

в меньшей степени, и положение кроссовера луча. В итоге все эти изменения характеристик могут служить причиной долговременных изменений качества изображения кинескопа (яркости, четкости) на временном интервале порядка десятков минут с момента включения до момента установления теплового режима электродов эмиссионной системы.

Авторы выражают признательность профессору С. И. Молоковскому за ценные обсуждения и поддержку данной работы.

Литература

1. Kim K. W., Kim N. W. Analysis of shadow mask thermal deformation an prediction of beam landing shifts for color CRT/ IEE Transaction Consumer Electronics. 1998. V. 44. № 2. May.
2. Moss H. Narrow angle electron guns and cathode ray tubes. — N. Y., 1968.
3. Иосель Ю. И., Качанов Э. С., Струминский М. Г. Расчет электрической емкости. — М.: Энергия, 1969.
4. Гребер Г., Эрк С. Основы учения о теплообмене. — М.: ОНТИ, 1936.
5. Галант М. Б. и др. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов. — М.: Сов. радио, 1969.
6. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки. — М.: Наука, 1966.
7. Сегерленд Л. Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979.
8. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. — М.: Энергоатомиздат, 1992.

Статья поступила в редакцию 26 мая 2004 г.

The analysis of influence of thermal mode and thermoelastic displacements of electron gun electrodes on the current and electron-optical characteristics of electronic beam

A. S. Starkov, O. V. Pakhomov

Sant-Petersburg State University of Refrigeration, Sant-Petersburg, Russia

The article contains results of modeling of heat exchange by radiation and thermoelastic displacements for modulating electrode of electronic gun. Modeling was performed using the finite element method. Results of performed research show that a reason of long-term defocusing and changes of the image quality can be both the bend and thermal extension of electrodes. Calculation data of change of current characteristics of electronic beam during thermal deformation of modulating electrode is also given.

УДК 621.384.6

Линейный электронный ускоритель на основе циклотронного резонанса

В. Н. Пашенцев

Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва, Россия

Рассмотрен линейный электронный ускоритель, работающий на E_{m1} волне. Электроны ускоряются в цилиндрическом волноводе, помещенном в соленоид. Частицы движутся по спиральным траекториям. Синхронизм между бегущей волной и электронами осуществляется на циклотронном резонансе. Для выполнения условия гирорезонанса по всей длине ускорителя магнитное поле увеличивается с ростом энергии электронов. Приведены параметры линейного ускорителя на энергию электронов 10 МэВ.

Линейные электронные ускорители на низкие энергии в диапазоне 5—15 МэВ широко применяются для радиационной обработки медицинского инструмента и в технологических установках для изменения свойств различных полимер-

ных материалов. В линейных ускорителях используют структуры с диафрагмированными волноводами, работающие на бегущей волне, или бипериодические структуры со стоячей волной. В ускоряющих структурах происходит за-

медление волны, чтобы ее фазовая скорость не превышала скорости света. Ускорение электронов происходит электрическим полем замедленной волны, которая синхронно движется с частицами. Фокусировка частиц на начальном этапе ускорения осуществляется аксиальным магнитным полем.

Несмотря на то что конструкции электронных ускорителей и технология их изготовления достигли высокого уровня, представляют интерес ускоряющие системы, основанные на циклотронном резонансе. В 1962 г. предложен авторезонансный метод ускорения частиц в магнитном поле под действием электромагнитной волны, распространяющейся по направлению этого поля [1]. В работе [2] представлены экспериментальные результаты по ускорению электронов в прямоугольном волноводе волной типа H_{10} . Для ускорения ионов предложен авторезонансный метод коллективного ускорения [3] с помощью медленной циклотронной волны, генерируемой сильноточным электронным пучком. Эти методы ускорения основаны на получении медленной волны в результате доплеровского смещения частоты при вращении электронов в магнитном поле. Главными отличиями ускорителей на циклотронном резонансе от высокочастотных линейных ускорителей являются: отсутствие в ускоряющем волноводе замедляющей системы в виде диафрагм и обязательное присутствие магнитного поля во всей области ускорения. Ускорители на основе циклотронного резонанса имеют более простую конструкцию и меньшие потери высокочастотной мощности, так как ускорение частиц происходит в гладком волноводе полем медленной циклотронной волны.

К настоящему времени среди устройств, основанных на циклотронном резонансе, большое распространение получили не ускорители, а высокочастотные генераторы-мазеры, в которых электронный пучок генерирует мощную электромагнитную волну. Ниже рассматривается ускоритель [4] на циклотронном резонансе с цилиндрическим волноводом, работающий на волне E_{mn} с азимутальными вариациями ($m \neq 0$) продольного компонента электрического поля.

Конструкция ускорителя

Электронный ускоритель, показанный на рис. 1, состоит из инжектора 1 и цилиндрического волновода 2, помещенного в соленоид 3. Электронный инжектор находится вне магнитного поля соленоида. Ось волновода параллельна оси соленоида. Волновод возбуждают на волне E_{mn} с азимутальными вариациями поля. Пучок электронов инжектируют через отверстие в торцевой стенке, которое смещено от оси волновода. Под действием магнитного поля соленоида электроны движутся по спиральным тра-

екториям и имеют поперечную и продольную составляющие скорости. Для другой конфигурации ускорителя, когда инжектор электронов находится внутри соленоида (в магнитном поле), инжекция частиц должна происходить под углом к оси волновода, чтобы частица имела кроме продольной и поперечную составляющую скорости к направлению магнитного поля.

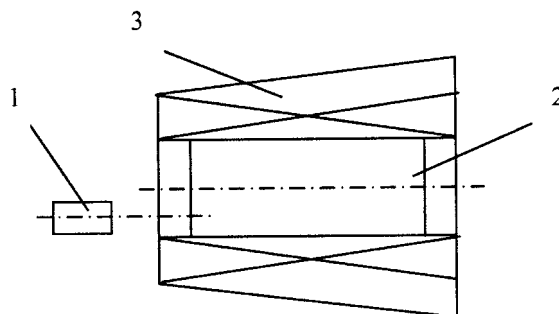


Рис. 1. Ускоритель на основе циклотронного резонанса

Процесс ускорения выглядит следующим образом: электроны движутся по спирали одновременно с перемещением волны вдоль оси волновода. Электроны ускоряются продольным компонентом электрического поля волны. На рис. 2 показано распределение продольного компонента E_z в разных сечениях волновода и перемещение электронов. За полупериод высокочастотного поля происходит поворот электронов в магнитном поле синхронно с аксиальным движением волны.

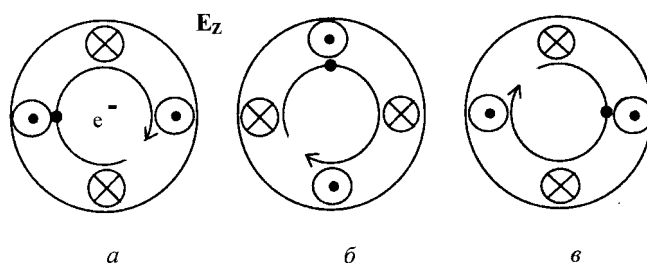


Рис. 2. Положение электрона в трех сечениях волновода при циклотронном резонансе на волне E_{12} в моменты времени: а - t ; б - $t+T/2$; в - $t+T$ (T - период высокочастотного поля); \odot , \otimes - направления E_z компоненты волны

Частота обращения частиц выбрана такой, что они, двигаясь по окружности, выходят из области, в которой ускоряющее направление поля изменяется на тормозящее. Смена направления поля происходит из-за быстрого движения волны по волноводу относительно частиц. Далее поворачивая по окружности, они входят в область, где направление продольного компонента электрического поля становится ускоряющим. Таким образом, синхронизм между волной и частицами осуществляется в поперечном сечении на циклотронном резонансе, а ускорение — в аксиальном направлении аксиальным компонентом электрического поля волны. Однако с ростом энергии частиц циклотронная частота

электронов в магнитном поле будет уменьшаться. Чтобы поддерживать циклотронную частоту постоянной, значение магнитного поля увеличивают в аксиальном направлении путем увеличения плотности витков соленоида.

Условие резонанса

Если в волноводе с бегущей высокочастотной волной в направлении распространения волны будут двигаться электроны по винтовым траекториям, то на их движение будет влиять замедленная циклотронная волна. Фазовая скорость циклотронной волны равна

$$\beta_z = \beta_{ph} \left(1 - \frac{m\Omega}{\omega} \right),$$

где β_z — относительная аксиальная скорость циклотронной волны;

β_{ph} — относительная фазовая скорость волны в волноводе ($\beta_{ph} = 1/\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}$;

λ — длина волны;

λ_c — критическая длина волны в волноводе);

Ω — циклотронная частота электрона;

m — число азимутальных вариаций поля волны E_{mn} ;

ω — круговая частота высокочастотного поля.

Изменением циклотронной частоты электронов можно получить замедленную циклотронную волну, двигающуюся по волноводу со скоростью, меньшей скорости света. В рассматриваемом ускорителе циклотронная волна используется для ускорения электронов в гладком волноводе, помещенном в магнитное поле.

Для расчета параметров ускорителя будем предполагать, что электроны ускоряются только в аксиальном направлении продольным компонентом электрического поля E_z , радиальная составляющая скорости электронов β_r равна нулю, азимутальная составляющая скорости электронов β_ϕ не изменяется в процессе ускорения. Циклотронная частота Ω и радиус орбиты r_e электронов являются постоянными.

При резонансном ускорении частиц скорость циклотронной волны поддерживается равной аксиальной скорости электронов

$$\beta_{ph} \left(1 - \frac{m\Omega}{\omega} \right) = \sqrt{1 - \beta_\phi^2 - \left(\frac{W_0}{W} \right)^2},$$

где W_0 — энергия покоя электрона;

W — полная энергия электрона.

Условие резонанса выполняется, когда зависимость магнитного поля в аксиальном направлении имеет вид

$$B = \frac{\omega W}{ec^2 m} \left(1 - \frac{1}{\beta_{ph}} \sqrt{1 - \beta_\phi^2 - \left(\frac{W_0}{W} \right)^2} \right),$$

где B — индукция магнитного поля соленоида;

e — заряд электрона;

c — скорость света.

Для релятивистских частиц величина магнитного поля пропорциональна их энергии (рис. 3). Увеличение магнитного поля необходимо для удержания электронов на постоянной орбите при возрастании энергии частиц.

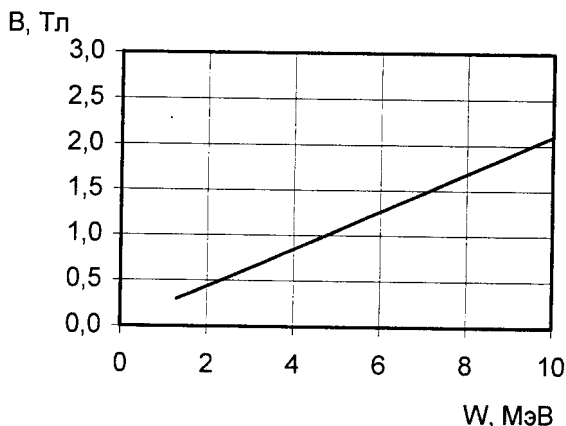


Рис. 3. Зависимость индукции магнитного поля соленоида от энергии электронов (волна E_{12} , $\lambda = 3$ см, $\beta_{ph} = 1,9$, $\beta_\phi = 0,65$)

Среди циклических типов ускорителей аналогом этого ускорителя является изохронный циклотрон, в котором также постоянна частота обращения ионов из-за роста магнитного поля в радиальном направлении. Отличие состоит в том, что в циклическом ускорителе радиус орбиты частиц увеличивается из-за увеличения азимутальной скорости вращения частиц в процессе их ускорения. В рассматриваемом ускорителе радиус орбиты неизменный. Ускорение происходит в направлении, которое перпендикулярно орбитальному вращению электронов. В обоих ускорителях траектории частиц имеют вид спирали: в изохронном циклотроне — плоская спираль, в рассматриваемом ускорителе — винтовая спираль.

Траектории электронов в неоднородном магнитном поле ускорителя

Траектории электронов в магнитном поле являются важным элементом в рассмотрении работы ускорителя, так как от них зависит синхронное движение частиц с бегущей волной. Радиус орбиты электронов сильно влияет на прирост энергии частиц и энергетический разброс пучка на выходе ускорителя, так как волна имеет неоднородное распределение полей в поперечном сечении волновода. Получение аналитического решения уравнений движения электронов сопряжено с большими трудностями из-за учета неоднородного магнитного поля, всех электрических и магнитных компонентов бегущей электромагнитной волны, а также собственных полей пучка, вызванных пространственным зарядом и током электронного пучка. Расчеты могут быть выполнены с использовани-

ем программ для расчета динамики электронов в ускоряющих структурах линейных ускорителей. Для упрощенного анализа траекторий частиц в ускорителе рассмотрим движение частиц в более простых конфигурациях магнитных и электрических полей: вначале — траектории частиц в однородном и неоднородном магнитных полях в отсутствие электрического поля; затем в тех же магнитных полях — ускорение частиц постоянным электрическим полем, полагая, что электрическое поле циклотронной волны, движущейся со скоростью частиц, будет создавать такое же воздействие, как и постоянное электрическое поле. Будем считать, что инжектор электронов находится в магнитном поле соленоида под углом к силовым линиям. Электроны имеют азимутальную β_ϕ и аксиальную β_z компоненты скорости.

Известно, что в постоянном магнитном поле электроны двигаются по винтовой траектории с постоянной ларморовской частотой и радиусом. Если магнитное поле увеличивается в аксиальном направлении, то радиальная составляющая магнитного поля создает силу Лоренца, выталкивающую вращающийся электрон из области более сильного магнитного поля. В соответствии с теоремой Буша электрон будет двигаться по винтовой траектории, радиус которой будет постепенно уменьшаться в направлении более сильного магнитного поля при сохранении магнитного потока внутри ларморовской орбиты электрона.

Теперь рассмотрим ускорение электрона постоянным аксиальным электрическим полем в тех же самых магнитных полях. В электрическом поле будут увеличиваться аксиальная скорость, а также масса частицы

$$M = \gamma M_0,$$

где γ — релятивистский фактор;

M_0 — масса покоя электрона.

В постоянном магнитном поле шаг спирали вдоль оси соленоида будет постепенно увеличиваться, пока электроны имеют нерелятивистские скорости. У релятивистских электронов аксиальное приращение скорости β_z становится малым, так как $\beta_\phi^2 + \beta_z^2 \approx 1$. Поэтому шаг спирали будет увеличиваться очень медленно. Циклотронная частота $\Omega = eV/\gamma M_0$ уменьшается, а радиус вращения электронов увеличивается, так как при постоянной азимутальной скорости увеличивается масса частицы, пропорционально релятивистскому γ -фактору. Траектория электронов имеет вид спирали, радиус которой постепенно увеличивается. Следовательно, чтобы частота вращения релятивистских электронов оставалась неизменной, магнитное поле должно увеличиваться пропорционально релятивистскому фактору (энергии частиц). При этом электроны будут двигаться по спиральной траектории с одинаковым радиусом и небольшим изменением шага спирали, так как по-прежнему

приращение скорости релятивистской частицы является небольшим. Поэтому в рассматриваемом ускорителе магнитное поле соленоида увеличивается в направлении движения волны, чтобы частота вращения частиц была равна частоте высокочастотного поля для выполнения условия синхронизма. В этом упрощенном описании азимутальное и аксиальное движения электронов рассматривались независимо. Очевидно, что для расчета траекторий частиц требуется учет всех внешних полей и собственных полей электронного пучка.

Основные параметры электронного ускорителя

Рассчитаем характеристики линейного ускорителя на основе циклотронного резонанса на низкую энергию электронов. Так как расчеты являются оценочными, то выбор значений параметров ускорителя будет не всегда оптимальным.

Электронный пучок ускоряется в круглом волноводе полем бегущей волной с азимутальными вариациями поля E_{m1} . В радиальном направлении вариации поля отсутствуют ($n = 1$). Продольный компонент электрического поля имеет вид

$$E_z = E_0 J_m \left(\frac{v_{m1} r}{R} \right) \cos m\phi \exp \left[i (\omega t - k_z z) \right],$$

где E_0 — амплитуда электрического поля;

J_m — функция Бесселя;

v_{m1} — корень функции Бесселя;

R — радиус волновода;

k_z — проекция волнового числа.

Полную энергию инжекции электронов W_i , радиус электронной орбиты r_e и радиус волновода R рассчитываются из условия циклотронного резонанса

$$\beta_z = \beta_{ph} \left(1 - \frac{m\beta_\phi \lambda}{2\pi r_e} \right),$$

здесь β_z — скорость электронов, равная скорости циклотронной волны.

Относительная фазовая скорость волны β_{ph} в гладком волноводе больше единицы, поэтому выражение в скобках будет влиять на скорость инжекции электронов в волновод. Радиус орбиты и число азимутальных вариаций поля m не могут быть выбраны произвольными из-за неоднородного радиального распределения электрического поля в круглом волноводе. Для получения меньшей скорости инжекции необходимо выбрать маленький радиус орбиты электронов и большое значение m , однако это снизит напряженность ускоряющего поля. При увеличении m максимум напряженности электрического поля будет смещаться к стенкам волновода, что приведет к уменьшению поля на орбите электрона. И соответственно, снижение радиуса орбиты также уменьшает темп ускорения, так как у вол-

ны с $m \neq 0$ электрическое поле к центру волновода снижается до нуля. Оценки показывают, что больше всего для этого ускорителя подходят инжекция электронов с азимутальной составляющей скорости $\beta_\phi \sim 0,6-0,7$ и небольшие значения m . Длина волны λ будет определять поперечный размер волновода. Для уменьшения габаритов ускорителя выберем значения длин волн в сантиметровом диапазоне.

Оценим параметры ускорителя, работающего на волне типа E_{21} . Длина волны в волноводе близка к критической ($\lambda/\lambda_c = 0,85$) для получения небольшой групповой скорости волны. Выберем азимутальный компонент скорости электронов $\beta_\phi = 0,65$ и $\lambda = 3$ см. Затем рассчитываем относительную фазовую скорость волны $\beta_{ph} = 1,9$ и радиус волновода $R = \lambda_c v_{m1}/2\pi$, ($v_{21} = 5,14$). Выберем большое значение продольной скорости инжекции $\beta_z = 0,65$, чтобы не уменьшать радиус вращения электрона для получения более высокой напряженности электрического поля волны. Тогда радиус вращения электронов равен $r_e = 9,4$ мм и энергия инжекции электронов U_i составляет 0,79 МэВ. Ускоритель имеет высокую энергию инжекции по сравнению с традиционными линейными высокочастотными ускорителями на бегущей или стоячей волне, в которых она составляет 12-60 кэВ. Индукция магнитного поля, при которой электронный пучок инжектируется в волновод, равна

$$B_i = \frac{2\pi W_i}{\lambda t e c} \left(1 - \frac{\beta_z}{\beta_{ph}} \right).$$

Шунтовое сопротивление ускоряющей структуры

Для оценки эффективности работы ускорителя рассчитаем его энергетические характеристики: затухание высокочастотной мощности в стенках волновода, амплитуду электрического поля, шунтовое сопротивление и длину ускорителя. Коэффициент затухания высокочастотной мощности равен

$$\alpha = \frac{R_s \beta_{ph}}{R Z_c},$$

где Z_c — характеристическое сопротивление 377 Ом;

$R_s = \sqrt{\pi \mu_0 c / \sigma \lambda}$ — поверхностное сопротивление;

μ_0 — магнитная постоянная;

σ — проводимость медной стенки волновода.

Амплитуда напряженности электрического поля

$$E_0 = \frac{2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)}{R |J'_m(v_{mn})|} \sqrt{\frac{Z_c P \beta_{ph}}{\pi}},$$

где J'_m — производная функции Бесселя;

P — мощность высокочастотной волны.

Так как траектории электронов не проходят через максимумы электрического поля, то напряженность ускоряющего поля на орбите E_e меньше E_0

$$E_e = E_0 J_m \left(\frac{v_{mn} r_e}{R} \right).$$

Шунтовое сопротивление $R_{sh} = E_e^2 / 2\alpha P$ ускоряющей системы равно

$$R_{sh} = \frac{2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 Z_c^2 \sqrt{\sigma \lambda} \left(J_m \left(\frac{v_{mn} r_e}{R} \right) \right)^2}{\pi \sqrt{\pi \mu_0 c} R \left(J'_m(v_{mn}) \right)^2}.$$

Длина ускорителя оценивается значением $L = (U - U_i) / E_e$, где U — выходная энергия электронов. В таблице приведены сравнительные характеристики ускорителей с условными названиями У1-У4 на энергию 10 МэВ при уровне высокочастотной мощности 10 МВт. Энергия инжекции равна 790 кэВ, две составляющие скорости инжекции электронов равны $\beta_\phi = \beta_z = 0,65$.

Параметры ускорителей на основе циклотронного резонанса

Наименование	Ускорители электронов			
	У1	У2	У3	У4
Тип волны E_{mn}	E_{21}	E_{21}	E_{41}	E_{41}
Длина волны λ , см	3	3	3	1
Фазовая скорость волны β_{ph}	1,9	3,2	3,2	3,2
Радиус волновода R , см	2,89	2,58	3,82	1,27
Радиус орбиты электронов r_e , мм	9,4	7,8	15,6	5,2
Индукция магнитного поля B_i при инжекции, Тл	0,3	0,36	0,18	0,54
Индукция магнитного поля на выходе ускорителя, Тл	2,2	2,8	1,4	4,2
Коэффициент затухания СВЧ-мощности α , 1/м	$4,5 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-3}$	$5,8 \times 10^{-3}$	3×10^{-2}
Напряженность ускоряющего поля E_e , кВ/см	23	33	17	52
Шунтовое сопротивление R_{sh} , МОм/м	57	63	26	46
Длина ускорителя L , м	4	2,8	5,3	1,8

Заключение

Преимущество предложенной ускоряющей системы по сравнению с ускорителями с дифрагмированным волноводом состоит в простоте конструкции. При изготовлении ускорителя не требуется сложная высокочастотная настройка на рабочую частоту ускоряющего волновода с большим количеством ячеек, так как рассматриваемая ускоряющая система может быть выполнена в виде отрезка гладкого волновода круглого или прямоугольного сечения. Из-за отсутствия в

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