

И. С. ДМИТРИЕВ, В. С. НИКОЛАЕВ, Я. А. ТЕПЛОВА

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ЗАРЯДА ИОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ИХ ЧЕРЕЗ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ

В экспериментальной ядерной и атомной физике твердые пленки используются для создания пучков ионов с большими зарядами, а также для образования ионов, находящихся в долгоживущих возбужденных состояниях [1, 2]. При этом желательно, чтобы толщина пленок была настолько мала, чтобы потерями энергии можно было пренебречь. Кроме того, целесообразно знать критическую толщину пленки, при которой распределение ионов по зарядам становится равновесным. Такое распределение является удобной характеристикой быстрых частиц: по ней можно судить о параметрах пучка.

Равновесную толщину пленки оценивают, используя сведения о сечениях потери и захвата электронов быстрыми ионами. Однако экспериментальных данных о величине этих сечений в твердом веществе мало [3, 4], так что для выполнения расчета приходится использовать аналогичные данные для газообразных сред, что в ряде случаев может оказаться некорректным. В твердом веществе состояние ионов между столкновениями не изменяется, так что сечения относятся к ионам, часть которых находится в возбужденных состояниях. В случае же разреженного газа за время между столкновениями возбужденные ионы успевают перейти в основное состояние.

Для получения сведений о „равновесных“ толщинах пленок и сечениях потери и захвата электронов быстрыми ионами был исследован зарядовый состав пучков ионов Be, B, N и O при $v \approx 8 \cdot 10^8$ см/сек ($E \approx 330$ кэв/нукл) и B и N при $v \approx 1,1 \cdot 10^9$ см/сек ($E \approx 630$ кэв/нукл) после прохождения их через целлулоидные пленки толщиной от 0,8 до 10 мкг/см². Экспериментальная установка и методика определения зарядового состава пучков, т.е. относительного числа частиц Φ_i с различными зарядами i ($\sum_i \Phi_i = 1$),

подробно описывались ранее [5]. Мишени, применявшиеся в эксперименте, изготавливались из раствора целлулоида в

амилацетате. Толщина мишени определялась микрофотометром по поглощению света в пленке [6].

В процессе эксперимента на мишень последовательно направлялись ионы с различными зарядами j , и в каждом

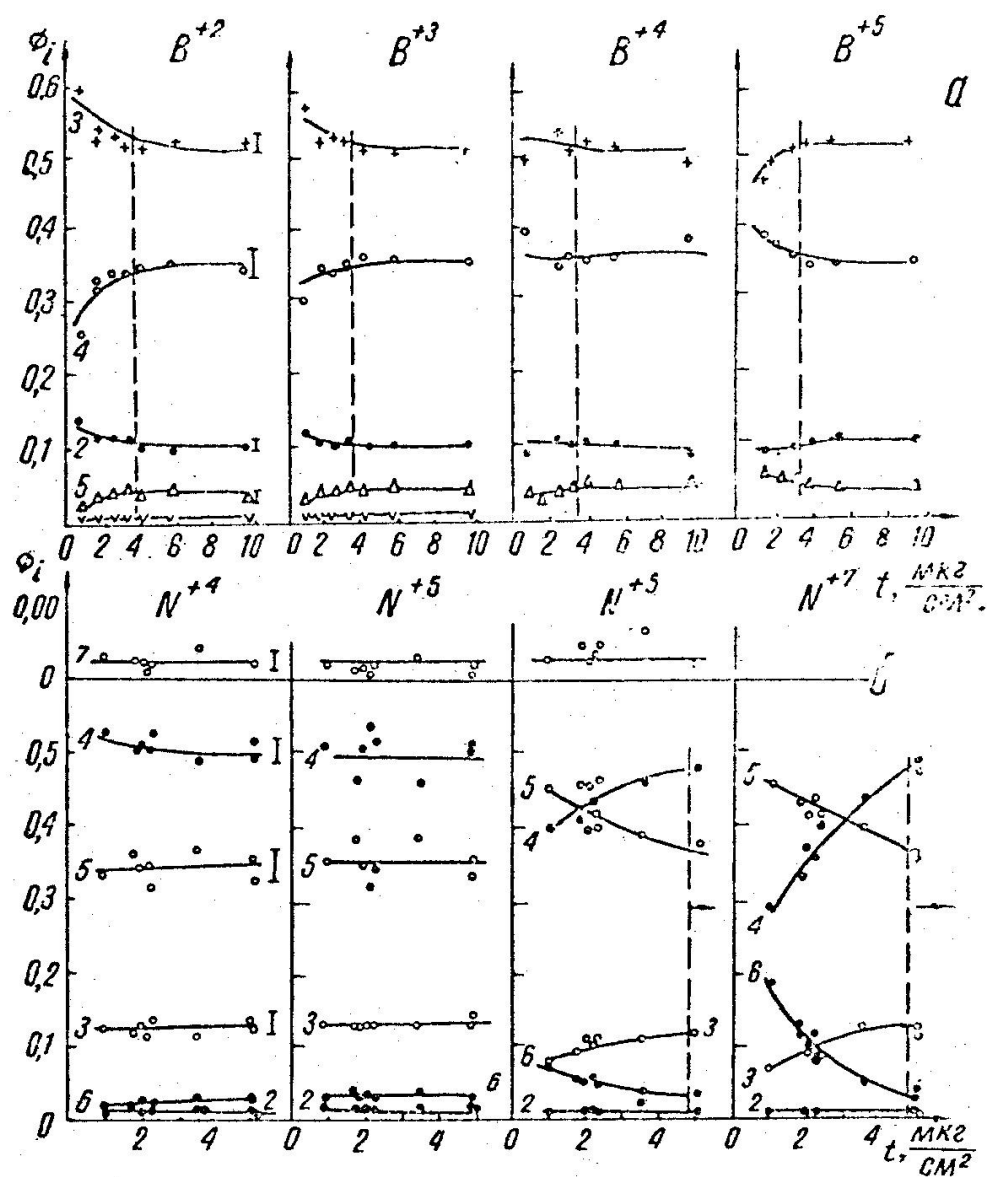


Рис. 1. Зависимость величины Φ_i от толщины целлулоидной пленки t для ионов B и N при $v \approx 8 \cdot 10^3$ см/сек (около кривых указан заряд ионов после прохождения через пленку, а над кривыми — начальное зарядовое состояние ионов).

случае измерялось распределение ионов по зарядам после прохождения через пленки разной толщины. Результаты этих измерений для ионов B и N представлены на рис. 1 а, б в виде зависимости величины Φ_i от толщины пленки t . Минимальные значения $t = t_{\min}$, необходимые для установления

в ионном пучке равновесного зарядового распределения, отмечены на рисунке пунктирными прямыми. Минимальную толщину пленок определяли при условии, что в области $t \geq t_{\min}$ изменение величин Φ_i при увеличении t не выходит за пределы ошибок эксперимента, которые для $\Phi_i > 0,1$ составляли несколько процентов.

Для ионов Be и E при $v \approx 8 \cdot 10^8$ см/сек и B и N при $v \approx 1,1 \cdot 10^9$ см/сек значения $t_{\min}$, как и для случая газообразных сред, оказались независимыми от начального заряда ионов и составили $2-4$ мкг/см², или в других единицах $n_{\min} \approx (1,2-1,6) \cdot 10^{17}$ атом/см². Эти значения близки к вычисленным на основе известных сечений потери и захвата электронов ионами в азоте. Действительно, из экспоненциального вида решения уравнений, описывающих процесс установления равновесного зарядового распределения [8], следует, что значения Φ_i не отличаются от равновесных более, чем на величину δ , при условии $\exp(-\sigma_T \cdot n) \gg \delta$, где $\sigma = \sigma_i$ — полное сечение изменения заряда иона для частиц с $i \sim j = Z = \sum_i i \Phi_i$ ($\sigma_i = \sum_k \sigma_{ik}$, где σ_{ik} — сечение процесса, в котором ион с зарядом i превращается в ион с зарядом k). Таким образом, при $\delta \sim 10^{-2}$ для $n_{\min}$ будем иметь

$$n_{\min} \approx -\ln \delta / \sigma_T \sim 4,6 / \sigma_T. \quad (1)$$

Подставив в данную формулу экспериментальные значения сечений σ_T в азоте [5, 7], для ионов Be и B (при $v \approx 8 \cdot 10^8$ см/сек) получим

$$n_{\min} = (1,2-1,3) \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2,$$

а для ионов B и N (при $v \approx 1,1 \cdot 10^9$ см/сек) —

$$n_{\min} = (1,5-3) \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2,$$

что и в пределах ошибок совпадает с экспериментом. Для ионов же N и O при $v = 8 \cdot 10^8$ см/сек Φ_i зависит от начального то заряда ионов. При $j \leq Z-2$, где Z — заряд ядра иона, $t_{\min} \leq 1$ мкг/см², а при $j = Z-1$ и $j = Z$ $t_{\min}$ возрастает до $5-9$ мкг/см². Значение $t_{\min} \sim 1$ мкг/см² хорошо согласуется с $n_{\min} \sim 5 \cdot 10^{16}$ атом/см², полученным из условия

Исходя из предположения, что химический состав целлюлозы соответствует формуле $(C_6H_{10}O_5)_n$ [3], а также используя известные величины сечений потери и захвата электронов в столкновениях с различными атомами среды [5, 7], можно было показать, что целлюлоза приблизительно эквивалентна азоту, при этом 1 мкг/см² соответствует $n \approx 4 \cdot 10^{16}$ атом/см².

(1) с использованием экспериментального значения $\sigma_T \sim 10^{-16} \text{ см}^2/\text{атом}$ для этих ионов в азоте [5, 7]. Большим величинам $t_{\min}$ должны соответствовать примерно в 5—7 раз меньшие сечения σ_T . Это явление можно объяснить уменьшением вероятности захвата электрона в K -оболочку при значениях параметра $v/Z \lesssim 1$. В рассматриваемых случаях $j \gg Z - 1$ параметр v/Z равен $(1,0 - 1,15) \cdot 10^8 \text{ см/сек}$; в остальных — $v/Z \geq 1,6 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$. Согласно последним экспериментальным данным, полученным в результате изучения процессов образования возбужденных метастабильных частиц, при изменении v/Z от $1,6 \cdot 10^8$ до $1,0 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ относительная вероятность захвата электрона в K -оболочку уменьшается более чем на порядок и для рассматриваемых ионов составляет приблизительно 3%. В этих условиях значение $n_{\min}$ будет определяться не полным сечением σ_T , а лишь некоторой его частью, относящейся к K -оболочке; в соответствии с (1) величины $n_{\min}$ значительно возрастут.

Результаты эксперимента с ионами В были использованы для получения информации о сечениях потери и захвата электронов этими ионами в целлулоиде. В данном случае в первом приближении соударениями с одновременной потерей и захватом более чем одного электрона можно было пренебречь [5, 7, 8], поэтому из отношений равновесных значений Φ_i были непосредственно получены отношения сечений потери и захвата одного электрона $\sigma_{i, i \pm 1}$, а именно:

$$\frac{\sigma_{i+1, i}}{\sigma_{i, i+1}} = \frac{\Phi_i}{\Phi_{i+1}}, \text{ а из экспериментальной зависимости } \Phi_i \text{ от}$$

t — абсолютные значения этих сечений. С помощью приведенного выше эквивалента целлулоида были вычислены величины сечений, отнесенные к одному атому. Полученные результаты приведены на рис. 2. Там же для сравнения представлены сечения потери и захвата электронов ионами В в азоте [5, 7].

Согласно качественным соображениям Бора и Линдхарда [9] относительно разницы в средних зарядах быстрых ионов, проходящих через твердое и газообразное вещества, сечения потери электронов ионами в твердой среде должны значительно превышать те же величины для газообразных сред. Действительно, как показывает сравнение (рис. 2), сечения потери электрона в твердом веществе почти в два раза превышают эти сечения в газе. В некоторых случаях, в отличие от общепринятых представлений, сечения в твердом веществе меньше сечений в газах. Последнее соотношение раньше не наблюдалось. Однако его можно качественно

объяснить, если у ионов, проходящих через твердое вещество, из-за отсутствия радиационных переходов между соударенными возбужденными состояниями, в которых электроны захватываются с наибольшей вероятностью, оказываются частично занятыми.

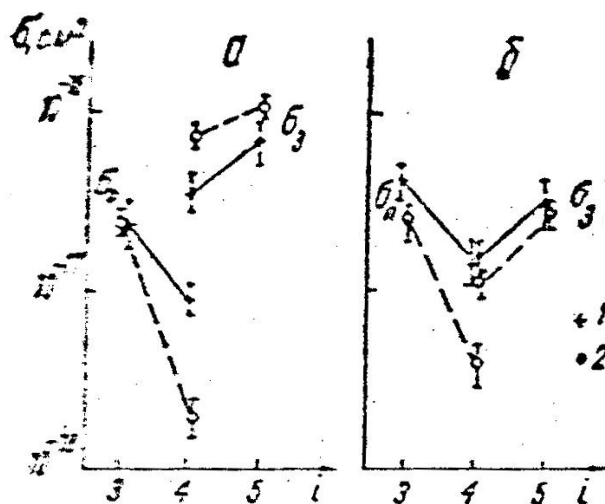


Рис. 2. Сечения потери ($\sigma_{\text{л}} = \sigma_{i,i-1}$) и захвата ($\sigma_{\text{з}} = \sigma_{i-1,i}$) электронов для ионов В в зависимости от начального заряда ионов при $v \approx 8 \cdot 10^8$ см/сек (а) и $v \approx 1,1 \cdot 10^8$ см/сек (б):

1—парафин, 2—цинк.

Обнаруженные явления, заключающиеся в уменьшении сечения электронного захвата при прохождении ионов через твердое вещество и резком повышении минимальной толщины мишени, необходимой для установления равновесного зарядового распределения при больших начальных зарядах ионов, безусловно, требуют более тщательного экспериментального и теоретического изучения.

Литература

1. Miessler H. *Nucl. Inst. and Meth.*, 72, 269—276 (1969).
2. Kay L. *Proc. Phys. Soc.*, 85, 163 (1965).
3. Reynolds H. L., Wyly L. D., Zucker A. *Phys. Rev.*, 96, 1621 (1955).
4. Mackman H. H., Hubbard E. L., Simon W. G. *Phys. Rev.*, 129, 1249 (1958).
5. Николаев В. С., Дмитриев И. С., Фатеева Л. Н., Теплова Я. А. *ЖЭТФ*, 40, 989 (1961); 41, 89 (1961); 39, 905 (1960).
6. Дмитриев И. С., Теплова Я. А., Николаев В. С., Фатеева Л. Н. *ПТФ*, 6, 181 (1959).
7. Николаев В. С., Дмитриев И. С., Фатеева Л. Н., Теплова Я. А. *ЖЭТФ*, 33, 607 (1957); 42, 16 (1962); 43, 661 (1962).
8. Николаев В. С. *УФН*, вып. 4, 85, 679 (1965).
9. Bohr N., Lindhard J. *Dan. Mat. Fys. Medd.*, 28, 7 (1954).