

ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ НА ФОРМУ СТИМУЛИРОВАННОГО ФОТОННОГО ЭХА В ГАЗЕ

Е. Н. Ахмедшина*, Л. А. Нефедьев, Г. И. Гарнаева

УДК 535.3+535.317.1

Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, Казань, ул. Кремлевская, 16, Россия; e-mail: ekanika8@gmail.com, nefediev@yandex.ru

(Поступила 3 декабря 2014)

Рассмотрена спектральная диффузия и частотно-временная корреляция неоднородно (доплеровски) уширенной линии в газе при наличии столкновений частиц с изменением скорости, а также влияние спектральной диффузии на формирование отклика стимулированного фотонного эха (СФЭ). Показано, что частотный сдвиг резонансного перехода атомов в газе случайным образом изменяется в результате каждого столкновения с изменением скорости атома. Это приводит к некоррелированности неоднородного уширения в газе в разные моменты времени и частичной потере фазовой памяти, что оказывает влияние на формирование фотонного эха. Результатом является искажение временной формы СФЭ и, соответственно, воспроизводимости информации, закодированной во временной форме объектного лазерного импульса.

Ключевые слова: стимулированное фотонное эхо, спектральная диффузия, частотно-временная корреляция, неоднородно уширенная линия.

The spectral diffusion and time-frequency correlation of inhomogeneous (Doppler) broadened line of the gas in the presence of particle collisions with the change of speed was investigated. It was Discussed the impact of spectral diffusion on the formation of response SFE. It was shown that the shift of the resonance frequency of the atoms in the gas varies randomly, resulting in each collision with change of the velocity of the atom. This leads to the uncorrelated of inhomogeneous broadening in a gas at different times and partial loss of phase memory that affects the formation of the photon echo. The result of this is distortion is temporal shape of SPE and respectively reproducibility information which is encoded in the temporal shape of object laser pulse.

Keywords: stimulated photon echo, spectral diffusion, time-frequency correlation. inhomogeneously broadened line.

Введение. В настоящее время методы оптической эхо-спектроскопии широко используются для исследования газовых сред, где теоретическое описание явлений фотонного эха (ФЭ) и стимулированного фотонного эха (СФЭ) широко развиты [1, 2], что в свою очередь позволяет применить ФЭ и его модификации для экспериментальной проверки теоретических моделей столкновительного взаимодействия частиц [3, 4]. Один из основных механизмов, влияющих на параметры отклика газовых систем при оптическом когерентном импульсном лазерном возбуждении, — движение частиц газа и их столкновения. Например, затухание амплитуды E электрического поля отклика ФЭ при варьировании временного интервала τ между возбуждающими лазерными импульсами не соответствует экспоненциальному закону $E \approx \exp(-\tau/T_2)$, где T_2 — время необратимой поперечной релаксации системы, а имеет вид $E \approx \exp(-\alpha\tau^3)$ для малых временных интервалов между возбуждающими лазерными импульсами ($\tau \ll T_2$) и $E \approx \exp(-\beta\tau)$ при достаточно больших временных интервалах ($\tau \approx T_2$) [5, 6], где α и β — постоянные. Причиной этого является то, что в газовых средах происходят упругие столкновения частиц, при которых их скорости движения изменяются. Это приводит к нарушению фазовых соотношений между разными “скоростными пакетами” в пределах неоднородно уширенной линии резонансного перехода, что в свою очередь вызывает изменение корреляции неоднородного уширения в разные моменты времени и затухание амплитуды E электрического поля отклика (ФЭ) с характерными временными зависимостями.

THE EFFECT OF COLLISIONS WITH CHANGE VELOCITY OF GAS PARTICLES ON THE STIMULATED PHOTON ECHO TEMPORAL FORM

E. N. Ahmedshina*, L. A. Nefediev, and G. I. Garnava (Kazan Federal University, 16 Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russia; e-mail: ekanika8@gmail.com, nefediev@yandex.ru)

Эффект затухания амплитуды отклика СФЭ связан с изменением положений частиц газа в результате столкновений с изменением скорости. В работе [5] показано, что наибольшее влияние на интенсивность СФЭ такие столкновения оказывают при непараллельных волновых векторах возбуждающих лазерных импульсов. Это может приводить к разрушению информации, закодированной в волновом фронте объектного лазерного импульса, в отклике стимулированной эхо-голограммы. Столкновения с изменением скорости частиц приводят также к спектральной диффузии излучения отдельных молекул газа в пределах неоднородно уширенной линии за счет эффекта Доплера. Это может оказывать влияние на формирование отклика СФЭ и при параллельных волновых векторах возбуждающих лазерных импульсов.

В данной работе исследуется спектральная диффузия и частотно-временная корреляция неоднородно (доплеровски) уширенной линии в газе при наличии столкновений частиц с изменением скорости, а также влияние спектральной диффузии на формирование отклика СФЭ.

Частотно-временная корреляция неоднородного (доплеровского) уширения в газах. Спектральная неоднородность в газе обусловлена разбросом молекул по скоростям и зависимостью частоты Ω_{ik}^j (переход $i-k$) j -й молекулы от скорости (эффект Доплера). При этом в отсутствие столкновений имеет место полная корреляция неоднородного уширения в разные моменты времени и на разных энергетических переходах, так как частотные сдвиги за счет движения частиц пропорциональны друг другу на разных переходах и на разных временных интервалах:

$$\Delta\Omega_{ik}^j = \Omega_{0ik}^j \frac{\mathbf{v}_j \mathbf{n}}{c} = \Omega_{0ik}^j \frac{v_j \cos \theta_j}{c}, \quad (1)$$

где $\Delta\Omega_{ik}^j$ — частотный сдвиг за счет движения j -й частицы со скоростью \mathbf{v}_j (не зависящей от времени в отсутствие столкновений); Ω_{0ik}^j — центральная частота перехода $i-k$; \mathbf{n} — единичный вектор в направлении наблюдения; c — скорость света; θ — угол между направлением скорости молекулы и направлением наблюдения.

Рассмотрим ситуацию, когда наблюдение за излучением газа проводится в разные моменты времени, разделенные интервалом τ , за который могут происходить упругие столкновения молекул газа, приводящие к изменению направления скорости частиц. Результатом таких столкновений будут случайные изменения проекции скорости на направление наблюдения и, соответственно, случайные изменения частотных сдвигов (1) при каждом отдельном столкновении:

$$\Delta\Omega_{ik}^j(\theta_j, \Delta\theta_\eta) = \Omega_{0ik}^j \frac{v_j \cos(\theta_j + \Delta\theta_\eta)}{c}, \quad (2)$$

где $\Delta\theta_\eta$ — угол случайного изменения направления скорости молекулы в результате отдельного η -го столкновения. Таким образом, каждая изохромата доплеровски уширенной линии случайным образом смещается в результате каждого столкновения с изменением скорости молекулы. Это приводит к некоррелированности неоднородного уширения в газе в разные моменты времени и потере фазовой памяти системы.

Определим среднее число столкновений на интервале времени τ между моментами наблюдения системы и их влияние на частоту излучения молекулы. За секунду молекула в среднем пройдет путь, равный средней скорости. Столкновения с изменением скорости “искажают” ее путь. Обозначим эффективный диаметр молекулы d и представим молекулу как шар. Тогда число столкновений N_0 молекулы с другими молекулами в секунду равно числу молекул, центры которых находятся в цилиндре длиной, равной средней скорости \bar{v} , и диаметром $2d$:

$$N_0 = \pi d^2 \rho,$$

где ρ — число молекул в единице объема. Нужно внести поправку на то, что данная молекула сталкивается не с неподвижными, а с движущимися молекулами:

$$N_0 = 2^{1/2} \pi d^2 \rho.$$

За интервал времени τ между моментами наблюдения системы произойдет в среднем $N(\tau) = N_0(\tau) = 2^{1/2} \pi d^2 \rho \tau$ столкновений. Это приведет к изменению угла между скоростью молекулы и направлением наблюдения в (2):

$$\Delta\Omega_{ik}^j(\theta_j, \Delta\theta_\eta) = \Omega_{0ik}^j \frac{v_j \cos\left(\theta_j + \sum_{\eta=1}^{N(\tau)} \Delta\theta_\eta\right)}{c}, \quad (3)$$

Число столкновений

$$N(\tau) = \tau \bar{v} / l,$$

где $\bar{v} = \sqrt{8kT/\pi m}$.

ФЭ, сформированное двумя импульсами резонансного излучения, поляризованными линейно и взаимно ортогонально, наблюдалось в [7], поэтому далее рассматриваем спектральную диффузию в парах иттербия ^{174}Yb в приближении двухуровневой системы, в качестве которой выбран переход $^1S_0(6s^2) \rightarrow ^3P_1(6s6p)$ при следующих параметрах: давление $P = 1$ Торр, температура $T = 800$ К.

Рассмотрим спектральную диффузию сдвигов частоты перехода в атомах иттербия, исходя из выражения (3). Зависимость частотных сдвигов от временного интервала представлена на рис. 1. Отметим, что вид зависимости может изменяться от эксперимента к эксперименту, так как в изучаемом нановременном диапазоне не успевает установиться равновесное состояние за счет столкновений.

Для сравнения степени некоррелированности неоднородного доплеровского уширения в разные моменты времени введем коэффициент частотно-временной корреляции аналогично [8]:

$$R_{ik}(\tau) = \frac{1}{\pi\sqrt{\sigma_1\sigma_2}} \int_0^\pi d\theta \int_0^\infty (\Delta\Omega_{ik}(\theta, 0) - Z_1)(\Delta\Omega_{ik}(\theta, \tau) - Z_2) F(v) dv, \quad (4)$$

$$\text{где } F(v) = 4\pi\rho(m/2\pi kT)^{3/2} v^2 \exp(-mv^2/2kT), \quad Z_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\theta \int_0^\infty \Delta\Omega_{ik}(\theta, 0) F(v) dv, \quad Z_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\theta \int_0^\infty \Delta\Omega_{ik}(\theta, \tau) F(v) dv,$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\theta \int_0^\infty (\Delta\Omega_{ik}(\theta, 0) - Z_1)^2 F(v) dv, \quad \sigma_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\theta \int_0^\infty (\Delta\Omega_{ik}(\theta, \tau) - Z_2)^2 F(v) dv.$$

Расчет коэффициента корреляции в нановременном диапазоне показывает, что, поскольку равновесие не установлено, коэффициент корреляции изменяется случайным образом. Это в свою очередь приводит к нарушению фазовой памяти системы, что оказывает влияние на формирование откликов ФЭ. Как видно из рис. 2, в нановременном диапазоне коэффициент корреляции неоднородного уширения в разные моменты времени меняется случайным образом.

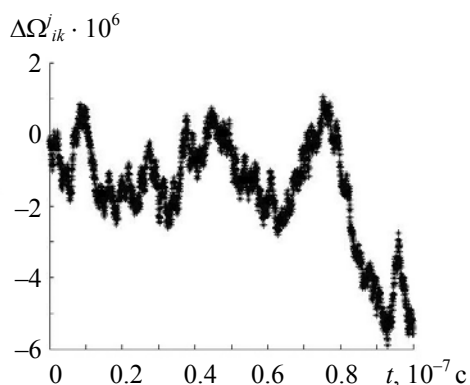


Рис. 1. Зависимость изменения частотных сдвигов излучения j -го атома газа от времени при наличии столкновений, изменяющих скорость

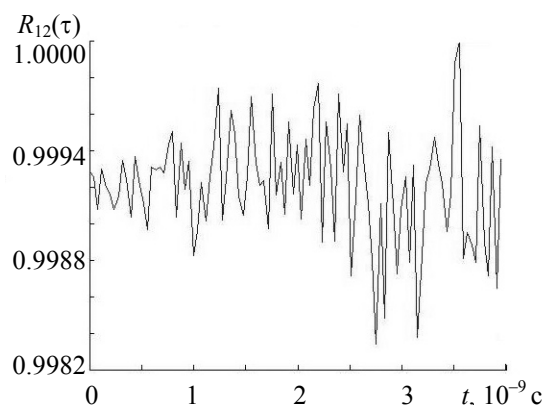


Рис. 2. Зависимость изменения частотно-временного коэффициента корреляции неоднородного (доплеровского) уширения от временного интервала при наличии столкновений, изменяющих скорость при $P = 1$ Торр, $T = 800$ К, $m = 288.91 \cdot 10^{-27}$ кг

Влияние столкновений с изменением скорости на временную форму отклика СФЭ в газе. Описанная выше спектральная диффузия может приводить к изменению временной формы отклика ФЭ. В нановременном диапазоне, в котором формируется СФЭ, сдвиги частоты перехода атомов иттербия не успевают прийти в равновесное состояние. Поэтому в каждом отдельном эксперименте по наблюдению СФЭ форма отклика может изменяться. Это связано со случайными изменениями коэффициента частотно-временной корреляции неоднородно уширенной линии за счет столкновений изменяющих скорость частиц. Временную форму отклика СФЭ определим согласно [9]:

$$I = EE^*, \quad (5)$$

где

$$E \approx \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\theta \int_0^\infty \exp \left\{ i\Omega_{0ik} \frac{v}{c} (t \cos \theta(t) - \tau \cos \theta(\tau) - \tau_1 \cos \theta(\tau_1)) \right\} F(v) dv, \quad (6)$$

$$\theta(t) = \theta + \sum_{\eta=1}^{N(t)} \Delta\theta_{\eta}, \quad \theta(\tau) = \theta + \sum_{\eta=1}^{N(\tau)} \Delta\theta_{\eta}, \quad \theta(\tau_1) = \theta + \sum_{\eta=1}^{N(\tau_1)} \Delta\theta_{\eta}.$$

τ — промежуток времени между первым и вторым возбуждающими лазерными импульсами; τ_1 — время подачи третьего (считывающего) лазерного импульса.

Численный расчет выражения (6) временной формы отклика СФЭ представлен на рис. 3. Как видно из рис. 3, *а*, увеличение временного интервала между первым и третьим импульсами приводит к искажению формы отклика СФЭ за счет столкновений с изменением скорости частиц газа. На рис. 3, *б* приведена временная форма СФЭ при давлении 5.25 Торр. В этом случае наблюдается сильное искажение временной формы СФЭ по сравнению со случаем, приведенным на рис. 3, *а*. Таким образом, воспроизведение информации, заложенной во временную форму объектного импульса, может существенно зависеть от параметров газовой среды и временных интервалов между возбуждающими лазерными импульсами.

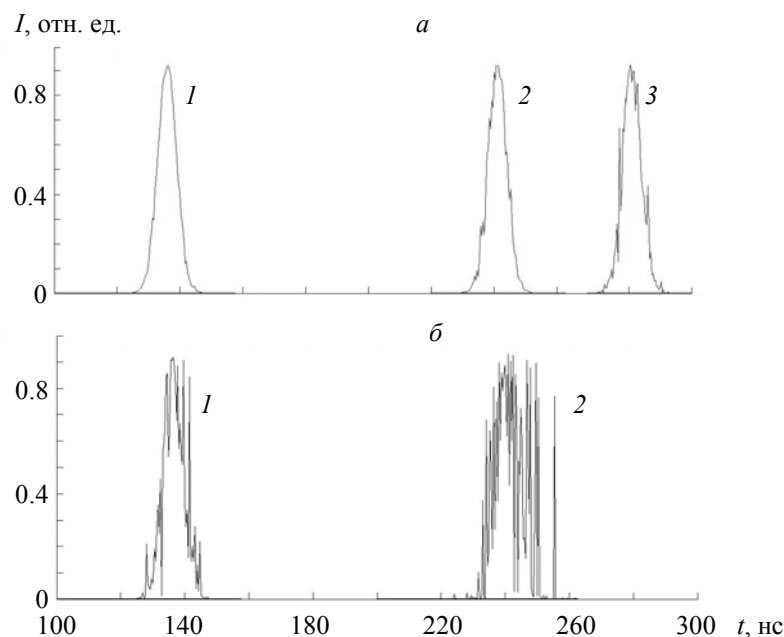


Рис. 3. Временная форма отклика стимулированного фотонного эха в газе: $\tau = 36$ нс, $T = 800$ К, $d = 0.388 \cdot 10^{-7}$ см, $P = 1.5$ (*а*) и 5.25 Торр (*б*), $\tau_1 = 100$ (1), 205 (2) и 245 нс (3)

Заключение. Показано, что частотный сдвиг резонансных переходов атомов в газе случайным образом изменяется в результате каждого столкновения с изменением скорости атома. Это приводит к некогерентности неоднородного уширения в газе в разные моменты времени и частичной потере фазовой памяти, что оказывает влияние на формирование фотонного эха. Результатом этого является искажение временной формы стимулированного фотонного эха и, соответственно, воспроизводимости информации, закодированной во временной форме объектного лазерного импульса.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности

- [1] И. В. Евсеев, Н. Н. Рубцова, В. В. Самарцев. Фотонное эхо и фазовая память в газах, Казань, изд-во Казанск. гос. ун-та (2009) 217—486
- [2] М. В. Евсеев, И. В. Ермаченко, В. В. Самарцев. Деполяризующие столкновения в нелинейной термодинамике, Москва, Наука (1991) 62—206
- [3] Н. Н. Рубцова, Л. С. Василенко, Е. Б. Хворостов. ЖЭТФ, **116**, № 1 (1999) 47—56
- [4] N. N. Rubtsova, V. G. Gol'dort, V. N. Ishchenko, S. A. Kochubei, V. A. Reslutov, I. V. Yevseev. Lett. Phys. Rev. A, **84**, N 3 (2011) 033413
- [5] Л. А. Нефедьев. Опт. и спектр., **52**, № 6 (1982) 981—986
- [6] A. Flusberg. Opt. Commun., **29**, N 1 (1979) 123—125
- [7] N. N. Rubtsova, V. N. Ishchenko, E. B. Khvorostov et al. Phys. Rev. A, **70** (2004) 023403—023410
- [8] Л. А. Нефедьев, Г. И. Гарнаева. Опт. и спектр., **105**, № 6 (2008) стр? [L. A. Nefediev, G. I. Garnaeva. Opt. and Spectrosc., **105**, N 6 (2008) 1006—1011]
- [9] Л. А. Нефедьев, Г. И. Хакимзянова. Опт. и спектр., **98**, № 1 (2005) 41—45