

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Б.И. Иванов, В.П. Прищепов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: ivanovbi@kipt.kharkov.ua

Проведены эксперименты по генерации ионных пучков при подаче импульсного напряжения +300...400 кВ длительностью 50 нс на блок острых эмиттеров из алюминия. Измерения, проведенные с использованием трековых детекторов, времяпролетного и магнитного анализаторов, показали, что пучки в основном состоят из ионов алюминия с зарядом $Z = 8 \pm 1$ и током 30...200 А; генерация высокозарядных ионов связана с автоэмиссией ионов из эмиттеров при значительной напряженности электрического поля ($E \sim 10^9$ В/см).

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе экспериментально исследуется возможность получения импульсных пучков высокозарядных ионов (ВЗИ) путем полевого испарения (автоэмиссии) ионных эмиттеров. С этой целью создана установка, в которой при вакууме $<10^{-6}$ Торр к блоку специально подготовленных ионных эмиттеров прикладывается импульс амплитудой $U = +300...400$ кВ, длительностью $t \sim 10^{-8}...10^{-7}$ с. Найдены условия работы, при которых эмиттеры стабильно генерируют ВЗИ с током $I \sim 10...100$ А длительностью $t \sim 10^{-8}$ с.

На уровне микротоков ($I \sim 10^{-10}...10^{-7}$ А, $U = 30...50$ кВ, $E \sim 10^8$ В/см) вопросы полевого испарения и десорбции ионов исследуются в автоионной микроскопии [1,2]. В частности, там отмечено, что в некоторых случаях наблюдалось полево испарение такого металла как вольфрам в виде четырехкратно заряженных ионов со скоростью до $3 \cdot 10^9$ атомных слоев в секунду (см. [1], с.350).

Ранее возможность получения импульсных интенсивных ионных пучков посредством испарения или десорбции ионов с поверхности металла под действием сильного ($E \sim 10^8...10^9$ В/см) электрического поля исследовалась нами в [3, 4].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Внешний вид экспериментального стенда представлен на Рис.1.

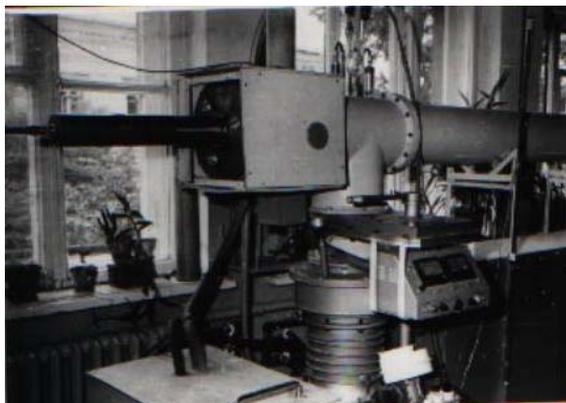


Рис.1. Внешний вид установки

Стенд состоит из экспериментальной камеры (Рис.1, слева) и генератора импульсного напряжения (ГИН) (Рис.1, справа). ГИН представляет собой 30-каскадный генератор типа Аркадьева-Маркса, собранный на малоиндуктивных керамических конденсаторах типа К15-10 (4700 пФ, 50 кВ). ГИН помещен в толстостенную изолирующую трубу, которая, в свою очередь, расположена в металлической трубе, герметично закрытой на торцах. Длина этой конструкции 3 м, диаметр 40 см. Разрядники ГИНа воздушные, продуваемые под давлением; первый разрядник – тригatronного типа, позволяющий включать ГИН от запускающего устройства. Высоковольтный конец ГИНа нагружен на согласованное сопротивление 170 Ом.

Испытания ГИНа дали следующие результаты: ГИН может генерировать импульсы положительной полярности амплитудой около 400 кВ, мощностью 10^9 Вт, длительностью 50 нс на полувысоте. Относительный разброс импульсов по амплитуде и форме $\sim 1\%$. Амплитуда импульсов может плавно регулироваться в пределах 300...400 В путем изменения давления воздуха в ГИНе. Напряжение зарядки ступеней 25...30 кВ, частота посылок в рабочем режиме 1 раз в 3 с, в форсированном режиме – до 1 Гц. Для повышения стабильности запуска ГИНа в первых каскадах применены емкости связи из двух последовательно соединенных конденсаторов К15-4 (470 пФ, 30 кВ).

Ионные пучки формировались в высоковольтном ускоряющем диоде, анод которого представлял собой блок острых ионных эмиттеров «ножевого» типа, а катод – сетку с прозрачностью около 80%. Исследовались плоский диод, коаксиальный диод со сходящимся на ось ионным пучком и диод со сферической фокусировкой. Основные измерения были проведены с плоским диодом (Рис.2). Высоковольтное напряжение положительной полярности вводилось в камеру источника через проходной фарфоровый изолятор длиной 100 см. В камере были размещены емкостной датчик напряжения и быстродействующий пояс Роговского. На конце высоковольтного ввода размещался блок эмиттеров. Далее по оси системы был расположен вытягивающий ионы электрод-сетка. Расстояние между блоком эмиттеров и сеткой могло изменяться без нарушения вакуума.

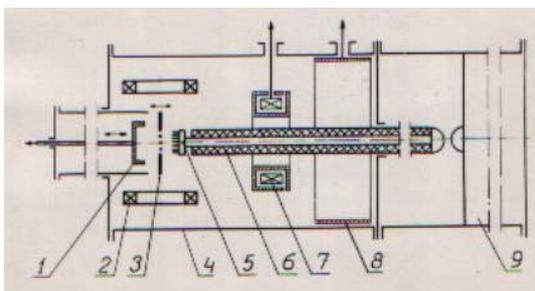


Рис.2. Схема плоского ионного диода: 1 – коаксиальный коллектор; 2 – катушки магнитного поля; 3 – вытягивающая сетка; 4 – камера источника; 5 – блок эмиттеров; 6 – изолятор; 7 – пояс Роговского; 8 – емкостной делитель; 9 – ГИН

Для того, чтобы подавить электронную составляющую тока в ускоряющем зазоре предусмотрено введение поперечного магнитного поля с напряженностью до 5 кЭ, создаваемого парой импульсных магнитных катушек 2. Ток ионного пучка, созданный в зазоре, регистрируется коаксиальным коллектором 1. Положение коллектора в пространстве может изменяться без нарушения вакуума, что используется для измерения энергии ионов по времени пролета. В рассматриваемом способе одним из сложных является вопрос приготовления большого количества эффективно работающих эмиттеров. В данной работе применены полосковые эмиттеры из алюминия, ввиду их эффективности и хорошей воспроизводимости получаемых результатов. Для диагностики импульсных ионных пучков использовались времяпролетный и магнитный анализаторы, а также поглощающие фольги. Развита методика определения параметров ионных пучков с помощью пластиновых трековых детекторов, которые применялись как в режиме регистрации отдельных ионов, так и в интегральном режиме. Использовались образцы из нитрата целлюлозы, которые после экспозиции исследуемым пучком ионов протравливались в щелочи. Полученные треки ионов (в виде лунок) наблюдались и фотографировались в электронном микроскопе (Рис.3). Разработан способ определения среднего заряда ионов в пучке по отношению плотности тока к плотности потока исследуемых ионов.

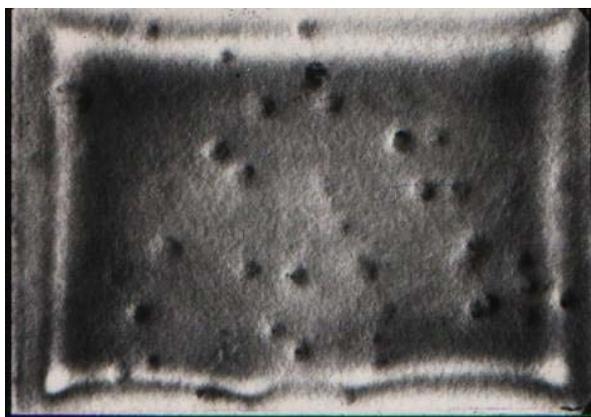


Рис.3. Треки ионов на поверхности нитрата целлюлозы

Схема, позволяющая производить одновременные измерения указанных выше величин, представлена на Рис.4. Ионный пучок 3 создавался в плоском

диоде, состоящем из блока эмиттеров 1 и сетки 2. Плотность ионного тока определялась с помощью экранированного коаксиального коллектора 4, сигнал с которого посредством СВЧ-кабеля 13 подавался на осциллограф.

Однородность ионного пучка в области входного отверстия коллектора проверялась путем экспонирования и обработки образца нитрата целлюлозы 10, который ставился под пучок и убирался с помощью держателя 11 и оси вращения 12.

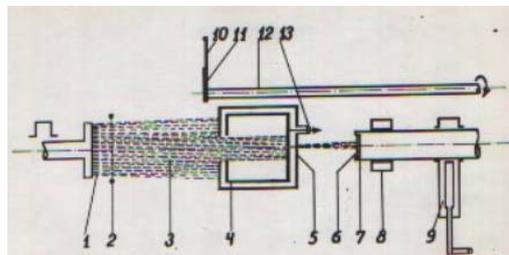


Рис.4. Схема определения среднего заряда ионов в пучке

Незначительная часть ионного пучка через малое отверстие в дне коллектора 5 выпускалась и направлялась на образец нитрата целлюлозы 6. Условия экспозиции образца 6 подбирались таким образом, чтобы треки ионов не перекрывались ($\sim 10^8$ треков/см²). Держатель образца 7, направляющая 8 и вакуумный шлюз 9 позволяли заменять образцы без нарушения вакуума в установке. После облучения ионами и обработки образца щелочью среднее количество треков на единице площади подсчитывалось с использованием электронного микроскопа.

Образцы нитрата целлюлозы применялись также в интегральном режиме в качестве регистрирующего материала, чувствительного к быстрым ионам (но не чувствительного к свету и электронам), при использовании в магнитном анализаторе и в ионной камере-обскуре.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Наиболее подробно изучен режим работы с плоским диодом с эмиттерами из алюминия. В нормальных рабочих условиях на согласованное сопротивление 170 Ом ГИН давал импульсы положительной полярности амплитудой $U = 400$ кВ, длительностью (на полувысоте) 50 нс, разбросом параметров импульсов $\sim 1\%$. При необходимости в ускоряющем зазоре создавалось поперечное магнитное поле напряженностью до 3 кЭ.

При подаче напряжения на блок эмиттеров были получены импульсы ионного тока до $I = 30$ А, длительностью 20 нс, с плотностью тока (усредненной по всей площади, занимаемой эмиттерами) до 2 А/см². Ток измерялся подвижным коллектором коаксиального типа, который посредством СВЧ-кабеля соединялся с пластинами скоростного осциллографа. При расположении коллектора сразу же за вытягивающей сеткой максимум тока соответствовал по времени максимуму напряжения, что было установлено при одновременной записи этих сигналов на двухлучевом осциллографе. Длительность импульса тока примерно вдвое короче импульса

напряжения (по времени импульс тока совпадает с верхней половиной импульса напряжения), что указывает на сильную зависимость тока от напряжения и является свидетельством в пользу автоэмиссионного происхождения ионов. Следует также отметить очень большой переанс данного источника ионов: $P = 0,14 \text{ мкА/В}^{3/2}$, в то время как почти предельным переансом для ионов считается $P = 0,1 \text{ мкА/В}^{3/2}$ [6]. При таком переансе существенно влияние пространственного заряда.

На Рис.5 представлены три осциллограммы импульсов напряжения с емкостного делителя (слева) и ионного тока на коллектор (справа), полученные в однолучевом осциллографе И2-7 (совмещение двух импульсов на одной развертке достигается схемой из двух кабельных задержек, тройника и согласованных аттенуаторов).

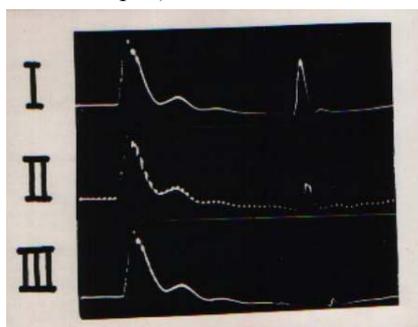


Рис.5. Осциллограммы импульсов напряжения (слева) и тока (справа)

Эти осциллограммы получены для трех положений коллектора (I, II, III – по мере увеличения длины пролета). При увеличении пролетного расстояния (ΔL) наблюдаются: уменьшение тока на коллектор (за счет углового расхождения пучка), время-пролетная задержка ($\Delta \tau$) и деформация токового импульса. На Рис.6 представлены зависимости $\Delta \tau$ (времяпролетная задержка максимума тока) от ΔL , полученные в результате обработки большого количества ($\sim 10^2$) подобных осциллограмм. Как следует из измерений, основную часть ионов составляют ВЗИ со скоростью перемещения максимума распределения $5,7 \cdot 10^8 \text{ см/с}$, что при $U = 400 \text{ кВ}$ соответствует отношению заряда к массе $Z/A \approx 0,4 (\pm 20 \%)$. Кроме того, имеется еще группа ионов ($\approx 10 \%$ от общего количества) со скоростью $1,7 \cdot 10^8 \text{ см/с}$, что при $U = 400 \text{ кВ}$ соответствует $Z/A = 1/27$ (ионы Al^+).

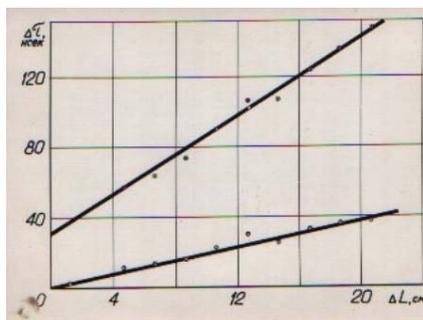


Рис.6. Времяпролетные измерения

Более точные измерения состава пучка были получены с применением магнитного анализатора с нитратом целлюлозы в качестве регистрирующего

материала. Обнаружены три группы ионов: большую часть составляют ионы с отношением заряда к массе $Z/A = 0,35 (\pm 15 \%)$; кроме того, есть ионы Al^+ и H^+ . На Рис.7 представлена величина отклонения (δ) этих групп ионов в зависимости от отношения заряда к массе и напряженности магнитного поля H (при этом для Al^+ и H^+ сплошными линиями нанесены расчетные зависимости).

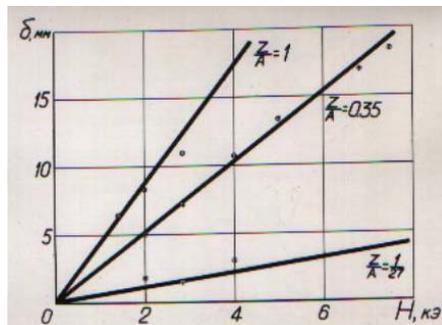


Рис.7. Измерение Z/A магнитным анализатором

Для определения среднего заряда ионов в пучке применен метод одновременного измерения среднего количества треков на единице площади и интеграла плотности тока, соответствующего высокозарядным ионам (см. раздел 2, Рис.4). Средний заряд определялся из их соотношения. Следует отметить, что треки, производимые ВЗИ, в основном одинаковы по форме и величине (см. Рис.3). В калибровочных измерениях регистрировались треки от протонов 400 кэВ, получаемых от отдельного источника; при этом было установлено, что при прочих равных условиях треки от протонов существенно меньше, чем от исследуемых ионов. В экспериментах по измерению среднего заряда $\langle Z \rangle$ треков от протонов было значительно меньше, чем треков от ВЗИ. В результате этих измерений, с учетом того, что около 10% тока переносится ионами Al^+ и H^+ , получено $\bar{Z} = 8 (\pm 20 \%)$. Все приведенные выше данные с учетом погрешностей измерений могут быть согласованы, если считать, что исследуемый пучок в основном состоит из ВЗИ алюминия ($A = 27$) со средним зарядом $Z = 8 \pm 1$.

Следует отметить, что в экспериментальном стенде было предусмотрено смотровое окошко напротив промежутка между блоком эмиттеров и вытягивающей сеткой (см. Рис.2, поз. 3 и 5). В результате визуального наблюдения установлено, что при вакууме 10^{-6} Торр, правильном подборе параметров, предварительной тренировке системы в момент подачи импульса напряжения 300...400 кВ и автоэмиссии ионного тока нет ни пробоя диодного промежутка, ни образования плазмы на эмиттерах.

Были измерены некоторые другие характеристики пучка ионов. Однородность пучка по сечению была проверена путем экспонирования им образца нитрата целлюлозы. Степень однородности эмиссии блока эмиттеров была проверена путем его изображения в «ионных лучах» с использованием ионной камеры-обскуры с нитратом целлюлозы в качестве регистрирующего материала. Из этих же измерений определена расходимость пучка, которая в данном случае составила $\approx 4^\circ$.

Для получения более мощных пучков ВЗИ был собран коаксиальный диод с радиально-сходящимся потоком ионов. В этой сборке все основные параметры были сохранены такими же, как и в плоском диоде, а количество эмиттеров и занимаемая ими площадь увеличены на порядок. В этом случае получен ток ВЗИ до 200 А при импульсной мощности пучка около 80 мегаватт.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОЭМИССИОННОГО ИСТОЧНИКА

Оптимизация блока эмиттеров состояла в определении оптимальной (по току ВЗИ) высоты эмиттеров и оптимального расстояния между эмиттерами. Алюминиевые эмиттеры представляли собой полоски длиной 40 мм, располагаемые параллельно на расстоянии Δ .

Эмиттеры и прокладки собирались и стягивались в один пакет, причем эмиттеры выступали над прокладками на высоту h . Высота h варьировалась в наших экспериментах от 1 до 4 мм (в случае $h = 5$ мм при подаче напряжения на эмиттеры, они повреждались). Как видно из Рис.8, в указанных пределах ионный ток I растет линейно с ростом h .

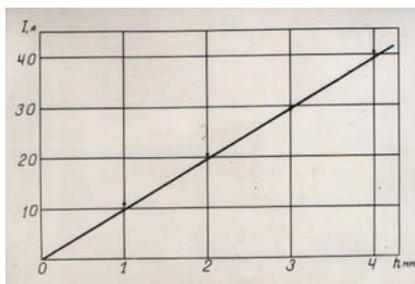


Рис.8

При оптимизации расстояния между эмиттерами Δ установлено, что при больших Δ суммарный ток пропорционален плотности расположения эмиттеров и, следовательно, обратно пропорционален Δ . При уменьшении Δ , когда становится ощутимым взаимное экранирование эмиттеров, суммарный ток уменьшается, несмотря на то, что количество эмиттеров на единицу длины увеличивается. Это иллюстрируется экспериментальной зависимостью на Рис.9, откуда видно, что ионный ток с блока эмиттеров (площадью 40×40 мм) достигает максимума при $\Delta = 2$ мм (при количестве эмиттеров 20 шт., длине каждого эмиттера 40 мм).

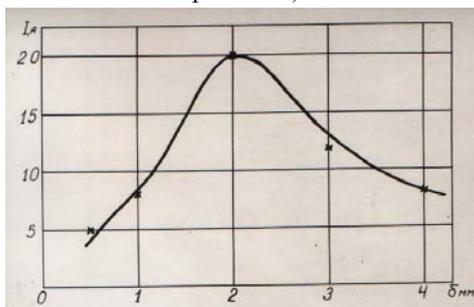


Рис.9

Далее на Рис.10 представлена зависимость относительной величины тока ВЗИ для плоского ионного автоэмиссионного диода (I/I_0 , $I_0=40$ А) от межэ-

лектродного расстояния (d), т.е. от расстояния между эмиттерами и вытягивающей сеткой.

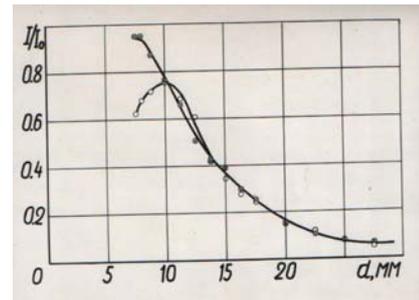


Рис.10

Черными кружками отмечена кривая, полученная при наличии в диодном промежутке поперечного магнитного поля напряженностью 3 кЭ, создаваемого специальными катушками (см. их изображение на Рис.2, поз.2). Белыми кружками отмечена кривая, полученная в отсутствие магнитного поля. Видно, что при наличии поперечного магнитного поля рост тока ВЗИ прекращается при меньших значениях d . Оптимальная величина d подбирается экспериментально по максимуму тока ВЗИ и лежит в интервале $d = 9 \dots 14$ мм при $U = 350 \dots 400$ кВ.

Кроме плоского и цилиндрического диодов было также проведено исследование диода со сферической фокусировкой. Для пучка ионов Al (+8) с энергией $W_i = U \cdot Z = 0,4 \cdot 8 = 3,2$ МэВ, током 30...40 А, диаметром около 4 см, отношением заряда к массе $Z/A \approx 0,3$ существенно влияние пространственного заряда. Чтобы пропустить такой пучок через отверстие диаметром меньше начального диаметра пучка, его следует сфокусировать. Для решения этой задачи произведен расчет диода со сферической фокусировкой с использованием известных формул [5]. На основании этих расчетов был изготовлен соответствующий диод с алюминиевыми полосковыми эмиттерами. Экспериментально найдено, что при напряжении 400 кВ, 50 нс, диодном промежутке 17 мм, кроссовер находится на расстоянии 50 мм от сетки. При этом через диафрагму диаметром 25 мм, расположенную в области кроссовера, проходит ток 32 А с плотностью 6,5 А/см². Экспериментальные данные по фокусировке пучка согласуются с расчетными. Кроме того, еще раз подтверждаются предыдущие измерения: заряда основной части ВЗИ ($Z = 8 \pm 1$) и отношения атомного веса к заряду ионов ($Z/A \approx 0,3$).

ВЫВОДЫ

1. Проведены эксперименты по генерации интенсивных пучков высокозарядных ионов путем ионной полевой эмиссии (автоэмиссии). В работе это осуществлено с использованием блоков эмиттеров (в трех вариантах) в виде металлических лезвий (полосок), в данном случае алюминиевых. Проведена оптимизация параметров. При подаче на эмиттеры импульсного напряжения U (+400 кВ, 50 нс) зарегистрирован ток ВЗИ от 30 до 200 А длительностью 20 нс; при этом пробой диодного промежутка, а также образование плазменного слоя вблизи эмиттеров не имели места. Ток в основном состоял из

ионов Al с зарядом $Z = 8 \pm 1$. Максимум тока совпал с максимумом напряжения; при $U < 200$ кВ ток ВЗИ был пренебрежимо мал. Эти данные, а также вид зависимости тока ВЗИ от высоты эмиттеров и расстояния между эмиттерами (см. Рис.8 и 9) подтверждают автоэмиссионный механизм генерации ВЗИ.

2. При полученных параметрах пучков ВЗИ существенно влияние их пространственного заряда. Так, при работе с плоским блоком эмиттеров площадью 16 см^2 усредненная плотность тока ВЗИ достигала 2 А/см^2 , первеанс пучка составил $0,14 \text{ мкА/В}^{3/2}$, в то время как «почти предельный первеанс» [6], определяемый пространственным зарядом, для таких ионов: $0,05 \text{ мкА/В}^{3/2}$.

Далее, при работе с блоком эмиттеров сферической конфигурации пучок ВЗИ был сжат до кроссовера радиусом 13 мм и плотности тока $6,5 \text{ А/см}^2$, что соответствует расчетам с учетом пространственного заряда. Также была определена зависимость тока ВЗИ от величины диодного промежутка в случае автоэмиссионного анода и влияния пространственного заряда.

3. Несколькими способами определено, что пучки ВЗИ на $80 \dots 90 \%$ состоят из ионов алюминия с $Z = 8 \pm 1$. Как указано в [1] (раздел III.3), полевая эмиссия ионов Al^{+1} может происходить при напряженности электрического поля $E \geq 1,25 \cdot 10^8 \text{ В/см}$, а

ионов Al^{+2} – при $E \geq 1,61 \cdot 10^8 \text{ В/см}$. Очевидно в наших экспериментах при импульсном напряжении $+400 \text{ кВ}$, 50 нс , в отсутствие пробоев и повреждения эмиттеров, достигаются значительно большие поля ($E \sim 10^9 \text{ В/см}$), обеспечивающие полевую эмиссию ионов $\text{Al}^{+7} \dots \text{Al}^{+9}$.

В заключение авторы благодарят А.М. Егорова, И.Н. Онищенко, Н.Г. Шулику, И.М. Михайловского за обсуждение результатов этой работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Э. Мюллер, Т. Цонь. *Автоионная микроскопия*. М.: «Металлургия», 1972, с.360.
2. Э.В. Мюллер, Т.Т. Цонг. *Полевая ионная микроскопия, полевая ионизация и полевое испарение*. М.: «Наука», 1980, с.221.
3. Б.И. Иванов // *Письма в ЖЭТФ*. 1974, т.20, с.170.
4. Б.И. Иванов, В.А. Мирошниченко, В.П. Прищепов // *Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения (Дубна, 1976)*, с.289-291.
5. И.В. Алямовский. *Электронные пучки и электронные пушки*. М.: «Сов. Радио», 1966, с.38-42.
6. С.И. Молоковский, А.Д. Глушков. *Интенсивные электронные и ионные пучки*. гл.1. М.: «Энергоатомиздат», 1991, с.303.

Статья поступила в редакцию 28.10.2011 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF FIELD EMISSION METHOD FOR HIGH-CHARGE ION BEAMS GENERATION

B.I. Ivanov, V.P. Prishchepov

Some experiments for ion beams generation were fulfilled in case of feeding the pulse voltage of $+300 \dots 400 \text{ кВ}$ 50 ns to a block of aluminum knife-edge emitters. The measurements performed with using of track detectors, time-of-flight mass spectrometer, and magnetic spectrometer were shown that the ion beams largely consist of high-charge aluminum ions ($Z = 8 \pm 1$) and currents $30 \dots 200 \text{ А}$; generation of high-charge ions is connected with the field emission of the ions out of the emitters at the considerable electric field strength ($E \sim 10^9 \text{ В/см}$).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОЕМИСІЙНОГО СПОСОБУ ОТРИМАННЯ ПУЧКІВ ВИСОКОЗАРЯДНИХ ІОНІВ

Б.І. Іванов, В.П. Прищепов

Проведені експерименти по генерації іонних пучків при подачі імпульсної напруги $+300 \dots 400 \text{ кВ}$ тривалістю 50 нс на блок острийних емітерів з алюмінію. Виміри, проведені з використанням трекових детекторів, часпролітного і магнітного аналізаторів, показали, що пучки в основному складаються з високозарядних іонів алюмінію з $Z = 8 \pm 1$ і струмом $30 \dots 200 \text{ А}$; генерація високозарядних іонів пов'язана з автоемісією іонів з емітерів при значній напруженості електричного поля ($E \sim 10^9 \text{ В/см}$).