

УДК 621.315

## **ОБ УСИЛЕНИИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ**

**Г.Р. ДЖАМАЛЯН**

Арцахский государственный университет, Степанакерт, НКР

(Поступила в редакцию 25 марта 2010 г.)

Рассмотрена возможность использования структур с квантовыми точками в качестве среды для усиления слабого оптического сигнала. Показано, что в подобных структурах возможен переход от поглощения к усилению без создания в них инверсной населенности.

### **1. Введение**

Известно, что полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми точками (КТ) позволяют изучать широкий спектр квантовых эффектов без обращения к природным атомным и ионным системам [1]. Использование структур с КТ, способных интегрироваться в монолитные схемы высокоскоростной оптоэлектроники, предопределяет задачи, связанные с изучением в них различных нелинейных оптических эффектов. Особой популярности изучения нелинейных оптических эффектов в структурах с КТ способствовало то обстоятельство, что вследствие квантового ограничения многие нелинейные эффекты проявляются при сравнительно малых полях [2-4]. Такую перенормировку концепции “сильного поля” в основном связывают с  $\delta$ -образным спектром плотности состояний и гигантской силой осциллятора оптических переходов на единицу объема квантовой точки [5].

С другой стороны, в силу уникальных нелинейных свойств структур с массивом КТ, достаточно хорошо изученное явление оптической бистабильности [6] может не только наблюдаться, но и быть управляемым. В этом случае открывается возможность даже без оптического резонатора эффективно усиливать малые изменения входной интенсивности или слабого отдельного светового сигнала, когда ансамбль КТ взаимодействует с относительно интенсивным когерентным излучением.

В работах [7,8] показано, что для обращения знака коэффициента поглощения двухуровневой системы, возбуждаемой мощным монохроматическим излучением, нет необходимости в инверсии населенности. В оптической области этот эффект был продемонстрирован в экспериментах по наблюдению режима оптического транзистора, а затем прямыми измерениями

усиления в парах натрия [9] с использованием слабого пробного пучка на другой частоте.

Целью данной работы является оценка условий перехода от поглощения к усилению слабого оптического сигнала в присутствии относительно сильного электромагнитного излучения для структур с КТ.

## 2. Теория

Рассмотрим взаимодействие когерентного излучения с массивом КТ, описываемое системой связанных уравнений Максвелла–Блоха [10]. Будем полагать, что все КТ одинаковые; тогда для однородно уширенной линии имеем:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial z} = -\frac{\alpha_0}{2} \left( \frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^{1/2} v, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\left( \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right)^{1/2} F w - \frac{v}{\tau_2}, \quad (1б)$$

$$\partial u / \partial t = 0, \quad (1в)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \left( \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right)^{1/2} F v - \frac{w+1}{\tau_1}. \quad (1г)$$

Здесь  $F = 2\mu E (\tau_1 \tau_2)^{1/2} / \hbar$ , а  $\alpha_0 = 8\pi\omega N \mu^2 \tau_2 / n_0 \hbar c$  – линейный коэффициент поглощения,  $E$  – медленно изменяющаяся амплитуда поля,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – соответственно, времена релаксации и инверсии,  $w$  – поляризация с синфазной  $u$  и противофазной  $v$  компонентами,  $N$  – плотность двухуровневых КТ, имеющих переходы на частоте  $\omega$  с электрическим дипольным моментом перехода  $\mu$ ,  $n_0$  – показатель преломления.

Для определения условий усиления малой модуляции  $F$ , введем малое отклонение  $F_1$  от стационарных решений, т.е.

$$F(z, t) = F_0(z) + F_1(z, t), \quad (2в)$$

$$v(z, t) = v_0(z) + v_1(z, t), \quad (2б)$$

$$w(z, t) = w_0(z) + w_1(z, t). \quad (2в)$$

При этом стационарные решения  $F_0$ ,  $v_0$  и  $w_0$  даются выражениями

$$\partial F_0 / \partial z = -(\alpha_0 / 2) F_0 / (1 + F_0^2), \quad (3a)$$

$$v_0 = (\tau_2 / \tau_1)^{1/2} F_0 / (1 + F_0^2), \quad (3б)$$

$$w_0 = -1 / (1 + F_0^2), \quad (3в)$$

которые получаются в результате совместного решения системы уравнений (1а)–(1г) при условии  $\partial F/\partial t = \partial v/\partial t = \partial w/\partial t = 0$  [10].

Подставляя (2а)–(2в) в (1а)–(1г), с учетом (3а)–(3в) в линейном приближении, для  $F_1$ ,  $v_1$ ,  $w_1$  получаем следующую систему уравнений:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial F_1}{\partial t} + \frac{\partial F_1}{\partial z} = -\frac{\alpha_0}{2} \left( \frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^{1/2} v_1, \quad (4а)$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} = -\left( \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right)^{1/2} (F_0 w_1 + w_0 F_1) - \frac{v_1}{\tau_2}, \quad (4б)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial t} = \left( \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right)^{1/2} (F_0 v_1 + v_0 F_1) - \frac{w_1}{\tau_1}. \quad (4в)$$

В стационарном режиме ( $\partial F_1/\partial t = \partial v_1/\partial t = \partial w_1/\partial t = 0$ ), исключая из (4а)–(4в)  $v_1$  и  $w_1$ , для  $F_1$  находим

$$\frac{\partial F_1}{\partial z} = -\frac{\alpha_0 F_1}{2} \frac{1 - F_0^2}{(1 + F_0^2)^2} \quad (5)$$

или для безразмерной интенсивности  $I = F^2$

$$\partial I_1 / \partial z = -\alpha_0 I_1 (1 - I_0) / (1 + I_0)^2. \quad (5а)$$

Из (5а) видно, что при  $I_0 < 1$  имеет место поглощение, а при  $I_0 > 1$  дифференциальное усиление, равное

$$\Gamma = \frac{1}{I_1} \frac{\partial I_1}{\partial z} = \alpha_0 \frac{I_0 - 1}{(1 + I_0)^2}. \quad (6)$$

Таким образом, показано, что в структурах с КТ возможен переход от поглощения к усилению без создания инверсной населенности.

### 3. Обсуждение результатов

Из (6) очевидно следует, что с увеличением  $\alpha_0$  будет расти и дифференциальное усиление. Однако необходимо отметить, что этот рост будет просходить до тех пор, пока эффект насыщения поглощения не будет играть доминирующую роль. Действительно, этот эффект проявляется в уширении и сглаживании формы линии, так что максимальное значение коэффициента поглощения уменьшается согласно выражению [10]

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + I},$$

Однако, как показано в работах [11,12], замечательной чертой линии поглощения структур с массивом КТ является отсутствие уширения линии при

увеличении плотности оптической накачки. Этот факт указывает на то, что в этих системах насыщение поглощения, несомненно, является особенностью их спектра плотности состояний, и как следствие, может управляться, например, в зависимости от числа и размеров КТ.

Корректность предположения об одиночной однородно уширенной линии подтверждается рядом независимых экспериментов [13] и связана с высокой однородностью по размерам массива КТ.

Оценка коэффициента усиления для значений параметров  $\omega \approx 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ,  $\mu \approx 3 \times 10^{-15} \text{ ед. СГСЭ}$ ,  $N \approx 7 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\tau_2 \approx 10^{-12} \text{ с}$ ,  $n_0 \approx 4$ , входящих в  $\alpha_0$ , дает  $\Gamma \approx 100 \text{ см}^{-1}$ . Выбор таких значений параметров, на наш взгляд, адекватно отражает физические условия в структурах с КТ.

Автор выражает благодарность Ал.Г. Александяну за полезные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ж.И.Алферов. ФТП, **32**, 3 (1998).
2. А.Ж.Хачатрян и др. ФТП, **41**, 67 (2007).
3. Ал.Г.Александян. Изв. НАН Армении, Физика, **42**, 305 (2007).
4. Al.G.Alexanian, G.R.Jamalian. Proc. of the Seventh Int. Conf. "Semiconductor Micro- and Nanoelectronics", Tsakhcadzor, Armenia, 2009, p.22.
5. Н.Н.Леденцов и др. ФТП, **32**, 385, (1998).
6. P.D.Dummond. Optical Bistability, New York, Plenum Press, 1981.
7. S.Haroche, F.Hartman. Phys. Rev A, **6**, 1280 (1972).
8. S.L.McCall. Appl. Phys. Let., **32**, 284 (1978).
9. F.Y.Wu et al. Phys. Rev Let., **38**, 1077 (1977).
10. Л.Аллен, Дж.Эберли. Оптический резонанс и двухуровневые атомы, М., Мир, 1978.
11. N.N.Ledentsov et al. Sol. State Electron., **40**, 785 (1996).
12. D.Bimberg et al. Thin Solid Films, **267**, 32 (1995).
13. V.Bressler-Hill et al. Phys. Rev. B, **50**, 8479 (1994).

ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ԿԵՏԵՐՈՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾ ՔՆԵՐՈՒՄ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ  
ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՈՒԺԵՂԱՑՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Գ.Ր. ԶԱՄԱԼՅԱՆ

Առաջարկված է քվանտային կետերով կառուցվածքները օգտագործել որպես թույլ օպտիկական ազդանշանը ուժեղացնող միջավայր: Ցույց է տրված, որ նման կառուցվածքներում հնարավոր է առանց բնակեցման ինվերսիայի անցում՝ կլանումից դեպի ուժեղացում:

## ON THE AMPLIFICATION OF OPTICAL SIGNAL IN STRUCTURES WITH QUANTUM DOTS

G.R. JAMALIAN

The structures with quantum dots are considered as a medium for the amplification of a weak optical signal. It is shown that in such structures a transition from absorption to amplification is possible without creating of population inversion.