

Полевой сдвиг резонансов когерентного пленения населенностей в случае гауссова пространственного профиля светового пучка

Д.В. Коваленко^{1,2}, М.Ю. Басалаев^{1,2,3}, В.И. Юдин^{1,2,3}, А.В. Тайченачев^{1,2}

¹ Институт лазерной физики СО РАН

² Новосибирский государственный университет

³ Новосибирский государственный технический университет

Аннотация: На основе формализма матрицы плотности исследована зависимость полевого (штарковского) сдвига частоты реперного перехода в спектроскопии резонансов когерентного пленения населенностей (КПН), возбуждаемых бихроматическим полем в открытой Λ -системе, от мощности излучения в случае гауссова пространственного профиля светового пучка. Обнаружено, что данная зависимость имеет существенно нелинейный характер, причем более сильный для смещения резонансного контура по сравнению со смещением нуля сигнала ошибки. Кроме того, нелинейный вклад возрастает с увеличением степени открытости Λ -системы. Показано, что использование диафрагмы, вырезающей из гауссова пучка центральную часть, позволяет получить близкую к линейной зависимость полевого сдвига от мощности и, тем самым, создать условия для эффективной работы метода автокомпенсации [V. I. Yudin *et al.*, General Methods for Suppressing the Light Shift in Atomic Clocks Using Power Modulation, Physical Review Applied 14, 024001 (2020)].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве теоретической модели атомной среды рассмотрим открытую трехуровневую Λ -систему (рис.1), взаимодействующую с бихроматическим (двухчастотным) полем:

$$E(t) = E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + \text{к.с.} \quad (1)$$

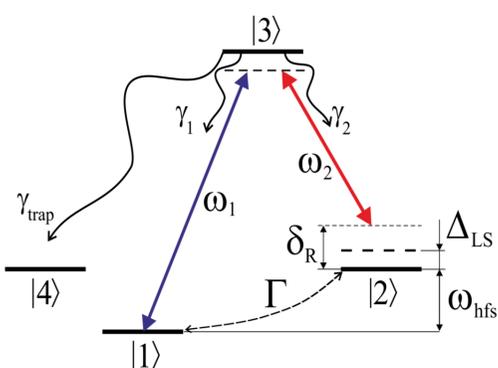


Рис. 1. Схема открытой Λ -системы. Здесь ω_1 и ω_2 есть частоты резонансных оптических полей; Δ_{LS} – полевой (штарковский) сдвиг частоты часового перехода; δ_R – двухфотонная отстройка; γ_1 , γ_2 и γ_{trap} есть скорости спонтанного распада населенности из состояния $|3\rangle$ на состояния $|1\rangle$, $|2\rangle$ и “ловушечное” состояние $|4\rangle$, соответственно. Γ – скорость распада когерентности между состояниями $|1\rangle$ и $|2\rangle$.

Резонанс когерентного пленения населенностей возбуждается при условии, что разность частот ($\omega_1 - \omega_2$) сканируется вблизи частоты сверхтонкого расщепления ω_{hfs} перехода между нижними состояниями Λ системы. Временную динамику данной квантовой системы мы будем описывать с помощью формализма атомной матрицы плотности $\hat{\rho}(t)$:

$$\hat{\rho}(t) = \sum_{m,n} |m\rangle \rho_{mn}(t) \langle n|. \quad (2)$$

Выделим в частотах Раби и полевого сдвига пространственную зависимость поперечного профиля f от радиуса r :

$$\Omega_1^2(r) = \Omega_{10}^2 f(r), \quad \Omega_2^2(r) = \Omega_{20}^2 f(r), \quad \Delta_{LS}(r) = \Delta_0 f(r), \quad (3)$$

где Ω_{10} , Ω_{20} и Δ_0 есть частоты Раби и полевого сдвига на оси (т.е. при $r = 0$) светового пучка, соответственно. В случае Гауссова профиля светового пучка функция $f(r)$ имеет вид:

$$f(r) = e^{-r^2/r_0^2}, \quad (4)$$

где r_0 определяет характерный поперечный размер пучка. В приближении оптически тонкой среды, поглощение света пропорционально интегральному по сечению значению населенности возбужденного состояния:

$$\alpha \propto \langle \rho_{33} \rangle_{\delta_R} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \rho_{33}(r, \delta_R) r d\varphi dr. \quad (5)$$

Для стабилизации частоты часового перехода, необходимо сформировать сигнал ошибки $S_{\text{err}}(\delta_R)$. В случае метода частотных прыжков, сигнал ошибки имеет следующий вид:

$$S_{\text{err}}(\delta_R) \propto \langle \rho_{33} \rangle_{\delta_R + \delta_{\text{jump}}} - \langle \rho_{33} \rangle_{\delta_R - \delta_{\text{jump}}}. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

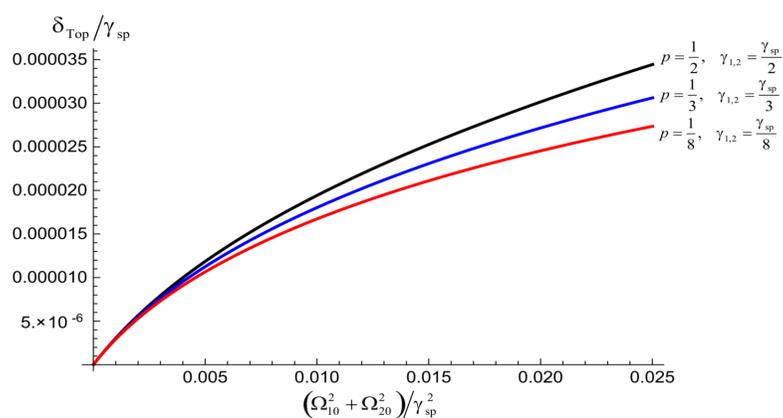


Рис. 2. Зависимость сдвига вершины КПН резонанса от интенсивности на оси светового пучка.

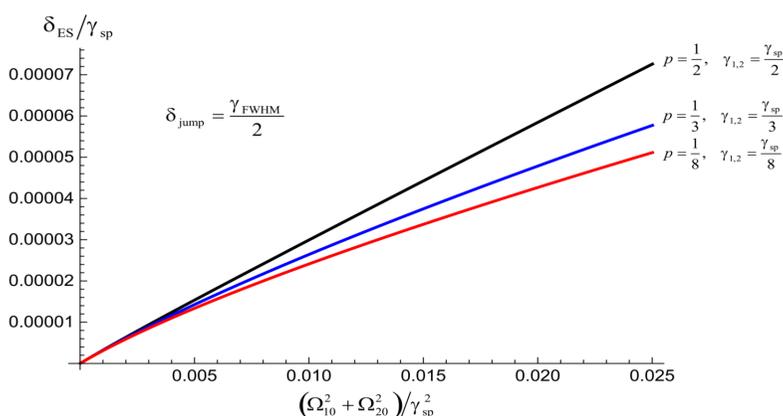


Рис. 3. Зависимость сдвига нуля сигнала ошибки от интенсивности на оси светового пучка. Сигнал ошибки сформирован частотными прыжками на полуширине КПН резонанса (в соответствии со световой интенсивностью).

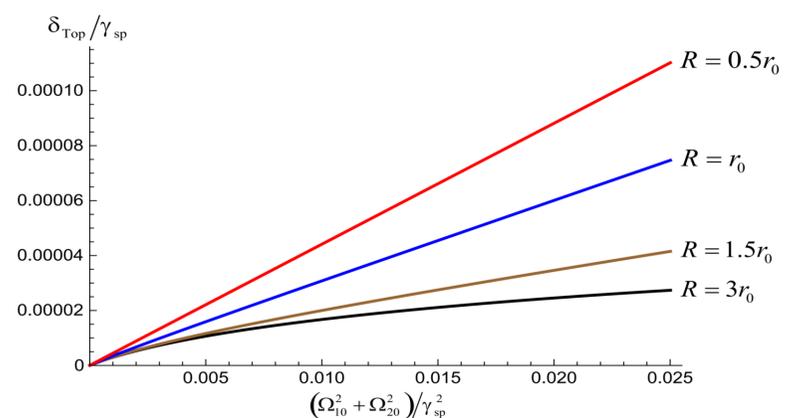


Рис. 4. Зависимость сдвига вершины КПН резонанса от интенсивности на оси светового пучка для различных значений радиуса интегрирования.

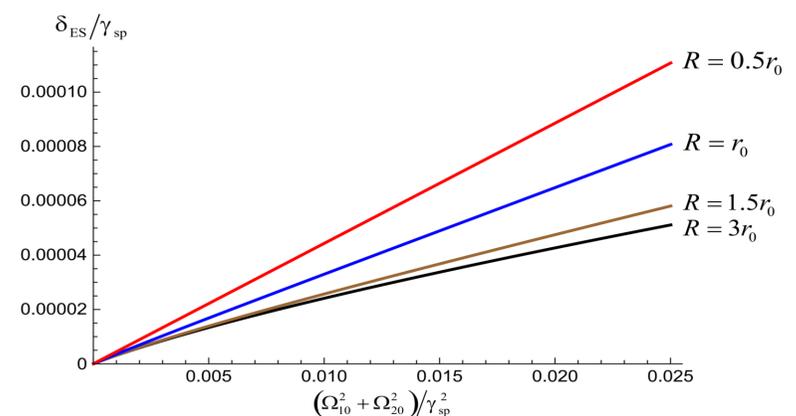


Рис. 5. Зависимость сдвига нуля сигнала ошибки от интенсивности на оси светового пучка для различных значений радиуса интегрирования. Сигнал ошибки сформирован частотными прыжками на полуширине КПН резонанса (в соответствии со световой интенсивностью).