

Высокоселективное четырехволновое смещение в вырожденной двухуровневой атомной системе при низкой интенсивности излучения

А.М.Акульшин^{*,**}, С.В.Баррейро^{**}, А.Лезама^{**}

Квазивырожденное четырехволновое смещение (ЧВС) излучения низкой интенсивности (менее 1 мВт/см²) получено в оптически прозрачных парах ⁸⁷Rb на переходе $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ в условиях электромагнитно-индуцированного поглощения. Эффективность преобразования составила не менее 1% по отношению к интенсивности возбуждающих волн. Нелинейное ЧВС обладает высокой селективностью по отношению к частотной отстройке возбуждающих волн (ширина контура ЧВС на полувысоте составляет менее 50 кГц).

Ключевые слова: когерентные оптические эффекты, четырехволновое смещение, электромагнитно-индуцированная прозрачность.

Для решения задач неразрушающих измерений и оптической обработки информации несомненный интерес представляет поиск сред и схем возбуждения, которые обеспечивают большую нелинейность при минимальной интенсивности возбуждающего излучения. Известно, что когерентное пленение населенности и обусловленная им электромагнитно-индуцированная прозрачность (ЭИП) увеличивают эффективность четырехволнового смещения (ЧВС) в поглощающей среде [1].

Недавно в [2] (см. также цитируемую там литературу) было теоретически показано, что эффективные нелинейные процессы при мощности излучения порядка 1 мкВт могут наблюдаться, если в среде реализована полная ЭИП, приводящая к радикальному уменьшению групповой скорости света ($V_g/c \leq 10^{-6}$). Однако наличие ЭИП не является необходимым условием получения высокой нелинейности.

Так, при реализации в парах Rb индуцированного поглощения на вырожденном двухуровневом переходе (ВДП) [3–5] высокая нелинейная восприимчивость $\chi^{(3)}$ была получена при интенсивности накачки $I \approx 0.1$ мВт/см², что на порядок меньше интенсивности насыщения оптического перехода (нелинейный коэффициент Керра $n_2 = 8 \cdot 10^{-3}$ см²/Вт [6]). Особенности ЧВС при различной поляризации резонансного излучения и наличии магнитного поля были рассмотрены в модели ВДП [7].

Целью настоящей работы является экспериментальная демонстрация нелинейного смещения излучения низкой интенсивности на ВДП в условиях индуцированного просветления и поглощения. Эксперимент проводился в парах ⁸⁷Rb на D_2 -линии поглощения ($\lambda = 780$ нм).

Циклические или замкнутые оптические переходы

*Физический институт им. П.Н.Лебедева, Россия, 117924 Москва, Ленинский просп., 53; эл. почта: akulshin@sci.lebedev.ru
(адрес в настоящее время: Instituto de Fisica, Facultad de Ingenieria, C.P.30, 11000 Montevideo, Uruguay)

**Instituto de Fisica, Facultad de Ingenieria, C.P.30, 11000 Montevideo, Uruguay

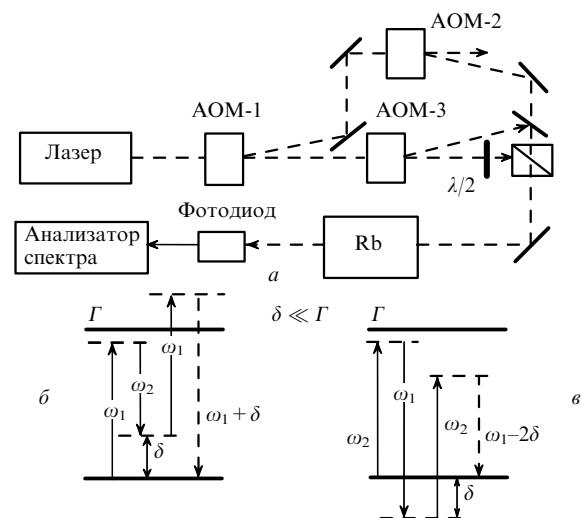


Рис.1. Оптическая схема эксперимента (а) и схемы нелинейного смещения волн с частотами ω_1 и ω_2 на вырожденном двухуровневом переходе (Γ – естественная ширина линии) (б, в).

$F = 2 - F' = 3$ и $F = 1 - F' = 0$ (F и F' – полные угловые моменты основного и возбужденного состояний), которые не приводят к перераспределению населенностей сверхтонких подуровней основного состояния, в отсутствие магнитного поля хорошо соответствуют модели ВДП.

Оптическая схема эксперимента представлена на рис.1,а. Пары ⁸⁷Rb содержались при комнатной температуре в отпаянной стеклянной кювете длиной 5 см. Внешнее магнитное поле в кювете ослаблялось экраном из μ -металла до 10 мГс. Источником резонансного излучения с шириной линии не более 1 МГц являлся инжекционный лазер с внешним резонатором. Внутридоплеровские резонансы насыщенного поглощения, полученные во вспомогательной кювете, служили реперами при электронной стабилизации частоты лазера.

Две взаимно-когерентные волны с варьируемой частотной отстройкой ($\delta = \omega_2 - \omega_1$) были сформированы акустооптическими модуляторами (АОМ), которые управлялись генераторами с фиксированной (200 МГц в

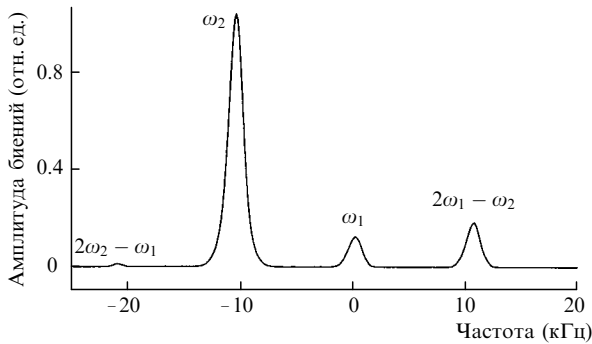


Рис.2. Спектр биений опорной волны с возбуждающими волнами ω_1 и ω_2 и двумя волнами, полученными в результате ЧВС в условиях электромагнитно-индуцированного поглощения паров ^{87}Rb . Отстройка возбуждающих волн на частотах ω_1 и ω_2 с интенсивностью 0.5 и 0.03 мВт/см² составила 10 кГц.

случае АОМ-1) и перестраиваемой (200 ± 5 МГц для АОМ-2) частотами. Максимальная интенсивность возбуждающих волн с частотами ω_1 и ω_2 на входе в кювету составляла 0.5 и 0.03 мВт/см² соответственно.

Для регистрации новых волн, обусловленных ЧВС, использовался гетеродинный метод. Опорная волна с частотой ω_0 ($\omega_0 - \omega_1 = \Delta = 2\pi \cdot 80$ МГц) формировалась с помощью АОМ-3. Поляризация всех трех волн была линейной, но ориентация поляризации более интенсивной волны на частоте ω_1 была ортогональна двум другим волнам. Пропускание этих волн, сведенных в однонаправленный пучок, через одномодовое оптическое волокно длиной 50 см обеспечивало идеальную коллинеарную схему возбуждения. Некоторая деполяризация излучения в волокне позволяла регистрировать биения опорной волны с волной на частоте ω_1 .

В классической схеме невырожденного ЧВС при выполнении условия фазового синхронизма $\mathbf{k}_4 = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3$, где \mathbf{k}_i – волновой вектор, в результате нелинейного смешения появляется новая волна с частотой $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ и амплитудой $E_4 \propto \chi^{(3)} E_1 E_2 E_3$. В случае возбуждения когерентности на ДВП однонаправленными волнами с амплитудами E_1, E_2 и частотами ω_1, ω_2 в среде за счет поглощения двух фотонов из одной волны и стимулированного испускания фотона на частоте другой образуются волны с частотами $2\omega_1 - \omega_2$ и $2\omega_2 - \omega_1$ (рис.1,б,в) и амплитудами $\chi^{(3)} E_1^2 E_2$ и $\chi^{(3)} E_2^2 E_1$ соответственно.

Таким образом, после прохождения паров Rb в спектре биений опорной волны (с амплитудой E_0) с возбуждающими волнами появляются две новые компоненты (рис.2). Большая амплитуда сигнала биений на частоте $2\omega_1 - \omega_2$ по сравнению с амплитудой на частоте $2\omega_2 - \omega_1$ объясняется различием интенсивностей возбуждающих волн I_1 и I_2 . Сигналы биений на этих частотах пропорциональны $E_0 I_1 \sqrt{I_2}$ и $E_0 I_2 \sqrt{I_1}$ соответственно. Эти зависимости были подтверждены экспериментально.

Максимальная эффективность ЧВС в оптически неплотной резонансной среде (линейное поглощение менее 40 %) в условиях электромагнитно-индуцированного поглощения при настройке лазера на переход $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ ^{87}Rb (спин ядра $I = 3/2$) составляла почти 2 % от интенсивности сильной волны. Следует подчеркнуть, что при настройке лазерного излучения на другой сверхтонкий подуровень основного состояния $F=1$, на котором реализуется ЭИП, сигнал ЧВС был в три раза меньше.

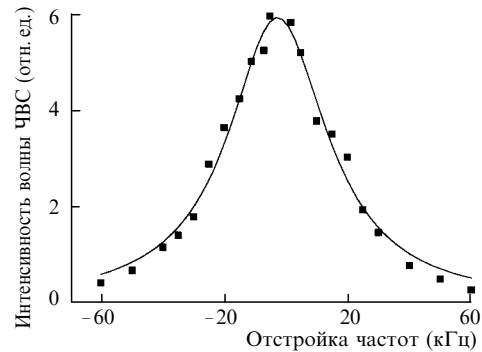


Рис.3. Зависимость интенсивности волны ЧВС (частота $2\omega_1 - \omega_2$) в когерентных парах Rb на D_2 -линии поглощения от разности (отстройки) оптических частот возбуждающих волн ($\delta = \omega_2 - \omega_1$); точки – эксперимент, сплошная кривая – аппроксимация кривой Лоренца.

Эффективность смешения на ВДП при столь низкой интенсивности излучения обусловлена тем, что частоты новых волн находятся в полном резонансе с оптическим переходом. В этом и есть существенное отличие использованной схемы от несимметричных Λ -схем [8], в которых частотная отстройка новых волн равна сверхтонкому расщеплению основного состояния, что значительно превышает неоднородное уширение линии ($\Delta_{\text{hf}} > \Delta_{\text{VD}}$).

На рис.3 представлена зависимость интенсивности сигнала ЧВС от частотной отстройки двух возбуждающих волн. Ширина контура на полувысоте составляет 44 кГц, что значительно меньше однородной ширины оптического перехода ($\Gamma/2\pi \approx 6$ МГц). Это демонстрирует высокую селективность нелинейного процесса.

Таким образом, впервые экспериментально показано, что квантовая интерференция, которая на различных атомных вырожденных двухуровневых переходах может быть как деструктивной, так и конструктивной (что приводит к просветлению среды или росту поглощения) вызывает значительный рост нелинейности среды. Это делает возможным достижение эффективного квазивырожденного смешения частот при исключительно низкой интенсивности излучения.

Получение излучения с амплитудными шумами ниже квантового предела (сжатый свет) представляется одним из самых интересных возможных применений предложенной простой схемы нелинейного смешения.

1. Harris S.E., Field J.E., Imamoglu A. *Phys.Rev.Letts.*, **64**, 107 (1990).
2. Harris S.E., Hau L.V. *Phys.Rev.Letts.*, **82**, 4611 (1999).
3. Akulshin A.M. et al. *Phys.Rev.A*, **57**, 2996 (1998).
4. Lezama A. et al. *Phys.Rev.A*, **59**, 4732 (1999).
5. Тайченачев А.В. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **69**, 776 (1999).
6. Akulshin A.M. et al. *Phys.Rev.Letts.*, **83**, 4277 (1999).
7. Lezama A. et al. *Phys.Rev.A*, **61**, 013801 (2000).
8. Lukin M.D. *Phys.Rev.Letts.*, **79**, 2959 (1997); Zibrov A.S. *Phys.Rev.Letts.*, **83**, 4049 (1999).

A.M.Akul'shin, S.V.Barreiro, A.Lezama. Highly selective four-wave mixing of low-intensity radiation in a degenerate two-level atomic system.

Quasi-degenerate four-wave mixing (FWM) of low-intensity radiation (with an intensity less than 1 мВт/см²) was observed for the $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ transition in an optically transparent ^{87}Rb vapour under conditions of electromagnetically induced absorption. The efficiency of frequency conversion was no less than 1 % with respect to the intensity of pump waves. Nonlinear FWM is highly selective relative to the frequency detuning of pump waves (the FWM full width at half maximum was less than 50 kHz).