

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

04

Журнал технической физики, т. 61, в. 7, 1991

© 1991 г.

ГЕНЕРАЦИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ
В КЮВЕТАХ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА
И ПРИ ВЫСОКОМ УСКОРИТЕЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

П. А. Бозан, А. Р. Сорокин

1. Несмотря на достаточно большое число публикаций по открытому разряду в узком промежутке ($l=0.5-1$ мм) с сетчатым анодом, через который можно извлекать электронные пучки ЭП с эффективностью, близкой к 100 % (наиболее полное представление о таком разряде можно получить из работ [1, 2]), остается еще много невыясненных вопросов. Нет подробных исследований зависимости максимально достижимого тока ЭП от длительности возбуждения. Не ясно, почему в ячейках с большой площадью S катода теряется стабильность разряда при удельном токе ЭП на порядок меньше, чем при малой $S \sim 1$ см² [1]. Можно ли найти условия для перехода к более высоким ($> 6-8$ кВ) ускоряющим напряжениям, что открыло бы перспективу использования продольных ЭП. Продольная инжекция ЭП в лазерах на парах металлов позволяет вынести разряд в холодную зону, что существенно упростило бы технологию изготовления лазерной ячейки. Этот круг вопросов и будет рассмотрен ниже.

Методика измерений подробно описана в [3]. Ток ЭП в планарной ячейке измерялся с помощью коллектора, размещенного за анодом в дрейфовом пространстве. В коаксиальной камере ток пучка оценивался путем сравнения с удельным током ЭП в планарной ячейке при сходных условиях возбуждения. Как показывают многочисленные эксперименты, такая оценка вполне приемлема.

2. Основной причиной, ограничивающей напряжение горения и величину тока рассматриваемого типа разряда в случае ячеек с малой площадью катода (~ 1 см²), является усиление поля в области катода до $E_k \geq 10^6$ В/см, когда начинаются процессы автоэлектронной и взрывной эмиссии.

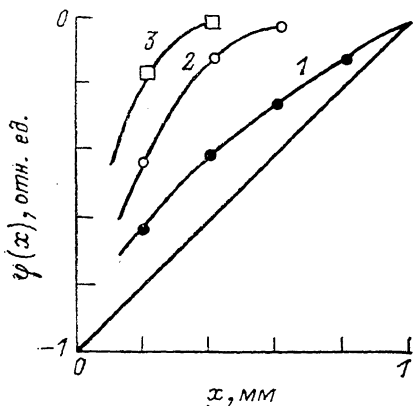
Качественный анализ свойств разряда, проведенный в [1], позволил сделать предположение, что размер l_k области катодного падения потенциала, где сосредоточено практически все приложенное напряжение U , сравним с длиной свободного пробега ионов $l_k \sim \lambda_i$. Поэтому путем снижения давления можно рассчитывать на увеличение l_k , а следовательно, уменьшение E_k . Это в свою очередь позволило бы использовать более высокое рабочее напряжение.

Результаты измерений распределения потенциала в разрядном промежутке, проведенных аналогично работе [4], представлены на рис. 1. Видно, что уменьшение давления Ne с 800 до 300 Па приводит к ослаблению поля в прикатодной области 0—0.2 мм в 4 раза. Отсюда и следует путь перехода к высоким напряжениям — уменьшение давления.

Снижение давления позволяет выполнить условия для бесстолкновительного ускорения электронов при больших длинах разрядного промежутка. Поскольку электроны, формирующие пучок, рождаются на катоде в результате фотоподсветки из-за анодной области [1, 2], то сохранение эффективности фотоподсветки при пониженном давлении требует увеличения длины дрейфового пространства. Исходя из этого, эксперименты проводились с камерой длиной 330 мм, в которой сетчатый анод диаметром 90 мм располагался коаксиально катоду диаметром 99 мм, что соответствует $l=4.5$ мм, $S=10^3$ см² и активному объему $2 \cdot 10^3$ см³. Сетка анода с отверстиями 2×2 мм имела геометрическую прозрачность $T=80-85$ %.

Для формирования импульсов возбуждения с плоской вершиной (рис. 2, а) длительностью $\tau > 30$ мс использовалась LC-линия, для меньших τ — керамические конденсаторы разной емкости. Передний фронт импульса напряжения формировался так, чтобы пробой

газа проходил сразу после достижения амплитудного значения напряжения. В этом случае обеспечиваются наилучшие условия формирования разряда. Эксперты проводились с неона при частоте следования импульсов $f=10$ Гц. Отметим, что повышение f сопровождается улучшением стабильности разряда.



Эксперименты с импульсами возбуждения различной длительности показали, что с ростом τ максимальный ток безыскрового разряда I , амплитуда напряжения U и напряжение U_I в максимуме тока (рис. 2, а) падают по закону $\sim \tau^{-0.5}$, что следует из рис. 3.

Рис. 1. Распределение потенциала $\varphi(x)$ в разрядном промежутке длиной 1 мм с площадью электродов 0.5 см^2 , токе $I=0.25 \text{ А}$ при различном давлении неона.

p , Па: 1 — 300, 2 — 600, 3 — 800. Координата x отсчитывается от катода.

При $\tau > \tau'$ ток ограничивается потерей устойчивости разряда в интервале времени, тяготеющего к окончанию импульса. Нестабильность проявляется резким выбросом тока на осциллограмме и появлением искры в разрядном промежутке. Типичные осциллограммы I , U безыскрового разряда в области значений $\tau > \tau'$ при различных длительностях возбуждения приведены на рис. 2, а, б.

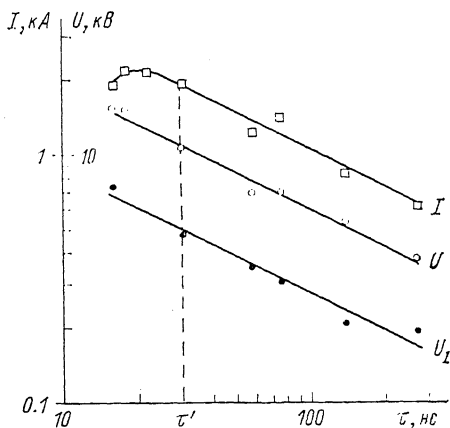
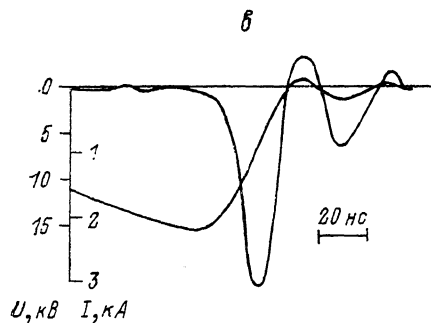
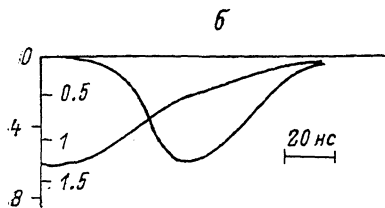
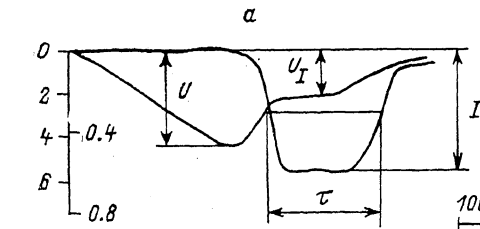


Рис. 3. Зависимости амплитудных значений тока I , напряжения U и напряжения в максимуме тока U_I от длительности накачки τ при давлении 300 Па.

Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока I и напряжения U при различных длительностях возбуждения τ и давлении 300 Па.

При $\tau < \tau'$ можно достигнуть такого тока, при котором сопротивление плазмы становится меньше импеданса контура питания, что проявляется в возникновении колебательного режима разряда (рис. 2, в). Если переполсование тока составляет несколько десятков процентов, то при дальнейшем увеличении напряжения разряд теряет устойчивость после смены полярности. Различные механизмы, нарушающих стабильность разряда, проявляется в изменении хода кривых на рис. 3.

Из-за смены полярности при достаточно малых длительностях возбуждения происходит снижение амплитуды тока и с ростом давления p , поскольку с ростом p уменьшается сопротивление разряда, что следует из рис. 4. В этих экспериментах величина рабочей емкости оставалась неизменной ($C=2.2$ нФ).

Наилучшие характеристики разряда в наших экспериментах $I=7$ кА при $U=22$ кВ, $p=300$ Па при сохранении высокой ($\sim 80\%$) эффективности генерации ЭП практически в течение всего импульса возбуждения. Последнее было проверено на небольшой планарной кювете $S=2$ см² анодной сеткой с отверстиями 2×2 мм прозрачностью 80–85% и $l=4.5$ мм. Коллектор располагался на расстоянии 45 мм от сетки. Эффективность (рис. 5) генерации ЭП определялась по формуле $\eta = (I_k/I + I_k) \times 100\%$.

Таким образом, несмотря на возникшие ограничения, связанные с переплюсованием питания, за счет снижения давления плотность тока 7 А/см² достигнута при напряжении, в 3 раза большем, чем в случае протяженных кювет, рассчитанных на более высокое давление [1].

Реализация режима [генерации ЭП с высоким напряжением при пониженном давлении позволяет осуществлять продольную инжекцию интенсивных ЭП на значительную длину (более 1 м при давлении неона 200–400 Па). Более полно рассматриваемый режим и был осуществлен с продольной инжекцией пучка. В этом случае катод площадью $S=60$ см² представлял собой сегмент из сферы диаметром 140 мм. Сегмент имел центральное отверстие 40 мм и внешний диаметр 96 мм. Сетчатый анод также сферической формы с отверстиями 2×2 мм располагался на $l=4.5$ мм от поверхности катода. Благодаря лучшему согласованию импедансов питания и разряда здесь была достигнута плотность тока на катоде 50 А/см² при $U=23$ кВ. С помощью магнитного поля формировался ЭП диаметром 2 см и транспортировался

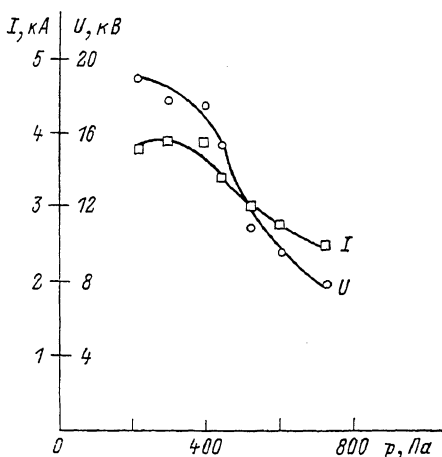


Рис. 4. Изменение тока I и напряжения U с ростом давления.

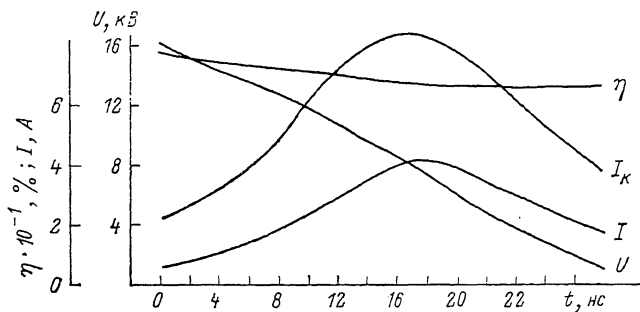


Рис. 5. Осциллограммы напряжения U , тока разряда I , тока коллектора I_k и изменение эффективности генерации ЭП в течение импульса возбуждения. Малая кювета.

при давлении 300 Па на длину до 100 см. На этой установке была получена генерация на самоограниченных переходах ионов металлов, в частности кальция и стронция.

3. С целью лучшего понимания процессов, происходящих в разряде при переплюсовании питания и ограничивающих ток ЭП, были проведены эксперименты в планарной кювете с геометрией, приведенной в разделе 2.

Как видно (рис. 6), плотность тока с этой ячейкой достигается на порядок выше, чем в кювете объемом 2 л. Благодаря малой площади электронов сопротивление разряда остается большим и при высокой плотности тока, поэтому не представляет особого труда обеспечить бесколебательный режим питания. Ограничение по току связано лишь с процессами автоэлектронной эмиссии на катоде.

При искусственном введении переполусования напряжения на сетке анода можно было наблюдать появление неоднородности в виде слабо светящегося пятна даже тогда, когда по осциллограммам I , U переполусование практически незаметно. В частности, по напряжению оно может составлять всего несколько сот вольт. Пятно может быть и несколько, но каждое из них четко занимает площадь соответствующего отверстия сетки (2×2 мм). По мере роста степени переполусования пятно становится более ярким, а затем возникает искрение, сначала после смены полярности питания, а затем при том же напряжении и в период генерации ЭП. Здесь даже наблюдается своеобразный гистерезис — искрение не исчезает и при значительном снижении напряжения. Нормальный режим разряда при пониженном напряжении восстанавливается, если выключить и вновь включить подачу питания на ячейку. Отсюда следует, что появившаяся неоднородность не успевает полностью исчезнуть за время между импульсами возбуждения и инициирует искрение во время основного импульса.

Если на разрядный промежуток подать основной высоковольтный импульс обратной полярности (минус на сетке), то в активном объеме можно наблюдать один или несколько расходящихся ЭП. Каждый ЭП исходит из центральной части соответствующего отверстия сетки. При повышении напряжения в этих местах возникает искрение.

Наблюдаемая картина может быть легко интерпретирована, если рассматривать каждое отдельное отверстие сетки как «элементарный» полый катод ЭПК. Роль анода при этом выполняет положительный объемный заряд, образующийся у сетки.

Действительно, в нашем случае параметр pd для ЭПК, где d — характерный размер (2 мм) отверстия сетки, соответствует левой ветви кривой Пашена. Когда на ячейку подается основной высоковольтный импульс обратной полярности, то ЭПК работает в режиме высоковольтного разряда с генерацией ЭП. Поскольку все ЭПК включены параллельно, то вследствие конкуренции разряд формируется в одном из ЭПК или в нескольких ЭПК, через которые и разряжается затем рабочая емкость.

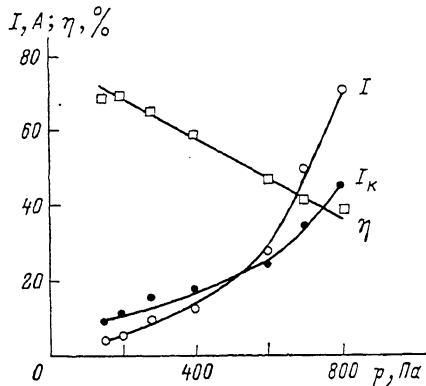


Рис. 6. Изменение тока I , тока коллектора I_k и КПД генерации ЭП с ростом давления при $U=18$ кВ. Малая кювета.

В случае когда на промежуток подается исходный импульс обычной полярности, в стадии переполусования формируется низковольтный режим работы ЭПК, плазма прорывается внутрь катода (появляется пятно в отверстии сетки), а падение напряжения на ней составляет несколько сот вольт [5]. При достаточно большом токе происходит переход в дуговой разряд с полым катодом.

Интересно сравнить высоковольтный режим разряда с обратной полярностью в нашем эксперименте со случаем, когда существует обратный ЭП [1]. В [1] размер ячеек сетки был сравним с размером длины катодного падения потенциала. Ускоренные ионы, из промежутка проникая за сетку, формировали там сплошной слой положительного объемного заряда, который в отличие от рассмотренного случая вызывал однородный по сечению ЭП со всей поверхности сетки.

Таким образом, для получения наибольших токов ЭП в кюветах с большой площадью катода необходимо избегать колебательного режима питания разряда. Для снижения порога перехода отдельного ЭПК при переполусовании напряжения из низковольтного режима в дуговой можно рекомендовать также применение катодов с ограниченной проводимостью [1], которые обеспечивают определенную «развязку» между ЭПК.

Список литературы

- [1] Божан П. А., Сорокин А. Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 88—95.
- [2] Колбывчев Г. В., Пташник И. В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 9. С. 104—111.
- [3] Божан П. А., Колбывчев Г. В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1823—1831.
- [4] Божан П. А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 5. С. 978—980.
- [5] Москалев Б. И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969.

Институт теплофизики СО АН СССР
Новосибирск

Поступило в Редакцию
3 января 1990 г.
В окончательной редакции
26 апреля 1990 г.