

ПРОВАЛ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАСЫЩЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В СПЕКТРАХ ОДНОРОДНО-УШИРЕННЫХ СИСТЕМ С ПРОСВЕТЛЕНИЕМ

М.С.Зубова, В.П.Кочанов

Теоретически рассмотрен новый тип нелинейных резонансов – провалов в спектрах поглощения интенсивного импульсного излучения трехуровневой системой и колебательно-вращательными переходами молекул. Провалы образуются на фоне однородно-уширенных линий и могут иметь ширины меньше радиационной. Показано, что при определенных условиях внутри провала образуется пик.

В типичных ситуациях нелинейной лазерной спектроскопии газовых сред образование провалов насыщенного поглощения происходит на фоне доплеровски-уширенных линий вследствие "выжигания" провалов Беннета в распределении заселенности уровней по скоростям при воздействии на рабочий переход мощного монохроматического излучения. Регистрация провалов в спектре производится с помощью пробных полей на том же, либо смежном переходе. В зависимости от постановки эксперимента могут наблюдаться нелинейные резонансы различных типов ¹, общими чертами которых являются неоднородное уширение линий и наличие выявляющего провал пробного поля. Ширина резонансов связана с радиационной (стокновительной) шириной линии и лишь в отдельных случаях, благодаря специфике эксперимента, они могут содержать более тонкую, субрадиационную структуру, обусловленную интерференцией состояний ², либо возбуждающего и пробного полей ³.

Вместе с тем, в измерениях с пучками атомов Rb ^{4,5} и He ⁶, а также с парами атомов Na ⁷, были зарегистрированы провалы в радиационно-уширенных линиях, обусловленные ограниченным временем некогерентного взаимодействия атомов с полем в условиях насыщения поглощения.

В данной работе приводится физическая интерпретация механизма образования провалов нестационарного поглощения на фоне однородно-уширенных линий. Показана возможность наблюдения таких провалов в простейшей схеме измерения поглощения импульсного поглощения бегущей волны в ячейке с газом без привлечения пробных полей. Обнаружено, что при определенных условиях в центре провала образуется пик, подобный инвертированному провалу Лэмба в нелинейной спектроскопии ¹. Предложена новая система – колебательно-вращательные (КВ) переходы молекулярных газов, в которой возможно наблюдение провалов тождественной физической природы.

Обсуждение механизма образования провалов проведем на примере трехуровневой системы, отвечающей измерениям ^{4,5,7}. Основное состояние системы пометим индексом 0, верхний уровень – 1, и промежуточный метастабильный уровень – 2. Пусть работа поля происходит на резонансном переходе 0 → 1. Тогда уравнения для матрицы плотности неподвижного атома в стандартном приближении имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\rho}_0 + \gamma_2 \rho_0 - (\gamma_{10} - \gamma_2) \rho_1 = \gamma_2 - 2\text{Re } iV\rho \\ \dot{\rho}_1 + \gamma_1 \rho_1 = 2\text{Re } iV\rho \\ \dot{\rho} + (\gamma - i\Omega)\rho = iV(\rho_1 - \rho_0) \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \rho_0(0) = 1 \\ \rho_1(0) = 0 \\ \rho(0) = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\rho_0 + \rho_1 + \rho_2 = 1, \quad \gamma_1 = \gamma_{10} + \gamma_{12}, \quad V = d_{10}E(t)/2\hbar$$

Здесь ρ_j – заселенность j -го уровня, $j = 0, 1, 2$; ρ – недиагональный элемент матрицы плотности на переходе 0 → 1, Ω – расстройка частоты лазерного излучения относительно частоты резонансного перехода, γ_j , $j = 1, 2$ – константы затухания уровней, γ_{10} и γ_{12} – скорости распада уровня 1 на состояния 0 и 2, γ – скорость затухания наведенного дипольного момента на

переходе $0 \rightarrow 1$. Существенным моментом в (1) является учет радиационной (столкновительной) релаксации метастабильного уровня. В качестве искоемых величин будем рассматривать работу поля $\mathcal{P}(\Omega, \tau) = 4\text{Re}iV\rho(\Omega, \tau)$ и заселенность верхнего уровня $\rho_1(\Omega, \tau)$ в момент окончания действия импульса, которым пропорциональны, соответственно, коэффициент поглощения возбуждающего излучения на резонансном переходе и интегральная по спектру интенсивность спонтанного испускания на переходах $1 \rightarrow 0$ и $1 \rightarrow 2$. Отсюда следуют два варианта постановки эксперимента, с регистрацией поглощения, либо флюоресценции. Использование временной развертки, или затвора, выделяющего конечную часть импульса, позволяет обходиться без пробных полей. Импульс $E(t)$ для простоты вычислений будем считать прямоугольным. Численные расчеты величин ρ_1 и \mathcal{P} с вариацией всех входящих в них параметров показали, что форма спектра в обоих случаях отличается не более, чем на 1%. Результаты расчетов, характеризующие поведение контура линии при изменении напряженности поля V , длительности импульса τ и скорости распада метастабильного уровня γ_2 представлены на рис. 1–3. Как видно из рисунков, при определенных значениях V , τ и γ_2 однородно-уширенная линия имеет провал и пик в нем. Аналитическое решение балансных уравнений, получающихся из (1) при $\dot{\rho} = 0$, совпадает с приведенным на рис. 2 с максимальной погрешностью $\lesssim 1\%$ для $\tau\gamma_1 \gtrsim 100$. С уменьшением $\tau\gamma_1$ до 8 погрешность возрастает до 15%. Т.о., подавляющий вклад в образование провала вносят заселенностные эффекты. Численное решение (1) с импульсом вида $V(t) = at^5 \exp(-\alpha t)$ показало, что аналогичные образования содержатся в линии и в случае гладкого импульса, даже в несколько более выраженном виде.

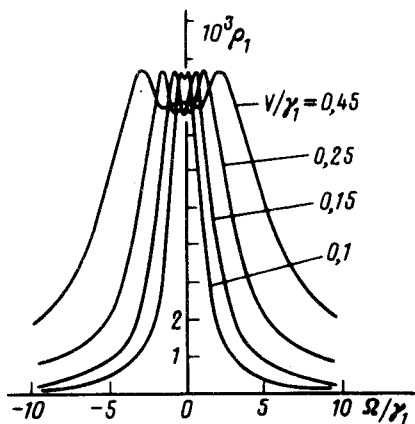


Рис. 1

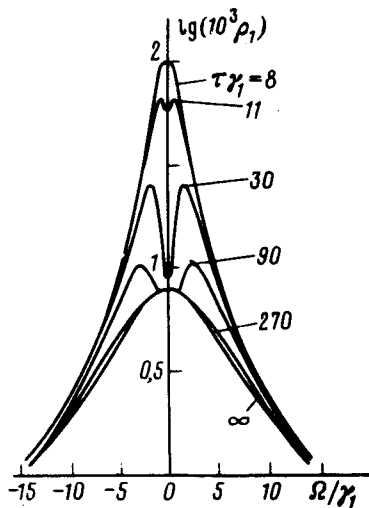


Рис. 2

Рис. 1. Форма линии нестационарного насыщенного поглощения (интегральной по спектру флюоресценции) в момент окончания действия импульса τ в зависимости от параметра насыщения V/γ_1 . $\tau\gamma_1 = 120$; $\gamma_{10} = \gamma = 0,5\gamma_1$; $\gamma_2 = 0,004\gamma_1$

Рис. 2. Форма провала в полулогарифмической шкале в зависимости от отношения длительности импульса τ к времени жизни верхнего уровня γ_1^{-1} . $V/\gamma_1 = 0,5$; $\gamma_{10} = \gamma = 0,5\gamma_1$; $\gamma_2 = 0,004\gamma_1$

Качественные особенности поведения формы провала, представленные на рис. 1–3, наряду с простотой схемы наблюдений однозначно приводят к следующему механизму образования провала и пика в нем. Провалы подобного типа образуются вследствие конкуренции времени действия поля и длительности цикла полной перекачки заселенности с основного состояния на метастабильный уровень (или его эквивалент). Действительно, пусть время жизни метастабильного уровня неограниченно велико. Тогда при воздействии на систему длинного импульса основное состояние опустошится, и поглощение в конце импульса будет отсутствовать. При отстройке частоты излучения от центра линии уменьшается сечение взаимодействия поля с системой, а следовательно, и скорость перекачки заселенности. Это приводит к ненулевому

поглощению в момент окончания импульса, что создает боковые максимумы в линии поглощения. При еще больших отстройках частоты поглощение уменьшается вплоть до нуля, что обычным образом формирует крылья линии. Уменьшение длительности импульса, начиная с некоторого значения, зависящего от констант релаксации и интенсивности поля, приводит к уменьшению глубины провала и в конечном итоге — к его исчезновению, поскольку распад верхнего уровня на метастабильное состояние и, соответственно, просветление среды не успевают произойти. Если теперь включить релаксацию метастабильно уровня, то поглощение резонансного излучения при больших τ уже не будет нулевым, а будет определяться той долей заселенности, которая "просачивается" через "узкое горло" метастабильного уровня на основной. Таким образом, в центре провала возникает пик, тем более заметный, чем ближе условия к стационарным. Последнее, очевидно, осуществляется при увеличении длительности импульса, интенсивности поля и скорости распада метастабильного уровня.

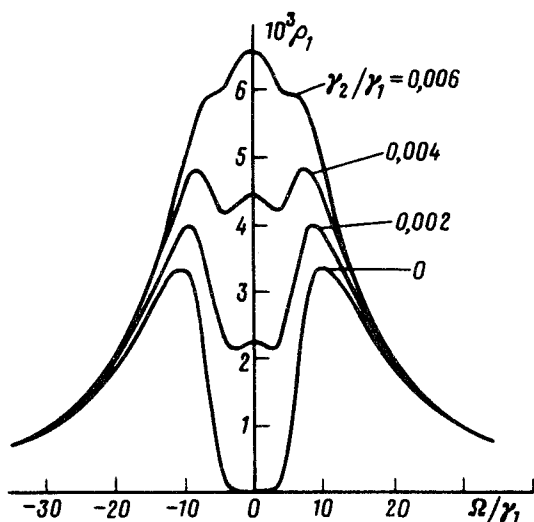


Рис. 3. Зависимость формы провала и пика внутри него от скорости распада γ_2 метастабильного уровня. $V/\gamma_1 = 1$; $\tau\gamma_1 = 120$; $\gamma_{10} = 0,1\gamma_1$; $\gamma = 0,5\gamma_1$

Обрисованный механизм образования провала естественным образом приводит к рассмотрению других систем с "узким горлом", в частности, колебательно-вращательных переходов молекул. Нами было проведено решение соответствующих уравнений для матрицы плотности, записанных в модели сильных вращательно-неупругих столкновений. Для длительностей прямоугольного импульса $\tau > 10\gamma_{вр}^{-1}$, где $\gamma_{вр}^{-1}$ — время вращательной релаксации, получено приближенное аналитическое выражение для работы поля, которое приводит к практически не отличающемуся по виду от рис. 1–3 зависимостям формы линии от V , τ и отношения $\gamma_{кол}/\gamma_{вр}$, где $\gamma_{кол}^{-1}$ — время колебательной релаксации, играющее роль времени распада метастабильного уровня. В принятых единицах измерения времени; γ_1^{-1} для трехуровневой системы и $\gamma_{вр}^{-1}$ для КВ переходов молекул характерные значения параметров V , τ и $\gamma_2(\gamma_{кол})$ для двух систем имеют одинаковый порядок величины.

Литература

1. Легохов В.С., Чеботаев В.П. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. М.: Наука, 1975.
2. Bertucelli G. et al. Opt. Lett., 1985, 10, 270.
3. Топтыгина Г.И., Фрадкин Э.Е. ЖЭТФ, 1982, 82, 429.
4. Klimcak C.M., Camparo J.C. Phys. Rev. A, 1984, 30, 1791.
5. Klimcak C.M. et al. Phys. Rev. A, 1986, 34, 1575.
6. Haberland H. et al. J. Phys. B. At. Mol. Phys., 1987, 20, 3367.
7. Gawlik W. et al. Phys. Rev. Lett., 1982, 48, 871.