

Влияние резонансного перемешивания состояний трехуровневой системы на реализацию из них многофотонных переходов

И.И.Бондарь, В.В.Суран

Впервые экспериментально обнаружено, что многофотонные переходы, запрещенные в дипольном приближении правилами отбора по четности, реализуются из резонансно-перемешанных состояний трехуровневой системы с вероятностями, которые примерно равны вероятностям многофотонных переходов, разрешенных этими правилами.

Ключевые слова: резонансное перемешивание состояний, трехуровневая система, многофотонные переходы.

В настоящих экспериментальных исследованиях атомных переходов из системы резонансно-перемешанных лазерным излучением состояний n , m и k , выполненных для атома Ва, рассматривались переходы из резонансно-перемешанных основного ($6s^2\ ^1S_0$), первого резонансного ($6s6p\ ^1P_1^o$) и метастабильного ($6s5d\ ^3D_2$) состояний.

Использовалось излучение двух импульсных лазеров: лазера на красителе (ЛК) и лазера на центрах окраски (ЛЦО). В наших исследованиях частота излучения ЛК ω_1 выбиралась равной частоте ω_{nm} , которая соответствует однофотонному переходу между основным и первым возбужденным состояниями, т.е. переходу $6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^1P_1^o$ ($\omega_{nm} = 18060\ \text{см}^{-1}$). Частота излучения ЛЦО ω_2 при этом изменялась в окрестности частоты ω_{mk} , соответствующей однофотонному переходу между первым возбужденным и метастабильным состояниями $6s6p\ ^1P_1^o \rightarrow 6s5d\ ^3D_2$ ($\omega_{mk} = 8845\ \text{см}^{-1}$). Поляризация обоих излучений была линейной с параллельной ориентацией световых векторов. В эксперименте оба излучения были синхронизованы по времени и фокусировались на пучок атомов Ва. Максимальные напряженности полей ε_1 и ε_2 , создаваемые излучениями ЛК и ЛЦО в области взаимодействия, составили соответственно 6×10^4 и 2×10^6 В/см.

Оценки с использованием данных о вероятностях переходов $6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^1P_1^o$ и $6s6p\ ^1P_1^o \rightarrow 6s5d\ ^3D_2$ [1, 2] показывают, что частоты Раби Ω этих переходов ($\Omega = V/2$, где $V = d\varepsilon$ – матричный элемент перехода, d – дипольный момент перехода) для указанных значений ε_1 и ε_2 есть соответственно $\Omega_{nm} \approx 25\ \text{см}^{-1}$ и $\Omega_{mk} \approx 100\ \text{см}^{-1}$. Данные частоты существенно превышают естественную ширину уровней и ширину спектральных линий использованных нами излучений ($\Delta\omega \approx 3\ \text{см}^{-1}$).

Известно, что при одновременном воздействии двух сильных резонансных излучений на трехуровневую систему по описанной выше схеме должно происходить резонансное перемешивание трех состояний. При этом все

три уровня будут населенными. Их населенности зависят от соотношения матричных элементов однофотонных переходов между состояниями трёхуровневой системы $n \rightarrow m$ и $m \rightarrow k$ (V_{nm} и V_{mk}) и от расстройек $\Delta_1 = \omega_{nm} - \omega_1$ и $\Delta_2 = \omega_{mk} - \omega_2$. При выполнении условия $|\omega_2 - \omega_{mk}| > \Omega_{mk}$ трехуровневая система преобразуется в двухуровневую. При этом будут перемешиваться лишь состояния $6s^2\ ^1S_0$ и $6s6p\ ^1P_1^o$ с населенностями $N_n \approx N_m \approx 0.5$ и $N_k \approx 0$.

При одновременном воздействии излучений ЛК и ЛЦО на атомы Ва по описанной выше схеме происходит не только заселение состояний $6s^2\ ^1S_0$, $6s6p\ ^1P_1^o$ и $6s5d\ ^3D_2$, но могут осуществляться также переходы из этих состояний в состояния с большей энергией. Методом ионизационной спектроскопии нами проведены исследования таких переходов. Измерялся выход (N^+) ионов Ва⁺, образующихся в результате одновременного воздействия на пучок атомов Ва излучений ЛК и ЛЦО, в зависимости от частоты излучения ЛЦО ω_2 . Постановка эксперимента была типичной для исследований резонансных процессов в двух полях лазерного излучения по методу ионизационной спектроскопии [4].

Результаты исследований приведены на рис. 1. Видно, что зависимость $N^+(\omega_2)$ представляет собой четко выра-

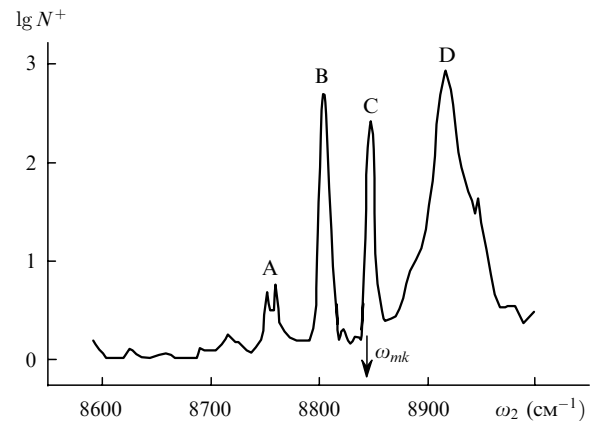


Рис. 1. Зависимость выхода ионов Ва⁺, образующихся при совместном воздействии на атомы Ва излучений ЛЦО и ЛК, от частоты излучения ЛЦО; вертикальной стрелкой обозначена частота $\omega_{mk} = 8845\ \text{см}^{-1}$.

женную резонансную структуру. Анализ показывает, что лишь максимумы, обозначенные В и D, могут идентифицироваться обычными многофотонными переходами в соответствии с правилами отбора для дипольных переходов. В частности, максимум D идентифицируется несколькими переходами, которые возникают при воздействии только излучения ЛЦО, а также при совместном воздействии излучений ЛЦО и ЛК из всех трех начальных состояний $6s5d^3D_2 + \omega_1 + \omega_2 \rightarrow 5d6d^1F_3$ ($\omega_2 = 8890 \text{ см}^{-1}$); $6s5d^3D_2 + 3\omega_2 \rightarrow 6s8p^1P_1^o$ ($\omega_2 = 8892 \text{ см}^{-1}$); $6s6p^1P_1^o + 2\omega_2 \rightarrow 6s8p^1P_1^o$ ($\omega_2 = 8916 \text{ см}^{-1}$); $6s^2^1S_0 + \omega_1 \rightarrow 6s6p^1P_1^o + 2\omega_2 \rightarrow 6s8p^1P_1^o$ ($\omega_2 = 8916 \text{ см}^{-1}$); $6s5d^3D_2 + \omega_1 + \omega_2 \rightarrow 5d6d^3D_2$ ($\omega_2 = 8925 \text{ см}^{-1}$) и $6s^2^1S_0 + 3\omega_2 \rightarrow 5d6p^1F_3^o + \omega_2 \rightarrow 6s7d^3D_3$ ($\omega_2 = 8940 \text{ см}^{-1}$).

На возникновение в этом случае нескольких резонансных переходов указывает сравнительно большая ширина максимума D. Вклад каждого из отмеченных выше переходов в его формирование определяется населенностью начальных состояний и вероятностями этих переходов.

Что касается максимума В, то на шкале частот ω_2 он расположен в окрестности частоты ω_{1s} , которая соответствует однофотонному переходу между состояниями $5d6p^1F_3$ и $6p^2^3P_1^o$ ($\omega_{1s} = 8800 \text{ см}^{-1}$). Как следует из работы [5], возникновение резонансного максимума в этом случае обусловлено многофотонным возбуждением и ионизацией сильно возмущенных состояний; возмущение состояний вызвано действием динамического эффекта Штарка в условиях, когда динамические поляризуемости имеют большие абсолютные значения и сильно зависят от частоты. На деталях возникновения максимума В мы здесь останавливаться не будем. Отметим лишь, что подробное описание механизма возникновения резонансных максимумов такого типа в выходе ионов приведено нами в работах [5, 6].

Остальные резонансные максимумы в зависимости $N^+(\omega_2)$ (А и С) не могут идентифицироваться переходами с выполнением правил отбора для дипольных переходов. Вместе с тем частоты ω_2 , соответствующие этим максимумам, в пределах ширины линии излучения ЛЦО совпадают с частотами, соответствующими переходам,

реализация которых в дипольном приближении запрещена правилами отбора по четности. Схемы этих переходов приведены на рис.2.

Один из максимумов (максимум А) идентифицируется однофотонным квадрупольным переходом $6s6p^1P_1^o + \omega_2 \rightarrow 5d6p^1F_3^o$. Оценки с использованием типичных значений вероятностей однофотонных квадрупольных переходов показывают, что в условиях наших исследований данный переход является ненасыщенным. Как следует из рис.1, отмеченный максимум имеет четко выраженную дублетную структуру с провалом, расположенным на частоте $\omega_2 = 8755 \text{ см}^{-1}$, которая совпадает с частотой, соответствующей приведенному выше квадрупольному переходу между невозмущенными состояниями.

Эта дублетная структура обусловлена расщеплением начального состояния $6s6p^1P_1^o$ на два квазиуровня в результате его перемешивания с основным состоянием $6s^2^1S_0$ в рамках двухуровневой системы. В этом случае разность частот ω_2 , которые соответствуют двум членам отмеченной дублетной структуры ($\delta\omega_2 \approx 10 \text{ см}^{-1}$), равна матричному элементу перехода $6s^2^1S_0 \rightarrow 6s6p^1P_1^o$: $V'_{nm} = d_{nm}e'_1$. Поскольку отмеченный квадрупольный переход реализуется при максимальных напряженностях поля, то здесь e'_1 – напряженность поля излучения ЛК, соответствующая области, в которой создается максимальная напряженность поля излучения ЛЦО. В данном случае $e'_1 = 1.2 \times 10^4 \text{ В/см}$.

Рассмотрим теперь резонансный максимум С. Как видно из рис.2, он обусловлен многофотонными переходами, реализация которых в дипольном приближении запрещена правилами отбора по четности. В связи с этим обращает на себя внимание сравнительно большая амплитуда данного максимума. Действительно, следовало бы ожидать, что амплитуда максимума С будет меньше амплитуды максимума А, поскольку многофотонные переходы должны иметь меньшую вероятность, чем однофотонный переход.

Нужно отметить, что при изменении частоты излучения ЛЦО в условиях наших исследований возможно возникновение еще нескольких запрещенных в дипольном приближении переходов из тех же начальных состояний с поглощением такого же количества квантов в состояния с теми же квантовыми числами, что и у переходов, соответствующих резонансному максимуму С. Однако отвечающие этим переходам максимумы в приведенной на рис.1 зависимости $N^+(\omega_2)$ отсутствуют.

Отличия реализации этих переходов и перехода, соответствующего максимуму С, состоят в следующем. Как следует из рис.2, максимум С обусловлен действием двух переходов из двух различных состояний (двухфотонного – из состояния $6s6p^1P_1^o$ и трехфотонного – из состояния $6s5d^3D_2$) в одно и то же состояние $6s7d^3D_3$. Причем частоты ω_2 , соответствующие этим двум многофотонным переходам ($\omega_2 = 8851 \text{ см}^{-1}$ и $\omega_2 = 8849 \text{ см}^{-1}$), в пределах ширины спектра излучения ЛЦО совпадают. Вместе с тем данные частоты очень близки к частоте $\omega_{mk} = 8845 \text{ см}^{-1}$, на которой имеет место резонансное перемешивание начальных состояний. Следовательно, при осуществлении резонансных переходов, соответствующих максимуму С, важную роль могут играть интерференционные эффекты. Что касается других запрещенных в дипольном приближении переходов, для которых резонансные максимумы не проявляются, то все они связаны с реализацией одиночных многофотонных переходов и

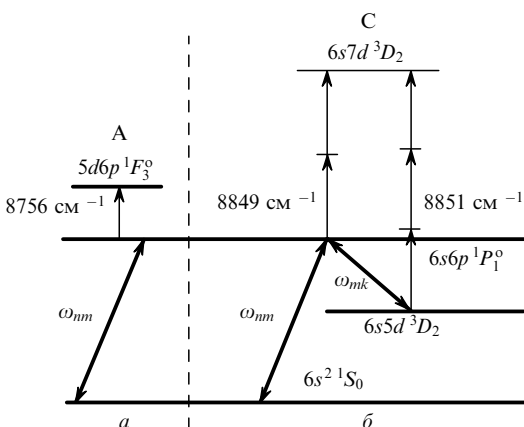


Рис.2. Схемы реализации исследуемых резонансных переходов с нарушением правил отбора по четности для дипольных переходов при перемешивании состояний двухуровневой ($6s^2^1S_0$ и $6s6p^1P_1^o$) (а) и трехуровневой ($6s^2^1S_0$, $6s6p^1P_1^o$ и $6s5d^3D_2$) систем (б). Резонансные переходы А и С отвечают резонансным максимумам на рис. 1, числа у стрелок – частоты ЛЦО, соответствующие приведенным переходам. Жирными двухсторонними стрелками обозначены частоты, на которых происходит перемешивание состояний атома Ва, перемешанные состояния указаны жирными горизонтальными линиями.

для них такое совпадение резонансных частот с частотой ω_{mk} отсутствует.

Таким образом, результаты наших экспериментальных исследований показывают, что резонансное перемещение состояний трехуровневой системы приводит к эффективному возникновению из этих состояний многофотонных резонансных переходов при нарушении правил отбора по четности для дипольных переходов.

1. Радшиг А.А., Смирнов Б.М. *Справочник по атомной и молекулярной физике* (М.: Атомиздат, 1989).
2. Bizzarri A., Huber M.C.E. *Phys. Rev. A.*, **42**, 5422 (1990).
3. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. *Атом в сильном световом поле* (М.: Энергоатомиздат, 1984).
4. Бондарь И.И., Суран В.В. *ЖЭТФ*, **107**, 1484 (1995).
5. Бондарь И.И., Суран В.В. *ЖЭТФ*, **113**, 499 (1998).
6. Bondar I.I., Suran V.V. *Laser Phys.*, **9**, 597 (1999).