

И-498

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

9 - 9186

ИЛЮЩЕНКО
Валерий Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОНИЗАЦИИ
В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1975

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель -
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Евгений Денисович
Донец .

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Сергей Емельянович
Куприянов ,

доктор технических наук
старший научный сотрудник

Игорь Александрович
Шелаев .

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
физико-технический институт АН СССР (г. Ленинград).

Автореферат разослан " " _____ 1975 года .

Защита диссертации состоится " " _____ 1975 года
в " " часов на заседании Ученого совета Лаборатории высоких
энергий Объединенного института ядерных исследований
(г. Дубна, Московской обл., ЛВЭ ОИЯИ, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

М. Ф. Лихачев / М. Ф. Лихачев

9 - 9186

ИЛЮЩЕНКО
Валерий Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОНИЗАЦИИ
В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Экспериментальное изучение процесса глубокой ионизации используется для проверки теоретических моделей неупругих соударений заряженных частиц и получения ценной информации по структуре и квантовым характеристикам атомных уровней.

Глубокая ионизация атомов и ионов (A^{m+}) электронным ударом $A^{m+} + ke \rightarrow A^{k+} + (n-m+k)e$ является одним из основных физических процессов, результаты которого учитываются при конструировании ионных источников, ускорителей тяжелых ионов, электронных пучков и т.п. приборов.

Особенно следует отметить постоянно растущую потребность в надежных экспериментальных значениях сечений ионизации σ_i в области атомной физики, физики плазмы и астрофизики. В большинстве указанных случаев требуются абсолютные значения в широком диапазоне энергий бомбардирующих электронов E_e .

Однако отсутствие эффективных экспериментальных методов привело к тому, что в настоящее время такие фундаментальные характеристики процесса, как сечения σ_i и ионизационные потенциалы I_i , известны далеко не для всех ионов элементов периодической системы.

В частности, полный набор I_i измерен только для элементов с $Z = 1 - 20$.

Для элементов с $Z = 21 - 39$ известны первые 4-20 ионизационных потенциалов, для элементов с $Z = 40 - 95$ - только первые 1-7 потенциалов I_i .

Сечения ионизации σ_i измерены только для первых двух -

трех ступеней процесса последовательной ионизации (каждая ступень соответствует отрыву одного электрона в одном соударении, т.е.

$n - m = k = 1$) и одной ступени процесса многократной ионизации в одном соударении, причем в относительно узком диапазоне энергий E_e /2/.

В диссертационной работе дан анализ процессов ионизации в условиях электронно-лучевого источника (ИЭЛ), рассмотрена конструкция и основные узлы ИЭЛ, приведены результаты экспериментальных исследований последовательной ионизации атомов и ионов углерода и азота и получены расчетные данные, которые адекватно отражают процессы, происходящие в ИЭЛ.

В диссертации четыре главы. Первая глава представляет собой краткое описание метода ионизации и основной схемы электронно-лучевого источника /3,4/. Магнитофокусированный электронный пучок с энергией в несколько кэВ и плотностью потока $\sim 100 \text{ A/cm}^2$ проходит внутри пространства дрейфа, откачанного до давления $10^{-8} - 10^{-10} \text{ Тор}$. Поле пространственного заряда электронного пучка и внешние электрические поля формируют топологически замкнутую протяженную ловушку, в которую инжектируются атомы и молекулы рабочего вещества. После однократной ионизации ионы рабочего вещества захватываются в ловушку и удерживаются в ней в течение времени ионизации $\tau_i \leq 100 \text{ мс}$. По окончании ионизации образующиеся многозарядные ионы (МЗИ) остаточного газа и рабочего вещества выводятся из источника на анализ. Глава заканчивается описанием электрического режима работы ионного источника ИЭЛ.

Во второй главе рассмотрены конструкция и основные узлы ИЭЛ. Анализируется расчет и критерии выбора основных параметров ИЭЛ, которыми являются следующие величины: энергия E_e и плотность j_e пучка ионизирующих электронов, напряженность магнитного поля B_x , глубина ямы пространственного заряда ионизирующих электронов E_r , давление остаточного газа p_B , время ионизации τ_i , потребляемая электрическая мощность питания P , интенсивность N_i и эмитанс \mathcal{E} ионного пучка.

Принцип действия ИЭЛ поясняется на рис. I /5/. В пространстве сверхвысокого вакуума создается протяженный электронный пучок с начальной плотностью тока I_0 (см. электронный ток I_0 на рис. Iб и относительно неглубокую потенциальную яму на рис. Iа). В момент времени t_0 за короткий промежуток Δt в электронный пучок вводится определенное количество положительных однозарядных ионов рабочего вещества. Распределение электрических потенциалов вдоль оси электронного пучка таково, что его конечные участки представляют собой барьеры для положительно заряженных частиц (см. рис. Iд, распределение потенциалов, отображенное сплошной линией). Далее в момент времени t_1 плотность тока электронного пучка возрастает до I_1 (ток I_1 на рис. Iб, глубокая потенциальная яма на рис. Iа). При этом амплитуды радиальных колебаний захваченных ионов уменьшаются. За время от t_1 до t_2 происходит ионизация ионов рабочего вещества до зарядности Z_i . В момент времени t_2 потенциал одного из конечных участков электронного пучка делается отрицательным по отношению к потенциалу всего пучка (см. распределение, отображенное штриховой линией на рис. Iд). При этом ионы покидают ловушку в аксиальном направлении.

Для исследования сечений последовательной ионизации требуется иметь определенное, регулируемое время инжекции Δt , которое должно быть малым по сравнению с τ_i . Для решения этой задачи был предложен метод электронного "регулятора" /4/.

В ионном источнике ИИД-1 использовалась электронная пушка с микроперевансом $P_{\mu} = 0,95$, соленоид с максимальной напряженностью 4 кГс и пять секций дрейфовой трубки длиной по 20, 20, 60, 20 и 20 мм соответственно. Схема электрического питания обеспечивала импульсы тока с напряжением до 6 кВ при длительности до 100 мс. При напряжении порядка 2,2 кВ были получены ионы O^{8+} , N^{7+} и C^{6+} , а также Au^{19+} /6-10/.

В ионном источнике ИИД-2 /5/ использовался также "теплый" соленоид и дрейфовая трубка с общей длиной около 1000 мм. Было показано также, что в электронном пучке можно накопить ионный заряд до 10^{11} элементарных зарядов. Кроме этого, было найдено, что при использовании "теплого" варианта не удается полностью избавиться от фона остаточного газа из-за отсутствия достаточно эффективных средств откачки дрейфовой трубки.

В ионном источнике КРИОН /11,12/ вместо обычного соленоида с водяным охлаждением используется сверхпроводящий соленоид длиной 1200 мм. Значение напряженности магнитного поля на оси дрейфовой трубки равно 15 кГс, микропереванс электронной пушки $P_{\mu} \approx 16$, напряжение катод - анод до 10 кВ, давление внутри дрейфовой трубки $\sim 10^{-11}$ Тор, время $t_1 - t_2 = \tau_i$ может достигать 1с. Количество ионов за импульс может быть равно 10^{12} /

при длительности экстракции ионов 100 мкс и цикличности - 1 Гц.

В отличие от ИИД, в ионном источнике КРИОН вывод ионов происходит при увеличении потенциала внутренних секций дрейфовой трубки до уровня потенциала аксиального запирающего. Преимуществом такого способа вывода является минимальный разброс аксиальных скоростей ионов в процессе вывода.

Экспериментальное изучение процесса последовательной ионизации ионов сводилось к тому, что в начальный момент времени за промежуток $\Delta t = 100 - 500$ мкс в электронный пучок вводилось $\sim 10^{11}$ ионов рабочего вещества. По истечении времени τ_i производился вывод МЗИ из КРИОНа и их анализ по времени пролета. Ионы на выходе времяпролетного спектрометра длиной около 1000 мм регистрировались ионным коллектором с предусилителем, коэффициент усиления которого не превышал 100.

В диссертации приведены результаты первых экспериментов по измерению сечений ионизации в цепочках вплоть до ядер C^{6+} и N^{7+} при энергиях электронов E_e выше 2000 эВ.

В третьей главе анализируются процессы получения ионов в ИИД. Основным процессом является последовательная ионизация электронным ударом. Предполагается, что обратные процессы, понижающие зарядность МЗИ, идут с пренебрежимо малой скоростью. Для расчета сечений последовательной ионизации применена формула Лотца для парциальных сечений /13,20/:

$$\sigma_{i \rightarrow j} = 4,5 \cdot 10^{-14} \cdot E_{i \rightarrow j} \cdot P_{\mu} \cdot E_e \cdot I_{i \rightarrow j} / E_e$$

где ϵ_{ne} - число эквивалентных электронов в nl - подоболочке,
 I_{ue} - потенциал ионизации nl - электрона.

При этом используется расчетный набор ионизационных потенциалов /14,15/.

С использованием расчетных потенциалов решается прямая задача ионизации, т.е. система уравнений вида

$$\frac{dq_i}{dt} = j e (\sigma_{i-1 \rightarrow i} q_{i-1} - \sigma_{i \rightarrow i+1} q_i) \quad (1)$$

с нормировкой $\sum_i q_i = 1$,

где q_i - доля ионов с зарядностью i ,

$\sigma_{i \rightarrow i+1}$ - сечение последовательной ионизации для перехода $i \rightarrow i+1$,

τ_i - время ионизации в секундах.

Пучок первичных электронов (e_p) проходит из электронной пушки внутрь дрейфовой трубки, ионизируя атомы рабочего вещества А и остаточного газа (фона) В. В процессе ионизации возникают медленные электроны (e_{is}). На выходе из соленоида пучок первичных электронов расходится вдоль силовых линий и бомбардирует поверхность электронного коллектора, при этом возникает вторичные электроны (e_s), которые могут попадать внутрь дрейфовой трубки, изменяя распределение электрических потенциалов. Таким образом, в пространстве ионизации имеется три электронных компонента - e_p , e_{is} и e_s , а также два семейства ионных компонента - A^{n+} и B^{m+} .

Электроны e_{is} уходят под действием электрических потенциалов

к конечным участкам дрейфовой трубки. При средней напряженности магнитного поля $H = (2,5 - 3,0) \text{ кГс}$ в ИЭЛ наблюдалось значительное токососедание за счет электронов e_s . В КРИОНе, где $H = (10 - 20) \text{ кГс}$, ток электронов e_s пренебрежимо мал. Таким образом, в пространстве ионизации КРИОН имеется фактически только компонента e_p .

Остаточный газ в ИЭЛ состоит из H_2 , CO , N_2 . В КРИОНе имеется только одна компонента остаточного газа - H_2 . По линиям H_2^+ и H^+ можно проводить калибровку времяпролетного спектрометра. В фоновом спектре наблюдается лишь одна линия - H^+ .

Для обеспечения оптимальных условий электронного формирования импульса инжекции ионов рабочего вещества A^+ и последующей ионизации используется импульс электронов e_p двухступенчатой формы. Импульс инжекции ионов A^+ формируется в течение первой ступеньки с относительно низкой энергией электронов e_p , при этом ионы заполняют относительно мелкую первичную потенциальную яму, глубина которой равна U_1 и радиус r_1 . Амплитуда колебаний ионов не превышает r_1 . Затем амплитуда электронного импульса адиабатически нарастает по экспоненте за время, равное нескольким периодам ионных колебаний в яме глубиной U_1 .

В конце этого времени нарастания энергия электронов становится равной $U_2 > U_1$ и радиус электронного пучка $r_2 \sim r_1$. Амплитуда колебаний ионов за время нарастания существенно не изменяется при одновременном повышении зарядности ионов. Затем в течение времени τ_2 происходит последовательная ионизация положительных ионов вплоть до А.

Вылет ионов за пределы электронного пучка под действием потенциала ионной сердцевинки приводит к ионизирующему фактору, $K \cdot j_e \cdot \tilde{\tau}_i$, где $K < 1$ учитывает время пребывания иона за пределами электронного пучка в точках поворота ионных траекторий.

Следует отметить, что рассмотренная выше модель процесса ионизации в КРИОНе изучена в экспериментальном плане еще далеко не достаточно и не полно.

Тем не менее имеются условия для исследования последовательной ионизации ионов $A^+ \rightarrow A^{2+} \rightarrow \dots \rightarrow A^{n+}$ при наличии однокомпонентного водородного фона H^+ и высокой эффективности удержания ионов в электронном пучке с ионизирующим фактором $j_e \cdot \tilde{\tau}_i \leq 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Спектр ионов на выходе источника состоит из небольшого числа линий, равного двум - трем в случае ионизации углерода и азота.

В четвертой главе представлены экспериментальные и расчетные результаты по определению сечений последовательной ионизации углерода и азота.

Ионизационная цепочка $C^{2+} \rightarrow C^{3+} \rightarrow C^{4+} \rightarrow C^{5+} \rightarrow C^{6+}$

Измеренные зарядовые спектры приведены на рис. 2.

Энергия первичных электронов равна $E_e = (2500 \pm 150) \text{ эВ}$. Ток пучка электронов $I_e = 1,5 \text{ А}$ при диаметре пучка 2 мм. В качестве рабочего газа применялся этилен C_2H_4 , поэтому, вероятно, линия

фонового водорода имеет относительно большую амплитуду на всех десяти кадрах в диапазоне $\tilde{\tau}_i = (2,5 - 19,5) \text{ мс}$. Ионизирующий фактор равен $(j_e \cdot \tilde{\tau}_i)_{\text{max}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

Полученные значения сечений вместе со среднеквадратичными ошибками приведены в таблице 1.

Для проверки полученных результатов, которые соответствовали решению обратной задачи ионизации, т.е. определению сечений, исходя из экспериментальных спектров зарядностей, мы выполнили расчеты прямой задачи ионизации по программе работ /13/.

Результаты расчета прямой задачи ионизации вместе с экспериментальными данными приведены на рис. 3.

Ионизационная цепочка $N^{3+} \rightarrow N^{4+} \rightarrow N^{5+} \rightarrow N^{6+} \rightarrow N^{7+}$

Измеренные спектры зарядностей ионов азота приведены на рис. 4.

Энергия первичных электронов равна $E_e = (2100 \pm 150) \text{ эВ}$. Ток электронного пучка $I_e = 1 \text{ А}$. Максимальный ионизирующий фактор $(j_e \cdot \tilde{\tau}_i)_{\text{max}} = 6,7 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

В КРИОН инжектировались молекулы N_2^0 . Пик фонового водорода имеет на всех восьми кадрах небольшую амплитуду в диапазоне $\tilde{\tau}_i = (5 - 39) \text{ мс}$.

Решения обратной задачи ионизации находились по формулам системы (1). Полученные значения сечений приведены в таблице 2. Результаты расчета прямой задачи ионизации по программе работ /13/ вместе с экспериментальными данными приведены на рис. 5.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. При помощи криогенного электронно-лучевого ионного источника КРИОН впервые измерены сечения последовательной ионизации углерода $C^{2+} \rightarrow C^{3+} \rightarrow C^{4+} \rightarrow C^{5+} \rightarrow C^{6+}$ при энергии ионизирующих электронов $E_e = 2500$ эВ. Сечения последовательной ионизации измерены также для ионов азота ($N^{3+} \rightarrow N^{4+} \rightarrow N^{5+} \rightarrow N^{6+} \rightarrow N^{7+}$) при $E_e = 2100$ эВ. Экспериментальные сечения сравниваются с расчетными. Показано, что расчетная постоянная $K \approx 4,5 \cdot 10^{-14} \text{ эВ}^2 \cdot \text{см}^2$.

2. С применением "теплого" варианта электронно-лучевого ионного источника (ИЭЛ-1) исследованы качественные характеристики процесса последовательной ионизации атомов остаточного газа в режиме непрерывной инжекции и атомов золота в режиме квазинепрерывной инжекции.

3. На ЭВМ БЭСМ-6 с помощью универсальной ФОРТРАН-программы выполнены расчеты потенциалов и сечений ионизации, а также прямой задачи ионизации для ряда элементов периодической системы.

4. Разработаны и испытаны две модели "теплого" электронно-лучевого ионного источника (ИЭЛ-1 и ИЭЛ-2) и схемы питания и управления криогенного электронно-лучевого ионного источника (КРИОН) /16-19/.

В диссертации 99 страниц текста, 29 рисунков. Список цитированной литературы содержит 89 названий.

Содержание диссертации изложено в работах /4-19/.

ТАБЛИЦА I

Экспериментальные и теоретические сечения последовательной ионизации атомов и ионов углерода при $E_e = 2500$ эВ

Сечения ($\times 10^{-20} \text{ см}^2$)	Эксперимент	Расчет по формуле Лотца /20/	Квантовомеханический расчет
$\sigma_{0 \rightarrow 1}$	-	2500	2200 (22)
$\sigma_{1 \rightarrow 2}$	800 ^{x)} (21)	810	700 (24)
$\sigma_{2 \rightarrow 3}$	200 \pm	300	400 (26)
$\sigma_{3 \rightarrow 4}$	57 \pm 12	120	140 (26)
$\sigma_{4 \rightarrow 5}$	30 \pm 7	20	28 (26)
$\sigma_{5 \rightarrow 6}$	14 \pm 2	6	9 (26)

Примечание: x) Экстраполированное значение. В графе "Эксперимент" указаны среднеквадратичные ошибки одной серии измерений без учета систематических ошибок о неоднородности в распределении плотности электронного тока j_e . Ошибки не указаны для сечений, измеренных однократно. Приведенные среднеквадратичные ошибки учитывают вклад побочных процессов ионизации - образование метастабильных ионов, автоионизации, оже - эффект и т.п., а также методические погрешности - неточность измерения площади под зарядовым пиком на оспиллограмме и т.п.

ТАБЛИЦА 2

Экспериментальные и теоретические сечения
последовательной ионизации атомов и ионов
азота при $E_0 = 2100$ эВ

Сечения ($\times 10^{-20}$ см ²)	Эксперимент	Расчет по формуле Лотца /20/	Квантовомеха- нический рас- чет
$\sigma_{0 \rightarrow 1}$	4000 х) (25)	2800	4400 х) (22)
$\sigma_{1 \rightarrow 2}$	700 х) (23)	960	1100 (24)
$\sigma_{2 \rightarrow 3}$	400 х) (21)	410	440 (24)
$\sigma_{3 \rightarrow 4}$	125 ± 22	180	250 (26)
$\sigma_{4 \rightarrow 5}$	39 ± 7	74	100 (26)
$\sigma_{5 \rightarrow 6}$	9 ± 2	11	21 (26)
$\sigma_{6 \rightarrow 7}$	$4 \pm$	4	7 (26)

х) См. примечание к таблице I.

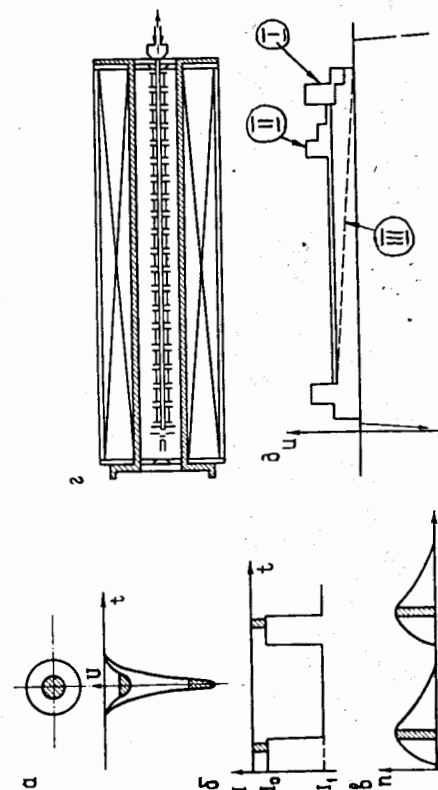


Рис. 1. Схема ионного источника ИЭЛ-2.
 а) радиальное распределение потенциала,
 б) импульс электронного тока,
 в) импульс ионный,
 г) ионный источник,
 д) аксиальное распределение потенциала.

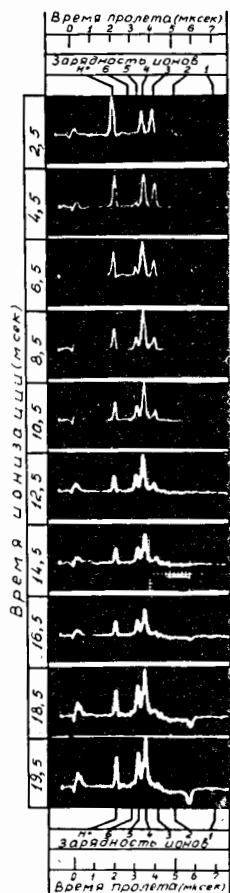


Рис. 2. Спектры последовательной ионизации положительных ионов углерода в КРИОН при $E_e = 2500$ эВ и $j_e = 2,5 \cdot 10^{20}$ эл/см²с.

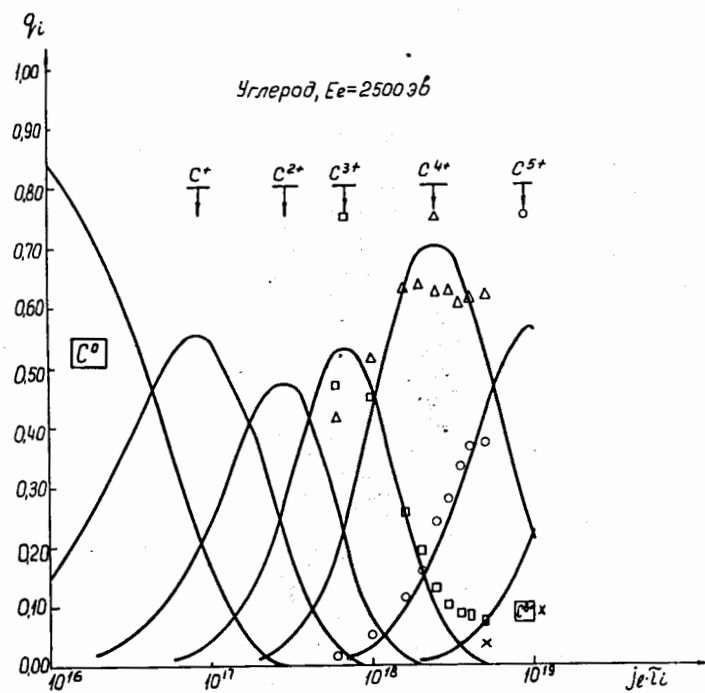


Рис. 3. Зависимость q_i от $j_e \cdot \tau_i$ для углерода при $E_e = 2500$ эВ (расчет и эксперимент).

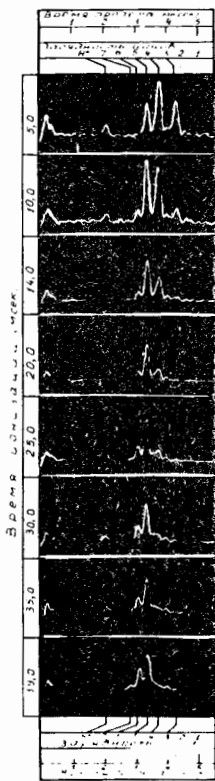


Рис. 4. Спектры последовательной
ионизации положительных ионов
азота в КРИОН, при $E_e = 2100$ эВ
и $j_e = 1,7 \cdot 10^{20}$ эл/см²с.

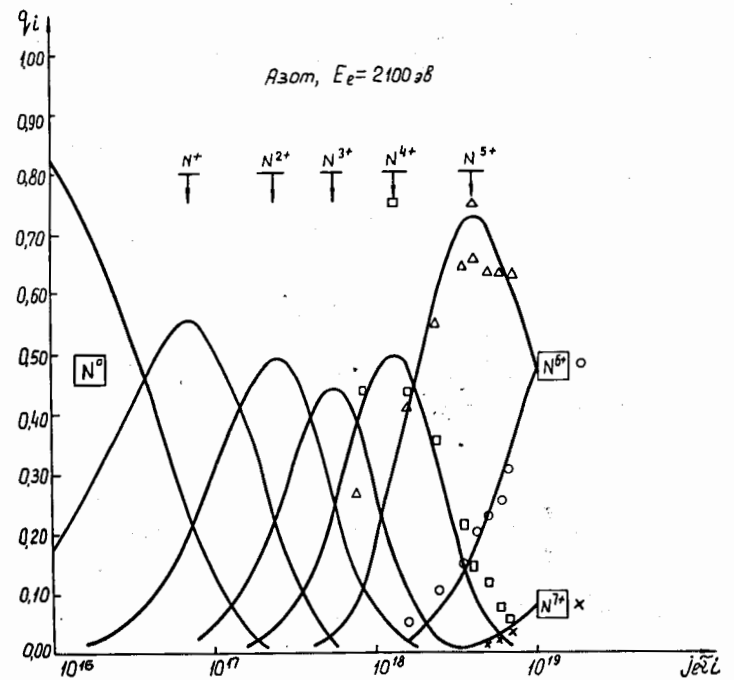


Рис. 5. Зависимость q_i от $j_e \cdot \sigma_i$ для азота
при $E_e = 2100$ эВ (расчет и эксперимент).

ЛИТЕРАТУРА

- I. Ch. Moore. Nat. Bur. Stand. Repts., Data Ser., 34, 1, 1970.
2. а) L. J. Kieffer, G. H. Dunn. Rev. Mod. Phys., 38, №1, 1, 1966.
б) L. J. Kieffer. Atomic Data, 1, 19, 120, 359, 1969.
3. Е.Д. Донец. Авторское свидетельство № 248860.
Бюллетень ОИПОТЗ, № 24, 1969.
4. Е.Д. Донец, В.И. Илщенко, В.А. Альперт. Авторское
свидетельство № 375708. Бюллетень ОИПОТЗ, № 16, 1973.
5. В.А. Альперт, Е.Д. Воробьев, Е.Д. Донец, В.И. Илщенко.
II Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, 1970,
т. I, II9, М., "Наука", 1972.
6. Е.Д. Донец, В.И. Илщенко, В.А. Альперт. ОИЯИ, Р7-4124, Дубна,
1968.
7. Е.Д. Донец, В.И. Илщенко, В.А. Альперт. ОИЯИ, Р7-4469, Дубна,
1969.
8. E. D. Donets, V. I. Ilyushchenko, V. A. Alpert. I Conf. Intern.
sur les Sources d'Ions, Saclay, 635, 1969.
9. Е.Д. Донец, В.И. Илщенко, В.А. Альперт. Тезисы докладов IV
Всесоюзной конференции по физике электронных и атомных столкно-
вений. Рига, "Зинатне", 52, 1969.
10. Е.Д. Донец, В.И. Илщенко, В.А. Альперт, Е.Д. Воробьев, А.И. Пикин.
Труды Международной конференции по физике тяжелых ионов.
ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971.
- II. а) Е.Д. Донец, А.И. Пикин. ОИЯИ, Р7-7999, Дубна, 1974.
б) Е.Д. Донец, В.И. Илщенко, А.И. Пикин, В.П. Овсянников.
IV Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц.
М., "Наука", 1974.

12. Е.Д. Донец, В.И. Илщенко. ОИЯИ, Р7-8310, Дубна, 1974.
13. В.И. Илщенко, В.И. Кочкин. ОИЯИ, 7-7226, Дубна, 1973.
14. В.И. Илщенко. ОИЯИ, 7-5560, Дубна, 1971.
15. В.И. Илщенко, В.И. Кочкин. ОИЯИ, 7-7227, Дубна, 1973.
16. В.И. Илщенко; Н.Н. Пляшкевич, В.Л. Степанюк. ОИЯИ, I3-6675,
Дубна, 1972.
17. В.И. Илщенко, В. Тушинский, Е. Хмелевский. ОИЯИ, I3-7591,
Дубна, 1973.
18. В.И. Илщенко, Р.Б. Кадыров, В.Л. Степанюк. ОИЯИ, I3-7771,
Дубна, 1974.
19. В.И. Илщенко, Д.А. Карягин, В.Л. Степанюк. ОИЯИ, I3-7772,
Дубна, 1974.
20. W. Lotz. Z. Phys., 216, 241, 1968.
21. K. L. Aitken, M. F. A. Harrison, R. D. Rundel. J. Phys. B, Atom.
Molec. Phys., 4, 1189, 1971.
22. K. Omidvar, H. L. Kyle, E. C. Sullivan. Phys. Rev. A, 5, №3, 1174, 1972.
23. M. F. A. Harrison, K. T. Dolder, P. C. Thonemann. Proc. Phys. Soc.,
82, 368, 1963.
24. D. L. Moores. J. Phys. B, Atom. Molec. Phys., 5, 286, 1971.
25. J. R. Peterson. III ICPEAC (1963), Atomic Collision Processes,
Amsterdam, 465, 1964.
26. K. Omidvar, A. N. Khateeb. J. Phys. B, Atom. Molec. Phys., 6, 341,
1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 сентября 1975 г.