02

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АТОМНОЙ СИСТЕМЫ К ФАЗАМ ВОЗБУЖДАЮЩИХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТЕЙ

Д. В. Косачев, Б. Г. Матисов, Ю. В. Рождественский

Показана возможность как разрушения, так и последующего восстановления когерентного пленения населенностей в зависимости от значения фаз приложенных полей в Λ-системе, замкнутой РЧ полем.

Известно [1, 2], что когерентное пленение населенностей (КПН) наиболее ярко проявляется в трехуровневой Λ-системе (рис. 1) и состоит в резком опустошении верхнего уровня при условии равенства частотных расстроек Ω_m возбуждающих световых полей ω_m $(m = 1, 2)$

$$\Omega_1 - \Omega_2 = \omega_1 - \omega_2 - \omega_{21} = 0\,, \tag{1}$$

где ω_{21} — расстояние между нижними уровнями.

Такой характер заселения верхнего уровня определяется существованием в трехуровневой системе особых когерентных состояний, попадая в которые атом вообще перестает взаимодействовать с полем [3, 4]. При этом было отмечено [4], что эти особые когерентные состояния получаются как определенная линейная комбинация состояний нижних уровней, смешанных когерентным образом. В результате в системе после установления КПН всегда присутствует ненулевая когерентность между нижними уровнями.

Естественно, что разрушение этой когерентности должно приводить к исчезновению когерентных состояний и соответственно к разрушению КПН. Это можно достичь, если связать уровни $|1\rangle$ и $|2\rangle$ резонансным радиочастотным (РЧ) полем

$$\omega_r = \omega_1 - \omega_2 = \omega_{21}\,. \tag{2}$$

Действительно, РЧ поле, связывая нижние уровни, непосредственно влияет на величину низкочастотной когерентности, наведенной световыми полями. При этом в зависимости от взаимной фазы всех трех полей могут наблюдаться как разрушение когерентного пленения, так и обратное восстановление. Покажем это на примере Λ-системы (рис. 1), взаимодействующей со световыми полями с частотами ω_m $(m = 1, 2)$, замкнутой РЧ полем с частотой ω_r, приложенным между нижними уровнями.[1] Будем считать переходы $|m\rangle - |3\rangle$ $(m = 1, 2)$ электродипольными, а переход $|1\rangle - |2\rangle$ магнитодипольным. Тогда гамильтониан взаимодействия атома с полем запишется в виде

$$\hat{H} = \hat{V} + \hat{U}\,, \tag{3а}$$

$$\hat{V} = \frac{1}{\hbar} \sum_{m=1,2} \hat{\mathrm{d}}_m \mathrm{E}_0\, e^{i(\phi_m - \vartheta_m)} \exp(-i\,\omega_m t)\,, \tag{3б}$$

[1] Отметим, что подобная схема исследовалась в [5] в отсутствие спонтанной релаксации с верхнего уровня Λ-системы.

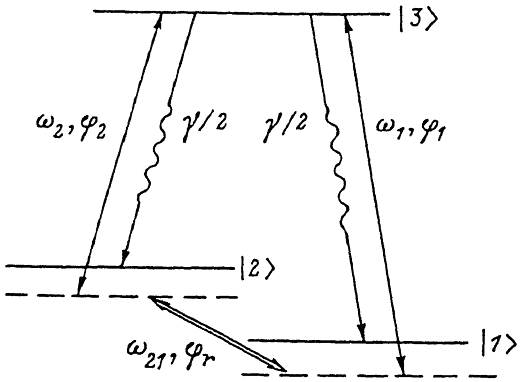

Рис. 1. Λ-система, взаимодействующая с двумя световыми полями с частотами $\omega_{1,2}$, замкнутая радиополем с частотой ω_{21}.

$$\hat{U} = \frac{1}{\hbar}\, \hat{\boldsymbol{\mu}}\, \mathrm{H}_0\, e^{i(\phi_r - \vartheta_r)} \exp(-i\,\omega_r\, t), \tag{3в}$$

где $\hat{d}_m$, $\hat{\mu}$ $(m = 1, 2)$ — операторы дипольных моментов (электрических и магнитного соответственно); E_0, H_0 — амплитуды электрического и магнитного полей; ϑ_p $(p = 1, 2, r)$ — начальные фазы полей; $\phi_p (p = 1, 2, r)$ — начальные фазы дипольных моментов.

Далее можно выписать уравнения для элементов атомной матрицы плотности трехуровневой Λ-системы ρ_{ij} с учетом (3) и, найдя решение этой системы в стационарном случае, получить выражение как для населенностей в системе

$$\rho_{33} = (4g^2u^2\sin^2\Phi)\, L^{-1}, \tag{4а}$$

$$\rho = \rho_{22} - \rho_{11} = (2g^2u\,\gamma\,\sin\Phi)\, L^{-1}, \tag{4б}$$

где $L = u^2\gamma^2 + 4(u^2 - g^2)^2 + 12g^2u^2\sin^2\Phi$, так и для когерентности между нижними уровнями

$$\rho_{12} = \frac{1}{2}\left\{a\rho\, \exp\left[i\left(\varphi_r - \frac{\pi}{2}\right)\right] + \left(1 - 3\rho_{33}\right)\, \exp\left[-i\left(\varphi_2 - \varphi_1 + \pi\right)\right]\right\}, \tag{5}$$

где $a = u(4u^2 + \gamma^2 - 4g^2)/2g^2\gamma$.

В (4) и (5) относительные фазы введены соотношениями $\varphi_p = \vartheta_p - \phi_p$, $p = 1, 2, r$; $\Phi = \varphi_r + \varphi_2 - \varphi_1$ и $g = dE_0/\hbar$, $u = \mu H_0/\hbar$ — соответствующие частоты Раби, γ — естественная ширина линии атомного перехода, а также считается, что расстройки световых волн Ω_m удовлетворяют условию точного резонанса $\Omega_m = \omega_m - \omega_{3m} = 0$ $(m = 1, 2)$ и выполнено условие (2).

Выражения (4), (5) полностью определяют характер воздействия резонансного РЧ поля на существование КПН в Λ-системе. Видно, что в отсутствие РЧ поля $(u = 0)$ верхний уровень не населен и существует КПН (условие (1) выполнено).

Если теперь рассмотреть случай $u \neq 0$, то, как видно из (4), (5), зависимость от взаимных фаз полей является определяющей. Так, при общей фазе

$$\Phi = \pi n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots\,. \tag{6}$$

Когерентное пленение в системе по-прежнему имеет место, однако при

$$\Phi = \frac{\pi}{2}(2n+1), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \tag{7}$$

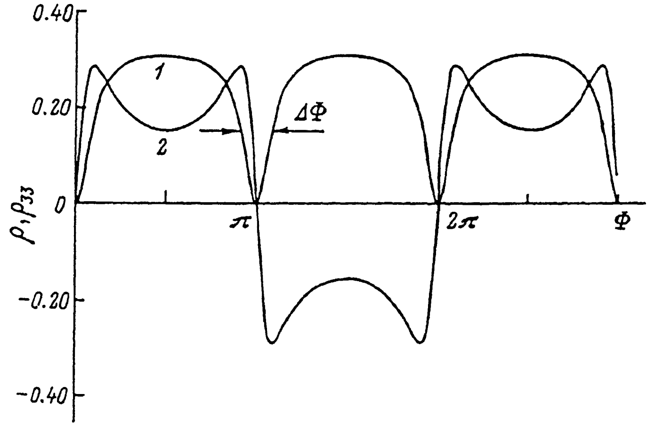

Рис. 2. Зависимость населенности ρ_{33} (*1*) и разности $\rho = \rho_{22} - \rho_{11}$ (*2*) от изменения общей фазы Φ при $g = u = 10^7\,c^{-1}$ и $\gamma = 10^7\,c^{-1}$.

происходит полное разрушение когерентного пленения и уровень $|3>$ в системе заселен, несмотря на выполнение условия КПН (1). Зависимости населенностей уровней (4) от общей фазы Ф приведены на рис. 2. Видно, что, изменяя соответствующим образом фазу Ф, можно как разрушать, так и снова восстанавливать состояние когерентного пленения.

По аналогии с работой [1], где был введен термин "черная линия" (black line) для обозначения отсутствия флуоресценции с верхнего уровня в условиях КПН, можно ввести понятие "фазовой черной линии", т. е. такой области изменения суммарной фазы Ф, вблизи которой существенно когерентное пленение. Ширина такой "фазовой черной линии" может быть определена как

$$\Delta\,\Phi = 2\arcsin\left[\frac{\gamma^2}{2(\gamma^2 + 6g^2)}\right]^{1/2}, \qquad (8)$$

при $g \simeq u$ и увеличении интенсивности волн чувствительность когерентного пленения к изменению Ф еще более возрастает.

Физически зависимость состояния системы от фазы РЧ поля можно понять, если рассмотреть изменение когерентности при изменении фазы φ_r. На рис. 3 показана комплексная плоскость, на которой низкочастотная когерентность ρ_{12} может быть изображена вектором с модулем $|\rho_{12}|$ и определенной фазой. Зафиксируем для определенности разность фаз оптических полей. Тогда в отсутствие РЧ поля ($u = 0$) когерентность изображается вектором a_0. При включении РЧ поля

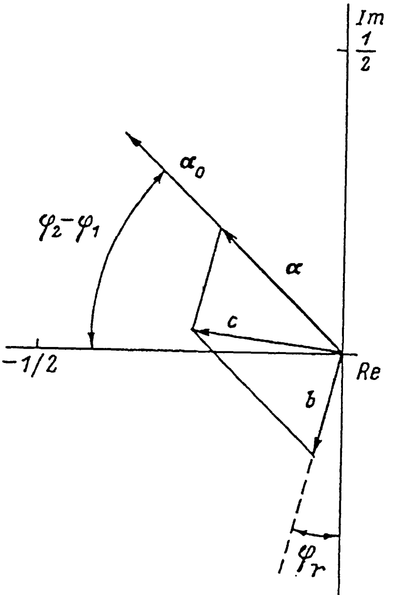

Рис. 3. Изменение низкочастотной когерентности ρ_{12} при включении РЧ поля.

a_0 — когерентность в отсутствие РЧ поля; a — компонента когерентности, наведенная оптическими полями при $u \neq 0$; b — компонента когерентности, наведенная РЧ полем; c — суммарная когерентность при $u \neq 0$.

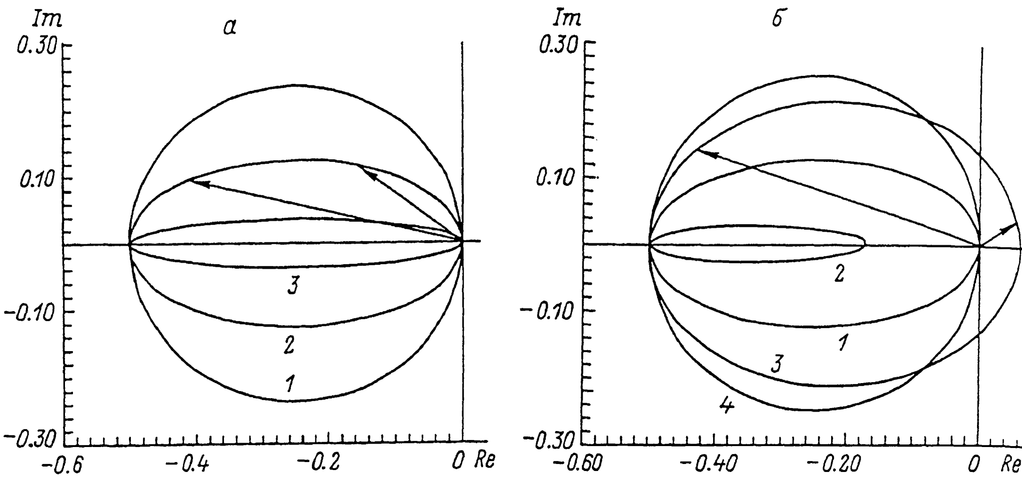

Рис. 4. Годограф вектора когерентности ρ_{12} при изменении фазы от $-\pi$ до π.

а: *1* — $\gamma = 10^7$ с$^{-1}$, $g = u = 0.1 \cdot 10^7$ с$^{-1}$; *2* — $g = u = 0.5 \cdot 10^7$ с−1; *3* — $g = u = 2 \cdot 10^7$ с$^{-1}$; *б*: *1* — $\gamma = 10^7$ с$^{-1}$, $g = u = 0.5 \cdot 10^7$ с$^{-1}$; *2* — $u = 0.3 \cdot 10^7$ с$^{-1}$, $g = 0.5 \cdot 10^7$ с−1; *3* — $u = 0.87 \cdot 10^7$ с$^{-1}$, $g = 0.5 \cdot 10^7$ с$^{-1}$; *4* — $u = 10^8$ с$^{-1}$, $g = 0.5 \cdot 10^7$ с$^{-1}$.

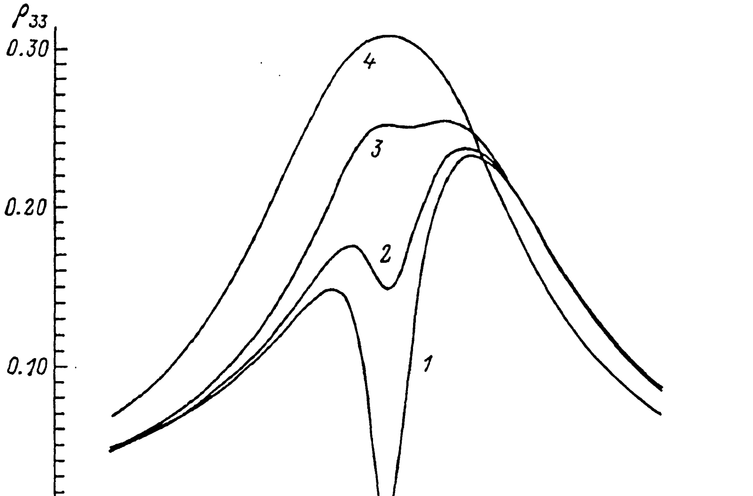

Рис. 5. Зависимость населенности третьего уровня для случая $\Omega_2 = 0$.

Ω_1 сканируется, $\gamma = g = u = 10^7$ с$^{-1}$; Φ : 1 = 0, 2 — $\pi/12$, 3 — $\pi/6$, 4 — $\pi/2$.

($u \neq 0$ к когерентности, наведенной оптическими полями a, добавляется когерентность, наведенная РЧ полем (что видно из (5)), которая на рис. 3 показана вектором b. Общая же когерентность между нижними уровнями в замкнутой Λ-системе получается сложением этих двух векторов a + b = c. Естественно, что общая когерентность будет сильно зависеть от направления вектора b, т. е. зависеть непосредственно от фазы РЧ поля.

На рис. 4 показаны кривые на той же комплексной плоскости, которые описывают конец вектора когерентности ρ_{12} при изменении фазы от $-\pi$ до π

(разность фаз оптических полей $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$).

Наконец, на рис. 5 приведены зависимости населенности верхнего уровня Λ-системы при сканировании одной из расстроек оптического поля, когда другая оптическая расстройка фиксирована и выполнено условие (2) (решение получено численным образом). Хорошо видны провалы когерентного пленения, которые существуют для одних фаз РЧ поля и совершенно исчезают для других.

В заключение отметим, что исследованная зависимость состояния КПН от фазы возбуждающих полей может представлять и практический интерес при создании, например, оптических модуляторов [6]. Наиболее интересной здесь представляется возможность амплитудной модуляции световых лучей при помощи фазовой модуляции РЧ поля.

Список литературы

[1] *Alzetta G., Gozzini A., Moi L., Orriols G.* // Nuovo Cimento. 1976. Vol. 36B. N 1. P. 5—20.
[2] *Gray H. R., Whitley R. M., Stroud C. R.* // Opt. Lett. 1978. Vol. 3. N 6. P. 218—220.
[3] *Cardimona D. A., Sharma M. P., Ortega M. A.* // J. Phys. B. 1989. Vol. 22. N 24. P. 4029—4039.
[4] *Смирнов В. С., Тумайкин А. М., Юдин В. И.* // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. Вып. 5. С. 1613—1628.
[5] *Dalton B. J., McDuff R., Knight P. L.* // Optica Acta. 1985. Vol. 32. N 1. P. 61—67.
[6] *Горный М. Б., Матисов Б. Г., Рождественский Ю. В.* // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. Вып. 4. С. 1263—1271.

С.-Петербургский государственный
технический университет

Поступило в редакцию
26 июля 1990 г.