

Г.С. НИКОГОСЯН, О.Г. ДЕМИРЧЯН, Г.Г. НИКОГОСЯН
ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ДВУХЪЯМНОЙ КВАНТОВОЙ
СТРУКТУРЕ В ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ
(Гюмри)

Предлагается модель резонанса Фано для фотоионизации многослойной гетероструктуры с двухъямным потенциальным профилем в электрическом поле, направленном вдоль оси роста структуры. Приводится теоретическое описание интерференции двух каналов фотоионизации в зависимости от структурных параметров, приводящей к реализации резонанса Фано. Анализируются информативные возможности использования профиля резонанса Фано для двухъямной структуры.

Ключевые слова: уровень, когерентность, взаимодействие, переход, ионизация.

Введение. Приложение постоянного электрического поля к MQW – структуре приводит к трансформации спектра поглощения, основным отличием которого от спектра без поля является отсутствие чисто дискретных уровней поперечных движений за счет конечной вероятности резонансного туннелирования через разделяющие ямы потенциальные барьеры [1-4]. Характерные особенности таких MQW – структур в поперечном поле проявляются уже у двухъямных образований. Реализация когерентного режима резонансного туннелирования в этих структурах делает возможным наблюдение резонансов Фано, которые можно использовать с целью исследования метрики двух туннельно связанных квантовых ям (КЯ), путем варьирования подгоночных параметров КЯ (ширины и глубины) и сопоставления с экспериментальными данными электропоглощения в поперечном поле.

В настоящей работе предложена теоретическая модель для наблюдения резонансов Фано в двухъямной структуре с когерентной электронной подсистемой. Резонансы Фано несут важную информацию о геометрическом рельефе и внутренних потенциальных полях гетероструктур, что имеет большое значение для создания резонансных наноэлектронных приборов. Форма резонансов Фано существенно меняется в электрическом поле, так что представляется актуальным также выяснение вклада резонансов в вольт-амперную характеристику низкоразмерных структур, где квантовые корреляции особенно ярко выражены [5]. Для реализации резонансов Фано, проявляющихся в асимметрии форм наблюдаемых спектров, важно наличие двух каналов эволюции квантовой системы, один из которых резонансный (через промежуточное квазистационарное возбужденное состояние, характеризующееся возможностью безызлуча-

чательных переходов), второй - нерезонансный, прямой процесс, связанный с непосредственным переходом из состояния дискретного спектра в континуум. Интерференция между различными путями при многоканальном распространении фотонов в структурах с редуцированной размерностью приводит в общем случае к нелоренцевой форме линии коэффициентов прохождения, отражения или поглощения как функции частоты фотона. Асимметричная форма линии поглощения впервые была описана Фано в 1961г. при исследовании неупругих автоионизационных резонансов в атомах. Подобные асимметричные профили линии поглощения наблюдаются не только в чисто атомных системах, но и в объемных полупроводниковых материалах, спектрах поглощения и рамановского рассеяния на примесях, полупроводниковых сверхрешетках (СР), КЯ, квантовых точках (КТ) с несколькими электронными уровнями, углеродных нанотрубках и т.д. [6-13]. В предлагаемой работе проводится анализ возможных особенностей в спектрах оптического поглощения двухъямной гетероструктуры на основе $n-GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ в поперечном электрическом поле. Гетероструктура окружена двумя спейсерными слоями $AlGaAs$, примыкающими к контактам с обеих сторон. Согласно модели рассмотрения, структура помещена в поперечном электрическом поле, направленном вдоль оси роста структуры, обеспечивающей совпадение основного уровня одной ямы с энергией возбужденного уровня соседней ямы, расположенной ниже по энергии. Если в первом приближении пренебречь штарковским сдвигом основного уровня и изменением энергетического расстояния между квазидискретным и основным уровнями симметричных КЯ структуры, то указанное расположение уровней осуществимо при условии $E_{12} - E_{11} = e(V_1 + V_2)$, где V_1, V_2 – падения напряжений соответственно на слое материала первой КЯ и на барьере между ямами. При этом предполагается, что проницаемость барьеров невелика, и поэтому ширины рабочих уровней малы по сравнению со значениями энергий этих уровней [10]. Формировавшаяся физическая ситуация допускает возможность туннелирования из верхнего уровня правой КЯ, через ограничивающий треугольный потенциальный барьер, в область надбарьерного континуума. Возможность туннелирования проявляется в уширении верхнего уровня в яме [14].

Резонанс Фано в двухъямной структуре. В процессе фотоионизации рассматриваемых двухъямных гетероструктур должны проявляться механизмы формирования резонансов Фано [15]. Электропоглощение указанных структур из двух тождественных одномерных КЯ, разделенных барьерной областью, в случае световой волны с вектором поляризации, имеющей составляющую

вдоль оси роста структуры, в поперечном электрическом поле, может формироваться по следующим схемам приема излучения (рис.1):

1- нерезонансный $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ канал оптического перехода из основной подзоны E_{11} первой КЯ путем резонансного туннелирования в подзону E_{22} второй ямы и переход в континуум непрерывного спектра, если энергия фотона превосходит потенциал ионизации подзоны E_{22} второй ямы (прямая фотоионизация структуры и широкая полоса поглощения):

$$\hbar\omega \geq I_2;$$

2- резонансный $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ канал оптического перехода из нижней подзоны E_{11} первой КЯ в континуум непрерывного спектра через возбужденное состояние подзоны E_{12} первой ямы с конечным временем жизни посредством туннелирования электронов сквозь ограничивающий треугольный потенциальный барьер (селективный спектр инфракрасного поглощения) [16].

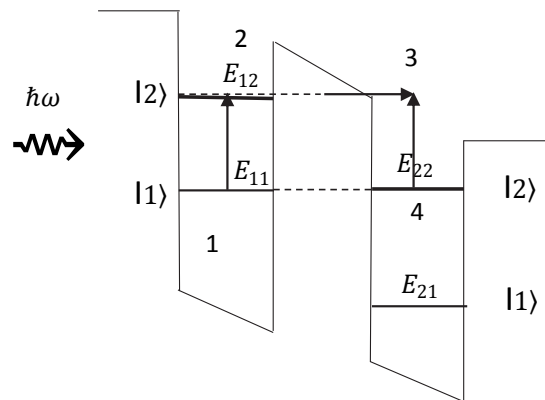


Рис.1. Возможные схемы фотоионизации двухъямной структуры в поперечном электрическом поле

- $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ – прямая фотоионизация путем резонансного туннелирования,
- $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ – межподзонный переход в комбинации с туннелированием в надбарьерный континуум

Рассмотрение проводится по фундаментальной схеме Фано [15]. В поперечном поле из-за туннелирования через треугольный потенциальный барьер образуется автоионизационное состояние с конечной шириной (квазистационарное резонансное состояние). То есть, дискретное состояние расплывается вследствие взаимодействия с состояниями непрерывного континуума, обуславливающего безызлучательный распад автоионизационного состояния. Ниже

рассматривается простейший случай наличия одного автоионизационного состояния и одного канала рассеяния, т.е. случай взаимодействия одного дискретного состояния с одним континуумом.

Как известно, в КЯ с двумя подзонами размерного квантования электрическое поле приводит к уширению пика межподзонного поглощения, понижению высоты пика и его сдвигу в коротковолновую область, что объясняется уширением возбужденного квазидискретного уровня и смещением относительно основного уровня за счет возрастания прозрачности ограничивающего барьера и увеличения наклона дна КЯ в сильном электрическом поле (проявления эффекта Штарка) [17]. Процесс резонансной фотоионизации описывается как переход из основного дискретного состояния $|1\rangle = \Psi_1$ в автоионизационное состояние Ψ_E . Сечение резонансной фотоионизации: $\sigma_P \sim |\langle \Psi_E | \hat{U} | \Psi_1 \rangle|^2$, где \hat{U} – оператор электрического дипольного момента. Два пути перевода системы из начального состояния в конечное свидетельствуют об интерференции волновых функций обоих каналов преобразования и возможной реализации резонансов Фано. Так что полное сечение перевода электронов из дискретных уровней в континуум имеет вид

$$\sigma_O = \sigma_P + \sigma_{\Pi} = \sigma_{\Pi} \left(1 + \frac{\sigma_P}{\sigma_{\Pi}} \right),$$

где

$$\frac{\sigma_P}{\sigma_{\Pi}} = \frac{|\langle \Psi_E | \hat{U} | \Psi_1 \rangle|^2}{|\langle \varphi_E | \hat{U} | \Psi_1 \rangle|^2} = \frac{(z(E) + q(E))^2}{1 + z^2(E)}, \quad (1)$$

$$q(E) = \frac{\langle \varphi | \hat{U} | \Psi_1 \rangle + \Im \int \frac{V_{E'}^* \langle \varphi_{E'} | \hat{U} | \Psi_1 \rangle}{(E - E')} dE'}{\pi V_E^* \langle \varphi_E | \hat{U} | \Psi_1 \rangle} - \text{профильный индекс Фано,}$$

характеризующий степень асимметрии линий поглощения; $\sigma_{\Pi} = |\langle \varphi_E | \hat{U} | \Psi_1 \rangle|^2$ – сечение прямой фотоионизации (с непосредственным переходом в надбарьерный континуум);

$z(E) = \frac{E - E_P}{\pi |V_E|^2}$ – безразмерная приведенная энергия;

$E_P = E_{\varphi} + F(E)$ – резонансное значение энергии возбуждения системы;

$$F(E) = \Im \int \frac{|V_{E'}|^2}{(E - E')} dE' - \text{мера сдвига уровня } \varphi \text{ из-за взаимодействия с}$$

непрерывным спектром; \Im – символ главного значения.

Формула Фано (1) в виде зависимости от значений приведенной энергии $z(E)$ при различных значениях параметра асимметрии q описывает перераспределение вероятности фотовозбуждения электрона из дискретных состояний в непрерывный континуум. В формуле (1) придерживаемся следующих обозначений: $\Psi_1 = |1\rangle, \varphi = |2\rangle$ – волновые функции, соответственно, основного дискретного состояния с энергией E_{11} и дискретной подзоны $E_{12} = E_\varphi$ первой КЯ в электрическом поле; $\varphi_E = |3\rangle$ – волновая функция непрерывного континуума над ямой, соответствующая энергии $E = E_\perp$.

Обсуждение результатов. При параметрах структуры $a = 7\text{nm}, |U_0| = 300\text{meV}, F = 30\text{kV/sm}$, где a – ширина, $|U_0|$ – глубина модельной КЯ, F – напряженность поля, поперечные уровни в яме, согласно расчетам, $E_{11} = -242\text{meV}, E_{12} = -84,4\text{meV}$, где энергия отсчитывается от потолка ямы. Функции поперечного движения внутриямных состояний даются линейными комбинациями функций Эйри первого и второго рода. О проявлении резонансов Фано должны свидетельствовать выполнения условий: деструктивной интерференции $z(E) = -q(E), (\sigma_p / \sigma_\Pi = 0)$ при $E < E_\varphi + F(E)$ и конструктивной интерференции $z(E) = 1/q(E), (\sigma_p / \sigma_\Pi = 1 + q^2)$ при $E > E_\varphi + F(E)$ в случае $0 < q(E) < \infty$. Результаты расчетов представлены в виде таблицы для значений $z(E)$ и $q(E)$.

Таблица

Расчетные значения параметров $z(E), q(E)$ при различных E

$10^{-20} \cdot E$	0.2	0.8	1.2	1.8	2.4	3	3.6	4.2	4.8
$z(E)$	-7.1877	-2.3552	-0.4095	2.5782	5.9733	9.9564	14.7029	20.4461	27.5221
$q(E)$	6.9263	5.7391	5.8944	6.3752	7.004	7.7507	8.6293	9.6773	10.954

С целью сопоставления с экспериментальными результатами формулу Фано (1) отображают в виде параметрической зависимости от $z(E)$,

формально фиксируя значение индекса $q(E)$. Графическое отображение (1) при отдельных значениях $q(E)$ имеет следующую асимметричную форму, что характерно для резонансов Фано (рис. 2).

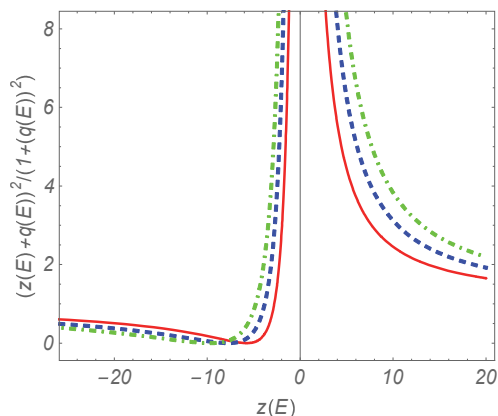


Рис. 2. Зависимость сечения от приведенной энергии при различных значениях профильного индекса. Сплошные/ пунктирные / пунктирные кривые соответствуют $q(E) = 5.74 / q(E) = 7.75 / q(E) = 9.67$.

Заключение. Проведенные теоретические исследования позволяют оценить вероятность фотоионизации изучаемой двухъямной структуры в зависимости от величин варьируемых параметров ε, a, U_0, F . Кроме того, исходя из экспериментальных значений вероятностей фотоионизации двухъямной структуры, можно решить обратную задачу: по фиксированным формам линии резонансов Фано оценить возможные структурные параметры, что немаловажно для конструирования наноструктур с подобными параметрами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта № 21Т-1С022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazarinov A. and Suris R. //Sov. Phys. Semicond. -1971.- 5.- 207.
2. Faist J., Capasso F., Sivco D. et al //Science.- 1994.- 264.- 553.
3. Елесин В.Ф., Копаев Ю.В. //УФН.- 2003.- 173.- 776.
4. Елесин В.Ф. //ЖЭТФ.- 1997.- 112.- 483.
5. Ким Ч.С., Сатанин А.М., Штенберг В.Б. //ЖЭТФ.- 2000.- 118.- 413.
6. Воронов В.К., Подоппелов А.В., Сагдеев Р.З. //Физические основы нанотехнологий.- URSS, 2016.
7. Ким Ч.С., Сатанин А.М., Штенберг В.Б. //ФТП.- 2002.- 36.- 569.

8. Лабзовский Л.Н. Квантовая электродинамика электронных оболочек и процессы излучения.- М.: Наука, Физматлит, 1996.
9. Оксенгендлер Б.Л., Марасулов М.Б., Никифоров В.Н. //Письма в ЖЭТФ.- 2016.- 42.- 60.
10. Алешкин В.Я., Антонов А.В., Гавриленко В.И., Гавриленко Л.В., Звонков Б.Н. //ЖЭТФ.- 2009.- 136.- 543.
11. Алешкин В.Я., Бурдейный Д.И., Жолудев М.С. //ФТТ.- 2011.- 53.- 1112.
12. Вейсман В.Л., Лобарев Д.С., Пучков Н.И., Романов С.Г. и др. //Вестник ПГУ. Серия “Естественные и физико-математические науки” .- 2015.- 6.- 106.
13. Лазаренкова О.Л., Пихтин А.Н. //ФТП.- 1998.- 32.- 1108.
14. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.- 332с.
15. Fano U. //Phys. Rev.- 1961.- 124.- 1866.
16. Елесин, В.Ф. //ЖЭТФ.- 2002.- 122.- 131.
17. Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Оптические свойства наноструктур.- СПб.: Наука, 2001.- 188с.

Հ.Ս. ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ, Հ.Գ. ԴԵՄԻՐՃՅԱՆ, Գ.Հ. ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ

**ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՌԵԶՈՆԱՆՍ ԵՐԿՆՈՐ ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՈՒՄ
ԼԱՅՆԱԿԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏՈՒՄ**

Առաջարկվում է կառուցվածքի առանցքի երկայնքով ուղղված էլեկտրական դաշտում երկհոր պոտենցիալային պրոֆիլով բազմաշերտ հետերոկառուցվածքի ֆոտոիոնացման համար Ֆանոյի ռեզոնանսի մոդել: Ներկայացվում է ֆոտոիոնացման երկու ուղիների ինտերֆերենցիայի տեսական նկարագրությունը՝ կախված կառուցվածքային պարամետրերից, որը հանգեցնում է Ֆանոյի ռեզոնանսի իրականացմանը: Վերլուծվում են երկհոր կառուցվածքի համար Ֆանոյի ռեզոնանսի պրոֆիլի կիրառման տեղեկատվական հնարավորությունները:

Առանցքային բառեր. մակարդակ, կոհերենտություն, փոխազդեցություն, անցում, իոնացում:

H.S. NIKOGHOSYAN, H.G. DEMIRCHIAN, G.H. NIKOGHOSYAN

**OPTICAL RESONANCE IN A TWO-HOLE QUANTUM STRUCTURE IN
A TRANSVERSE ELECTRIC FIELD**

A Fano resonance model is proposed for the photoionization of a multilayer heterostructure with a double-well potential profile in an electric field directed along the growth axis of the structure. A theoretical description of the interference of two photoionization channels is given as a function of the structural parameters, which leads to the realization of the Fano resonance. The informative possibilities of using the Fano resonance profile for a two-well structure are analyzed.

Keywords: level, coherence, interaction, transmission, ionization.