

Краткие сообщения

06

Узкополосная фильтрация на основе однобарьерных кристаллоподобных структур

© Е.А. Нелин

Национальный технический университет Украины (Киевский политехнический институт),
03056 Киев, Украина
e-mail: ye_nelin@gmail.com

(Поступило в Редакцию 31 июля 2006 г.)

Предложен метод формирования узкополосных высокоизбирательных характеристик на основе резонансного туннелирования в однобарьерных кристаллоподобных структурах. Приведены характеристики, иллюстрирующие эффективность метода.

PACS: 81.05.-t

Кристаллоподобные структуры (КС) составляют основу новых разнообразных устройств обработки сигналов. Высокие селективные свойства КС позволяют существенно улучшить фильтрацию сигналов. В конструкциях селективных устройств на основе КС используются традиционные аналоги. В [1] был рассмотрен узкополосный фильтр электронных волн на основе полупроводниковой сверхрешетки в режиме надбарьерного прохождения электронов. Конструкция аналогична оптическому резонатору с внутренней полуволновой резонансной полостью.

В [2] был предложен фильтр, образованный тремя последовательно расположенными фотонными кристаллами (ФК). Конструкция фильтра аналогична симметричной двухбарьерной структуре для электронов в режиме туннелирования. Первый и третий ФК в рабочем диапазоне частот имеют запрещенную зону, что соответствует потенциальному барьеру, второй ФК — разрешенную, что отвечает потенциальной яме. Авторы не сравнивают полученные характеристики с характеристиками обычного резонатора Фабри–Перо с отражателями, образованными периодическими структурами — первым и третьим ФК. Такое сравнение показывает, что второй ФК практически не влияет на характеристики, так что избирательность фильтра соответствует традиционной.

В [3,4] были рассмотрены специальные методы амплитудной и фазовой аподизации для повышения избирательности КС.

В настоящей работе предложен метод формирования узкополосных высокоизбирательных характеристик на основе однобарьерных КС с резонансным туннелированием. Избирательность таких фильтров заметно выше избирательности традиционных устройств.

Резонансное туннелирование электронов — ключевой эффект барьерных электронных структур, в частности симметричной двухбарьерной. При резонансном туннелировании любых волн проявляются необычные особенности, имеющие много потенциальных применений, в том числе в спектральной селекции.

Для моделирования предлагаемых структур воспользуемся общей для любых волн концепцией импеданса. Импедансный метод решения квантово-механических задач предложен в [5,6]. Концепция импеданса лежит в основе модели неоднородной линии передачи [7], позволяющей моделировать волновые структуры, в том числе КС различной природы и размерности.

Обратим внимание, что для резонансного прохождения волн любой природы ключевое значение имеет сформированная структурой стоячая волна. Импеданс характеризует силу реакции среды на волновое возмущение. На границе областей с различающимися импедансами силы возмущения и реакции различны, что вызывает появление отраженной волны. Скачки потенциала потенциального барьера при надбарьерном прохождении электронов образуют резонатор. На собственных частотах резонатора волна, отражаемая первой границей барьера, скомпенсирована контрфазной волной, излучаемой резонатором. Отражение падающей волны второй границей барьера также противофазно скомпенсировано. Компенсация неоднородностей волновых возмущений падающей волны на границах обусловлена возмущениями сформированной резонатором стоячей волны, так что падающая волна проходит эти границы как однородную среду.

Резонансное туннелирование также обусловлено самоорганизацией полей падающей и отраженной волн в результате формирования стоячей волны. В двухбарьерной структуре резонатор, формирующий стоячую волну, помещен внутрь барьера, так что образованы два барьера с потенциальной ямой между ними. Обозначим такую структуру через ТРТ, где Т — туннельный барьер; Р — резонатор, соответствующий потенциальной яме. Другое решение — поместить барьер в поле стоячей волны резонатора. В результате получим однобарьерные РТ- и РТР-структуры.

Из выражения для коэффициента отражения РТ-структуры следует, что Р-область в виде потенциальной ямы

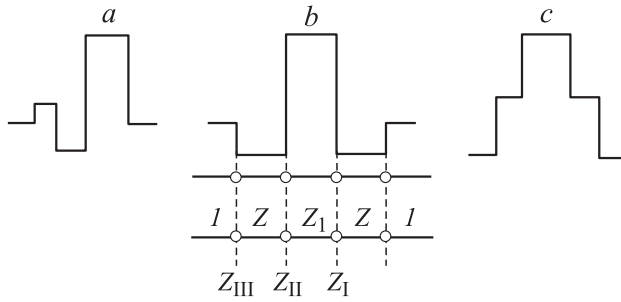


Рис. 1. РТ- (*a*) и РТР-структуры с потенциальными ямами (*b*) и ступеньками (*c*). I , Z и Z_1 — нормированные импедансы окружающей среды, Р- и Т-областей. Z_I – Z_{III} — нормированные входные импедансы на границах Р- и Т-областей.

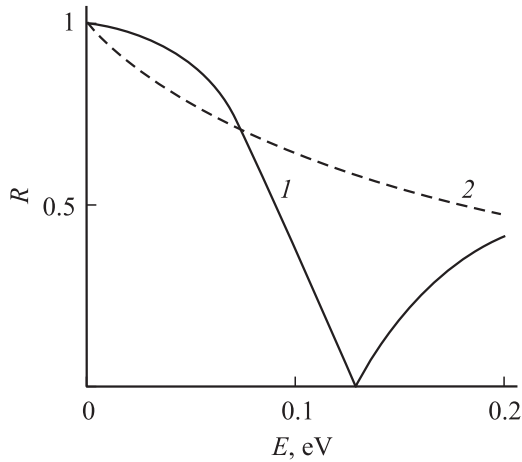


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения (по модулю) R РТ-структуры (1) и Т-барьера (2) от энергии электрона E . Высота Р-барьера равна 0.1 eV, высота Т-барьера равна глубине ямы и составляет 0.2 eV; толщина Р- и Т-барьеров и ширина ямы равны соответственно 29, 15 и 7 Å; эффективная масса электрона — $0.1m_0$, где m_0 — масса покоя электрона.

или барьера конечных размеров обеспечивает лишь близкое к резонансному квазирезонансное туннелирование. Для резонансного туннелирования Р-область должна быть более сложной, например, образованной барьером и ямой (рис. 1, *a*). На рис. 1, *b, c* представлены симметричные РТР-структуры с потенциальными ямами или со ступеньками, а также линия передачи, позволяющая моделировать как РТР-, так и ТРТ-структуры. Т-области имеют реактивный характер и соответственно мнимые импеданс и волновое число. Для упрощения выкладок импедансы Р- и Т-областей пронормированы к импедансу окружающей среды.

Рис. 2 иллюстрирует резонансное туннелирование в РТ-структуре, показанной на рис. 1, *a*. Для сравнения приведена зависимость коэффициента отражения одиночного Т-барьера. Режекция коэффициента отражения, сформированная резонансным туннелированием, соответствует узкополосной характеристике прохождения.

Последовательно найдя нормированные входные импедансы Z_I – Z_{III} на границах Р- и Т-областей (рис. 1, *b*), получим следующее выражение для коэффициента отражения симметричной РТР-структуры:

$$R = \frac{[(Z_1^2 - Z^4)A^2 + Z^2(1 - Z_1^2)]B - 2ZZ_1(Z^2 - 1)A}{[(Z^4 + Z_1^2)A^2 - 2Z(Z^2 + Z_1^2)A + Z^2(Z_1^2 + 1)]B + 2ZZ_1[(Z^2 - ZA + 1)A - Z]}, \quad (1)$$

где $A = \text{th}(ika)$; $B = \text{th}(ik_1b)$, k и a — соответственно волновое число в Р-области и ее ширина, k_1 и b — аналогично для Т-области. Выражение (1) справедливо и для ТРТ-структур. В случае симметричной ТРТ-структуры $Z_1 = 1$.

Исходя из (1) собственные значения РТР-структуры, соответствующие резонансному туннелированию, определяются выражением

$$B = \frac{2ZZ_1(Z^2 - 1)A}{(Z_1^2 - Z^4)A^2 + Z^2(1 - Z_1^2)}. \quad (2)$$

В частном случае при $Z = |Z_1|$ и $k = |k_1|$ из (2) получим

$$\text{th}(2\pi\hat{b}) = \frac{\pm(Z^2 - 1)\sin(4\pi\hat{a})}{Z^2 + 1},$$

где знак „ \wedge “ означает нормировку к длине волны; знаки „ \pm “ соответствуют знакам Z_1 .

Квантово-механический импеданс изменяется в широких пределах. В ФК достигим эффективный относительный импеданс порядка 0.01 [8]. В фоновых кристаллах отношение импедансов может составлять несколько десятков [9].

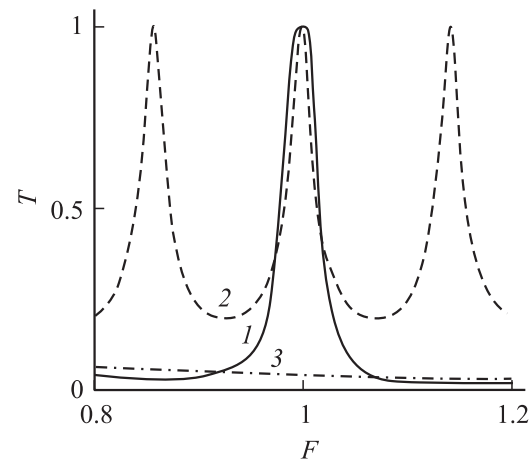


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов прохождения РТР-структуры (1), резонатора Фабри–Перо (2) и одиночного Т-барьера (3). $Z = 10$, $Z_1 = Zi$, (либо $Z = 0.1$, $Z_1 = -Zi$), $\hat{a} = 1.63$, $\hat{b} = 0.36$; $F = f/f_0$, f_0 — частота резонансного туннелирования. Импеданс резонансной полости резонатора равен Z ; импеданс одиночного Т-барьера — Z_1 , толщина — \hat{b} .

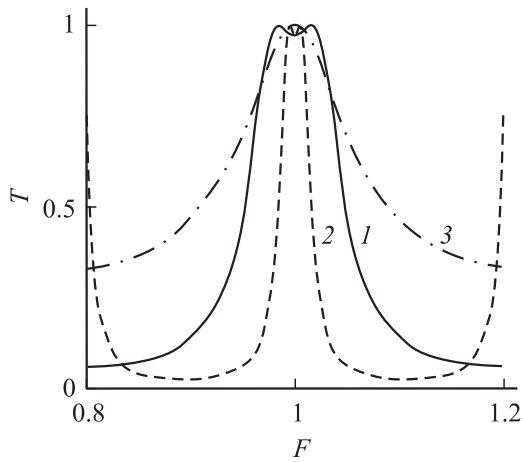


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента прохождения РТР-структуры (1, 2) и коэффициента прохождения КС с внутренней полуволновой резонансной полостью (3). Число четвертьволновых слоев КС — 5, $\hat{a} = 0.5$ (1) и 4 (2).

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента прохождения $T = \sqrt{1 - R^2}$, иллюстрирующие резонансное туннелирование в такой РТР-структуре и ее избирательность в сравнении с резонатором Фабри–Перо. Размер резонансной полости резонатора принят равным $2\hat{a} + 0.25$. Вне пределов влияния Р-областей избирательность РТР-структуры определяется коэффициентом прохождения барьера. Избирательность РТР-структуры на порядок выше избирательности резонатора Фабри–Перо: минимум коэффициента прохождения равен 0.2 для резонатора и 0.03/0.015 в области нижних/верхних частот для РТР-структуры.

На рис. 4 приведены характеристики, иллюстрирующие избирательность РТР-структуры на основе КС. Р-область образована слоем с относительным импедансом $Z = 10$, КС — чередующимися слоями с относительными импедансами $Z_1 = 5$ и $Z = 10$. Избирательность РТР-структуры существенно превышает избирательность Т-области — КС при выполнении ее с внутренней резонансной полостью и импедансом окружающей среды, равным Z : минимум коэффициента прохождения равен 0.33 для КС и 0.06/0.03 для РТР-структур 1/2. Зависимость 2 иллюстрирует возможность формирования характеристики с заданной полосой пропускания выбором размеров Р-областей.

Для повышения избирательности необходимо использовать более сложные Р-области, например двуслойные, соответствующие рис. 1, а, а также импедансные зависимости с большим числом уровней. При этом уменьшается максимальное значение импеданса и перепад импедансов.

Резонансное туннелирование в однобарьерных КС обеспечивает высокоизбирательную узкополосную фильтрацию сигналов. Рассмотренные решения применимы для более сложных структур различной природы и размерности.

Список литературы

- [1] Gaylord T.K., Glytsis E.N., Brennan K.F. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 6. P. 2535–2540.
- [2] Qiao F., Zhang C., Wan J., Zi J. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77. N 23. P. 3698–3700.
- [3] Нелин Е.А. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 120–121.
- [4] Нелин Е.А. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 8. С. 140–142.
- [5] Khondker A.N., Khan M.R., Anwar A.F.M. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63. N 10. P. 5191–5193.
- [6] Anwar A.F.M., Khondker A.N., Khan M.R. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 7. P. 2761–2765.
- [7] Cristopoulos C. The Transmission-Line Modeling Method: TLM. New York: IEEE Press/Oxford University Press, 1995. 232 p.
- [8] www.brl.ntt.co.jp/group/shitsubi-g/project2-e.htm
- [9] Kee C.-S., Kim J.-E., Park H.Y., Chang K.J. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 87. N 4. P. 1593–1596.