

Определив $\langle \rho(t) \rangle$, можно найти и $\Phi(t)$, так как, в соответствии с соотношениями (6) и (10), $\Phi(t) = (\langle \rho(t) \rangle - \langle \rho^2 \rangle) / \rho_0$. Если известна $\Phi(t)$, соотношение (8) позволяет определить $f(\rho, t)$. Величину распухания можно, впрочем, найти, и не прибегая к отысканию $f(\rho, t)$, так как зависимость от времени полного объема пор выражается непосредственно через $\Phi(t)$ и первые моменты исходной функции распределения f_0

$$\Delta V = \frac{4\pi\rho_0^4}{3} \left\{ \int_1^\infty y^3 f_0(y) dy + 3\Phi(t) \int_1^\infty y^2 f_0(y) dy + 3\Phi^2(t) \times \right. \\ \left. \times \int_1^\infty y f_0(y) dy + \Phi^3(t) \int_1^\infty f_0(y) dy \right\}$$

Если учесть, что, начиная с определенного этапа распухания, материал можно считать пористым, то полученные результаты позволяют, в частности, экстраполировать экспериментальные данные, относящиеся к малым значениям выгорания, на область больших его значений.

Поступила 4 XII 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Агранович В. М., Михлин Э. Я., Семенов Л. П. Доклад № 338А на III Международн. конф. по мирному использ. атомной энергии. Женева, 1964.
2. Greenwood G. W., Foreman A. J. E., Rimmer D. E., J. Nucl. Mat., 1959, vol. 1, p. 305.
3. Лебедев Н. Н. Специальные функции. Физматгиз, 1963.

О ВЫВОДЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ИЗ ВАКУУМА В ГАЗ ЧЕРЕЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ОКНО

А. М. Трохан

(Новосибирск)

Для вывода из вакуума в газ высокого давления электронных пучков малой мощности рассмотрена возможность использования капилляров, проплавляемых самим пучком в стенке из кварца.

Для вывода мощных пучков используются дифференциальные газодинамические окна, в которых насосная откачка заменена вымораживанием рабочего газа — углекислоты или паров воды. Рассмотрены две схемы таких устройств с вымораживанием внутри окна и вне его.

В тех случаях, когда требуемая мощность невелика и могут быть использованы очень тонкие пучки диаметром в несколько десятков микрон, вывод может быть осуществлен непосредственно через открытое отверстие соответствующего диаметра в стенке непрерывно откачиваемой вакуумной системы. Количество газа, натекающее в вакуумную систему через такое отверстие, зависит от размеров отверстия, величины давлений и рода газа. Для воздуха, натекающего в вакуум из атмосферы при нормальных условиях через цилиндрический капилляр, натекание может быть определено следующим образом [1]:

$$I \approx 7600 \frac{d}{L} (1 + 7000d) \left[\frac{\mu \text{ мм рт. ст.}}{\text{сек}} \right] \quad (1)$$

Здесь d [см] — диаметр капилляра, L [см] — его длина.

Для сохранения вакуума это натекание должно быть скомпенсировано непрерывной работой вакуумного насоса соответствующей мощности.

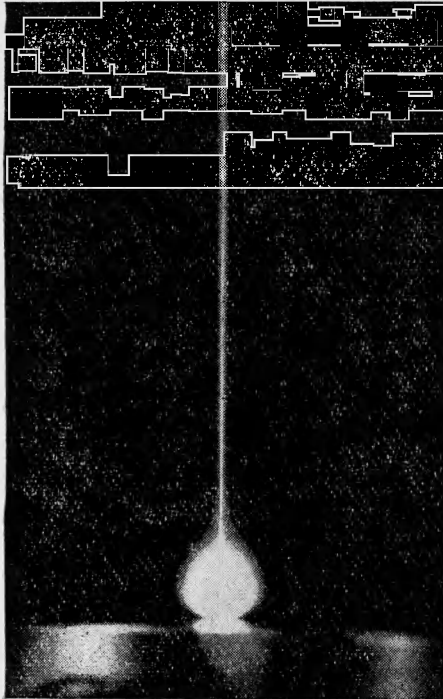
При выводе пучка через капилляр, чтобы получить хорошую его фокусировку и очень тонкую юстировку, следует использовать отверстие, проплавляемое в стенке самим пучком. Очень интересно применение для этой цели кварца. В проведенных опытах пучок 30 кэв электронов диаметром 0.8 мм при плотности тока порядка 1 а/см^2 направлялся на кварцевые пластинки толщиной 16 мм. Довольно быстро (15—20 сек) пучок проплавлял пластинку, образуя коническое отверстие с полууглом при вершине порядка 2° , переходящее в капилляр примерно постоянного диаметра, равного 40—50 мк. При выходе из капилляра в газ пучок имеет вид, представленный на фиг. 1. У выхода пучка из пластинки имеет место довольно яркий факелообразный ореол, образуемый медленными электронами. Размеры ореола уменьшаются с ростом плотности газа. При давлениях воздуха, больших 100 мм рт. ст., при комнатной температуре ореол исчезает полностью. Граница ореола резко выражена. Это свидетельству-

ет, что величина энергии заторможенных электронов группируется около какого-то определенного значения. Часть же электронов проходит без заметного торможения, образуя узкий луч.

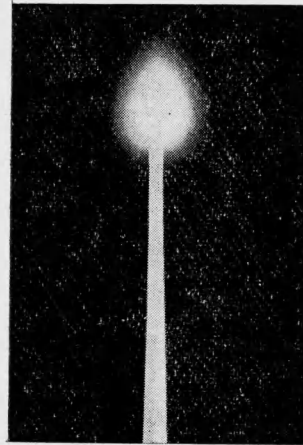
Подобная же картина имеет место и при прохождении электронов через кварцевые трубки. На фиг. 2 приведена фотография пучка электронов, прошедшего через коническую трубку длиной 50 мм с диаметром отверстия 0.5—0.3 мм. Здесь доля электронов, прошедших через трубку без торможения, невелика. Нужно отметить, что при проплавлении кварца пучком в окрестностях отверстия возникают значительные термические напряжения, которые при быстром остывании приводят к появлению большого количества мелких трещин, ввиду чего желателен отжиг пластины или уменьшение ее размеров (цилиндр диаметром 5—6 мм).

Если после проплавления отверстия ток пучка уменьшить в 2—3 раза, то диаметр капилляра со временем практически не увеличивается. В наших экспериментах капилляры в течение нескольких часов

работали при плотности тока выходящего пучка, равной $2.5-3 \text{ а/см}^{-2}$ при ускоряющем напряжении 30 кэ. Эта плотность тока примерно на порядок выше средней плотности тока пучка, падающего на пластину, что может быть объяснено фокусирующим влиянием поверхностных зарядов, образующихся на внутренней поверхности отверстия.



Фиг. 1



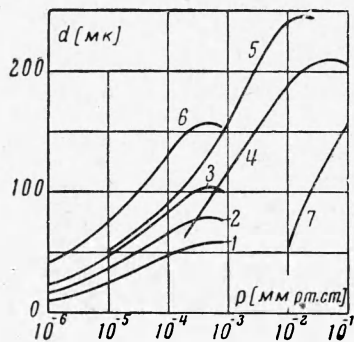
Фиг. 2

Использование вывода пучка через капилляр, проплаваемый в кварце, позволяет существенно упростить конструкцию электронной пушки, поскольку отпадает надобность в юстировке (два угловых и два линейных перемещения), и уменьшить ее габариты. Уменьшается и необходимая мощность насосов.

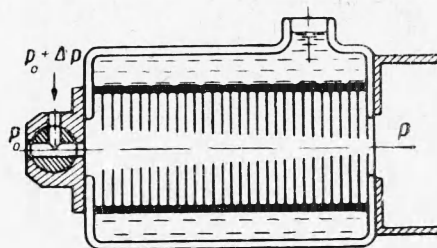
На фиг. 3 в качестве примера приведена зависимость вакуума, обеспечиваемого промышленными насосами различных типов, от диаметра цилиндрического капилляра длиной 5 мм, соединяющего вакуумную систему с атмосферой; здесь 1 — насос ЦВЛ-100, 2 — Н-5, 3 — ЦВЛ-15 м, 4 — ВН-3, 5 — БН-1500, 6 — Н-8Т, 7 — ВН-1. Вычисления велись по формуле (1). Как видно из приведенных графиков, использование капилляров диаметром 30—50 мк вполне реально даже при применении сравнительно маломощных насосов. Применение же больших диаметров приводит к очень резкому возрастанию необходимой скорости откачки насоса.

Для вывода пучков диаметром 0.1—2 мм и более обычно используется дифференциальное газодинамическое окно, представляющее систему соосных отверстий в стенках, промежутки между которыми откачиваются форвакуумными насосами. Использование такого ступенчатого понижения давления позволяет на несколько порядков понизить суммарный объем газа, откачиваемого насосами, и, тем самым, делает возможным создание газодинамических открытых окон между вакуумом и газом высокого давления, диаметр которых достигает нескольких миллиметров.

Впервые идея такого устройства была использована Паули [2]. Им было применено двухступенчатое окно с промежуточной камерой, откачиваемой вспомогательным насосом. Многоступенчатое газодинамическое окно для вывода мощных пучков электронов было создано С. Т. Синициным [3,4]. Современная теория дифференциального газодинамического окна дана Шумахером [5,6]. В настоящее время такие окна нашли весьма широкое применение. Однако использование мощных механических насосов, достаточно громоздких и тяжелых, создающих вибрации и требующих для своей работы наличия мощного электропривода, не всегда представляется возможным, в частности при использовании пучка электронов для целей измерения газовых и плазменных потоков. Прогресс в этом направлении может быть достигнут путем замены насосной откачки откачкой криогенной. Действительно, вымораживание позволяет получить значительно большие скорости удаления газа, чем механические насосы. Кроме того, выше-



Фиг. 3



Фиг. 4

указанные недостатки насосной откачки оказываются в этом случае устраненными. Скорость вымораживания V равна [1]

$$V = \frac{62}{\sqrt{M}} \left(1 - \frac{p}{p'}\right) S [л\text{ сек}^{-1}] \quad (2)$$

Здесь M — молекулярный вес вымораживаемого газа, p — давление вымораживаемого газа, p' — равновесное давление газа при температуре поверхности, S [см²] — площадь вымораживающей поверхности.

Для конденсации таких газов, как азот, кислород, аргон, нужны температуры порядка температуры жидкого водорода (20.4° К). Создание подобных температур в небольших технических установках в настоящее время затруднительно. Получение же температуры жидкого азота (78° К) не представляет труда.



Фиг. 5

Давление паров воды при температуре жидкого азота составляет 10^{-22} мм рт. ст., а давление двуокиси углерода равно $4 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. При этом, согласно (2), скорость вымораживания (практически независимо от давления) оказывается равной: для воды — $14.6 \text{ л/сек}^{-1} \text{ см}^{-2}$ и для углекислого газа — $9.4 \text{ л/сек}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

Представляет интерес следующая схема газодинамического окна. Между газом высокого давления p_0 и вымораживающей системой устанавливается дополнительная камера, в которую подается вымораживаемый газ — двуокись углерода или пары воды. Давление газа в камере устанавливается несколько большим p_0 — для предотвращения попадания невымораживаемого газа.

Схема одного из вариантов подобного устройства приведена на фиг. 4. Здесь вымораживание происходит на серии диафрагм с соосными отверстиями, находящимися при температуре жидкого азота.

В принципе подобная схема могла бы позволить отказаться от использования вообще каких бы то ни было насосов, однако наличие невымораживаемых примесей, находящихся в рабочем газе или образующихся в результате диссоциации под действием электронных ударов, не позволяет избежать необходимости высоковакуумного насоса.

Газодинамическое окно, схема которого приведена на фиг. 4, может быть использовано лишь в течение ограниченного времени ввиду ограниченности вымораживающего объема, однако оно отличается компактностью и простотой, что в ряде случаев является решающим.

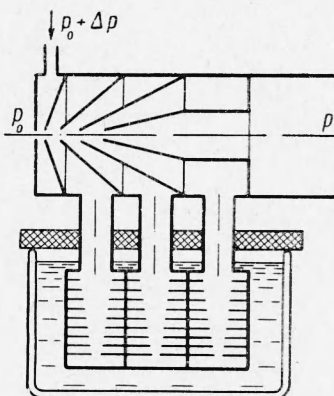
Вымораживание рабочего газа в такой системе происходит в основном на поверхностях, противостоящих потоку. На фиг. 5 приведена фотография части щелевого газодинамического окна с вымороженной в нем углекислотой. Отметим, что скорость вымораживания практически не зависит от давления газа, а количество вымороженного газа пропорционально ему, поэтому рабочий газ вымораживается преимущественно в начале окна. Улучшение равномерности вымораживания может быть достигнуто путем применения отверстий переменной площади, как показано на фиг. 4.

Недостатком этой схемы является то, что поток газа, поступающий в камеру вымораживания, может увлекать отдельные кристаллики углекислоты или воды и вызывать их попадание в камеру электронной пушки. Избежать этого недостатка позволяет использование газодинамического окна по схеме фиг. 6, где вымораживание происходит за пределами окна. Такая схема позволяет осуществить сколь угодно длительную работу окна либо путем увеличения объема вымораживающих камер, либо путем параллельного подключения удвоенного количества камер, работающих попеременно.

Сравнивая углекислый газ и пары воды в качестве рабочего тела, можно отметить, что, несмотря на определенное усложнение, вызываемое необходимостью использования подогревателя, пары воды обладают рядом преимуществ: 1) ввиду меньшей упругости паров возможно использование термоэлектрических вымораживающих устройств вместо жидкого азота; 2) расход рабочего газа в случае водяного пара в полтора-два раза меньше, а следовательно, меньше и габариты вымораживающего устройства; 3) меньшая плотность газа приводит к меньшим потерям энергии электронов при прохождении газодинамического окна.

Использование вымораживания рабочего газа вместо насосной откачки позволяет существенно увеличить максимальный диаметр открытого отверстия между вакуумом и газом. В то время как максимальный диаметр окна между атмосферой и вакуумом при насосной откачке составляет 3—4 мм, при использовании вымораживания оказывается реальным получение отверстий диаметром 15—20 мм.

Если попадание рабочего газа (паров воды или углекислоты) в газовую среду высокого давления нежелательно, это может быть достигнуто путем установки дополнительной камеры у входа в окно, давление в которой меньше, чем p_0 .



Фиг. 6

Поступила 15 IV 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Г р о ш к о в с к и й Я. Технология высокого вакуума. Изд. иностр. лит., 1957.
2. P a u l i W. E. Über eine neue Entladungsröhre, die den Austritt aller in der Röhre entstehen den Strahlen in die atmosphärische Luft gestattet. Phys. Z., 1920, B. 21, No. 1, S. 11.
3. С и н и ц и н С. Т. Выпуск корпускулярных лучей из трубки через открытое отверстие. Ж. эксперим. и теор. физ., 1933, т. 3, № 4, стр. 277.
4. С и н и ц и н С. Т. Мощная катодная пушка с выпуском электронов через открытое отверстие. Ж. эксперим. и теор. физ., 1934, т. 4, № 8, стр. 774.
5. S c h u m a c h e r B. W. Dynamische Druckstufenströcken für den Einschuss intensiver, monokinetischer Korpuskularstrahlbündel in Gase hoher Drucks. Optik, 1953, B. 10, No. 1/3, S. 116.
6. S c h u m a c h e r B. W. Dynamic Pressure stages for high-pressure/high-vacuum systems. Trans. eight vacuum symposium, Pergamon press, 1962, p. 1192.