

ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КОНТУРА РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА ПЛАЗМЫ

В. И. Гладуцак, В. В. Скидан и Е. Я. Шрейдер

Контур резонансных линий исследовался методом линейчатого поглощения и сканированием электрическим полем. Показано, что наблюдаемые уширения резонансных линий связаны с присутствием метастабильных атомов и передачей энергии в результате ударов второго рода.

В настоящей работе исследовались контуры резонансных линий испускания атомов примеси в смесях различного состава. Основная часть работы посвящена исследованию контура линии L_α в смесях водорода с инертными газами. Для исследования контура применялось два метода [1].

1. Измерялось резонансное поглощение исследуемой линии при прохождении света через кювету, наполняемую соответствующим газом при различных давлениях. Оптическая плотность поглощающей среды для исследуемой линии была известна. По измеренным величинам поглощения подбирался контур линии испускания с параметрами $k'_0 l'$ и $k''_0 l''$. При подборе параметров контура мы исходили из двухслойной модели [2] ($k'_0 l'$ и $k''_0 l''$ — оптическая плотность излучающего и отражающего слоев соответственно).

2. Метод сканирования электрическим полем, заключающийся в том, что определяется зависимость поглощения исследуемой линии от напряженности электрического поля, в которое помещается поглощающая кювета [3]. Этот метод применялся для линии L_α водорода, которая состоит из центральной несмещаемой и двух боковых компонент, расстояние между которыми пропорционально напряженности электрического поля. Если сдвинутые в электрическом поле компоненты совпадают с горбами самообращенной линии испускания, наблюдается максимальное поглощение.

При малой оптической плотности поглощающей среды отношение поглощения при данной напряженности электрического поля к поглощению при нулевой напряженности зависит только от контура линии испускания, т. е. от оптической плотности излучающего и отражающего слоев.

Таким образом, экспериментально найденная зависимость поглощения от напряженности электрического поля дает возможность определить контур линии испускания. Установка и методика определения контура линии испускания описаны нами ранее [1, 4]. Нами определялся контур линии L_α в спектре смеси, содержащей 2% водорода в гелии, при давлении 0.5 тор.

На рис. 1, а и б приведены экспериментально найденные поглощения и подобранные к ним расчетные кривые. Обе кривые соответствуют контуру линии испускания с параметрами $k'_0 l' = 100$ и $k''_0 l'' = 7$.

Нами исследовались следующие смеси: 2% водорода в гелии, неоне, аргоне, криптоне, ксеноне, кислороде; 2% кислорода в криптоне, аргоне,

гелии и ксеноне; 6% криптона в аргоне и гелии; 3% ксенона в аргоне и гелии. Этими смесями заполнялась излучающая трубка; в поглощающую трубку вводились смеси, в которых было известно давление поглощающей примеси.

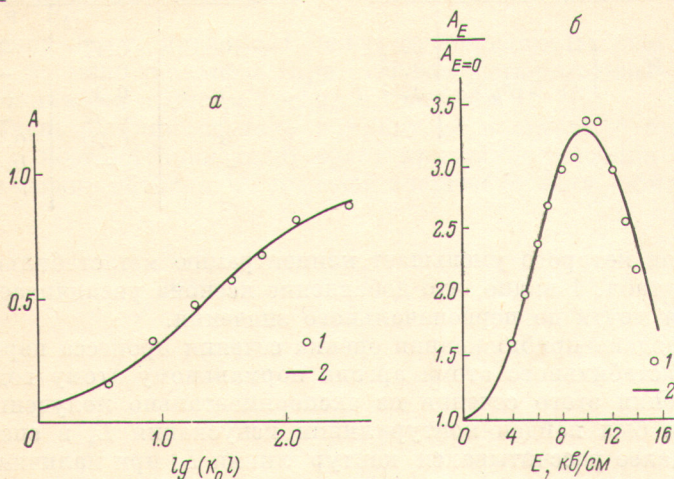
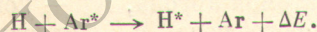


Рис. 1. Поглощение линии L_{α} .

a — зависимость поглощения A от оптической плотности $k_0 l$ поглощающего слоя, b — зависимость относительного поглощения от напряженности электрического поля E ; 1 — эксперимент, 2 — расчет; $k_0'' = 100$, $k_0''' = 7$.

На рис. 2 приведены кривые поглощения для водорода в различных смесях. Как видно из рис. 2, поглощение в гелии, неоне и ксеноне описывается одной и той же кривой, в то время как в аргоне и криптоне поглощение значительно меньше. Уменьшение поглощения наблюдается также для смеси водород—кислород по сравнению со смесью водород—гелий (табл. 1). Изменение кривых поглощения объясняется уширением линии L_{α} . Это уширение не связано с уширением верхнего уровня, так как найденная с помощью интерферометра Фабри—Перо ширина линии H_{α} для которой этот уровень является нижним, не зависит от состава смеси и определяется температурой газа.

Уширение линии L_{α} можно объяснить, предположив передачу энергии от метастабильных атомов аргона и криптона нормальным атомам, водорода по схеме



При этом атом водорода оказывается возбужденным, а избыточная энергия переходит в кинетическую и распределяется между соударяющимися партнерами обратно пропорционально их массам, т. е. практически переходит к атому водорода. Таким образом, создаются «горячие» атомы водорода, контур линии испускания которых много шире, чем доплеровский контур, соответствующий температуре атомов в разряде.

Нами был поставлен опыт, доказывающий, что аномальное уширение линии L_{α} (в смеси H_2 —Ar) обусловлено процессами, в которых участвуют метастабильные атомы аргона. К такой смеси добавлялся ксенон, присут-

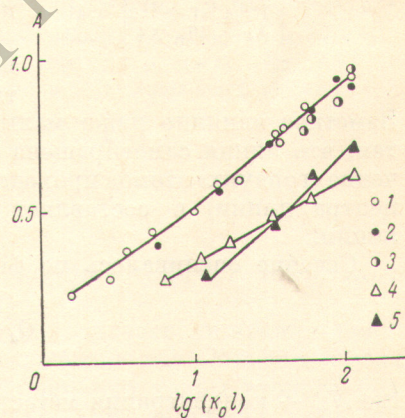


Рис. 2. Зависимость поглощения A линии L_{α} от оптической плотности $k_0 l$ поглощающего слоя в различных смесях.

1 — H_2 в He, 2 — H_2 в Ne, 3 — H_2 в Xe, 4 — H_2 в Ar, 5 — $H_2 + 18\%$ Kг в He.

Таблица 1

| Смесь | A | |
|------------------------|-------------|------|
| 20% H ₂ + { | He | 0.87 |
| | Ar | 0.54 |
| | Ar + 60% Xe | 0.74 |

Таблица 2

| $N_{гор.}/N_{возб.}, \%$ | $A_{расч.}$ | $A_{эксп.}$ |
|--------------------------|-------------|-------------|
| 10 | 0.17 | — |
| 5 | 0.24 | — |
| 3 | 0.30 | — |
| 1 | 0.42 | — |
| 0 | 0.70 | 0.70 |
| x | — | 0.40 |

ствие атомов которого уменьшает концентрацию метастабильных атомов аргона. Из табл. 1 видно, что добавление ксенона увеличивает величину поглощения почти до первоначального значения.

Нами сделана приближенная оценка сечения процесса передачи энергии от метастабильного атома аргона нормальному атому водорода.

Для оценки этого сечения из экспериментально полученной кривой поглощения был найден контур линии испускания L_{α} в спектре смеси H₂—He. Далее рассчитывался контур линии L_{α} при наличии «горячих» атомов. Зная контур линии, можно рассчитывать зависимость относительного поглощения от напряженности электрического поля (рис. 3). Как видно из рис. 3, даже если концентрация «горячих» атомов ($N_{гор.}$) составляет 1% от числа атомов, возбужденных электронным ударом ($N_{возб.}$), вид кривой существенно меняется. Из сопоставления кривых, приведенных на рис. 3, следует, что экспериментальная кривая соответствует концентрации $\sim 1\% \div 3\%$. Можно оценить также концентрацию «горячих» атомов и по изменению абсолютной величины поглощения, если концентрация поглощающих атомов известна (табл. 2).

Экспериментально измеренная величина поглощения 0.40 близко совпадает с рассчитанной для добавки «горячих» атомов в 1%.

Заметное влияние даже малых количеств «горячих» атомов объясняется тем, что линия самообращена и ее центральная часть поглощена, а излучение «горячих» атомов проходит беспрепятственно (за исключением самого центра линии) и составляет значительную долю общей интенсивности линии.

Сечение оценивалось по формуле

$$\bar{Q}_a = \frac{N_{гор.}}{N_{возб.}} \frac{N_e}{N_m} \frac{\bar{Q}_e \bar{v}_e}{\bar{v}_a},$$

где N_m — концентрация метастабильных атомов аргона, N_e — концентрация электронов, \bar{Q}_a — сечение удара второго рода, \bar{v}_a — относительная скорость атомов водорода и аргона, \bar{Q}_e — среднее значение сечения электронного возбуждения, \bar{v}_e — средняя скорость возбуждающих электронов. Отношение N_m/N_e оценивалось по кривым, полученным Разумовской при исследовании разряда в аргоне [5]; \bar{Q}_e, \bar{v}_e рассчитывались по формулам, приведенным в [6]. На основании этих оценок $\bar{Q}_a \sim 10^{-18} \text{ см}^2$.

По уменьшению величины поглощения было также обнаружено, что линии резонансного мультиплета кислорода (1304 Å) в смесях O₂—Ar и O₂—Kr шире, чем в смеси O₂—He (табл. 3). Аналогичные уширения наблюдались и для линии OI 8446 Å, контур которой исследовался с помощью эталона Фабри—Перо. Уширение линии OI 1302 Å наблюдалось ранее и было объяснено передачей энергии от метастабильного атома аргона нормальному атому кислорода [7].

Если такая передача энергии и имеет место, то этот процесс не является единственной причиной уширения, так как ударами второго рода нельзя объяснить уширение линии $O\text{I } 8447 \text{ \AA}$ (3^3P-3^3S) в смеси O_2-Kr , поскольку уровень 3^3P расположен выше метастабильных уровней криптона $3P_0$ и $3P_2$.

Уширение линии кислорода может происходить за счет образования «горячих» атомов кислорода при взаимодействии молекул кислорода с метастабильными атомами аргона и криптона [8, 9].

Резонансные линии ксенона и криптона в смесях с аргоном также уширены и поэтому происходит сдвиг кривой поглощения (рис. 4). Это уширение можно объяснить передачей энергии от метастабильных атомов

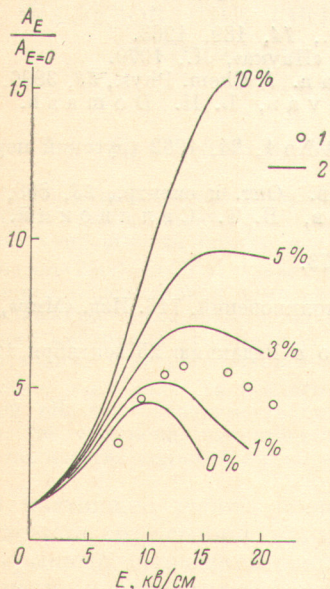


Рис. 3. Зависимость относительного поглощения $A_E/A_{E=0}$ линии L_α для различных концентраций «горячих» атомов от напряженности электрического поля E .

1 — эксперимент, 2 — расчет.

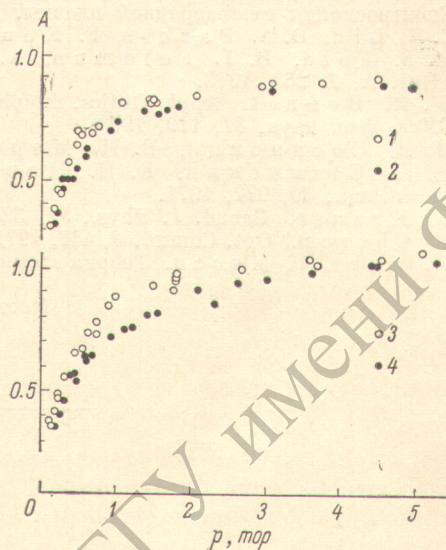


Рис. 4. Зависимость поглощения A линий He ($\lambda 1295 \text{ \AA}$) и Kr ($\lambda 1236 \text{ \AA}$) от давления p в поглощающей кювете.

1 — He в He , 2 — He в Ar , 3 — Kr в He , 4 — Kr в Ar .

аргона нормальным атомам криптона и ксенона. Эффект значительно меньше, чем для смесей H_2-Ar и H_2-Kr .

Таким образом, мы наблюдаем целый ряд случаев уширения линии испускания при изменении состава светящейся смеси. Механизм уширения не всегда до конца ясен, но бесспорно, что удары второго рода играют существенную роль в этих процессах. Так, например, уширение линии L_α в присутствии атомов криптона и аргона нам кажется возможным объяснить только с помощью ударов второго рода. Появление «горячих» атомов за счет перезарядки по схеме $Ar^+ + H \rightarrow Ar + H^+$ с последующей рекомбинацией $H^+ + e \rightarrow H$ маловероятно, так как в этом процессе не участвуют метастабильные атомы аргона, роль которых мы считаем доказанной.

В смеси H_2-Ar наблюдается передача энергии за счет ударов второго рода при $\Delta E \sim 1.4$ эв. Аналогичные процессы, связанные с передачей больших энергий, ранее наблюдались в ряде работ по сенсibilизированной флуоресценции [10-13]. Нельзя считать, что эти наблюдения противоречат теории, так как представление о малой вероятности таких процессов связано с расчетами, выполненными в предположении отсутствия «точки пересечения» [14]. Справедливость такого предположения для каж-

дой конкретной задачи можно проверить только, имея детальные сведения о потенциальных кривых взаимодействия атомов.

В заключение мы благодарим А. Н. Зайделя за обсуждение результатов работы и студентку Физического факультета ЛГУ А. В. Георгиеву за участие в эксперименте.

Литература

- [1] В. В. Скидан, В. И. Гладущак, Е. Я. Шрейдер. Тр. III Всесоюз. конф. по спектр. вакуумного ультрафиолета, ВУФ 72, 174, Харьков, 1972.
- [2] W. Braun, T. Carrington. J. Quant. Spectr. Rad. Trans., 9, 1133, 1969.
- [3] J. Vanier. Appl. Opt., 6, 167, 1967.
- [4] В. В. Скидан, Е. Я. Шрейдер. Опт. и спектр., 27, 532, 1969; 28, 627, 1970.
- [5] Л. П. Разумовская. Опт. и спектр., 14, 189, 1963.
- [6] Спектроскопия газоразрядной плазмы. Изд. «Наука», Л., 1970.
- [7] C. L. Lin, D. A. Parkes, F. Kaufman. J. Chem. Phys., 53, 3896, 1970.
- [8] M. S. Feld, V. J. Feldman, A. Javan, L. H. Domash. Phys. Rev. A, 7, 257, 1973.
- [9] W. R. Bennet. Appl. Optics. Supplement No 1, 24, 1962 (русский перевод: Усп. физ. наук, 81, 119, 1963).
- [10] М. Л. Сосинский, Е. Н. Морозов. Опт. и спектр., 23, 868, 1967.
- [11] М. Л. Сосинский, Е. Н. Морозов, В. Т. Селявский. Опт. и спектр., 30, 972, 1971.
- [12] L. Krause. Canad. J. Phys., 51, 334, 1973.
- [13] В. Черон. Opt. Comm., 3, 437, 1971.
- [14] Н. Мотт, Г. Месси. Теория атомных столкновений. 716. Изд. «Мир», 1969.

Поступило в Редакцию 25 сентября 1973 г.
