

05;06

Резонансно-туннельные односторонние несимметричные кристаллоподобные структуры

© Е.А. Нелин

Национальный технический университет Украины
„Киевский политехнический институт“,
03056 Киев, Украина
e-mail: ye.nelin@gmail.com

(Поступило в Редакцию 6 июля 2007 г.)

Предложены резонансно-туннельные односторонние несимметричные кристаллоподобные структуры с широкополосным подавлением внеполосных сигналов. Приведены характеристики, иллюстрирующие эффективность структур.

PACS: 81.05-t

Кристаллоподобные структуры (КС) с заданными зонными диаграммами обеспечивают достижение необходимых характеристик разнообразных новых устройств обработки сигналов. Базовый эффект нанодиапазона, лежащий в основе функционирования нанозлектронных устройств, — туннелирование электронов. Использование этого эффекта для электромагнитных и упругих волн расширяет возможности устройств на основе фотонных и фононных кристаллов.

Резонансно-туннельные односторонние КС представляют интерес как возможные базовые структуры для устройств обработки сигналов на различных волнах [1]. Идея селективных устройств на этой основе заключается в следующем. Полоса пропускания соответствует резонансному туннелированию. Коэффициент прохождения на резонансной частоте равен единице. Вне полосы пропускания туннельный барьер обладает чрезвычайно низкой прозрачностью, что обеспечивает значительное затухание сигнала.

Симметричные односторонние КС позволяют сформировать узкие разрешенные зоны, соответствующие высокоизбирательным характеристикам пропускания [2]. Вследствие симметрии таких КС, как и традиционных структур с внутренней резонансной полостью, формируется спектр резонансных частот. Во многих случаях необходимо широкополосное подавление сигналов. Введение асимметрии позволяет разрядить спектр. Например, резонансное прохождение несимметричного потенциального барьера имеет односторонний (с одним значением энергии) характер в отличие от многорезонансного характера такого прохождения для симметричного барьера [1].

В настоящей работе предложены резонансно-туннельные односторонние несимметричные КС для формирования высокоизбирательных характеристик с широкополосным подавлением внеполосных сигналов. Избирательность таких структур заметно выше избирательности традиционных устройств.

Формирование разрешенных зон обусловлено противоположной интерференцией волн, отраженных элементами КС. Введение асимметрии в КС, при которой

эти условия выполняются в основной зоне и нарушаются в дополнительных, позволит сформировать лишь основную разрешенную зону, подавив паразитные отклики. Несимметричные односторонние КС расширяют применимость таких структур в устройствах обработки сигналов.

Для резонансного прохождения волн, в том числе и туннелирования, необходим собственный по отношению к структуре резонансный источник волн [1]. Наиболее простая несимметричная односторонняя структура с резонансным туннелированием — РТ-структура, где Р и Т — соответственно резонансная и туннельная области.

Для моделирования предлагаемых КС воспользуемся общей для любых волн импедансной моделью [1,3]. Принципиальные особенности КС проявляются в одномерных структурах. В режиме резонанса Р-область формирует собственный источник волнового поля, согласующего граничные неоднородности для падающей волны. В соответствии с импедансной моделью Р-область трансформирует импеданс Т-области, согласуя его с импедансом внешней среды. Для удобства будем использовать импедансы, пронормированные к импедансу внешней среды.

На рис. 1 приведены различные варианты РТ-структур. Обозначим их соответственно РТ_a–РТ_e. РТ_a — потенциальная структура для электронов. РТ_b–РТ_e — структуры фотонных и фононных кристаллов, а также сверхрешеток в режиме надбарьерного прохождения. Варианты Р-областей: *a* — потенциальная яма или барьер (обозначен штриховой линией) в режиме надбарьерного прохождения; *b* и *e* — четвертьволновой слой; *c* — два четвертьволновых слоя; *d* — четвертьволновой слой и слой толщиной *l*. Варианты Т-областей: *a* — туннельный барьер; *b*–*d* — симметричная и *e* — асимметричная КС в режиме запрещенной зоны.

Рассмотрим РТ_a-структуру (рис. 1, *a*). С учетом формулы для квантово-механического импеданса [4,5] нормированный импеданс определяется выражением $Z = \sqrt{m'(E - V)/mE}$, где m' и m — эффективная масса электрона соответственно во внешней среде и в Р-об-

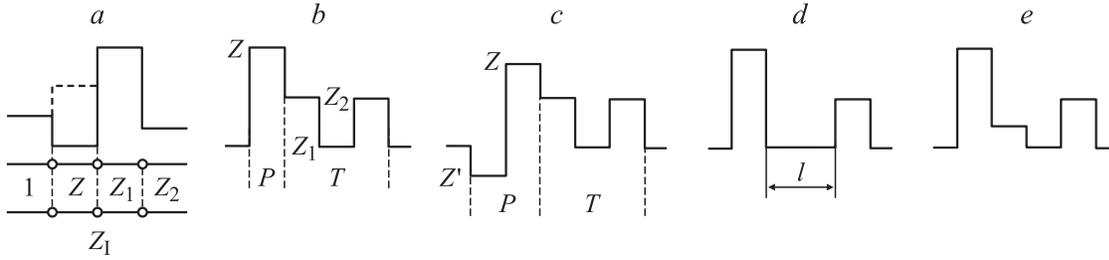


Рис. 1. Потенциальная (а) и импедансные (b–e) зависимости РТ-структур. а: 1 и Z_2 — импедансы внешней среды слева и справа от структуры; Z и Z_1 — импедансы Р- и Т-областей; Z_1 — входной импеданс Т-области; b: Z — импеданс Р-слоя, $Z_{1,2}$ — импедансы слоев Т-области; c: Z и $Z' = Z^{-1}$ — импедансы слоев Р-области.

ласти; E — энергия электрона; V — потенциал в Р-области. Для потенциальной ямы $V < 0$. Соответственно $Z_{1,2} = \sqrt{m'(E - V_{1,2})/m_{1,2}E}$, где $V_{1,2}$ — высота Т-барьера и потенциал справа от КС; $m_{1,2}$ — эффективная масса электрона в области Т-барьера и справа от КС. Поскольку при туннелировании $E < V_1$, то импеданс Т-барьера мнимый.

Для резонансного туннелирования сквозь РТ-структуру в Р-области должны выполняться условия баланса амплитуд и фаз. По условию баланса амплитуд $|r| = |r_1|$, где r и r_1 — коэффициенты отражения соответственно от левой и правой отражающих плоскостей резонатора. Согласно условию баланса фаз $2ka + \varphi + \varphi_1 = 2\pi n$, где $k = \sqrt{2m(E - V)}/\hbar$; a — ширина ямы или толщина Р-барьера; φ и φ_1 — фазы коэффициентов отражения r и r_1 соответственно; $n = 1, 2, \dots$

Исходя из эквивалентной схемы, приведенной на рис. 1, а, имеем $r = (Z - 1)/(Z + 1)$ и $r_1 = (Z - Z_1)/(Z + Z_1)$. Подставив $Z_1 = (Z_2 + Z_1H)/(1 + Z_1^{-1}Z_2H)$, где $H = \text{th } \chi b$, $\chi = \sqrt{2m_1(V_1 - E)}/\hbar$, b — толщина Т-барьера, получим

$$r_1 = \frac{Z - Z_2 + (ZZ_1^{-1}Z_2 - Z_1)H}{Z + Z_2 + (ZZ_1^{-1}Z_2 + Z_1)H}.$$

Отсюда

$$|r_1|^2 = \frac{(Z - Z_2)^2 + Z'_+}{(Z + Z_2)^2 + Z'_-}, \quad (1)$$

где $Z'_\pm = (Z|Z_1^{-1}|Z_2 \pm |Z_1|)^2 H^2$.

В случае $Z_2 = Z$, что при $m_2 = m$ отвечает симметричному Т-барьеру, из условий баланса амплитуд и фаз имеем соответственно

$$H = \frac{|(Z - 1)Z_1|\sqrt{Z}}{\sqrt{(Z + |Z_1|^2)(Z^3 + |Z_1|^2)}},$$

$$\text{tg}(2ka) = \frac{2Z|Z_1|}{(Z^2 - |Z_1|^2)H}. \quad (2)$$

При $(Z - 1)(Z - |Z_1|) < 0$ значения $2ka$ смещены на π радиан.

Рис. 2 иллюстрирует резонансное туннелирование в РТa-структуре с Р-ямой и симметричным Т-барьером. Структура синтезирована исходя из (2). Для сравнения

приведена зависимость коэффициента отражения одиночного Т-барьера. Режекции коэффициента отражения, сформированной резонансным туннелированием, соответствует узкая полоса резонансного прохождения.

Обычно свойства внешней среды слева и справа от КС одинаковы, так что $Z_2 = 1$. В этом случае потенциал РТa-структуры наиболее простой — двухуровневый — и (1) примет вид

$$|r_1|^2 = \frac{Z_-(1 + Z'_+/Z_-)}{Z_+(1 + Z'_-/Z_+)},$$

где $Z_\pm = (Z \pm 1)^2$, причем $r^2 = Z_-/Z_+$. Поскольку $Z'_+/Z_- > Z'_-/Z_+$, то $|r_1| > |r|$. Вследствие нарушения условия баланса амплитуд резонансное туннелирование в такой РТa-структуре невозможно. Это обусловлено мнимым по характеру импедансом Т-барьера. Для Т-области в виде КС в режиме запрещенной зоны импеданс не имеет такого ограничения, и Р-область может быть наиболее простой — одиночным резонатором (рис. 1, b).

Рис. 3 иллюстрирует зонные характеристики РТ-структур вариантов b–d (соответственно кривые 1–3) в

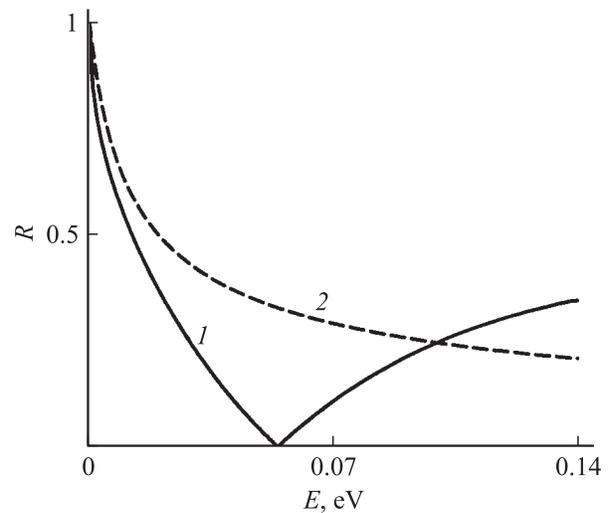


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения R (по модулю) РТ-структуры (кривая 1) и Т-барьера (2) от энергии электрона: $V = -0.19$, $V_1 = 0.14$ eV, $a = 48$ Å, $b = 7$ Å, $m = m' = m_1 = 0.1m_0$, где m_0 — масса покоя электрона.

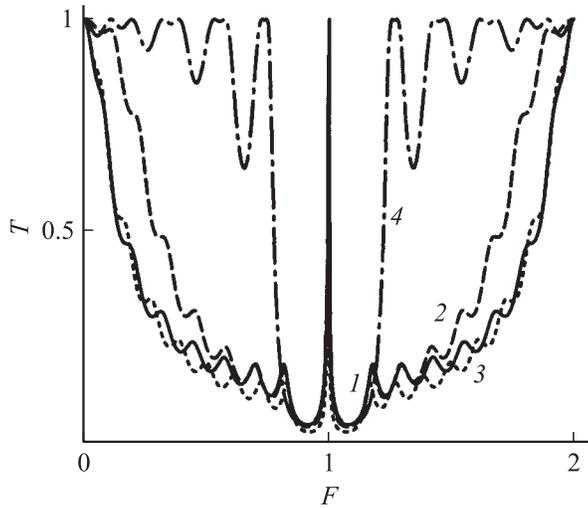


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента прохождения T (по модулю) РТ-структур вариантов $b-d$ (1–3) и резонатора Фабри–Перо (4). $F = f/f_0$, f_0 — частота резонансного тунnelирования. Параметры Р-области: b — $Z = 15$; c — $Z = 4$; d — $Z = 15$, $l = \lambda_0/2$, где λ_0 — длина волны в слое на частоте f_0 .

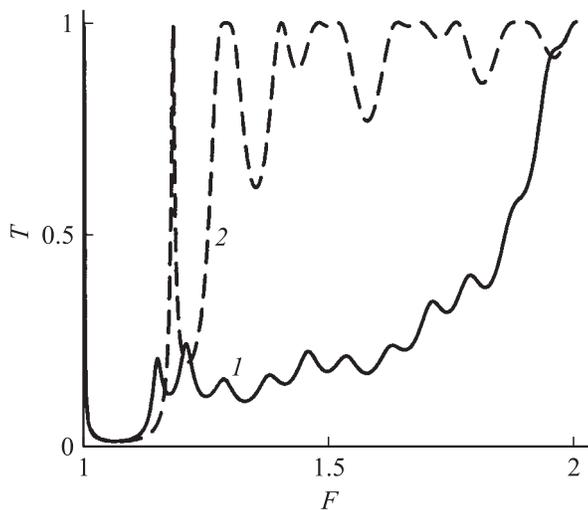


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента прохождения РТd-структуры (1) и резонатора Фабри–Перо (2).

сравнении с традиционной структурой — резонатором Фабри–Перо в виде КС с внутренней полуволновой резонансной полостью. Т-область образована КС с чередующимися четвертьволновыми слоями с импедансами $Z_1 = 1$ и $Z_2 = 1.4$; число слоев $N = 15$. Число слоев резонатора Фабри–Перо $N = 17$, импедансы слоев $Z_1 = 1$ и $Z_2 = 1.68$. Значение импеданса Z_2 для резонатора Фабри–Перо соответствует совпадению минимумов зависимостей коэффициентов прохождения РТb-структуры и резонатора Фабри–Перо. Ширина характеристик по уровню 0.5 для этих структур приблизительно одинакова. В отличие от резонатора Фабри–Перо характеристики РТ-структур в диапазоне частот от 0 до $2f_0$ имеют

однорезонансный характер, что существенно расширяет полосы подавления.

Введение дополнительного полуволнового слоя в РТd-структуре позволило сузить характеристику соответственно в 1.8 раза и в 1.6 раза по сравнению с РТb- и РТc-структурами. При расширении этого резонансного слоя происходит дальнейшее сужение характеристики. Возможность синтеза узкополосных характеристик представляет значительный интерес, поскольку такие характеристики обеспечивают высокую степень локализации частиц-волн.

На рис. 4 приведены зависимости, иллюстрирующие особенности формирования однорезонансной характеристики РТd-структуры. С учетом симметрии характеристик показана лишь их верхнечастотная половина. Параметры соответствуют рис. 3, за исключением значений $l = 2\lambda_0$ и $Z_2 = 1.8$ для резонатора Фабри–Перо. Как видно, за счет асимметрии РТ-структуры подавлены дополнительные отклики симметричной структуры, обусловленные расширенным резонансным слоем. При $l = \lambda_0$ характеристика РТd-структуры сужается в 2.6 раза, а при $l = 2\lambda_0$ — в 4.1 раза по сравнению с РТb-структурой.

Ассиметрия Т-области в РТе-структуре (рис. 1, e) повышает степень частотной зависимости фазовых условий при интерференции парциальных отраженных волн, что приводит к дальнейшему сужению разрешенной зоны.

Рис. 5 иллюстрирует сужение характеристики за счет асимметрии Т-области. РТb-структура с симметричной Т-областью соответствует рис. 3. Асимметрия выполнена вариацией импедансов нечетных слоев Т-области, согласно закону $Z_{2n} = 1 + \Delta Z_2(n-1)/2$, $n = 1, 3, \dots$ — номера нечетных слоев Т-области, начиная от Р-слоя, $\Delta Z_2 = 0.123$. За счет асимметрии Т-области характеристика сужается в 2.4 раза.

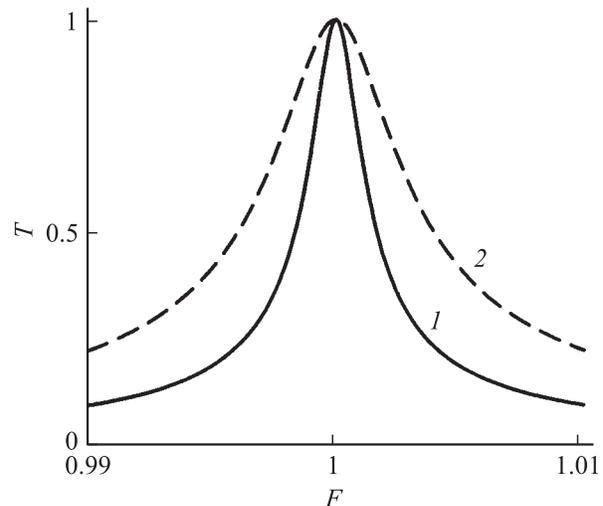


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента прохождения РТ-структуры с асимметричной (1) и симметричной (2) Т-областями.

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

Список литературы

- [1] *Нелин Е.А.* // УФН. 2007. Т. 177. № 3. С. 307–313.
- [2] *Нелин Е.А.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 9. С. 120–122.
- [3] *Нелин Е.А.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 11. С. 70–74.
- [4] *Khondker A.N., Khan M.R., Anwar A.F.M.* // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63. N 10. P. 5191–5193.
- [5] *Anwar A.F.M., Khondker A.N., Khan M.R.* // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 7. P. 2761–2765.