

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЧЕНИЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ В СМЕСИ Cd—He

А. С. Тибиллов, М. К. Шевцов и А. М. Шухтин

Описана экспериментальная установка для исследования методом оптической накачки сечений передачи энергии при столкновении атомов Cd в высоковозбужденном состоянии с атомами инертного газа. В качестве источника света применен импульсный лазер на парах Cd. Измерены сечения передачи энергии при столкновении атомов Cd в состоянии $4^3F_{2,3,4}$ с атомами He. Оценено сечение передачи энергии при столкновении атомов Cd в состоянии $4^3F_{2,3,4}$ с атомами в нормальном состоянии. Экспериментально доказана справедливость используемой методики. Определены границы ее применения и источники возможных погрешностей.

Одним из методов исследования процессов передачи энергии возбуждения при столкновениях, позволяющих получить наиболее надежные данные, является метод оптической накачки [1, 2]. Применение лазеров в качестве источников подсветки значительно расширило возможности этого метода [3]. С помощью накачки непрерывным гелиевым лазером были измерены сечения передачи энергии возбуждения при столкновении атома гелия в высоковозбужденном состоянии с нормальным атомом гелия [4]. Создание импульсных лазеров на линиях Cd, Zn, Mg [5] и Hg [6] открыло возможность аналогичных исследований для элементов второй группы.

Ниже описывается созданная нами экспериментальная установка и некоторые первые результаты измерений. В нашем эксперименте источником оптической накачки является импульсный лазер на парах Cd [5]. Разрядная трубка, обеспечивающая генерацию, помещалась в печь, в которой поддерживалась температура 300°C . Внутри трубки имелись отрезки, в которых находился Cd. Концы трубки выступали из печи на 20 см и закрывались кварцевыми окошками, приклеенными под углом Брюстера. Буферным газом служил гелий при давлении $6 \div 8$ тор. Гелий поддерживал разряд и одновременно изолировал окошки от паров Cd.

Для накачки использовалась генерация $\lambda=1648$ нм ($4^3F_{2,3,4} - 5^3D_2$). Генерация имела длительность $100 \div 150$ мксек. с задержкой относительно импульса тока $60 \div 80$ мксек.; частота повторения импульсов до 1500 гц. Для выделения из спектра генерирующих линий линию $\lambda=1648$ нм внутрь резонатора помещалась диспергирующая призма.

В экспериментах исследовалось спонтанное излучение поперек дополнительной кюветы, в которой зажигался постоянный разряд. Кювета помещалась в резонатор соосно с лазерной трубкой. Этот вариант эксперимента позволял в широких пределах варьировать условия разряда (ток, давление паров Cd, давление буферного газа). Кювета помещалась в печь (рис. 1), причем температуру в печи удавалось поддерживать с точностью $\pm 1^\circ$. Кадмий находился в отрезках, распределенных равномерно по всей длине. Длина печи была равна 1 м. Такая конструкция позволяла получать в центре столб паров Cd с давлением, соответствующим насыщающему при температуре внутри печи. Заслонки, поднимаемые магнитом, предохраняли внешние окна от Cd во время откачки кюветы при высокой тем-

пературе. Спонтанное излучение наблюдалось через два боковых сапфировых окна, расположенных под углом 90° относительно друг друга. Сапфир обеспечивал пропускание света в широком диапазоне длин волн и не взаимодействовал с парами Cd. Исследуемые линии выделялись двумя монохроматорами и регистрировались ФЭУ или фотодиодом. Сигнал с ФЭУ состоял из постоянной составляющей, обусловленной спонтанным излучением с исследуемого уровня, и импульсов фототока, вызванных перераспределением заселенности под действием лазерного излучения, которые в дальнейшем мы будем называть сигналами.

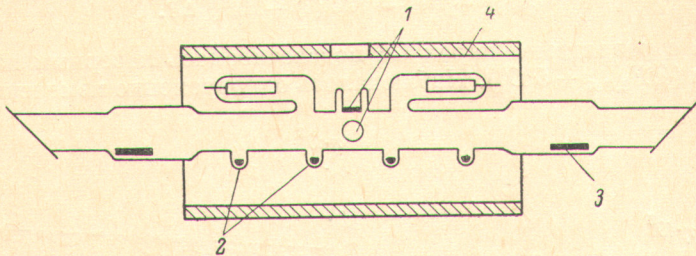


Рис. 1. Кювета.

1 — сапфировые окна, 2 — отрезки с Cd, 3 — никелевая заслонка, 4 — печь.

Электрическая схема регистрации сигналов для определения сечений передачи энергии при столкновении возбужденных атомов Cd с атомами He изображена на рис. 2. Сигналы с ФЭУ поступали на усилители 3, 4, а затем на схемы линейного пропускания — «ворота». Генератор 14 вырабатывал импульсы, запускающие питание лазерной трубки, и одновременно сдвинутые по времени импульсы, отпирающие «ворота». Эти импульсы по длительности и задержке совпадали с генерацией. Схема линейного пропускания была сконструирована нами так, что пропускала без искаже-

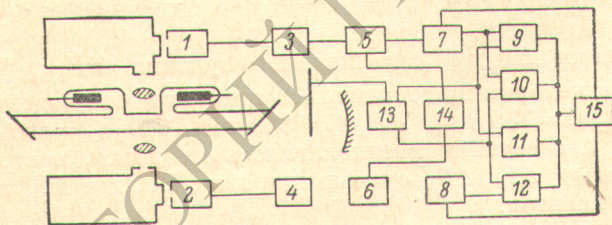


Рис. 2. Электрическая схема регистрации сигналов.

1, 2 — ФЭУ, 3, 4 — усилители, 5, 6 — схемы линейного пропускания, 7, 8 — цифровые вольтметры, 9, 10, 11, 12 — пересчетные приборы, 13 — модулятор, 14, 15 — генераторы импульсов.

ний импульсы амплитудой от 10 до 3000 мв и длительностью от 5 до 5000 мксек. Запас по амплитуде был выбран для устранения перегрузки от шумов. На выходе «ворот» стояла интегрирующая цепочка. Постоянные составляющие сигналов, снимаемые с интегрирующей цепочки, преобразовывались цифровыми вольтметрами 7, 8 в число импульсов, пропорциональное амплитуде поступающих сигналов. Эти импульсы накапливались на пересчетных приборах 9, 10, 11, 12. Генератор импульсов 15 запускал цифровые вольтметры и одновременно эти запускающие импульсы поступали в блок времени пересчетных приборов. Таким образом, пересчетные приборы показывали, как число импульсов, поступивших с цифрового вольтметра, так и число измерений, сделанных им.

Для устранения дрейфовых шумов была введена дополнительная модуляция. Модулятор 13 осуществлял прерывание генерации с помощью вращающегося обтюратора. Одновременно он осуществлял включение и

выключение пересчетных приборов таким образом, что при наличии генерации работали приборы 9, 11, а в отсутствие — 10, 12, причем время измерения и в том и в другом случае было одинаковым и задавалось блоком времени пересчетного прибора. Частота модуляции равнялась $1/8$ гц. Выбранная схема регистрации позволяла осуществлять накопление сигналов в течение времени, необходимого для получения заданного отношения сигнал/шум.

На описанной установке измерялось сечение передачи энергии при столкновении возбужденных атомов Cd с атомами He



Кювета с разрядом в парах Cd подсвечивалась лазерным излучением $\lambda = 1648$ нм ($4^3F_{2,3,4} - 5^3D_2$). Наблюдалось одновременно изменение в спон-

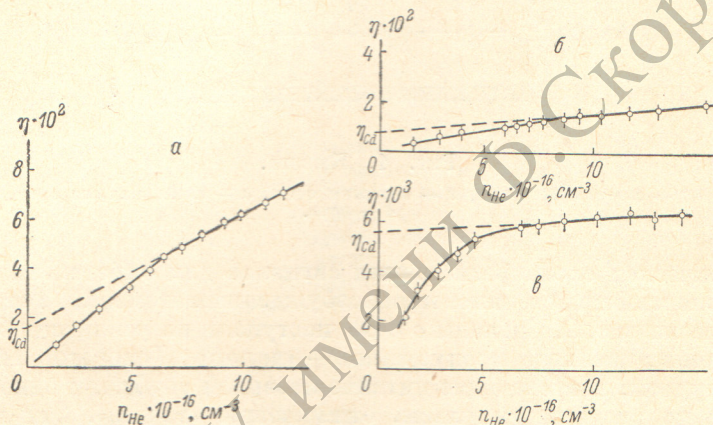


Рис. 3. Экспериментальные графики для определения сечения передачи энергии возбуждения с уровня $4^3F_{2,3,4}$ Cd.

а — на уровень 7^3P_2 , б — на уровень 6^1D_2 , в — на уровень 7^1P_1 .

танном излучении ΔI_{pq} с накачиваемого уровня $4^3F_{2,3,4}$ ($\lambda = 1648$ нм) и с уровнями, на которые предполагалась передача возбуждения при столкновениях 7^3P_2 ($\lambda = 735$ нм), 7^1P_1 ($\lambda = 820$ нм), 6^1D_2 ($\lambda = 466$ нм) — ΔI_{kl} . Интересующие нас сечения предполагалось получить, построив зависимость величины $\eta = \Delta I_{kl} / \Delta I_{pq}$ от концентрации He, где ΔI_{kl} и ΔI_{pq} выражены в числе квантов.

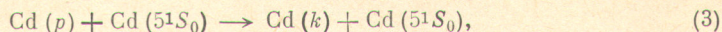
Если предположить, что с изменением давления He остальные факторы, влияющие на передачу энергии возбуждения, не изменяются, то искомые сечения можно определить по формуле

$$\sigma_1 = \frac{\partial \eta}{\partial n_{\text{He}}} \frac{A_{pq}}{v_1 \tau_k A_{kl}}, \quad (2)$$

где τ_k — полное время жизни уровня k ; A_{kl} , A_{pq} — вероятности для спонтанного излучения наблюдаемых линий. Но в нашем случае есть по крайней мере две возможности косвенного влияния изменения давления He на скорость передачи энергии возбуждения. Во-первых, при различных давлениях He одному и тому же значению тока (30 ма) могут соответствовать разные концентрации электронов, и поскольку передача энергии возможна при столкновении с электронами, это может повлиять на зависимость η от тока при различных давлениях He. При проверке в диапазоне от 10 до 60 ма зависимости от тока обнаружено не было.

Во-вторых, при нашей конструкции кюветы начиная с некоторого давления He уменьшение давления должно приводить к понижению концентрации Cd, что связано с тем, что скорость диффузии атомов Cd на холодные концы становится сравнимой со скоростью испарения Cd в остротках.

В том случае, когда в процессе передачи энергии существенный вклад вносит реакция



такое снижение концентрации Cd приведет к дополнительному уменьшению η . Действительно, как видно из рис. 3, при концентрациях He менее $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на графиках $\eta = \eta(n_{\text{He}})$ наблюдается излом, и при дальнейшем снижении концентрации n_{He} , $\eta \rightarrow 0$.

Учитывая последнее обстоятельство, при определении $d\eta/dn_{\text{He}}$ в формуле (2) мы использовали части кривой рис. 3 при $n_{\text{He}} > 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Сечения приведены в таблице. Значения величин A_{kl} и τ_k взяты из работы [7], а A_{pq} из [8]. Из графиков рис. 3 по величине отсечки по оси η можно оценить величину сечения для реакции (3) по формуле

$$\sigma_2 = \eta_{\text{Cd}} \frac{A_{pq}}{\tau_k A_{kl} v_2 n_{\text{Cd}}}, \quad (4)$$

Переход	$\sigma_1 \cdot 10^{16}, \text{ см}^2$	$\sigma_2 \cdot 10^{15}, \text{ см}^2$
$4^3F_{2,3,4} - 7^3P_2$	0.32 ± 0.08	10
$4^3F_{2,3,4} - 7^1P_1$	0.003 ± 0.002	3.2
$4^3F_{2,3,4} - 6^1D_2$	0.04 ± 0.01	2

где n_{Cd} — концентрация Cd, соответствующая давлению насыщающих паров при температуре печи $T = 555^\circ \text{ К}$.

Поскольку передача возбуждения с уровня $4^3F_{2,3,4}$ происходит на целую группу уровней, формула (2) не является строгой, так как она учитывает только прямую передачу энергии с уровня $4^3F_{2,3,4}$ на исследуемый. Очевидно, что соотношение (2) будет выполняться тем лучше, чем меньше отношение $\Delta n_k / \Delta n_p$, где Δn_k и Δn_p — изменение заселенностей уровней k и p в результате накачки, вычисленные из ΔI_{kl} и ΔI_{pq} . В наших измерениях отношение $\Delta n_k / \Delta n_p$ не превышало 0.03. Использование формулы (2) отчасти оправдано и тем, как нами было проверено, что линейность $\eta = \eta(n_{\text{He}})$ сохраняется вплоть до концентрации He $3.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Применяемая методика предполагает также, что возмущением n_0 и T_0 при подсветке можно пренебречь. Была сделана попытка экспериментально проверить, насколько оправдано это предположение. Для этого определялось отношение $\kappa = \Delta I_{ik} / I_{ik}$, где ΔI_{ik} — добавка, возникающая при подсветке, I_{ik} — интенсивность линии в разряде. Отношение κ было измерено как для исследуемых линий, так и для «контрольных» линий ($\lambda = 611 \text{ нм}$, переход $8^3P_2 - 6^3S_1$; $\lambda = 508.5, 467.9, 469.9 \text{ нм}$, переход $6^3S_1 - 5^3P_{0,1,2}$). Для исследуемых линий κ оказалось 10^{-2} , а для «контрольных» не превышало $2 \cdot 10^{-4}$. Даже эти незначительные добавки можно объяснить либо каскадными переходами (для уровня 6^3S_1), либо передачей энергии при столкновении (для уровня 8^3P_2). Таким образом, вклад, связанный с возмущением n_0 и T_0 в наблюдавшиеся добавки интенсивности на исследуемых линиях, незначителен.

Исследования, проведенные Е. Н. Котликовым на описанной установке показали, что в наших условиях неизотропностью излучения можно пренебречь.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить С. Э. Фриша за полезные обсуждения и интерес к работе.

Литература

- [1] С. Э. Фриш, Ю. З. Ионих. Опт. и спектр., 25, 171, 1968.
- [2] J. Vакos, J. Szigeti, J. of Physics B, 1, 1115, 1968.
- [3] J. Parks, A. Javan. Phys. Rev., 139, A1351, 1965.
- [4] N. Abrams, A. Wolga. Phys. Rev. Lett., 19, № 25, 1967.
- [5] А. Н. Дубровин, А. С. Тибилев, М. К. Шевцов. Опт. и спектр., 32, 1252, 1972.
- [6] A. Bloom, W. Veol, F. Lopez. Phys. Rev., 135, A578, 1964.
- [7] Я. Ф. Веролайнен, А. Л. Ошерович, Опт. и спектр., 20, 929, 1966.
- [8] В. Л. Зилигис. Опт. и спектр., 31, 161, 1971.

Поступило в Редакцию 1 июня 1972 г.