

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ВОЗБУЖДЕНИЯ
В ИОНЕ ЕВРОПИЯ

П. А. Бохан и Л. В. Фадин

Методом резонансной флуоресценции измерены сечения внутри и межмультиплетного перемешивания состояний ${}^7, {}^9P$, а также время релаксации уровней ${}^7D^0$ в столкновениях с атомами гелия. Сечение реакций $\text{Eu}^{+*} ({}^7P_4) + \text{He} \rightarrow \text{Eu}^{+*} ({}^9P_5, {}^9P_3, {}^7P_2) + \text{He} + \Delta E$ составляет соответственно 2.9, 6.3 и 1.3 \AA^2 и являются обычными для процессов мультиплетного перемешивания, происходящих при малых дефектах энергии. В то же время сечение процесса $\text{Eu}^{+*} ({}^7D^0) + \text{He} \rightarrow \text{Eu}^{+*} (j) + \text{He} + \Delta E$, равное 1.3 \AA^2 , является аномально большим для адиабатических столкновений, поскольку дефект энергии на порядок превышает тепловую.

Идея использования неупругих межатомных столкновений для создания инверсии заселенностей в атомных системах, выдвинутая еще в 1940 г. [1] и развитая затем в работе [2], впервые была реализована в лазере на смеси $\text{He} + \text{Eu II}$ [3]. Для создания модели лазера и выяснения его предельных возможностей необходимо иметь сведения о природе и сечениях неупругих процессов, приводящих к перемешиванию состояний ${}^7, {}^9P$ и быстрой релаксации состояний ${}^7D^0$ (рис. 1). Такая попытка была предпринята в работе [4], однако недостаточная чувствительность метода поглощения, примененного в этой работе, не позволила получить результаты, допускающие однозначную интерпретацию.

В данной работе методом резонансной флуоресценции исследованы процессы передачи энергии внутри и между мультиплетами ${}^7, {}^9P$, а также измерялась скорость релаксации состояния ${}^7D^0$ при малых уровнях накачки, что соответствовало их малым заселенностям и незначительной концентрации электронов.

Схема эксперимента показана на рис. 2. От лазера 1 на смеси $\text{He} + \text{Eu II}$ с длиной волны генерации $\lambda = 1.0019$ мкм (переход ${}^7P_4 \rightarrow {}^7D^0_3$) излучение попадало в кювету 2 с исследуемой плазмой, состоящей из смеси паров Eu с различными буферными газами. Лазер имел среднюю выходную мощность 1 Вт [6] при частоте следования импульсов 10 кГц и длительности импульса генерации 300 нс. Разряд в кювете 2 возбуждался импульсами тока с частотой следования 10 кГц, длительностью по основанию 50 нс и амплитудой тока 0.5–10 А. Поджиг разряда в кювете и в лазере синхронизовался так, чтобы время задержки между возникновением разряда в кювете и приходом импульса излучения лазера могло изменяться от 0 до 100 мкс. Условия возбуждения в кювете выбирались такими, чтобы длительность спонтанного излучения на резонансном переходе ${}^7P_4 \rightarrow {}^7S^0_3$ была минимальной. В нашем случае она обычно составляла 200 нс, что и ограничивало в основном точность измерения времени релаксации.

Температура стенки кюветы 2 составляла 620°C , что соответствует оптимальным условиям работы $\text{He} - \text{Eu II}$ лазера. Концентрация атомов европия в этом случае составляет $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Верхний предел полной плотности ионов Eu в послесвечении оценивается в зависимости от тока, равным $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Оценка производилась из условия, что вся энергия, вложенная в разряд в течение импульса возбуждения, была затрачена на ионизацию европия.

Идея и методика эксперимента состояли в следующем. После выключения разряда в кювете и быстрого сброса электронной температуры происходит изменение заселенности резонансных и метастабильных состояний вследствие

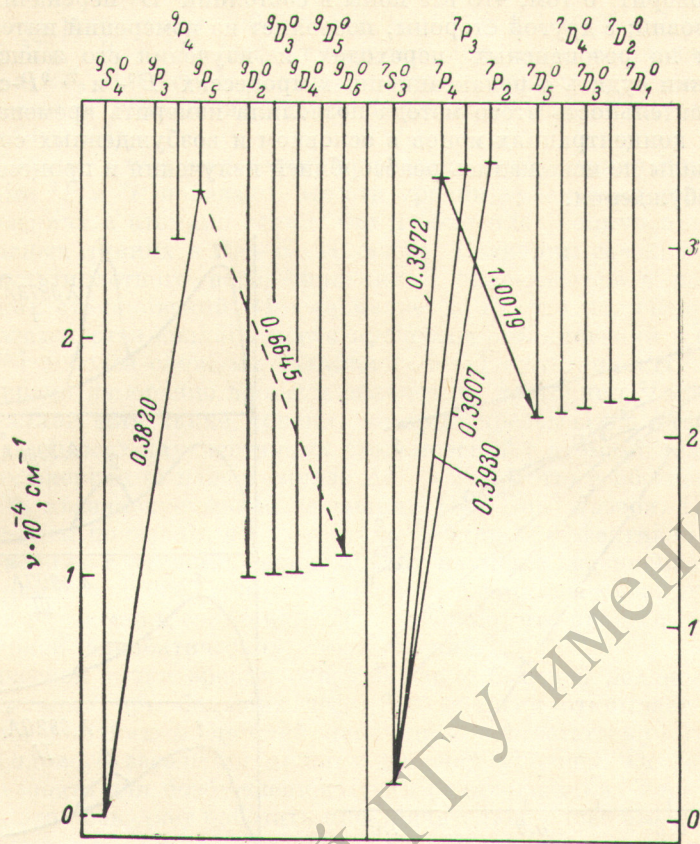


Рис. 1. Схема нижних уровней иона европия.

спонтанного излучения и релаксации в процессах неупругих столкновений, включая рекомбинацию и диффузию на стенки. При освещении кюветы излучением лазера происходит оптическая перекачка ионов с состояния $7D^0$

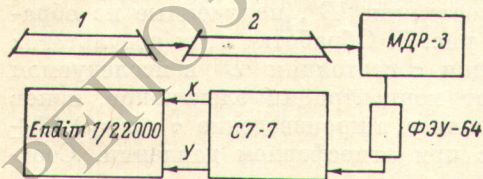


Рис. 2.

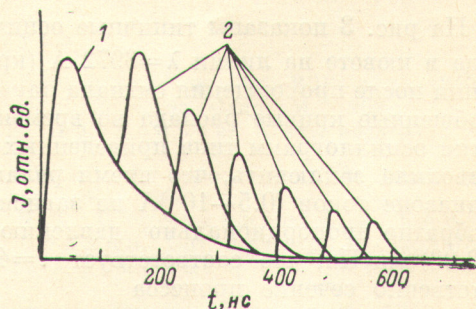


Рис. 3.

на уровень $7P_4$ с дальнейшей передачей возбуждения в процессах неупругих соударений на другие уровни $7P_j$ и на состояние $9P$, что фиксировалось по всплеску спонтанного излучения на резонансных переходах иона европия. Интенсивность лазерного излучения более чем на порядок превышала уровень, необходимый для достижения эффекта спектроскопического насыщения на

переходе с $\lambda=1.0019$ мкм. В исследуемом диапазоне изменения давления буферных газов длительность сигнала люминесценции не зависела от давления последнего и была значительно меньше времени излучения лазера. Это, с одной стороны, говорит о том, что все ионы в состоянии ${}^7D^0$ перекачиваются на резонансные уровни; с другой стороны, позволяет из измерений интенсивности люминесценции на резонансных переходах и изучения его зависимости от времени задержки судить о релаксационных процессах ${}^7D^0$ - и ${}^7, {}^9P$ -состояний. Высокая чувствительность этого метода позволила измерить времена релаксации при малых концентрациях ионов в основном и возбужденных состояниях, т. е. когда сигналы не искажались реабсорбцией излучения и процессами электронного девозбуждения.

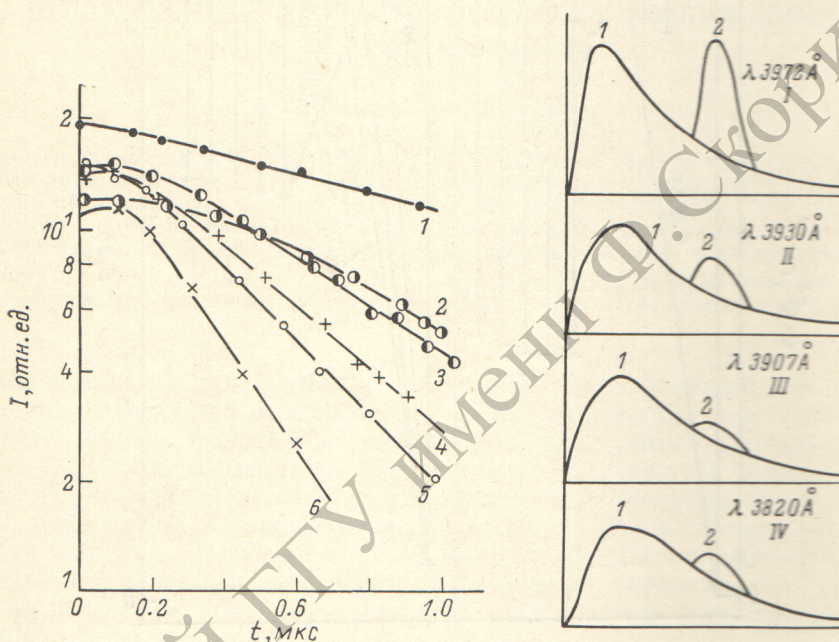


Рис. 4. Кривые распада состояния ${}^7D^0$.

1 — 160, 2 — 400, 3 — 590, 4 — 975, 5 — 1060, 6 — 1670 Па.

Рис. 5. Осциллограммы спонтанного излучения.

1 — без подкачки, 2 — с оптической подкачкой. λ , Å: I — 3972, II — 3930, III — 3907, IV — 3820.

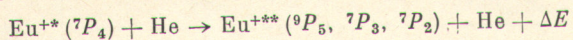
На рис. 3 показаны типичные осциллограммы спонтанного излучения разряда в кювете на линии $\lambda=3972$ Å (кривая 1) и свечения плазмы на этой же линии после прохождения сигнала накачки (кривые 2). На рис. 4 представлены обобщенные кривые распада во времени состояния ${}^7D^0$, полученные из обработки осциллограмм типа приведенных на рис. 3. Обработка этих результатов позволила заключить, что время релаксации τ состояния ${}^7D^0$ в исследуемом диапазоне токов (0.5—10) А не зависит от концентрации электронов, ионов и обратно пропорционально давлению гелия p , а произведение $\tau \times p = (0.43 \pm 0.08)$ мс·Па, что соответствует $\tau=4$ нс при атмосферном давлении. Соответственно сечение процесса



составляет $\sigma=1.3 \cdot 10^{-16}$ см².

Для понимания механизма работы He+Eu II лазера важно также знать, какими процессами обеспечивается перемешивание уровней 9P и 7P . Измерение отношения сигналов люминесценции на линии с $\lambda=3972$ Å к линиям, начинающимся с других уровней ${}^7, {}^9P$ (рис. 5), дает информацию об этих процессах. Независимость отношения сигнала люминесценции от концентрации электронов и его уменьшение с ростом давления гелия указывает на то, что состояния

7P и 9P как внутри мультиплета, так и между собой перемешиваются в процессах неупругих соударений с гелием. Оценка величин сечений процессов



дает следующие результаты: $2.9 \cdot 10^{-16}$, $6.3 \cdot 10^{-16}$ и $1.3 \cdot 10^{-16}$ см² соответственно для уровней 9P_5 , 7P_3 и 7P_2 (дефект энергии при этом составляет 666, 266 и 418 см⁻¹, а $kT_9 = 630$ см⁻¹, k — постоянная Больцмана, T_9 — температура газа; при расчетах использовались значения вероятностей переходов, приведенные в работе [5]).

Таким образом, измерение сечений передачи возбуждения внутри и между мультиплетами 7P и 9P показало, что эти уровни эффективно перемешиваются при столкновениях с атомами гелия, что и объясняет конкуренцию переходов на инфракрасных линиях в He—Eu II лазере. Величины сечений типичны для процессов мультиплетного перемешивания и описываются в рамках теории адиабатических столкновений. Новым является то, что получено экспериментальное доказательство аналогичности процессов столкновений в сравнительно простых [7, 8] и более сложных [данная работа] мультиплетах.

В то же время измерение времени релаксации состояния ${}^7D^0$ показало, что в ионах металлов есть такие уровни, которые чрезвычайно эффективно разрушаются в процессах двухчастичных столкновений с атомами гелия при больших дефектах энергии (в нашем случае $\Delta E > 9kT_0$), что и обеспечивает высокую мощность квазинепрерывной генерации He—Eu II лазера. Предварительные эксперименты показали, что состояние ${}^7D^0$ также эффективно разрушается при столкновениях с атомами неона, а факт наличия квазинепрерывной генерации на линии с $\lambda = 0.6645$ мкм с большой вероятностью указывает и на высокую скорость релаксации состояния ${}^9D^0$. Очевидно, что процессы не могут быть описаны теорией адиабатических столкновений.

С практической точки зрения существование быстрой релаксации метастабильных состояний при больших дефектах энергии открывает возможность использования высоких мощностей накачки и соответственно генерации без опасности теплового заселения нижних рабочих уровней. Особенно перспективно использовать для возбуждения пучки релятивистских электронов. С одной стороны, это позволяет работать при значительно более высоких давлениях гелия и европия, что должно привести к существенному увеличению мощности генерации. С другой стороны, станет возможным использование реакций Пеннинга и перезарядки для накачки более высоких резонансных и других состояний, что должно привести к возникновению генерации в видимой и УФ области (вплоть до $\lambda \approx 0.3$ мкм).

Авторы выражают благодарность А. Н. Мальцеву за ценные замечания по работе и В. Г. Соколову за помощь в эксперименте.

Л и т е р а т у р а

- [1] В. А. Фабрикант. В сб.: Электронные и ионные приборы. Тр. ВЭИ, в. 44, 1940.
- [2] Г. Гулд. В сб.: Газовые лазеры, под ред. Н. Н. Соболева. «Мир», М., 1968.
- [3] П. А. Бохан, В. М. Климкин, В. Е. Прокопьев. Квант. электрон., 1, 1365, 1974.
- [4] P. A. Bokhan, V. M. Klimkin, V. E. Prokoriev. The paper of XIII Intern. Conf. on phenomena in ionised gases, 641, 1977.
- [5] К. Б. Благоев, М. Л. Бурштейн, Я. Ф. Веролайнен, В. А. Комаровский, А. Л. Ошерович, Н. П. Пенкин. Опт. и спектр., 44, 32, 1978.
- [6] П. А. Бохан, В. М. Климкин, В. Е. Прокопьев, С. С. Монастырев. Письма ЖТФ, 3, 410, 1977.
- [7] Б. М. Смирнов. Ионы и возбужденные атомы в плазме. Атомиздат, М., 1974.
- [8] M. Lukaszewski, D. Decler. Opt. Comm., 25, 189, 1978.

Поступило в Редакцию 15 сентября 1980 г.