

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко, И. П. Стороженко

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

E-mail: e.d.prokhorov@mail.ru

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ДИОДОВ
С РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ В «СЭНДВИЧ»-ВАРИАНТЕ**

Исследуются вольтамперные характеристики и эффективность генерации диодов с резонансно-туннельными границами (РТГ) в структурах типа «сэндвич» на основе GaAs. Рассмотрены одно- и двухуровневые модели РТГ. Оценен частотный предел работы диодов с РТГ. Показана возможность генерации гармоник и умножения частоты на диодах с РТГ в диапазоне несколько десятков гигагерц. Ил. 10. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: GaAs-диоды, резонансно-туннельная граница, вольтамперные характеристики, эффективность генерации, генерация гармоник, умножение частоты.

В работе [1] изложены принципы работы новых полупроводниковых приборов с туннельными и резонансно-туннельными границами (РТГ), обладающих отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). Эти приборы могут быть использованы для генерации и умножения частоты в миллиметровом (мм) и субмиллиметровом (субмм) диапазонах. В работах [2–4] исследованы энергетические и частотные характеристики диодов с туннельными границами в «сэндвич»-структуре.

Цель настоящей работы – исследовать вольтамперные характеристики (ВАХ), а также энергетические и частотные характеристики диодов с РТГ в «сэндвич»-структуре.

1. Диод с РТГ. Структура диода показана на рис. 1. РТГ представляет собой, например, такую структуру: n^+ -GaAs-Al_{0,2}Ga_{0,8}As-GaAs-Al_{0,2}Ga_{0,8}As- n^+ -GaAs с одним энергетическим уровнем в квантовой яме или структуру n^+ -GaAs-AlAs-GaAs-AlAs- n^+ -GaAs с двумя энергетическими уровнями в квантовой яме [5, 6]. На рис. 1, а изображен энергетический профиль n^+ - n - n^+ -структуры. На рис. 1, в изображен энергетический профиль РТГ.

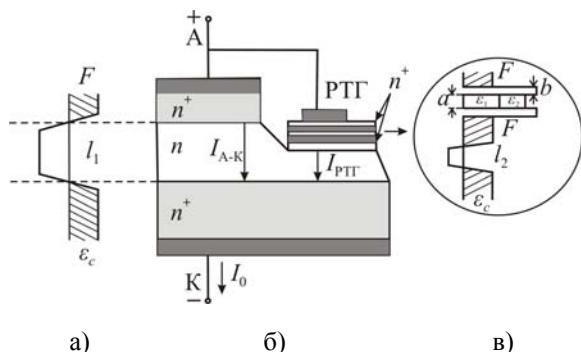


Рис. 1. Структура диода с симметричной РТГ n^+ -GaAs-AlAs-GaAs-AlAs- n^+ -GaAs в «сэндвич»-варианте

Между анодом и катодом (А-К) протекает ток I_{A-K} . Электронный ток через РТГ – $I_{РТГ}$.

При увеличении напряжения на диоде U_0 токи $I_{РТГ}$ и I_{A-K} растут до тех пор, пока ток через РТГ не достигнет максимального значения. При дальнейшем увеличении напряжения ток РТГ резко уменьшается, что приводит к уменьшению тока между А-К диода. При последующем увеличении напряжения U_0 токи $I_{РТГ}$ и ток I_{A-K} возрастают. Таким образом, диод К-А n^+ - n - n^+ с боковыми границами в виде РТГ обладает ОДП [1–4]. При одинаковой толщине и высоте барьеров ВАХ РТГ симметрична.

Для рассмотренных нами размеров квантовой ямы в РТГ квантовая структура может иметь 1 или 2 энергетических уровня. РТГ Al_{0,2}Ga_{0,8}As/GaAs состоит из барьеров с высотой ~0,3 эВ и одним энергетическим уровнем в квантовой яме. В то же время РТГ AlAs/GaAs имеет высоту барьеров 0,7 эВ и 2 энергетических уровня в квантовой яме. Материал n -области GaAs $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрация электронов в n^+ -областях составляет $5 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

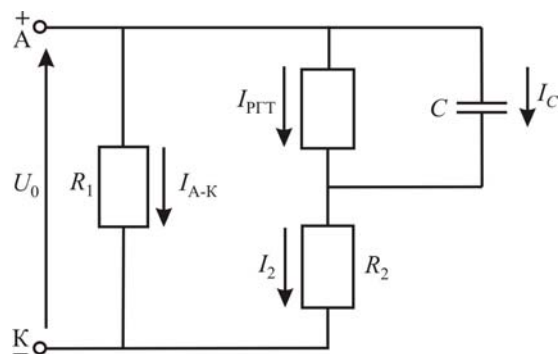


Рис. 2. Физическая эквивалентная схема диода с РТГ

На рис. 2 изображена эквивалентная схема диода с РТГ. Она представляет собой проводимость РТГ, параллельно которой включена емкость РТГ – C . Последовательно с РТГ включено сопротивление R_2 , состоящее из сопротивления

потерь R_s и сопротивления между РТГ и катодом. Емкость А–К намного меньше емкости РТГ ($l_1 \gg l_2$). Сопротивление R_1 (сопротивление А–К) включено параллельно РТГ и R_2 . С увеличением частоты существенную роль будет играть емкостное сопротивление $Z_c = 1/\omega C$, которое включено параллельно активной проводимости РТГ. Индуктивность, включенная последовательно с РТГ, представляет собой золотую полосу длиной 1 мкм, шириной порядка нескольких микрометров и толщиной 3...5 мкм. Она мала и составляет приблизительно 10^{-15} Гн. Резонанс индуктивность–емкость находится на частотах, превышающих диапазон рабочих частот рассматриваемого прибора.

Сопротивления областей зависят от приложенного напряжения к диоду, поскольку в материалах этих областей подвижность и дрейфовая скорость зависят от напряженности электрического поля и различны для Ge, Si, GaAs.

Обозначим площадь омического контакта S_1 . Сопротивление между А–К $R_1 \approx U/(enS_1v(U/l_1))$ может меняться при изменении l_1 . Сопротивление R_2 , включенное последовательно с РТГ, $R_2 \approx U_2/(enS_2v(U_2/l_2))$ тоже может меняться (l_2 – расстояние между РТГ и катодом, S_2 – площадь РТГ), U_2 – напряжение на R_2 , равное $U_2 = U_0 - U$, где U – напряжение на РТГ.

Емкость РТГ можно оценить следующим образом. Общая емкость диода состоит из емкостей барьеров C_B и емкости квантовой ямы C_Y , соединенных последовательно. Ширина квантовой ямы для исследованных структур составляла a , ширина одинаковых барьеров в $b_1 = b_2 = b$ [7].

Емкость РТГ определяется по формуле:

$$C = (C_B C_Y)(C_Y + 2C_B)^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{где } C_B = \varepsilon_B \varepsilon_0 S_2 / b; \quad C_Y = \varepsilon_Y \varepsilon_0 S_2 / a; \quad (2)$$

$\varepsilon_B, \varepsilon_Y$ – диэлектрические постоянные барьера и квантовой ямы; ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума (для GaAs $\varepsilon_Y = 12,5$, для $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ $\varepsilon_B = 12,2$, для AlAs $\varepsilon_B = 10$).

2. Ток РТГ. $I_{\text{РТГ}}(U)$ в общем виде равен [8]

$$I_{\text{РТГ}}(U) = I_1(U) + I_2(U); \quad (3)$$

$$I_1(U) = \frac{em_n^*kT}{4\pi^2\hbar^3} \int_0^V |D|^2 \ln \frac{1 + e^{\frac{F-\varepsilon}{kT}}}{1 + e^{\frac{F-\varepsilon-eU}{kT}}} d\varepsilon; \quad (4)$$

$$I_2(U) = \frac{em_n^*(kT)^2}{2\pi^2\hbar^3} e^{\frac{V}{kT}} (e^{\frac{\beta eU}{kT}} - 1), \quad (5)$$

где $I_1(U)$ – резонансно-туннельный ток; $I_2(U)$ – надбарьерный ток термоэлектронной эмиссии; F – уровень Ферми, отсчитанный от дна зоны проводимости n^+ -области; ε – энергия электрона; m_n^* – эффективная масса электрона; $|D_p|^2$ – коэффициент прозрачности РТГ; V – высота потенциальных барьеров РТГ; T – температура; β порядка 0,3...0,5 для туннельно-резонансной структуры [8].

Если напряжение прикладывается к центру ямы, окруженной одинаковыми барьерами, то

$$|D|^2 = \frac{\Gamma_n^2}{\Gamma_n^2 + 4[\varepsilon - (\varepsilon_1 - eU/2)]^2}, \quad (6)$$

где ε_1 – резонансный уровень в одноуровневой квантовой яме. Это предположение не всегда правильно, в общем случае $eU/2$ может быть записано как eU/n , где n определяется из анализа экспериментальных данных. Вблизи резонанса $\varepsilon \approx \varepsilon_1 - eU/2$, поэтому производя замену $\varepsilon = \varepsilon_1 - eU/2$ в логарифме, его можно вынести из-под знака интеграла и получим

$$J = \frac{em_n^*kT}{4\pi^2\hbar^3} \Gamma_n^2 \ln \frac{1 + e^{\frac{F-\varepsilon_1+eU/2}{kT}}}{1 + e^{\frac{F-\varepsilon_1-eU/2}{kT}}} \times \left\{ \frac{\pi}{2} + \text{arctg} \frac{\varepsilon_1 - \frac{eU}{2}}{\Gamma_n} \right\}; \quad (7)$$

$$\Gamma_n = -\left(\frac{2\varepsilon_n}{a m_n^*}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left\{ 1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{\varepsilon_n(V - \varepsilon_n)} \text{sh}^2 \left[\sqrt{\frac{2m_n^*}{\hbar^2}} (V - \varepsilon_n) \right] b \right\}^{-1}. \quad (8)$$

$v_n = \left(\frac{2\varepsilon_n}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$ – скорость поперечного движения электрона на n -уровне.

В расчетах для ряда структур можно воспользоваться аналитическими зависимостями для резонансно-туннельного тока в виде [9]

В расчетах для ряда структур можно воспользоваться аналитическими зависимостями для резонансно-туннельного тока в виде [9]

$$I_1(U) = A \ln \frac{1 + e^{\frac{B-C+n_1U}{kT}}}{1 + e^{\frac{B-C-n_1U}{kT}}} \left\{ \frac{\pi}{2} + \text{arctg} \frac{C - n_1U}{D} \right\}; \quad (9)$$

$$I_2(U) = H \left(e^{\frac{n_2 eU}{kT}} - 1 \right). \quad (10)$$

В формулах (6)–(7) A, B, C, D, H, n_1, n_2 – параметры, характерные для конкретной РТГ.

3. ВАХ с РТГ. Общий ток через диод $I_0(U_0)$ состоит из электронного тока через РТГ $I_{РТГ}(U)$, электронного тока между А–К $I_{А-К}(U_0)$ и емкостного тока I_C :

$$I_0(U_0) = I_{РТГ}(U) + I_{А-К}(U_0) + I_C(U). \quad (11)$$

Отметим, что при $R_2 \ll R_1$ падение напряжения на диоде мало. При этом можно полагать R_2 постоянным при приложенном к нему напряжении $U_2 \ll U_p$, где U_p – пороговое напряжение. В этом случае ограничения тока $I_{РТГ}(U)$ не происходит из-за насыщения дрейфовой скорости через R_2 .

Электронный ток I_2 , протекающий через сопротивление R_2 , определяется из трансцендентного уравнения

$$I_2(U_0) = \frac{U_0 - I_2(U_0)R_2}{Z_C} + \quad (12)$$

$$+ I_{РТГ}(U_0 - I_2(U_0)R_2).$$

Уравнение для ВАХ диода с РТГ запишем в виде

$$I_0(U_0) = I_2(U_0) + enS_1v(U_0/l). \quad (13)$$

Решая уравнение (12)–(13), получаем зависимости электронного тока через диод $I_0(U_0)$ от частоты.

По зависимостям электронного тока от напряжения на различных частотах определяется эффективность генерации (КПД) [10].

4. Частотные зависимости диодов с РТГ.

На частотах до 30...50 ГГц для зависимости $v(E)$ в GaAs можно использовать выражение [10]

$$v(U/l) = \frac{\mu_n(U/l) + v_s(U/U_p)^4}{1 + (U/U_p)^4}, \quad (14)$$

где v_s – дрейфовая скорость насыщения в GaAs ($\sim 10^7$ см/с).

На частотах, где сказывается инерционность перераспределения электронов между долинами зоны проводимости GaAs, необходимо использовать динамические зависимости $v(E)$ GaAs. Таким образом, в рассматриваемом случае при определении частотной зависимости КПД диода с РТГ от частоты необходимо учитывать и туннелирование через РТГ и междолинный перенос электронов в области А–К.

При определении КПД расчет был проведен в режиме однородного поля в области А–К. При этом использовались частотные зависимости $v(E)$, определяющие ток между А–К, рассчитанные многочастичным методом Монте-Карло [11] для GaAs. При расчетах использовалась модель

GaAs, в которой электроны при разогреве электрическим полем переносятся из Γ -долины, расположенной в центре зоны Бриллюэна, в боковые долины L и X , расположенные выше по энергии над Γ -долиной. Нами были учтены все переносы электронов между долинами. В расчетах также учитывались все существенные механизмы рассеяния электронов: акустическое, полярное оптическое, примесное, пьезоэлектрическое, междолинное и эквивалентное междолинное. Во всех долинах учитывалась непараболичность. Все параметры, необходимые в расчетах для GaAs, были взяты из литературы [12].

5. Численные расчеты частотных характеристик ВАХ и эффективности генерации диодов. Рассматриваются две РТГ – одно- и двухуровневая.

Одноуровневая РТГ представляет собой структуру $Al_{0,2}Ga_{0,8}As/GaAs$ с $a = 6$ нм, $b_1 = b_2 = b = 1,5$ нм, $m_n^* = 0,072m_0$, $V = 0,3$ эВ, энергетическим уровнем в квантовой яме $\varepsilon_1 = 0,144$ эВ, $\beta = 0,3$, $T = 300$ К и концентрацией в прилегающих к барьерам областях $N_d \approx n = 10^{19}$ см $^{-3}$.

Величина энергии Ферми определялась следующим образом:

$$F = \frac{2\pi^2\hbar^2}{m_n^*} \left(\frac{3}{8\pi} N_d\right)^{2/3}. \quad (15)$$

Параметры материала GaAs и диода имели такие же значения, как и в работе [3] для вариантов А и Б. Емкость РТГ рассчитана по приведенным ранее формулам (1)–(2) и составляет $\sim 0,8$ пФ (для диодов с туннельной границей (ТГ) ~ 1 пФ).

Зависимости тока от напряжения для диода с РТГ, тока между А–К и суммарного тока показаны на рис. 3–4. С увеличением частоты растут максимальный и минимальный токи и уменьшается ОДП, что приводит к уменьшению эффективности генерации диода с РТГ.

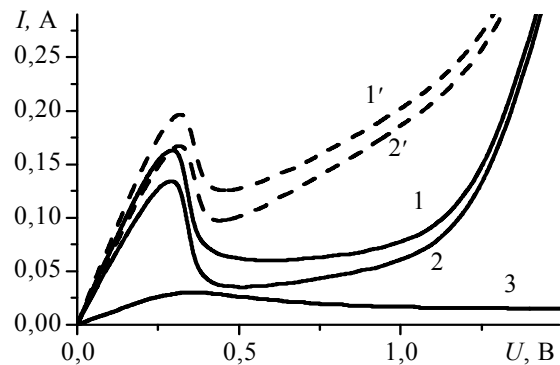


Рис. 3. Динамические ВАХ диодов с РТГ: 1, 1' – общий ток; 2, 2' – ток через РТГ; 3 – ток через А–К. Сплошная кривая соответствует частоте 10 ГГц, пунктирная кривая – 40 ГГц

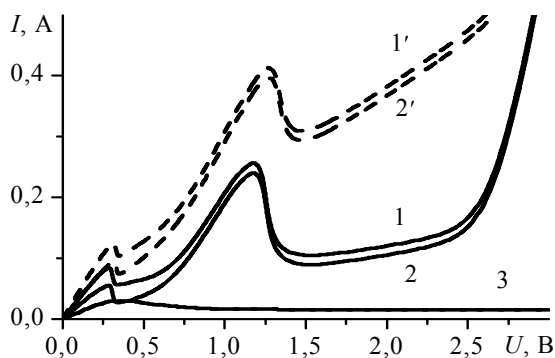


Рис. 4. Динамические ВАХ диода с двухуровневым РТГ: 1, 1' – общий ток; 2, 2' – ток через РТГ; 3 – ток через А-К. Сплошная кривая соответствует частоте 10 ГГц, пунктирная кривая – 40 ГГц

Двухуровневая РТГ представляет собой структуру AlAs/GaAs с $a = 6$ нм, $b = 1,5$ нм, $m_n^* = 0,072m_0$, $V = 0,7$ эВ, $\epsilon_1 = 0,144$ эВ, $\epsilon_2 = 0,577$ эВ, $\beta = 0,3$, концентрацией в прилегающих к барьерам областях $n = 10^{19}$ см⁻³, $T = 300$ К. Параметры материала (GaAs) и диода такие же, как и для вариантов А и Б одноуровневой РТГ. Емкость двухуровневой РТГ отличается от емкости одноуровневой РТГ, поскольку различны диэлектрические постоянные Al_{0,2}Ga_{0,8}As и AlAs. Для барьеров из AlAs емкость меньше, чем у одноуровневой РТГ, но при этом выше напряжения, при которых наблюдается ОДП, особенно для второго максимума тока.

Зависимости тока от напряжения для диода с двухуровневой РТГ, тока I_{A-K} и суммарного тока I_0 показаны на рис. 5. Видно, что напряжение, при котором наблюдается второй максимум тока диода с двухуровневой РТГ, в несколько раз больше напряжения максимума тока диода с одноуровневой РТГ.

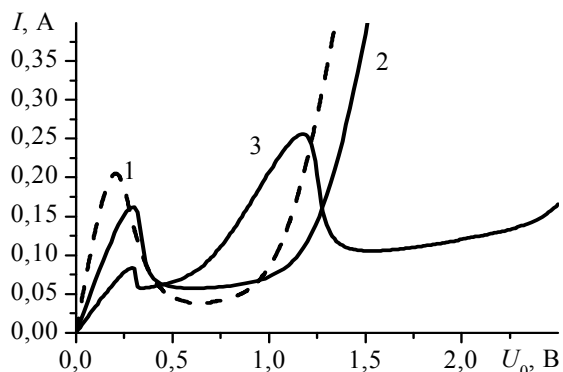


Рис. 5. Динамические ВАХ диодов на частоте 10 ГГц: 1 – с ТГ; 2 – с одноуровневой РТГ; 3 – с двухуровневой РТГ

На рис. 5 и 6 для сравнения показаны ВАХ и КПД диодов с ТГ, одноуровневой РТГ и

двухуровневой РТГ. На них хорошо видны указанные выше различия в ОДП и КПД.

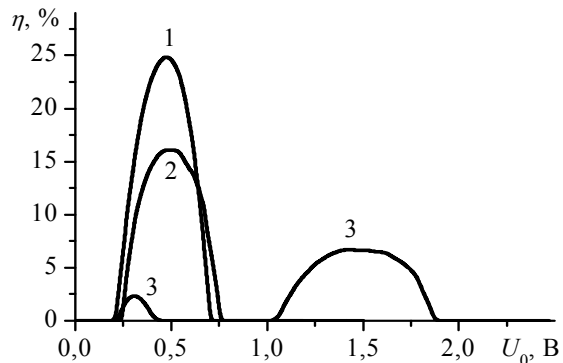


Рис. 6. КПД диодов на частоте 10 ГГц: 1 – с ТГ; 2 – с одноуровневой РТГ; 3 – с двухуровневой РТГ

ВАХ диодов с двухуровневой РТГ имеют два участка ОДП и две зоны генерации по напряжению. Первый максимум тока намного меньше второго, поэтому и генерируемая мощность и эффективность генерации на первом участке ОДП намного меньше мощности и эффективности генерации на втором участке ОДП (рис. 6).

С увеличением частоты пороговые токи и напряжения смещаются в сторону больших значений. При этом ОДП уменьшается, что приводит к уменьшению эффективности генерации с увеличением частоты (рис. 7). Поскольку емкость одноуровневой РТГ меньше емкости ТГ и двухуровневой РТГ, то предельная частота генерации диода с одноуровневой РТГ оказывается выше предельных частот генерации диодов с ТГ и двухуровневой РТГ.

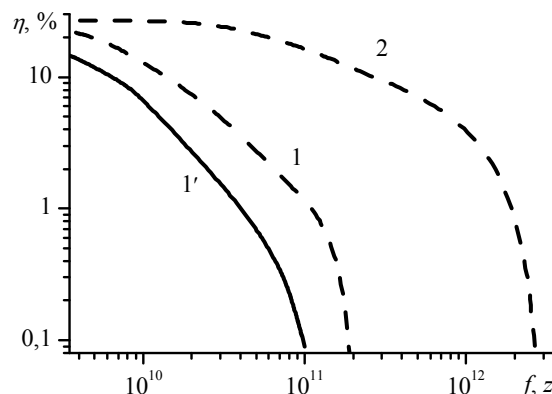


Рис. 7. Зависимость эффективности генерации от частоты для диодов с РТГ в случае варианта параметров А работы [3] (1–1') и для варианта параметров Б той же работы (2). Пунктирные линии – одноуровневая РТ, сплошная – двухуровневая РТГ

На рис. 7 показаны эффективности генерации диода с двухуровневой РТГ при использовании второго наибольшего по току максимума

ВАХ. При расчете частотных характеристик учтен междолинный перенос электронов в промежутке А–К. Увеличение динамического сопротивления $R_1 = f(U_0)$ за счет междолинного переноса электронов на частотах до 150 ГГц приводит к улучшению энергетических характеристик диода с РТГ. Для улучшения КПД на частотах до 150 ГГц необходимо, чтобы доля тока за счет междолинного переноса электронов была меньше тока РТГ.

На более высоких частотах (свыше 150 ГГц) основную роль играет туннелирование через РТГ. ОДП за счет междолинного переноса уже отсутствует, а нелинейность в промежутке А–К присутствует. Это обстоятельство улучшает КПД диода с РТГ.

Анализ зависимостей рис. 7 показывает, что более высокочастотным является диод с одноуровневой РТГ, эффективность генерации таких диодов также выше.

6. Генерация гармоник в диодах с РТГ.

ВАХ диода с РТГ нелинейна и имеет участок ОДП. В режиме генерации ток через диод имеет сложную форму, содержащую множество гармоник. Любую гармонику можно выделить, поместив диод с РТГ в сложный резонатор, состоящий из резонатора, настроенного на 1-ю гармонику, и резонатора, настроенного на n -ю гармонику. При необходимости получить максимальный КПД на n -й гармонике следует оптимизировать амплитуды и 1-й и n -й гармоник.

На рис. 8 изображена зависимость эффективности генерации от частоты для диодов с РТГ в случае двух вариантов площадей и длин диода с РТГ. Из него видно, что напряжения, при которых начинает возрастать 2-я гармоника, больше напряжений, характерных для переноса мощности на 2-ю гармонику для диода с ТГ [3]. Это связано с различием ВАХ диодов с ТГ и диода с одноуровневой РТГ (напряжение максимума тока диода с одноуровневой РТГ больше напряжения максимума тока диода с ТГ).

При генерации гармоник диодом с двухуровневой РТГ форма тока через диод оказывается более сложной по сравнению с одноуровневой РТГ. Сначала в генерации гармоник участвует участок ОДП при малых напряжениях, а затем участок ОДП при больших напряжениях. Это приводит к зависимостям, показанным на рис. 8.

С увеличением частоты эффективность генерации гармоник уменьшается, что связано с уменьшением эффективности генерации на основной частоте. Напряжения, при которых начинает расти эффективность генерации на гармониках, для двухуровневой РТГ выше по сравнению с одноуровневой РТГ.

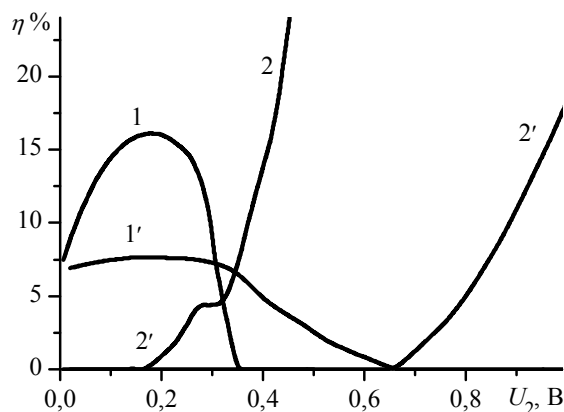


Рис. 8. Эффективность генерации на гармониках диода при $R_2 = 0,5$ Ом на частоте 10 ГГц с одноуровневой РТГ(1–2) и двухуровневой РТГ (1'–2'): 1–1' – 1-е гармоники; 2–2' – 2-е гармоники

7. Эффект умножения частоты на диодах с РТГ.

Отметим, что диоды с ТГ имеют несимметричную ВАХ, а диоды с РТГ обладают симметричной ВАХ.

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 $I_0(U_0)$ ток через диод имеет сложную форму, содержащую высшие гармоники. Выделение гармоник 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.

Коэффициент преобразования частоты (КПЧ) или КПД (это отношение мощности на n -й гармонике, поступающей на диод, к мощности 1-й гармоники) определяется в следующем виде

$$\eta = \frac{I_g(n)U_g}{I_g(1)U_1} 100 \%. \quad (16)$$

На рис. 9 и 10 показаны зависимости КПЧ от амплитуды входного сигнала.

При умножении амплитуда тока n -й гармоники может быть как в фазе, так и в противофазе с действующим напряжением. В связи с этим зависимости на рис. 9 и 10 показаны по абсолютным значениям КПЧ. Видно, что при постоянном смещении на диоде КПЧ на 2-й гармонике выше, чем на 3-й. При отсутствии напряжения смещения генерироваться будут только нечетные гармоники. Наибольший КПЧ соответствует участку ОДП на ВАХ одноуровневой РТГ и наименьшему по напряжению участку ОДП на ВАХ двухуровневой РТГ. КПЧ на втором участке ОДП на ВАХ двухуровневой РТГ меньше, чем на первом участке ОДП, что связано с большим по-

стоянным напряжением на диоде (и рассеиваемой мощностью), при котором проявляется ОДП.

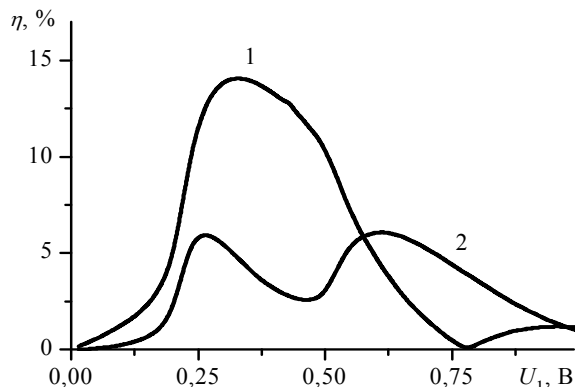


Рис. 9. КПД для одноуровневой РТГ на частоте 10 ГГц при $U_0 = 0,15$ В: 1 – 2-я гармоника; 2 – 3-я гармоника

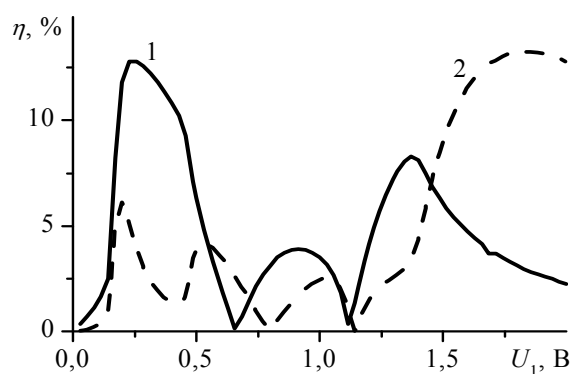


Рис. 10. КПД для двухуровневой РТГ на частоте 10 ГГц при $U_0 = 0,15$ В: 1 – 2-я гармоника; 2 – 3-я гармоника

Выводы. Диоды с РТГ являются эффективными источниками СВЧ-колебаний мм и субмм диапазонов длин волн вплоть до 1 000 ГГц.

Диод с одноуровневой РТГ оказывается более высокочастотным по сравнению с диодами с ТГ и двухуровневой РТГ (его рабочая частота приблизительно на 10 % выше).

Диоды с одно- и двухуровневой РТГ могут эффективно генерировать гармоники, эффективность генерации зависит от постоянного смещения на диоде и амплитуды 1-й гармоники.

Умножение частоты на диодах с РТГ отличается от умножения частоты на диодах с ТГ, поскольку такие диоды обладают симметричной ВАХ. Поэтому существенную роль в эффекте умножения частоты играет постоянное напряжение смещения, которое подается на диод при любой полярности.

Диод с двухуровневой РТГ обладает двумя зонами генерации по напряжению. Наибольший вклад в плотность тока через диод, эф-

фективность генерации гармоник и частотный диапазон работы диода с РТГ вносит верхний энергетический уровень в квантовой яме РТГ.

Увеличение динамического сопротивления $R_1 = f(U_0)$ за счет междолинного переноса электронов на частотах до 150 ГГц приводит к улучшению энергетических характеристик диода с РТГ. На более высоких частотах (свыше 150 ГГц) основную роль играет туннелирование через РТГ. При этом ОДП за счет междолинного переноса отсутствует, а нелинейность тока через промежуток А–К является существенной, что улучшает КПД диода с РТГ.

Библиографический список

1. Прохоров Э. Д. Отрицательная дифференциальная проводимость полупроводникового диода с туннельными боковыми гранями / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // 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 та електрон. – 2011. – 2(16), № 1. – С. 54–57.
3. Прохоров Э. Д. Генерация и умножение частоты диодами с туннельными границами на основе GaAs / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Радиофизика та електрон. – 2011. – 2(16), № 3. – С. 91–96.
4. Пат. Украины № 65022. Полупроводниковый диод для генерации СВЧ колебаний / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко; заяв. 23.05.2011; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.
5. Waho T. A novel multiple-valued logic gate usind resonant tunneling devices / T. Waho, K. J. Chen, M. Yamamoto // IEEE Electron Devices Lett. – 1996. – 17, N 5. – P. 223–225.
6. Shifren L. C. A Wigner function-based quantum ensemble monte-carlo study of a Resonant Tunneling diode / L. C. Shifren, D. K. Ferry // IEEE Trans. Electron Devices. – 2003. – 50, N 3. – P. 769–773.
7. Lake R. A physics based model for the RTD quantum capacitance / R. Lake, Junyie Yang // IEEE Trans. Electron Devices. – 2003. – 50, N 3. – P. 785–789.
8. Прохоров Э. Д. Квантово-размерные эффекты в твердотельных сверхвысокочастотных приборах / Э. Д. Прохоров. – Х.: Харьков. нац. ун-т, 2005. – 220 с.
9. Schulman J. N. Physics-based RTD current voltage equation / J. N. Schulman, H. J. De Los Santos, D. N. Chow // IEEE Electron Devices Lett. – 1996. – 17, N 5. – P. 220–222.
10. Прохоров Э. Д. Вольтамперные характеристики и эффективность генерации диодов с туннельными границами на основе GaAs / Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко // Вестн. ХНУ. Радиофизика и электроника. – 2010. – 17, № 942. – С. 71–75.
11. Иващенко В. М. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте–Карло / В. М. Иващенко, В. В. Митин. – К: Наук. думка, 1990. – 120 с.
12. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www/URL: http://www.ioffe.rssi.ru. Semiconductor. GaAs. – Загл. с экрана.

Рукопись поступила 19.01.2012.

E. D. Prokhorov, O. V. Botsyla,
O. A. Klimenko, I. P. Storozhenko

EFFICIENCY OF DIODES GENERATION
WITH RESONANT-TUNNEL BOUNDARIES
IN THE STRUCTURES OF THE «SANDWICH» TYPE

We study the current-voltage characteristics and the efficiency of generation diodes with resonant-tunnel boundaries in the structures of the «sandwich» type based on GaAs. We consider single-level and two-level model of the resonant-tunnel border. Frequency limit of the diode with resonant-tunnel border was estimated. A possibility of harmonic generation and frequency multiplication of the diodes with resonant tunnel border in the range of tens to hundreds of GHz was shown.

Key words: GaAs-diodes with resonant-tunnel border, current-voltage characteristics, the efficiency of generation, harmonic generation, frequency multiplication.

Е. Д. Прохоров, О. В. Боцула,
О. О. Клименко, І. П. Стороженко

ЕФЕКТИВНІСТЬ ГЕНЕРАЦІЇ ДІОДІВ
З РЕЗОНАНШНО-ТУНЕЛЬНИМИ МЕЖАМИ
В «САНДВИЧ»-ВАРІАНТІ

Досліджено вольтамперні характеристики та ефективність генерації діодів з резонансно-тунельними межами (РТМ) в структурах типу «сандвич» на основі GaAs. Розглянуто одно- і дворівневі моделі РТМ. Оцінено частотну межу роботи діодів з РТМ. Показано можливість генерації гармонік і множення частоти на діодах з РТМ у діапазоні кілька десятків гігерц.

Ключові слова: GaAs-діоди, резонансно-тунельна межа, вольтамперні характеристики, ефективність генерації, генерація гармонік, множення частоти.