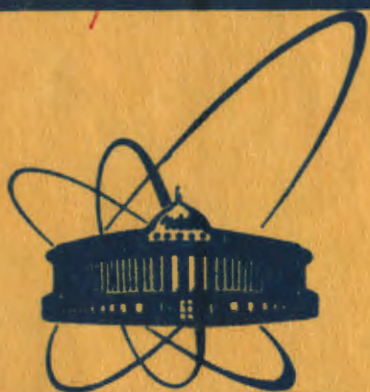


1601/82

5/IV-82



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P13-82-3

В.Г.Новиков, Б.А.Шестаков

**ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ АТОМОВ МЕТАЛЛОВ
ИЗ ТЕРМОЗФУЗИОННОГО ИСТОЧНИКА**

1982

ВВЕДЕНИЕ

Загрузка электронных колец в адгезаторе КУТИ ионами выбранного для ускорения элемента может происходить из среды атомов, находящихся во всем объеме камеры, или же из пересекающего кольцо направленного потока атомов соответствующего элемента^{/1/}. Для выбора оптимального режима работы адгезатора необходимо знать основные параметры среды, окружающей электронное кольцо. Определение параметров компонент газовой смеси в объеме камеры, а также параметров потоков атомов газообразных элементов достаточно хорошо освоено^{/2/}.

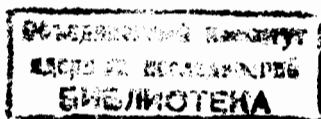
Большой интерес представляет загрузка колец ионами и дальнейшее ускорение ионов тяжелых элементов, находящихся в нормальных условиях в твердом состоянии. Диагностика потоков таких атомов значительно сложнее /особенно для малых концентраций атомов/, ей посвящено и небольшое количество работ. В основном это диагностика, разработанная в технике напыления тонких проводящих пленок. Диагностика импульсных потоков атомов металлов изучена относительно слабо.

Для реализации загрузки электронных колец ионами твердотельных элементов в Отделе новых методов ускорения был разработан и изготовлен термоэффузионный источник. Источник мог работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Диагностика потоков атомов металлов из источника осуществлялась кварцевым датчиком толщины напыленных пленок, а также, после специальной калибровки и некоторых изменений в конструкции, серийными образцами вакуумных датчиков ПМИ-10 и ПМИ-2.

В данной работе описываются конструкция термоэффузионного источника, его параметры, область использования источника /по рабочему веществу/ и диагностическая аппаратура для определения параметров потоков атомов металлов.

ТЕРМОЭФФУЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК

Принцип действия источника основан на том, что при нагревании до соответствующей температуры рабочего вещества из химического элемента, находящегося в нормальных условиях в твердом состоянии, часть его переходит в парообразное состояние. Образовавшийся пар при истечении в вакуум /в сторону более низкого давления/ через сопло /различной геометрии/ образует на-



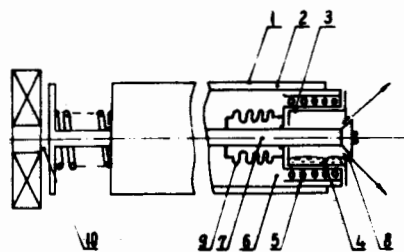


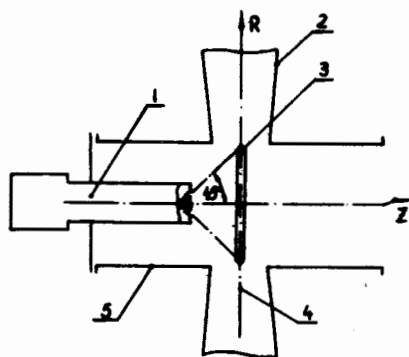
Рис.2. Расположение источника в камере адгезатора.

правленные потоки атомов рабочего вещества, причем при постоянно открытом сопле реализуется непрерывный стационарный поток, а при импульсно открываемом сопле - импульсный поток атомов рабочего вещества.

На рис.1 показан упрощенный вид источника. Источник состоит из корпуса - 1 /нержавеющая трубка $\varnothing 36$ мм, толщиной 0,5 мм/, полости - 2 с проточной водой для общего охлаждения источника, испарительной камеры - 3 /жаростойкая нержавеющая сталь/ с рабочим веществом - 4 и нагревателя камеры - 5 /молибденовая проволока/. Внутренняя полость - 6 содержит токоподводы нагревателя, термопару /хромель-алюмель/ для контроля температуры камеры, шток - 7, открывающий сопловой аппарат - 8. Сильфон - 9 служит для передачи движения штока и отделения нагревательной камеры от внутренней полости, которая откачивается на форвакуум с целью предотвращения образования окислы на нагреваемых элементах. Шток соединен с импульсным электродинамическим клапаном - 10^{3/8}, что и позволяет источнику работать в импульсном режиме. Сопловой аппарат может быть сменным /конусный, цилиндрический, с отверстием и т.д./ при работе как в непрерывном, так и в импульсном режимах, что обеспечивает получение потоков атомов различной конфигурации.

Как показано в^{4/}, загрузку электронных колец ионами в камере адгезатора предпочтительно проводить в конце сжатия кольца, когда его пересекает поток атомов из источника. Такому способу загрузки кольца соответствует расположение источника, схематически показанное на рис.2, где 1 - источник, 2 - камера адгезатора, 3 - электронное кольцо, 4 - медная плоскость камеры, 5 - осевой патрубок. Исходя из геометрических особенностей камеры адгезатора и возможности инжектировать атомы

Рис.1. Упрощенный вид термоэффузионного источника.



в электронное кольцо в конце его сжатия на различные радиусы /что достигается смещением источника по оси z /, оказалось необходимым направить поток атомов под углом 45° к оси z.

Из расчетов по накоплению ионов в электронном кольце^{4/} следует, что плотность потока атомов n_a в точке инжекции должна составлять величину примерно $10^9 \div 10^{10} \text{ см}^{-3}$, т.е. давление в потоке атомов p_a должно быть равно 10^{-7} Тор. С учетом потерь интенсивности потока на расстоянии от источника до точки инжекции /около 7 см/ и в сопле давление паров в камере нагревателя необходимо поддерживать на уровне $\geq 10^{-3}$ Тор. Температура камеры испарителя T_k данного источника может достигать значения 900°C . Таким образом, в качестве рабочего вещества термоэффузионного источника могут быть использованы химические элементы, которые при температуре $T_k \leq 900^\circ\text{C}$ имеют удельное давление своих паров $p_{уд} \geq 10^{-3}$ Тор. Этим условиям удовлетворяют такие элементы, как Mg, S, K, Mn, Zn, Cd, Jn, Pb и некоторые другие^{5/}. Испарительная камера источника - сменная, что позволяет на источнике получить потоки атомов различных перечисленных элементов. Количество нейтральных частиц /или плотность в потоке/, выходящих из источника, может регулироваться изменением $p_{уд}$ в камере, т.е. изменением температуры T_k . Мощность нагревателя испарительной камеры - около 150 Вт. В качестве рабочего вещества в данной работе использовался свинец, предпочтительный при загрузке его ионами электронных колец и дальнейшем ускорении и технически удобный при создании потоков его атомов.

ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ АТОМОВ МЕТАЛЛОВ

К важнейшим параметрам потоков и среды атомов газа или паров относятся: давление p /концентрация n /, скорость атомов v_a в потоке и объем, занимаемый потоком.

Рассмотрим работу ионизационных датчиков давления, в которых атомы среды ионизируются потоком электронов с катода и образовавшиеся ионы улавливаются коллектором. Ионный ток I_+ коллектора /при известном токе эмиссии I_- / является величиной, прямо пропорциональной давлению p /или концентрации n / атомов в определенном диапазоне давлений.

Как известно, в ионизационных датчиках

$$p = k \frac{I_+}{I_-},$$

где k - коэффициент, зависящий от сорта атомов, конструкции датчика и других условий.

Значения k для ионизационных датчиков типа ПМИ-10, ПМИ-2 известны для некоторых газов, таких, как He, Ne, N₂, Ar,

Кг, Хе. Эти датчики могут работать в среде атомов других паров и газов, если при этом они химически неактивны по отношению к материалам катода и других элементов датчика. Датчик ПМИ-10 представляет собой диодную конструкцию, электроды - из никеля, катод - иридиевый, чувствительная область датчика - примерно 8x6x2 мм, площадь коллектора - 0,7 см². Датчик ПМИ-2 - триодной конструкции, электроды - никель, катод и держатели электродов - вольфрам, чувствительная область датчика - примерно цилиндрическая длиной 25 мм и диаметром 15 мм, площадь коллектора = 15 см².

В данной работе проводилась отработка диагностики потоков атомов свинца, который не вступает в химические реакции с конструкционными материалами датчиков ПМИ-10 и ПМИ-2. Датчик ПМИ-10 обладает лучшей локальностью при измерениях, а датчик ПМИ-2 может измерять меньшие давления. Таким образом, принципиально возможно использовать датчики ПМИ-10 и ПМИ-2 для диагностики потоков атомов металла /например, свинца/, если определить значение коэффициента k для этих датчиков и для выбранного сорта атомов.

В некоторых работах /6/ значение k для заданной конструкции датчика определяется различными экспериментальными способами, и лишь в /2/ отмечается, что для одноатомных и двухатомных паров и газов величина k для обычных конструкций датчиков приблизительно пропорциональна N_e - общему числу электронов в молекуле.

В работе Зауэрбрея /7/ впервые было показано, что сдвиг резонансной частоты кристалла кварца прямо пропорционален массе нанесенного материала /по крайней мере до величины 0,1 от массы кристалла/. В нашей работе применялся кварцевый вибратор /радиокварц РКМ-4,5/ толщиной 0,5 мм, т.е. могло обеспечиваться измерение пленок толщиной до 50000 Å.

Расчетная формула для толщины пленки δ имеет вид /7/:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f^2} \cdot \frac{\rho_{кв}}{\rho} \cdot N \cdot \frac{S_{эл}}{S_H},$$

где f - основная частота вибратора, Δf - сдвиг частоты, $\rho_{кв}$ - плотность кварца, ρ - плотность напыляемого вещества, N - частотная постоянная /для АТ-среза кварцевого кристалла $N = 1670$ кгц мм/, $S_{эл}$ и S_H - площади электрода и напыления соответственно.

С учетом опыта работы с кварцевыми вибраторами и целей исследований была выбрана основная частота кварца $f = 4,5$ МГц и $S_{эл} = S_H = 1,5$ см². В этом случае для свинца имеем:

$$\delta [Å] = 2 \cdot 10^{-1} \Delta f / Гц /.$$

При работе с кварцем учитывался уход основной частоты $f - \Delta f$, а измерения Δf проводились электронным частотомером ЧЗ-38 при

температуре датчика $T_d = 20^\circ C$. Знание толщины пленки позволяет вычислить общее количество атомов в слое. Однако плотность вещества в тонких напыленных пленках не всегда равна плотности того же вещества в массивном куске. Поэтому определение таким образом количества атомов в слое может давать завышенное значение - до 20% /7/.

Отработка диагностики потоков проводилась в вакуумной камере /давление в камере $p_k \approx 5 \cdot 10^{-6}$ Тор / на стационарной струе атомов из термоэффузионного источника, работавшего в непрерывном режиме испарения. Диаметр сопла источника - 1,2 мм, длина - 1 мм. Измерения проходили при $T_k = 670^\circ C$, т.е. $p_a \approx 5 \cdot 10^{-3}$ Тор.

Если средняя длина пробега молекул пара велика по сравнению с расстоянием от сопла до точки измерения, то средняя тепловая скорость молекул пара V_a при температуре T_k определяется как /2/:

$$V_a = \left(\frac{8kT_k L}{\pi M} \right)^{1/2},$$

где k - постоянная Больцмана; L - число Авогадро; M - молекулярный /или атомный/ вес испаряемого материала. Тогда для свинца при $T_k \approx 670^\circ C$ скорость $V_a \approx 3 \cdot 10^4$ см/с. Число атомов пара N_a , проходящих /конденсирующихся/ через площадку площадью S , со скоростью V_a за время t $N_a = n V_a S t$, где n - плотность пара в точке измерения. При этом ось потока проходит через центр площадки и будем считать, что плотность n постоянна в ее пределах. В нашем случае величины V_a , S и t были известны, величина N_a - измерена. Это позволило определить плотность атомов в стационарном потоке $n = \frac{N_a}{V_a \cdot S \cdot t}$. Исходя из этого можно откалибровать для измерений ионизационные датчики ПМИ-2 и ПМИ-10.

Питание датчиков осуществляется от вакуумметра ВИТ-3. Если поместить ионизационный датчик и кварцевую пластинку в поток атомов свинца практически в одну точку, то можно считать, что для ионизационного датчика $n_a = k \frac{I_+}{I_-}$. Зная величины n_a , I_+ , I_- , легко определить значение коэффициента k для данного датчика и сорта металла /свинец/. Например, для одного из датчиков, ПМИ-2, установленного в потоке свинца, при $I_- = 10^{-4}$ А, $I_+ = 4 \cdot 10^{-9}$ А определенное с помощью кварца значение n_a составило $1 \cdot 10^{10}$ см⁻³ откуда $k \approx 3 \cdot 10^{14}$. Таким же образом можно определить значение k для датчика ПМИ-10.

Следует отметить, что датчики ПМИ-2 и ПМИ-10 подвергались некоторым конструктивным изменениям. С ПМИ-2 был удален стеклянный баллон, перед входом в чувствительную область датчика поставлена диафрагма с отверстием $\phi 8$ мм, выводы электродов были защищены колпачками для предотвращения замыкания электродов при наличии проводящих пленок. Аналогично был изменен и датчик ПМИ-10.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Важным условием диагностики потоков атомов металлов является отсутствие отражения атомов, вышедших из термоэффузионного источника, от "холодных" стенок камеры и элементов конструкции. Например, в работе ^{16/} отмечается, что в таких случаях отражения отсутствуют, т.е. все атомы конденсируются на "холодных" поверхностях.

Для подтверждения этого положения был проведен простой эксперимент, схема которого показана на рис.3. В камере 1 располагался источник 2, а в точках А, В, С - кварцевые датчики. Датчики, установленные в точках А и В, находились в области видимости источника, а установленные в точке С - вне этой области. При работе источника в непрерывном режиме на датчики в точках А и В напылялись пленки толщиной 400 и 200 Å соответственно, при этом сдвиг частоты в точке С соответствовал толщине пленки менее 5 Å. Однако этот сдвиг частоты мог быть вызван и приборной ошибкой /генератора и частотомера/.

Неоднократно повторенные измерения показывают, что отражения атомов свинца от стенок не обнаружено, т.е. коэффициент прилипания близок к 1.

Измерения толщины пленок кварцевым датчиком и давления ионизационными датчиками, проведенные на разных расстояниях от сопла, показывают, что плотность атомов в потоке изменяется примерно обратно пропорционально квадрату расстояния от сопла /рис.4/.

Полная конденсация атомов свинца на ненагретых поверхностях позволяет варьировать параметры узких атомных потоков изменением геометрии сопла и диафрагмы с отверстиями. На рис.5 показаны сечения потока на расстоянии 5 см от сопла без диафрагмы - кривая 1 и с диафрагмой / ϕ отверстия - 8 мм, расстояние от сопла - 15 мм/ - кривая 2.

Как показано в работе ^{13/}, датчики ПМИ-2 и ПМИ-10 можно использовать для диагностики импульсных потоков газа. Измерение длительности импульсного потока атомов проводилось датчиком ПМИ-10, который имеет меньшие размеры и дает более точные значения длительности, чем датчик ПМИ-2. Например, для одного из импульсных режимов работы источника / $T_k \approx 670^\circ\text{C}$, $p_a \approx 5 \cdot 10^{-3}$ Тор / на расстоянии в 6 см от сопла длительность потока составила от 300 мкс и больше /в зависимости от настройки электродинамического клапана источника/. Увеличенная по сравнению с газовым источником длительность потока объясняется, видимо, большей инерционностью подвижной части клапана в термоэффузионном источнике /наличие сильфона и т.д./ . Измерение скорости перемещения сгустка атомов свинца /по времени пролета известного расстояния/ дало значение, близкое к $3 \cdot 10^4$ см/с, что соответствует расчетной скорости.

Были проведены измерения параметров импульсных потоков атомов свинца из источника с коническим соплом в условиях, близких по геометрии к реальному расположению источника в камере адгезатора. На рис.6 показана зависимость плотности потока атомов от радиуса в медианной плоскости.

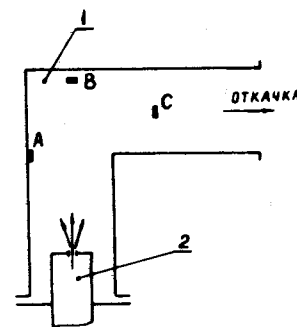


Рис.3. Схема эксперимента по определению отражения атомов свинца от стенок камеры.

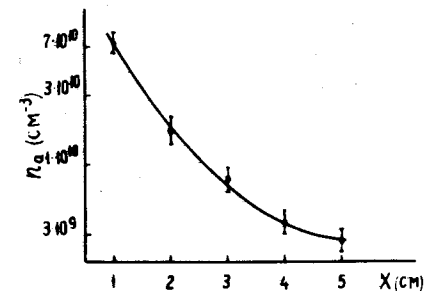


Рис.4. Зависимость плотности атомов свинца в потоке от расстояния сопла - датчик.

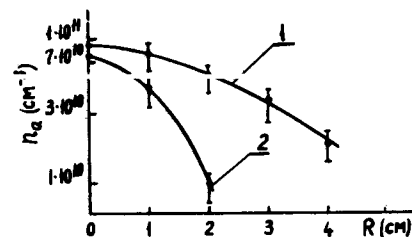


Рис.5. Сечение потока атомов свинца на расстоянии 5 см от сопла. Кривая 1 - измерения без диафрагмы, кривая 2 - с диафрагмой.

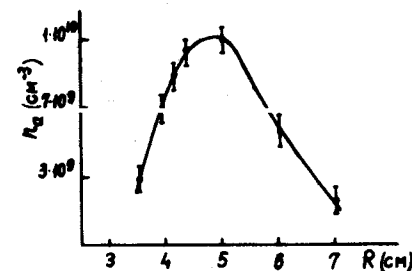


Рис.6. Сечение импульсного потока атомов свинца плоскостью, соответствующей медианной плоскости камеры адгезатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный термоэффузионный источник, относительно простой по конструкции, позволяет получать потоки атомов целого ряда легкоплавких элементов, в том числе представляющих интерес для ускорения ионов этих элементов в коллективном ускорителе.

теле. Испытание источника показало надежную работу нагревателя, возможность работы с цикличностью до 10 Гц и выявило необходимость профилактической чистки соплового аппарата.

Проведенная диагностика потоков атомов свинца с помощью кварцевых и ионизационных датчиков проста и достаточно надежна. Однако следует отметить, что измерение давлений в потоке, меньших 10^{-7} Тор, принципиально ограничено для рассмотренных ионизационных датчиков и требует более сложных методов диагностики /например, масс-спектрометрических и т.д./. Точность измерения плотности атомов металлов ионизационными датчиками /с учетом всех погрешностей/ составляла, примерно, $+10\%$ - -30% .

Авторы выражают благодарность З.А.Тер-Мартirosяну за разработку конструкции источника, Л.Ф.Иссинской за разработку схем питания и управления, И.П.Лушникову и А.М.Левитину за творческое участие в наладочных работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
2. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. "Мир", М., 1964.
3. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-10278, Дубна, 1976.
4. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, Р9-80-124, Дубна, 1980.
5. Коваленко В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. "Сов.радио", М., 1975.
6. Современная вакуумная техника. Сборник статей. ИЛ, М., 1963.
7. Saurbrey P. Zs.f.Phys., 1959, 155, p.206.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 января 1982 года.

Новиков В.Г., Шестаков Б.А.

P13-82-3

Диагностика потоков атомов металлов из термоэффузионного источника

Представлена конструкция термоэффузионного источника атомов легкоплавких элементов. Источник может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Диагностика параметров потока атомов проводилась с помощью кварцевых датчиков толщины напыленных пленок, а также /после калибровки и некоторых изменений в конструкции/ ионизационных датчиков типа ПМИ-2 и ПМИ-10. Получены импульсные потоки атомов свинца длительностью 300 мкс и больше, плотностью атомов $10^{10}+10^{11}$ см⁻³, распространяющихся со скоростью примерно $3 \cdot 10^4$ см/с. Термоэффузионный источник может быть использован для загрузки ионами электронных колец и дальнейшего ускорения ионов в адгезаторе коллективного ускорителя.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Novikov V.G., Shestakov B.A.

P13-82-3

Diagnostics of Metal Atomic Fluxes from a Thermoeffusive Source

The design of thermal atomic source of some low-melting chemical elements is presented. The source could work both in continuous and pulse regimes and may create respective atomic fluxes. The measurements of some main characteristics of flux were performed by means of an improved quartz detector and PMI-2 and PMI-10 ionization detectors. The Pb pulse atomic fluxes were obtained, velocity of atoms was near $3 \cdot 10^4$ cm/s, atomic density in the flux was measured to be about $10^{10}+10^{11}$ cm⁻³, persistence of the flux was over 300 μ s. The source may be used for the formation of ion component in electron rings of the collective accelerator.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.