

НЕПРЕРЫВНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК В ОТКРЫТОМ РАЗРЯДЕ

А.Р.Сорокин

Институт физики полупроводников СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия
(Поступило в Редакцию 12 октября 1994 г.)

1. Электронно-лучевая технология, занимая видное место среди принципиально новых, является наиболее обширной и интенсивно развивающейся областью применения мощных нерелятивистских электронных пучков непрерывного действия (НЭП) [1]. Применение НЭП для возбуждения лазеров взамен традиционного тлеющего разряда позволило увеличить в ряде случаев их мощность и КПД на порядок [2]. Среди известных способов получения НЭП электронные пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) имеют повышенную надежность и позволяют сравнительно просто получать пучки сложного профиля [1].

Один из типов высоковольтного разряда, открытый разряд (ОР), был предложен в [3] в связи с разработкой новых источников накачки для импульсных лазеров. В [4] был отмечен факт существования и НЭП в ОР, а в [5] было положено начало детальным исследованиям непрерывного режима ОР, НЭР которого, в частности [5], использовались для травления монокристаллического кремния. Однако в [5] энергия электронов не превышала 1 кэВ, а мощность P была < 3 Вт/см².

Предлагаемая работа преследует две цели: привести результаты наших исследований непрерывного ОР при больших энергиях электронов и на два порядка большей P , чем в [5], а также определить место ОР среди других способов получения НЭП в самостоятельном ВТР. Последнее нам представляется целесообразным сделать, поскольку до сих пор в литературе идет дискуссия о том, к какому типу разряда следует отнести импульсный ОР [6-8], а приводимое ниже рассмотрение в равной мере относится как к непрерывному, так и к импульсному ОР и может помочь использовать результаты давних, хорошо известных исследований при оценке процессов, происходящих в ОР.

2. Самым близким к ОР по физическим процессам, протекающим в нем, является ВТР с полым анодом, наиболее перспективный в использовании для технологических целей [1,9] и для накачки непрерывных лазеров. В простейшем случае это разряд между плоскими катодом и анодом с отверстием. Размер d (рис. 1,а) выбирается так, чтобы параметр pd (p — давление газа в промежутке) соответствовал левой ветви кривой Пашена, когда электроны находятся в режиме непрерывного ускорения. В таком разряде легко сформировать ленточные НЭП практически неограниченной длины, которым можно придать и иную форму, следует лишь изменить профиль электронов [9]. НЭП в раз-

ряде с полым анодом использовались в [9] для плавки металлов при давлении аргона $p = 0.1$ Тор и P до 200 Вт/см².

Выполнение условия существования высоковольтного разряда $pd < (pd)_{\min}$ накладывает ограничение на ширину $\sim d$ пучка. Увеличить d можно лишь путем снижения давления. В гелии при 1 Тор d не превышает 1 см.

ОР — это разряд между сплошным катодом и сетчатым анодом (рис. 1, б). Формально это разряд с полым анодом, точнее, с множеством полых анодов, включенных параллельно. Роль анодов выполняют отдельные ячейки сетки. Здесь условие существования ВТР определяется геометрией отдельной ячейки. Уменьшая межэлектродное расстояние и взяв более мелкую сетку, можно существенно повысить давление и сформировать НЭП нужной геометрии с практически неограниченной апертурой, что значительно расширяет возможности практического использования ОР по сравнению с обычным разрядом в полном аноде.

Другое отличие от разряда с полым анодом — это возрастание в ОР роли фотоэмиссии с катода. Все авторы, занимавшиеся исследованием ОР как импульсного [4, 6–8], так и непрерывного [5], отмечают наблюдаемую в опытах значительную или определяющую роль фотоэмиссии с катода электронов, формирующих ЭП. Хотя известно [1], что в других типах ВТР фотоэмиссией пренебрегают и учитывают лишь эмиссию под действием бомбардировки катода ионами и быстрыми атомами.

В ОР (рис. 1, б) электроны e , покидая определенную ячейку сетки, продолжают за время их движения в дрейфовом пространстве возбуждать атомы A , которые после высвечивания фотонов ν вызывают фотоэмиссию не только на участке катода этой ячейки, но и на соседних участках, что и должно при достаточно больших размерах сетки и дрейфового пространства приводить к возрастанию фотоэмиссии на порядки. Ясно, что роль фотоэмиссии может быть значительной для обычного разряда с полым анодом, который является частным случаем ОР и в котором фотоподсветка катода обеспечивается не только фотонами, рожденными в самом разрядном промежутке, но и фотонами из дрейфового пространства. Таким образом, с точки зрения физических процессов, протекающих в ОР, это разряд с полым анодом, но со значительно большим значением фотоэмиссии.

3. В наших экспериментах использовалась сферическая конфигурация электронов с радиусом сферы катода $R = 50$ мм. Сетчатый электрод с $R = 49.3$ мм размещался на расстоянии $d = 0.7$ мм от по-

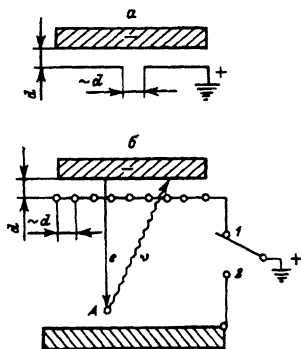


Рис. 1. Планарные конфигурации разрядного промежутка в ВТР с полым анодом (а) и в ОР (б).

верхности стального катода площадью 33 см². Коллектор из графита помещался в фокусе катода. Катод и коллектор охлаждались проточной водой. Применялись как обычная схема питания, так и трехэлектродная, предложенная ранее для импульсного ОР [10,11]. В последнем случае сетчатый электрод оставляется под свободным потенциалом, а напряжение подается на дополнительный электрод, в нашем случае коллектор (положение 2 переключателя на рис. 1, б). После электрического пробоя промежутка ток разряда переносится электронами пучка и поле между сеткой и дополнительным электродом практически отсутствует (рис. 2). Появление неоднородности разряда в промежутке катод-сетка приводит к перераспределению напряжения, которое сосредоточивается в области сетка-дополнительный электрод. Это ограничивает ток разряда и предохраняет катод от эрозии, а сетку от разрушения. В такой пушке при давлении гелия $p = 7$ Тор был получен НЭП мощностью до 1 кВт с энергией электронов в нем 6 кэВ и КПД 85%. Удельная мощность 30 Вт/см² ограничивалась началом интенсивного катодного распыления.

В планарной конструкции ($d = 3$ мм) с катодом из графита, который подвержен значительно меньшему катодному распылению, получен НЭП ~ 100 Вт/см² (рис. 2). Это все же меньше, чем значение $P \sim 200$ Вт/см², полученное в полом аноде [9]. Заметим, что приведенные выше значения P получены нами при приемлемом катодном распылении. В принципе мы получали значения P в несколько сот Вт/см². Поэтому можно считать, что у нас и в [9] удельные параметры НЭП примерно одинаковы, поскольку механизм, ограничивающий P , один и тот же. Существенное отличие в том, что в нашем случае можно работать при более высоком p и имеются большие возможности выбора апертуры НЭП.

Существует еще один путь увеличения P . Это применение составных катодов, изготовляемых методами порошковой металлургии, например из $Al_2O_3 + Mo$ или оксидных катодов [2]. В работе [2] получе-

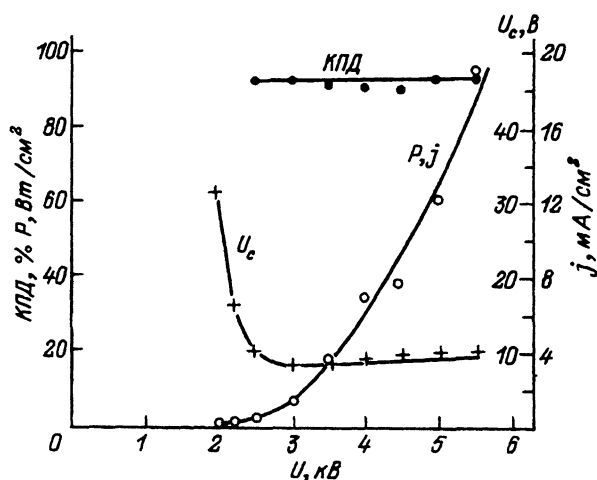


Рис. 2. Зависимости напряжения на сетке U_c при трехэлектродном питании, мощности P пучка, тока j пучка и КПД формирования НЭП от напряжения U , подаваемого на пушку. Катод из графита, давление гелия 2 Тор.

ны широкоапертурные НЭП диаметром до 70 мм при давлении гелия 2 Тор, но конструкция анода неясна. Нам представляется, что в [2] использовался разряд, подобный ОР.

4. Таким образом, в работе показано, что открытый разряд способен генерировать непрерывные электронные пучки с параметрами, пригодными для их использования в различных областях электронно-лучевой технологии. В отличие от известных способов открытый разряд позволяет формировать пучки заданной геометрии с практически неограниченной апертурой и при значительно больших давлениях.

Список литературы

- [1] *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурич Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [2] *Rossa J.J., Meyer J.D., Farrell M.R., Collins G.J.* // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 3. P. 790–797.
- [3] *Боган П.А., Колбычев Г.В.* // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 7. С. 418–421.
- [4] *Боган П.А., Сорокин А.Р.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 88–95.
- [5] *Ковалев А.С., Манкелевич Ю.А., Муратова Е.А. и др.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 18. С. 1076–1983.
- [6] *Колбычев Г.В., Пташник И.В.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 9. С. 104–111.
- [7] *Клименко К.А., Королев Ю.Д.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 9. С. 138–142.
- [8] *Боган П.А.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 6. С. 61–68.
- [9] *Izaacs* // Electron. Lett. 1968. Vol. 4. N 19. P. 405–406.
- [10] *Сорокин А.Р.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 8. С. 27–30.
- [11] *Сорокин А.Р.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 23. С. 92–94.

01.09
© 1995 г.

Журнал технической физики, т. 65, в. 5, 1995

ТЕОРИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ИМПЕДАНСНОГО ВИБРАТОРА

В.Л.Данильчук, С.И.Эминов

Новгородский государственный университет,
173033, Новгород, Россия
(Поступило в Редакцию 12 октября 1994 г.)

Импедансный вибратор изучался в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей. Однако проблема создания эффективных методов расчета остается актуальной. В данной работе проводится качественный анализ интегрального уравнения и на его основе строится эффективный алгоритм решения интегрального уравнения. Исходное уравнение импедансного вибратора имеет вид

$$E_z(j_z) + E_z^0 = Zj_z, \quad (1)$$

где Z — поверхностный импеданс; j_z — плотность тока, наведенного на поверхности вибратора первичным полем E_z^0 .