

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.5

Влияние эффекта встречного поля на характеристики импульсного разряда

А.Р. Сорокин*

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13

Поступила в редакцию 23.10.2011 г.

Показано, что параметры разряда на спаде напряжения U в большой степени зависят от скорости спада U на разрядном промежутке d . Так, мгновенное значение параметра η — отношение тока пучка к полному току разряда — может превысить 1. В разрядах, трактуемых как фотоэмиссионные, параметр η отождествляется с энергетическим КПД формирования электронного пучка. Очевидно, что мгновенное значение η не может характеризовать КПД. Эффект встречного поля влияет не только на параметр η , но и на другие характеристики импульсного разряда.

Ключевые слова: импульсный тлеющий разряд, эффект встречного поля, электронный пучок; pulse glow discharge, opposite field affect, electron beam.

1. В [1, 2] исследован разряд с катодной полостью, одна из стенок которой, для повышения устойчивости разряда к его переходу в низковольтный режим из-за высокой плотности плазмы в полости, выполнена в виде диэлектрической пластины. Электронный пучок (ЭП), сформированный перед входом в полость, использован как вспомогательный. Распространяясь над частью катода, открытой отверстием диаметром D в диэлектрической пластине, пучок ЭП дополнительно ионизовал газ. Ток основного электронного пучка (ЭП) $j_{\text{ЭП}}$ в сторону анода возрастал с превышением полного тока j_{AD} эквивалентного (при тех же значениях напряжения питания U и давления p) аномального разряда $\alpha = j_{\text{ЭП}}/j_{\text{AD}} > 1$ (сильноточный ЭП) до порядка величины при давлениях p примерно до 100 торр. В гелии

$$j_{\text{AD}}/(p_{\text{He}})^2 = 2,5 \cdot 10^{-12} (U_{\text{cf}})^3 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{торр}^{-2}), \quad (1)$$

где U_{cf} — катодное падение потенциала (КПП). Оценить j_{AD} можно заменой U_{cf} на U , что зависит j_{AD} , поскольку часть U падает на положительном столбе разряда. Условия работы источника при повышенных давлениях [1, 2] определяются размером ширины катодной полости δ (расстояние между металлической и диэлектрической стенками полости). Апертура D основного пучка в сильноточном режиме сверху ограничена длиной пробега электронов вспомогательного пучка над поверхностью открытой части катода, которая, очевидно, должна быть $\geq D/2$.

В ячейке [1] с $\delta = 0,5$ мм и узкой ($H = 1$ мм) протяженной (50 мм) щелью в диэлектрической пла-

стине при давлении $p = 50$ торр в максимуме импульса основного ЭП малой продолжительности ($t_{\text{ЭП}} = 2$ нс) наблюдалось необычно высокое значение параметра η , принимаемого за эффективность формирования ЭП:

$$\eta = j_{\text{ЭП}}/j. \quad (2)$$

Здесь $j_{\text{ЭП}}$ — ток электронного пучка, j — полный ток разряда. В [1] было высказано предположение, что повышение η связано с эффектом появления в прианодной области результирующего электрического поля, встречного по отношению к полю от внешнего источника питания, из-за инерционности отслеживания положительным объемным зарядом у катода изменений поля в разрядном промежутке при быстром, несколько наносекунд, спаде напряжения.

В настоящей статье показано, что этот эффект, в частности когда $\eta > 1$ (здесь нет нарушения закона сохранения энергии, так как мгновенное значение параметра η не учитывает импульсный характер разряда, когда процессы в нем находятся в развитии), проявляет себя в широком диапазоне условий импульсного разряда. В том числе не только в ячейках с катодной полостью при быстром, в несколько наносекунд, спаде напряжения, но и в ячейках без катодной полости и при спаде напряжения в десятки микросекунд в широком диапазоне давлений. Исследовался разряд в гелии. Для повышения устойчивости разряда к искрообразованию в гелий добавлялся 1%-й O_2 , что существенно не сказывалось на параметрах разряда по сравнению с разрядом в чистом гелии [3].

2. В опытах [1] с ячейкой, имеющей узкую щель в диэлектрической пластине, в максимуме 2-наносекундного импульса $j_{\text{ЭП}}$ параметр η составил 1,2.

* Александр Разумникович Сорокин (ars@isp.nsc.ru).

Однако, как выяснилось позже, в [1] была допущена неточность в измерениях токов разряда в импульсах малой продолжительности ~ 1 нс (не была учтена в должной мере реактивная составляющая измерительного сопротивления), что привело к завышению параметра η .

Для осциллограмм с корректно измеренными токами в ячейке с $\delta = 0,5$ мм и более узкой ($H = 0,2$ мм), протяженной (40 мм) щелью в диэлектрической пластине параметр η также оказался высоким (0,9), рис. 1, а.

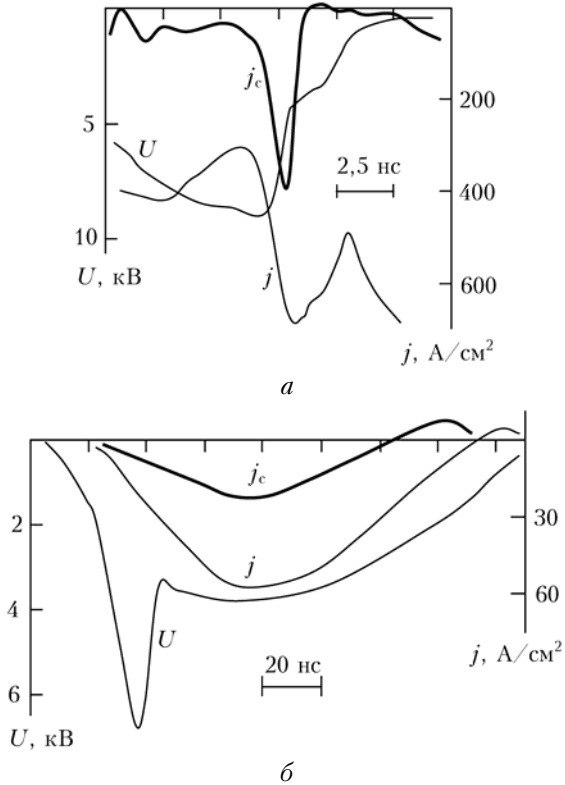


Рис. 1. Осциллограммы разряда, $p = 50$ торр: а – ячейка с катодной полостью; б – ячейка без катодной полости (аномальный разряд)

Токи $j_{\text{ЭВ}}$ и j перед основным импульсом $j_{\text{ЭВ}}$ соответствуют начальной стадии формирования основного разряда и барьерному разряду на диэлектрическую пластину, начало которого на рис. 1, а не вошло. Для определения тока ЭП $j_{\text{ЭВ}}$ часть его j_c направлялась на коллектор через решетчатый анод прозрачностью $\mu = 0,71$, расположенный на расстоянии $d = 10,5$ мм от дна катода, так что $j_{\text{ЭВ}} = j_c/\mu$. Решетчатый анод с окнами 0,5 мм был выполнен в виде проволочек диаметром 0,2 мм, перпендикулярных щели. Коллектор размещался на расстоянии $L_d = 5,5$ мм (область дрейфа ЭП) от анода. Ток коллектора регистрировался на измерительном сопротивлении при заземленном аноде, а полный ток – на том же сопротивлении с подсоединенными к нему анодом и коллектором.

На рис. 1, б для сравнения приведен пример осциллограмм аномального разряда для $p = 50$ торр

(ячейка без катодной полости: диаметр катода $D = 22$ мм, $d = 7,4$ мм, $L_d = 5$ мм, анод сетчатый $\mu = 0,64$). Ток $j = 58$ А/см² достигается при $U = 3,8$ кВ. Согласно (1), полагая $j_{\text{AD}} = j$, получим $U_{\text{cf}} = 2,1$ кВ, т.е. на анодной плазме падает 1,7 кВ. Чем больше U и меньше протяженность области КПП (0,1 мм для 50 торр) по сравнению с d , тем большая часть U падает на анодную плазму [2, 3] (это замечание относится и к рис. 1, а). В соответствии с осциллограммами параметр $\eta = 0,63$ в максимуме j_c , что значительно меньше, чем для рис. 1, а. Но и в этих условиях эффект встречного поля наглядно проявил себя в завершающей стадии разряда (пояснения в п. 3).

Обратимся к опытам с этой же ячейкой, работающей в режиме аномального разряда, в условиях, когда эффект встречного поля наиболее наглядно проявляет себя в возрастании параметров η и α . Этому соответствуют условия небольшого давления и плавного спада напряжения на разрядном промежутке. При $p = 0,76$ торр на медленном спаде U (рис. 2, а) параметры η и α составили: для $U = 1,5$ кВ – 0,95 и 6,5; 0,75 кВ – 1,27 и 17,9. С более быстрым спадом U соответственно (рис. 2, б): $U = 1,5$ кВ – 1,1 и 11,5; 0,75 кВ – 1,5 и 26,5. Скорость спада U менялась подключением сопротивлений последовательно и параллельно емкости, разряжающейся на ячейку. Отметим, что в квазистационарных условиях аномального разряда параметры η и α не превышают единицы, а полный ток хорошо подчиняется закону (1) [3].

Таким образом, в условиях, отображенных осциллограммами на рис. 2, параметры η и α растут с увеличением скорости спада U и с уменьшением напряжения.

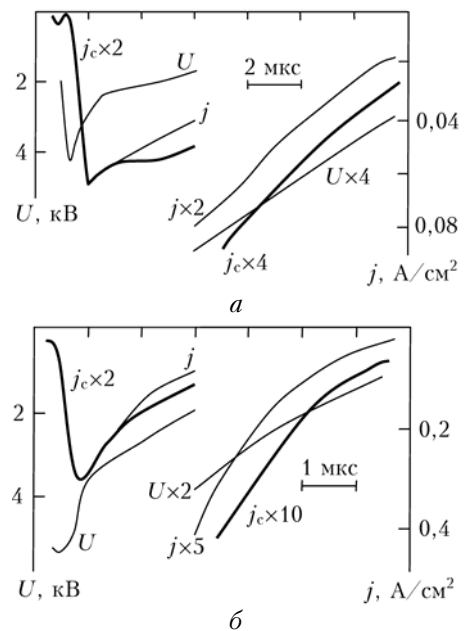


Рис. 2. Осциллограммы разряда с различной скоростью спада напряжения на разрядном промежутке при $p = 0,76$ торр (разрывы осциллограмм соответствуют изменению их масштабов)

Еще большее значение параметра α наблюдалось на спаде U в ячейках для получения сильноточных ЭП. Так, в ячейке ($D = 22$ мм, $d = 12,1$ мм, $\mu = 0,56$, $L_d = 5,8$ мм), в которой отсутствовала диэлектрическая пластина, а для формирования вспомогательного ЭП1 служила стенка высотой 4 мм выемки в катоде, в сходных, как на рис. 2, б, условиях спада напряжения, при $U = 0,75$ кВ параметр $\alpha = 43$ [4].

3. Обратимся к интерпретации представленных опытов. Зарегистрированные в опыте значения $\eta > 1$ свидетельствуют, что $j_{\text{ЭВ}} > j$. Эффект обусловлен спадом напряжения на разрядном промежутке. Распределения потенциала ϕ и поля E в разрядном промежутке определяются суперпозицией поля, задаваемого внешним источником питания, и поля объемных зарядов самого разряда. В условиях $\eta > 1$ качественно эти распределения могут выглядеть так, как представлено на рис. 3.

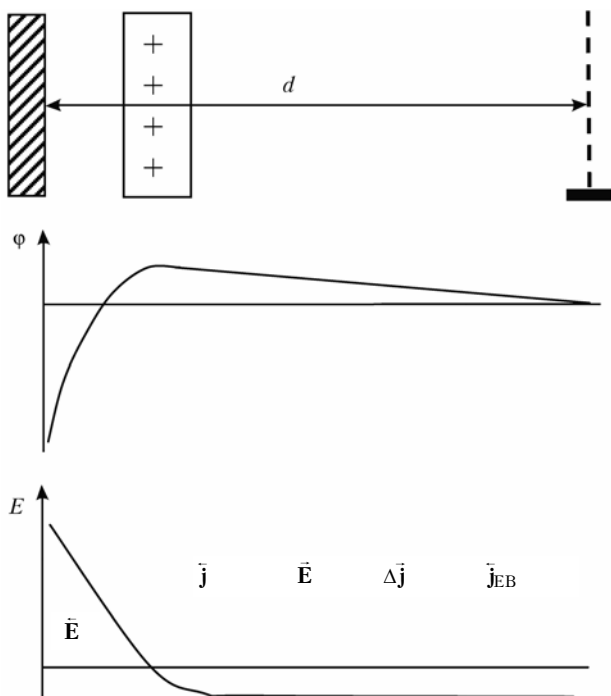


Рис. 3. Качественные распределения потенциала ϕ и электрического поля E в разрядном промежутке d в условиях присутствия встречного поля в d

Векторы показывают их направления в d : \vec{E} — электрического поля перед положительным объемным зарядом «+»; \vec{E} — суммарного поля в прианодной области разряда от источника питания и положительного объемного заряда «+»; \vec{j} — полного тока разряда; $\Delta\vec{j}$ — тока под действием электрического поля \vec{E} ; $\vec{j}_{\text{ЭВ}}$ — тока электронного пучка. Объемный положительный заряд «+», ответственный за сильное поле, ускоряющее электроны пучка, за время сброса U не успевает перестроиться, и поле, порождаемое им на анод, может превысить противоположно направленное поле от внешнего источника питания. В результате в прианодной области появляются поле \vec{E} и ток $\Delta\vec{j}$, встречные току $\vec{j}_{\text{ЭВ}}$ пучка.

Полный ток j , регистрируемый во внешней электрической цепи с измерительного сопротивления, учитывает движение всех зарядов в разрядном промежутке. Движение зарядов, не достигших электродов, учитывается во внешней цепи через токи смещения [5]. Снижение поля E в положительном столбе из-за инерционности движения положительных зарядов во время спада U , а затем и появление встречного поля проявляются в росте параметра η (см. рис. 1, а). Если ток Δj превысит ток от потока ионов в сторону катода, то $j_{\text{ЭВ}}$ станет больше j , а $\eta > 1$ (см. рис. 2). Заметим, что в области отрицательного свечения нормального тлеющего разряда иногда тоже регистрируется встречное поле, но иного происхождения [5, 6].

Процессы ионизации в области КПП практически отсутствуют, а с уменьшением U падает эмиссия электронов с катода от бомбардировки его быстрыми тяжелыми частицами. Тогда возможна ситуация, при которой вследствие ионизации газа в области за положительным объемным зарядом ток Δj превысит не только ток от потока ионов на катод, но и его сумму с током ЭП, и тогда ток j меняет знак при сохранении полярности U , как на рис. 1, б.

Интересно поведение и тока коллектора на рис. 1, б. Сетчатый анод после быстрого спада U оказывается под отрицательным потенциалом относительно положительного объемного заряда в d . Электрическое поле, концентрируясь у анода, проникает в отверстия анода, и с его обратной стороны может также сформироваться КПП. Под действием положительного заряда в этом КПП развивается разряд на коллектор с током, противоположно направленным к току ЭП. Если этот ток превысит ток ЭП, то ток коллектора меняет знак, и это может произойти раньше, чем изменит полярность полный ток (см. рис. 1, б). Подобный эффект проявлялся ранее в опытах [7] в условиях смены полярности питания для открытого разряда (объяснение в [7] появления положительного объемного заряда за сетчатым катодом иное и ошибочно).

Этот же эффект проявляет себя на спаде тока коллектора (см. рис. 1, а). Формирование КПП за анодом и разряда на коллектор уменьшает ток j_c до нуля, хотя ЭП продолжает поступать на него. Об этом свидетельствует появление его вновь после снижения тока разряда на коллектор или его исчезновения. Поэтому реальный ток ЭП в первом его пике имеет большую длительность, чем регистрируемый коллектором. Отмеченные особенности называются и на осциллограмме полного тока j (см. рис. 1, а).

Таким образом, параметры разряда в большой степени зависят от скорости спада напряжения на разрядном промежутке, от давления и напряжения на спаде U . Так, в отличие от условий горения разряда, отображенных осциллограммами на рис. 1, для низкого давления и в микросекундном диапазоне протекания разряда параметры η и α растут с увеличением скорости спада U и с уменьшением

напряжения на разрядном промежутке в период спада U . С увеличением скорости спада U положительный объемный заряд в большей мере не успевает отслеживать изменение U , а с уменьшением скорости спада U постепенно снижается скорость ионов. В обоих случаях это проявляется в возрастании η и α .

4. В широком диапазоне условий показано большое влияние на параметры разряда появления в прианодной области результирующего электрического поля, встречного к полю, задаваемому внешним источником питания. Эффект обусловлен инерционностью отслеживания положительным объемным зарядом у катода спада напряжения на разрядном промежутке. Отсюда большое значение приобретают скорость спада напряжения, его величина и значение рабочего давления. Заметный эффект проявляется в условиях работы источников электронных пучков, т.е. когда величина катодного падения потенциала составляет значительную часть приложенного напряжения.

Показано, что использование мгновенного значения параметра η (отношение тока пучка к полному току) для характеристики эффективности источника в целом может дать большую ошибку. Так, в [8] на спаде U мгновенное значение параметра η составило 99,88%. Оно было принято за истинное значение КПД и необоснованно положено в основу доказательства фотоэлектронного механизма разряда. Этот параметр хорошо характеризует энергетическую эффективность для квазистационарных и непрерывных разрядов и то лишь при выполнении ряда условий [3].

Измерения энергетической эффективности через параметр η , основанные на регистрации анодного и коллекторного токов, могут дополнительно приводить к завышенным значениям истинного КПД. Основная ошибка измерений КПД по токам разряда связана с наличием плазмы и объемных зарядов в ней как в самом разрядном промежутке, так и в области дрейфа [3]. В технологических источниках энергетический КПД определяют с использованием калориметрических измерений [9].

A.R. Sorokin. Opposite field effect on characteristics of a pulse discharge.

It is shown that the glow discharge parameters depend to a large extent on the decay rate of the voltage U in the discharge gap d . Thus, the instantaneous value of the parameter η (the ratio of beam current to the total discharge current) can exceed the unity. In discharges interpreted as the photoemission ones, the parameter η is identified with the energy efficiency of the electron beam formation. Obviously, the instantaneous value of η can not characterize the efficiency. It is also shown that the opposite field affects not only on the parameter η , but also on other characteristics of the pulse discharge.

Из проведенных опытов следует уточнение режима разряда с сильноточным электронным пучком: пучок можно считать сильноточным, если энергия, запасенная в нем, превышает полную энергию, выделившуюся в эквивалентном аномальном разряде. Наиболее просто сильноточный режим разряда можно установить через ток пучка и полный ток эквивалентного аномального разряда только для квазистационарного, как в [1, 2, 4], или непрерывного разрядов.

1. *Сорокин А.Р.* Сильноточный электронный пучок в разряде с полым катодом и рабочим давлением до 100 торр // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 9. С. 70–78.
2. *Сорокин А.Р.* Широкоапертурный сильноточный электронный пучок в разряде с катодной плазмой и с повышенным рабочим давлением до десятков торр // Ж. техн. физ. 2009. Т. 79, вып. 3. С. 46–53.
3. *Сорокин А.Р.* Источники электронных пучков в аномальном тлеющем разряде // Ж. техн. физ. 2006. Т. 76, вып. 5. С. 47–55.
4. *Сорокин А.Р.* Сильноточный широкоапертурный электронный пучок в разряде с повышенной ионизацией газа давлением до десятков торр // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 12. С. 1–8.
5. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
6. *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н.* О немонотонности перехода от Фарадеева пространства к положительному столбу и возникновении стоячих страт за катодной областью тлеющего разряда // Теплофиз. высок. температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 19–24.
7. *Бохан П.А., Сорокин А.Р.* Открытый разряд, генерирующий электронный пучок: механизм, свойства и использование для накачки лазеров среднего давления // Ж. техн. физ. 1985. Т. 55, вып. 1. С. 88–95.
8. *Бохан П.А., Закревский Д.Э.* Механизм аномально высокой эффективности генерации электронного пучка в открытом разряде // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, вып. 11. С. 21–27.
9. *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.