, что намного меньше периода колебаний рассматриваемых частот ($10^{-11} - 10^{-12}$ с).

Проведен численный расчет диода с меньшими площадями контактов (второй вариант) на основе материала GaAs с $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_n = 7000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при $S_1 = 10^{-7} \text{ см}^2$, $l_1 = 10^{-5} \text{ см}$, сопротивление в слабом электрическом поле $R_1 \approx 10 \text{ Ом}$, сопротивление R_2 при $l_1 = 10^{-6} \text{ см}$ и $S_2 = 10^{-7} \text{ см}^2$ составляет менее 1 Ом, $I_{\max} = 0,02 \text{ А}$, $U_{\max} = 0,1 \text{ В}$, $I_S = 10^{-7} \text{ А}$, $b = 0,3$. Емкость $C < 0,1 \text{ пФ}$. Рассеиваемая мощность 2...20 мВт, полезная 0,2...6 мВт. Частота, на которой ВАХ не имеет участка ОДП и КПД равен нулю, составляет $\sim 1000 \text{ ГГц}$ (рис. 5).

Таким образом, КПД диода с ТГ при увеличении частоты уменьшается, а верхний частотный предел зависит от параметров диода с ТГ.

3. Генерация гармоник. ВАХ диода с ТГ нелинейна, имеет участок ОДП. При выведении постоянного напряжения на участок ОДП возникает генерация СВЧ-колебаний. В режиме генерации ток через диод имеет сложную форму, содержащую множество гармоник. Любую гармонику можно выделить, поместив диод с ТГ в сложный резонатор, состоящий из резонатора настроенного на 1-ю гармонику и резонатора на n -ю гармонику. В этом случае на диоде с ТГ действует напряжение

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1} U_n (-1)^n \sin \left[n\omega t + \frac{\pi}{2}(n+1) \right]. \quad (8)$$

Постоянная составляющая и амплитуда n -ой гармоники тока определяются по формулам:

$$I(U_0) = \frac{1}{T} \int_0^T I(U(t)) dt; \quad (9)$$

$$I_g(n) = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \sin \left\{ n\omega t + \frac{\pi}{2}(n+1) \right\} (-1)^n dt. \quad (10)$$

Эффективность генерации на первой и n -й гармониках определяются в виде

$$\text{КПД} = \frac{1}{2} \frac{I_g(n) U_n}{I(U_0) U_0} 100 \%. \quad (11)$$

При необходимости получить максимальный КПД на n -й гармонике следует оптимизировать амплитуды и 1-й, и n -й гармоник. Здесь возможны режимы – генерация на основной частоте в присутствии гармоник, генерация гармоник при работе диода на основной частоте и генерация на частотах гармоник.

Введение 2-й гармоники в сигнал напряжения на диоде приводит к увеличению эффективности генерации (КПД) на 1-й гармонике [9, 10]. На 2-й гармонике при малых амплитудах напряжения, близких к пороговым, тоже наблюдается генерация, которая при увеличении напряжения может возрасти по мощности. То же самое происходит и в присутствии n -й гармоники. В этом случае можно говорить об оптимальной генерации на основной частоте в присутствии гармоник (на рис. 6 амплитуда 2-й гармоники меняется от 0 до напряжений, соответствующих точкам А и Б).

Увеличение эффективности генерации на гармониках приводит к уменьшению эффективности генерации на 1-й гармонике. Когда генерация на 1-й гармонике по мощности становится меньше мощности 2-й гармоники, то такую ситуацию можно характеризовать как генерацию на частотах гармоник (на рис. 6 КПД на 2-й гармонике больше КПД 1-й гармоники в точках В, Г).

На рис. 6 результаты представлены для основной частоты меньше 10 ГГц. Для $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $U_0 = 0,4 \text{ В}$, $U_1 = 0,35 \text{ В}$, для $R_1 = f(U) U_0 = 0,5 \text{ В}$, $U_1 = 0,45 \text{ В}$.

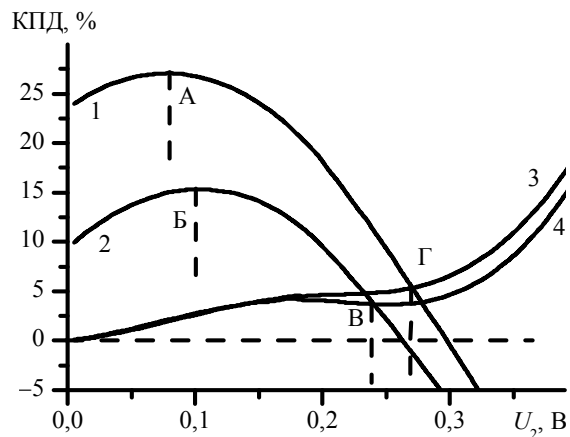


Рис. 6. Эффективность генерации диода с ТГ $R_2 = 0,5 \text{ Ом}$ на 1-й и 2-й гармониках от амплитуды 2-й гармоники: 1 – 1-я гармоника $R_1 = 10 \text{ Ом}$; 2 – 1-я гармоника $R_1 = f(U)$; 3 – 2-я гармоника $R_1 = 10 \text{ Ом}$; 4 – 2-я гармоника $R_1 = f(U)$

Когда КПД на 1-й гармонике больше КПД на высших гармониках, то можно говорить о генерации гармоник при работе диода на основной частоте (на рис. 6 амплитуда напряжения 1-й гармоники меняется от напряжения в точках А и Б до напряжений в точках В и Г).

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. Варианты перераспределения мощности между гармониками в зависимости от амплитуды 2-й гар-

моники показаны на рис. 6. Видно, что при увеличении амплитуды U_2 увеличивается КПД на 2-й гармонике, при этом КПД на 1-й гармонике выше, чем на 2-й.

Максимальные КПД в режиме генерации гармоник уменьшаются с увеличением номера гармоники, что характерно для любого сложного во времени сигнала (в нашем случае тока через диод $I(U(t))$).

С увеличением частоты КПД на гармониках будет уменьшаться, поскольку будет уменьшаться КПД на основной частоте из-за шунтирующего влияния емкости ТГ (см. рис. 5).

Возможна также генерация на частоте гармоник, но при этом эффективность генерации на основной частоте становится меньше эффективности генерации на частоте гармоники или происходит поглощение мощности на основной частоте. При увеличении частоты основной гармоники эффективность генерации и на основной частоте и на частотах гармоник значительно уменьшаются.

Таким образом, диод с ТГ может быть использован для эффективной генерации на частотах гармоник в широком диапазоне частот в коротковолновой части мм диапазона.

При генерации на 2-й гармонике (рис. 7) можно получить большую мощность по сравнению с генерацией на той же частоте на 1-й гармонике.

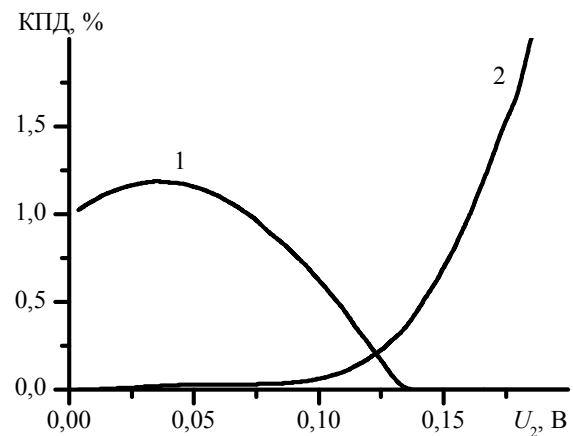


Рис. 7. Эффективность генерации на 1-й (1) и 2-й (2) гармониках на частоте 1-й гармоники 80 ГГц при $R_1 = f(U)$, $U_0 = 0,33 \text{ В}$, $U_2 = 0,15 \text{ В}$

4. Умножение частоты. В отличие от генерации в случае умножения частоты, на диод или не подается постоянное смещение, или подается смещение, не превышающее U_{max} [11, 12]. ВАХ диода с ТГ при прямом смещении записана в виде (2). При обратном смещении избыточный и диффузионный токи становятся значительно меньше туннельного тока:

$$I_{\max} \frac{-U}{U_{\max}} \exp\left(1 + \frac{U}{U_{\max}}\right) \gg \quad (12)$$

$$\gg I_{\max} \exp(A(-U - U_{\max})),$$

$$I_{\max} \frac{-U}{U_{\max}} \exp\left(1 + \frac{U}{U_{\max}}\right) \gg \quad (13)$$

$$\gg I_s \exp\left(-b \frac{eU}{kT} - 1\right).$$

Коэффициент преобразования частоты (КПЧ) или коэффициент полезного действия (это отношение мощности на n -й гармонике поступающей на диод к мощности 1-й гармоники) определяется как

$$\text{КПЧ} = \frac{I_g(n)U_g}{I_g(1)U_1} 100 \%. \quad (14)$$

ВАХ диода с ТГ несимметрична (при прямом смещении ВАХ имеет участок ОДП, при обратном наблюдается резкий рост туннельного тока). Исходя из эквивалентной схемы ток при обратном смещении ограничивается сопротивлением R_2 . ВАХ при прямом и обратном смещениях зависят от параметров диода с ТГ, естественно, что и КПЧ будут зависеть от этих параметров диодов и от частоты.

В режиме умножения на диод подается сигнал с определенной частотой и амплитудой: $U(t) = U_0 + U_1 \sin \omega t$, где U_0, U_1 – постоянная составляющая и амплитуда входного сигнала соответственно. Из-за нелинейности характеристики $I(U_0)$ ток через диод имеет сложную форму, содержащую высшие гармоники. Выделение гармоники осуществлялось контуром, настроенным на частоту гармоники. Амплитуды постоянной составляющей, 1-й и n -й гармоники тока определяются из разложения формы тока через диод $I(t)$ в ряд Фурье.

Поскольку преобразование в большинстве случаев происходит на 2-й и реже на 3-й гармониках, приводим результаты этих гармоник для диода с ТГ на основе GaAs с параметрами диода для первого варианта (рис. 8–9).

Анализ частотных зависимостей КПЧ показывает, что с увеличением частоты эффективность преобразования частоты уменьшается.

Уменьшение ОДП диода с ТГ приводит к увеличению частоты. Более того, умножение частоты возможно и на частотах, превосходящих максимальную частоту генерации диодов с ТГ (на 100 ГГц ОДП стремится к нулю, диод генерировать не может, а нелинейность ВАХ остается).

Таким образом, диод с ТГ может эффективно преобразовывать входные сигналы мм диапазона в сигналы коротковолновой части мм и субмм диапазонов.

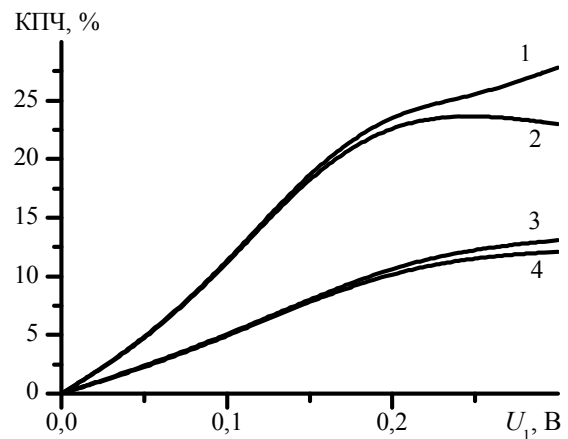


Рис. 8. Зависимости КПЧ диода с ТГ на 2-й гармонике от амплитуды 1-й гармоники при постоянном смещении $U_0 = 0,15$ В: 1 – 10 ГГц, $R_1 = f(U)$; 2 – 10 ГГц, $R_1 = 10$ Ом; 3 – 80 ГГц, $R_1 = f(U)$; 4 – 80 ГГц, $R_1 = 10$ Ом

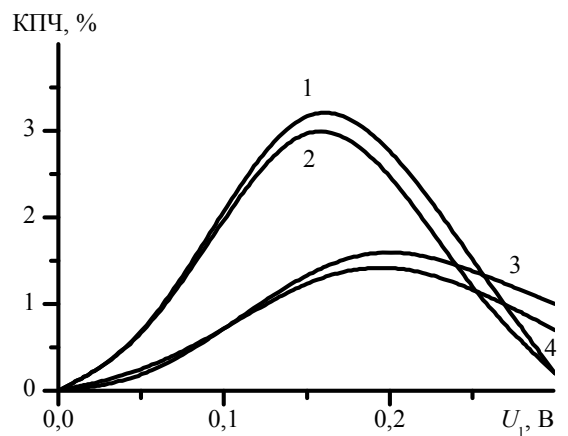


Рис. 9. Зависимости КПЧ диода с ТГ на 3-й гармонике от амплитуды 1-й гармоники при постоянном смещении $U_0 = 0,15$ В: 1 – 10 ГГц, $R_1 = f(U)$; 2 – 10 ГГц, $R_1 = 10$ Ом; 3 – 80 ГГц, $R_1 = f(U)$; 4 – 80 ГГц, $R_1 = 10$ Ом

Выводы. Показано, что ВАХ диодов с ТГ в структуре типа «сэндвич» обладают ОДП, зависящей от сопротивлений, которые включены последовательно и параллельно ТГ. Последовательно включенное сопротивление должно быть намного меньше параллельно включенного сопротивления.

Учет междолинного переноса электронов в промежутке анод–катод диода с ТГ улучшает ОДП диода, расширяет диапазон генерации диода по напряжению и увеличивает КПД генерации в этом диапазоне.

Показано, что параметры диода с ТГ определяют диапазон генерации по напряжению и максимальные значения КПД в этом диапазоне, максимальные значения КПД на низких частотах составляют 26...32 % при рассеиваемых мощностях до 200 мВт.

Максимальные частоты генерации при микроразмерах структуры (площади $10^{-7} \dots 10^{-6}$ см²)

находятся в коротковолновой части мм и длинноволновой части субмм диапазонов (120...1 000 ГГц).

При генерации на 2-й гармонике (например, на 80 ГГц) можно получить большую мощность по сравнению с генерацией на той же частоте на 1-й гармонике.

Диод с ТГ может эффективно преобразовывать входные сигналы мм диапазона в сигналы коротковолновой части мм и субмм диапазонов даже на частотах, на которых в диоде отсутствует ОДП.

1. Прохоров Э. Д. Отрицательная дифференциальная проводимость полупроводникового диода с туннельными боковыми гранями / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 2. – С. 109–113.
2. Прохоров Э. Д. Импедансные характеристики диодов с туннельными и резонансно-туннельными границами / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(16), № 1. – С. 54–57.
3. Esaki L. New Phenomenon in Narrow Germanium p-n junction / L. Esaki // Phys. Rev. – 1958. – 109, iss. 2. – P. 603–605.
4. Hall R. N. Tunnel diodes / R. N. Hall // IRE Trans. Electron Devices. – 1960. – 7, iss. 1. – P. 1–9.
5. Carr W. N. Reversible degradation effects in tunnel diodes / W. N. Carr // Solid state electron. – 1962. – 5, iss. 4. – P. 261–263.
6. Holonyak Nic. Evidenc of state in the forbidden gap of degenerate GaAs and InP – secondary tunnel current and negative resistance / Nic. Holonyak // J. Appl. Phys. – 1961. – 32, iss. 1. – P. 130.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. Т. 2 / С. Зи; пер. с англ. под ред. Р. А. Суриса. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
8. Прохоров Э. Д. Твердотельная электроника / Э. Д. Прохоров. – Х.: Харьк. нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2008. – 544 с.
9. Прохоров Э. Д. О возможности увеличения высокочастотного предела работы диодов Ганна / Э. Д. Прохоров, Н. И. Белецкий, А. В. Дядченко // Радиотехника и электроника. – 1972. – 17, № 5. – С. 1103–1105.
10. Прохоров Э. Д. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов / Э. Д. Прохоров, Н. И. Белецкий. – Х.: Вища школа, 1982. – 144 с.
11. Ризкин И. К. Умножители и делители частоты / И. К. Ризкин. – М.: Связь, 1976. – 328 с.

12. Жаботинский М. Е. Основы теории и техника умножения частоты / М. Е. Жаботинский, Ю. Л. Свердлов. – М.: Сов. радио, 1964. – 327 с.

E. D. Prokhorov, O. V. Botsula, O. A. Klimentko

GENERATION AND FREQUENCY MULTIPLICATION BY DIODES WITH TUNNEL BOUNDARIES BASED ON GaAs

The current-voltage characteristics and the generation efficiency diodes with tunnel boundaries (TB) in structures of the «sandwich» based on GaAs are investigated. The effect of resistance between the contacts of the diode structure and the resistance in series with the TG on the efficiency of generation at the fundamental and harmonic frequencies is shown. Frequency limit of the diodes with TB is estimated. The possibility of harmonic generation and frequency multiplication using diodes with TG in the range of tens to hundreds of gigahertz is shown.

Key words: GaAs-diodes with a tunneling boundary, the current-voltage characteristics, efficiency of generation, the generation of harmonics, frequency multiplication.

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

ГЕНЕРАЦІЯ І МНОЖЕННЯ ЧАСТОТИ ДІОДАМИ З ТУНЕЛЬНИМИ МЕЖАМИ НА ОСНОВІ GaAs

Досліджено вольт-амперні характеристики та ефективність генерації діодів з тунельними межами в структурах типу «сандвич» на основі GaAs. Показано, як впливають опори між контактами діодної структури й опори, включені послідовно з тунельною межею, на ефективність генерації на основній частоті та частотах гармонік. Оцінено частотну границю роботи діодів з тунельними межами. Показано можливість генерації гармонік і множення частоти на діодах з тунельною межею в діапазоні десятки-сотні гігагерц.

Ключові слова: GaAs-діоди з тунельною межею, вольт-амперні характеристики, ефективність генерації, генерація гармонік, множення частоти.

Рукопись поступила 17.03.11 г.