

## Перспективы использования резонансно-туннельных диодов в субгармонических смесителях радиоаппаратуры

*Дорофеев А. А., Гладышева Н. Б., Алкеев Н. В., Аверин С. В.*

*Проведён анализ перспективы использования резонансно-туннельных диодов (РТД) в качестве нелинейных элементов субгармонических смесителей. Субгармонические смесители находят широкое применение в качестве входных каскадов приёмников в диапазоне субмиллиметровых длин волн, поскольку для этого диапазона не существуют малощумящие транзисторные усилители. Показано, что для того чтобы потери преобразования смесителя с РТД не превышали 5...6 дБ, необходимо, чтобы вольт-амперная характеристика (ВАХ) РТД удовлетворяла двум условиям: 1) в окрестности  $U = 0$  на ВАХ должен быть заметный горизонтальный участок; 2) величина проводимости на участке резонансного туннелирования электронов на ВАХ РТД должна быть не менее  $0,08 \text{ См}$ . Этого значения проводимости следует достигать уменьшением толщины барьеров РТД вплоть до  $\sim 1 \text{ нм}$ , при этом активная площадь диода, которая определяет его собственную ёмкость, должна быть минимальной. Проведённые оценки также показали, что РТД на основе гетеросистемы  $\text{InGaAs/AlAs}$  имеют целый ряд преимуществ по сравнению с РТД на основе гетеросистемы  $\text{GaAs/AlAs}$  при работе в смесителях субмиллиметрового диапазона длин волн.*

### **Введение**

Смесители (или преобразователи частоты) широко используются во многих узлах радиоэлектронной аппаратуры. Преобразование частоты при этом осуществляется по закону  $f_{\text{пч}} = |f_c - nf_r|$ , где  $f_{\text{пч}}$  – промежуточная частота,  $f_c$  и  $f_r$  – частоты сигнала и гетеродина соответственно, а  $n$  – целое число. В зависимости от условий применения смесители должны удовлетворять самым разнообразным требованиям (низкие потери преобразования, низкие шумы, большая полоса пропускания, минимальная мощность гетеродина, максимальное подавление нежелательных гармоник и комбинационных составляющих преобразования, большой динамический диапазон, максимальная развязка трактов гетеродина и сигнала и т. д. [1]). В коротковолновых диапазонах субгармонические смесители (СГС) с  $n \geq 2$  имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными ( $n = 1$ ) смесителями. Значительно более низкая частота гетеродина позволяет упростить его конструкцию и получить достаточную мощность для эффективного преобразования частоты. Кроме того, так как  $f_r$  значительно отличается от  $f_c$ , то в СГС уменьшается взаимное влияние цепей сигнала и гетеродина. Часто преобразование частоты в СГС осуществляется при  $n = 2$ , в этом случае вольт-амперная характеристика (ВАХ) нелинейного элемента (НЭ) СГС должна быть антисимметрична относительно нуля. Классический вариант СГС состоит из двух антипараллельно включённых диодов Шоттки. Оптимальная для работы такого смесителя мощность гетеродина составляет несколько милливатт, что трудно обеспечить в диапазоне субмиллиметровых (СММ) длин волн [2]. В диапазоне СММ длин волн в качестве входных каскадов приёмных устройств, как правило, используются диодные субгармонические смесители, так как для этого диапазона длин волн нет малощумящих транзисторных усилителей.

В [3] предложено использовать для субгармонического преобразования частоты резонансно-туннельный диод (РТД). Последний является одним из самых быстродействующих полупроводниковых приборов, его нелинейные свойства сохраняются

---

до 10 ТГц [4]. РТД способен работать в широком диапазоне температур от гелиевой до комнатной. Нелинейностью его ВАХ в окрестности нулевого смещения ( $U_{a-k} = 0$ ) можно управлять, изменяя толщину и состав слоёв РТД, что даёт возможность существенно снизить оптимальную мощность гетеродина СГС по сравнению с СГС на диодах Шоттки. Ещё одним достоинством РТД является пониженный уровень его дробового шума. Характеризующий интенсивность дробового шума фактор Фано РТД  $\gamma = 1/2$ , что вдвое меньше, чем у диодов Шоттки. Величину  $\gamma$  РТД можно уменьшить, если реализовать в РТД когерентный механизм транспорта электронов, а не последовательный [5]. В [3] рассматривался режим работы СГС при достаточно большом напряжении гетеродина, когда оно частично заходит в область отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) РТД. В этом случае потери преобразования смесителя могут стать отрицательными, то есть амплитуда сигнала промежуточной частоты будет больше амплитуды входного сигнала. Следует, однако, учесть, что для смесителя как входного каскада приёмника определяющим параметром являются не потери преобразования, а коэффициент шума, который будет увеличиваться при заходе сигнала гетеродина в области ОДП на ВАХ РТД, так как в этих областях дробовые шумы РТД возрастают в несколько раз [6]. Таким образом, чтобы реализовать эффект депрессии дробового шума РТД при субгармоническом преобразовании частоты, напряжение гетеродина СГС не должно заходить в области ОДП на ВАХ, то есть не должно превышать напряжение пика на ВАХ РТД.

В ФГУП “НПП” Пульсар” были изготовлены РТД на основе гетеросистемы GaAs/AlAs, предназначенные для работы в СГС. В [7, 8] приведены параметры изготовленных РТД и предварительные результаты испытаний работы РТД в схеме СГС. В работе анализируются перспективы использования субгармонических смесителей с РТД в аппаратуре связи и измерительной технике. Анализ сопровождался моделированием работы смесителя с помощью программы Microwave Office.

### ***Снижение потерь преобразования СГС с РТД***

Полученные в [8] результаты сравнивались с результатами моделирования, для этого в программу по точкам заносилась ВАХ РТД и вычислялись потери преобразования  $L$  и коэффициент шума  $F$  СГС при разных мощностях гетеродина и на тех же частотах, на которых проводились измерения. Расчёты показали, что минимальные потери преобразования составляют  $\sim 11$  дБ, а коэффициента шума  $\sim 10$  дБ, что практически совпадает с результатами эксперимента [8].

Величина потерь преобразования СГС с РТД, полученная в наших экспериментах, определяется относительно большой толщиной барьеров РТД, поэтому дифференциальная проводимость  $G_R$  РТД на участке резонансного туннелирования на ВАХ РТД была недостаточно большой – около 0,0067 См. Легко показать, что от величины  $G_R$  напрямую зависят потери преобразования СГС. Действительно, поскольку напряжение гетеродина модулирует проводимость НЭ, в нашем случае РТД, и проводимость НЭ изменяется от  $\sim 0$  при  $U = 0$  до  $G_R$ , когда напряжение гетеродина заходит на участок резонансного туннелирования электронов, то если  $G_R$  мала, будет мала и амплитуда модуляции входного сигнала смесителя и, следовательно, будут велики его потери преобразования.

Это подтвердило и моделирование работы СГС. На рис. 1 представлена рассчитанная зависимость потерь преобразования  $L$  смесителя от величины  $G_R$  НЭ на участке резонансного туннелирования электронов. ВАХ НЭ смесителя имеет вид ломаной линии. Напряжение начала участка резонансного туннелирования  $V_T$  было выбрано равным 0,2 В, величина  $G_R$  изменялась в процессе моделирования от 0,005 до

0,2 сименс. Из рисунка видно, что потери преобразования смесителя уменьшаются с ростом  $G_R$ .

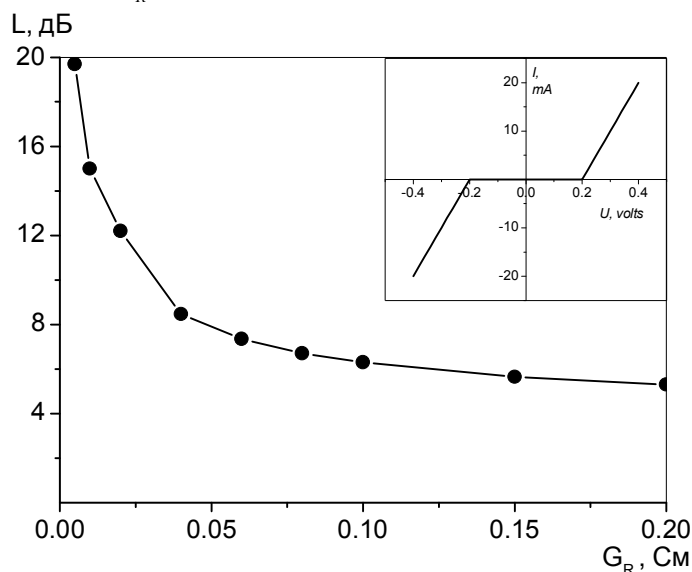


Рис. 1

Зависимость потерь преобразования  $L$  СГС с РТД от проводимости  $G_R$  РТД на участке резонансного туннелирования электронов; на вставке представлена ВАХ смоделированного РТД

смесителей с РТД до 5...6 дБ, необходимо уменьшить толщину барьеров РТД до  $\sim 1,1$  нм (4 монослоя AlAs), при этом площадь активной области РТД для уменьшения его собственной ёмкости должна быть минимальной, но такой, чтобы величина  $G_R$  была не менее 0,08 сименс.

### Уменьшение оптимальной мощности гетеродина СГС с РТД

Смесители, работающие при малых мощностях гетеродина, весьма востребованы в диапазоне субмиллиметровых длин волн. Известно [10], что для снижения оптимальной мощности гетеродина СГС с РТД необходимо уменьшать напряжение начала участка резонансного туннелирования  $V_T$  ВАХ РТД, то есть увеличивать ширину КЯ РТД. На рис. 2 приведён график зависимости оптимальной мощности  $P_{LOopt}$  гетеродина СГС РТД от величины  $V_T$ , полученный расчётным путём в работе [10].

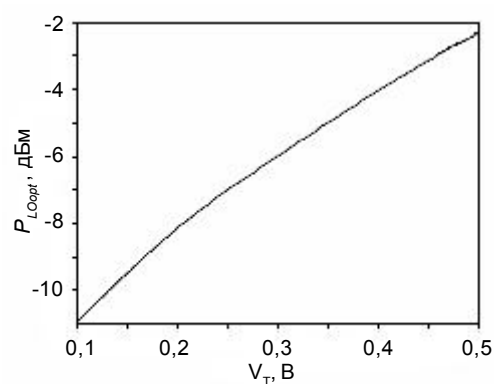


Рис. 2

Зависимость оптимальной мощности гетеродина  $P_{LOopt}$  от напряжения  $V_T$  начала участка резонансного туннелирования электронов в РТД

Из всех известных из литературы РТД наиболее большая  $G_R$  была у диода на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs из [9] – 0,03 См/мкм<sup>2</sup>. Пользуясь графиком рис. 1, можно показать, что уже при активной площади диода 5 мкм<sup>2</sup> потери преобразования смесителя с таким РТД будут порядка 5...6 дБ, что соответствует потерям преобразования лучших смесителей на диодах Шоттки. Отметим, что удельная проводимость наших диодов на участке резонансного туннелирования равна  $6,7 \cdot 10^{-5}$  См/мкм<sup>2</sup>, что почти в четырёхста пятьдесят раз меньше, чем у РТД из [9].

Таким образом, чтобы уменьшить потери преобразования

Форма ВАХ РТД имела вид, представленный на вставке рис. 1. Видно, что с изменением  $V_T$  от 0,1 до 0,5 В  $P_{LOopt}$  возрастает практически линейно (в дБм) от -11 до -3,5 дБм. Однако эта ВАХ не учитывает влияние температуры, в результате воздействия которой тепловое размытие уровня Ферми эмиттера приведёт к уменьшению нелинейности ВАХ РТД в окрестности  $U = 0$  и росту потерь преобразования смесителя. Так на графике ВАХ РТД из [7] видно, что если при гелиевой и азотной температурах на ВАХ имеются достаточно протяжённые горизонтальные участки, то при комнатной температуре такой участок практически отсутствует.

В [7] проведено моделирование работы смесителя с учётом зависимости ВАХ РТД от температуры. Моделирование показало, что для  $V_T \approx 0,75$  В при гелиевой температуре оптимальная мощность гетеродина составляет  $\sim 12$  дБм, а минимальные потери преобразования  $\sim 6$  дБ. С уменьшением  $V_T$  оптимальная мощность гетеродина снижалась и при  $V_T \approx 0,07$  В составляла  $-13$  дБм, при этом потери преобразования СГС возрастали до  $10$  дБ, то есть для того, чтобы получить пороговое напряжение  $V_T \approx 0,07$  В, ширину КЯ РТД необходимо увеличить с  $4$  до  $16$  нм. Таким образом, при гелиевой температуре у СГС с РТД на основе гетеросистемы GaAs/AlAs можно уменьшить оптимальную мощность гетеродина в  $\sim 300$  раз за счёт увеличения ширины КЯ РТД, при этом потери преобразования ещё остаются на приемлемом уровне.

Моделирование работы СГС с РТД при комнатной температуре позволило установить, что при  $V_T \approx 0,75$  В оптимальная мощность гетеродина составляет  $\sim 12$  дБм, потери преобразования равны  $11$  дБ. С уменьшением  $V_T$  потери преобразования СГС быстро возрастают, поэтому можно предположить, что у РТД на основе гетеросистемы GaAs/AlAs недостаточная нелинейность ВАХ, чтобы обеспечить меньшие потери преобразования СГС.

Моделирование также показало, что эффективность преобразования СГС заметно падает с ростом величины паразитного последовательного сопротивления  $r_s$ . В этой связи следует отметить, что для работы в СГС при комнатной температуре весьма эффективными могут оказаться РТД на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs. Удельное сопротивление несплавных омических контактов к InGaAs можно сделать существенно меньше удельного сопротивления сплавных омических контактов к GaAs, что повысит эффективность работы таких РТД в СГС. Высота барьеров у этой гетеросистемы больше, чем у диодов на основе гетеросистемы GaAs/AlAs, и составляет  $1,2$  эВ, поэтому электрические характеристики РТД на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs будут меньше подвержены влиянию температуры. РТД на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs имеют и большую нелинейность ВАХ в окрестности  $U = 0$ . На рис. 3а приведена ВАХ при комнатной температуре РТД на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs из [11]. Активная площадь диода была  $25$  мкм<sup>2</sup>,  $J_p \sim 7,6 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>,  $G_R \sim 0,15$  См. Из графика видно, что  $V_T$  для этого диода около  $0,3$  В. Пользуясь рис. 2, можно оценить, что оптимальная мощность гетеродина СГС с таким РТД около  $-6$  дБм ( $\sim 0,25$  мВт). Значительно увеличить нелинейность ВАХ при  $U = 0$  при комнатной температуре можно путём использования трёхбарьерных РТД. На рис. 3б приведена ВАХ при комнатной температуре трёхбарьерного РТД на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs из [12]. Диаметр активной области этого диода  $8$  мкм,  $J_p \sim 5,6 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>,  $G_R \sim 0,0023$  См. Оценки показали, что СГС на базе РТД с такой нелинейностью при соответствующем выборе толщины барьеров и ширины квантовых ям будет иметь приемлемые потери преобразования при комнатной температуре при мощности гетеродина  $\sim 100$  мкВт.

#### ***Уменьшение интенсивности побочных продуктов преобразования СГС с РТД***

Одним из требований к смесителю часто является отсутствие нежелательных гармоник и комбинационных составляющих ( $e$ ) преобразования в спектре выходного сигнала, обеспечить которое можно использовав в смесителе нелинейный элемент (НЭ), имеющий кубичную форму ВАХ. Пусть ВАХ НЭ имеет вид  $I(U) = AU^3$ , тогда дифференциальная проводимость НЭ  $G_D(U) = dI/dU = 3AU^2$ . Теперь, если к НЭ приложено напряжение гетеродина  $U_1 = U_r \sin(\omega_r t)$ , то проводимость НЭ будет изменяться по закону  $G_D(t) = 3A(V_r^2) \sin^2(\omega_r t) = (3/2)A(V_r^2)(1 - \cos(2\omega_r t))$ .

Пусть на НЭ присутствует ещё и напряжение сигнала  $V_2 = V_c \sin(\omega_c t)$ , причём  $V_c \ll V_r$ . В этом случае в спектре тока НЭ помимо компонент с частотами  $\omega_c$  и  $\omega_r$  появятся компоненты с частотами  $2\omega_r - \omega_c$  и  $2\omega_r + \omega_c$ . Их происхождение легко понять, если разложить на слагаемые  $\cos(2\omega_r t)\sin(\omega_c t) = (1/2)(\sin(2\omega_r - \omega_c)t + \sin(2\omega_r + \omega_c)t)$ . Других слагаемых в спектре тока НЭ в случае кубической формы его ВАХ не возникает.

Из рис. 4 видно, что ВАХ РТД достаточно хорошо совпадает с кубической параболой. Анализ спектра выходного сигнала СГС с РТД показал, что все нежелательные гармоники и комбинационные составляющие ( $e$ ) преобразования подавляются не менее чем на 50 дБ относительно основного продукта преобразования.

Расчёты с помощью программы Microwave Office подтвердили подавление нежелательных гармоник и комбинационных составляющих преобразования.

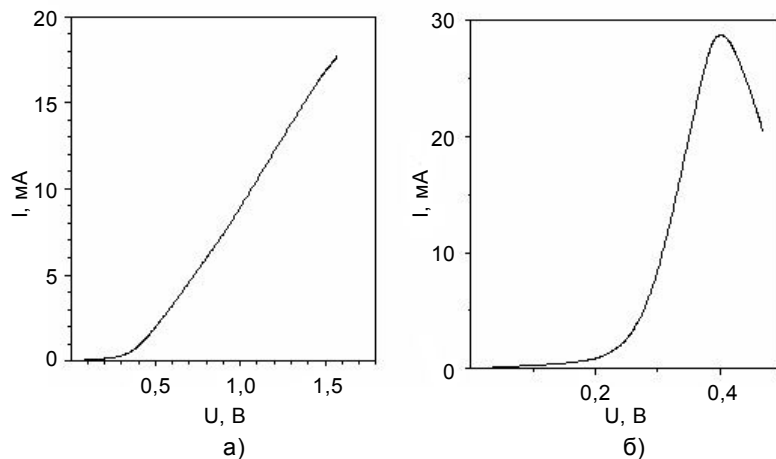


Рис. 3

Начальные участки ВАХ РТД на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs: а – двухбарьерный РТД [11]; б – трёхбарьерный РТД [12]

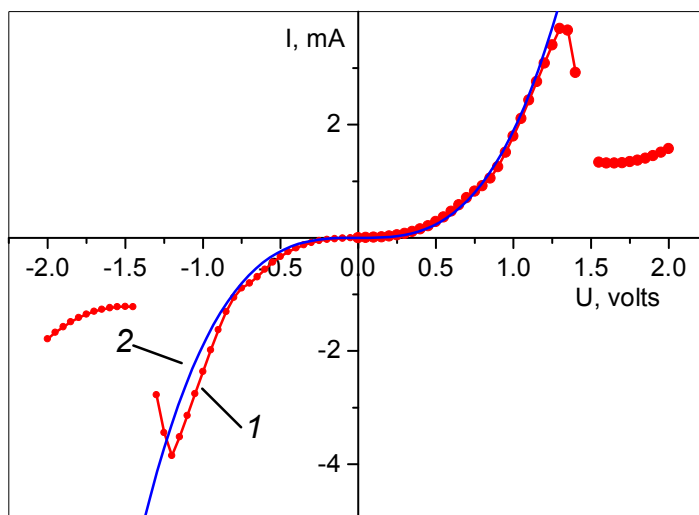


Рис. 4

Кривая 1 (красная) – ВАХ РТД площадью  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$  при комнатной температуре; кривая 2 (синяя) – кубическая парабола  $I = 1,9 \cdot U^3$

### Заключение

Для того, чтобы потери преобразования СГС с РТД не превышали 5...6 дБ, необходимо, чтобы проводимость на участке резонансного туннелирования электронов на ВАХ РТД была не менее 0,08 См. При этом активная площадь диода, которая определяет его собственную ёмкость, должна быть минимальной. Для увеличения  $G_R$  необходимо уменьшать толщину барьеров до  $\sim 1 \text{ нм}$ .

Оптимальная мощность гетеродина СГС с изготовленным РТД на основе гетеросистемы GaAs/AlAs при комнатной температуре была равна 6 дБм при потерях преобразования СГС  $\sim 10 \text{ дБ}$ . При дальнейшем снижении мощности гетеродина потери преобразования СГС быстро росли, что связано с недостаточной нелинейностью ВАХ РТД на основе гетеросистемы GaAs/AlAs.

Оптимальную мощность гетеродина СГС можно снизить до -6 дБм при потерях преобразования СГС 5...6 дБ. Для этого РТД должен быть

---

на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с гетеросистемой GaAs/AlAs.

Дальнейшего снижения оптимальной мощности гетеродина СГС с РТД до -10 дБ можно добиться применением трёхбарьерных РТД на основе гетеросистемы InGaAs/AlAs.

Форма ВАХ изготовленных нами РТД при комнатной температуре близка к кубической параболе, поэтому СГС с такими РТД будут иметь минимум нежелательных гармоник и комбинационных составляющих преобразования на своем выходе. Исследования показали, что интенсивность нежелательных гармоник и комбинационных составляющих преобразования подавляется не менее чем на 50 дБ по сравнению с полезным сигналом.

Таким образом, можно сделать вывод, что СГС с РТД не уступают по параметрам смесителям на основе других нелинейных элементов. Более того, благодаря уникальным свойствам РТД смесители на его основе имеют преимущества по сравнению с другими смесителями. Особенно эти преимущества проявляются при использовании СГС в качестве приёмника субмиллиметровых длин волн. В частности, оптимальную мощность гетеродина СГС с РТД можно снизить более чем на порядок по сравнению с СГС на диодах Шоттки.

Еще одно преимущество СГС – это меньший коэффициент шума СГС с РТД по сравнению со смесителями на других нелинейных элементах. Этот эффект обусловлен депрессией дробового шума в РТД: интенсивность дробового шума в РТД снижена минимум вдвое по сравнению с интенсивностью дробового шума диодов Шоттки.

### *Литература*

1. Гасанов Л. Б., Липатов А. А., Марков В. В., Могильченко Н. А. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи // М.: Радио и связь. – 1988. – 288 с.
2. Розанов Б. А., Розанов С. Б. Приёмники миллиметровых волн // М.: Радио и связь. – 1989. – 169 с.
3. P. M. Smith and D. R. Conn. The limits of resonant tunneling diode subharmonic mixer performance // J. Appl. Phys. – 1989. – V. 66 (3). – P. 1453-1458.
4. Frensley W. R. Quantum transport calculation of the small-signal response of a resonant tunneling diode // Appl. Phys. Lett. – 1987. – V. 51 (6). – P. 448-450.
5. Aleshkin V. Ya., Reggiani L., Alkeev N. V., Lyubchenko V. E., Ironside C. N., Figueiredo M. L. and Stanley C. R. Coherent approach to transport and noise in double barrier resonant diodes // Phys. Rev. B. – 2004. – V. 70. – P. 1153211-1- 1153211-13.
6. Song W., Mendez E. E., Kuznetsov V., Nielsen B. Shot noise in negative-differential conductance devices // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 82 (10). – P. 1568-1570.
7. Алкеев Н. В., Аверин С. В., Дорофеев А. А., Гладышева Н. Б., Торгакшин М. Ю. Резонансно-туннельный диод на основе гетеросистемы GaAs/AlAs для субгармонического смесителя // Микроэлектроника. – 2010 – Т. 39. – № 5. – С. 356-365.
8. Дорофеев А. А. Резонансно-туннельный диод для устройств формирования, преобразования и генерации сигналов СВЧ и КВЧ диапазонов частот // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – Вып. 2(227). – С. 91-95.
9. Suzuki S., Asada M., Teranishi A., Sugiyama H., Yokoyama H. Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature // Appl. Phys Lett. – 2010. – V. 97. – P. 242102-1- 242102-1.
10. Алкеев Н. В. Расчёт параметров субгармонического смесителя на резонансно-туннельном диоде // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48. – № 4. – С. 508-512.
11. Scott J. S., Kaminski J. P., Allen S. J., Chow D., Lui M. and Liu T. Y. Terahertz response of InGaAs/AlAs resonant tunneling diode // Semicond. Sci. Technol. – 1994. – V. 9. – P. 530-532.
12. Hori T., Ozono T., Orihashi N., Asada M. Frequency mixing characteristics of room temperature resonant tunneling diodes at 100 and 200 GHz // J. Appl. Phys. – 2006. – V. 99. – P. 064508-1- 064508-7.