

04;12

## Разряд Пеннинга в электронно-оптических приборах с магнитным сопровождением

© Ю.В. Коротаев<sup>1</sup>, И.Н. Мешков<sup>1</sup>, В.Н. Поляков<sup>1</sup>, А.В. Смирнов<sup>1</sup>, Е.М. Сыресин<sup>1</sup>, Р. Лей<sup>2</sup>, Ж. Транквилль<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская область, Россия

<sup>2</sup> Европейский центр ядерных исследований,  
Женева, Швейцария

(Поступило в Редакцию 14 февраля 1996 г.)

Анализируются причины возникновения разряда Пеннинга в электронно-оптических устройствах, работающих в условиях среднего и высокого вакуума, при наличии сопровождающего магнитного поля. Рекомендованы способы его подавления. Приведены основные результаты испытаний по устранению разряда Пеннинга на экспериментальном стенде ОИЯИ (г. Дубна) и накопителе антипротонов LEAR CERN (г. Женева).

В электронно-оптических устройствах, работающих в условиях среднего и высокого вакуума при наличии сопровождающего магнитного поля может возникать так называемый разряд Пеннинга [1–4]. К такого рода конструкциям относятся, в частности, устройства электронного охлаждения, получившие в последнее время широкое распространение как необходимая часть накопителей тяжелых заряженных частиц. В них используются стационарные электронные пучки достаточно высокой интенсивности: при энергии электронов в диапазоне 1–300 keV ток пучка составляет соответственно 0.1–5 А. Для снижения потребляемой мощности используется, как правило, рекуперация энергии электронов: коллектор помещается под отрицательный потенциал, несколько выше катодного. Геометрия построенной с учетом этих требований электронно-оптической системы зачастую благоприятна для зажигания разряда Пеннинга. Условиями зажигания разряда являются наличие потенциальной ямы для вторичных электронов, запертых в продольном магнитном поле, и достаточной для ускорения электронов до энергии ионизации напряженности электрического поля. Особенность этого разряда в описываемых устройствах — устранение его после специальной “тренировки”.

Целью данного сообщения является обобщение опыта устранения разряда Пеннинга при тестировании элементов электронного охлаждения, разработывавшихся для накопителя антипротонов LEAR Европейского центра ядерных исследований (CERN, Женева)[5].

Испытания проводились на экспериментальном стенде (рис.1), являющимся натурным макетом системы электронного охлаждения. Он состоит из электронной пушки, катод которой погружен в продольное магнитное поле, а его потенциал  $U_{\text{cath}}$  варьируется в диапазоне 0–30 kV, дрейфовой камеры длиной 2 м и коллектора. Пушка имеет управляющий электрод, потенциал которого  $U_g$  может быть как отрицательным, так и положительным относительно земли и изменяется в пределах –25–+25 kV. При работе пушки с высоким первеансом, когда потенциал управляющего электрода положителен,

вблизи него возникает потенциальная яма для вторичных электронов. Продольное магнитное поле препятствует уходу электронов в поперечном направлении, в результате чего они оказываются запертыми в потенциальной яме и осциллируют, возбуждая, вообще говоря, разряд. Величина магнитного поля в эксперименте регулировалась в пределах 300–500 G. Минимально достижимое давление составляло  $3 \cdot 10^{-7}$  Pa.

Коллектор, обеспечивающий рекуперацию энергии пучка, имеет конечную эффективность захвата электронов: потери пучка из коллектора порядка  $10^{-4}$  от полного тока. Поэтому он может являться источником вторичных электронов, участвующих в разряде в других частях электронно-оптического тракта.

Для возникновения разряда Пеннинга необходима “критическая геометрия”, не только создающая потенциальный барьер для вторичных электронов (рис. 2), но и позволяющая электрону набирать энергию, превышающую потенциал ионизации  $\varphi_i$ . Для этого средняя напряженность электрического поля на длине потенциальной ямы  $l_i$  должна превышать некоторое критическое значение  $E \geq \varphi_i/l_i$ .

Множественно отражаясь от потенциальных барьеров, теряя свою энергию и снова набирая ее, электрон ионизует остаточный газ, в результате чего в потенциальной яме накапливаются вторичные электроны. Процесс на-

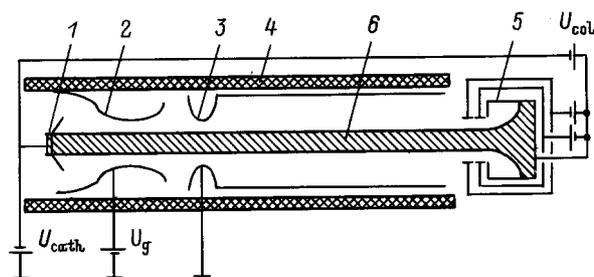


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1 — катод, 2 — управляющий электрод, 3 — анод, 4 — соленоид, 5 — коллектор, 6 — электронный пучок.

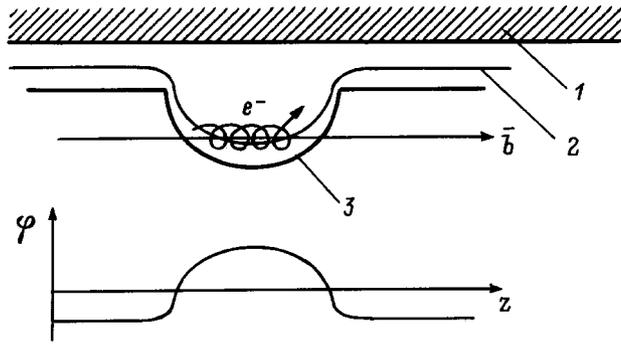


Рис. 2. "Критическая геометрия" и распределение потенциала в ней. 1 — вакуумная камера, 2 — эквипотенциаль, 3 — электрод.

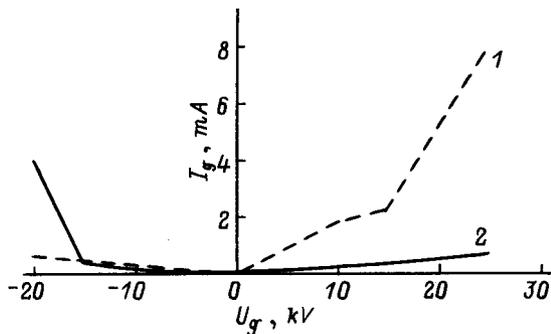


Рис. 3. Зависимость тока управляющего электрода от напряжения  $U_g$  на нем при значениях  $U_{\text{cath}} = 5 \text{ kV}$ ,  $P = 10^{-6} - 10^{-5} \text{ Pa}$  и  $B = 500$  (1),  $300 \text{ G}$  (2).

растает, возникает локальный участок плазмы, закорачивающий промежуток электрод-камера, вследствие чего наблюдается увеличение потребляемого системой тока и давления остаточного газа, а также уменьшение напряжения на электроде. Со временем, по мере "тренировки", рабочие параметры устройства, имеющего такую "критическую геометрию", восстанавливаются. Это связано с тем, что под воздействием ионов плазмы, бомбардирующих электроды, поверхность последних очищается от адсорбированного ею газа и других "летучих" элементов, имеющих высокую энергию связи с материалом поверхности. Косвенно это подтверждается экспериментом: чем чище поверхность, тем меньшее время затрачивается на "тренировку" разряда.

Для пушки, описанной выше, характерны два режима разряда. При работе с  $U_g < 0$  все электроды пушки и коллектора имеют отрицательный потенциал относительно земли. Поэтому разряд может идти с электродов на вакуумную камеру, имеющую земляной потенциал. По мере роста абсолютного значения потенциала управляющего электрода  $|U_g|$  ток  $I_g$  на него растет (рис. 3). Если  $U_g > 0$ , то геометрия разряда изменяется. Теперь система в целом от пушки до коллектора имеет "критическую геометрию" и разряд перемещается в приосевую область вблизи управляющего электрода. Характерно,

что в этом случае токи управляющего электрода и пушки ведут себя одинаковым образом в отличие от первого случая, когда разряд в одном из элементов приводит к росту тока только этого элемента.

Важнейшим параметром, определяющим развитие описываемого разряда, является магнитное поле. Характер зависимости тока от величины магнитного поля для случаев  $U_g > 0$  и  $U_g < 0$  существенно разный (рис. 4, a, b). При положительном  $U_g$  возрастание величины магнитного поля приводит к более монотонному увеличению тока управляющего электрода, чем в случае  $U_g < 0$ , когда наблюдаются сильные резонансные зависимости тока от магнитного поля.

Каждый раз после цикла вскрытия системы и последующей откачки при включении наблюдается разряд Пеннинга. Как правило, такой напуск атмосферы сопровождается монтажом внутри вакуумного объема новых электродов, которые чистятся возникающим разрядом. Обычно интервал времени отжига разряда составляет 1–30 ч. Известно несколько факторов, уменьшающих влияние разряда. Во-первых, уход от критической геометрии путем закрытия разрядных промежутков специальными экранами. Полость в электроде (рис. 2), где может гореть разряд, накрывается токопроводящей металлической фольгой, имеющей непосредственный электрический контакт с электродом и позволяющей тем не менее производить эффективную откачку. Тогда вторичный электрон, рожденный внутри полости, находящейся под одним потенциалом с фольгой, не чувствует сильного электрического поля между электродом и камерой и его энергия остается достаточно низкой. Во-вторых, предварительная вакуумная обработка внутренних по-

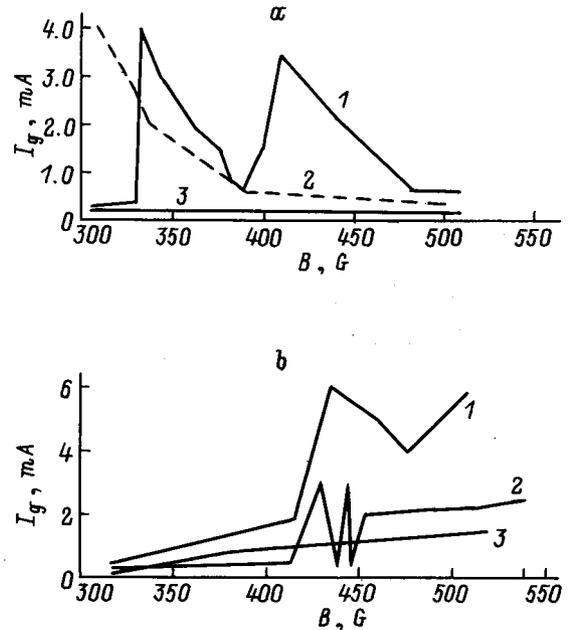
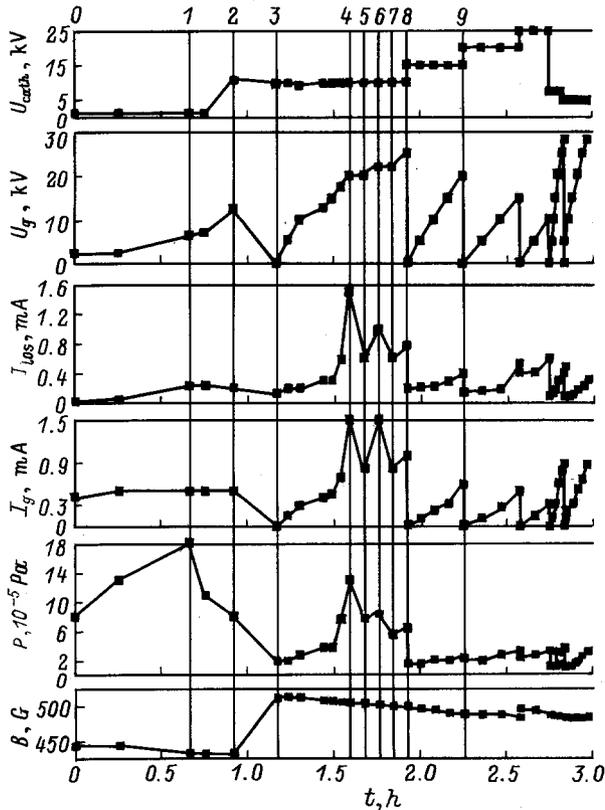


Рис. 4. Зависимость тока управляющего электрода от значения магнитного поля для  $U_{\text{cath}} = 5 \text{ kV}$ . a  $U_g$ : 1 —  $-20$ , 2 —  $-15$ , 3 —  $-10 \text{ kV}$ ; b  $U_g$ : 1 —  $+20$ , 2 —  $+14.3$ , 3 —  $+9.5 \text{ kV}$ .



**Рис. 5.** Зависимость катодного  $U_{\text{cath}}$  и управляющего  $U_g$  напряжений, токов потерь всей системы  $I_{\text{los}}$  и управляющего электрода  $I_g$ , остаточного давления  $P$  и магнитного поля  $B$  от времени в процессе тренировки разряда Пеннинга.

верхностей. Так, например, при установке электронной пушки на накопитель LEAR она подверглась предварительной чистке по специальной технологии CERN. К тому же рабочее давление в накопителе составляет  $P = 10^{-10} - 10^{-9}$  Па. Разряд Пеннинга при этом не наблюдается.

Типичный пример "тренировки" приведен на рис. 5. Как видно, регулирование напряжениями на катоде и управляющем электроде и магнитным полем позволяет со временем снизить токи этих элементов и давление. Процесс тренировки проводится следующим образом. Включаются регулируемые источники питания соленоидов, затем подается высокое напряжение на катод электронной пушки. В магнитном поле 450 G разряд загорается уже при напряжении на катоде  $U_{\text{cath}}$  около 1 kV. При этом наблюдается резкое возрастание остаточного давления, однако разрядный ток  $I_g$  при этом увеличивался незначительно. После некоторой выдержки вводится напряжение на управляющий электрод, которое затем увеличивается со временем при фиксированном значении потенциала катода (интервал 0–1). Процесс развития разряда и соответственно качество его тренировки отслеживается по изменению давления и токов потерь  $I_{\text{los}}$ ,  $I_g$ . В интервале 1–2 разряд стабилизируется, несмо-

тря на увеличение потенциалов катода и управляющего электрода. Затем, выключив напряжение управляющего электрода (точка 3), увеличиваем магнитное поле до 500 G и вновь подаем напряжение на управляющий электрод. Далее при фиксированном катодном потенциале в интервале 3–4 с определенным по времени шагом увеличивали  $U_g$ . Разряд снова возбуждался, а с некоторого момента (точка 4) наблюдается резкое увеличение остаточного давления и потерь токов. В этом случае требовалась выдержка во времени фиксированных значений потенциалов катода и управляющего электрода (интервал 4–5). После стабилизации снова делается попытка увеличить  $U_g$ . Каждое увеличение  $U_g$  сопровождается резким ростом токов разряда и давления (точки 4, 6, 8) и ожиданием во времени (интервалы 4–5, 6–7). Результатом такого ступенчатого изменения параметров является уменьшение со временем потерь токов и остаточного давления до приемлемых значений при достижении максимальной разности потенциалов катодного и управляющего напряжений (точка 8). Интервал 8–9 и последующие отвечают нормальной работе экспериментального стенда при некотором перераспределении потенциалов  $U_g$  и  $U_{\text{cath}}$ , когда токи  $I_{\text{los}}$ ,  $I_g$  в основном определяются уже собственными утечками элементов электронного охлаждения, а не развитием разряда Пеннинга. Некоторый спад величины магнитного поля во времени связан с прогревом соленоидов магнитной системы.

## Список литературы

- [1] Грановский В.И. Электрический ток в газе. Устойчиво-статический ток. М.: Наука, 1971. 543 с.
- [2] Мухамедов Р.Ф. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 9. С. 1992–1994.
- [3] Мухамедов Р.Ф. // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 8. С. 1677–1684.
- [4] Крейндель Ю.Е., Ионов А.С. // ЖТФ. 1964. Т. 34. Вып. 7. С. 1199–1205.
- [5] Meshkov I.N. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1995. Vol. A355 P. 208–222.