

02;12

Исследование спектров рассеянных электронов на метастабильных атомах магния и стронция ($\dots nsnp^3P_{0,2}$)

© И.И. Шафраньош, В.И. Марушка

Ужгородский национальный университет

E-mail: shafr@iss.univ.uzhgorod.ua

Поступило в Редакцию 6 мая 2003 г.

Методом электронной спектроскопии в условиях пересекающихся пучков было исследовано упругое и неупругое рассеяние электронов на атомах магния и стронция, находящихся в основном в метастабильных состояниях. В спектрах потерь впервые выявлены линии, вызванные сверхупругим рассеянием электронов на метастабильных атомах магния и стронция ($\dots nsnp^3P_{0,2}$). Полученный результат указывает на высокую эффективность протекания сверхупругого процесса, сравнимую с эффективностями упругого рассеяния и электронного возбуждения нижних атомных уровней.

Введение. Взаимодействие электронов с метастабильными атомами по многим параметрам отличается от взаимодействия с атомами в основном состоянии, что обусловлено различными первичными свойствами атома-мишени (энергией возбуждения, поляризуемостью, геометрическими размерами). В частности, в работах [1–2] было установлено, что сечения возбуждения спектральных переходов магния и стронция из метастабильных состояний на два порядка и более превышают сечения возбуждения тех же спектральных переходов из основных состояний атомов. В связи с этим представляется интересным в одном эксперименте провести сравнение энергетических спектров электронов, рассеянных на атомах в основном и в метастабильных состояниях, поскольку они могут дать наглядное представление об относительной вероятности возбуждения нижних уровней атомов. Кроме того, открытым остается вопрос о процессе девозбуждения (ударах II рода) метастабильных состояний электронным ударом.

Экспериментальная установка. Исследования проводились в условиях пересекающихся электронного и атомного пучков. Основные узлы

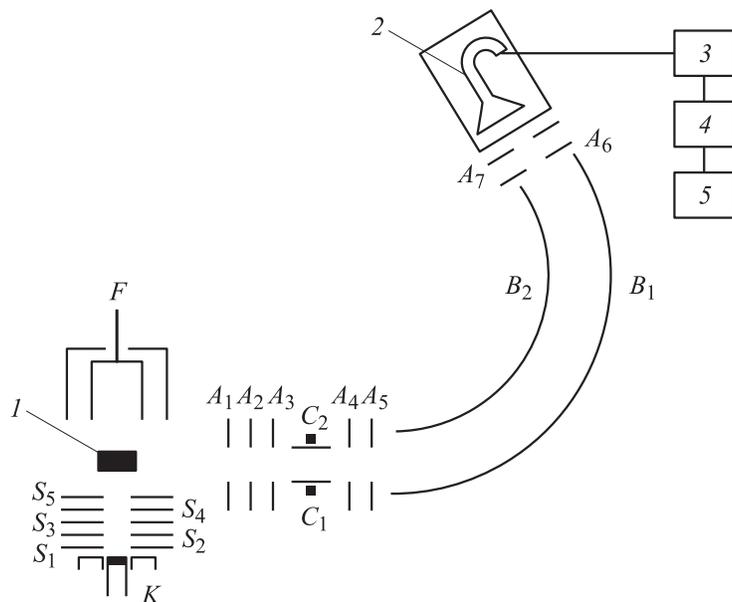


Рис. 1. Блок-схема измерений спектров потерь энергий: K — катод; S_1 – S_5 — электроды электронной пушки; F — приемник электронов; A_1 – A_7 — электроды 127° -ного цилиндрического анализатора; C_1, C_2 — пластины корректирующего конденсатора; B_1, B_2 — пластины 127° -ного цилиндрического конденсатора; I — атомный пучок; 2 — вторичный электронный умножитель; 3 — предварительный и широкополосный усилители; 4 — интенсиметр; 5 — двухкоординатный (X – Y) самописец.

установки: камера столкновений и система ее откачки, электронный спектрометр, включающий в себя источники пучков электронов и атомов, и анализатор энергий рассеянных электронов, система регистрации тока рассеянных электронов. В экспериментах с магнием для получения пучка электронов использовалась пятиэлектродная электронная пушка, а со стронцием — 90° -ный цилиндрический монохроматор. Блок-схема записи спектров потерь приведена на рис. 1. Параметры первичного пучка электронов были следующие: энергия электронов составляла $10 \div 15$ eV, сила тока пучка электронов в зоне столкновений для пушки

и монохроматора составляла соответственно ~ 25 и $\sim 2 \mu\text{A}$, а энергетическая неоднородность пучка электронов — соответственно ~ 0.4 и $\sim 0.2 \text{ eV}$.

Для получения пучка атомов в основном состоянии в работе применялся термический источник эффузионного типа. Пучок атомов в метастабильных состояниях получали разрядным методом, который вместе с методикой измерения концентрации метастабильных атомов магния и стронция подробно описан в работах [3–4].

Анализатор энергий рассеянных электронов был создан на базе 127° -ного цилиндрического конденсатора с молибденовыми электродами, радиусы которых составляли 32.7 и 37.5 см. Потенциал на электродах 127° -ного конденсатора изменялся в пределах $2 \div 5 \text{ V}$, а потенциал корректирующего конденсатора составлял $0 \div 1 \text{ V}$.

Система регистрации рассеянных электронов работала в импульсном режиме с непрерывной разверткой спектра и аналоговой формой записи сигнала. Она включала в себя детектор электронов, тракт усиления сигнала, блок развертки и двухкоординатный ($X-Y$) самописец. Детектором электронов служил каналный электронный умножитель типа ВЭУ-6.

Электронный спектрометр с элементами системы регистрации помещался на съемном фланце внутри камеры столкновений. Подготовка к измерениям включала продолжительный прогрев и очистку поверхностей электродов источника пучка электронов и анализатора в условиях высокого вакуума. Эксперимент проводился при вакууме $\sim 3 \cdot 10^{-7} \text{ Torr}$.

Методика исследований. Пучок частиц исследуемого элемента, содержащий атомы в основном и метастабильных состояниях, направлялся в область столкновений, где под прямым углом пересекался с первичным пучком электронов. Рассеянные электроны наблюдались под углом 90° к осям распространения электронного и атомного пучков и детектировались умножителем ВЭУ-6. В данных экспериментах был реализован режим записи спектров потерь энергии (energy loss mode), при котором фиксируется энергия падающих электронов, а анализатор настраивается на последовательное пропускание групп рассеянных электронов с различными энергиями. Система регистрации функционировала следующим образом. Одноэлектронные импульсы с выхода ВЭУ-6, усиленные предварительным и широкополосным усилителями, поступали на вход измерителя скорости счета импульсов. Аналоговый сигнал с последнего подавался на вход Y самописца. С помощью

блока развертки (на базе цифроаналогового преобразователя Ф 4810/1) осуществлялось линейное сканирование спектра по энергии, для чего на входную щель анализатора A_5 и на вход X самописца подавался сканирующий потенциал (в пределах от 0 до 10 В).

Изложенная методика давала возможность записывать спектры рассеянных электронов на атомах, находящихся как в основном, так и в метастабильных состояниях. Калибровка энергии первичного пучка электронов осуществлялась с использованием вольт-амперной характеристики с точностью ± 0.1 eV. Калибровка энергетической шкалы в спектре потерь велась относительно линии (пика) упругорассеянных электронов, положение которой бралось за ноль, с точностью ± 0.15 eV.

С целью проверки корректности предложенной методики и выбора оптимального режима работы спектрометра были поставлены контрольные опыты. Полученные нами спектры электронов, рассеянных на атомах магния и стронция, в основном состоянии сопоставлялись с известными ранее данными [5–6], в результате чего отмечено их удовлетворительное согласие. Достигнутая энергетическая разрешающая способность спектрометра (~ 0.4 eV для пушки и ~ 0.2 eV для монохроматора) оказалась достаточной для выделения наиболее глубоких возбужденных уровней атомов магния и стронция. В работе приведены спектры электронов для энергии 15 eV, что обусловлено наилучшим соотношением сигнал/шум.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 показаны спектры электронов, рассеянных на атомах магния (*a*) и стронция (*b*) в основном и метастабильных $n^3P_{0,2}$ -состояниях. По оси абсцисс отложена энергия потерь рассеянных электронов в единицах электронвольт, а по оси ординат — ток рассеянных электронов в произвольных единицах.

Рассмотрим вначале случай рассеяния электронов на атомах магния в основном состоянии (спектр *1* на рис. 2, *a*). Доминирующий пик при нулевой потере энергии характеризует процесс упругого рассеяния на основном 3^1S_0 -состоянии атома. В области положительных потерь присутствуют две линии при энергиях ~ 2.7 и ~ 4.3 eV, соответствующие возбуждению нижних триплетных 3^3P - (первый пик) и синглетного 3^1P -уровней (второй пик). Поскольку триплетная структура терма 3^3P очень узкая ($\Delta E \approx 0.01$ eV), пики, соответствующие возбуждению компонент триплета, остались неразрешенными. В области отрицательных потерь отмечаем только статистические колебания фонового сигнала.

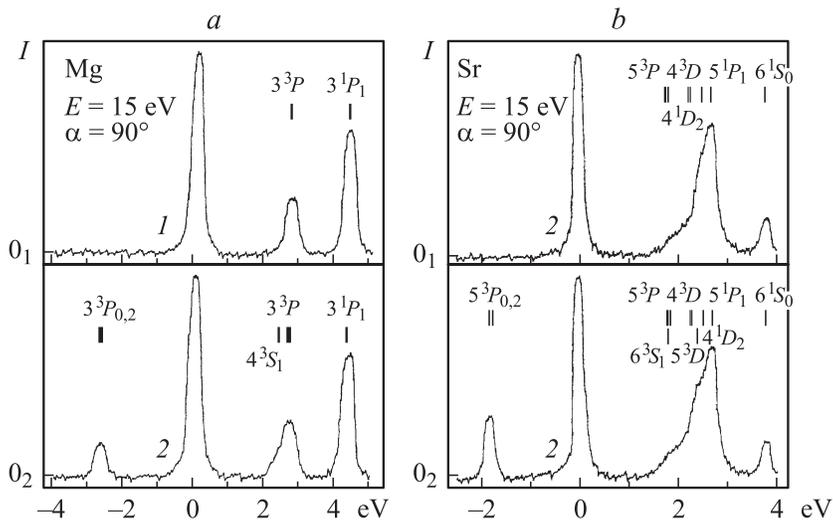


Рис. 2. Спектры потерь энергий электронов, рассеянных на атомах магния (*a*) и стронция (*b*) для энергии электронного пучка 15 eV и угла рассеяния 90° : *1* — в атомном пучке присутствуют атомы в основном состоянии; *2* — в атомном пучке присутствуют атомы в основном и метастабильных состояниях.

Иная картина наблюдается для случая, когда в атомном пучке присутствуют атомы в метастабильных состояниях (см. спектр *2* на рис. 2, *a*). Отличие в области положительных потерь энергий проявляется в уширении первого пика, приходящемся на энергию ~ 2.7 eV, за счет вклада процесса возбуждения 4^3S_1 -уровня с метастабильных $3^3P_{0,2}$ -состояний, что коррелирует с данными, полученными оптическим методом [1]. Отличий между пиками упругого рассеяния для спектров *1* и *2* нами не обнаружено. В области же отрицательных потерь при энергии ~ 2.7 eV заметно выделяется пик, не имеющий аналога на спектре *1*. Данную особенность мы объясняем процессом девозбуждения метастабильных $3^3P_{0,2}$ -состояний атома магния, в результате которого образуются „быстрый“ электрон и атом в основном состоянии. В литературе такой процесс называют сверхупругим рассеянием электронов.

Перейдем к результатам для атомов стронция. Вначале заметим, что величина полезного сигнала для стронция существенно выше, чем для магния. Наличие у стронция синглетного метастабильного уровня 4^1D_2 требовало повышения разрешающей способности спектрометра, которое было достигнуто применением 90° -ного монохроматора в качестве источника пучка электронов. Спектры рассеянных электронов на атомах стронция в основном и в метастабильных состояниях существенно отличаются (подобно результатам для магния). В спектре 1 (рис. 2, *b*) при нулевой энергии доминирует пик упругого рассеяния на основном 5^1S_0 -состоянии атома. В области положительных потерь выделяется интенсивная широкая линия с максимумом при энергии ~ 2.5 eV, соответствующая возбуждению сразу нескольких уровней — 4^3D , 4^1D и 5^1P_1 (энергия потерь равна соответственно ~ 2.2 , 2.5 и ~ 2.7 eV). Разрешающая способность спектрометра оказалась недостаточной для разделения этих линий. В области энергии ~ 3.8 eV хорошо проявляется пик, образованный вследствие возбуждения первого синглетного 6^1S_0 -уровня. Пик, соответствующий возбуждению триплетных метастабильных 5^3P -уровней (энергия потерь ~ 1.8 eV), проявляется только в виде слабой невыраженной особенности, лежащей у порога суммарного контура.

Спектр рассеянных электронов на метастабильных атомах стронция качественно подобен описанному выше для атомов магния, но более сложен по структуре. Так, в области положительных потерь при энергиях ~ 1.8 и ~ 2.4 eV отмечаем уширение суммарного контура за счет вкладов процессов возбуждения соответственно 6^3S_1 - и 5^3D -уровней с метастабильных 5^3P -состояний. В области же отрицательных потерь наблюдаем появление новой особенности, которая в спектре 1 отсутствует. Этот пик с максимумом при энергии ~ 1.8 eV мы объясняем процессом сверхупругого рассеяния электронов на триплетных метастабильных $5^3P_{0,2}$ -состояниях атома стронция.

Отсутствие в спектре 2 на рис. 2, *b* линии, вызванной сверхупругим рассеянием электронов на 4^1D_2 -состоянии, объясняется низкой концентрацией последних в области пересечения пучков. В экспериментах было выявлено, что концентрация в атомном пучке стронция синглетных метастабильных 4^1D_2 -состояний в 40–50 раз меньше, чем триплетных метастабильных $5^3P_{0,2}$ -состояний.

Заключение. Впервые получены энергетические спектры рассеяния электронов на метастабильных атомах магния и стронция и проведен их

сравнительный анализ со спектрами рассеяния на атомах в основном состоянии. В результате выявлены отличия в процессах возбуждения уровней 4^3S_1 -магния и 6^3S_1 -, 5^3D -стронция из основного и метастабильных состояний. Впервые обнаружено эффективное протекание процесса сверхупругого рассеяния электронов на триплетных метастабильных состояниях исследуемых атомов.

Список литературы

- [1] Шафраньош И.И., Снегурская Т.А., Алексахин И.С. // Опт. и спектр. 1994. Т. 76. № 1. С. 23–25.
- [2] Алексахин И.С., Небесный Ф.И., Семенюк Я.Н. и др. // Опт. и спектр. 1988. Т. 64. № 2. С. 431–433.
- [3] Shafranyosh I.I., Margitich M.O. // Z. Phys. D. 1996. V. 37. N 2. P. 97–101.
- [4] Маргитич Н.А., Шафраньош И.И. // Укр. физ. журн. 2000. Т. 45. № 1. С. 31–34.
- [5] Казаков С.М., Христофоров О.В. // Межвузов. сб. „Метастабильные состояния атомов и молекул и методы их исследования“. Чебоксары: Изд-во Чувашского госунив-та, 1981. С. 148–170.
- [6] Казаков С.М., Романюк Н.И., Христофоров О.В. и др. // Опт. и спектр. 1985. Т. 59. № 1. С. 38–43.