

01;12

## Теоретическое исследование приборных структур, содержащих резонансно-туннельные диоды

© И.И. Абрамов, А.В. Королев

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220027 Минск, Белоруссия  
e-mail:nanodev@bsuir.edu.by

(Поступило в Редакцию 9 января 2001 г.)

С помощью предложенных электрических моделей и разработанного комплекса программ ЕС-RTS-NANODEV проведено теоретическое исследование нескольких простых приборных структур, включающих резонансно-туннельные диоды. Показано, что проанализированные структуры могут использоваться в качестве элементов многозначной логики, преобразователей частоты и генераторов самых различных сигналов, включая гармонические, релаксационные и хаотические.

### Введение

В результате развития нанотехнологии начали создаваться новые приборные структуры, на работу которых сильное влияние оказывают квантовые эффекты и которые характеризуются достаточно сложными и полезными функциональными возможностями [1–4]. Так, в настоящее время только в сочетании с резонансно-туннельными структурами создан ряд интегрированных элементов, а именно на нескольких резонансно-туннельных диодах (РТД) [5], а также резонансно-туннельных транзисторах [6], объединяющих РТД и гетероструктурный биполярный транзистор [7], РТД и гетероструктурный полевой транзистор с селективным легированием [8], РТД и КМОП элемент [9] и др. Данные функционально-интегрированные элементы характеризуются уникальными свойствами и, как правило, возросшей степенью сложности протекающих в них физических процессов по сравнению с входящими в их состав приборами. Последнее связано с возможностью взаимодействия между самыми различными областями интегрированной приборной структуры. Таким образом, может качественно изменяться физика работы элемента. В связи с этим теоретический анализ таких структур крайне затруднителен и в то же время необходим ввиду значительных успехов в их экспериментальной реализации и начала создания на их основе наноэлектронных квантовых интегральных схем.

Цель данной работы — теоретическое исследование нескольких простейших приборных структур, содержащих РТД, и иллюстрация их широких функциональных возможностей.

### Модели

Анализ показывает, что для теоретического исследования рассматриваемых функционально-интегрированных элементов, включающих квантовые приборы, в настоящее время целесообразно использование электрических моделей. Это связано с тем, что более строгие модели, например на основе численного самосогласованного

решения уравнений Шредингера, Пуассона и кинетического уравнения для функции Вигнера [10], сложны, только начинают разрабатываться и, как правило, применяются для простейших квантовых приборов. Таким образом, ситуация качественно отличается от ситуации для функционально-интегрированных элементов, работающих согласно классическим принципам и с достаточной степенью точности описываемых диффузионно-дрейфовыми моделями [11]. В связи с этим для теоретического исследования нами использованы именно электрические модели.

Электрические модели анализируемых резонансно-туннельных структур подробно рассмотрены в работах [12–16], поэтому здесь опишем их лишь кратко. Предложенные электрические модели РТД основаны на следующей аппроксимации вольт-амперной характеристики (ВАХ)

$$I(V) = I_p(V/V_p) \exp[a_0 + a_1(V/V_p) + a_2(V/V_p)^2] + a_3 I_p \exp(a_4) \{ \exp[a_5(V/V_p) + a_6(V/V_p)^2] - \exp[a_7(V/V_p)] \}, \quad (1)$$

где  $I$  — ток;  $V$  — напряжение;  $I_p$  — максимальная величина туннельного тока РТД,  $V_p$  — величина внешнего смещения при максимальной величине туннельного тока,  $a_0$ – $a_7$  — коэффициенты.

Каждое из слагаемых выражения (1) вносит свой вклад в ток, проходящий через РТД, и следовательно, может интерпретироваться как источник тока, управляемый напряжением. Таким образом, эквивалентная схема в стационарных режимах работы РТД состоит из трех диодов (рис. 1, *a*). Величина  $R_N$  включает сопротивление пассивных частей РТД, а также другие "паразитные" в стационарном случае составляющие. Для анализа переходных процессов эквивалентная схема электрической модели РТД приведена на рис. 1, *b*. Зависимость  $I(U)$  аппроксимируется с помощью выражения (1) во всем диапазоне прикладываемых смещений,  $R_p$ ,  $L_p$ ,  $C_p$  описывают динамические свойства РТД для случая большого

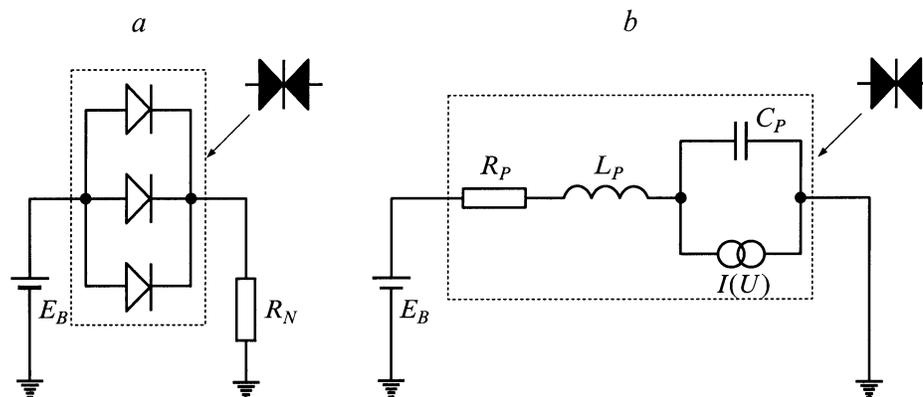


Рис. 1. Эквивалентные схемы РТД для стационарного случая (а), для анализа переходных процессов (б).

сигнала. Заметим, что значение  $R_P$  может отличаться от  $R_N$ , хотя для малосигнального случая этим обычно пренебрегают [15]. Величина  $C_P$  описывает не только емкостные свойства активной части РТД, но и паразитные составляющие. Индуктивность  $L_P$  характеризует динамические процессы в квантовой яме и также включает паразитные компоненты.

Описанные электрические модели основаны на современных представлениях о физике протекающих в РТД процессов [13,15,16], что является более целесообразным в данных исследованиях простейших элементов по сравнению со случаем использования макромоделей. В работе [17] показано, что применение последних высокоэффективно для моделирования сложных схем, содержащих квантовые приборы и когда не столь важно исследование физических процессов, протекающих собственно в приборных структурах. Более высокая адекватность моделирования РТД по предложенным электрическим моделям по сравнению с известными относительно экспериментальных данных была проиллюстрирована в работах [12,13,15]. Так, характерная максимальная погрешность при расчете ВАХ составляет около 10–15%, что является неплохим результатом, если учесть сильную нелинейность ВАХ РТД. Используемая при этом методика идентификации параметров электрической модели из экспериментальных данных описана в работах [18,19].

Для теоретического исследования был применен комплекс программ расчета резонансно-туннельных структур и схем на их основе с использованием разработанных и ряда известных электрических моделей ЕС–RTS–NANODEV [19–22]. Комплекс был включен в систему моделирования нанoeлектронных приборов на эффектах одноэлектронного, резонансного туннелирования и квантовой интерференции NANODEV [23,24].

## Исследование приборных структур

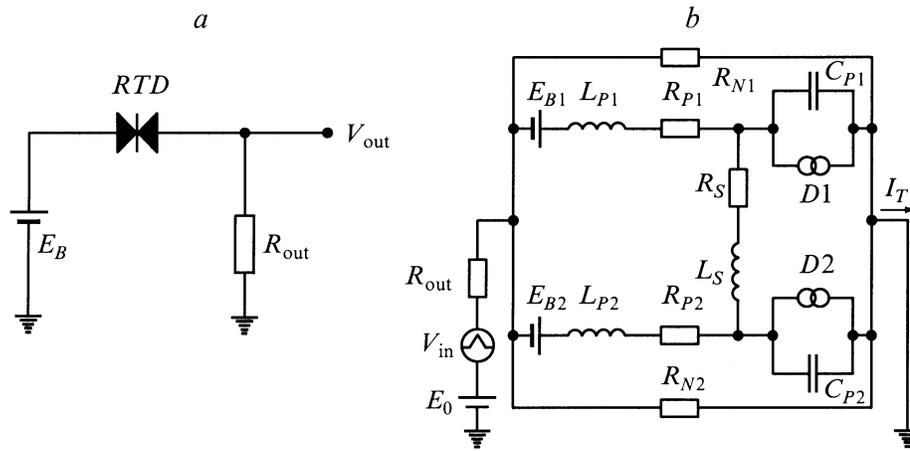
В [15,16] была показана возможность создания на РТД генераторов самых различных колебаний, а именно гармонических, релаксационных, ждущих релаксационных и

др. При этом на РТД подавалось постоянное напряжение. Параллельно и независимо в работах [25,26] была проиллюстрирована подобная возможность на простой схеме, содержащей РТД и дополнительные емкость и индуктивность, при подаче на вход генератора переменного синусоидального сигнала с постоянной составляющей. Хотя данная схема в принципе несложна, однако она содержит дополнительную индуктивность, что делает схему трудно реализуемой в интегральном исполнении. Это подтверждают и результаты авторов, показавших работоспособность предложенной схемы генератора в дискретном исполнении [25,26].

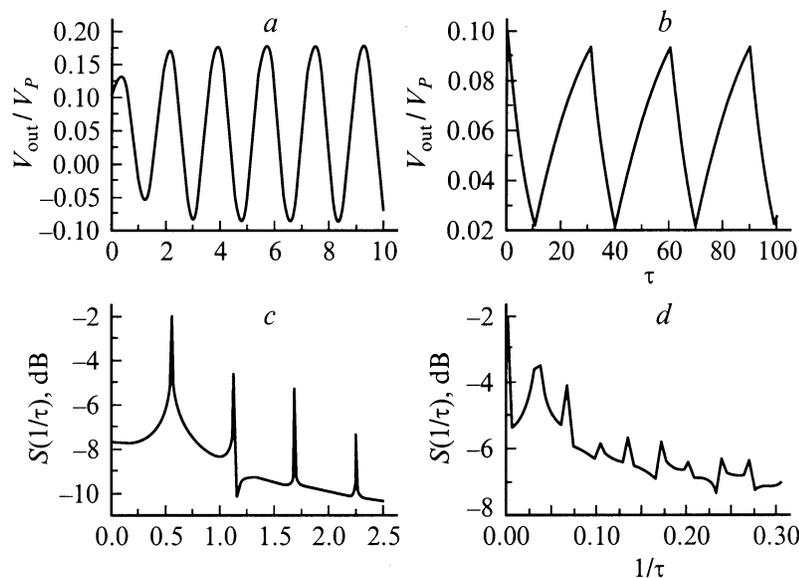
Проиллюстрируем возможность создания генераторов самых различных колебаний на простейшей приборной структуре, включающей только РТД без дополнительной емкости и индуктивности. Эквивалентная схема анализируемой структуры приведена на рис. 2, а. На вход приборной структуры подается постоянное смещение  $E_B$ , а выходное напряжение  $V_{out}$  снимается с сопротивления  $R_{out}$ . Эквивалентная схема собственно РТД соответствует приведенной на рис. 1, б. При аппроксимации ВАХ по модели (1) использовались экспериментальные данные для структуры А работы [27]. Это сделано умышленно для большей достоверности проводимых теоретических исследований.

Результаты моделирования приборной структуры рис. 2, а приведены на рис. 3 для случаев практически гармонического (рис. 3, а) и релаксационного (рис. 3, б) выходных сигналов. Соответствующие спектральные характеристики сигналов иллюстрируются рис. 3, с, д. В таблице приведены численные значения параметров эквивалентной схемы анализируемой приборной структуры для получаемых сигналов. Из таблицы следует, что параметры характеризуются небольшим разбросом численных значений.

Таким образом, результаты свидетельствуют о том, что генераторы самых различных колебаний могут быть реализованы с помощью простейшей приборной структуры, включающей только РТД и нагрузочное сопротивление. Необходимые изменения параметров эквивалентной схемы, в частности  $R_P$ ,  $L_P$ ,  $C_P$ ,  $R_{out}$ , могут достигаться с



**Рис. 2.** Эквивалентные схемы: *a* — элемент, включающий РТД; *b* — функционально-интегрированный элемент, включающий два параллельно включенных РТД.



**Рис. 3.** Результаты моделирования простейшего элемента, включающего РТД ( $\tau = t/t_0$ ,  $t_0 = 10^{-10}$  s): *a* — гармонические колебания, *b* — релаксационные колебания, *c* — спектр гармонических колебаний, *d* — спектр релаксационных колебаний.

помощью вариации топологических размеров пассивной части интегрированной приборной структуры, дополнительным легированием некоторых ее областей, вариацией толщины слоев резонансно-туннельной структуры и др. Это связано с тем, что именно конструктивно-технологические и электрофизические параметры РТД определяют численные значения  $R_P$ ,  $L_P$ ,  $C_P$ ,  $R_{out}$ . Опи-

санные действия легко реализуемы при изготовлении приборной структуры путем определенных модификаций технологического процесса. Для этих целей могут использоваться эмпирические формулы для  $R_P$ ,  $L_P$ ,  $C_P$ ,  $R_{out}$ , установленные при экспериментальной разработке элементов. Необходимо также отметить, что указанные в табл. 1 параметры взяты в характерных для реальных РТД диапазонах численных значений [27–32].

Рассмотрим простейший функционально-интегрированный элемент, включающий два РТД и описываемый эквивалентной схемой рис. 2, *b*. Покажем, что данный элемент в зависимости от прикладываемых смещений и параметров эквивалентной схемы может использоваться для многозначной логики, а также в качестве преобразователя частоты и генератора различных сигналов.

Численные значения параметров эквивалентной схемы

Случай моделирования	Параметры				
	$E_B$ , V	$R_P$ , $\Omega$	$L_P$ , nH	$C_P$ , pF	$R_{out}$ , $\Omega$
Рис. 3, <i>a, c</i>	0.575	0.17	0.05	15	0.1
Рис. 3, <i>b, d</i>	0.575	0.17	5	2	0.1

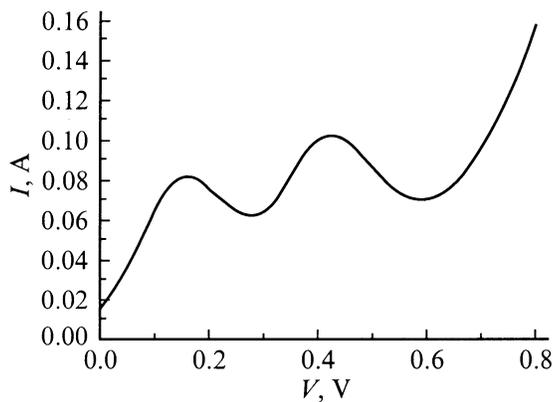


Рис. 4. ВАХ логического элемента, состоящего из двух параллельно включенных РТД.

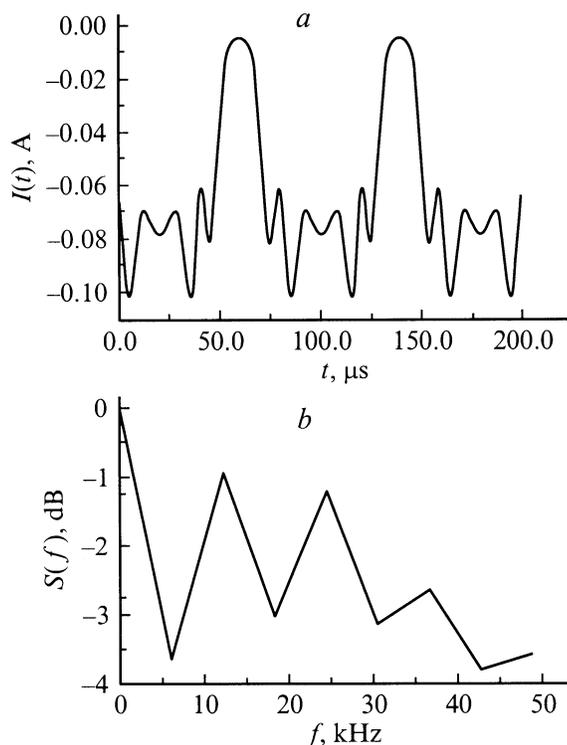


Рис. 5. Результаты моделирования приборной структуры, включающей два РТД: *a* — выходной ток, *b* — спектр.

Прежде всего отметим, что анализируемая приборная структура подобна экспериментально исследованной в работе [5] при температуре  $T = 100$  К. Наиболее существенные отличия заключаются в характере связи. Так, в работе [5] два РТД связаны только с помощью сопротивления. В схеме рис. 2, *b* связь осуществляется с помощью сопротивления  $R_S$  и индуктивности  $L_S$ , что может интерпретироваться как взаимодействие через активные области двух параллельно расположенных резонансно-туннельных структур в функционально-интегрированном элементе. Кроме того, численные значения  $R_S$  в наших исследованиях гораздо меньше по сравнению с данны-

ми [5]. Включение сопротивлений  $R_{N1}$  и  $R_{N2}$  в схеме рис. 2, *b* не носит принципиального характера.

Рассчитанная ВАХ исследуемой приборной структуры показана на рис. 4 и доказывает возможность ее использования в качестве элемента памяти многозначной логики. Качественный вид "двухпиковой" ВАХ, как показали вычислительные эксперименты, в сильной степени зависит от величины смещения  $E_{B2}$ . Это происходит вследствие того, что при уменьшении значения  $E_{B2}$  ниже некоторого критического уровня ВАХ первого РТД фактически накладывается на ВАХ второго РТД. Кроме того, на ВАХ элемента оказывает влияние и  $R_S, L_S$ , как характеризующие обратную связь между двумя резонансно-туннельными структурами. Численные значения параметров, которые использовались при моделировании, следующие:  $E_{B1} = 0$ ,  $E_{B2} = 0.35$  В,  $R_{P1} = R_{P2} = 0.17$  Ω,  $L_{P1} = L_{P2} = 1.01$  нН,  $C_{P1} = C_{P2} = 2.96$  пФ,  $R_S = 1.0$  Ω,  $L_S = 1.01$  нН. ВАХ каждого из РТД соответствует структуре А работы [27]. Сопротивления  $R_{N1}, R_{N2}$  в данных исследованиях не учитывались.

Эта же приборная структура может использоваться и в качестве преобразователя частоты. На рис. 5 показаны результаты моделирования, полученные при тех же параметрах, что указаны выше, при подаче на вход гармонического сигнала

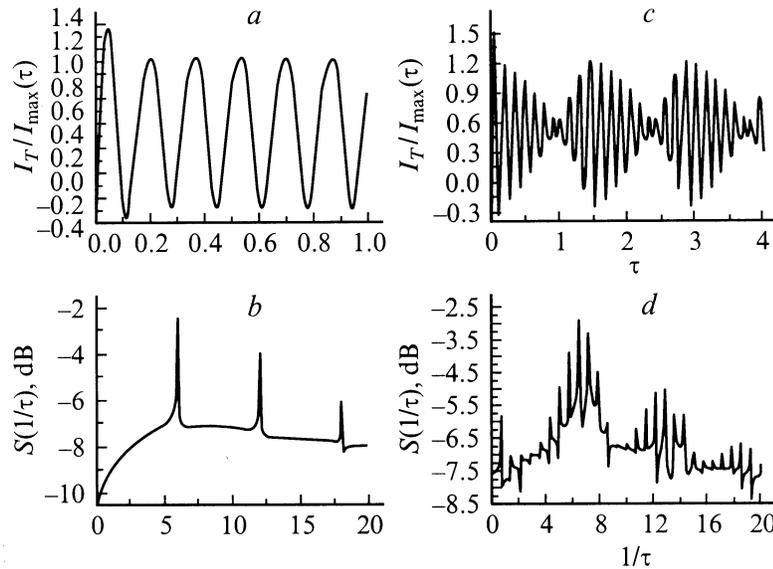
$$V_{in} = A \sin(ft), \quad (2)$$

где  $A = 0.35$  В,  $f = 12.5$  kHz,  $E_0 = 0.3$  В.

Ток, приведенный на рис. 5, *a*, сигнал проходит через сопротивление  $R_{out}$ . Соответствующий спектр выходного сигнала иллюстрируется рис. 5, *b* и доказывает возможность использования данной приборной структуры в качестве умножителя частоты.

Покажем, что эта же приборная структура может использоваться и в качестве генератора самых различных сигналов при постоянном смещении, т.е.  $V_{in} = 0$ , с небольшим рассогласованием параметров двух РТД. В данном случае  $R_{out} = 0$ , а в качестве выходного сигнала рассматривался ток  $I_T$  на схеме рис. 2, *b*. В приводимых исследованиях ВАХ активной области первого РТД соответствует структуре А работы [27], ВАХ активной области второго РТД отличается приблизительно на 2%. На рис. 6 приведены результаты моделирования для параметров эквивалентной схемы рис. 2, *b*, численные значения которых такие:  $R_{P1} = 0.17$  Ω,  $R_{P2} = 0.167$  Ω,  $L_{P1} = 0.01$  нН,  $L_{P2} = 0.0098$  нН,  $C_{P1} = 0.5$  пФ,  $C_{P2} = 0.49$  пФ,  $R_S = 8.012$  Ω,  $L_S = 0.1$  нН.

Из рис. 6, *a, b* следует, что в данном случае выходной сигнал близок к гармоническому. На рис. 6, *c, d* приведен выходной сигнал, спектральная характеристика которого близка к свойственной хаотическому сигналу. Подчеркнем, что такое существенное отличие в виде сигналов достигнуто при небольшом различии в значении всего лишь одного параметра. Так, для получения сигнала рис. 6, *a* одно из смещений было  $E_{B2} = 0$ , а для сигнала рис. 6, *c*  $E_{B2} = 0.1$  В.



**Рис. 6.** Результаты моделирования для приборной структуры, состоящей из двух РТД,  $\tau = t/t_0$ ,  $t_0 = 10^{-10}$  с,  $I_{MAX} \approx 0.2$  А,  $E_0 = 0.55$  В,  $E_{B1} = 0$ .  $a, c$  — колебания;  $b, d$  — спектр.  $E_{B2}$ , В:  $a, b$  — 0;  $c, d$  — 0.1.

Интересно заметить, что эквивалентная схема рис. 2,  $b$  может быть использована и для построения электрических моделей ряда новых структур [33–38], функционирование которых основано на принципе когерентного транспорта носителей заряда с самоорганизацией [39]. Теоретические исследования таких приборных структур осуществлены в работах [33–39], в том числе на основе электрических моделей [14,40]. В данных случаях ВАХ диодов эквивалентной схемы рис. 2,  $b$  могут отличаться гораздо более значительно [14,40]. Кроме того, сопротивления  $R_{P1}, R_{P2}$  и индуктивности  $L_{P1}, L_{P2}$  также более сильно различаются между собой и нет необходимости в дополнительных источниках напряжения  $E_{B1}$  и  $E_{B2}$ . В таких приборных структурах повышенные функциональные возможности достигаются за счет более сложных физических процессов в самой наноструктуре, а не за счет пространственного разделения двух взаимодействующих резонансно-туннельных структур, как в рассмотренных ранее элементах.

## Заключение

С использованием разработанных электрических моделей РТД и комплекса программ расчета резонансно-туннельных структур и схем на их основе ЕС–RTS–NANODEV проведено теоретическое исследование нескольких приборных структур, включающих РТД. Несмотря на простоту проанализированных элементов, показано, что они могут использоваться для выполнения самых разнообразных и сложных функций в зависимости от прикладываемых, как правило, постоянных смещений и параметров эквивалентной схемы. В частности, они могут применяться в качестве элементов многозначной логики, преобразователей частоты и генераторов самых

различных сигналов, включая гармонические, релаксационные, хаотические. Учитывая требуемые при этом небольшие различия численных значений параметров эквивалентной схемы, допустимо создание в рамках одной нанoeлектронной интегральной схемы разнообразных устройств, как аналоговых, так и цифровых. В этой принципиальной возможности также убеждает то, что приведенные выше параметры лежат в характерных для РТД диапазонах численных значений [27–32].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Республиканских научно-технических программ "Информатика", "Низкоразмерные системы" и "Нанoeлектроника".

## Список литературы

- [1] Алфёров Ж.И. // ФТП. 1998. Т. 32. Вып. 1. С. 3–18.
- [2] Resonant Tunneling in Semiconductors: Physics and Applications / Ed by L.L. Chang., E.E. Mendez, C. Tejedor. NATO ASI Ser. B. 1991. Vol. 277. 538 p.
- [3] Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures / Ed. by H. Grabert, M.H. Devoret. NATO ASI Series. B: Physics. New York: Plenum, 1992. Vol. 294. 336 p.
- [4] Nanostructure Physics and Fabrications / Ed by M.A. Reed, W.P. Kirk. Boston: Academic Press, 1989. 517 p.
- [5] Sen S., Capasso F., Cho A.Y., Sivco D. // IEEE Trans. 1987. Vol. ED-34. P. 2185–2190.
- [6] Capasso F., Sen S., Beltram F. et al. // IEEE Trans. 1989. Vol. ED-36. P. 2065–2082.
- [7] Chang C.E., Asbeck P.M., Wang K.-C., Brown E.R. // IEEE Trans. 1993. Vol. ED-40. P. 685–691.
- [8] Kawashima M., Hayashi H., Fukuyama H. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39. P. 2468–2472.
- [9] Bergman J.I., Chang J., Joo Y. et al. // IEEE Electron. Device Lett. 1999. Vol. 20, N 3. P. 119–122.

- [10] *Biegel V.A., Plumter J.D.* // Phys. Rev., Ser. B. 1996. Vol. 54. P. 8070–8082.
- [11] *Абрамов И.И.* Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Минск: БГУ, 1999. 189 с.
- [12] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В., Патент Е.А.* // Матер. 8<sup>й</sup> междунар. Крымской микроволновой конференции. Севастополь, 1998. С. 599–601.
- [13] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Изв. Белорусской инженерной академии. 1998. № 2(6)/2. С. 43–46.
- [14] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Изв. Белорусской инженерной академии. 1999. № 1(7)/2. С. 119–121.
- [15] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43. № 3. С. 59–63.
- [16] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2000. № 2. С. 75–79.
- [17] *Mohan S., Sun J.P., Mazumber P., Haddad G.I.* // IEEE Trans. 1995. Vol. CAD-14. N 6. P. 653–662.
- [18] *Абрамов И.И., Королев А.В.* // Тр. 7<sup>й</sup> Междунар. научно-технической конф. "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники". Дивноморское, 2000. Т. 2. С. 16–18.
- [19] *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Королев А.В.* // Матер. 10<sup>й</sup> междунар. Крымской микроволновой конференции. Севастополь, 2000. С. 418–420.
- [20] *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Матер. 9<sup>й</sup> междунар. Крымской микроволновой конференции. Севастополь, 1999. С. 296–299.
- [21] *Абрамов И.И., Берашевич Ю.А., Шеремет И.В., Якубовский И.А.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1999. Т. 42. № 2. С. 46–50.
- [22] *Королев А.В., Абрамов И.И.* // Тр. 7<sup>й</sup> Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники". Дивноморское, 2000. Т. 2. С. 13–15.
- [23] *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Новик Е.Г., Шеремет И.В.* // Матер. 6<sup>й</sup> междунар. Крымской микроволновой конференции. Севастополь, 1996. С. 294–298.
- [24] *Абрамов И.И., Новик Е.Г.* Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. Минск: Бестпринт, 2000. 164 с.
- [25] *Kawano Y., Kishimoto Sh., Maezawa K., Mizutani T.* // Jap. J. Appl. Phys. 1999. Vol. 38. P. L1321–L1322.
- [26] *Kawano Y., Kishimoto Sh., Maezawa K., Mizutani T.* // Jap. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39. P. 3334–3338.
- [27] *Gering J.M., Crim D.A., Morgan D.G. et al.* // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 61. P. 271–276.
- [28] *Brown E.R., Parker C.D., Sollner T.C.L.G.* // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 54. P. 934–936.
- [29] *Huang C.Y., Morris J.E., Su Y.K.* // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. P. 2690–2696.
- [30] *Gan K.J., Su Y.K., Wang R.L.* // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 81. P. 6825–6829.
- [31] *Gan K.J., Su Y.K.* // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. P. 5822–5828.
- [32] *Gan K.J., Su Y.K.* // Jap. J. Appl. Phys. 1997. Vol. 36. P. 6280–6284.
- [33] *Abramov I.I., Danilyuk A.L.* // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. P. 665–667.
- [34] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // Матер. 7<sup>й</sup> междунар. Крымской микроволновой конференции. Севастополь, 1997. С. 379–382.
- [35] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1997. № 3. С. 64–68.
- [36] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 12. С. 93–94.
- [37] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // Докл. НАН Беларусі. 1998. Т. 42. № 5. С. 55–59.
- [38] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // Матер. 8<sup>й</sup> междунар. Крымской микроволновой конференции. Севастополь, 1998. С. 602–605.
- [39] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // Матер. 6<sup>й</sup> междунар. Крымской микроволновой конференции. Севастополь, 1996. С. 45–54.
- [40] *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2001. № 1.