

04;10;11

©1995

## ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ ОТКРЫТЫЙ РАЗРЯД ФОТОЭЛЕКТРОННЫМ?

*А.Р.Сорокин*

Считается [1-7], что в аномальном высоковольтном разряде с сетчатым анодом — открытом разряде (ОР) основным поставщиком электронов пучка является эмиссия с катода за счет самофотоподсветки из дрейфового пространства.

Уже в первых работах по ОР было замечено большое влияние фотоподсветки на формирование разряда [8]. Об определяющей роли фотоэмиссии электронов с катода в сильноточной фазе разряда впервые было высказано автором настоящей работы для объяснения высокой эффективности генерации электронного пучка (ЭП) в предложенной им качественной картине формирования ОР [1]. В позже опубликованной работе других авторов [2] сделан вывод, что ток ЭП в ОР определяется только фотоэлектронной эмиссией с катода и предложено разряд назвать фотоэлектронным. Подробное исследование роли фотоэффекта в динамике разряда с убегающими электронами с тем же выводом проведено в [3], а затем и в обзоре [4].

Покажем путем анализа типичных осциллограмм разряда (рис. 1 [4]), что фотоэмиссия может не являться основным механизмом генерации ЭП в ОР.

Критическое поле для непрерывного ускорения электронов в гелии  $E_{сг}/p_{He} = 150 \text{ V/cm} \cdot \text{Торг}$  [9]. В конце импульса напряжения (рис. 1)  $U = 3 \text{ kV}$ , а среднее значение  $E/p_{He} = 2 \cdot 10^3 \text{ V/cm} \cdot \text{Торг}$  на порядок выше  $E_{сг}/p_{He}$ . В процессе формирования ОР ток ЭП достигает максимального значения на спаде  $U$  при  $6 \text{ kV}$  (рис. 1). Для фотоэлектронного разряда процессы в разрядном промежутке могут влиять лишь на анодный ток и на эффективность генерации ЭП, а никак не на сам пучок. Поскольку для измерения тока ЭП коллектор в дрейфовом пространстве располагают на таком расстоянии от сетки, чтобы перехватить почти весь пучок, то наибольшую фотоподсветку будут обеспечивать более медленные электроны, генерируемые на спаде, и поэтому эффективней возбуждающие атомы.

Оценим, как меняется ток  $I_c$  пучка при уменьшении  $U$  с  $6$  до  $3 \text{ kV}$ . Потери энергии электронов на единице дли-

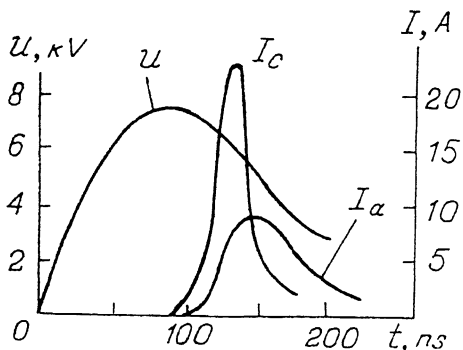


Рис. 1. Осциллограммы из работы [4] напряжения  $U$ , тока  $I_c$  коллектора и тока  $I_a$  в анодной цепи для разрядного промежутка 0.5 мм при  $p_{Ne} = 30.4$  Торр и площади катода  $0.8 \text{ cm}^2$ .

ны пробега пропорциональны  $\sim \ln(1.16 \cdot eU/\epsilon) \cdot (eU)^{-2}$  [10], где  $\epsilon$  — так называемый средний ионизационный потенциал (для Ne  $\epsilon \approx 37 \text{ eV}$ ). Полагая, что число фотоэлектронов, рождаемых на катоде в единицу времени, пропорционально скорости этих потерь, для тока пучка получим:  $I_c \sim \ln(1.16 \cdot eU/\epsilon) \cdot (eU)^{-1.5}$ , откуда для рассматриваемого случая ток пучка должен возрасти в 2.2 раза, а не резко падать, как на рис. 1.

Наиболее ярко роль фотоподсветки заметна при возбуждении разряда импульсом, сформированным на кабельных линиях, когда четко проявляется квазистационарная фаза разряда (рис. 2), в которой сохраняется высокая эффективность генерации ЭП, равная геометрической прозрач-

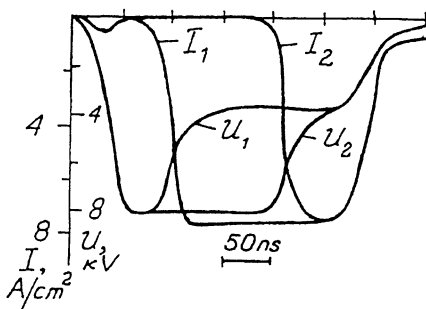


Рис. 2. Осциллограммы напряжения  $U$  и полного тока  $I$  для различных длин  $L$  дрейфового пространства:  $L = 40 \text{ mm}$  ( $U_1, I_1$ );  $L = 12 \text{ mm}$  ( $U_2, I_2$ ). Разрядный промежуток 1 мм; геометрическая прозрачность сетчатого анода 65%; площадь катода из дюралюминия  $1.8 \text{ cm}^2$ ; давление неона  $p_{Ne} = 3.3$  Торр.

ности сетки. Уменьшение интенсивности фотоподсветки путем сокращения длины  $L$  дрейфового пространства приводит лишь к увеличению задержки электрического пробоя промежутка. Амплитудное значение тока, которое должно при фотоэлектронном разряде уменьшаться одновременно с  $L$ , остается неизменным.

Таким образом, в рассмотренных условиях фотоэмиссия с катода в сильноточной фазе ЭП не играет определяющей роли. Поэтому следует принять общепринятый механизм эмиссии электронов в обычном высоковольтном разряде за счет бомбардировки катода быстрыми тяжелыми частицами, когда и в разрядном промежутке со сплошными электродами генерируется ЭП почти со 100%-й эффективностью [11]. Эмиссия резко падает с уменьшением энергии тяжелых частиц [12]. Этим и объясняется спад генерации ЭП на заднем фронте  $U$  (рис. 1). То, что ОР может быть описан в рамках обычного аномального высоковольтного разряда, хорошо продемонстрировано и в опытах работы [13]. Заметим также, что в условиях существования ОР наблюдается задержка во времени максимума спонтанного излучения в дрейфовом пространстве относительно максимума тока ЭП.

Все же роль фотоэмиссии в ОР чрезвычайно велика в период его формирования, и здесь имеется большое сходство с формированием безыскрового разряда в плотных газах с предварительной фотоподсветкой.

Развитие ОР начинается на переднем фронте импульса  $U$ , о чем свидетельствует снижение  $U$  в этой фазе разряда [8]. На этой стадии бомбардировка катода медленными тяжелыми частицами неэффективна, поэтому резко возрастает роль однородной фотоподсветки, которая и обеспечивает в дальнейшем устойчивость сильноточной фазы ОР. Снижая скорость нарастания импульса напряжения, путем искусственного затягивания переднего фронта удается обеспечить более стабильное протекание разряда [1]. Область эффективной подсветки, влияющей на разряд, сокращается с ростом давления, составляя для условий рис. 2  $L \approx 30$  мм, а, например, в гелии при 15 Торг  $L < 10$  мм. Наилучшая стабильность ОР наблюдается с трехэлектродной схемой питания [14,15], когда обеспечиваются наиболее благоприятные условия как для формирования слаботочной, так и для протекания сильноточной фаз разряда.

Таким образом, основная роль фотоподсветки из дрейфового пространства открытого разряда сводится к обеспечению однородной фотоэмиссии с катода во время формирования разряда. Это стабилизирует его сильноточную фазу и позволяет получать значительно большие токи, чем

в обычном аномальном разряде без его перехода в дуговую форму. Одна из причин расхождения этого вывода с предыдущими исследованиями связана с тем, что в них не рассматривалась квазистационарная стадия разряда и роль фотоэмиссии в сильноточной фазе маскировалась влиянием фотоподсветки на динамику развития разряда.

Возможно, фотоэмиссия проявит себя и непосредственно в сильноточной фазе открытого разряда при достаточно высоком поле у катода, когда за счет эффекта Шоттки произойдет существенный сдвиг границы фотоэффекта в видимую область спектра. Возможно также, что эффект фотоэмиссии проявляется в непрерывном открытом разряде при небольших напряжениях и токах [6].

Автор выражает благодарность Фонду Сороса за поддержку работ по открытому разряду.

### Список литературы

- [1] Ботан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. С. 88–95.
- [2] Колбычев Г.В., Пташник И.В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 18. С. 1106–1110.
- [3] Колбычев Г.В., Пташник И.В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 9. С. 104–111.
- [4] Колбычев Г.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635–649.
- [5] Ботан П.А. // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 6. С. 61–68.
- [6] Ковалев А.С., Манкелевич Ю.А., Муратов Е.А. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 8.
- [7] Арланцев С.В., Борович Б.Л., Голубев Л.Е. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 9. С. 824–826.
- [8] Колбычев Г.В., Самышкин Е.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 10. С. 2032–2037.
- [9] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [10] Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. и др. Инжекционная газовая электроника. Новосибирск: Наука, 1982. 240 с.
- [11] O'Brien V.B. // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. № 10. P. 503–505.
- [12] Hayden H.C., Utterback N.G. // Phys. Rev. 1964. V. 135. N 6A. P. 1575–1579.
- [13] Клименко К.А., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. N 9. С. 138–142.
- [14] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 8. С. 27–30.
- [15] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 23. С. 92–95.

Институт физики  
полупроводников СО РАН

Поступило в Редакцию  
8 июня 1995 г.