

УДК 539.186

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ И НЕВОЗБУЖДЕННЫХ ИОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

И. С. Дмитриев, Н. Ф. Воробьев, В. С. Николаев, Я. А. Теплова,
Ю. А. Файнберг

1. **Введение.** При изучении сечений перезарядки ионов гелия, углерода и кислорода [1, 2] была обнаружена осцилляционная зависимость этих сечений от заряда ядер атомов среды Z_t . Для изучения осцилляций сечений перезарядки метастабильных ионов в настоящей работе получены экспериментальные сечения захвата электрона в гелии, азоте, неоне и аргоне для пучков гелиеподобных ионов Li^+ , Be^{2+} и N^{5+} с различным количеством метастабильных частиц и выполнены теоретические расчеты сечений перезарядки невозбужденных и метастабильных ионов Li^+ , Be^{2+} и N^{5+} , находящихся в состояниях $(1s^2)^1S$ и $(1s2s)^1,3S$ соответственно, в соударениях с атомами среды с $Z_t = -1-36$.

2. **Описание экспериментов.** В опытах использовались выведенные из 72-см циклотрона со скоростью $v=8 \cdot 10^8$ см/с ионы Li^{2+} , Be^{2+} и N^{3+} . Измерения проводились на экспериментальной установке, которая аналогична описанной в [3]. Для получения пучков гелиеподобных ионов, содержащих различные относительные количества α метастабильных частиц, ускоренные ионы пропускались через тонкую целлулоидную пленку, после чего магнитным сепаратором из ионного пучка выделялись водородоподобные частицы Li^{2+} , Be^{3+} и N^{6+} , направляемые затем на тонкую (толщиной $\sim 10^{15}$ ат./см²) азотную проточную мишень, в которой в результате захвата электрона образовывались гелиеподобные ионы Li^+ , Be^{2+} и N^{5+} . Кроме того, гелиеподобные ионы получались также путем пропускания ионных пучков через целлулоидную мишень толщиной 2—3 мкг/см² (что соответствует $\sim 10^{17}$ ат./см²). Были использованы также пучки ионов Be^{2+} , выведенные непосредственно из ускорителя, и пучки ионов N^{5+} , образованные в процессе потери электрона литиеподобными частицами в тонкой газовой мишени.

По результатам измерений зарядовых распределений ионов, прошедших через камеру столкновений при двух—трех давлениях напускаемого газа, способом, изложенным в [3], были определены сечения потери и захвата электронов σ_{ik} , где i и k — начальный и конечный заряды ионов. Ошибка полученных сечений потери электрона $\sigma_{Z-2, Z-1}$ гелиеподобными ионами составляла величину 5—7%, а сечений захвата электрона $\sigma_{Z-2, Z-3}$ этими ионами — 10—15% (здесь Z — заряд ядра иона).

3. **Определение сечений перезарядки метастабильных и невозбужденных ионов.** Из полученных в эксперименте сечений потери электрона $\sigma_{Z-2, Z-1}$ и соотношения

$$\sigma_{Z-2, Z-1} = (1 - \alpha) \sigma_{Z-2, Z-1}^0 + \alpha \sigma_{Z-2, Z-1}^m, \quad (1)$$

где $\sigma_{Z-2, Z-1}^0$ и $\sigma_{Z-2, Z-1}^m$ — сечения потери электрона невозбужденными

и метастабильными ионами соответственно, были найдены относительные количества α метастабильных частиц в пучках гелиеподобных ионов, образованных различными способами. Значения $\sigma_{Z-2, Z-1}^0$ и $\sigma_{Z-2, Z-1}^m$ в гелии и азоте были взяты из работы [4]. Используемые значения сечений $\sigma_{Z-2, Z-1}^0$ и $\sigma_{Z-2, Z-1}^m$ в гелии и азоте и полученные средние (по результатам опытов в гелии и азоте) значения α показаны на рис. 1.

Экспериментальные сечения потери электрона $\sigma_{Z-2, Z-1}$ в зависимости от α показаны на рис. 1, а сечения перезарядки $\sigma_{Z-2, Z-3}$ — на рис. 2. Линейная экстраполяция экспериментальных сечений $\sigma_{Z-2, Z-3}$,

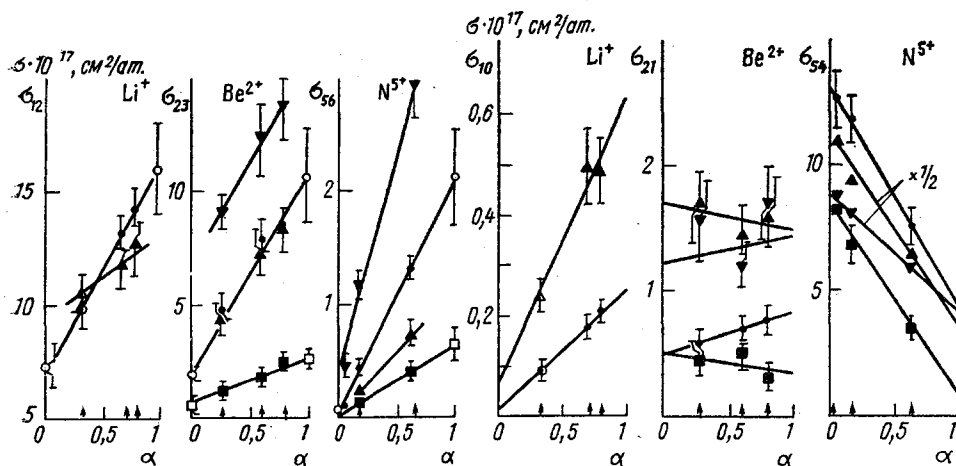


Рис. 1. Зависимость сечений потери электрона $\sigma_{Z-2, Z-1}$ от α для ионов Li^+ , Be^{2+} и N^{5+} в гелии (\square , \blacksquare), азоте (\circ , \bullet), неоне (\blacktriangle , \triangle) и аргоне (\blacktriangledown). Зачерненные значки — результат настоящей работы, светлые значки — значения $\sigma_{Z-2, Z-1}^0$ и $\sigma_{Z-2, Z-1}^m$ из [4], (\circ) и (\blacktriangle) — значения сечений для ионов Li^+ из [5], экстраполированных к скорости $v=8 \cdot 10$ см/с. Стрелками показаны полученные значения α

Рис. 2. Зависимость сечений захвата электрона $\sigma_{Z-2, Z-3}$ от α . Обозначения те же, что на рис. 1

соответствующих различным значениям α , к величинам при $\alpha=0$ и 1 дает сечения перезарядки невозбужденных и метастабильных ионов.

Из рис. 2 видно, что для ионов N^{5+} сечения σ_{54}^m существенно меньше сечения σ_{54}^0 ; отношения $\eta = \sigma_{54}^m / \sigma_{54}^0$ составляют 0,3—0,4 в азоте, неоне и аргоне и $\sim 0,1$ в гелии. Для ионов Be^{2+} величины $\eta = \sigma_{21}^m / \sigma_{21}^0$ во всех средах оказались близкими к 1, а для ионов Li^+ величины σ_{10}^m в азоте и неоне в 10—15 раз выше значений σ_{10}^0 .

С увеличением Z_t значения $\sigma_{Z-2, Z-3}^0$ изменяются немонотонно: для ионов Be^{2+} в гелии, азоте, неоне и аргоне величины этих сечений относятся как 1:1:3,4:2,4, а для ионов N^{5+} как 0,6:1:1,7:1,4, т. е. сечения в неоне больше, чем в азоте и аргоне. В противоположность этому для метастабильных частиц сечения $\sigma_{Z-2, Z-3}^m$ в обоих случаях практически монотонно увеличиваются с ростом Z_t : для ионов Be^{2+} в тех же средах сечения относятся как 0,4:1:2:2, а для ионов N^{5+} как 0,2:1:1,6:1,8.

4. **Методика расчета сечений перезарядки.** Сечения захвата электрона $\sigma_{z-2, z-3}$ вычислялись в приближении Оппенгеймера—Бринкмана—Крамерса (ОБК) при описании активного электрона водородоподобными волновыми функциями. Полные сечения перезарядки получались суммированием парциальных сечений захвата электрона σ^{nl} в состоянии nl с главным квантовым числом $n \leq 10$. Методика вычисления сечений перезарядки невозбужденных ионов $\sigma_{z-2, z-3}^0$ совпадает с описанной в работе [1]. Сечения перезарядки метастабильных ионов $\sigma_{z-2, z-3}^m$ рассчитывались с учетом того, что при захвате электрона в состоянии с $n \geq 2$ значительная часть образовавшихся литиеподобных частиц автоионизируется на пути от места их образования до анализатора зарядов. В частности, все литиеподобные частицы, находящиеся в дуплетных состояниях, за время $\tau \sim 10^{-13} - 10^{-15}$ с распадаются путем обычной автоионизации [6], а кватертные состояния с $n \geq 3$ быстро высвечиваются (путем радиационных переходов) в одно из нижайших кватертных состояний $(1s2s2p)^4 P_{1/2, 3/2, 5/2}$, которые являются метастабильными. Времена жизни τ_j атомов лития Li^0 и ионов бериллия Be^+ и азота N^{4+} в этих состояниях известны из работ [6, 7].

Из статистических соображений следует [6], что при захвате электрона метастабильными гелиеподобными ионами относительное количество образовавшихся литиеподобных частиц в кватертных состояниях с $j = 5/2, 3/2$ и $1/2$ составляет величину $(2j+1)/24$. С учетом этого выражение для измеряемого в эксперименте сечения захвата электрона $\sigma_{z-2, z-3}^m$ метастабильными ионами, находящимися в состояниях $(1s2s)^{1,3}S$ имеет вид

$$\sigma_{z-2, z-3}^m = \sigma^{1s} + A \left(\sigma^{2p} + \sum_{n \geq 3} \sigma^{nl} \right)$$

при $A = v(24L)^{-1} \sum_j [(2j+1)\tau_j e^{-\frac{R}{\tau_j v}} (1 - e^{-\frac{L}{\tau_j v}})]$,

где τ_j — время жизни литиеподобных частиц с полным моментом j , $L = 40$ см — длина камеры столкновений, $R = 20$ см — расстояние от выходного канала камеры столкновений до центра последнего анализирующего магнита. Для ионов Li^+ , Be^{2+} и N^{5+} значения A равны 0,47; 0,37 и 0,12 соответственно.

Поскольку приближение ОБК завышает сечения, рассчитанные сечения были нормированы на экспериментальные значения σ_{54}^0 для ионов N^{5+} в азоте, т. е. все вычисленные сечения были уменьшены в 9 раз.

5. **Результаты расчета сечений перезарядки.** Вычисленные сечения захвата электрона $\sigma_{z-2, z-3}^0$ и $\sigma_{z-2, z-3}^m$ невозбужденными и метастабильными ионами Li^+ , Be^{2+} и N^{5+} приведены на рис. 3, из которого видно, что расчеты качественно правильно воспроизводят экспериментальные зависимости этих сечений от Z_t и Z . Нормированные теоретические значения $\sigma_{z-2, z-3}^0$ и $\sigma_{z-2, z-3}^m$ для исследованных ионов согласуются с экспериментальными сечениями, как правило, в пределах 30—50%.

Из расчетов следует, что вследствие оболочечного строения атомов среды зависимость сечений $\sigma_{z-2, z-3}^m$ и $\sigma_{z-2, z-3}^0$ от Z_t является осцилирующей, максимумы ее обусловлены максимумами сечений захвата электронов из K , L и M оболочек атомов среды. Для ионов Li^+ и Be^{2+} максимумы функций $\sigma_{z-2, z-3}^m(Z_t)$ смещены в сторону больших Z_t от-

носителем максимумов функций $\sigma_{Z-2, Z-3}^0(Z_t)$, а для ионов N^{5+} максимумы этих функций располагаются практически при одних и тех же значениях Z_t . Это вызвано тем, что основной вклад в сечения перезарядки метастабильных ионов Li^+ и Be^{2+} вносит захват электрона в сильно связанное состояние $1s$, в то время как сечения перезарядки невозбужденных ионов Li^+ и Be^{2+} определяются захватом электрона в состоянии с $n \geq 2$. Сечения же перезарядки метастабильных ионов

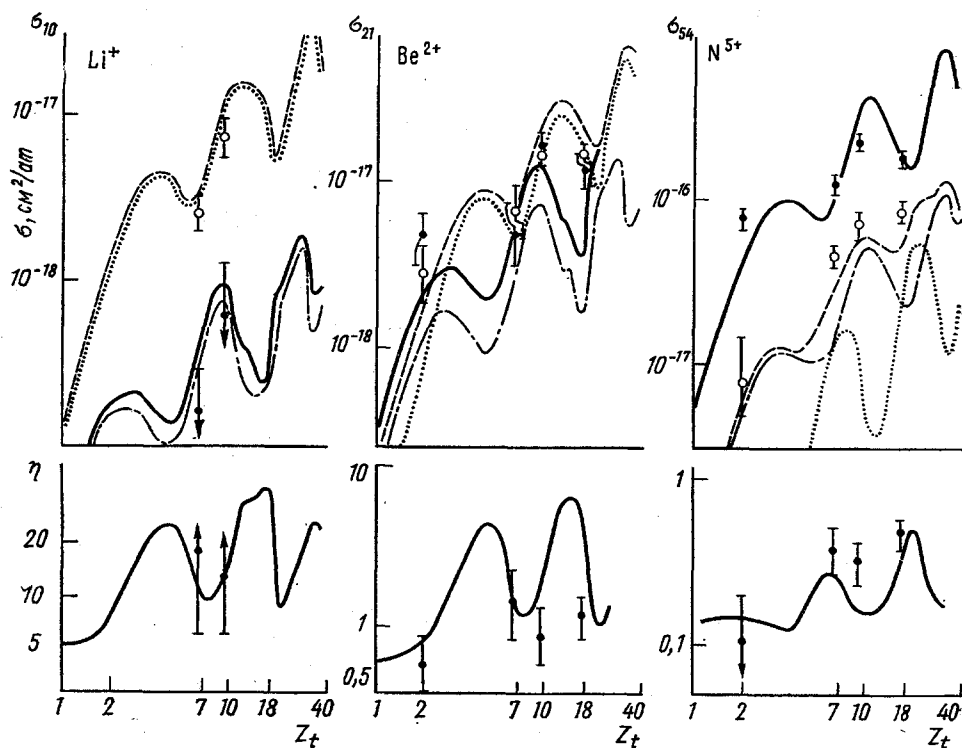


Рис. 3. Сечения $\sigma_{Z-2, Z-3}^0$ (●) и $\sigma_{Z-2, Z-3}^m$ (○) и отношения $\eta = \sigma^m / \sigma^0$ в зависимости от Z_t . Значки — экспериментальные величины. Линии — нормированные теоретические значения: полные сечения перезарядки невозбужденных (—) и метастабильных (---) ионов, парциальные сечения перезарядки метастабильных частиц в состоянии $1s$ (...) и в состоянии $2p + \sum_{n \geq 3} nl$ (— · — · —)

N^{5+} в большинстве сред, как и сечения перезарядки невозбужденных ионов N^{5+} , определяются захватом электрона в состоянии с $n \geq 2$. Для ионов N^{5+} перезарядка в состояние $1s$ вносит значительный вклад в сечение σ_{54}^m только в некоторых средах (например, азот и аргон), в которых сечения перезарядки в состоянии с $n \geq 2$ близки к минимальным (см. рис. 3).

В связи с этим для ионов Li^+ и Be^{2+} с изменением Z_t отношения сечений η сильно осциллируют, образуя максимумы при $Z_t = 4-5$ и $Z_t = 13-16$ и минимумы при $Z_t \sim 8$ и $Z_t \sim 20-25$, в то время как для ионов N^{5+} величины η осциллируют с заметно меньшей амплитудой, принимая максимальные значения при $Z_t = 6-7$ и $Z_t \sim 20$ и минималь-

ные значения при $Z_i=4$ и $Z_i \approx 12$. Таким образом, для ионов Li^+ и Be^{2+} найденные в эксперименте отношения η в азоте, неоне и аргоне близки к минимальным, а для ионов N^{5+} — к максимальным. Поэтому при столкновении ионов Li^+ и Be^{2+} с атомами с $Z_i=4$ и 13 следует ожидать больших значений η , а при соударении ионов N^{5+} с теми же атомами — более низких значений η (см. рис. 3).

6. Заключение. В результате проведенных экспериментов установлено, что во всех исследованных средах сечения перезарядки гелиеподобных ионов N^{5+} понижаются с увеличением относительного количества α метастабильных частиц в ионном пучке, сечения перезарядки ионов Be^{2+} почти не зависят от α , а для ионов Li^+ возрастают при увеличении α . Это объясняется тем, что у метастабильных ионов Li^+ преобладает перезарядка в состоянии $1s$, а у ионов N^{5+} в большинстве сред — перезарядка в состояниях с главным квантовым числом $n \geq 2$. Расчеты сечений перезарядки в приближении Оппенгеймера—Бринкмана—Крамерса качественно правильно описывают поведение экспериментальных сечений при изменении заряда ядер Z и атомов среды Z_i . Из расчетов следует, что при изменении Z_i сечения перезарядки для метастабильных и невозбужденных ионов и их отношения η испытывают значительные периодические колебания, амплитуда которых для более легких ионов больше, чем для ионов N^{5+} . Показано, что при перезарядке на атомах Be и Al сечения для метастабильных и невозбужденных ионов Li^+ , Be^{2+} и N^{5+} должны различаться в еще большей степени, чем при перезарядке в азоте, неоне и аргоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дмитриев И. С. и др. ЖЭТФ, 1983, 84, с. 1987. [2] Dmitriev I. S. et al. In: XII ICPEAC, Abstract of Papers. Berlin, 1983, p. 530. [3] Николаев В. С., Дмитриев И. С., Фатеева Л. Н., Теплова Я. А. ЖЭТФ, 1961, 40, с. 989. [4] Дмитриев И. С., Николаев В. С., Ташаев Ю. А., Теплова Я. А. ЖЭТФ, 1974, 67, с. 2047. [5] Пивовар Л. И., Левченко Ю. З., Кривоносов Г. А. ЖЭТФ, 1970, 59, с. 19. [6] Дмитриев И. С., Теплова Я. А., Николаев В. С. ЖЭТФ, 1971, 61, с. 1359. [7] Сафронова У. И., Сенашенко В. С., Симонов Г. А. В кн.: Автоионизационные явления в атомах и ионах. М.: Изд. АН СССР, 1983, с. 166.

Поступила в редакцию
24.06.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1986, Т. 27, № 1

УДК 539.213.2:535.211

НЕРАВНОВЕСНОЕ СВЕЧЕНИЕ СТЕКЛА ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

Н. Е. Каск, Е. Г. Лексина, Г. М. Федоров, М. Т. Яборов

Под действием лазерного излучения в прозрачных диэлектриках наблюдается ненаправленное свечение со сплошным спектром. Излучению области пробоя приписывается, как правило, равновесный тепловой характер с эффективной температурой $(3 \div 10) \cdot 10^3$ К [1, 2]. Выделение неравновесной компоненты в излучении усложняется газодинамическим разлетом плазмы пробоя, определяющим кинетику затухания свечения. За более слабое свечение, наблюдаемое до появления макроскопического разрушения, ответственны неравновесные процессы различной природы: 1) люминесценция примесных центров с аномально широким спектром (свыше $10\,000$ см⁻¹) [3, 4]; 2) рассеянная параметрическая люминесценция на неоднородностях кристалла [5]; 3) рекомбинационная люминесценция, в частности в антистоксовой области [6], возникающая при лазерном отжиге и фотовозбуждении центров окраски, наведенных лазерным излучением и аналогичных радиационным центрам окраски [7, 8]; 4) триболоминесценция [9, 10] и т. д.