

04;10

Влияние компенсационных токов на открытый разряд

© А.Р. Сорокин

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск
E-mail: IFP@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 6 декабря 2002 г.

Подтвержден прежний вывод автора о едином механизме формирования электронных пучков в тлеющих разрядах различного типа, включая открытый разряд. Поведение разряда определяется процессами ионизации и бомбардировкой катода быстрыми тяжелыми частицами, что согласуется с давно установленными представлениями о тлеющем разряде. Токи компенсации или самого электронного пучка, в противовес существующим предположениям, фотоэлектронный механизм открытого разряда не обеспечивают.

1. В [1] пересмотрен механизм фотоподсветки катода в открытом разряде (ОР). Отмечая кратковременность стадии генерации импульсного электронного пучка (ЭП), а с ростом приложенного напряжения ухудшение геометрии фотоподсветки и уменьшение энергоклада в среду ультрафиолетового (УФ) излучения — электроны пучка слабее взаимодействуют с газом, автор [1] заключает: УФ-подсветка, обеспечивающая фотоэлектронный характер ОР, возникает от высвечивания атомов, возбужденных не электронным пучком, а током j_g на анодную сетку, компенсирующим заряд, выносимый ЭП в пространство дрейфа. Если первая часть заключения находится в полном согласии с позицией, давно отстаиваемой автором настоящего сообщения [2,3], то со второй трудно согласиться. Возникают вопросы: почему не меняется ток ОР при изменении длины дрейфа, скажем, на порядок? Как быть с квазистационарным или непрерывным ОР, когда $j_g = 0$? Хотя в [4] было обращено внимание на подобные противоречия, автор [1] в последующей своей работе [5] вновь подтвердил свой вывод из [1]. Наконец отметим, ОР был специально разработан для возбуждения лазеров, а оказалось, как следует из [1], компенсационные токи, типа обычных разрядных, лучше, чем ЭП, возбуждают атомы, поэтому

не проще ли вообще отказаться от этих самых пучков и ограничиться применением для возбуждения лазеров обычного разряда?

Несмотря на отмеченные явные противоречия, остановимся на роли компенсационных токов подробнее. В описываемых ниже опытах хорошо просматривается влияние на ОР и самих ЭП, что в совокупности важно для внесения окончательной ясности в механизм ОР.

2. Достаточно наглядно и просто роль компенсационного тока j_g можно выявить, сравнивая поведение полного тока ОР в случаях подсоединенного к аноду коллектора — j_c и отсоединенного — j_{dc} (коллектор под свободным потенциалом; весь ток ЭП становится компенсационным — $j_g = j_{dc}$, и j_g возрастает на порядки).

ОР формировался между дюралевым катодом и молибденовым анодом (сетка с шагом 1 мм, геометрическая прозрачность $\mu = 0.85$) с зазором $d = 0.65$ мм. Коллектор располагался на расстоянии $L = 19.5$ мм от сетки. В режиме отсоединенного коллектора измерялся его потенциал U_p относительно анода через высокоомное сопротивление R .

Во всех опытах отключение коллектора, когда ток j_g и вклад от него в фотоподсветку максимальны, приводило к увеличению задержки электрического пробоя промежутка d до t_d в десятки наносекунд и более, вплоть до исчезновения пробоя. Влияние процессов в пространстве дрейфа на ОР хорошо прослеживается при малых давлениях p с ростом U — напряжения на d .

При небольших напряжениях ток разряда и потенциал U_p (сопротивление $R = 50$ к Ω) не регистрировались измерительной системой. По мере увеличения U предпробойный ток пучка начинает выноситься, если коллектор отключен, заметный отрицательный потенциал на коллектор, сначала с задержкой ~ 10 μ s, затем с меньшей. Ток j_{dc} и в этих условиях не регистрируется, но если подсоединить коллектор, появляется ток j_c (рис. 1, а). Отсутствие тока j_{dc} обусловлено частичной компенсацией провисания поля из промежутка d за сетку полем отрицательного заряда, осевшим на коллекторе. В результате ослабляются ионизация в полостях анодной сетки, поток ионов из них на катод и сдерживается начало развития разряда. С дальнейшим повышением U на заднем фронте потенциала U_p сначала с задержкой в несколько μ s, а затем с меньшей возникает первый электрический пробой промежутка L между коллектором и анодом. Формируется встречный основному ЭП пучок электронов, который дополнительно

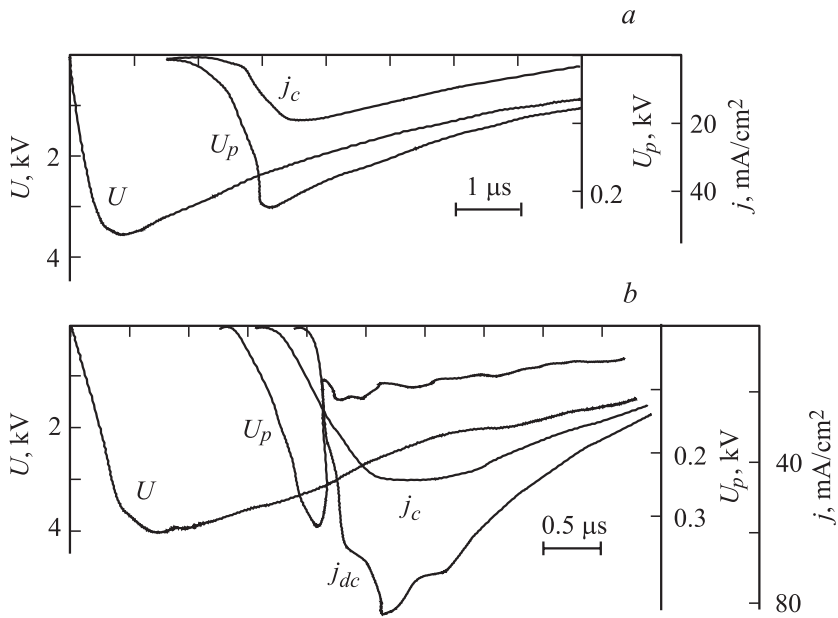


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на промежутке катод-анод U , потенциала коллектора U_p , токов и напряжений j_{dc} , U_{dc} и j_c , U_c с отсоединенным и подсоединенным к аноду коллектором. Давление гелия: $a-c$ — 1.5; d — 5.8 Торр. Открытый разряд.

ионизует газ в полостях анодной сетки, и поток ионов на катод возрастает. Момент пробоя промежутка L четко коррелирует с появлением тока j_{dc} , который задержан относительно j_c , и по величине с ростом U начинает превышать ток j_c (рис. 1, b).

При еще больших напряжениях ток j_{dc} , следовательно, и ток ЭП настолько быстро растут после первого пробоя промежутка L , что потенциал U_p вновь начинает увеличиваться, и наступает второй, уже сильноточный, пробой L (рис. 1, c). Хотя амплитудное значение $j_{dc} = 3.2 \text{ A/cm}^2$ в 8 раз превосходит j_c ($K = j_{dc}/j_c = 8$), начало тока j_{dc} задержано на $t_d > 100 \text{ ns}$ относительно j_c . Если продолжить наращивание U , то коэффициент K после достижения своего максимума начинает падать, стремясь к единице.

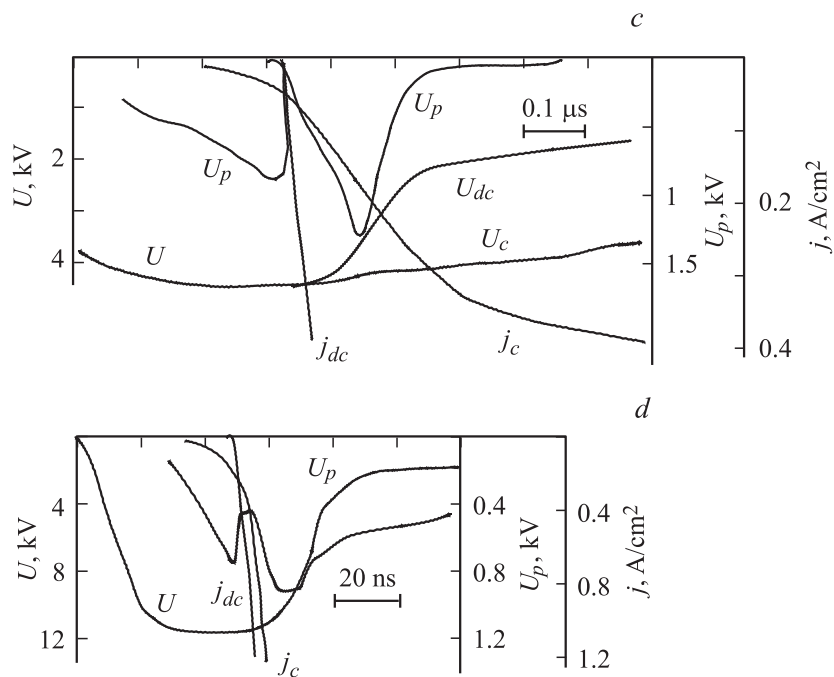


Рис. 1 (продолжение).

Важное замечание: при не очень высоких U , когда $K < 1$, отключение коллектора приводит к многократному возрастанию свечения газа в пространстве дрейфа, а ток разряда при этом падает, что свидетельствует о пренебрежимо малой роли фотоподсветки катода от токов компенсации и от тока ЭП также (встречный ЭП дополнительно возбуждает атомы).

В опытах было обнаружено большое влияние на разряд величины высокоомного плеча делителя R . При небольших давлениях отсоединение R вообще исключало возможность измерений j_{dc} из-за больших флуктуаций задержки t_d . Даже с $R = 530 \text{ k}\Omega$ флуктуации t_d существенно уменьшались. Все это указывает на чрезвычайно большое влияние на начальную стадию разряда процессов в дрейфе, регулирующих поток ионов на катод.

С ростом давления токи j_{dc} и j_c по величине начинают выравниваться: $K \rightarrow 1$, а задержка $t_d \rightarrow 0$. Убыстрение процессов развития разряда сопровождалось увеличением электромагнитных наводок на измерительные цепи, что затрудняло измерение небольших, хотя и значительно возросших, предпробойных токов, а также потенциала U_p через R большой величины — $50 \text{ k}\Omega$. По этой причине, а также из-за сдвига момента пробоя промежутка L к началу импульса напряжения U , по виду осциллограмм токов j_{dc} и j_c невозможно было определить, который из них начинается раньше. Однако если увеличить сток электронов с коллектора, уменьшив R , задержка t_d становится четко выраженной (рис. 1, d): $R = 2 \text{ k}\Omega$, $K = 1.5$, $j_c = 9.5 \text{ A/cm}^2$. Если совсем отсоединить R , $K = 2$. В этих условиях, как и ранее, понижением напряжения можно было получить $K < 1$.

При еще больших давлениях двухимпульсный пробой сливался в один, а начиная с давления $p > 10 \text{ Torr}$ токи практически полностью выравнивались — $K = 1$, $t_d = 0$ даже при отсоединенном R . Так, при 13 Torr и $U > 4 \text{ kV}$ ток j_{dc} лишь на $\approx 1\%$ превышал j_c , что можно принять за верхний предел вклада фотоэмиссии от тока компенсации. Здесь уже быстро образующаяся достаточно плотная анодная плазма в промежутке d сама в состоянии регулировать и контролировать параметры разряда. Ослабленное поле в плазме благоприятствует ионизации [6]. По этой же причине при небольших давлениях формирование катодного падения потенциала и появление анодной плазмы за ним с ростом U , начиная с достаточно высокого напряжения, приводило к уменьшению K .

Таким образом, токи компенсации или самого ЭП фотоэлектронный механизм не обеспечивают. Все определяется процессами ионизации и атом-электронной эмиссией электронов с катода, как это общепринято для тлеющих разрядов [6].

3. Чтобы подчеркнуть идентичность процессов, происходящих в тлеющих разрядах различного типа, роль компенсационных токов была исследована в конструкции, представленной на рис. 4 в [7]: анод в виде кольца толщиной 5 mm с отверстием 20 mm размещался на расстоянии 5 mm от дюралевого катода; коллектор отстоял от анода на 40 mm . Отверстие в аноде могло прикрываться сеткой, и тогда разряд с полым анодом заменялся на ОР с большим межэлектродным промежутком $d = 10 \text{ mm}$. Разряд зажигался в гелии или, для повышения стабильности [6], в гелии с добавкой $1\% \text{ O}_2$.

Во всех случаях качественная картина поведения j_{dc} , j_c , U_p была идентична рассмотренной в п. 2. Различия не принципиальны и обусловлены большей свободой развития процессов ионизации в основном разрядном промежутке: наблюдались большие по величине токи, пробой между сеткой и коллектором был одноимпульсный, особенности поведения разряда в зависимости от давления сместились в сторону меньших давлений. Даже для нормального тлеющего разряда длина катодного падения потенциала $l_{cf} = 1.3 \text{ p}^{-1} \cdot \text{cm}$ становится меньше $d = 10 \text{ mm}$, начиная с $p > 1.3 \text{ Torr}$. Еще большая свобода развития объемных процессов будет в отсутствие сетки. В обоих случаях уже нет смысла говорить об ОР или разряде с полым анодом — в промежутке развивается обычный аномальный разряд.

Пример случая разряда с полым анодом на рис. 2 для $p = 3.4$ и 0.4 Torr , $R = 50 \text{ k}\Omega$. При больших давлениях, так же как и ранее, начиная с $p \sim 10 \text{ Torr}$, K становится равным единице. Отметим, что во всех упомянутых условиях, как показано в [7], эффективно генерируются ЭП.

4. В заключение обсудим еще одно замечание из работы [1], в котором обращено внимание на кратковременность эффективной стадии генерации ЭП по сравнению с длительностью самого разряда. По мнению автора [1], этот эффект связан с малым временем существования УФ-подсветки катода лишь в течение стадии нейтрализации заряда в пространстве дрейфа компенсационным током. Однако такое предположение не согласуется с фактом существования эффективных ЭП, например в непрерывном ОР.

В действительности наблюдаемое быстрое падение эффективности η в период завершения импульсного разряда связано с процессами движения зарядов в промежутке d . За эффективность формирования ЭП в ОР принимается отношение тока коллектора к полному току разряда $\eta = j_e/j$. Параметр η зависит от коэффициента γ -эмиссии электронов с катода и от доли (k) электронов, рожденных в объеме разрядного промежутка и достигающих коллектора, т. е. $\eta \approx \mu(\gamma + k)(\gamma + 1)^{-1}$ [8]. В типичном ОР [5,8] во всем разрядном промежутке выполнены условия для „убегания“ электронов, поэтому $k \approx 1$, η не зависит от величины γ и $\eta \approx \mu$ — геометрической прозрачности сетки. Приведенная формула для параметра η справедлива, когда число положительных ионов, прибывших на катод из d , в сумме с возникшими на катоде положительными зарядами после выбивания с него электронов в γ -процессах, равно суммарному числу электронов, попадающих на анод и коллектор.

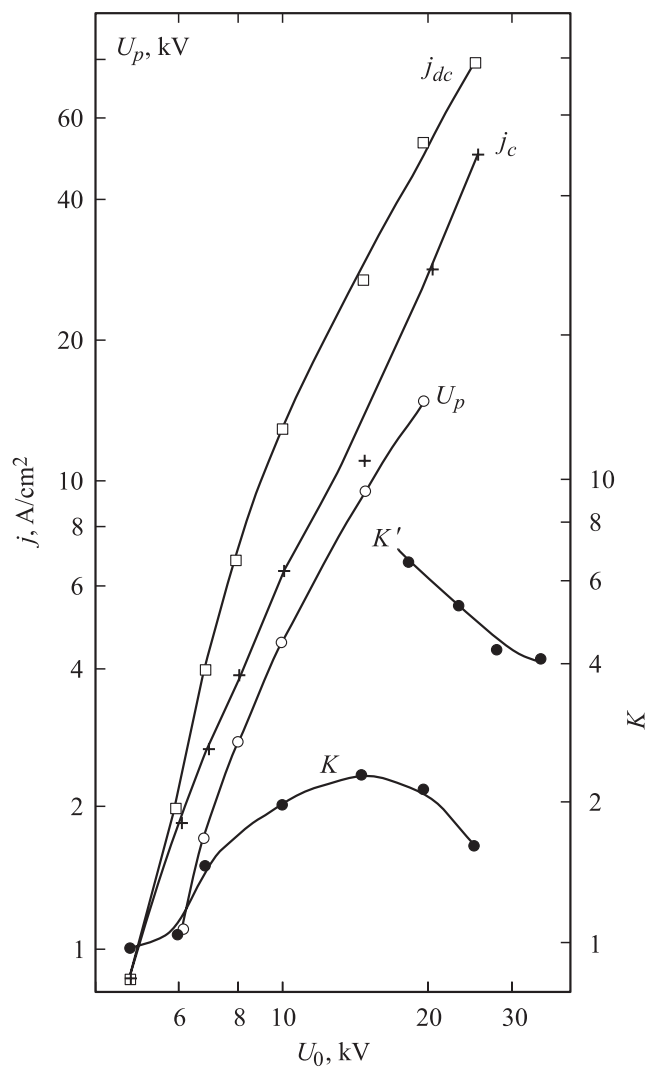


Рис. 2. Изменение токов j_{dc} , j_c , потенциала коллектора U_p и коэффициента $K = j_{dc}/j_c$ в зависимости от амплитудного значения напряжения на промежутке катод-анод U_0 для давления гелия с добавкой 1% O_2 — 3.4 Торг. K' — для давления 0.4 Торг. Разряд с полым анодом.

Это реализуется для стационарного и квазистационарного разрядов, а также по времени вблизи максимума тока импульсного разряда в момент перехода от накопления положительного заряда в промежутке к его рассасыванию. В стадии же рассасывания нескомпенсированный электронами поток ионов дает дополнительный вклад только в ток анода, поэтому $\eta < \mu$.

Таким образом, уменьшение η на заднем фронте тока в ОР связано с преобладанием в этот период потока ионов на катод над потоком электронов на анод и коллектор.

Резюме. 1. Во всех рассмотренных случаях подтверждается вывод из [3,7,8] о едином механизме формирования электронных пучков в тлеющих разрядах различного типа, включая открытый разряд. Поведение разряда определяется процессами ионизации и бомбардировкой катода быстрыми тяжелыми частицами. Токи компенсации или самого электронного пучка фотоэлектронный механизм не обеспечивают, в противовес предположениям авторов [1,9].

2. При небольших давлениях ($p < 10$ Торр), изменяя потенциал коллектора подбором связи (R) между анодом и коллектором, можно для фиксированного U регулировать ток разряда в пределах до порядка величины. Формирующийся в этих условиях встречный электронный пучок дополнительно возбуждает газ, что важно для лазерных применений разряда.

Список литературы

- [1] Колбычев Г.В. // Изв. вузов. Физика. 1999. № 11. С. 84–86.
- [2] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 20. С. 37–40.
- [3] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 9. С. 14–21.
- [4] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 24. С. 89–94.
- [5] Колбычев Г.В. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1056–1061.
- [6] Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е. и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [7] Сорокин А.Р. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1062–1066.
- [8] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 4. С. 86–94.
- [9] Бохан А.П., Бохан П.А. // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 3. С. 216–227.