

волноводе диафрагм потери мощности в стенках волновода на порядок меньше, чем в диафрагмированном. Однако из-за того, что орбита электрона не проходит через максимум электрического поля, это не приводит к существенному увеличению шунтового сопротивления. Преимуществом ускорителя является возможность одновременного ускорения нескольких электронных пучков для увеличения суммарного тока электронов, так как в поперечном сечении волновода имеется несколько областей с ускоряющим направлением электрического поля. Количество пучков в ускорителе не должно превышать значения  $m$ -азимутальных вариаций поля.

Из-за высокой энергии инжекции в качестве инжектора можно использовать группирователь короткой длины на основе диафрагмированного волновода. Недостатком ускорителя является использование для ускорения электронов волны  $E_{mn}$  не основного типа. Это может приводить к возбуждению в волноводе паразитных типов волн. Однако для подавления низших и высших

типов волн можно использовать фильтры типов волн [5] или узкополосные высокочастотные фильтры, выполненные из отрезков волновода. Ускоритель на циклотронном резонансе может найти применение в медицине для получения материалов с новыми свойствами и в технологических процессах, где требуются пучки электронов с невысокой энергией частиц.

#### Литература

1. Коломенский А. А., Лебедев А. Н. // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. С. 261.
2. Протасевич Е. Т. // ПТЭ. 1994. № 1. С. 137.
3. Sloan M. L., Drummond W. E. // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 31. P. 1234.
4. Пашенцев В. Н. Способ ускорения заряженных частиц: А.с. 1135420. СССР; Б. открытия и изобретения № 30. 1985. С. 248.
5. Будурис Ж., Шеневье П. Цепи сверхвысоких частот. — М.: Сов. радио, 1979.

Статья поступила в редакцию 2 июня 2004 г.

## Cyclotron resonance electron linac

V. N. Pashentsev

Moscow Engineering Physics Institute (State University), Moscow, Russia

*Electron linear accelerator fed by  $TM_{m1}$  mode wave is described. Electrons are accelerated in a cylindrical waveguide placed inside a solenoid. The particles have spiral trajectories. Synchronism between the wave and the electrons is provided on cyclotron resonance. The magnetic field is increased with electron energy to provide the gyroresonant condition at full accelerator length. Parameters of the 10 MeV electron linac are presented.*

УДК 621.384.5

## Барьерный электрический озонатор как транспортер зарядов генератора Ван-де-Граафа

И. М. Кирко

Институт физических проблем технологии, г. Пермь, Россия

В. А. Кузнецов

Магнитогорский государственный университет, г. Магнитогорск, Россия

*Предложен и обосновывается способ использования струи озонированного в барьерном электрическом разряде газа в качестве транспортера зарядов для электростатического генератора Ван-де-Граафа [1].*

Экспериментально установлено [2], что озонированный в барьерном электрическом разряде газ является носителем отрицательного электричества. Особенно это ощутимо при турбулентном режиме течения газа через разрядный промежуток озонатора.

В работе ставилась задача выяснения причин и оценки величины электрического тока из озонатора.

Основным источником электронов в разрядный промежуток барьерного электрического озонатора является обусловленная высокой напряженностью электрического поля автоэлектронная эмиссия в него из металлического электрода.

Напряженность  $E$  электрического поля в разрядном промежутке озонатора изменяется в соответствии с фазами его периодической работы

(разряд горит или не горит). Когда разряд не горит,  $E$  во всех точках разрядного промежутка может быть вычислена как  $E = U/d$ , где  $U$  — приложенное напряжение,  $d$  — ширина разрядного промежутка. Эта формула годится при напряженности поля  $E < E_r$ , где  $E_r$  — напряженность пробоя газа. Подсчитанная по методике Фаулера-Нордгейма для таких напряженностей плотность тока автоэлектронной эмиссии ничтожно мала (при традиционных для озонаторов напряжениях порядка 10 кВ и ширине разрядного промежутка 3 мм). Но поскольку эксперимент показывает у озонированного газа наличие заряда, и формулы для описания автоэлектронной эмиссии считаются проверенными, то приходится предположить, что реально в разрядном промежутке озонатора у поверхности металлического электрода напряженность электрического поля в какие-то моменты времени значительно больше, чем  $E_r$ .

Когда загорается корона барьерного разряда, разрядный промежуток заполняется низкотемпературной плазмой, проводимость которой практически бесконечна. Падение же напряжения происходит в приэлектродных слоях Дебая (рис. 1), толщина  $L_D$  которых может быть оценена по формуле [3]

$$L_D = \sqrt{\varepsilon_0 k \frac{T}{e^2 n}},$$

- где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;
- $T$  — температура газа, К;
- $e$  — заряд электрона;
- $k$  — постоянная Больцмана;
- $n$  — количество молекул озона в 1 г/моль озонированного воздуха.

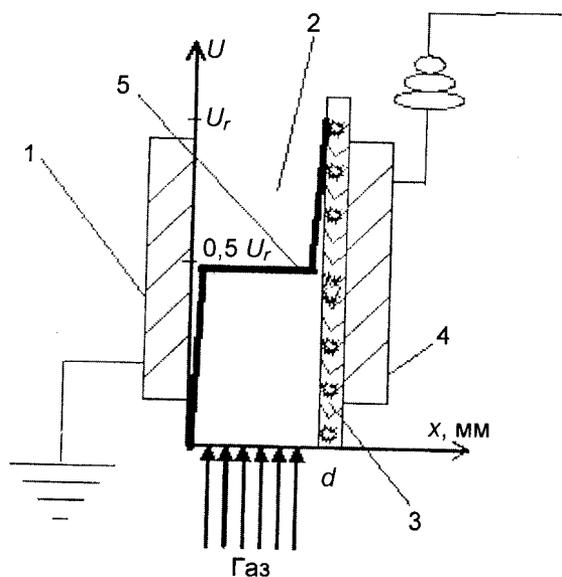


Рис. 1. Изменение потенциала в разрядном промежутке озонатора во время горения разряда:

1, 4 — металлические электроды; 2 — разрядный промежуток; 3 — диэлектрический барьер; 5 — изменение потенциала по толщине разрядного промежутка

При напряжении 10 кВ толщина слоя Дебая равна  $5 \cdot 10^{-7}$  м. При этом напряженность электрического поля в слое Дебая у металлического электрода получается равной примерно  $10^7$  кВ/м. При такой большой электрической напряженности поля в слое Дебая в то время, когда металлический электрод озонатора имеет отрицательный потенциал, автоэлектронная эмиссия будет главной причиной заряжения плазмы отрицательным электричеством. Причем утечка электронов на положительный электрод будет невозможна, так как он защищен стеклянным барьером.

Таким образом, наиболее вероятным источником отрицательного заряжения плазменного "тела" является слой Дебая или ему подобное образование двойного электрического слоя на поверхности металлического электрода озонатора при отрицательном на нем знаке приложенного переменного напряжения.

Так как неизвестны исследования о закономерностях автоэлектронной эмиссии в неравновесную плазму коронного разряда, то для оценки порядка величины плотности электрического тока эмиссии применяем методику Фаулера-Нордгейма. Возможно, применение этих закономерностей при дальнейших исследованиях оправдает себя, так как полученная выше толщина слоя Дебая соизмерима с длиной свободного пробега молекул, т. е. условия в нем для эмитируемых электронов можно сравнить с вакуумом.

Расчеты показывают, что плотность тока здесь составляет  $10^{18}$  А/м<sup>2</sup>. Такой большой ток не сохраняется в течение всего времени существования короны, так как приводит к практически мгновенному заряжению плазменного тела отрицательным зарядом и тем самым ликвидации слоя Дебая на металлической поверхности 1 и соответственному возрастанию этого слоя на поверхности стеклянного барьера 3 (см. рис. 1). Этот процесс происходит в самый начальный момент зажигания короны. Заряд же, который получит плазменное тело, может быть определен без расчета тока автоэлектронной эмиссии, а непосредственно как заряд слоя Дебая, т. е. как заряд конденсатора с первоначальным значением толщины слоя Дебая. Он же и отдаст затем свой заряд в плазму. Емкость такого конденсатора будет равна

$$C_{Deb} = \frac{\varepsilon_0 S}{L_D},$$

где  $S$  — площадь электродов озонатора.

Заряд слоя Дебая  $q_{Deb}$  находим по формуле

$$q_{Deb} = \frac{U_r C_{Deb}}{2}, \quad (1)$$

где  $U_r$  — напряжение горения разряда в данном разрядном промежутке.

Этот заряд уходит в плазму за одно зажигание разряда. В секунду таких порций заряда при частоте переменного тока 50 Гц будет 50. Выносятся же из разрядного промежутка будет только половина заряда. Таким образом, получается, что ток с газом из разрядного промежутка будет равен

$$I = \frac{V_{turb} q_{Deb}}{2L_{can}}, \quad (2)$$

где  $V_{turb}$  — скорость турбулентного потока газа;  
 $L_{can}$  — длина канала разрядного промежутка.

Расчеты по формулам (1) и (2) при скорости потока газа  $V_{turb} = 10$  м/с и площади электродов озонатора  $0,1$  м<sup>2</sup> и  $L_{can} = 1,5$  м дают плотность электрического заряда в разрядном промежутке его металлического электрода, равную  $6 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>, а ток из озонатора — 5,5 мА. Это существенный ток. Поэтому, действительно, барьерные электрические озонаторы с турбулентным режимом течения озонируемого газа можно использовать в качестве источников отрицательного электричества и в качестве транспортера зарядов в генератор статического электричества (генератор Ван-де-Граафа [1]), а также и для коагуляции аэрозольных положительно заряженных частиц в воздухе.

Предлагается следующая схема применения барьерного электрического озонатора в качестве источника ионов для высоковольтного генератора постоянного тока (рис. 2).

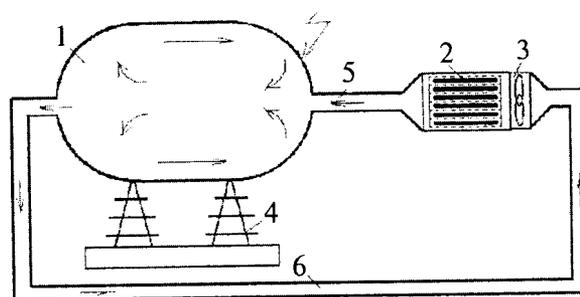


Рис. 2. Генератор Ван-де-Граафа с озонным источником ионов:

1 — заряжаемый корпус; 2 — озонатор; 3 — вентилятор высокого давления; 4 — изоляторы; 5, 6 — трубы из изоляционного материала

При геометрических размерах установки, соответствующих характерному радиусу корпуса 1,4 м, площади электродов озонатора  $0,1$  м<sup>2</sup>, толщине разрядного промежутка 3 мм, мощности вентилятора 14 кВт, обеспечивающей скорость течения газа 10 м/с, на корпусе (см. рис. 2) будет создан рабочий потенциал генератора постоянного тока в 2,5 МВ.

#### Литература

1. Ardenne M. Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Ultramikroskopie. — Berlin 11, 1956. — 544 S.
2. Кирко И. М., Кузнецов В. А. Ламинарный и турбулентный режим течения в плазме коронного разряда//Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Пермь 23—29 августа 2001 г.): Аннотации докладов. — Екатеринбург. УрОРАН, 2001. С. 322.
3. Физический энциклопедический словарь/ Под ред. А. М. Прохорова. — М: Сов. энциклопедия, 1984. — 944 с.

Статья поступила в редакцию 30 августа 2004 г.

## Barrier electrical ozone generator as the conveyor of charges of the Van-de-Graafs generator

I. M. Kirko

Perm State University, Perm, Russia

V. A. Kuznetsov

Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia

*The way of use is offered and proved of barrier electrical ozone generator as the conveyor of charges of the Van-de-Graafs generator.*