

УДК 621.382.2

## РАСЧЁТ ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ СМЕСИТЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСНО- ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА ДЛЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ «КВАНТОВУЮ» ИНДУКТИВНОСТЬ

**Дорофеев А.А.**

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Установлена зависимость между видом частотной характеристики импеданса РТД и типом механизма транспорта электронов через КЯ на различных участках ВАХ РТД. Получена формула непосредственного расчёта предельной частоты РТД для ЭС с «квантовой» индуктивностью, учитывающей задержку электронов в КЯ РТД.

**Ключевые слова:** резонансно-туннельный диод (РТД), квантовая яма (КЯ), вольт-амперная характеристика (ВАХ), эквивалентная схема (ЭС), «квантовая» индуктивность

**Сведения об авторах:** Дорофеев Алексей Анатольевич, dorofeev@pulsarnpp.ru

## CALCULATION OF THE MIXING RESONANT-TUNNELING DIODE CUTOFF FREQUENCY FOR THE EQUIVALENT CIRCUIT WITH QUANTUM INDUCTANCE

**A.A. Dorofeev**

S&PE «Pulsar» JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr., 27

In this paper the dependence between the RTD impedance frequency characteristic type and electron transport mechanism type was determined using QW on various regions of RTD's CVC. Formula for direct calculation of RTD cutoff frequency for equivalent circuit with quantum inductance was obtained, accounting electrons delay in RTD's QW.

**Keywords:** resonant-tunneling diode (RTD), quantum well (QW), current-voltage characteristic (CVC), equivalent circuit (EC), quantum inductance

**Authors:** Dorofeev Aleksey Anatolievich, dorofeev@pulsarnpp.ru

### **Введение**

В настоящее время в качестве нелинейных элементов смесителей терагерцового диапазона наиболее широко применяются смесители на эффекте электронного разогрева (hot-electron bolometer (HEB) mixer) и на основе туннельных переходов типа сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС), требующие охлаждения до криогенных температур [1, 2]. Наиболее перспективным полупроводниковым прибором для создания приёмных устройств терагерцового диапазона, не требующих криогенного охлаждения, может служить резонансно-туннельный диод (РТД), способный работать от криогенных до комнатных температур. Особый интерес представляет применение РТД

в качестве нелинейного элемента субгармонического смесителя [3–9].

Для описания высокочастотных свойств РТД, работающего на участке вольт-амперной характеристики (ВАХ), соответствующей резонансному туннелированию электронов, предложено несколько вариантов малосигнальных эквивалентных схем (ЭС), представленных на рис. 1, 2 [10–14]. В [15] показано, что выбор эквивалентной схемы РТД на различных участках ВАХ можно проводить на основе анализа вида кривой зависимости измеренного импеданса от частоты на диаграмме Смита. Так, на диаграмме Смита частотная зависимость импеданса ЭС РТД (рис. 1а) представляет собой в точности дугу окружности [15]. Частотные зависимости импеданса ЭС РТД,

содержащей индуктивность (рис. 1б), отклоняются вниз относительно дуги окружности [15], в то время как для ЭС (рис. 2) [14, 16] и других ЭС, содержащих дополнительные ёмкости, частотные зависимости импеданса имеют спрямлённые участки [15].

Экспериментально показано, что при отсутствии постоянного смещения высокочастотные свойства РТД хорошо описываются

ЭС, состоящей из параллельно соединённых ёмкости  $C_D$  и резистора  $R_D$  и подключённого к ним последовательного резистора  $r_S$  (рис. 1а) [15]. Однако при напряжении смещения на РТД  $0 < |V_{см}| < |V_{тик}|$  кривая зависимости импеданса на диаграмме Смита имеет форму, идеально описываемую эквивалентной схемой, содержащей «квантовую» индуктивность  $L_Q$  (рис. 1б) [15].

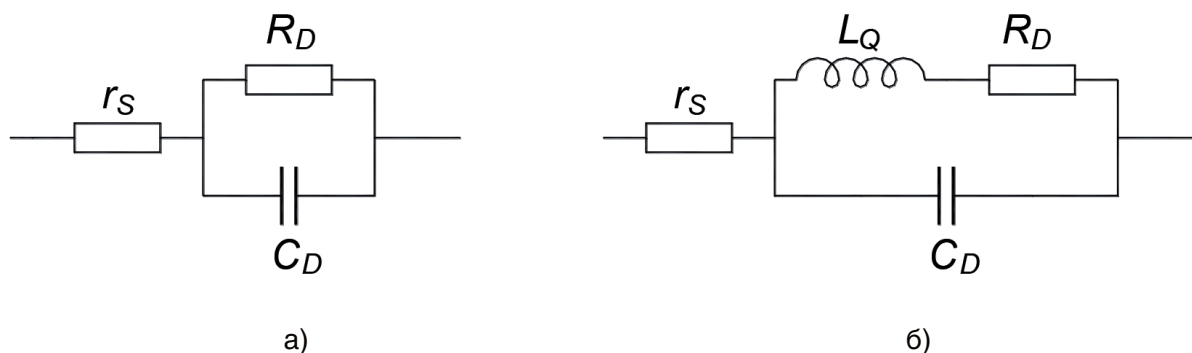


Рис. 1

Эквивалентная схема диода Шоттки (а); РТД с «квантовой» индуктивностью (б)

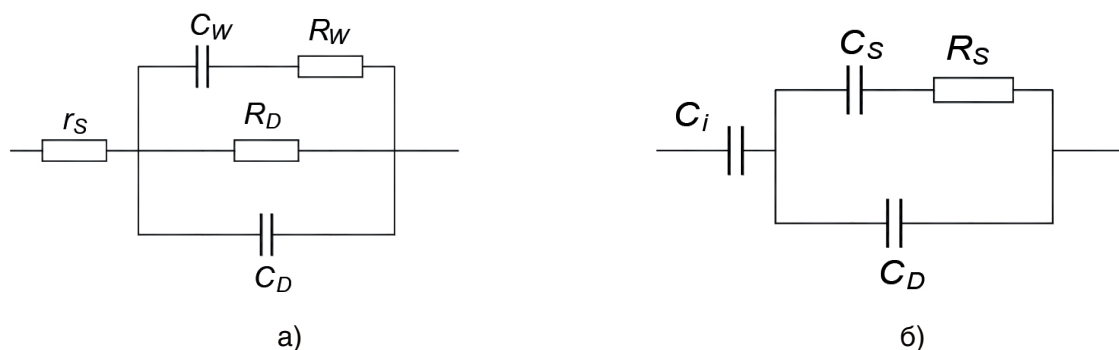


Рис. 2

Эквивалентные схемы диодов, содержащие дополнительные ёмкости: а) [13], б) [15]

Принято считать, что механизм транспорта электронов через РТД может быть трёх типов [17]:

- когерентный, когда электроны туннелируют через РТД с сохранением информации о первоначальной фазе волновой функции [18];
- некогерентный (или «последовательный»), когда электроны не сохраняют информацию о первоначальной фазе волновой функции, но при этом сохраняются резонансные уровни в квантовой яме (КЯ) [19]. В этом случае туннелирование электронов через РТД происходит в два этапа: сначала через первый барьер на уровень размерного квантования энергии в КЯ, а за-

тем с уровня размерного квантования через второй барьер и далее, что предполагает определённое время нахождения электрона в КЯ, т.е. задержку;

- нерезонансное туннелирование, происходящее при исчезновении резонансных уровней в КЯ [20].

Первые два механизма транспорта электронов являются резонансными, третий – нерезонансным.

Рассмотрим механизмы транспорта электронов для различных областей типовой ВАХ РТД, за исключением области 3 – участка ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью (рис. 3).

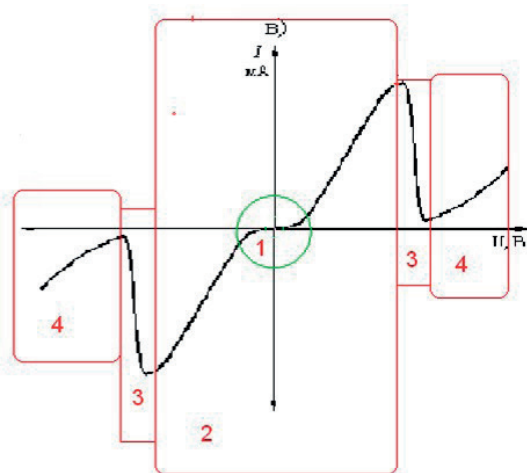


Рис. 3

### Типовая вольт-амперная характеристика

- РТД: область 1 –  $V_{см} = 0$  В;  
 область 2 –  $0 < |V_{см}| < |V_{пик}|$ ;  
 область 3 –  $|V_{пик}| < |V_{см}| < |V_B|$ ;  
 область 4 –  $|V_{см}| \geq |V_B|$

На основании экспериментальных результатов, представленных в [15], можно предположить, что:

– ЭС, описывающая высокочастотные свойства РТД при напряжениях смещения  $V_{см} = 0$  В (рис. 1а), соответствует когерентному механизму транспорта электронов через РТД, т.е. транспорту, при котором задержки электронов в КЯ нет;

– ЭС, описывающая высокочастотные свойства РТД, работающего при напряжениях смещения в диапазоне  $0 < |V_{см}| < |V_{пик}|$  (рис. 1б), где  $V_{пик}$  – напряжение, соответствующее пику тока РТД, соответствует последовательному механизму транспорта электронов через РТД, т.е. транспорту с задержкой электронов в КЯ (задержку электронов в ЭС описывает «квантовая» индуктивность [10]);

– при напряжении смещения  $|V_{см}| > |V_B|$ , где  $V_B$  – напряжение, соответствующее минимуму тока впадины на ВАХ РТД, механизм транспорта через барьеры КЯ представляет собой нерезонансное туннелирование электронов, частотная зависимость импеданса РТД практически совпадает с дугой окружности, что хорошо описывается ЭС рис. 1а.

Таким образом, несмотря на то, что расчёты ВАХ РТД для когерентного и для последовательного механизмов транспорта электронов через КЯ дают одинаковые результаты [21], характер механизма транспор-

та электронов через РТД можно определить по результату анализа частотной зависимости импеданса РТД.

В работе [15] приведён метод оценки предельной частоты  $f_{C2}$  РТД с учётом задержки электронов в КЯ. Для РТД, описываемого ЭС, представленной на рис. 1б, частотно-зависимая функция отношения амплитуд высокочастотных напряжений  $U_1(f)$  на резисторе  $R_D$  и  $U(f)$  на выводах РТД определяется по формуле:

$$\frac{|U_1|}{|U|} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f)^4 (\tau_0 \tau_{DL})^2 + (2\pi f)^2 (\tau_0^2 + \tau_{DL}^2)}}, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение частотой  $f$  на выводах ЭС (рис. 1б);  $U_1$  – напряжение частотой  $f$  на резисторе  $R_D$  ЭС (рис. 1б);  $\tau_0 = r_s * C_D$ ;  $\tau_{DL} = L_D / R_D$  (рис. 1б).

Оценка предельной частоты обычно проводится графическим методом по спаду функции  $|U_1(f)|/|U(f)|$  в  $\sqrt{2}$  раз [15].

Выведем формулу для непосредственного расчёта предельной частоты РТД с учётом задержки электронов в КЯ для ЭС РТД, содержащей «квантовую» индуктивность (рис. 1б).

Принимаем  $|U_1(f)|/|U(f)| = 1/\sqrt{2}$ , подставив в формулу (1), получаем:

$$2 = 1 + (2\pi f)(\tau_0 \tau_{DL})^2 + (2\pi f)^2 (\tau_0^2 + \tau_{DL}^2), \quad (2)$$

$$(2\pi f)(\tau_0 \tau_{DL})^2 + (2\pi f)^2 (\tau_0^2 + \tau_{DL}^2) - 1 = 0. \quad (3)$$

Решая уравнение (3) относительно  $f$ , получаем формулу для непосредственного расчёта предельной частоты РТД с учётом задержки электронов в КЯ:

$$f_{C2} = \frac{1}{4\pi \tau_0 \tau_{DL}} \sqrt{2(\sqrt{\tau_0^4 + 6\tau_0^2 \tau_{DL}^2 + \tau_{DL}^4} - \tau_0^2 - \tau_{DL}^2)}. \quad (4)$$

### Выводы

Анализ частотной зависимости импеданса РТД позволяет определить тип механизма транспорта электронов через квантовую яму.

Получена формула непосредственного расчёта предельной частоты РТД для эквивалентной схемы с «квантовой» индуктивностью, учитывающей задержку электронов в квантовой яме.

### Литература

1. Вакс В.Л., Анфертьев В.А., Гольцман Г.Н., Пентин И.В., Третьяков И.В. ЗТГц спектрометр

- высокого разрешения на основе наноструктурированных полупроводниковых и сверхпроводящих устройств // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 1. – С. 1-10.
2. Кошелец В.П., Тарасов М.А. Сверхпроводниковые приёмники терагерцового диапазона для космических и аэростатных радиотелескопов // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – № 4. – С. 517-521.
  3. Георгиевский А.М., Громов Д.В., Дудинов К.В., Еськов Г.В., Зайцев Г.М., Иванов Ю.А., Лубышев Д.И., Малышев К.В., Мальцев П.П., Михальченко А.Г., Перунов Ю.М., Попов Н.Д., Преображенский В.В., Федоркова Н.В. Исследование направлений применения резонансно-туннельного диода в интегральных схемах СВЧ-диапазона // Микроэлектроника. – 1996. – Т. 25. – С. 249-258.
  4. Алкеев Н.В. Расчёт параметров субгармонического смесителя на резонансно- туннельном диоде // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48. – № 4. – С. 508-512.
  5. Toshihiko Ouchi , Kousuke Kajiki, Takayuki Koizumi, Takeaki Itsuji, Yasushi Koyama, Ryota Sekiguchi, Oichi Kubota, Kodo Kawase. Terahertz Imaging System for Medical Applications and Related High Efficiency Terahertz Devices//J Infrared Milli Terahz Waves , DOI 10.1007/s10762-013-0004-5, # Springer Science+Business Media New York 2013.
  6. Иванов Ю.А., Мешков С.А., Федоренко И.А., Федоркова Н.В., Шашурин В.Д. Улучшение параметров смесителей радиосигналов за счёт применения резонансно-туннельных диодов // Техника и приборы СВЧ. – 2011. – № 2. – С. 18-25.
  7. Алкеев Н.В., Аверин С.В., Дорофеев А.А., Гладышева Н.Б., Торгашин М.Ю. Резонансно-туннельный диод на основе 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. Дорофеев А.А., Гладышева Н.Б., Алкеев Н.В., Аверин С.В. Перспективы использования резонансно-туннельных диодов в субгармонических смесителях радиоаппаратуры // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1(228). – С. 38-43.
  10. Brown E.R., Parker C.D., Solner T.C.L.G. Effect of quasibond-state lifetime on the oscillation power of resonant tunneling diodes – Appl. Phys. Lett. 1989, v. 54 (10), pp. 934-936.
  11. Feiginov M. N. Displacement current and the real part of high-frequency conductance of resonant-tunneling diode // Appl. Phys. Lett. – 2001. – V. 78. – No. 21. – P. 3301-3303.
  12. Sheard F. W., Toombs G. Space-charge effects and ac response of resonant tunneling double-barrier diodes // Solid-State Electronics. – 1989. – V. 32. – No. 12. – P. 1443-1447.
  13. Wei T., Stapleton S., Berolo O. Capacitance and hysteresis study of AlAs/GaAs resonant tunneling diode with asymmetric spacer layers // J. Appl. Phys. – 1995. – V. 77 (8). – P. 4071-4076.
  14. Jo J., Li H. S., Chen Y.W., Wang K.L. Observation of large capacitive current in double barrier resonant tunneling diode at resonance // Appl. Phys. Lett. – 1994. – V. 64. – No. 17. – P. 2276-2278.
  15. Дорофеев А.А., Гладышева Н.Б., Алкеев Н.В., Аверин С.В. Определение предельной частоты резонансно-туннельного диода с учётом поверхностных состояний на гетерограницах и времени задержки электронов в квантовой яме // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1(228). – С. 19-29.
  16. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / М.: Мир. – 1984. – Т. 1.
  17. Iannaccone G., Pellegrini B. Unified approach to electron transport in double-barrier structures// Phys. Rev. B, 1995, 52, 17406-17412.
  18. Tsu R., Esaki L., Tunneling in a finite superlattice, App. Phys. Lett. 22(11), pp. 562–564, 1973, 22(11), pp. 562–564.
  19. Luryi S. Frequency limit of double-barrier resonant-tunneling oscillators//Appl. Phys. Lett.1985, V.47, 490-492.
  20. Hu Y., Stapleton S. Sequential tunneling versus resonant tunneling in a double-barrier diode// J. Appl. Phys. 1993, 73, 8633-8636.
  21. Weil T., Vinter B. Equivalence between resonant tunneling and sequential tunneling in double barrier diodes// Appl. Phys. Lett. 1987, 50, 1281-1283.

## References

1. Vaks V.L., Anfertyev V.A., Goltsman G.N., Pentin I.V., Tretyakov I.V., 3-THz high-resolution spectrometer based on nanostructure semiconductor and superconductor devices. «Radioelectronic Journal», No.1, 2016. pp.1-10.
2. Koshelets V.P., Tarasov M.A., Superconducting terahertz receivers for space and airborne radiotelescopes. Proceedings of the RAS. Physics. 2016. Vol.80, No.4. pp.517-521.
3. Georgievskiy A.M., Gromov D.V., Dudinov K.V., Eskov G.V., Zaytsev G.M., Ivanov Yu.A.,

- Lubyshev I., Malyshev K.V., Maltsev P.P., Mikhailchenkov A.G., Perunov Yu.M., Popov N.D., Preobrazhenskiy V.V., Fedorkova N.V. Research on the resonant-tunneling diode applications in microwave integrated circuits. «Microelectronics 1996», Vol.25. pp. 249-258.
4. Alkeev N.V. Calculation of resonance-tunneling diode based subharmonic mixer parameters. «Radio-engineering and electronics», 2013. Vol.48. No.4. pp.508-512.
  5. Toshihiko Ouchi, Kousuke Kajiki, Takayuki Koizumi, Takeaki Itsuji, Yasushi Koyama, Ryota Sekiguchi, Oichi Kubota, Kodo Kawase. Terahertz Imaging System for Medical Applications and Related High Efficiency Terahertz Devices//J Infrared Milli Terahz Waves, DOI 10.1007/s10762-013-0004-5, # Springer Science+Business Media New York 2013
  6. Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Fedorenko I.A., Fedorkova N.V., Shashurin V.D. Improvement of radio-signal mixer parameters using resonant-tunneling diodes. «Microwave devices and engineering». 2011. No.2. pp.18-25.
  7. Alkeev N.V., Averin S.V., Dorofeev A.A., Gladysheva N.B., Torgashin M.Yu. GaAs/AlAs resonant-tunneling diode for subharmonic mixer. «Microelectronics». 2010. Vol.39. No.5. pp.356-365.
  8. Dorofeev A.A. Resonant-tunneling diode for signal shaping, conditioning and generating devices of microwave and millimeter-wave frequency bands. «Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices». 2011. Issue 2(227). pp.91-95.
  9. Dorofeev A.A., Gladysheva N.B., Alkeev N.V., Averin S.V. Application prospects of resonant-tunneling diodes in subharmonic radio-mixers. «Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices». 2012. pp.38-43.
  10. Brown E.R., Parker C.D., Solner T.C.L.G. Effect of quasibond-state lifetime on the oscillation power of resonant tunneling diodes – Appl. Phys. Lett. 1989, v. 54 (10), pp. 934-936.
  11. Feiginov M. N. Displacement current and the real part of high-frequency conductance of resonant-tunneling diode // Appl. Phys. Lett. – 2001. – V. 78. – No. 21. – P. 3301-3303.
  12. Sheard F. W., Toombs G. Space-charge effects and ac response of resonant tunneling double-barrier diodes // Solid-State Electronics. – 1989. – V. 32. – No. 12. – P. 1443-1447.
  13. Wei T., Stapleton S., Berolo O. Capacitance and hysteresis study of AlAs/GaAs resonant tunneling diode with asymmetric spacer layers // J. Appl. Phys. – 1995. – V. 77 (8). – P. 4071-4076.
  14. Jo J., Li H. S., Chen Y.W., Wang K.L. Observation of large capacitive current in double barrier resonant tunneling diode at resonance // Appl. Phys. Lett. – 1994. – V. 64. – No. 17. – P. 2276-2278.
  15. Dorofeev A.A., Gladysheva N.B., Alkeev N.V., Averin S.V. Determining the cutoff frequency of resonant-tunneling diode accounting heterojunction surface states and delay of electrons in quantum well. «Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices». 2012. pp.19-29.
  16. Zi S. Semiconductor Devices Physics. M.: Mir. 1984. Vol.1.
  17. Iannaccone G., Pellegrini B. Unified approach to electron transport in double-barrier structures // Phys. Rev. B, 1995, 52, 17406-17412.
  18. Tsu R., Esaki L., Tunneling in a finite superlattice, App. Phys. Lett. 22(11), pp. 562–564, 1973, 22(11), pp. 562–564.
  19. Luryi S. Frequency limit of double-barrier resonant-tunneling oscillators // Appl. Phys. Lett. 1985, V.47, 490-492.
  20. Hu Y., Stapleton S. Sequential tunneling versus resonant tunneling in a double-barrier diode // J. Appl. Phys. 1993, 73, 8633-8636.
  21. Weil T., Vinter B. Equivalence between resonant tunneling and sequential tunneling in double barrier diodes // Appl. Phys. Lett. 1987, 50, 1281-1283.