

04;10

Механизм аномально высокой эффективности генерации электронного пучка в открытом разряде

© П.А. Бохан, Дм.Э. Закревский

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

Поступило в Редакцию 12 декабря 2001 г.

Исследованы параметры открытого разряда без анодной сетки при повышенных плотностях тока. Продемонстрирована практически 100%-ная эффективность генерации импульсного и непрерывного электронного пучка. Предложен механизм, отвечающий за столь высокое значение эффективности, заключающийся в том, что в зоне, прилегающей к катоду, образуется слой с низким градиентом потенциала, блокирующий ток ионов на катод, а эмиссия электронов обеспечивается фотоподсветкой.

В работе [1] было показано, что открытый разряд (ОР) без анодной сетки обладает значительно большей практической эффективностью генерации непрерывного электронного пучка (ЭП), чем любые другие виды газового разряда. Для выяснения механизма генерации ЭП и определения предельных характеристик ОР без анодной сетки в данной работе были проведены исследования в квазинепрерывном режиме при высоких плотностях тока. В экспериментах использовалась конструкция ячейки, аналогичная описанной в работе [1] с рабочей площадью катода $\sim 1 \text{ cm}^2$. Напомним, что для подавления ионного тока на катод на расстоянии $\delta = 1 \text{ mm}$ перед ним установлена решетка из диэлектрических пластин с расстоянием между ними $h = 2 \text{ mm}$, что уменьшает ион-электронную эмиссию с катода. Использовались разряд емкости $C = 3.3 \text{ nF}$ через тиратрон и разрядный промежуток, питание прямоугольными импульсами длительностью $(0.5 \dots 2) \text{ ms}$ и режим кратковременного ($\sim 15 \text{ s}$) включения непрерывного режима. Для стабилизации горения последовательно в разрядную цепь включалось балластное сопротивление.

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы развития токов анода I_a и коллектора электронов I_{ce} . Хорошо различаются три стадии функционирования разряда: а) зажигания; б) развития ОР; в) квазистационарного горения ОР. Стадия зажигания ($0 \dots 6.5$) μs характеризуется большим анодным током и низкой эффективностью генерации ЭП. Затем в интервале ($6.5 \dots 12$) μs происходит резкое падение анодного тока и увеличение (до $\sim 95\%$) эффективности генерации ЭП. В дальнейшем, несмотря на постепенное снижение напряжения, происходит заметный рост тока ЭП и эффективности генерации пучка.

Полученные результаты интерпретируются следующим образом. На стадии зажигания, происходящей при низком напряжении ($U < 1.5$ kV), реализуется обычный аномальный разряд с эффективностью генерации пучка $\eta = (20 \dots 40)\%$. Как и в других видах высоковольтного тлеющего разряда [2], в этом случае происходит постепенный рост η при увеличении плотности тока и напряжения. При дальнейшем росте напряжения все более значительная часть электронов переходит в режим убегания, поэтому большая часть ионов производится за областью анодного узла и рекомбинирует, не достигая катода. Ко времени $t \sim 10 \mu\text{s}$ основная часть ионов, возникших на стадии зажигания в промежутке катод-пластины, уже достигла катода, поэтому главным поставщиком электронов в ток разряда становится фотоэмиссия под действием излучения из дрейфового пространства. Эта стадия характеризуется чрезвычайно высокой эффективностью генерации пучка (99.8% при $I_{ce} \sim 25$ mA, $t = 150 \mu\text{s}$), которая возможна только при фотоэмиссионном механизме эмиссии электронов.

Из рис. 1 видно, что условия получения максимальной эффективности не совпадают с условиями реализации максимального тока ЭП. Наибольшая эффективность, вне зависимости от исходного напряжения и тока ЭП в максимуме, лежит в диапазоне токов ($20 \dots 25$) mA. Увеличение давления гелия $p_{\text{He}} > 8$ Torr смещает область наивысшей эффективности генерации ЭП в область больших токов при постепенном снижении η . Напряжение горения ОР вначале резко уменьшается, затем снова увеличивается (рис. 2). Максимальная зарегистрированная эффективность составила $\eta = 99.88\%$ при $p_{\text{He}} = 8$ Torr.

При питании прямоугольными миллисекундными импульсами область максимальной эффективности смещается в сторону больших токов ($30 \dots 40$) mA при $p_{\text{He}} = (7 \dots 8)$ Torr и также достигает величины $\eta = 99.8\%$.

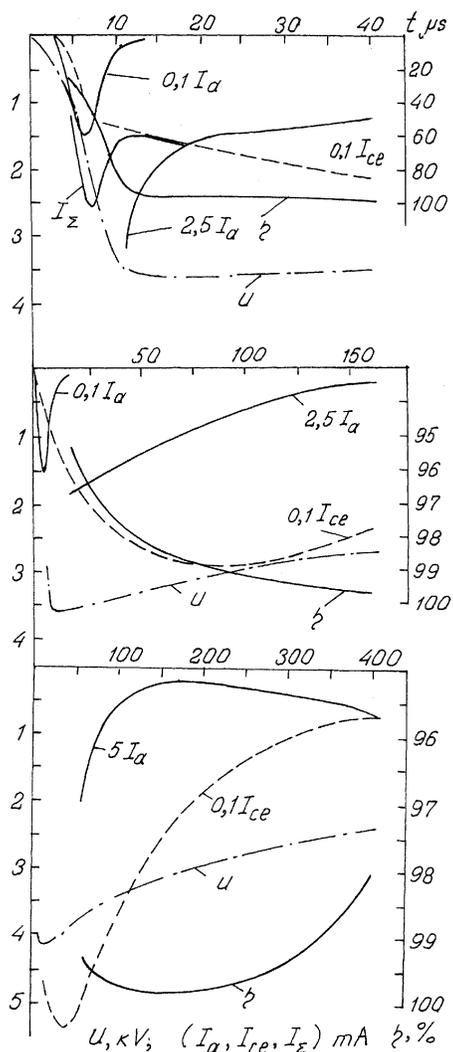


Рис. 1. Типичные осциллограммы напряжения U ; токов — анодного I_a , коллекторного I_{ce} , суммарного I_{Σ} и эффективность генерации ЭП η при различных исходных напряжениях ($p_{He} = 8 \text{ Torr}$).

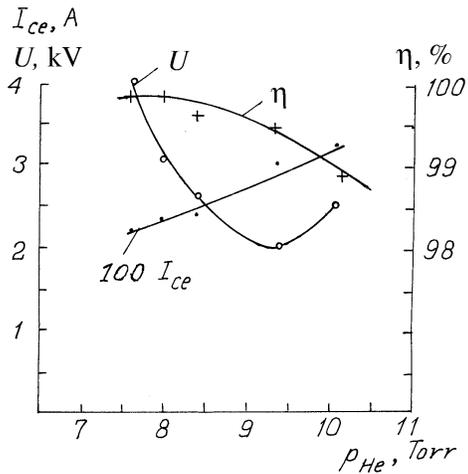


Рис. 2. Изменение параметров разряда: напряжения U ; тока ЭП I_{ce} ; эффективности генерации ЭП η от давления гелия p_{He} .

В непрерывном режиме в дрейфовом пространстве и на коллекторе электронов рассеивается значительная мощность (до ~ 100 W), что ведет к быстрому разогреву ячейки и изменению концентрации рабочего газа в области ускорения электронов. Ввиду сильной зависимости тока в разрядном промежутке и напряжения на нем от концентрации рабочего газа параметры ЭП в непрерывном режиме сохраняются неизменными в течение лишь (10...15) с. Результаты измерения в таком режиме представлены на рис. 3. Видно, что в непрерывном режиме напряжение горения несколько выше, а эффективность ниже ($\sim 99.5\%$), чем в квазинепрерывном режиме.

Полученные результаты хорошо укладываются в фотоэмиссионный механизм эмиссии электронов. Превышение тока ЭП над током анода I_a , компенсирующим ток ионов на катод, настолько велико (до 500 раз), что не может быть следствием ион-электронной эмиссии, как и в обычном ОР. С практической точки зрения это означает, что благодаря незначительному распылению катода срок службы ускорителей электронов на основе ОР без анодной сетки может быть значительно выше, чем на основе высоковольтных аномальных [2,3] и обычных открытых разрядов.

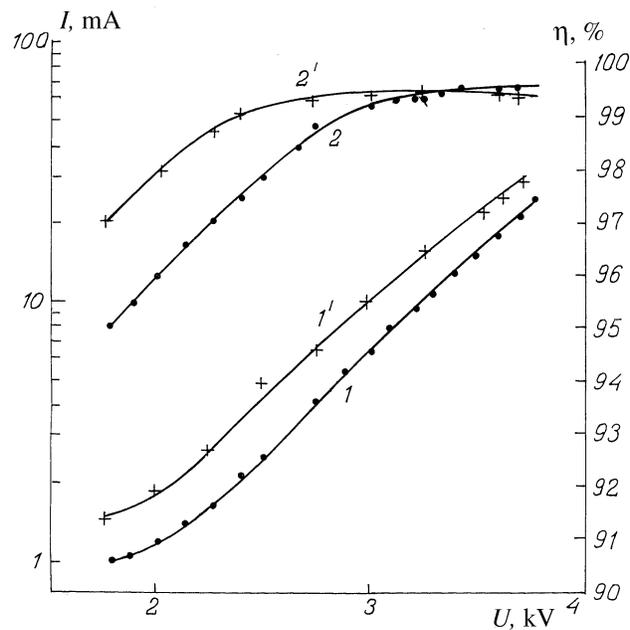


Рис. 3. Изменение параметров разряда: суммарного тока I_{Σ} (I, I') и эффективности генерации ЭП η ($2, 2'$) от напряжения U в квазинепрерывном режиме ($1, 2$ — $p_{\text{He}} = 8 \text{ Torr}$; $2, 2'$ — $p_{\text{He}} = 9 \text{ Torr}$).

С другой стороны, намного более сильное подавление ионного тока в ОР без анодной сетки говорит о том, что механизм ускорения электронов и нейтрализации ионов в нем существенно различаются по сравнению с традиционным ОР. В самом деле, эффективность генерации ЭП (без учета потерь в сетке), согласно [4], определяется выражением

$$\eta = \frac{1}{(1 + \Theta \delta(dw/dx)/w_0)}, \quad (1)$$

где dw/dx и Θ — соответственно энергетические потери быстрых электронов и их доля, затрачиваемая на ионизацию; w_0 — энергия, затрачиваемая на образование одного иона. Для гелия $\Theta = 0.51$ и $w_0 = 49 \text{ eV}$ [5], а $(dw/dx) = 47 \text{ eV/cm}$ при $p_{\text{He}} = 8 \text{ Torr}$ и $w = 3 \text{ keV}$

для одиночного электрона [6]. Если считать, что на катод попадают все ионы, образованные на длине зазора $\delta = 1$ mm, равной расстоянию между катодом и пластинами, то $\eta = 95.3\%$ и $I_{ce}/I_a = 20$, а отнюдь не $\eta = 99.8\%$ и $I_{ce}/I_a = 500$, как в эксперименте.

Ключевым для понимания механизма высокоэффективной генерации ЭП в исследованном разряде является изучение траектории движения ионов в прикатодной области. Исследование поверхности катода показало, что ионному травлению подвергается не вся поверхность катода, заключенная между соседними пластинами, а только ее узкая центральная часть. Полная ширина l зоны травления значительно меньше расстояния h между пластинами и составляет $l \sim 0.5$ mm в использованной структуре. Так как наибольшему воздействию подвергается центральная часть, то эффективная ширина зоны еще меньше и равна $l_0 \sim 0.25$ mm. Это свидетельствует в пользу того, что ионный ток на большую часть открытой поверхности катода полностью подавлен.

Механизм подавления ионного тока, на наш взгляд, состоит в следующем. Так как экранированная часть катода, расположенная напротив пластин, освещается сбоку излучением из зоны между пластинами, а также из самого зазора, то эмитированные ускоренные электроны попадают на поверхность пластины и заряжают ее до потенциала, соответствующего действующему напряжению. В результате поле в промежутке катод–пластины резко ослабляется, и область высокого градиента потенциала, где ускоряются электроны, отодвигается от катода на расстояние $\sim \delta$. И только в центральной треугольной зоне шириной $\sim l$ и высотой $\sim \delta$ приложенное поле проникает в область катод–пластины, что порождает ток быстрых ионов на катод. Вне этой зоны ионы нейтрализуются в процессе амбиполярной диффузии, не переносящей ток. В результате ионный ток на катод уменьшается в пропорции $\sim 0.5l_0/h$.

Исходя из вышесказанного, формула (1) для ОР без анодной сетки должна быть записана в виде:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Theta \delta (dw/dx) 0.5l_0}{w_0 h}}. \quad (2)$$

Расчет по формуле (2) дает для $p_{\text{He}} = 8$ Torr и $U = 3$ kV $\eta = 99.8\%$, что совпадает с экспериментальной величиной.

Таким образом, показано что ОР без анодной сетки при токах (20...30) mA/cm² имеет эффективность генерации ЭП $\eta = 99.8\%$.

Предложен механизм, отвечающий за столь высокое значение η . Он основан на том, что фотоэлектроны, рожденные на катоде, в основном ускоряются не в прикатодной области, а на некотором расстоянии от нее, что блокирует попадание быстрых ионов на катод. В результате ионы нейтрализуются в основном в процессе амбиполярной диффузии, что практически полностью подавляет ионный ток на катод.

Список литературы

- [1] *Бохан П.А., Закревский Д.Э.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 2. С. 74–80.
- [2] *Rocca J.J., Meyer J.D., Farrell M.* et al. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. N 3. P. 790–797.
- [3] *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А.* и др. // Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [4] *Бохан П.А.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 6. P. 61–68.
- [5] *Arlantsev S.V., Borovich B.L., Buchanov V.V.* et al. // J. Russ. Las. Res. 1995. V. 16. N 2. P. 99–119.
- [6] *La Verne J.A., Mozumder A.* // J. Phys. Chem. 1985. V. 89. N 20. P. 4219–4225.