

*Письма в ЖЭТФ, том 11, стр. 377 – 381*

20 апреля 1970 г.

## ОБРАЗОВАНИЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

*В.В.Аполлонов, Ю.А.Быковский, Н.Н.Дегтяренко,*

*В.Ф.Елесин, Ю.П.Козырев, С.И.Сильнов*

В данной работе исследовалась высокотемпературная плазма, образованная при воздействии излучения ОКГ на вещество, при максимальной мощности  $W_{max} \sim 2 \text{ Гвт}$ .

Блок излучения состоял из неодимового стекла  $10 \times 130$  (генератор) и 2-х усилителей со стержнем  $20 \times 30\text{б}$  (с углом Брюстера) и  $30 \times 260$ .

Плотность потока излучения, при линзе с  $f = 5 \text{ см}$ , составляла  $\sim 10^{13} \text{ вт/см}^2$ . В качестве анализирующего прибора использовались время-пролетный масс-спектрометр с совмещенными  $E$  и  $H$  полями [1].

Были исследованы мишени из:  $\text{Co}_{59}^{27}$ ;  $\text{Ag}_{107-109}^{47}$ ;  $\text{Ta}_{181}^{73}$ ;  $\text{W}_{184}^{74}$ ;  $\text{Bi}_{209}^{83}$ . Максимальные зарядности ионов этих элементов, таковы  $\text{Ag}^{+16}$ ,  $\text{Ta}^{+20}$ ,  $\text{W}^{+19}$ ,  $\text{Bi}^{+19}$ .

На мишени из  $\text{Co}_{59}^{27}$  получены ионы до 25 зарядности. На рис. 1 показаны экспериментальные осциллограммы ионных импульсов  $\text{Co}_{59}^{27}$ . Идентификация ионов большой зарядности производилась по левой границе осциллограммы и по предполагаемому месту в масс-осциллограммах. Из-за недостаточного разрешения ионов с  $z \sim 20$  при регистрации возникают определенные трудности. Точность определения величины заряда ионов в области  $z = 20 + 25$  для развертки 50 мксек составляет  $\Delta z = \pm 1$ , на 100 мксек  $\Delta z = \pm 2$  и на 300 мксек  $\Delta z = \pm 3$ .

Статистически обработанная осциллограмма, показанная на рис. 2, а содержит в левой части группу сигналов, которые соответствуют ионам с зарядностью 15 + 23.

Схожую группу сигналов могли бы дать также ионы легких примесей: С, N, O. Ниже приведены соображения, которые, по нашему мнению, показывают, что в рассматриваемом случае легкие примеси не могут объяснить наличие указанной группы.

1. На осциллограммах были зарегистрированы ионы примесей ( $\text{C}_{12}$ ;  $\text{N}_{14}$ ;  $\text{O}_{16}$ ), причем амплитуды сигналов уменьшаются с увеличением заряда, как видно из рис. 2, б. Анализ энергетических спектров и масс-осциллограмм большой серии веществ (для ионов до 6 зарядности) позволил выявить общую тенденцию зависимости амплитуды ионного сигнала от заряда иона. Вид та-

кой зависимости для углерода показан на рис. 2, в. Считая, что группа сигналов на осциллограмме связана с примесными ионами, можно построить предположительную зависимость  $A(z)$  для этих ионов рис. 2, в. Однако, вид этой зависимости противоречит результатам экспериментов рис. 2, в.

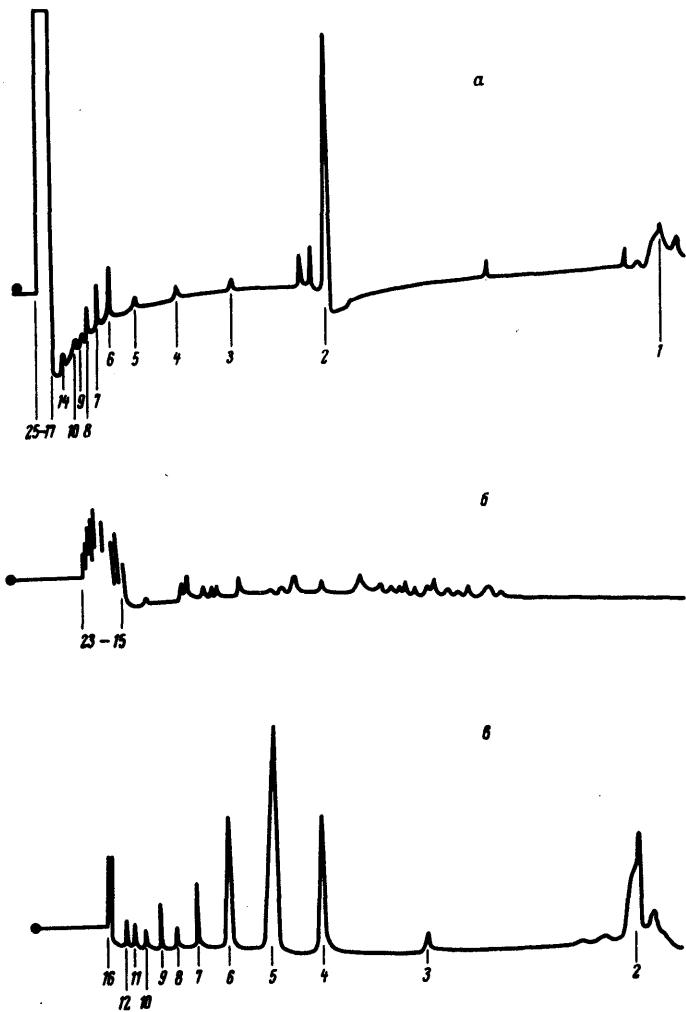


Рис. 1

2. На рис. 2, а над осциллограммой даны местоположения ионов различной зарядности. Ионы  $\sim 20$  зарядности (при энергии  $30 + 40 \text{ кэВ}$ ) не должны разрешаться, а передние фронты сигналов соответствуют пределу разрешения вторичного электронного умножителя  $\sim 0,1 \text{ мксек}$ . В анализируемой группе, согласно расчету, должно содержаться около десяти сигналов ионов высокой зарядности. Предположив, что группа сформирована сигналами от примесных ионов, можно определить количество сигналов. При таком предположении число сигналов в группе должно быть около 4, ионы должны быть разрешены. В действительности число сигналов в анализируемой группе заведомо больше 6.

3. Кроме того, если предположить, что анализируемая группа сигналов связана с ионами примесей, то амплитуда ионов  $(C, N, O)^+$ ,  $(C, N, O)^{++}$  и  $(C, N, O)^{+++}$

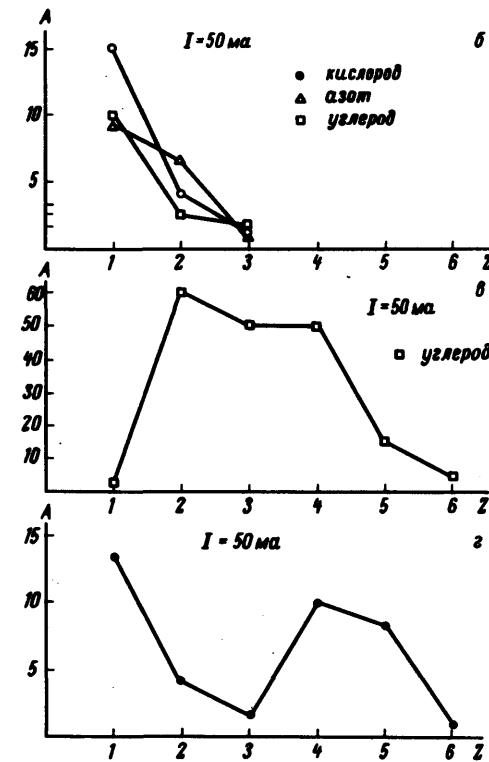
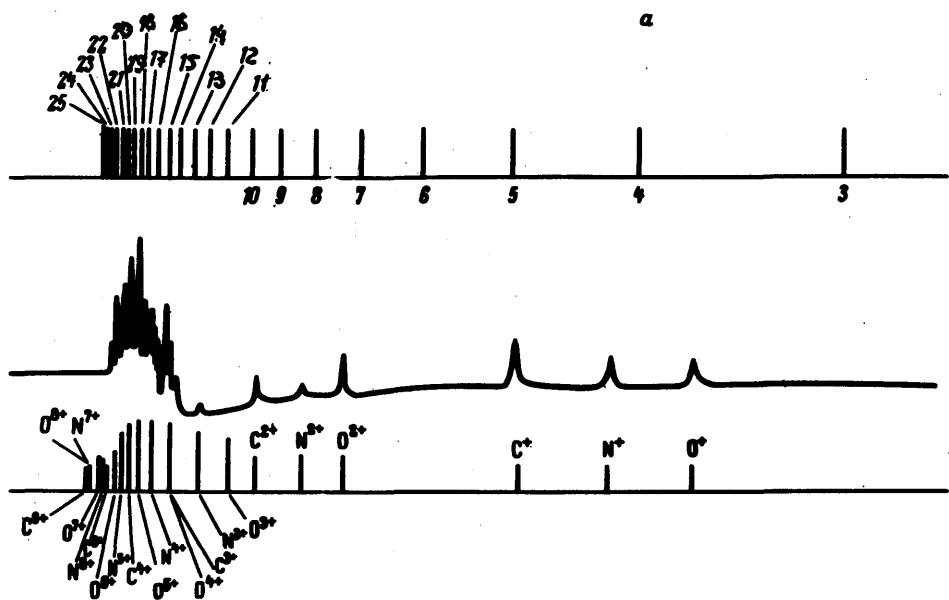


Рис. 2

в соответствующих максимумах энергетических спектров примесей должны иметь большие амплитуды по сравнению с их средней амплитудой на осциллографах.

Соображения, изложенные в пунктах 1 + 3 позволяют считать, что экспериментально зарегистрированы ионы Со до 25 зарядности.

4. Расчет кратности ионизации проведен в предположении, что плазма находится в термодинамическом равновесии, когда применим приближенный метод [2]. При этом внутренняя энергия плазмы определена следующей формулой:

$$\epsilon = \left[ \frac{3}{2} k T (1+z) + \sum I_i \right] = \frac{P}{\rho} \frac{1}{(\gamma' - 1)} , \quad (1)$$

где  $I_i$  –  $i$ -й потенциал ионизации.

$z = z(T, n)$  – кратность ионизации, которая является функцией температуры плазмы  $T$  и плотности  $n$ . Величина  $(\gamma' - 1)$  определена здесь как:

$$\frac{1}{\gamma' - 1} = \frac{3}{2} + \frac{I(z)}{T} \frac{z}{1+z} \frac{1}{a} ; \quad a \lesssim z .$$

Второе слагаемое в (1) учитывает энергию, затраченную на ионизацию многозарядных ионов, которая становится особенно существенной при больших  $z$ .

Внутренняя энергия  $\epsilon$  определена из решения для стационарного режима разлета плазмы [3; 4], с учетом зависимости коэффициента поглощения от  $(\gamma' - 1)$ , предполагая, что величина  $\gamma'$  является медленно меняющейся функцией  $T$  и  $n$  (параметр медленности  $(\gamma' - 1) \sim \frac{1}{T} \approx 0,1$ ). Подставляя  $\epsilon$  в (1), получаем систему уравнений для определения  $z, \gamma'$ .

$$\frac{I(z)}{(\gamma' - 1)^{4/9}} = \beta_1 W^{4/9} d^{-2/3} \ln [z^{1/2} (\gamma' - 1)^{1/3} W^{1/3} \beta_2] , \quad (2)$$

$$\frac{1}{\gamma' - 1} = \frac{3}{2} + \frac{I(z)}{a} \frac{1}{(\gamma' - 1)^{4/9}} W^{-4/9} d^{2/3} \beta_1^{-1} ,$$

где  $\beta_1 \approx 0,32 \mu^{2/9} [\text{эв см}^{2/3} \text{Мем}^{-4/9}]$ ;  $\beta_2 \approx 5,6 \cdot 10^{+2} \mu^{1/6} [\text{Мем}^{-1/3}]$ .

Значения кратности ионизации зависят от вида кривой  $I(z)$ , которая была получена на основе известных экспериментальных значений (в основном для Со) и с помощью аппроксимационной формулы [5]. Результаты численного решения (2) дают для  $\gamma' \approx 1,2$  и  $z \approx 25$ , что согласуется с экспериментальной величиной. Теоретические оценки для других веществ приводят к завышенным значениям по сравнению с экспериментальными.

Это связано, по-видимому, с возможным отсутствием равновесности плазмы при  $q \gtrsim 10^{12} \text{ эв/см}^2$  [6], с неточностью аппроксимации потенциалов ионизации.

Авторы благодарят Н.Г.Басова, О.Н.Крохина и Г.Н.Флерова за интерес к работе.

Московский  
инженерно-физический институт

Поступила в редакцию  
13 марта 1970 г.

### Литература

- [ 1 ] Ю.А.Быковский, В.И.Дорофеев, В.И.Дымович, Б.И.Николаев, С.В.Рыжих, С.М.Сильнов. ЖТФ, 38, 1194, 1968.
  - [ 2 ] Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзэр. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Изд. Наука, 1966, гл. 3, § 7,8.
  - [ 3 ] И.С.Немчинов. ПММ, 31, 300, 1967.
  - [ 4 ] Н.Г.Басов, В.А.Грибков, О.Н.Крохин, Г.В.Склизков. ЖЭТФ, 54, 1072, 1968.
  - [ 5 ] И.В.Немцов. ЖЭХ, 29, 1031, 1955.
  - [ 6 ] Ю.В.Афанасьев, Э.М.Беленов, О.Н.Крохин, И.А.Полуэктов. Письма в ЖЭТФ, 10, 553, 1969.
-