

01;09;10;12

## Виркатор с предмодуляцией электронного пучка на основе сильноточного импульсно-периодического ускорителя

© С.А. Кицанов, А.И. Климов, С.Д. Коровин, И.К. Куркан,  
И.В. Пегель, С.Д. Полевин

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: pegel@lfe.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 23 мая 2001 г. В окончательной редакции 28 сентября 2001 г.)

Проведены теоретические, численные и экспериментальные исследования виркатора с предмодуляцией электронного пучка дециметрового диапазона длин волн. Дан анализ возможных механизмов возбуждения генерации в системах с виртуальным катодом (модуляция проходящего тока, эффект отражательного клистрона, инерционная группировка отраженных частиц). Показано, что при использовании в виркаторе двухззорной электродинамической системы эффективность генерации может быть значительно выше, чем для одноззорной системы. На основе результатов численного эксперимента разработан экспериментальный макет двухсекционного виркатора без внешнего магнитного поля. В экспериментах с использованием сильноточного импульсно-периодического электронного ускорителя в дециметровом диапазоне длин волн была получена одномодовая генерация с мощностью до 1 GW и длительностью  $\sim 25$  ps при эффективности генерации  $\sim 5\%$ . Продемонстрирована стабильность частоты генерации в течение импульса и от импульса к импульсу, что доказывает определяющее влияние электродинамической системы. За счет варьирования параметров резонатора удалось реализовать непрерывную перестройку частоты генерации виркатора в полосе  $\sim 15\%$  на половинном уровне мощности.

### Введение

Виркаторы [1–6] привлекают к себе внимание прежде всего как источники мощного микроволнового излучения, способные работать без внешнего магнитного поля. С другой стороны, ввиду того, что длина области взаимодействия потока частиц и высокочастотного (ВЧ) поля в виркаторах сравнима с длиной волны излучения, эти приборы оказываются относительно компактными, что является немаловажным при генерации излучения в длинноволновой части СВЧ диапазона. К недостаткам виркаторов можно отнести полученную в большинстве экспериментов низкую эффективность ( $\sim 1\%$ ) и нестабильность частоты излучения. В проведенных экспериментах это чаще всего обусловлено большим значением инжектируемого тока и использованием сверхразмерных электродинамических систем с большой плотностью электромагнитных колебаний. В данной работе представлены результаты исследования виркатора, основанного на формировании виртуального катода (ВК) в двухсекционном одномодовом резонаторе, при инжекции электронного пучка с небольшим уровнем надкритичности тока [7,8].

### Механизмы генерации излучения

В качестве модели виркатора рассмотрим плоский зазор длиной  $L$ , в который инжектируется электронный пучок с энергией частиц  $\varepsilon_{in} = mc^2(\gamma_{in} - 1)$  и плотностью тока  $j_{in} > j_{cr2}$ , где  $j_{cr2}$  — второй критический ток. В этом случае в системе возможно стационарное

двухпоточное состояние электронного пучка с образованием ВК [9]. Величина прошедшего тока  $j_{out}$  и местоположение ВК  $z_0$  определяются соотношениями

$$\frac{1}{j_{out}^{1/2}} + \frac{1}{(2j_{in} - j_{out})^{1/2}} = \frac{2}{j_{cr}^{1/2}},$$

$$z_0/L = 1 - (j_{cr1}/4j_{out})^{1/2},$$

где  $j_{cr1} \approx j_{cr2}/2$  — первый критический ток.

Вероятность того, что частица пересечет зазор,  $W_{tr} = j_{out}/j_{in}$ . Величина  $W_{tr}$  зависит от превышения инжектируемого тока над критическим. Если  $j_{in} \approx j_{cr2}$ , то  $W_{tr} \approx 1/4$ ,  $z_0 \approx L/3$ .

Пусть для простоты плоский зазор является элементом одномодового резонатора с добротностью  $Q \gg 1$ , так что распределение ВЧ поля в нем является фиксированным. Будем считать, что амплитуда поля мала. Изменение полной энергии частиц за время пролета через зазор  $eEL \ll \varepsilon_{in}$ . Кроме того, будем предполагать, что движение частиц является одномерным, а частицы, отраженные от ВК, не возвращаются в область взаимодействия с ВЧ полем.

Наличие ВЧ поля приводит к тому, что полная энергия частиц в зазоре становится функцией времени. Очевидно, что модуляция частиц по энергии приводит к модуляции прошедшего тока, тока отраженных электронов, а также положения самого ВК. Работа поля с частотой  $\omega$  над потоком частиц может быть представлена в виде

$$P_{\Delta j} \approx \frac{j_{in} S_b}{2e} \operatorname{Re} \left\{ \langle \Delta \tilde{W}_{tr}^* (\Delta \tilde{\varepsilon}_{tr} - \Delta \tilde{\varepsilon}_{ref}) \rangle_{Q_0} \right\},$$

где  $\Delta \tilde{\varepsilon}_{tr} = \Delta \tilde{\varepsilon}(L)$  — изменение энергии пролетных частиц в ВЧ поле;  $\Delta \tilde{\varepsilon}_{ref} = (1 - e^{i\Theta_{z_0}}) \Delta \tilde{\varepsilon}(z_0)$  — изменение

энергии частиц, отраженных от ВК;

$$\Delta\tilde{\varepsilon}(z) = e^{i\Theta_0} \int_0^z eE e^{i\Theta} dz; \quad \Theta(z) = \int_0^z \frac{\omega}{V(z')} dz';$$

$V(z)$  — невозмущенная скорость частиц;  $S_b$  — сечение пучка,  $\Theta_0$  — фаза влета частицы в область взаимодействия с ВЧ полем.

Полагая, что  $\omega < \omega_{vc}$ , где  $\omega_{vc}$  — собственная частота колебаний ВК, вероятность прохождения частицы через ВК с помощью стационарного решения можно оценить как

$$\Delta\tilde{W}_{tr} \approx \frac{1}{j_{in}} \frac{j_{out}}{j_{cr1}} \frac{\partial j_{cr1}}{\partial \gamma} \frac{L}{z_0} \frac{\Delta\varepsilon(z_0)}{mc^2}.$$

При однородном распределении ВЧ поля в зазоре линейный КПД взаимодействия можно представить в виде

$$\eta_{\Delta j} \approx \frac{1}{2} \frac{j_{out}}{j_{in} j_{cr1}} \frac{\partial j_{cr1}}{\partial \gamma} \frac{|eEL/mc^2|^2}{(\gamma_{in} - 1)} \Phi_{\Delta j},$$

где

$$\Phi_{\Delta j} = \text{Re} \left\{ f(L) f^*(z_0) - \frac{z_0}{L} (1 - e^{i\Theta_0}) |f(z_0)|^2 \right\},$$

$$f(z) = \frac{1}{z} \int_0^z e^{i\Theta} dz.$$

При малых углах пролета  $\Phi_{\Delta j} \approx 1$  и, таким образом, излучение отсутствует, что связано с поглощением энергии пролетными частицами, поскольку плотность тока ускоренных ВЧ полем пролетных частиц выше, чем плотность тока замедленных. При конечных углах пролета, если инжектируемый ток  $j_{in} \gg j_{cr2}$ , плоскость поворота частиц приближается к плоскости инжекции пучка. В этом случае, как и в предыдущем, отраженные частицы практически не участвуют во взаимодействии. При этих условиях  $\Phi_{\Delta j} \approx \text{Re}\{f(L)\}$ . Например, для  $\Theta(z) \approx \omega z / \bar{V}$  функция угла пролета  $\Phi_{\Delta j} \approx (\sin \Theta_L) / \Theta_L$ , где  $\Theta_L = \Theta(L)$ . Таким образом, при больших значениях инжектируемого тока излучение возможно при  $\pi < \Theta_L < 2\pi$ . Основной вклад в отрицательный энергообмен с ВЧ полем вносят пролетные частицы. Отсюда, в частности, следует вывод о возможности возбуждения колебаний в планарном вакуумном диоде. Функция угла пролета для  $j_{in} \approx j_{cr2}$  при  $\Theta(z) \approx \omega z / \bar{V}$  показана на рис. 1. Высокочастотная проводимость зазора в этом случае становится отрицательной при  $\Theta_L > \pi$  имеет минимальное значение при  $\Theta_L \approx 2\pi$ .

Другим механизмом, который может приводить к возбуждению колебаний в виркаторе, является инерционная группировка частиц под действием ВЧ поля. Для пролетных частиц это возможно за счет монотронного эффекта; отраженные частицы могут передавать энергию ВЧ колебаниям и при меньших углах пролета,  $0 < \Theta_L < 2.5\pi$ . Учитывая вклад как пролетных, так и

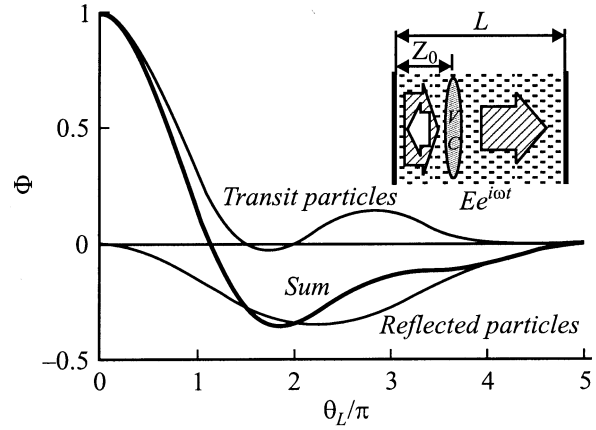


Рис. 1. Функции пролетного угла для однозазорного виркатора.

отраженных частиц при возбуждении колебаний, можно показать, что при  $L \approx \beta\lambda$  или  $\Theta_L \approx \pi$

$$\frac{\langle \Delta\varepsilon / \varepsilon_{in} \rangle_{\Theta_0, \Delta V}}{\langle \Delta\varepsilon / \varepsilon_{in} \rangle_{\Theta_0, \Delta j}} \approx \frac{\frac{1}{\beta_0} \frac{\partial \beta}{\partial \gamma}}{\frac{1}{j_{cr1}} \frac{\partial j_{cr1}}{\partial \gamma}} \approx \begin{cases} \frac{1}{(\gamma_0 - 1)^{1/2}} \gg 1 & \text{при } (\gamma_0 - 1) \ll -1, \\ \frac{1}{\gamma_0^2} \ll 1 & \text{при } \gamma_0 \gg 1. \end{cases}$$

Отсюда следует, что при нерелятивистской начальной энергии электронов возбуждение колебаний в однозазорном виркаторе возможно вследствие инерционной группировки частиц. При небольших углах пролета ( $\Theta_L < 2.5\pi$ ) основной вклад в энергообмен вносят частицы, отраженные от ВК. При релятивистских энергиях, когда скорость частиц за счет взаимодействия с ВЧ полем изменяется мало, возбуждение колебаний может происходить за счет модуляции тока, происходящей вследствие осциллирующей потенциала ВК. При  $j_{in} \approx j_{cr2}$  за возбуждение колебаний в широком диапазоне углов пролета ответственны отраженные частицы. В случае, когда  $j_{in} \gg j_{cr2}$ , излучение возможно за счет пролетных частиц. Использование модуляции тока в ВЧ поле для возбуждения колебаний возможно и в нерелятивистской области энергий электронов без образования ВК. Примером этому может служить генератор Баркгаузена–Курца [10], в котором пролетные частицы, ускоренные ВЧ полем, поглощаются электродом, находящимся под потенциалом катода, а замедленные ВЧ полем частицы совершают осцилляции в потенциальной яме около сетки с нулевым потенциалом.

Пусть теперь виркатор состоит из двух зазоров с длиной соответственно  $L_1$  и  $L_2$ . Пусть  $L_1 \ll L_2$ , так что ВК существует только во втором зазоре. Будем считать, как и в предыдущем случае, что зазоры являются элементами высокочастотного резонатора, в котором

могут существовать ВЧ поля с амплитудами  $E_1$  и  $E_2$ . Высокочастотное поле во втором зазоре имеет сдвиг фазы  $\Delta\varphi$  относительно первого зазора. Предполагается, что изменение скорости частиц под действием ВЧ поля несущественно. Рассмотрим задачу в приближении малых углов пролета. Тогда, если частица пересекает оба зазора, изменение ее энергии под действием ВЧ поля есть

$$\Delta\tilde{\epsilon}_{\text{tr}} \approx \Delta\tilde{\epsilon}_1 + \Delta\tilde{\epsilon}_2 \approx e^{i\Theta_0}(eE_1L_1 + eE_2L_2e^{i\Delta\varphi}).$$

Изменение энергии отраженных частиц в этом приближении мало по сравнению с изменением энергии пролетных частиц  $\Delta\epsilon_{\text{ref}} \ll \Delta\epsilon_{\text{tr}}$ . Вероятность пролета частицы через второй зазор зависит не только от изменения ее энергии в области ВК, но и от энергии на выходе из первого, модулирующего, зазора. Из решения стационарной задачи следует, что

$$\Delta\tilde{W}_{\text{tr}} \approx \frac{j_{\text{out}}^0}{j_{\text{in}}j_{\text{cr1}}^0} \frac{\partial j_{\text{cr1}}^0}{\partial\gamma} \frac{2(j_{\text{out}}^0/j_{\text{cr1}}^0)^{1/2}\Delta\tilde{\epsilon}_1 + \Delta\tilde{\epsilon}_2}{mc^2}.$$

Тогда

$$P_{\Delta j} \approx \frac{S_b}{2e} \frac{j_{\text{out}}^0}{j_{\text{cr1}}^0} \frac{\partial j_{\text{cr1}}^0}{\partial\gamma} \frac{|eE_1L_1|^2}{mc^2} \Phi_{\Delta j}(\alpha, \Delta\varphi),$$

где  $\Phi_{\Delta j}(\alpha, \Delta\varphi) = 2\sqrt{j_{\text{out}}^0/j_{\text{cr1}}^0} + \alpha(1 + 2\sqrt{j_{\text{out}}^0/j_{\text{cr1}}^0}) \times \cos\Delta\varphi + \alpha^2$ ,  $\alpha = E_2L_2/E_1L_1$ .

Функция  $\Phi_{\Delta j}(\alpha, \Delta\varphi)$  принимает отрицательные значения при  $1 < \alpha < 2\sqrt{j_{\text{out}}^0/j_{\text{cr1}}^0}$  и  $\Delta\varphi = \pi$ . Ее минимальное значение  $\Phi_{\Delta j}^{\text{min}}(\alpha, \Delta\varphi) = -(1 - 2\sqrt{j_{\text{out}}^0/j_{\text{cr1}}^0})^2/4$  достигается при  $\alpha \approx (1 + 2\sqrt{j_{\text{out}}^0/j_{\text{cr1}}^0})/2$ . Таким образом, в системе двух зазоров возбуждение колебаний возможно и при малых углах пролета. В энергообмене в этом приближении участвуют пролетные частицы. Для излучения необходимо, чтобы изменение энергии частицы во втором зазоре было больше, чем в первом. При противофазных полях в первом и втором зазорах это обеспечивает передачу энергии от потока частиц электромагнитному полю. В этом случае первый зазор играет роль модулятора электронного потока. С ростом величины инжектируемого тока линейный КПД взаимодействия падает,  $\Phi_{\Delta j}^{\text{min}} \rightarrow 0$  при  $j_{\text{out}}^0 \rightarrow j_{\text{cr1}}^0/4$ .

Учет конечного значения угла пролета достаточно просто провести для  $\alpha \ll 1$ . В этом случае можно пренебречь изменением энергии частиц за счет взаимодействия с ВЧ полем в зазоре с ВК. Если, кроме этого,  $L_1\omega/\bar{V} \ll \pi$ , то

$$\Delta\tilde{\epsilon}_{\text{tr}} \approx eE_1L_1e^{i\Theta_0}, \quad \Delta\tilde{\epsilon}_{\text{ref}} \approx eE_1L_1e^{i\Theta_0}(1 - e^{i2\Theta_{z0}}).$$

Вероятность прохождения через ВК в данном случае определяется ее энергией на выходе из первого, модулирующего, зазора

$$\Delta\tilde{W}_{\text{tr}} \approx \frac{j_{\text{out}}^0}{j_{\text{in}}j_{\text{cr1}}^0} \frac{\partial j_{\text{cr1}}^0}{\partial\gamma} \frac{2\Delta\tilde{\epsilon}_{\text{tr}}(j_{\text{out}}^0/j_{\text{cr1}}^0)^{1/2}}{mc^2}.$$

Таким образом,

$$P_{\Delta j} \approx \frac{S_b}{e} \left( \frac{j_{\text{out}}^0}{j_{\text{cr1}}^0} \right)^{3/2} \frac{\partial j_{\text{cr1}}^0}{\partial\gamma} \frac{1}{mc^2} \text{Re} \left\{ |\Delta\tilde{\epsilon}_{\text{tr}}|^2 - \Delta\tilde{\epsilon}_{\text{tr}}\Delta\tilde{\epsilon}_{\text{ref}}^* \right\}.$$

Пролетные частицы в этом приближении всегда забирают энергию у ВЧ поля. Поток частиц может передавать энергию электромагнитному полю только за счет отраженных от ВК частиц. Эффективность взаимодействия максимальна, когда  $2\Theta_{z0} = \pi$ . При оптимальных значениях  $\Theta_{z0}$  ускоренные в модулирующем зазоре частицы после отражения от ВК ускоряются, а замедленные еще раз теряют энергию. В среднем энергообмен отрицателен вследствие того, что плотность обратного тока замедленных частиц выше, чем ускоренных. Очевидно, что при  $\alpha \ll 1$  сдвиг фазы ВЧ поля между двумя зазорами не оказывает влияние на процессы энергообмена.

Учтем в этом же приближении ( $\alpha \ll 1$ ) пространственные колебания ВК, считая их малыми. Этот механизм аналогичен механизму возбуждения колебаний в отражательном клистроне [11]. Тогда

$$\Delta\tilde{\epsilon}_{\text{ref}} \approx (eE_1L_1)e^{i\Theta_0}[(1 - e^{i2\Theta_{z0}}) - i2\Delta\Theta_{z0}e^{i2\Theta_{z0}}],$$

где  $\Delta\Theta_{z0}$  — изменение угла пролета частиц за счет колебаний ВК, происходящие вследствие изменения энергии частиц в модулирующем зазоре.

Тогда

$$P_{\Delta z} \approx \frac{S_b(j_{\text{in}} - j_{\text{out}}^0)}{e} \frac{\partial(z_0/L_2)}{\partial\gamma} \frac{(eE_1L_1)^2}{mc^2} \times \frac{L_2}{z_0} \Theta_{z0} \sin(2\Theta_{z0}).$$

Как и для отражательного клистрона, энергообмен максимален, когда  $2\Theta_{z0} = 3\pi/2$ . Суммарная эффективность взаимодействия, таким образом, есть

$$\eta_{\Sigma} \approx \frac{1}{j_{\text{in}}} \left( \frac{j_{\text{out}}^0}{j_{\text{cr1}}^0} \right)^{3/2} \frac{\partial j_{\text{cr1}}^0}{\partial\gamma} \frac{|eE_1L_1/mc^2|^2}{(\gamma_{\text{in}} - 1)} \times [\cos(2\Theta_{z0}) + \mu\Theta_{z0} \sin(2\Theta_{z0})].$$

Для  $j_{\text{in}} \approx 2j_{\text{cr1}}^0$  коэффициент  $\mu \approx 2$ . Функция угла пролета для этого случая приведена на рис. 2. Как видно, при  $j_{\text{in}} \approx j_{\text{cr2}}$  и  $\alpha \ll 1$  возбуждение колебаний в виркаторе возможно как за счет колебания потенциала ВК, так и за счет его пространственных осцилляций. При больших значениях инжектируемого тока возбуждение колебаний возможно лишь в сверхразмерных системах, когда  $L_2 \gg \lambda$ . Основную роль в возбуждении колебаний в этом случае играет „эффект отражательного клистрона“, поскольку при  $j_{\text{in}} \gg j_{\text{cr1}}^0$  коэффициент

$$\mu\Theta_{z0} \approx \sqrt{2} \frac{\Theta_{z0}L_2}{z_0} \left( \frac{j_{\text{in}}}{j_{\text{cr1}}^0} \right)^{1/2} \gg 1.$$

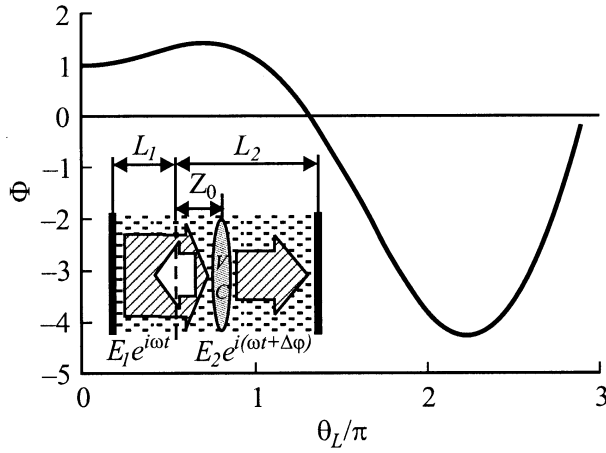


Рис. 2. Функция пролетного угла для двухзорового виркатора при  $\alpha \ll 1$  и  $j_{in} \approx j_{cr2}$ .

Если  $L_2 \approx \lambda$ , то при увеличении инжектируемого тока происходят уменьшение угла пролета  $\Theta_{z0}$  и возбуждение колебаний становится невозможным.

При  $\alpha \approx 1$  и  $\alpha z_0/L_2 \ll 1$  вероятность прохождения частицы через ВК, как и в предыдущем случае, определяется изменением ее энергии в модулирующем зазоре. Тем не менее, поскольку  $\alpha \approx 1$ , необходимо учитывать взаимодействие пролетных частиц с полем как в первом, так и во втором зазоре. Функция угла пролета в этом случае (без учета „эффекта отражательного клистрона“) может быть представлена в виде

$$\Phi_{\Delta j} \approx \text{Re}\{e^{i2\Theta_{z0}} + \alpha e^{i\Delta\phi} f(L_2)\}.$$

В частности, для  $\Theta(z) = \omega z/\bar{V}$

$$\Phi_{\Delta j} \approx -(1 - \cos 2\Theta_{z0}) + \left[ 1 + \alpha \cos(\Delta\phi + \Theta_{L2}/2) \frac{\sin \Theta_{L2}/2}{\Theta_{L2}/2} \right].$$

Первые два члена обусловлены взаимодействием электромагнитного поля с отраженными частицами, два других — с пролетными. Как видно, отраженные частицы при любых углах пролета передают энергию полю. Характер взаимодействия пролетных частиц зависит от сдвига фаз поля между секциями и величины параметра  $\alpha$ . Если  $\Delta\phi = 0$ , то пролетные частицы для  $\alpha < 4.7$  поглощают энергию поля при любых углах пролета. Если  $\Delta\phi = \pi - \Theta_{L2}/2$ , то при

$$\alpha > \alpha_{cr} = \frac{\Theta_{L2}/2}{\sin \Theta_{L2}/2}$$

пролетные частицы, так же как и отраженные, могут передавать энергию ВЧ полю. При  $\Theta_{z0} \ll \pi$  во взаимодействии участвуют только пролетные частицы.

Если  $\alpha z_0/L_2 \gg 1$ , то модулирующий зазор оказывает слабое влияние на возбуждение колебаний, а двухзоровая система становится по своим свойствам близкой к однозоровой.

## Численное моделирование в одномерной модели. Режим больших КПД

Основные закономерности энергообмена электронного потока с ВК с ВЧ полями большой амплитуды в одно- и двухзоровых системах исследовались с помощью одномерной PIC-модели с отдельным учетом полей объемного заряда и ВЧ полей. Поля объемного заряда определялись самосогласованным образом в потенциальном приближении. Амплитуды и фазы ВЧ полей, а также энергия инжектируемых электронов  $\epsilon_{in}$  и плотность тока инжекции  $j_{in}$  задавались. КПД генерации определялся путем суммирования работ ВЧ поля над всеми частицами пучка с момента их инжекции до поглощения на граничных электродах или фольге. Сравнение данной величины с полными потерями энергии частицами позволило сделать вывод об удовлетворительной консервативности схемы по энергии ( $\sim 10\%$ ).

В однозоровой системе с ВК при небольшом превышении тока над критическим и умеренно релятивистской энергии инжекции электронов ( $\gamma \approx 2$ ) максимальная эффективность генерации СВЧ излучения ( $\sim 12\%$ ) достигается при величине ускорительного параметра

$$a = \frac{eEL}{mc^2(\gamma_0 - 1)} \approx 3$$

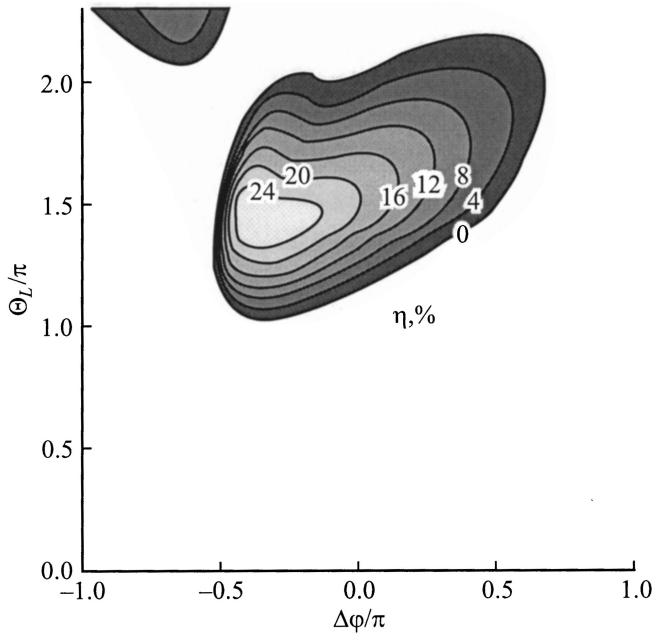
и невозмущенном угле пролета частиц через промежуток в ВЧ поле

$$\Theta_L = \frac{\omega L}{c\beta_0} \approx 2\pi.$$

Данная величина пролетного угла близка к величине, характерной для механизма возбуждения колебаний, связанного с модуляцией токопрохождения через ВК (рис. 1). Она приблизительно вдвое больше величины пролетного угла, соответствующего резонансу с релаксационной частотой  $f_r$  электронного потока.<sup>1</sup> В режимах с максимальными КПД положительный вклад в энергообмен вносится отраженными частицами. Вклад прошедших частиц отрицателен и сравнительно мал. При этом отражения испытывают в основном частицы, стартовавшие во второй половине тормозящей и в начале ускоряющей фазы ВЧ поля.

Одномерные расчеты двухзоровой системы выполнялись для небольшого (до 50%) превышения тока над вторым критическим во втором зазоре и ограничивались случаем  $L_1 \approx (0.1 - 0.2)L_2$ . По отношению к отраженным от ВК частицам моделировались две простейшие ситуации. В первом случае разделяющая промежутки фольга полностью пропускала частицы в обоих направлениях.

<sup>1</sup> Частота релаксационных колебаний, возникающих при установлении равновесного токопротекания в сильноточной системе, определяется характерным временем накопления объемного заряда. В обычном диоде это время пролета электронов через промежуток. В случае существования ВК, как показывает численное моделирование, релаксационная частота определяется временем пролета инжектированных частиц до ВК и обратно.



**Рис. 3.** Эффективность генерации двухсекционного виркатора как функция величины фазового сдвига между ВЧ полями в секциях и невозмущенного угла пролета электронов.  $a_1 = 0.4$ ,  $a_2 = 1.6$ , без отсечения отраженных частиц на фольге.

Во втором случае частицы, пересекающие фольгу в отрицательном направлении, изымались из расчета.

Использование сдвига фазы между ВЧ полями в секциях двухззорной системы позволяет достичь более благоприятного распределения ВЧ поля на траектории электрона с точки зрения модуляции тока и энергообмена по сравнению с одноззорным случаем. Расчеты показали, что эффективность двухззорной системы при  $\varepsilon_{in} = 500 \text{ keV}$  может более чем втрое превышать эффективность одноззорной системы. При этом в отличие от последней максимум эффективности наблюдается при сравнении частоты ВЧ колебаний с частотой релаксационных колебаний ВК. Далее везде рассматривается именно этот случай. Оптимальная величина сдвига фаз  $\Delta\varphi_{opt}$  зависит от угла пролета электронов через систему, уменьшается с ростом энергии электронов и практически не зависит от условий на разделяющей фольге. Так, при  $L_1 = 1 \text{ cm}$ ,  $L_2 = 5 \text{ cm}$ ,  $j_{in} \approx 1.35 j_{cr2}$  имеем  $\Delta\varphi_{opt} \approx 85^\circ$  при  $\varepsilon_{in} = 250 \text{ keV}$ ,  $\Delta\varphi_{opt} \approx 80^\circ$  при  $\varepsilon_{in} = 500 \text{ keV}$ ,  $\Delta\varphi_{opt} \approx 70^\circ$  при  $\varepsilon_{in} = 1 \text{ MeV}$ ,  $\Delta\varphi_{opt} \approx 65^\circ$  при  $\varepsilon_{in} = 5 \text{ MeV}$  (везде поле во втором зазоре колеблется с опережением).

Условия на разделяющей фольге оказывают заметное влияние на максимальную величину эффективности и соответствующие величины ускорительных параметров в секциях. Так, при  $\varepsilon_{in} = 500 \text{ keV}$  и  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{opt}$  без отсечения отраженных частиц на фольге имеем  $\eta_{max} = 29\%$  при  $a_1 = 0.45$ ,  $a_2 = 1.8$ , а отсечением частиц  $\eta_{max} = 38\%$  при  $a_1 = 1.05$ ,  $a_2 = 4.6$ . В другом практически важном случае при нулевом сдвиге фаз

между секциями имеем соответственно  $\eta_{max} = 20\%$  при  $a_1 = 0.4$ ,  $a_2 = 1.6$ , и  $\eta_{max} = 13\%$  при  $a_1 = 0.55$ ,  $a_2 = 1.7$ , т.е. эффект отсечения отраженных частиц на фольге имеет иной знак. Отметим, что режимы с оптимальным сдвигом фаз отличаются наиболее узким рабочим диапазоном отношения  $a_2/a_1$ .

При фиксированном превышении тока над критическим, при  $f = f_r$  и одинаковых условиях на фольге, зависимость КПД от величин ускорительных параметров и абсолютные значения КПД мало изменяются в широком диапазоне энергий электронов (от  $\gamma_{in} \sim 1.5$  до  $\gamma_{in} \sim 10$ ).

При оптимальных величинах ускорительных параметров положительные значения КПД приблизительно соответствуют диапазону сдвига фаз ( $-\pi/2 < \Delta\varphi < \pi/2$ ) и достигаются в достаточно широкой области пролетных углов (рис. 3), что в реальной конструкции виркатора позволяет надеяться на возможность варьирования частоты генерации за счет настройки электродинамической системы при неизменных параметрах электронного пучка.

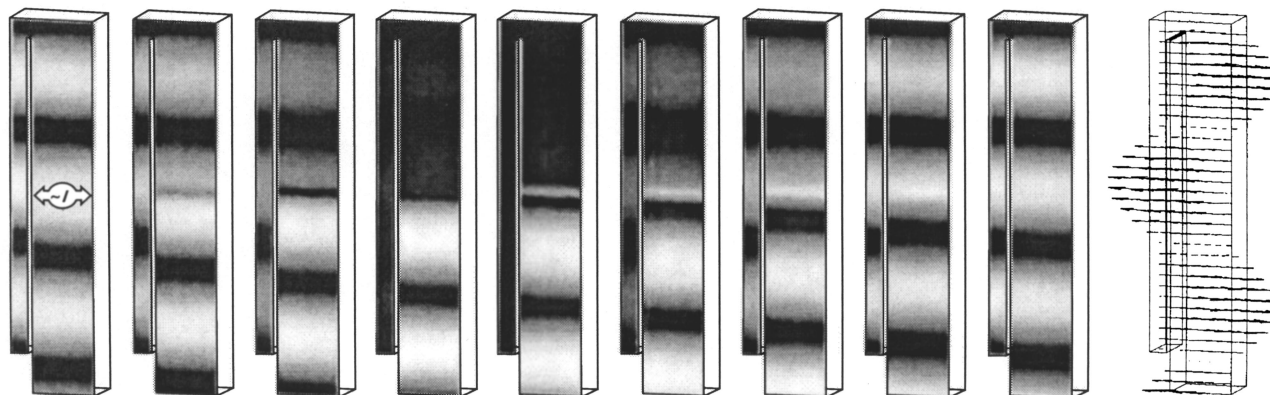
В режимах с высоким КПД определяющее влияние на динамику энергообмена оказывают ВЧ поля объемного заряда электронного потока. На коллектор проходят в основном электроны, потерявшие энергию в первом зазоре. Положительный вклад в энергообмен с волной вносят в основном отраженные от ВК частицы, а индивидуальный КПД проходящих частиц мал и может быть отрицателен.

## Конструкция виркатора

Основным фактором, определяющим тип конструкции двухсекционного виркатора, является выбор величины фазового сдвига между ВЧ полями на траектории электронного пучка в секциях. Для осуществления режима с оптимальным сдвигом фаз ( $\Delta\varphi \sim \pi/2$ ) могут быть использованы электродинамические системы с бегущей волной. В резонансных электродинамических системах представляет интерес случай с синфазными полями ( $\Delta\varphi = 0$ ).

В экспериментальной конструкции виркатора, описываемой ниже, сделана попытка реализовать режим синфазных полей. Электродинамическая система виркатора представляет собой два прямоугольных волновода, связанных прямоугольным отверстием связи (рис. 4). Рабочее колебание — низшая мода  $TE_{10}$ . Расчетная структура полей, представленная на рисунке, соответствует возбуждению резонатора заданным линейным источником тока, расположенным поперек второго зазора. В этом случае колебание в первой и второй секциях выше источника тока имеет вид стоячей волны, а излучение выводится из второй секции в виде бегущей волны (на рисунке по направлению вниз). В реальной системе через пучности поля пропускается электронный пучок круглого сечения.

Размеры резонатора выбраны из следующих соображений. Во-первых, во избежание образования ВК в



**Рис. 4.** Расчетная картина эволюции амплитудного распределения электрического поля в плоскости срединного сечения электродинамической системы виркатора в течение полупериода ВЧ колебания (с интервалом  $20^\circ$ ) при возбуждении заданным линейным источником тока. Карта векторов соответствует последнему моменту времени.

первом зазоре его длина должна быть много меньше длины второго ( $\sim 1/5$ ). Во-вторых, для максимального снижения рабочей плотности тока (что желательно с точки зрения формирования сильноточного пучка в вакуумном диоде и его транспортировки через резонатор с разделительными фольгами или сетками), а также приближения конфигурации электронного потока в зазорах резонатора к планарной, диаметр электронного пучка выбран близким к длине второго зазора  $D_b \approx L_2$ , что в свою очередь вызвало ограничение поперечного размера волноводных секций снизу величиной  $\sim 2L_2$ . С другой стороны, ширина волноводов ( $\approx 0.7\lambda$ ) выбиралась такой, чтобы на рабочей частоте она совпадала с половиной волноводной длины волны и, таким образом, масштаб поперечной неоднородности ВЧ поля, имеющего в сечении пучка синусоидальное распределение по  $X$  и  $Y$ , был одинаков по обеим координатам. К сожалению, удовлетворение этой совокупности требований привело к тому, что рабочая частота виркатора оказалась несколько ниже невозмущенной релаксационной частоты ВК в данной системе (например,  $2.7 \text{ GHz}$  против  $\sim 4 \text{ GHz}$ ), что в дальнейшем, по-видимому, негативно сказалось на величине эффективности генерации. Ширина и положение отверстия связи подбирались таким образом, чтобы напряженности ВЧ полей в зазорах на рабочей частоте были приблизительно одинаковыми:  $E_1 \approx E_2$ .

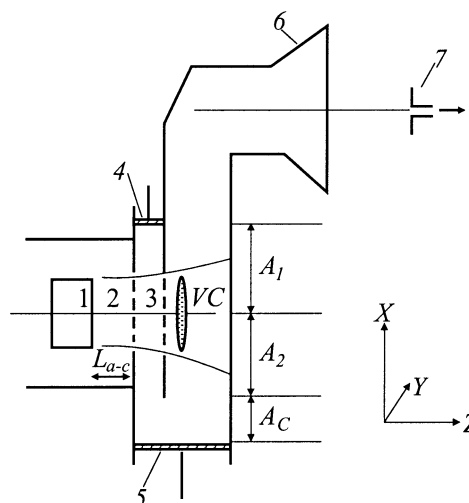
Предварительная оптимизация параметров виркатора была выполнена с помощью трехмерной версии PIC-кода KARAT [12]. Виркатор моделировался в совокупности с вакуумным диодом либо в упрощенном варианте с инжекцией в резонатор электронного пучка с заданными параметрами [7,8]. Расчеты продемонстрировали резонансный характер СВЧ генерации по отношению к величине импеданса вакуумного диода (оптимальная величина  $\sim 60 \Omega$ , превышение тока над критическим  $\sim 30\%$ ) и настроечным параметрам резонатора (положение поршней, размер и положение отверстия связи). Время раскачки колебаний при возбуждении прямоугольным фронтом тока составило около 15 периодов

колебания, излучение имело узкий спектр. Зависимость частоты генерации от импеданса вакуумного диода оказалась сравнительно слабой (менее 4% при изменении импеданса на 50%), а эффективность генерации сохранялась на уровне 10–12% в широком диапазоне мощностей электронного пучка.

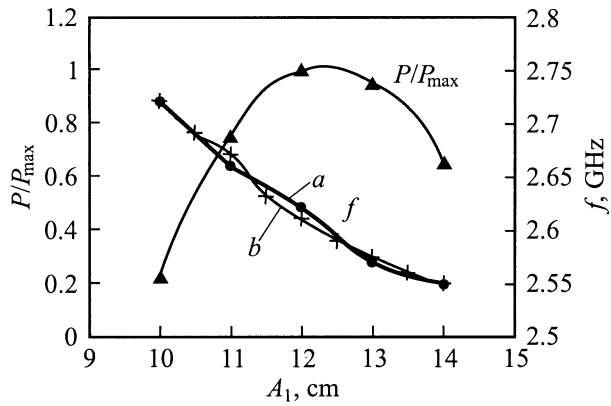
В расчете была продемонстрирована возможность плавной перестройки частоты генерации в полосе  $\sim 20\%$  (по половинному уровню мощности) за счет изменения геометрических размеров резонатора, при неизменных параметрах электронного пучка.

## Экспериментальные результаты

На рис. 5 приведена схема эксперимента. Электронный пучок формировался в планарном вакуумном диоде с холодным взрывоэмиссионным катодом без внешне-



**Рис. 5.** Схема виркатора: 1 — катод; 2 — вакуумный диод; 3 — модулирующий зазор; 4,5 — настроечные поршни; 6 — излучающая рупорная антенна; 7 — приемная антенна.



**Рис. 6.** Зависимость мощности и частоты излучения виркатора от положения поршня 4 (*a* — эксперимент, *b* — электродинамические измерения.)

го фокусирующего магнитного поля и инжектировался в двухсекционный резонатор с зазорами длиной  $L_1 \approx \lambda/8$ ,  $L_2 \approx \lambda/2$  соответственно. Пучок транспортировался сквозь тонкие фольги или сетки с высоким коэффициентом прозрачности, первая из которых разделяла диод и первую секцию, а вторая устанавливалась в перегородке между двумя секциями. Рабочая мода виркатора  $TE_{10}$  излучалась в открытое пространство в виде квазигаттуса пучка посредством рупорной антенны с размером апертуры около  $8\lambda$ .

Колебание волны  $TE_{10}$  в первой секции имело три вариации в поперечном по отношению к оси пучка направлении (вдоль волновода). Варьирование резонансной частоты достигалось изменением длины волновода путем согласованного смещения настроечных поршней. Были проведены электродинамические измерения параметров резонатора с использованием панорамного измерителя  $S$ -параметров. Резонатор возбуждался с помощью короткого штыря, расположенного в первой секции вдоль оси электронного пучка. Результаты измерений перестройки резонансной частоты моды  $TE_{103}$  отображены далее на рис. 6 (кривая *b*). Резонансные частоты двух соседних мод  $TE_{102}$  и  $TE_{104}$  отстояли примерно на 15%. Величина добротности колебания  $TE_{103}$  зависела от размера отверстия связи и для оптимальной геометрии на рабочей частоте составляла около 40, при этом напряженности электрических полей в секциях были приблизительно одинаковы.

Экспериментальные исследования виркатора проводились на импульсно-периодическом ускорителе SINUS-7 [13], (длительность импульса по полувысоте 50 ns, энергия электронов до 2 MeV, ток пучка до 20 kA, частота следования импульсов до 100 Hz). Для формирования электронного пучка использовался металлодиэлектрический катод с экранирующим электродом и диэлектрической поверхностью  $\approx \lambda/2$ .

Параметры микроволновых импульсов (мощность, форма импульса, спектр) измерялись с использованием нескольких дипольных антенн с различной эффективной

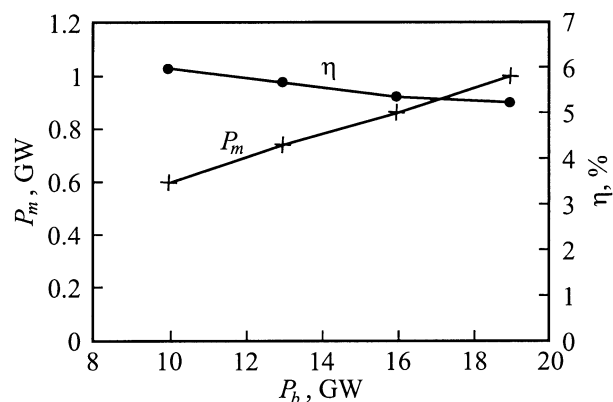
площадью. Антенны калибровались с помощью измерителя  $S$ -параметров HP8510. СВЧ сигналы с антенн либо детектировались, либо подавались непосредственно на вход широкополосного осциллографа HP54720D. Полная мощность излучения определялась путем суммирования по диаграмме направленности. Энергия в микроволновом импульсе измерялась с использованием калориметра, аналогичного описанному в [14]. Калориметр был собран в прямоугольном сверхразмерном волноводе размером  $20 \times 30$  см и был заполнен этиловым спиртом. С учетом точности калибровок ошибка в измерении мощности излучения не превышала  $\pm 20\%$ .

В экспериментах виркатор настраивался на режим максимальной мощности и требуемую частоту генерации путем изменения зазора в диоде, а также параметров резонатора. При больших зазорах в диоде (высоких значениях импеданса диода) ток был недостаточен для формирования ВК и излучение отсутствовало. Оптимальная величина зазора соответствовала 30%-му превышению тока над критическим для второй секции, что хорошо согласуется с результатами численного моделирования. При больших значениях инжектируемого тока мощность излучения существенно уменьшалась, а спектр излучения уширялся. В этом случае в виркаторе отсутствовали регулярные ВЧ колебания. Наличие оптимума может быть связано как с неравномерностью распределения потенциала по радиусу электронного пучка, так и с изменением пространственного положения ВК в резонаторе при изменении импеданса вакуумного диода.

В оптимальном режиме генерации (напряжение в вакуумном диоде 1 MV, ток электронного пучка 19 kA) мощность излучения виркатора составила  $\sim 1$  GW при КПД около 5%, частота излучения — 2.65 GHz, длительность микроволнового импульса на половинном уровне мощности — 25 ns. Диаграмма направленности соответствовала излучению моды  $TE_{10}$  из рупорной антенны. Плотность мощности излучения в максимуме диаграммы направленности на расстоянии 3 m от рупорной антенны составляла около  $60 \text{ kW/cm}^2$ , энергия в микроволновом импульсе, измеренная с помощью калориметра, 20 J.

В данных экспериментах КПД генерации определялся как отношение пиковой микроволновой мощности к соответствующей величине мощности электронного пучка, рассчитанной с учетом полного тока в вакуумном диоде. Однако, как показали измерения, от 30 до 50% величины тока в диоде составлял паразитный ток, текущий с изготовленного из нержавеющей стали фокусирующего электрода, окружающего рабочую поверхность катода. Этот ток выпадал на коллимирующую диафрагму, установленную на входе виркатора, и не давал вклада в микроволновую генерацию. Величина КПД, рассчитанная с учетом полезной величины тока, составляла 8–10%, что близко к расчетной величине.

Максимум мощности излучения достигается при ширине отверстия связи  $A_c \approx \lambda_w/30$  ( $\lambda_w$  — длина волны в волноводе), что результатам электродинамических



**Рис. 7.** Экспериментальная зависимость мощности и эффективности излучения виркатора от мощности электронного пучка.

измерений и расчетов соответствует приблизительно равному равенству полей в секциях и величине отношения  $a_2/a_1 \approx 4$ . КПД виркатора при варьировании мощности электронного пучка изменялся слабо (рис. 7). Незначительный рост КПД до 6% с уменьшением мощности пучка до 10 GW был обусловлен уменьшением потерь тока с экранирующего электрода катода при работе на меньших напряжениях в диоде. В течение импульса излучения импеданс вакуумного диода уменьшался примерно в 1.5 раз, что характерно для диодов со взрывоэмиссионными катодами без внешнего фокусирующего магнитного поля. Увеличение тока в течение импульса, по-видимому, было связано как с ростом размера отдельных эмиссионных центров на поверхности катода и увеличения их числа [15], так и с расширением катодной плазмы в зазор. Тем не менее вид осциллограмм свидетельствует о том, что частота излучения виркатора в течение импульса не изменялась.

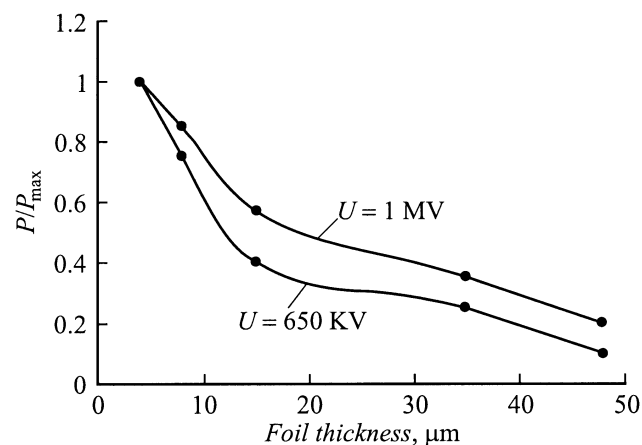
Варьирование частоты излучения осуществлялось изменением положения поршня 4 модулирующей секции и положения отверстия связи. Зависимость частоты излучения от расстояния между поршнем 4 и осью электронного пучка ( $A_1$ ) приведена на рис. 6 (кривая *a*). Данная зависимость находится в хорошем соответствии с результатами электродинамических измерений (кривая *b*). Это подтверждает тот факт, что при малой надкритичности тока пучка частота генерации виркатора задается параметрами резонатора. Полоса перестройки частоты генерации удавалось увеличить до 15% при синхронном изменении  $A_1$  и  $A_2$ , так чтобы пучность электрического поля все время располагалась вблизи оси пучка, т.е.  $A_1 \approx A_2 \approx 3\lambda_w/4$ . При этом ширина отверстия связи сохранялась неизменной.

Зависимости мощности излучения от толщины алюминиевой фольги, разделяющей секции виркатора, для различных значений напряжения в диоде и его неизменном импедансе приведена на рис. 8. При напряжении 1 MV падение мощности излучения в два раза наблюдалось при толщине фольги около  $15 \mu\text{m}$ . Достаточно быстрый

спад мощности можно объяснить значительным влиянием фольги на движение низкоэнергетических электронов, существующих в электродинамической системе виркатора в условиях их взаимодействия с сильными ВЧ полями. При меньшем напряжении (650 kV) спад мощности генерации с ростом толщины фольги был более быстрым. Аналогичные экспериментальные зависимости наблюдались при исследовании виркаторов в работах, приведенных в обзоре [6]. Зависимость мощности генерации от свойств фольги, разделяющей вакуумный диод и модулирующую секцию, была заметно слабее. Так, при толщине алюминиевой фольги около  $15 \mu\text{m}$  и напряжении в диоде 1 MV спад мощности излучения составлял около 30%.

Структура электронного пучка контролировалась по его отпечаткам на полимерной пленке. Поперечное распределение тока на входе в систему было сравнительно однородным, в то время как на коллекторе оно приобретало форму кольца. В экспериментах были проведены измерения распределения коллекторного тока электронного пучка, в которых часть электронов, прошедших через небольшое отверстие на коллекторе, попадала на центральный проводник коаксиальной линии с волновым сопротивлением  $50 \Omega$ . Полученный сигнал после ослабления подавался на вход широкополосного осциллографа. Положение отверстия могло изменяться. В коллекторном токе были зарегистрированы как постоянная, так и ВЧ составляющая. Частота модуляции тока совпадала с частотой микроволнового излучения. Высокочастотная модуляция тока возникала с задержкой 15–20 ns после начала импульса, что соответствовало времени раскачки колебаний в виркаторе. Распределение постоянной составляющей тока имело форму кольца, расплывающегося в течение длительности импульса. Максимум распределения относительной величины ВЧ тока находился вблизи оси электронного пучка. Максимальная глубина модуляции электронного тока составляла 70–80%.

С использованием виркатора дециметрового диапазона на ускорителе SINUS-7 был реализован па-



**Рис. 8.** Зависимость мощности излучения от толщины фольги при различных величинах напряжения в вакуумном диоде.



кетный импульсно-периодический режим генерации. В импульсно-периодическом режиме вместо алюминиевых фольг, разделяющих секции виркатора, использовались вольфрамовые сетки с размером квадратной ячейки  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$  и геометрической прозрачностью около 0.9. Мощность излучения в каждом импульсе составляла около 100 MW, длительность — 20–25 ns. Максимальное количество импульсов в пакете было ограничено разрушением сетки, разделяющей секции виркатора, и составило около 50 при частоте следования импульсов 50 Hz и около 400 при частоте 20 Hz.

## Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать заключение об основных механизмах генерации СВЧ излучения в приборах с ВК. На стадии возбуждения ими являются а) прямая модуляция тока, связанная с колебаниями потенциала ВК в ВЧ поле; б) механизм группировки электронов типа „отражательного клистро-на“, обусловленный позиционными колебаниями ВК, и в) инерционная группировка отраженных частиц. При релятивистских энергиях электронов значение последнего механизма несущественно. Ограничение КПД при большой амплитуде ВЧ поля, как и в других СВЧ приборах, связано с конечной фазовой шириной модулированного электронного пучка.

Использование в виркаторе двухзачорной электродинамической системы теоретически позволяет за счет сдвига фаз между ВЧ колебаниями в секциях и осуществления таким образом благоприятного распределения ВЧ поля вдоль траектории электронов достичь эффективности генерации до  $\sim 20\%$  ( $\sim 40\%$  в одномерной модели), что более чем втрое превышает эффективность однозачорной системы при аналогичных условиях. Значительная ( $\sim 20\%$ ) ширина полосы электронной восприимчивости вблизи частоты релаксационных колебаний ВК дает возможность изменения частоты генерации за счет соответствующей настройки электродинамической системы.

Достижение указанной высокой величины эффективности в реальном эксперименте сдерживается необходимостью одновременного удовлетворения большого числа взаимосвязанных физических условий (ширина зазоров, фазировка и соотношение амплитуд ВЧ полей в секциях, формирование сильноточного электронного пучка с заданными параметрами).

На основе результатов численного эксперимента, выполненного с привлечением трехмерной версии электромагнитного PIC-кода KARAT, был разработан экспериментальный макет двухсекционного виркатора внешнего магнитного поля, с синфазными полями в секциях. В экспериментах с использованием сильноточного импульсно-периодического электронного ускорителя в дециметровом диапазоне длин волн была получена одно-модовая генерация с мощностью до 1 GW и длительностью  $\sim 25 \text{ ns}$  при эффективности генерации  $\sim 5\%$ . При

вырйировании мощности электронного пучка эффективность генерации виркатора практически не изменялась. Факторами, ограничившими величину эффективности, оказались существенные потери тока в вакуумном диоде и дрейф параметров электронного пучка в течение импульса. Вместе с тем частота генерации не изменялась, как в течение импульса, так и от импульса к импульсу, что доказывает определяющее влияние электродинамической системы. За счет варьирования параметров резонатора удалось реализовать непрерывную перестройку частоты генерации виркатора в полосе  $\sim 15\%$  на половинном уровне мощности.

Авторы выражают искреннюю признательность М.И. Петелину за интерес к работе и стимулирующие обсуждения, а также автору кода KARAT В.П. Тараканову за плодотворное сотрудничество.

## Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г. // Плазменная электроника. Киев: Наукова думка, 1989. С. 112–131.
- [2] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // РиЭ. 1992. № 3. С. 385–396.
- [3] Селемир В.Д., Алексин Б.В., Ватрунин В.Е. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. Вып. 7,8. С. 689–708.
- [4] Гадецкий Н.П., Магда И.И., Найстемпер С.И. и др. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. Вып. 4. С. 530–538.
- [5] Jiang W., Woolverton K., Dickens J., Kristiansen M. / IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. Vol. 27. N 5. P. 1538–1542.
- [6] Granatstein V.L., Alexeff I. High-Power Microwave Sourced. Boston; London: Artech House, 1989. 564 p.
- [7] Korovin S.D., Pegel I.V., Polevin S.D., and Tarakanov V.P. // Proc 11<sup>th</sup> Intern. Pulsed Power Conf. Baltimore, 1997. P. 736–741.
- [8] Kutsanov S.A., Klimov A.I., Korovin S.D. et al. // Proc. 1<sup>st</sup> Int’l Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Tomsk, 2000. Vol. 2. P. 423–428.
- [9] Воронин В.С., Зозуля Ю.Т., Лебедев А.Н. / ЖТФ. 1972. Т. XLII. Вып 3. С. 546–552.
- [10] Gill E.W.B., Morrell J.H. // Phil. Mag. S. 6. Vol. 44. N 259. July. 1992. P. 161–178.
- [11] Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в СВЧ электронике. М.: Сов. радио, 1970. 584 с.
- [12] Tarakanov V.P. User’s Manual for Code Karat. Springfield: BRA, 1992.
- [13] Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.
- [14] Шкварунец А.Г. // ПТЭ. 1996. № 4. С. 72–75.
- [15] Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Пегель И.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 6. С. 97–101.