

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СТРУКТУРЫ СЕЧЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ $3p^2P$ УРОВНЯ ИОНА МАГНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

*И.П. Запесочный, А.И. Дащенко, В.И. Фронтов, А.И. Имре
А.Н. Гомонай, В.И. Лендьел, В.Т. Навроцкий, Е.П. Сабад*

Методом пересекающихся электронного и ионного пучков впервые изучена резонансная структура сечения возбуждения $3p^2P$ уровня иона Mg II в области энергий от порога возбуждения до порога ионизации Mg II. Экспериментальное сечение хорошо согласуется с результатами теоретического расчета, выполненного диагонализационным методом.

Точные данные о процессах возбуждения ионов электронами приобретают в последнее время все большую актуальность в связи с потребностями физики плазмы и смежных с ней прикладных областей. В этих процессах важную роль играют короткоживущие автоионизационные состояния (АИС), безызлучательный распад которых приводит к сложной резонансной структуре сечений возбуждения. В этом отношении ион магния представляет особый интерес, поскольку процессы с участием ионов щелочноземельных электронов играют чрезвычайно важную роль в астрофизических и других исследованиях. Изучение влияния роли резонансов на детальное поведение функции возбуждения стало возможным только в последнее время благодаря использованию современной техники эксперимента, автоматизации исследований, а также новейших теоретических методов расчета.

Экспериментальное исследование процесса возбуждения $3p^2P$ уровня иона магния электронным ударом было проведено на сверхвысоковакуумной установке. Ионы магния, образующиеся в разрядном источнике, формировались ионно-оптической системой линз в пучок сечением $2 \times 2 \text{ мм}^2$, ускорялись до энергии 1 кэВ, отделялись от нейтральных атомов 90° электростатическим конденсатором, проходили область столкновений и регистрировались глубоким цилиндром Фарадея. Ионный пучок с величиной тока $\sim 4 \text{ мкА}$ в условиях вакуума 10^{-8} торр пересекался под прямым углом с ленточным электронным пучком сечением $0,5 \times 6 \text{ мм}^2$, величиной тока 4 – 30 мкА в энергетическом интервале 4 – 30 эВ при энергетической неоднородности $\Delta E_{1/2} \sim 0,3 \text{ эВ}$. Монокинетизация электронного пучка осуществлялась 90° -ным электростатическим селектором электронов.

Спектральное разделение излучения производилось светосильным дифракционным монохроматором МДР-2 с обратной линейной дисперсией 2 нм/мм. Ввиду незначительного (0,01 эВ) мультиплетного расщепления $3p^2P$ терма Mg II спектральное разделение компонент резонансного дублета в наших условиях оказалось невозможным и поэтому регистрировалось суммарное излучение соответствующих спектральных переходов с $\lambda = 279,6 + 280,3 \text{ нм}$. Это

излучение детектировалось в режиме счета фотоэлектронным умножителем ФЭУ-106. Для отделения полезного сигнала от суммарного фона, обусловленного столкновениями электронов и ионов с атомами остаточного газа, использовалась техника модуляции пучков. Интенсивность полезного сигнала была 6 имп/с при соотношении сигнал/суммарный фон 1/5. Суммарное время накопления полезного сигнала в каждой экспериментальной точке составляло ~ 20 мин. Эксперименты проводились с помощью измерительно-управляющего комплекса на базе мини-ЭВМ „Электроника 100/И”¹. При этом автоматически по заданной программе осуществлялось циклическое сканирование энергии электронов в интервале 3,6 – 15,6 эВ с шагом 0,1 – 0,2 эВ, сбор, накопление и предварительная обработка экспериментальной информации.

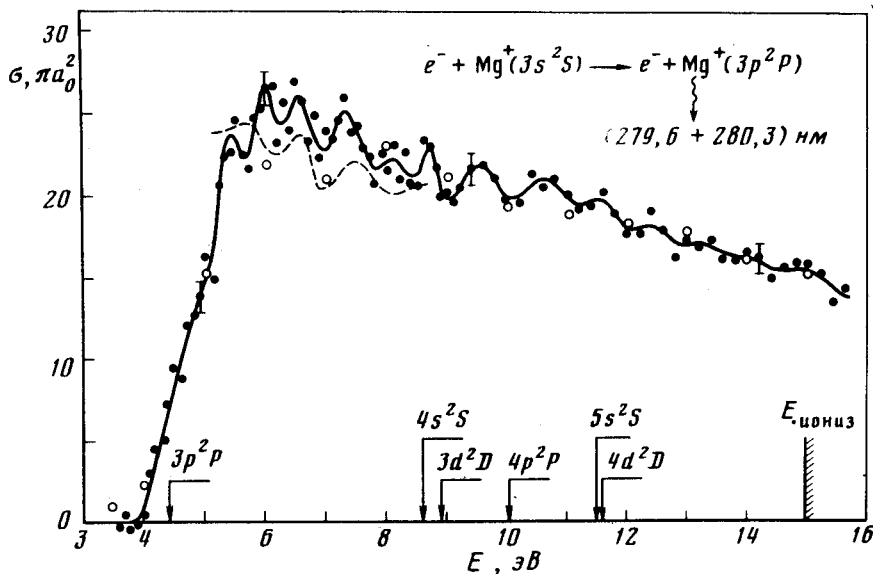


Рис.1. Энергетическая зависимость сечения возбуждения $3p^2P$ уровня $Mg II$: ● – данный эксперимент, сплошная кривая – результат цифровой фильтрации, ○ – эксперимент³, пунктирная кривая – данный расчет

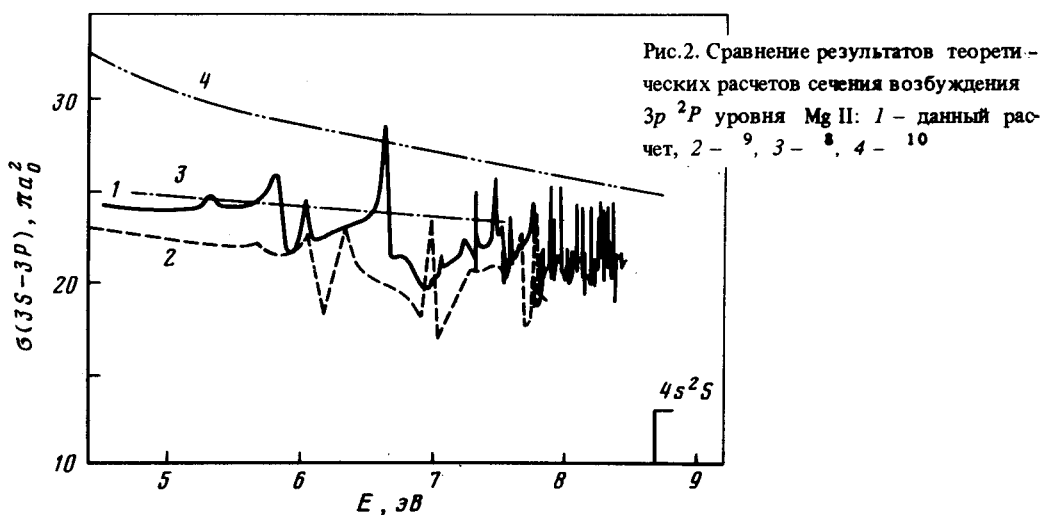


Рис.2. Сравнение результатов теоретических расчетов сечения возбуждения $3p^2P$ уровня $Mg II$: 1 – данный расчет, 2 – ⁹, 3 – ⁸, 4 – ¹⁰

Экспериментально полученная энергетическая зависимость сечения возбуждения резонансного уровня $Mg II$ представлена на рис.1. Вертикальными отрезками указан 90%-ный доверительный интервал относительных измерений. Сплошной линией приведен результат обработки

на ЭВМ экспериментальных данных методом цифровой фильтрации². Величины абсолютных сечений получены путем сравнения с результатами ранее проведенного исследования данного процесса при энергетической неоднородности электронов $\Delta E_{1/2} \sim 1$ эВ³. Пунктирной линией показан результат теоретического расчета сечения, усредненного по энергетическому распределению электронов в пучке. Расчет сечения возбуждения $3p^2P$ уровня Mg II при энергиях электронов от порога возбуждения этого уровня (4,43 эВ) до порога возбуждения $4s^2S$ уровня (8,66 эВ) был проведен диагонализационным методом^{4,5}, впервые предложенным Балашовым с сотрудниками для изучения резонансной фотоионизации атомов. Волновые функции дискретных состояний Mg II были рассчитаны в одноконфигурационном хартри-фоковском приближении с использованием программы MCHF 77⁶, для нахождения нерезонансной части амплитуды рассеяния использовалась программа IMPACT⁷.

Расчитанное нами сечение возбуждения $3p^2P$ уровня Mg II сравнивается на рис.2 с результатами расчетов методом сильной связи^{8,9} и методом Кулон – Борна¹⁰. В расчете⁸ резонансы вообще не были выявлены, что же касается расчета⁹, резонансная структура сечения возбуждения, полученная методом сильной связи $3s-3p-4s-3d$ состояний, хорошо согласуется по форме с результатами нашего расчета. Например, на обеих кривых видны пики, обусловленные $4s3d^3D$, $4s4p^3P$ и $3d4p^3F$ АИС Mg I (особенно четко наблюдается пик при энергии электронов 6,65 эВ, обусловленный $3d4p^3F$ АИС) и провалы, обусловленные $4s3d^1D$ и $3d4p^1F$ АИС Mg I. Однако резонансные особенности, полученные методом сильной связи, оказываются сдвинутыми в область больших энергий приблизительно на 0,3 эВ. Этот сдвиг связан с тем, что в расчете⁹ не была учтена дипольная поляризуемость $4s$ состояния Mg II. В наших же расчетах эта поляризуемость учитывалась путем включения в исходное разложение полной волновой функции $4pnl$ конфигураций Mg I⁵, что, как видно из рис.1, позволило получить очень хорошее согласие между нашим теоретическим сечением, усредненным по энергетическому распределению электронов в пучке и результатами эксперимента.

Таким образом, наблюдавшаяся в эксперименте структура вблизи порога возбуждения обусловлена захватом бомбардирующих электронов ионами магния с образованием короткоживущих атомарных АИС. Наличие структуры при энергиях электронов выше порога возбуждения $4s^2S$ уровня может быть объяснено суммарным вкладом за счет каскадных переходов с соответствующих уровней Mg II и АИС атома магния.

Литература

1. Дашенко А.И., Фронтов В.И., Панин Ф.Ф., Соломченко С.Г. Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по физике электронных и атомных столкновений, 1981, Ленинград, с.292.
2. Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982.
3. Запесочный И.П., Кельман В.А., Имре А.И., Дашенко А.И., Данч Ф.Ф. ЖЭТФ, 1975, 69, 1948.
4. Балашов В.В., Гришанова С.И., Круглова И.М., Сенашенко В.С. Оптика и спектроскопия, 1970, 28, 859.
5. Гайсак М.И., Лендвел В.И., Навроцкий В.Т., Сабад Е.П. УФЖ, 1980, 25, 1329; 1982, 27, 1617.
6. Froese-Fischer C. Comput. Phys. Comm., 1978, 14, 143.
7. Creech M.A., Seaton M.J., Wilson P.M.H. Comput. Phys. Comm., 1978, 15, 23.
8. Burke P.G., Moores D.L. J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., 1968, 2, 575.
9. Mendoza C. J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., 1981, 14, 2465.
10. Blaha M. Astron. Astrophys., 1972, 16, 437.

Ужгородский университет

Ужгородское отделение Института ядерных исследований
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
13 октября 1983 г.