

РАДИАЦИОННЫЙ ПЕРЕНОС НЕРАВНОВЕСНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ ПО СКОРОСТЯМ ПО ВЫРОЖДЕННЫМ ПОДУРОВНЯМ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ АТОМА В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ В ИНТЕНСИВНОМ МОНОХРОМАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

И.А.Карташов, А.В.Шишаев

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 16 августа 1993 г.

Экспериментальные исследования процесса оптической накачки на переходе $^3P_2 \rightarrow ^3D_2$ ($1s_5 \rightarrow 2p_8$)Ne²⁰ в интенсивном монохроматическом поле лазерного излучения позволили зарегистрировать когерентный радиационный перенос неравновесного распределения атомов по скоростям по вырожденным подуровням основного состояния атома на невзаимодействующий с сильным полем подуровень, в распределении населенности которого появляется резкий пик на частоте поля. Амплитуда пика населенности более чем в 2 раза превосходит амплитуду доплеровской подкладки. Когерентность процесса переноса населенностей позволила непосредственно наблюдать штарковское расщепление подуровней возбужденного состояния в поле встречных волн. Наблюдаемый эффект можно интерпретировать как аналог когерентного пленения населенностей в непоглощающем атомном состоянии в цикле оптической накачки с возможностью произвольного выбора скорости движения атома. Полученные результаты открывают пути эффективной селекции поляризованных атомов и управления их движением.

1. Неравновесное распределение атомов по скоростям, возникающее при взаимодействии интенсивного светового поля с ансамблем атомов, является предметом исследований лазерной спектроскопии насыщения [1]. Анализ процессов насыщения, проведенный для случаев простых и вырожденных двух- и трехуровневых атомных систем, выявляет возникновение характерных особенностей (резонансов) в спектрах поглощения и излучения для различных комбинаций сильного (насыщающего) и слабого (пробного) полей как по направлению их взаимного распространения, так и по их частотам и поляризациям.

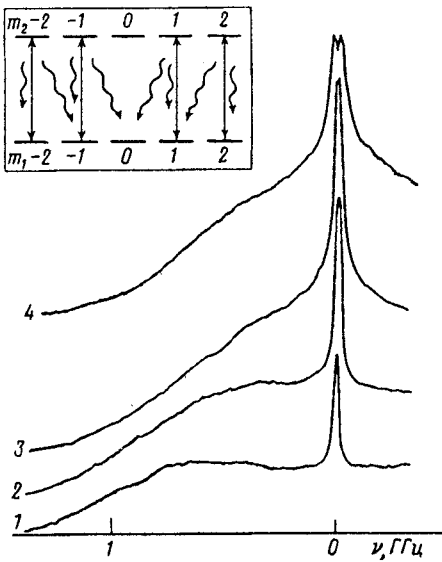
Другой возможностью спектроскопических исследований внутри доплеровски уширенной линии является использование метода селективной по скорости оптической накачки [2,3]. Одной из отличительных особенностей атомных систем, изучаемых методом оптической накачки, является медленность релаксационных процессов в системе вырожденных подуровней основного состояния, а также малость величины интенсивности излучения накачки, насыщающего переход. Это приводит к перераспределению населенностей по вырожденным подуровням основного состояния атома и, в ряде случаев, к просветлению атомного перехода для излучения заданной поляризации.

Учитывая, что основным механизмом релаксации в оптически ориентируемых атомных системах является радиационная релаксация из возбужденного состояния в основное, в теории оптической накачки для лазерных интенсивностей излучения необходим самосогласованный учет процессов индуцированного и спонтанного излучений, что приводит к выявлению новых особенностей

в распределении населенностей по вырожденным зеемановским подуровням основного состояния атома [4].

В предлагаемой работе, насколько известно авторам, впервые приводятся экспериментальные результаты по наблюдению когерентного радиационного переноса неравновесного распределения атомов по скоростям по вырожденным подуровням основного состояния в условиях оптической ориентации интенсивным лазерным излучением.

2. Эксперимент был поставлен на переходе ${}^3P_2 \rightarrow {}^3D_2$ ($1s_5 \rightarrow 2p_8$) Ne^{20} ($\lambda = 633,4 \text{ нм}$), основное состояние которого является метастабильным. Данный переход представляет пример оптически ориентируемой системы, в которой атомы под действием излучения накачки линейной поляризации в результате радиационных переходов перераспределяются на зеемановский подуровень $m_1 = 0$ основного состояния, что уже при умеренной интенсивности излучения накачки приводит к просветлению перехода. Схема переходов приведена на рисунке. Основную задачу эксперимента авторы видели в регистрации спектральной зависимости формы линии поглощения слабой волны круговой поляризации, вызывающей переходы $m_1 = 0 \rightarrow m_2 = \pm 1$, в поле сильной (приводящей к просветлению перехода) встречной волны линейной поляризации для случая равенства их частоты.



Форма линии поглощения слабой волны круговой поляризации в поле сильной встречной волны линейной поляризации для оптически ориентируемого перехода ${}^3P_2 \rightarrow {}^3D_2$ ($1s_5 \rightarrow 2p_8$) Ne^{20} при разных интенсивностях сильного поля (в Вт/см^2): 1 - $3 \cdot 10^{-2}$, 2 - $6 \cdot 10^{-2}$, 3 - $1,2 \cdot 10^{-1}$, 4 - 0,5. Слева сверху - схема вынужденных (прямые стрелки) и спонтанных (волнистые линии) переходов в основное состояние (3P_2) атома неона

Схема экспериментальной установки была стандартна для экспериментов по наблюдению резонансов насыщенного поглощения в газе в поле встречных волн [1]. Излучение непрерывного перестраиваемого лазера на красителе ДСМ направлялось в разрядную ячейку с чистым Ne^{20} . Давление неона составляло $2 \cdot 10^{-2}$ торр, разрядный ток поддерживался $\sim 15 \text{ мА}$, длина поглощающего слоя была 5 см . В этих условиях концентрация атомов Ne в метастабильном $1s_5$ состоянии составляла $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ [5], а коэффициент ненасыщенного поглощения $\sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Мощность излучения накачки, имевшего линейную поляризацию, могла плавно изменяться от 0 до 30 мВт , что соответствовало плотности мощности $0 \div 0,5 \text{ Вт/см}^2$. Ширина линии излучения была $\leq 3 \text{ МГц}$.

Слабое встречное поле круговой поляризации имело постоянную мощность $\approx 0,1$ мВт и направлялось под углом $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ рад к сильному полю. Форма линии поглощения регистрировалась по изменению интенсивности слабого поля при перестройке частоты лазера по контуру линии поглощения неона.

3. Экспериментальные записи формы линии поглощения слабой волны круговой поляризации в поле сильной встречной волны линейной поляризации для оптически ориентируемого перехода $^3P_2 \rightarrow ^3D_2$ Ne²⁰ приведены на рисунке для разных интенсивностей сильного поля. Нулевой коэффициент поглощения слабого поля соответствует основанию линии поглощения, что проверялось как отключением разрядной ячейки, так и перестройкой частоты лазера.

Величина интенсивности сильного поля, приводящая в цикле оптической накачки к перераспределению атомов по вырожденным подуровням основного состояния, определяется временем полного просветления, составляющего $\tau \sim 1/\gamma G$ для слабых и $\tau \sim 1/\gamma$ для сильных полей [2,4], и соотношением τ^{-1} к скорости деполяризующих столкновений. Здесь γ – скорость релаксации верхнего уровня, G – параметр насыщения перехода. Для условий нашего эксперимента просветление, соответствовавшее опустошению зеемановских подуровней с $|m_1| = 1, 2$, наступало при плотности мощности накачки $I_{p,min} \geq 2 \cdot 10^{-2}$ Вт/см², что было установлено по характеру изменения коэффициента поглощения сильного поля в зависимости от его интенсивности. Исследования формы линии поглощения слабого поля проводились для $I_p > I_{p,min}$.

Наблюдаемая форма линии поглощения слабого поля имеет вид узкого резонанса на фоне широкой доплеровской подкладки, обусловленной поглощением непосредственно с магнитного подуровня $m_1 = 0$. Причиной резонансного увеличения поглощения в центре линии является радиационный перенос населенности с магнитных подуровней $|m_1| = 1, 2$ на подуровень $m_1 = 0$ в цикле оптической накачки в интенсивном электромагнитном поле. Увеличение интенсивности сильного поля приводит не только к росту амплитуды резонанса, то есть увеличению населенности подуровня $m_1 = 0$, но и к его полевому уширению. Отношение амплитуды резонанса и доплеровской подкладки достигает 2,5 при плотности мощности накачки $I_p \approx 3 \cdot 10^{-2}$ Вт/см², а ширина резонанса Γ_p на его полувысоте увеличивается с 20 МГц при $I_p \approx 3 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² до 45 МГц при $I_p \approx 1,2 \cdot 10^{-1}$ Вт/см². Отметим, что полевое уширение резонанса имеет нелинейный характер в зависимости от интенсивности накачки. Учитывая тот факт, что частоты сильного и слабого полей одинаковы, мы можем констатировать наличие когерентности процессов поглощения сильного и слабого полей при радиационном переносе населенностей по зеемановским подуровням основного состояния оптически ориентируемой атомной системы в случае отсутствия деполяризующих столкновений.

Дальнейшее увеличение интенсивности сильного поля приводит к штарковскому расщеплению на две компоненты наблюдаемого резонанса населенности магнитного подуровня $m_1 = 0$, что является убедительным подтверждением когерентности процесса переноса неравновесной населенности на невзаимодействующий с полем подуровень. Штарковское расщепление составило ≈ 25 МГц при $I_p \approx 0,5$ Вт/см² (см. рисунок). Характерно, что соотношение между амплитудами резонанса и доплеровской подкладки, начиная с $I_p \approx 1,5 \cdot 10^{-1}$ Вт/см², падает, достигая постоянного значения (~ 2) при $I_p \gtrsim 0,2$ Вт/см².

Интересно отметить, что пример оптически ориентируемой схемы переходов был проанализирован (но без учета ориентации) в работах [1,6], где было

показано, что коэффициент поглощения κ слабой волны с частотой ω_2 в присутствии встречной сильной волны ω_1 противоположной поляризации при $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ имеет следующий вид:

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \exp \left[- \left(\frac{\Omega}{kv} \right)^2 \right] \left\{ 1 - G \frac{\gamma_1 \Gamma}{(2\Gamma)^2 + \Omega^2} \right\},$$

где $\Omega = \omega_{21} - \omega$, ω_{21} - частота перехода, γ_1 - скорость релаксации основного уровня, 2Γ - однородная ширина перехода, G - параметр насыщения перехода, κ_0 - ненасыщенный коэффициент поглощения.

Из полученной зависимости видно, что при $\Omega \gg 2\Gamma$ имеется обычный доплеровский контур, определяемый населенностью зеemanовского подуровня, не подверженного воздействию сильного поля, а при $\Omega < 2\Gamma$ в κ возникает провал, вызванный наличием пика населенности на верхнем общем уровне. Этот результат диаметрально отличается от полученного в наших экспериментах и указывает на важность учета процесса оптической накачки при анализе реальных атомных систем.

4. Таким образом, в работе показано, что при оптической ориентации атомов в интенсивных лазерных полях происходит когерентный радиационный перенос неравновесного распределения атомов по скоростям на один из вырожденных подуровней основного состояния атома и, что очень важно, - подуровень, не подверженный воздействию сильного поля. В этом отношении полученные результаты можно интерпретировать как аналог когерентного пленения населенностей в непоглощающем атомном состоянии [7], отличительной особенностью которого является тот факт, что пленение происходит в цикле оптической накачки с возможностью произвольного выбора скорости движения атомов. На наш взгляд, полученные результаты представляют интерес при получении поляризованных атомов, управлении их движением и охлаждении.

Авторы сознательно обошли в дискуссии ряд важных вопросов, выходящих за рамки данной публикации. Это влияние деполяризующих столкновений на форму линии поглощения слабого поля, анализ динамического Штарк-эффекта, вид доплеровской подкладки и др. Обращаем внимание и на тот факт, что отсутствие теоретического расчета эффекта оптической накачки для произвольных интенсивностей поля затрудняет количественную интерпретацию полученных результатов.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность И.М.Бетерову, А.М.Тумайкину, А.В.Тайченачеву и В.И.Юдину за плодотворные дискуссии и обсуждение результатов работы. Работа поддерживалась программой "Университеты России".

-
1. В.С.Летохов, В.П.Чеботаев, Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. М.: Наука, 1990.
 2. С.Г.Аminoff and M.Pinard, J. Physique **43**, 263 (1982).
 3. M.Pinard and L.Julien, J. Phys. B **17**, 3693 (1984).
 4. А.П.Казанцев, В.С.Смирнов, А.М.Тумайкин, И.А.Ягофаров, Препринт №5, Томск (1982).
 5. И.М.Бетеров, В.П.Чеботаев, Оптика и спектроскопия **XXIII**, 854 (1967).
 6. Ю.А.Вдовин, В.М.Ермаченко, А.Л.Попов, Е.Д.Проценко, Письма в ЖЭТФ **15**, 401 (1972).
 7. A.Aspect, E.Arimondo, R.Kaiser et al., Phys. Rev. Lett. **61**, 826 (1988).