

04;10;12

Механизм эмиссии электронов в открытом разряде

© А.П. Бохан, П.А. Бохан

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 16 октября 2000 г.

Исследовано влияние искусственной фотоподсветки из дрейфового пространства, вызванной дополнительным разрядом между анодом и коллектором электронов, на ток открытого разряда. Исследование проведено для непрерывного, квазинепрерывного и импульсного режима генерации электронного пучка в диапазоне токов от 1 mA/cm^2 до 10 A/cm^2 . Установлено, что энергетическая эффективность воздействия дополнительного разряда на ток пучка выше, чем энергетическая эффективность самого пучка. Сформулирован вывод о том, что фотоэмиссия является основным поставщиком электронов в открытом разряде.

Открытый разряд (ОР), генерирующий электронный пучок, является предметом интенсивных исследований. Одним из важнейших является вопрос о природе эмиссии электронов с катода в ОР. Ранее считалось, что основным механизмом, обеспечивающим ток пучка в ОР, является фотоподсветка из дрейфового пространства [1–5]. Позднее эта модель была подвергнута критике, главным образом в работах [6–8], в которых роль фотоподсветки была сведена к обеспечению равномерности зажигания ОР на его ранней стадии при плотности тока $j < 10^{-4} \text{ A/cm}^2$. В дальнейшем до плотностей тока порядка $j \leq 10^{-1} \text{ A/cm}^2$ поддержание разряда осуществляется за счет ионизации в поле, провисающем за анодную сетку в дрейфовое пространство. Затем эта стадия перерастает в аномальный тлеющий разряд, во время которого и генерируется основная масса электронов пучка [9,10].

Рамки данного издания не позволяют провести детальный анализ результатов работ [6–10]. Этот анализ авторы планируют представить в развернутой статье в ЖТФ. Здесь мы только упомянем, что доказательства, приведенные в работах [6–10], являются косвенными и не могут служить основанием для однозначного заключения о природе электронной эмиссии в ОР. Основные же усилия в данной работе были направлены на постановку прямых экспериментов по изучению

влияния фотоподсветки из дрейфового пространства на вольт-амперные характеристики (ВАХ) в ОР.

С этой целью обычная конструкция ячеек для реализации ОР (катод–сетчатый анод–дрейфовое пространство–коллектор электронов) была дополнена второй сеткой, установленной в дрейфовом пространстве на расстоянии 2 мм от анодной сетки. Длина дрейфового пространства составляла 20 мм. Расстояние катод–анодная сетка было равно 1 мм, характерный размер ячеек в сетках 0.2 мм. В экспериментах по изучению влияния фотоподсветки из дрейфового пространства обе сетки находились под одинаковым потенциалом. Это позволило свести к минимуму провисание поля, приложенного к промежутку катод–анод, в область дрейфового пространства за второй сеткой, и наоборот, поля этого дрейфового пространства в ускорительный зазор. В результате, усиливая фотоподсветку из дрейфового пространства путем поддержания в нем газового разряда, можно изучать ее прямое влияние на свойства ОР. В установке использовался полированный катод из нержавеющей стали диаметром 13.5 мм и перфорированный анод диаметром 12.5 мм. Рабочий газ гелий марки ВЧ дополнительно очищался ловушкой из активированного угля.

Исследовались три режима горения ОР.

1. Непрерывный режим с плотностью тока до 5 mA/cm^2 .
2. Квазинепрерывный режим с плотностью тока до 1 A/cm^2 и типичной длительностью прямоугольного импульса $10 \mu\text{s}$.
3. Импульсный режим, осуществляемый при разряде емкости 600 pF через ускорительный зазор при плотности тока до 10 A/cm^2 .

Для того чтобы исключить из рассмотрения переходные процессы, связанные с зажиганием разряда, в режимах 2 и 3 в зазоре одновременно поддерживался иницирующий непрерывный разряд с плотностью тока $1 \dots 2 \text{ mA/cm}^2$. В этих условиях, если следовать выводам работ [8,9], влияние фотоподсветки из дрейфового пространства не должно проявляться вообще.

На рис. 1 соответственно кривыми 1, 2 показаны зависимости тока разряда I_2 в цепи 2-я сетка–коллектор и тока I_3 в цепи катод–анод, т. е. в ускорительном зазоре, от напряжения U_2 , приложенного к промежутку 2-я сетка–коллектор. Напряжение, приложенное к ускорительному зазору, составляло $U_3 = 1040 \text{ V}$, давление гелия $p_{\text{He}} = 11 \text{ Torr}$. Кривые 1', 2' демонстрируют те же зависимости для квазинепрерывного режима при

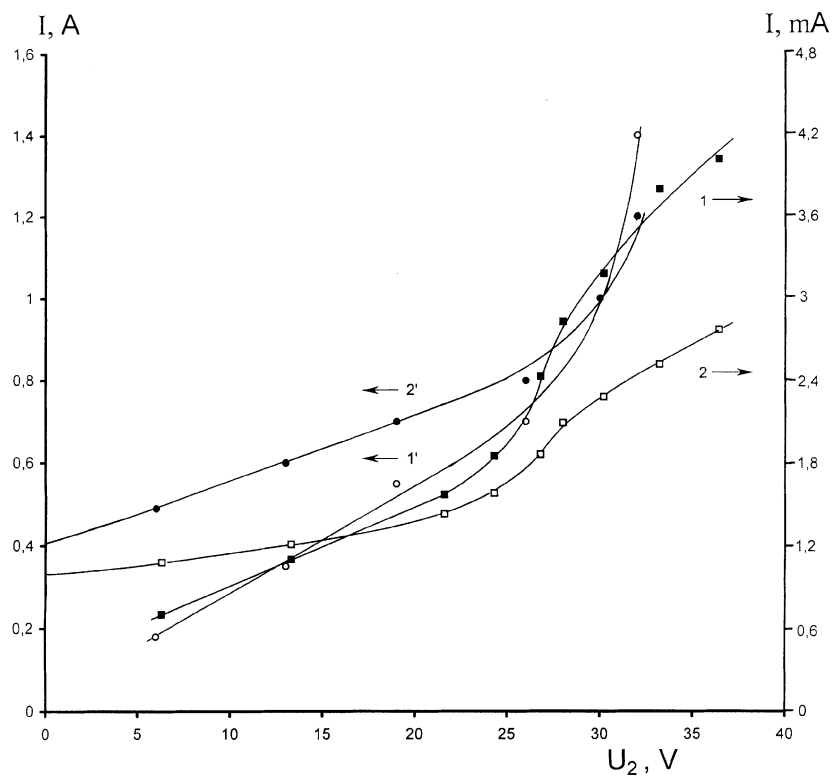


Рис. 1. Зависимость I , I' тока разряда в цепи 2-я сетка–коллектор I_2 и тока 2 , $2'$ в ускорительном зазоре I_3 от напряжения на коллекторе. I , 2 — непрерывный режим; I' , $2'$ — квазинепрерывный режим.

$U_3 = 2400$ В, $p_{\text{He}} = 16$ Торг. Во всех случаях коллектор находился под положительным относительно второй сетки потенциалом.

На рис. 2 показаны зависимости прироста тока в процентах от отношения P_p/P_d , где P_p — мощность разряда, вычисляемая из данных рис. 1, а P_d — мощность, рассеиваемая быстрыми электронами при пересечении дрейфового пространства, рассчитываемая по известным методикам [5,11,12].

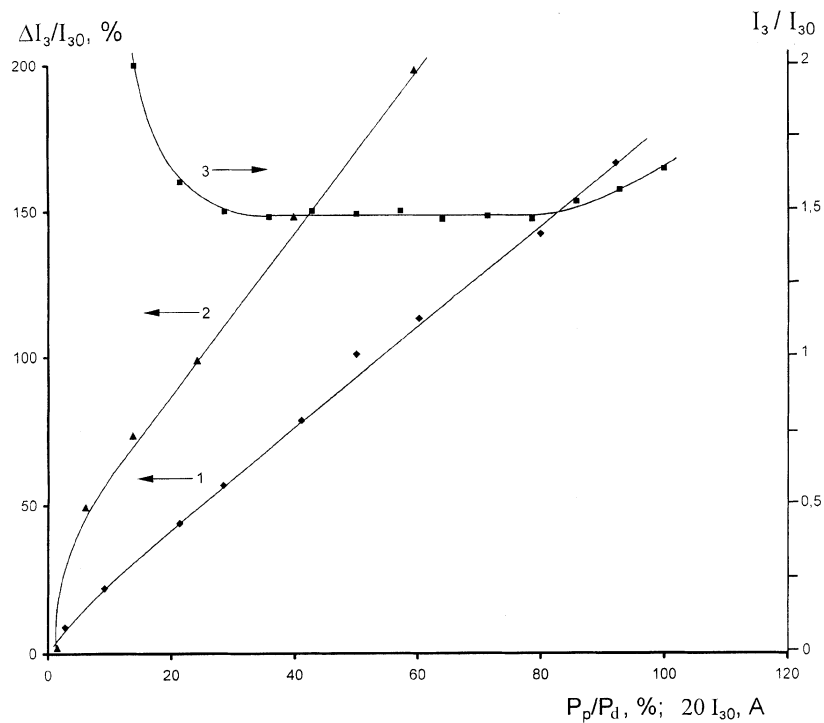


Рис. 2. Зависимость относительного прироста тока в зазоре $\Delta I_3/I_{30}$ от относительной мощности, вводимой в дрейфовое пространство P_p/P_d (1, 2) и I_3/I_{30} от тока в зазоре (3): 1 — непрерывный режим, 2 — квазинепрерывный режим; 3 — импульсный режим.

Энергетические потери электронов keV-энергий вычисляются с точностью до 50%. Тем не менее из данных рис. 2 видно, что при мощности дополнительного разряда, как правило, меньшей, чем мощность, рассеиваемая пучком, ток в цепи катод-анод удваивается. Особо следует отметить, что это удвоение происходит при напряжении дополнительного разряда, исключающем размножение электронов в цепи 2-я сетка-коллектор, т. е. в условиях строго несамостоятельного разряда, поддерживаемого пучком быстрых электронов. Такой тип разряда влияет

только на функцию распределения по энергиям вторичных электронов пучка. Так как большая часть возбуждения газа при прохождении пучка происходит от вторичных электронов [5,11], то можно говорить об одинаковой природе генерации ультрафиолетовых квантов и их воздействии на эмиссию электронов с катода. Поэтому близость энергетической эффективности воздействия пучка и дополнительного разряда на ток в ускорительном зазоре свидетельствует в пользу фотоэлектронной природы эмиссии в открытом разряде по крайней мере до плотности тока 1 A/cm^2 .

В импульсном режиме эксперименты с дополнительной фотоподсветкой затруднены для интерпретации, так как при распространении в слабоионизированном газе импульсного пучка малой длительности генерируются индукционные токи большой величины. В результате глубина проникновения пучка становится значительно меньше, а мощность фотоподсветки значительно больше, чем это следует из расчета энергетических потерь. Поэтому изучение влияния фотоподсветки проводилось в два этапа. Вначале измерялись ВАХ ОР с плавающим потенциалом сеток 1, 2 [13] и величина плавающего потенциала на этих сетках относительно коллектора. Затем измерялась ВАХ разряда с заземленными сетками. Отличие этих режимов состоит в том, что между коллектором и сеткой в случае плавающего потенциала последней протекает дополнительный ток, обусловленный стеканием зарядов с сетки. Оказалось, что в непрерывных и квазинепрерывных пучках величина плавающего потенциала U составляет $15 \dots 20 \text{ V}$, а воздействие этого потенциала и обусловленного им дополнительного тока на ВАХ точно такое же, как и влияние U_2 в случае независимого дополнительного разряда в цепи 2-я сетка–коллектор, рассмотренного выше.

В импульсном режиме величина U существенно нестационарна и ведет себя сложным образом. В период развития токовой части $U = 200 \dots 400 \text{ V}$, а превышение тока ОР с плавающим потенциалом сетки над током с заземленной сеткой, как и в непрерывном разряде, составляет $30 \dots 50\%$.

С учетом изложенного для проверки влияния дополнительной подсветки на коллектор подавался потенциал U_k относительно заземленных сеток (1, 2), не вызывающий самостоятельного разряда в том числе и при воздействии пучка. Изменялась ВАХ импульсного ОР как с подачей этого потенциала, так и без него. На рис. 2 кривой 3 показана зависимость прироста тока I_3/I_{30} при подаче $U_k = -300 \text{ V}$ от тока I_{30}

при $U_k = 0$. Эта зависимость носит немонотонный характер, однако во всех случаях прирост тока не ниже, чем от дополнительной подсветки в ОР с плавающим потенциалом сеток. Это свидетельствует в пользу того, что и в импульсном режиме ток открытого разряда обусловлен фотоэмиссией электронов под действием ультрафиолетовой подсветки из дрейфового пространства.

Таким образом, прямые эксперименты по изучению влияния подсветки из дрейфового пространства показали, что в широком диапазоне условий, а именно в импульсном, квазинепрерывном и непрерывном режимах в диапазоне токов от 1 mA/cm^2 до 10 A/cm^2 , ток открытого разряда обусловлен фотоэмиссией с катода. Поэтому открытый разряд не является известным аномальным разрядом, как это утверждается в работах [9,10]. В частности, это проявляется в том, что плотность тока в ОР более чем на порядок уступает плотности тока в аномальном разряде. Детальное сравнение ОР с аномальным, включая свойства ВАХ, будет дано в последующей публикации.

Список литературы

- [1] Бохан П.А., Колбычев Г.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 9. С. 1823–1831.
- [2] Колбычев Г.В., Самышкин Б.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 10. С. 2031–2037.
- [3] Колбычев Г.В., Пташник Н.В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 9. С. 104–110.
- [4] Бохан П.А. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 6. С. 61–68.
- [5] Arlantsev S.V., Borovich B.L., Buchanov V.V. et al. // Journal of Russian Laser Research. 1995. V. 16. N 2. P. 99–119.
- [6] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 17. С. 33–37.
- [7] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 20. С. 37–40.
- [8] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 13. С. 17–21.
- [9] Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 3. С. 33–38.
- [10] Клименко К.А., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 138–142.
- [11] Сыцко Ю.Н., Яковленко С.И. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. № 1. С. 63–71.
- [12] La Verne L.A., Mozumder A.J. // J. Phys. Chem. 1985. V. 89. N 20. P. 4219–4225.
- [13] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 23. С. 92–95.