

ОСОБЕННОСТИ ДВУХФОТОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТРЕХБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ С КОГЕРЕНТНЫМ ТРАНСПОРТОМ ЭЛЕКТРОНОВ

Пашковский А. Б.

ФГУП НПП «Исток» Вокзальная 2а, Московская обл. г. Фрязино, 141190, Россия
Тел.: (495) 4658620, e-mail: solidstate10@mail.ru

Аннотация – Для несимметричных трехбарьерных резонансно-туннельных структур с тонкими высокими барьерами найдено аналитическое решение уравнения Шредингера с открытыми граничными условиями по всем каналам рассеяния, описывающее резонансные переходы между тремя квантовыми уровнями в сильном высокочастотном электрическом поле. Обнаружено, что большая часть электронов, падающих на верхний резонансный уровень может отдавать два фотона и уходить из структуры по нижнему уровню без промежуточного взаимодействия с фононами с квантовой эффективностью достигающей в пределе 160%.

I. Введение

Интенсивно развиваемые в последние годы квантовые каскадные лазеры работают в режиме некогерентного транспорта электронов. Из-за столкновений с фононами их квантовая эффективность обычно не превосходит 10%. В то же время в [1] в лазере на межподзонных переходах было предложено использовать режим когерентного транспорта электронов, при котором подавляющее число электронов успевает протуннелировать сквозь выходной барьер активного участка без столкновений с фононами. Квантовая эффективность одной рабочей ячейки такого лазера может быть намного выше, чем ячейки лазера с некогерентным транспортом и, при определенных условиях, достигать 80% [2]. Представляет несомненный интерес рассмотреть возможность прямого каскадирования активных лазерных ячеек с когерентным транспортом электронов с целью получения квантовой эффективности 160% всего на двух ячейках.

II. Основная часть

Рассмотрим несимметричную трехбарьерную структуру рис.1 с тонкими (δ -образными) барьерами, к которой приложено однородное высокочастотное электрическое поле $E(t) = E(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})$. Моноэнергетический поток электронов с энергией ε падает слева на резонансный уровень с номером K первой двухбарьерной структуры, частота высокочастотного поля соответствует переходам на L уровень этой же структуры (см. рис.1), один из резонансных уровней второй двухбарьерной структуры с номером N находится вблизи уровня L первой, образуя общий резонансный уровень, а во второй яме находится уровень с номером I находящийся на том же расстоянии от общего уровня, что и верхний уровень в первой яме. Нестационарное уравнение Шредингера для такой системы имеет вид:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + H(x)\psi + H(x,t)\psi$$

$$H(x) = U(\theta(x) - \theta(x-a)) + U_1(\theta(x-a) - \theta(x-a-l)) +$$

$$U_2\theta(x-a-l) + a\delta(x) + \alpha\rho\delta(x-a) + \alpha\gamma\delta(x-a-l)$$

$$H(x,t) = -qE[x(\theta(x) - \theta(x-a-l)) + (a+l)\theta(x-a-l)](e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})$$

Здесь q , m^* - заряд и масса электрона, $\alpha = \phi_b b$ - мощность первого барьера, ϕ_b , b - его высота и ширина, $\theta(x)$ - единичная функция, γ , ρ - численные

коэффициенты, a , l - расстояния между барьерами, U , U_1 и U_2 - величина скачка дна зоны проводимости на барьерах.

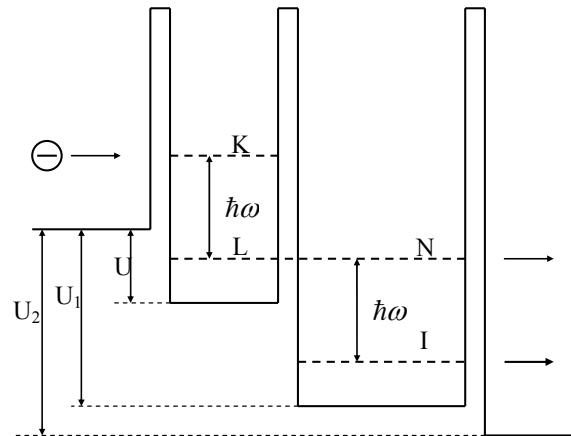


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма рассматриваемой трехбарьерной структуры.

Fig. 1. Schematic representation for a triple-barrier structure

Решение задачи будем искать по теории возмущений с открытыми граничными условиями по всем каналам рассеяния [2,3,]. Рассчитав и просуммировав соответствующие поправки можно показать, что волновая функция электронов внутри структуры и за ней имеет вид:

$$\psi(x,t) = \frac{1+w}{1+w+z} \psi_K(x) e^{-i\omega_0 t} + \frac{1}{1+w+z} \psi_{LN}(x) e^{-i(\omega_0-\omega)t} + \frac{1}{1+w+z} \psi_I(x) e^{-i(\omega_0-2\omega)t}$$

$$z = \left(\frac{2qE}{m^* \omega^2}\right)^2 \frac{(\gamma + \rho - \gamma\xi\rho)^2 y^4}{k_0 k_{2-}}, \quad w = \left(\frac{2qE}{m^* \omega^2}\right)^2 \frac{y^4 \gamma^4}{k_{2-} k_{2-}}$$

а коэффициент отражения от структуры равен

$$R = \left| \frac{1+w-z}{1+w+z} \right|^2$$

Здесь ψ_K - волновая функция электронов основного состояния, ψ_{LN} , ψ_I - волновые функции, рассчитанная в первом и втором порядке теории возмущений соответственно, $y = 2m^* \alpha / \hbar^2$ - величина, которая в структурах с δ -образными барьерами выступает в роли резонансного параметра, k_i , k_{i-} , k_{i+} - соответствующие волновые векторы. При достаточно мощных барьерах $y \gg k$. Коэффициент ξ определяется параметрами структуры и задается условием $\text{sink}l \approx -\xi k_{1-}/y$.

Ранее было показано, что однофотонный канал рассеяния при диагональных переходах в трехбарьерных структурах [4] и прямых переходах в двух-

барьерных структурах [3] может быть абсолютно прозрачен. Абсолютно прозрачной может быть и трехбарьерная структура с прямыми переходами и одним каналом рассеяния (в данном случае $\psi_1 = 0$, $w=0$) при $z=1$ см. рис. 2.

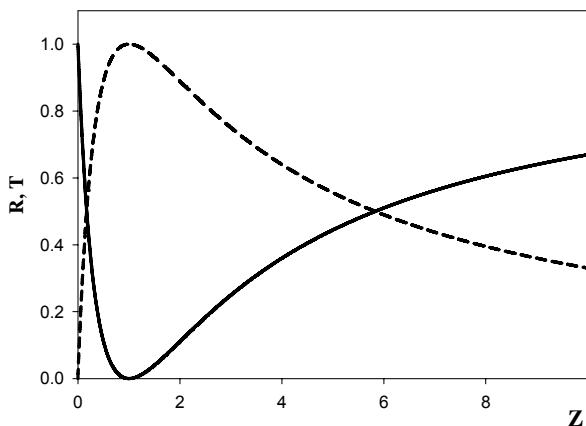


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения (—) и прохождения (---) электронов от параметра z для трехбарьерной структуры.

Fig. 2. Reflection (—) and transmission coefficients (---) dependence of parameter z for triple barrier structure

Видно, что и в случае трех резонансных уровней структура в сильном поле может стать абсолютно прозрачной, то есть коэффициент отражения от центра верхнего резонансного уровня может быть равным нулю при $z=1+w$.

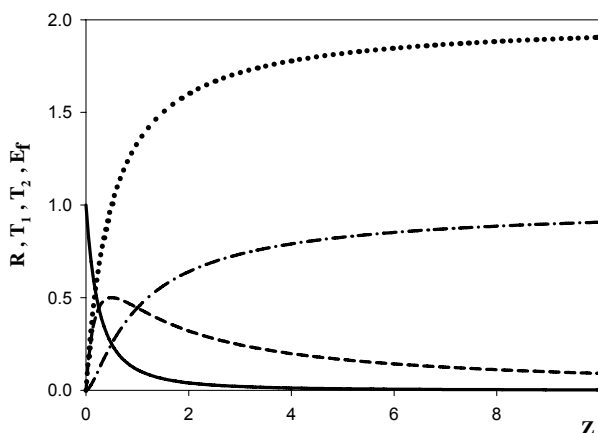


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения (—) и прохождения по среднему (---) и нижнему (— · —) резонансным уровням и суммарной квантовой эффективности (••••) для трехбарьерной структуры от параметра z .

Fig. 3. Reflection (—) and transmission coefficients on middle (---) and low (— · —) quantum levels and quantum efficiency (••••) dependence of parameter z for triple barrier structure

Однако для приборного применения абсолютная прозрачность структуры совсем не обязательна, см. рис.3 где приведены графики зависимости коэффициентов отражения, прохождения по среднему T_1 и нижнему T_2 резонансным уровням и суммарной квантовой эффективности $E_f = T_1 + 2T_2$ от параметра

z (квадрата амплитуды СВЧ поля) при $z = w$ (надо отметить, что при $0,5z < w < 2z$ характер зависимостей существенно не меняется).

III. Заключение

Таким образом, появляется довольно заманчивая перспектива создания структуры с баллистическим транспортом электронов и весьма большой квантовой эффективностью. Известно, что в случае переходов электронов, испускающих один фотон, с узкого на широкий резонансный уровень [3] квантовая эффективность может достигать 80 %. Поэтому если подобрать параметры рассматриваемой структуры так, чтобы средний и нижний резонансный уровни был заметно шире верхнего, то около 80 % электронов попавших на верхний уровень перейдет на средний, а затем большая часть электронов отдав еще один фотон перейдет на нижний уровень и покинет структуру. Таким образом в пределе квантовая эффективность такого процесса может достигать 160%, а в полях по напряженности всего в три раза превосходящих напряженность поля обеспечивающую абсолютную прозрачность однофотонного канала рассеяния приближаться к весьма заманчивой цифре в 150%.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07 – 02 – 01121).

IV.Список литературы

- [1] Голант Е. И., Пашковский А. Б., Тагер А. С. "ИК лазер на эффекте стимулированного резонансного туннелирования электронов", Письма в ЖТФ, 20(21), 74(1994).
- [2] Голант Е. И., Пашковский А. Б. "Высокая интенсивность межзонных электронных переходов в двухбарьерных структурах с высокочастотным электрическим полем". Письма в ЖЭТФ, 2002, Т.75. В.2, с.88-91
- [3] Голант Е. И., Пашковский А. Б. "Необычное поведение коэффициента отражения электронов от несимметричных двухбарьерных квантовых структур в высокочастотном поле конечной амплитуды". Письма в ЖЭТФ, 1996, том 63, вып.7, с. 559-564.
- [4] Сумецкий М. Ю., Фельштын М. Л. "Абсолютная прозрачность неупругого канала и фотовольтаический эффект при резонансном туннелировании через двухъямную гетероструктуру" Письма в ЖЭТФ, 53(1), 24-27(1991).

PECULIARITIES OF DOUBLE PHOTON INTERSUBBAND TRANSITION IN COHERENT TRANSPORT TRIPLE-BARRIER STRUCTURES

Pashkovskii A. B.

Federal State Unitary Corporation R&PC «Istok»
2a, Vokzalnaya Str., Fryazino, Moscow reg.
141190, Russia

Ph.: (095) 4658620, e-mail: solidstate10@mail.ru

Abstract – The closed form solution of Schrödinger equation is found, it describes resonant transitions which happen in the large-signal high-frequency electric fields for asymmetric triple-barrier resonant-tunneling structures with thin and high (delta) barriers. It is also shown that the most of electrons falling on the upper energy level can emit two photons and then leave the structure without intermediate electron-phonon interaction with 160% quantum efficiency limit.