

Д, - 672

13/VI.69

P7 - 4469

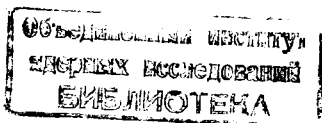
Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт

**ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЗАРЯДНОСТИ
В СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОМ
ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОМ
ИСТОЧНИКЕ**

P7 - 4469

Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЗАРЯДНОСТИ
В СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОМ
ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОМ
ИСТОЧНИКЕ



1. В в е д е н и е

В первой статье, посвященной электроннолучевому источнику многозарядных ионов /1/, был описан принцип его работы, конструкция экспериментальной установки ИЭЛ и некоторые эксперименты, выполненные на этой установке. Было показано, что атомарный ион может быть захвачен в электростатическую ловушку в области электронного пучка, многократно ионизирован и выведен из области ионизации для последующего анализа. В частности, из остаточного газа были получены четырехзарядные ионы углерода, азота и кислорода.

В настоящей работе эксперименты продолжены, в электронный луч введены атомы рабочего вещества, в частности, золота, произведена их ионизация до высоких зарядностей и анализ спектра зарядностей по времени пролета. Для этого, естественно, потребовались некоторые методические усовершенствования описанной ранее установки ИЭЛ.

2. Методическая часть

а) Источник ионов

Схема электроннолучевого ионного источника показана на рис. 1. Электронная пушка с микропервееансом 0,95 располагается внутри экранированного соленоида с максимальной напряженностью магнитного поля около 4 кэ. Катод из гексаборида лантана опирается на танталовый диск с диаметром отверстия 2,5 мм. Для обеспечения необходимой эмиссии применен электронный подогрев катода. На расстоянии 2,5 мм от катода

находится анодная диафрагма с диаметром отверстия 3 мм. Далее располагается дрейфовая трубка, состоящая из пяти изолированных секций длиной 20, 20, 60, 20, 20 мм, соответственно. В стенке предпоследней секции имеется продольное отверстие прямоугольной формы, вдоль которого расположена спираль испарителя рабочего вещества.

Последняя секция дрейфовой трубки опирается на магнитный полюс, непосредственно за которым установлен электронный коллектор цилиндрической формы. Коаксиально с электронным коллектором расположен ускоряющий электрод масс-спектрометра по времени пролета.

Электроны, эмиттируемые катодом и ускоренные анодным потенциалом, сильным магнитным полем формируются в пучок, который после прохождения дрейфовой трубки и выхода из магнитного поля регистрируется электронным коллектором.

Ионы, возникающие в области электронного пучка, могут либо удерживаться там, либо выводиться в аксиальном направлении для анализа по времени пролета. Для этого используются соответствующие распределения потенциалов на секциях трубки дрейфа.

Источник работает в условиях сверхвысокого вакуума, что обеспечивает длительные времена взаимодействия ионов с пучком электронов.

б) Испаритель рабочего вещества

Испаритель атомов рабочего вещества представляет собой спираль из вольфрамовой проволоки, толщиной 0,07 мм, с нанесенным на нее тонким слоем золота. Спираль предварительно обезгаживается прокаливанием в вакууме. Золото наносится методом термического испарения.

В источнике испаритель помещается на расстоянии ≈ 10 мм от оси электронного пучка коаксиально с ним. При пропускании через спираль электрического тока золото на поверхности вольфрама плавится и интенсивно испаряется. Часть атомов при своем тепловом движении через пучок электронов ионизируется и захватывается в электростатическую ловушку в области пучка. При имеющихся плотностях электронного тока и геометрии испарителя полная эффективность использования рабочего вещества составляет величину 0,1-0,5%.

Режим работы испарителя импульсный с частотой 1 гц.

Экспериментально показано, что импульс интенсивности испарившихся атомов золота при коротком импульсе тока подогрева спирали все-таки имеет полуширину ≈ 10 мсек, что, вероятно, объясняется значительной теплоемкостью спирали.

Для электрического питания спирали испарителя используется схема разряда накопительной емкости через тиратрон (см. рис. 2). Запускающий импульс после усилителя (L_1) и катодного повторителя (L_2) поступает на сетку тиратрона (L_3), работающего в ключевом режиме. Емкость C_p , напряжение на которой плавно регулируется от 0 до 600 в, разряжается через тиратрон и нагрузку (испаритель). В схеме использован тиратрон ТГИ1-35/3, позволяющий получать на нагрузке импульсы тока с амплитудой до 35 а. Применяя набор емкостей, можно генерировать импульсы различной длительности.

в) Масс-спектрометр по времени пролета

Схема анализатора зарядового спектра ионов из ИЭЛ по времени пролета (ВПМС) приведена на рис. 3. ВПМС состоит из следующих основных элементов: вытягивающий электрод (3), модулятор конденсаторного типа (6), трубка дрейфа (8) и детектор ионов (10).

На вытягивающий электрод подается постоянный отрицательный потенциал, превышающий по абсолютному значению ускоряющее напряжение, приложенное между катодом и заземленным анодом электронной пушки ИЭЛ. Быстрые электроны тормозятся в электростатическом поле вытягивающего электрода и регистрируются электронным коллектором (2). Многозарядные ионы, удерживаемые пространственным зарядом электронного пучка вплоть до места его расфокусировки на выходе из магнитного поля, после ускорения в поле вытягивающего электрода попадают в модулятор. Ионы остаточного газа, возникающие в области электронного коллектора, собираются внешней поверхностью вытягивающего электрода.

Модулятор, расположенный в специальной съемной насадке на трубке дрейфа, представляет собой плоский конденсатор, с длиной пластин 18 мм и зазором между ними 3 мм. Одна из пластин соединена электрически с дрейфовой трубкой, вторая изолирована и находится под постоян-

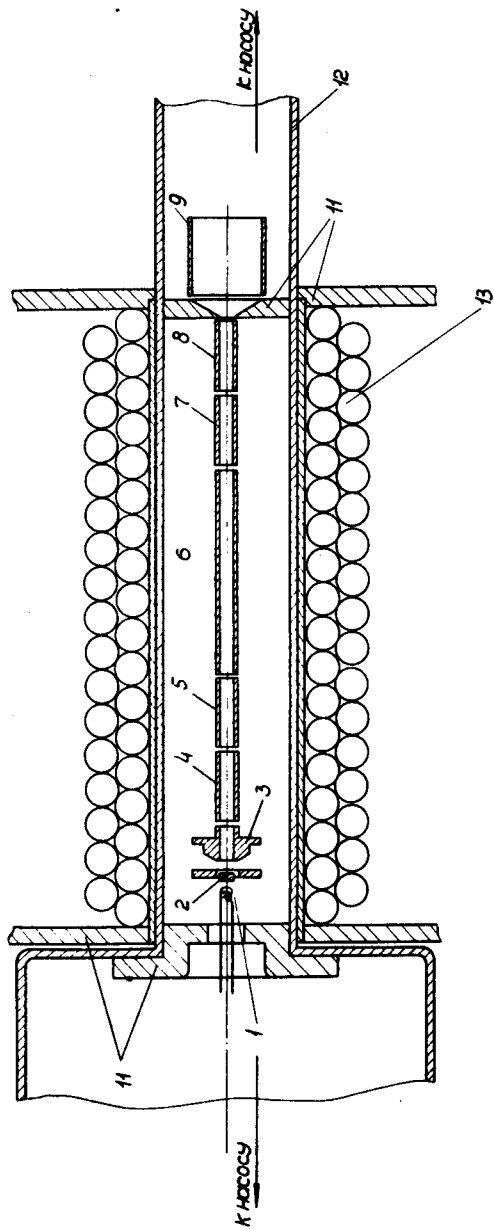


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - анод, 4-8 - секции трубки дрейфа, 9 - коллектор электронов, 11 - магнитные полюса соленоида, 12 - корпус ИЭЛ, 13 - обмотка соленоида.

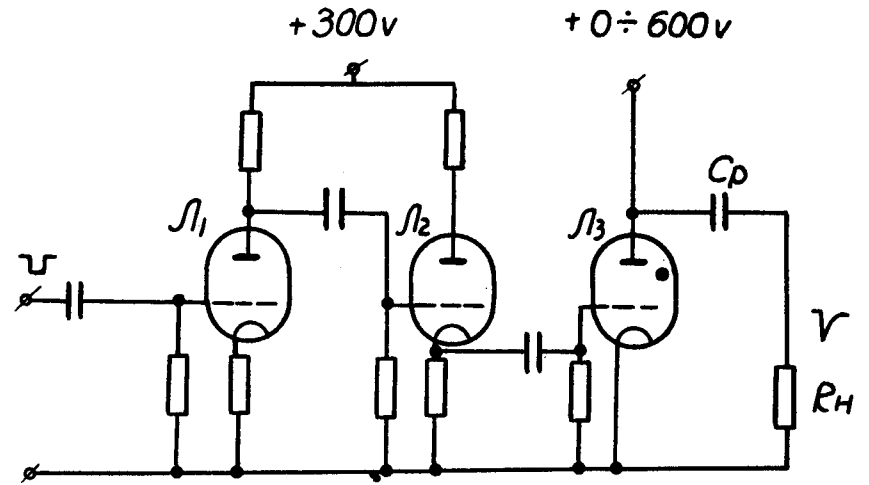


Рис.2. Схема источника питания нити испарителя.

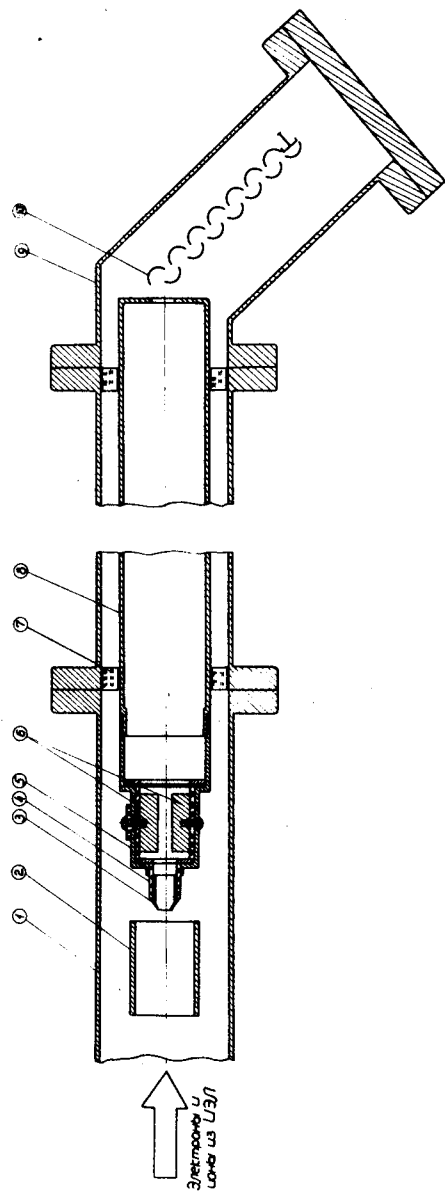


Рис.3. Схема ВПМС. 1 - корпус, 2 - коллектор электронов, 3 - вытягивающий электрод, 4 - изолятор, 5 - насадка, 6 - пластины конденсатора, 7 - изолятор, 8 - трубка дрейфа, 9 - корпус детектора ионов, 10 - ВЭУ ОТ-8М.

ным положительным смещением (0-300 в) относительно первой. В поле конденсатора ионы отклоняются и не попадают на детектор. Трубка дрейфа имеет внутренний диаметр 26 мм и длину 1150 мм. Фиксация и изоляция дрейфовой трубки в заземленном корпусе ВПМС производится с помощью фарфоровых колец (7).

Трубка дрейфа находится под постоянным и неизменным потенциалом (≈ 2 кв) независимо от потенциала на вытягивающем электроде, что обеспечивает неизменные энергетические условия анализа по времени пролета.

При наличии отрицательного модулирующего сигнала (0-300 в), который на определенный промежуток времени компенсирует положительное смещение изолированной пластины конденсатора, ионы в виде узкого пакета проходят в дрейфовую трубку и после разделения по времени пролета регистрируются детектором ионов. В качестве детектора ионов выбран вторично-электронный умножитель типа ВЭУ ОТ-8М ^{1/2} с внутренним делителем. В связи с необходимостью прогрева корпуса ВПМС до 400°C делитель ВЭУ собирался из резисторов типа МЛТ, с поверхности которых перед монтажом удалялось изолирующее покрытие.

Необходимое разрежение в объеме ВПМС создавалось вакуумной системой ИЭЛ и электроразрядным насосом ЭСН-1, пристыкованным к корпусу анализатора.

Электронная схема ВПМС работает следующим образом: генератор МГИ-1 (в ждущем режиме) запускается задним фронтом запирающего импульса ИЭЛ. Задержанные сигналы генератора МГИ-1 запускают развертку скоростного осциллографа ИСО-1 и генератор типа Г5-13. Выходные импульсы генератора Г5-13, используемые в качестве модулирующих, имеют варьируемые длительности в интервале 7-500 нсек и амплитуды в интервале 0-300 в.

Сигналы с ВЭУ после предусилителя поступают на вход ИСО-1, на экране которого визуально или путем фотографирования наблюдается спектр зарядностей ионов.

Постоянные напряжения смещения на различные элементы ВПМС подаются от блока батарей типа ПМЦГ-315.

В работе анализатора имеется ряд особенностей. Наиболее важные из них следующие.

Во-первых, интенсивность пучка ионов из ИЭЛ настолько велика, что полный спектр зарядностей уверенно регистрируется при работе в разовом режиме. Следствием этого оказывается отсутствие каких-либо серьезных требований на стабильность высоковольтных источников питания при достижении предельного разрешения.

Во-вторых, при имеющейся длительности заднего фронта импульса, запирающего ионы в дрейфовой трубке ИЭЛ и равной ≈ 50 мксек, начальный разброс поступающих на анализ ионов по энергиям не превышает 0,2 в. Такая цифра получается из сравнения длительности запирающего импульса, имеющего амплитуду ≈ 100 в и длительности модулирующего импульса 60 нсек.

В результате в области $A/Z = 2$ получено разрешение 40, причем это значение определяется длительностью импульса с ВЭУ и предусилителя от одиночного иона, которая в настоящее время составляет 50 нсек. Таким образом, разрешение ВПМС может быть существенно увеличено.

Наконец, третья особенность работы ВПМС состоит в наличии двух электростатических линз; электронный коллектор - вытягивающий электрод и вытягивающий электрод - трубка дрейфа. Ионы с разными значениями A/Z испытывают неодинаковое воздействие при прохождении этих линз, что приводит к тому, что у анализатора появляются слабо выраженные свойства резонансности, которые необходимо учитывать при сравнении интенсивностей далеко отстоящих друг от друга линий спектра зарядностей.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

а) Эксперименты по ионизации остаточного газа

В настоящей работе были продолжены эксперименты по исследованию электроннолучевого источника при использовании атомов остаточного газа в объеме ИЭЛ. В первую очередь с применением ВПМС было показано, что вид спектра зарядностей ионов существенно зависит от времени запираания ионов в электронном пучке τ . А именно, при увеличении τ в спектре наблюдаются ионы углерода, азота и кислорода

все более высоких зарядностей. Это является однозначным свидетельством того, что многозарядные ионы появляются в результате последовательной ионизации, а не в одном столкновении, как это имеет место в работе /3/.

При изучении зависимости эффективности ионизации от давления в ИЭЛ показано, что при одном и том же времени запираания τ для получения ионов некоторой максимальной зарядности требуется тем большая плотность электронного пучка j , чем выше давление в системе.

При давлении $2 \cdot 10^{-8}$ торр, измеряемом с помощью электроразрядного насоса ЭСН-1, установленного на крышке корпуса ИЭЛ и при $j\tau = 2 \cdot 10^{17}$ см⁻² ($E_e = 2,3$ кэв) уверенно наблюдались ионы следующих зарядностей C^{+5} , N^{+6} , O^{+7} . Этот факт сам по себе несомненно представляет большой интерес, т.к. здесь совершен переход к ионизации К-оболочки. Тем не менее еще более интересным оказывается соотношение интенсивностей, например, линий N^{+5} и N^{+6} . На рис. 4 представлен участок спектра, полученного при указанных выше условиях, когда основной компонентой остаточного газа был азот. Из рисунка видно, что $I_{N^{+5}} / I_{N^{+6}} = 4$.

Это соотношение при некоторых простых предположениях позволяет вычислить сечение ионизации электронным ударом пятизарядного иона азота с образованием шестизарядного. Это сечение оказывается равным $\approx 10^{-18}$ см² для энергии ионизирующих электронов 2,3 кэв.

Примерно такие же значения получаются и для сечений образования C^{+5} и O^{+7} из C^{+4} и O^{+6} соответственно.

Наблюдение голых ядер углерода, азота и кислорода затруднено из-за наличия линии H_2^+ . Образуются ли ионы C^{+6} , N^{+7} , O^{+8} в нашем источнике при $j\tau = 2 \cdot 10^{17}$ см⁻²? На этот вопрос следует ответить утвердительно, поскольку сечение их образования должно составлять $\approx 1/3$ от сечения образования ионов, имеющих 1 электрон на К-оболочке.

б) Эксперименты по ионизации золота

Результаты экспериментов по ионизации золота носят пока лишь предварительный характер, т.к. получены в основном при отработке методики ввода золота в электронный луч ИЭЛ.

H_2^+ N^{+6} N^{+5} N^{+4} O^{+3}
 O^{+4} N^{+3}



Рис.4. Участок спектра зарядностей ионов остаточного газа.

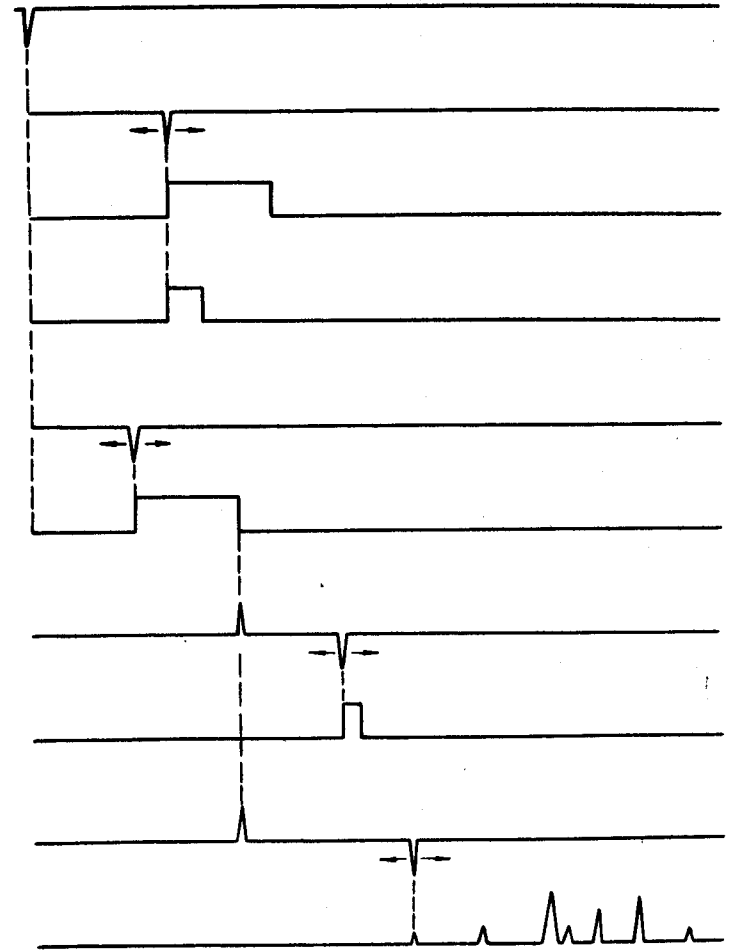


Рис.5. Диаграмма временной последовательности процессов в ИЭЛ.

На рис. 5 приведена диаграмма временной последовательности процессов в ИЭЛ от начала цикла до получения спектра ионов золота и ос- таточного газа (сверху-вниз). Импульс задающего генератора, который служит началом отсчета времени, задерживается и одновременно является командой, во-первых, на выработку мощного электронного импульса через ИЭЛ и, во-вторых, на выдачу токового импульса через спираль испари- теля атомов золота.

Этот же импульс задающего генератора, задержанный на другой ин- тервал времени, служит командой для генератора серий, который выдает импульс той или иной длительности, запирающий ионы в объеме электрон- ного луча в трубке дрейфа ИЭЛ.

В свою очередь, задний фронт запирающего импульса служит нача- лом отсчета времени, относительно которого сдвигается модулирующий импульс генератора Г5-13 и импульс, запускающий развертку осциллогра- фа, на экране которого наблюдается спектр зарядностей.

Кроме того, импульс тока через спираль испарителя может быть связан не с началом мощного электронного импульса, а с началом запи- рающего импульса. Для удобства наблюдения схема, вырабатывающая им- пульс питания испарителя, может запускаться через пересчетную схему.

В первых же экспериментах, когда было включено питание испари- теля, в спектре наблюдались ионы золота вплоть до +6. Вакуумные ус- ловия при этом были настолько плохими, что в спектре ионов остаточ- ного газа едва наблюдались двухзарядные ионы. Впоследствии, когда вакуумные условия улучшились, были получены сначала ионы вплоть до Au^{+13} , а затем и до Au^{+19} . В этом последнем случае вакуумные условия в трубке дрейфа соответствовали лишь тому, что наблюдались ионы C^{+4} , N^{+4} , O^{+4} . Это значит, что $j_T = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в этих ус- ловиях еще не реализовалось.

Как уже указывалось выше, золото поступало в электронный луч за время 10 мсек, что сравнимо с длительностью запирающего импульса. Это значит, что здесь пока имеет место практически непрерывная пода- ча атомов рабочего вещества. Тем более интересно отметить, что спектр зарядностей ионов золота имеет линии, интенсивность которых, например, от Au^{+12} до Au^{+19} падает примерно в 5 раз.

Эти результаты, так же как и результаты экспериментов по иониза- ции К-оболочки атомов C , N , O , оказались неожиданными, и необхо- димы новые эксперименты, прежде чем станет ясна причина столь быст- рого в смысле величины j_T достижения таких высоких зарядностей.

в) Обсуждение некоторых результатов

Интересно сравнить полученную экспериментально величину сечения ионизации N^{+5} с переходом в N^{+6} $\sigma_{N^{+5} \rightarrow N^{+6}} = 10^{-18} \text{ см}^2$ с расчетны- ми величинами сечения этого перехода.

Полуэмпирическая формула Эльверта /4/, улучшенная для больших значений отношения энергии электронов к энергии ионизации

$$U = \frac{E_e}{I_i}$$

$$\sigma_i = \sigma_{np} \epsilon_i \pi a_0^2 \left(\frac{I_H}{I_i} \right)^2,$$

где

$$\sigma_{np} = 2 \frac{U-1}{U^2} [1 + 0,3(U-1)]$$

ϵ_i - число электронов в данном состоянии, $\pi a_0^2 = 9 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, I_H - энергия ионизации атома водорода, дает значение для

$$\sigma_{N^{+5} \rightarrow N^{+6}} = 0,78 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2.$$

Еще большее различие с экспериментальной величиной дает форму- ла из работы /5/

$$\sigma_i = \frac{1}{2} \frac{\pi e^4}{E_e I_i} \ln \left(\frac{E_e}{I_i} \right),$$

где e - заряд электрона. Здесь $\sigma_{N^{+5} \rightarrow N^{+6}} = 0,4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

Наилучшее согласие получается при сравнении экспериментальной величины с расчётной полученной в борн-кулоновском приближении в ра- боте /6/, где $\sigma_{N^{+5} \rightarrow N^{+6}}$ оказывается примерно равным $2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$. Однако и здесь различие с экспериментом достигает значительной вели- чины: 5 раз.

В настоящее время мы ничего не можем сказать о причинах столь сильных расхождений между экспериментальной и расчетными величинами. С точки зрения создания источника высокозарядных ионов это различие оказывается приятным, т.к. облегчает достижение необходимых зарядностей. Так, например, реально создать источник с интенсивностью $2 \cdot 10^{13}$ ионов урана зарядности +24 в секунду, которые могут быть ускорены до необходимых энергий на циклотроне с диаметром полюсов 4 м.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить академика Г.Н. Флорова за интерес к работе и Е.Д. Воробьева за постоянную поддержку и помощь, во многом обеспечившие успешное выполнение данной работы.

Л и т е р а т у р а

1. Е.Д. Донец, В.И. Илющенко, В.А. Альперт. Препринт ОИЯИ Р7-4124, Дубна 1968.
2. Г.И. Слободенюк, А.И. Титов, ПТЭ, №2, 155 (1967).
3. В.L. Schram, А.J.H. Boerboam, J. Kistemaker. Physica, 32, 185 (1966).
4. G. Elwert. Z.f. Naturforsch, 7a, 432 (1952).
5. G.S. Janes, R.H. Levy, H.A. Bethe, B.T. Feld. Phys. Rev., 145, 925 (1966).
6. И.Л. Бейгман, Л.А. Вайнштейн. Астрономический журнал, 44, 889 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел
30 апреля 1969 года.