

01;09

## О возможности использования МСЭ с брэгговским резонатором для тестирования высокодобротных резонансных структур

© Н.С. Гинзбург,<sup>1</sup> А.К. Каминский,<sup>2</sup> С.В. Кузиков,<sup>1</sup> Э.А. Перельштейн,<sup>2</sup> Н.Ю. Песков,<sup>1</sup>  
С.Н. Седых,<sup>2</sup> А.П. Сергеев,<sup>2</sup> А.С. Сергеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 31 мая 2005 г. В окончательной редакции 11 октября 2005 г.)

В рамках нестационарных уравнений проведено моделирование работы на резонансную нагрузку импульсного мазера на свободных электронах (МСЭ) с брэгговским резонатором. Показано, что при совпадении частоты собственной моды нагрузочного резонатора с частотой генерации МСЭ в переходном процессе происходит просветление нагрузки и накопление в ней СВЧ-энергии. Отстройка частоты резонансной нагрузки от частоты генератора приводит к значительным паразитным отражениям и, в конечном счете, к срыву генерации в МСЭ. Устойчивость процесса генерации зависит от времени запаздывания отраженного сигнала, а также потерь в тракте.

PACS: 84.40.-x

### Введение

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию ускорителей с высоким темпом набора энергии, которые предполагается запитывать мощными ВЧ-импульсами в диапазоне 30–34 GHz [1–3]. Для этого необходима экспериментальная информация как о работе самих ВЧ-компонент этих ускорителей, так и о поведении материалов (металлов, диэлектриков) в сильных электромагнитных полях. Перспективными источниками для возбуждения и тестирования компонент ускорителей нового поколения могут служить мощные мазеры на свободных электронах (МСЭ) миллиметрового диапазона. Исследования в этом направлении в последние несколько лет проводятся в сотрудничестве Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) с Институтом прикладной физики РАН (ИПФ, Н. Новгород) на основе МСЭ-генератора с брэгговским резонатором, работающим на частоте 30 GHz [4,5]. Достигнутый в автономном (без внешней нагрузки) режиме уровень мощности излучения в сочетании с достаточно высокой стабильностью режима одномодовой генерации делают привлекательным использование таких генераторов для обсуждаемых приложений [6,7].

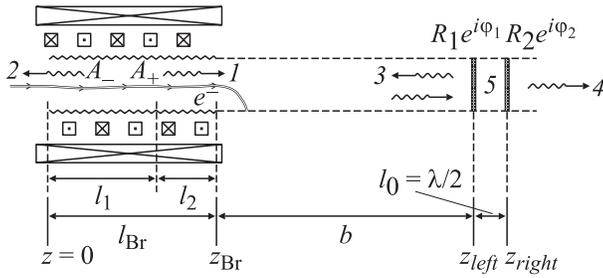
Тем не менее возможность такого приложения МСЭ требует дополнительных исследований. Нетривиальность вопроса заключается в том, что при накачке высокодобротной резонансной нагрузки импульсным излучением МСЭ на начальной стадии прихода СВЧ-импульса в нагрузку должно возникать практически полное его отражение. В то же время известно, что большие отражения могут отрицательно сказываться на работе автогенератора, вплоть до срыва генерации. В данной статье в рамках одномерных нестационарных уравнений проведено моделирование работы на резонансную

нагрузку импульсного МСЭ-генератора с брэгговским резонатором. Показано, что при совпадении частоты собственной моды нагрузочного (тестового) резонатора с частотой МСЭ в переходном процессе происходит просветление тестового резонатора и накопление в нем СВЧ-энергии.

### Модель и основные уравнения

Условная схема экспериментов приведена на рис. 1. Особенностью МСЭ-генератора, реализованного на основе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 (ОИЯИ), является использование брэгговского резонатора со скачком фазы гофрировки в пространстве взаимодействия [4]. Указанный резонатор представляет собой два отрезка гофрированного волновода с длинами  $l_1$  и  $l_2$  соответственно, в месте сочленения которых происходит скачок фазы гофрировки  $\pi$  (рис. 1),  $l_{Br} = l_1 + l_2$  — длина резонатора. Высокие селективные свойства резонатора нового типа [8] позволили обеспечить в МСЭ стабильную одномодовую генерацию при большом электронном КПД [4,5].

Моделирование работы МСЭ на резонансную нагрузку проводилось в рамках пространственно-временного подхода. Для описания взаимодействия внутри брэгговского резонатора был использован метод связанных волн [9]. ВЧ-поле представлялось в виде попутной  $A_+ \mathbf{E}_+(\mathbf{r}_\perp) e^{i\omega t - ih_+ z}$  и встречной  $A_- \mathbf{E}_-(\mathbf{r}_\perp) e^{i\omega t + ih_- z}$  по отношению к электронному потоку парциальных волн с медленно меняющимися во времени и по продольной координате амплитудами. Нанесенная на поверхность брэгговских отражателей неглубокая гофрировка  $r = R_0 + r_1 \cos(\tilde{h}z)$ , где  $R_0$  — невозмущенный радиус волновода,  $r_1$  — глубина гофра,  $r_1 \ll \lambda$ ,  $\lambda$  — длина



**Рис. 1.** Схема МСЭ с нагрузочным резонатором. Цифрами отмечены сечения, в которых далее на рис. 2–6 представлены амплитуды полей.

волны, обеспечивает распределенную связь этих двух встречных волн, если постоянная структуры  $\bar{h} = 2\pi/d$  ( $d$  — период гофрировки) связана с продольными волновыми числами волн  $h_{\pm}$  брэгговским условием [9]:

$$\bar{h} \approx h_+ + h_- \quad (1)$$

Будем далее для простоты считать  $h_+ = h_- = h$  и в качестве несущей частоты выберем определяемую условием (1) частоту точного брэгговского резонанса  $\bar{\omega} = \bar{h}c/2$ . Предположим также, что для усиливаемой попутной волны  $A_+$  выполнены условия ондуляторного синхронизма

$$\bar{\omega} - hv_{\parallel} \approx \Omega_b \quad (2)$$

с электронами, движущимися в  $+z$  направлении со скоростью  $v_{\parallel}$  и осциллирующими в периодическом магнитостатическом поле ондулятора с частотой  $\Omega_b = h_w v_{\parallel}$ ,  $h_w = 2\pi/d_w$ ,  $d_w$  — период ондулятора. Тогда с учетом связи попутной и встречной волн на гофрировке эволюция амплитуд парциальных волн может быть описана уравнениями [10]

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \hat{A}_+ + i\hat{\alpha} \hat{A}_- &= C^3 J, \\ \left( -\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \hat{A}_- + i\hat{\alpha} \hat{A}_+ &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Z = \bar{\omega}z/c$ ,  $\tau = \bar{\omega}t$ ,  $\hat{A}_{\pm} = eA_{\pm}/mc\bar{\omega}$ ,  $\hat{\alpha} = \alpha c/\bar{\omega}$  — нормированный коэффициент связи волн,

$$C = \left( \frac{eI}{mc^3} \frac{\lambda^2}{8\pi N} \right)^{\frac{1}{3}}$$

— параметр усиления,  $I$  — невозмущенный ток пучка,  $N$  — норма волны,

$$J = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} e^{-i\theta} d\theta_0 \approx \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{A_w}{(\gamma + q_H)} e^{-i\theta} d\theta_0$$

— амплитуда высокочастотного электронного тока, который может быть найден из усредненных уравнений движения частиц. В МСЭ, запитываемом ускорителем

ЛИУ-3000, в качестве рабочего выбран режим обратного ведущего магнитного поля [11,12]. При этом направление вращения электронов в поле винтового ондулятора противоположно направлению их вращения в ведущем поле. Как было показано в [10,13], этот режим оптимален с точки зрения снижения чувствительности к разбросу параметров сильноточных релятивистских электронных пучков и достижения высокого электронного КПД. Это подтверждено в проведенных экспериментальных исследованиях МСЭ-генератора в диапазоне 30 GHz [4,5,10]. В условиях обратного ведущего поля уравнения движения электронов могут быть представлены в виде [14]

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \gamma &= -\frac{A_w \operatorname{Re}(A_+ e^{i\theta})}{\gamma + q_H}, \\ \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta &= \Delta + \frac{1}{2\gamma^2} + \frac{A_w^2}{2(\gamma + q_H)^2} \\ &+ \frac{A_w \operatorname{Im}(iA_+ e^{i\theta})}{(\gamma + q_H)^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\gamma$  — релятивистский масс-фактор;  $\theta = \bar{\omega}t - hz - h_w z$  — фаза электронов относительно синхронной волны;  $\Delta = (\bar{\omega} - hc - h_w c)/\bar{\omega}$  — начальная расстройка синхронизма;  $A_w = eH_w/h_w mc^2$ ,  $H_w$  — амплитуда ондуляторного поля на траектории электронов;  $q_H = \omega_{H0}/h_w c$ ,  $\omega_{H0} = eH_0/mc$  — нерелятивистская гирочастота электронов в однородном ведущем поле  $H_0$ .

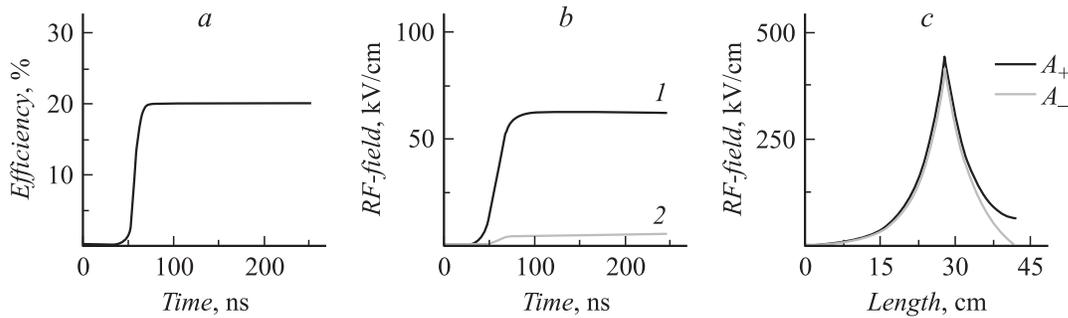
Следует отметить, что уравнения (3), (4) написаны в условиях большого доплеровского преобразования частоты, а также в пренебрежении „проскальзыванием“ синхронной волны  $A_+$  относительно электронов, т.е. в левых частях считается  $v_1 \approx v_{gr}$ . Такое упрощение эквивалентно предположению, что полоса частот, усиливаемых электронным потоком, существенно превосходит ширину полосы отражения брэгговских зеркал (полосу непрозрачности брэгговской структуры). Это соотношение выполнено экспериментально на ускорителе ЛИУ-3000.

Граничные условия к (4) для моноскоростного немодулированного электронного пучка могут быть представлены в виде

$$\theta|_{z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \gamma|_{z=0} = \gamma_0. \quad (5)$$

Резонансная нагрузка в моделировании предполагалась расположенной на расстоянии  $b$  от выхода МСЭ (рис. 1) и представляла собой две тонкие пластины с зазором  $l_0$ . Комплексные коэффициенты отражения и прохождения через пластины принимались равными  $R_{1,2} = |R_{1,2}|e^{i\phi_{1,2}}$  и  $T_{1,2} = \sqrt{1 - |R_{1,2}|^2} e^{i(\phi_{1,2} + \pi/2)}$  соответственно. Для описания эволюции полей парциальных волн в нагрузочном резонаторе были использованы уравнения

$$\left( \frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \hat{A}_+ = 0, \quad \left( -\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \hat{A}_- = 0 \quad (6)$$



**Рис. 2.** Установление стационарного режима генерации в МСЭ при оптимальных параметрах в отсутствие нагрузки. *a* — зависимости от времени КПД и амплитуды парциальных волн на выходе МСЭ с коллекторного (1) и катодного (2) концов (*b*), а также структуры полей парциальных волн внутри пространства взаимодействия МСЭ в стационарном режиме генерации (*c*).

с учетом следующих соотношений на левой  $z_{left} = l_{Br} + b$  и правой  $z_{right} = l_{left} + l_0$  границах резонатора:

$$\begin{aligned} A_+|_{Z=Z_{left}+0} &= T_1 A_+|_{Z=Z_{left}-0} + R_1 A_-|_{Z=Z_{left}+0}, \\ A_-|_{Z=Z_{left}-0} &= R_1 A_+|_{Z=Z_{left}-0} + T_1 A_-|_{Z=Z_{left}+0}, \\ A_+|_{Z=Z_{right}+0} &= T_2 A_+|_{Z=Z_{right}-0} + R_2 A_-|_{Z=Z_{right}+0}, \\ A_-|_{Z=Z_{right}-0} &= R_2 A_+|_{Z=Z_{right}-0}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $Z_{left,right} = \bar{\omega} C z_{left,right} / c$ . Кроме того, предполагалось отсутствие потоков электромагнитной энергии извне. На правой границе системы это обстоятельство учтено в последнем из соотношений (7), а на левой соответствующее условие имеет вид

$$A_+|_{Z=0} = 0. \quad (8)$$

В промежутке между генератором и нагрузочным резонатором амплитуды полей парциальных волн удовлетворяют соотношениям

$$\begin{aligned} A_+(\tau)|_{Z=Z_{left}-0} &= k A_+(\tau - B)|_{Z=L_{Br}}, \\ A_-(\tau)|_{Z=L_{Br}} &= k A_-(\tau - B)|_{Z=Z_{left}-0}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $k$  — потери в тракте,  $B = \bar{\omega} b / c$ .

Добротность нагрузочного резонатора, задаваемого указанным образом, равна

$$Q \approx \frac{\omega l_0}{c(1 - |R_1 R_2|)}, \quad (10)$$

а суммарный коэффициент отражения в стационарном режиме составляет

$$R = e^{i\varphi_1} \frac{|R_1| - |R_2| e^{i(2hl_0 + \varphi_1 + \varphi_2)}}{1 - |R_1 R_2| e^{i(2hl_0 + \varphi_1 + \varphi_2)}}. \quad (11)$$

Расстояние между пластинами резонатора принималось равным половине длины волны на частоте точного брэгговского резонанса, т.е.  $l_0 = \pi c / \bar{\omega}$ . Настройка тестового резонатора на частоту генерации МСЭ (которая

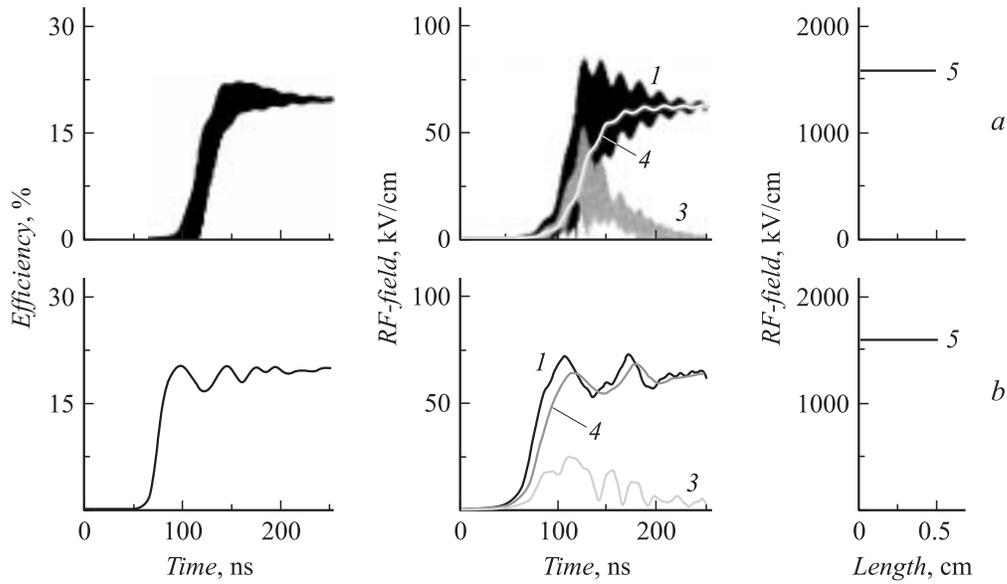
из-за наличия электронной перестройки частоты может отличаться от частоты собственной моды брэгговского резонатора) осуществлялась путем подбора фаз отражения от пластин  $\varphi_{1,2}$ . При  $|R_1| = |R_2|$  в условии резонанса  $2hl_0 + \varphi_1 + \varphi_2 = 2\pi n$  из (11) следует, что в стационарном режиме отражения от нагрузки отсутствуют  $R = 0$ . Тем не менее возникает вопрос о влиянии отражений на работу МСЭ-генератора в процессе накопления энергии в тестовом резонаторе.

## Результаты моделирования

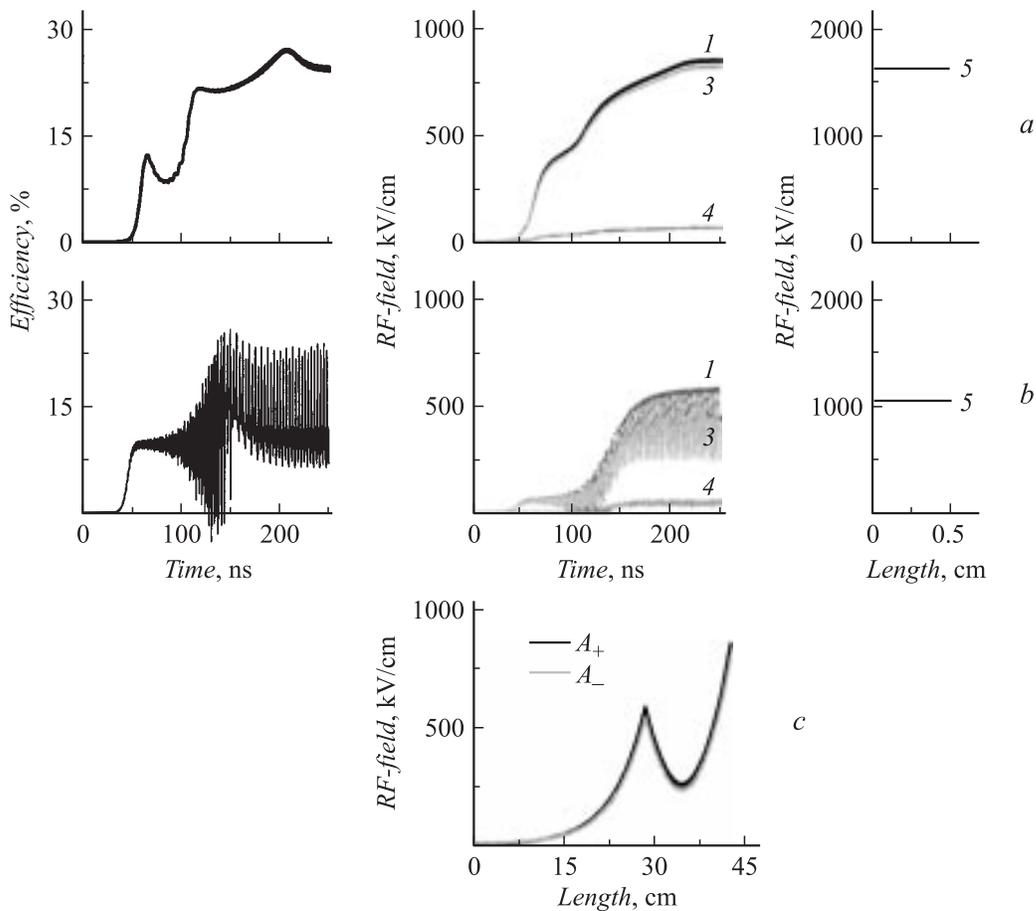
Моделирование работы МСЭ на резонансную нагрузку проводилось при параметрах, близких к условиям экспериментов на ускорителе ЛИУ-3000. МСЭ-генератор запитывался электронным пучком с энергией частиц 0.8 MeV и током 150 А. Брэгговский резонатор, составленный из двух гофрированных волноводных секций  $l_1 = 30$  и  $l_2 = 15$  см, обеспечивал обратную связь для рабочей волны  $H_{1,1}$  в окрестности частоты 30 GHz. Раскачка поперечных колебаний электронов осуществлялась в ондуляторе с периодом 6 см при амплитуде ондуляторного поля около 1 кОе и обратном ведущем магнитном поле  $\sim 2$  кОе.

В области указанных параметров моделирование отражает установление одномодового одночастотного режима генерации в отсутствие нагрузки. Зависимость КПД МСЭ от времени в оптимальных условиях генерации приведена на рис. 2. Структура полей парциальных волн в стационарном режиме соответствует возбуждению основной моды резонатора со скачком фазы гофрировки, частота генерации совпадает с брэгговской с точностью до небольшой (на уровне  $\Delta\omega/\bar{\omega} \approx 0.03\%$ ) электронной перестройки частоты. Величина этой перестройки от частоты „холодной“ моды лежит внутри полосы  $\bar{\omega}/Q$ , определяемой добротностью брэгговского резонатора  $Q \approx 1000$ , и зависит от величины ондуляторного и ведущего полей, т.е. поперечной скорости частиц.

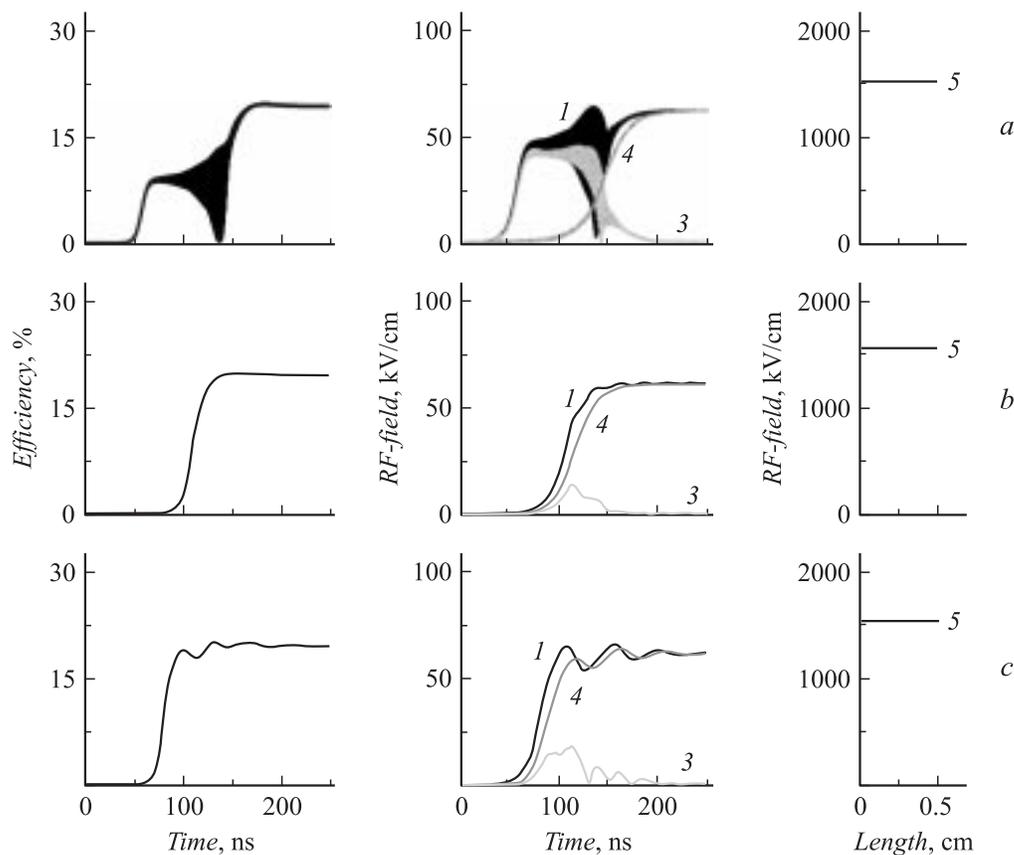
Результаты моделирования работы МСЭ на резонансную нагрузку приведены на рис. 3–6, где показаны зависимости от времени электронного КПД, а также ампли-



**Рис. 3.** Моделирование работы МСЭ на резонансную нагрузку, расположенную на большом расстоянии.  $a$  —  $B = 40$ ,  $b$  —  $150$  см. Зависимость от времени КПД (слева) и амплитуды парциальных волн на выходе МСЭ (1), отраженной (3) и прошедшей через нагрузку (4) (в центре), а также структура поля внутри нагрузки (5) в установившемся режиме (справа).



**Рис. 4.** Моделирование работы МСЭ на резонансную нагрузку, расположенную на малом расстоянии.  $a$  —  $B = 1$ ,  $b$  —  $3$  см;  $c$  — структура полей парциальных волн внутри пространства взаимодействия МСЭ в стационарном режиме генерации для случая ( $a$ ).



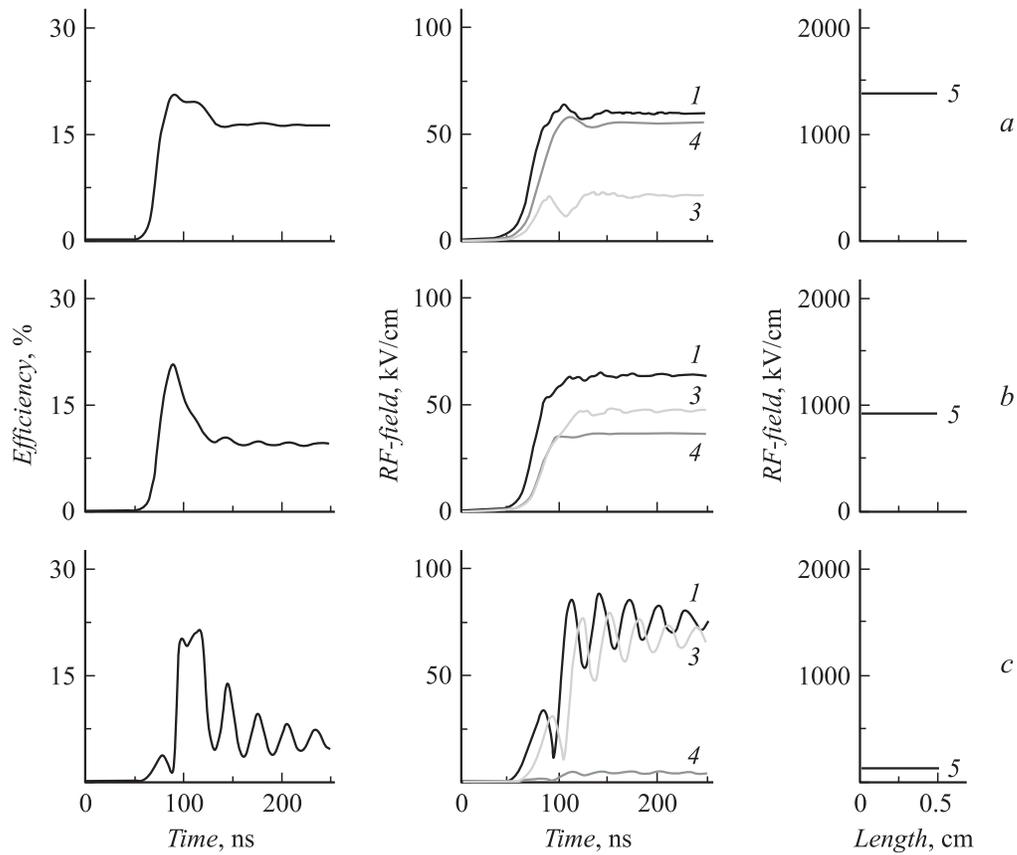
**Рис. 5.** Моделирование работы МСЭ на резонансную нагрузку при наличии 10% потерь поля в тракте. *a* —  $B = 3$ , *b* — 40, *c* — 150 см.

туд полей парциальных волн на выходе брэгговского резонатора (в сечениях 1 и 2 на рис. 1 соответственно), отраженной (в сечении 3), прошедшей (в сечении 4) и накопленной внутри тестового резонатора (сечение 5). Коэффициенты отражения от пластин принимались равными  $|R_{1,2}| = 0.9992$ , что, согласно (10), соответствует добротности тестового резонатора  $Q_{test} \approx 2000$ . В условиях экспериментов на ЛИУ-3000 [6,7] резонатор с такой добротностью предполагается использовать в качестве имитатора высокоградиентной структуры для проекта компактного линейного коллайдера CLIC (CERN) [1].

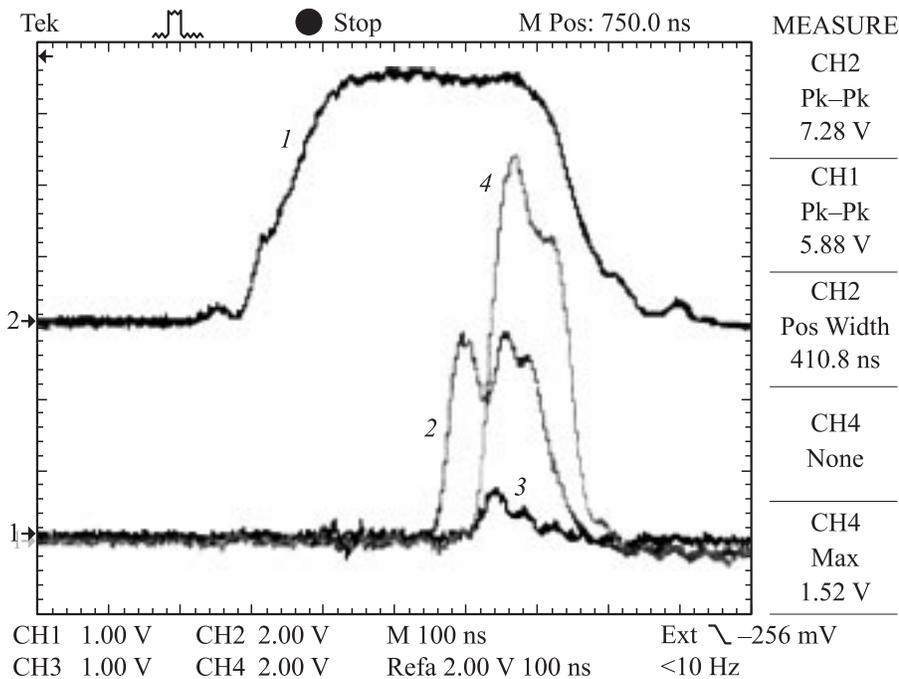
Моделирование показывает (рис. 3), что при точной настройке тестового резонатора на частоту генерации МСЭ при больших расстояниях до нагрузки  $B \gg L$  процесс накопления энергии в тестовом резонаторе сопровождается уменьшением амплитуды отраженной волны. В результате происходит просветление нагрузки и установление режима стационарной генерации в МСЭ. Накопленная величина поля в тестовом резонаторе превышает амплитуду поля падающей на нее волны примерно в  $\sqrt{Q}$  раз (рис. 3). Следует отметить, что при больших расстояниях между МСЭ и нагрузкой характер процесса установления автоколебаний в генераторе слабо зависит от времени задержки  $B$  и фазы отраженного от нагрузки сигнала (ср. рис. 3, *a* и 3, *b*).

В то же время при малых расстояниях до нагрузки (рис. 4) важным фактором, влияющим на режим работы МСЭ и процесс накопления в нагрузке ВЧ-энергии, является время задержки прихода отраженного сигнала (которое, очевидно, определяется расстоянием  $B$ ). Структура поля в рабочем (брэгговском) резонаторе в присутствии нагрузки может сильно изменяться (можно говорить о комбинированном резонаторе, формируемом брэгговским резонатором МСЭ и внешней нагрузкой). В таких условиях структура поля попутной волны может становиться более благоприятной для взаимодействия с электронами, и возможен рост КПД (ср. рис. 2 и 4, *c*). С другой стороны, изменение структуры поля приводит к изменению частоты „горячей“ моды в процессе генерации. В результате накопления СВЧ-энергии происходит не только в тестовом резонаторе, но и между брэгговским резонатором и нагрузкой (рис. 3, *a*). Существенное влияние отражений на структуру поля в МСЭ в этой области параметров может приводить также к смене стационарных режимов генерации режимами периодической и стохастической автомодуляции (рис. 4, *b*).

Положительным фактором, повышающим стабильность установления одночастотного режима в МСЭ, является наличие потерь в тракте между генератором и нагрузкой. Так, 10–15% потерь по амплитуде поля



**Рис. 6.** Моделирование работы МСЭ при различной величине отстройки резонансной частоты нагрузки. *a* —  $\Delta\omega/\bar{\omega} = 0.01$ , *b* — 0.05, *c* — 0.5% ( $B = 150$  см, потери поля в тракте — 10%).



**Рис. 7.** Начальные результаты экспериментального исследования работы МСЭ-генератора на высокочастотную нагрузку: 1 — ток на входе МСЭ (60 А/point), 2 — ВЧ-импульс на выходе МСЭ (5 MW/point), 3 — ВЧ-импульс, отраженный от тестового резонатора (15 MW/point), 4 — ВЧ-импульс, прошедший через тестовый резонатор (0.5 MW/point); горизонтальная развертка 100 ns/point.

практически не уменьшают величину накопленного поля в тестовом резонаторе, однако достаточны, чтобы отраженный сигнал не оказывал существенного влияния на работу МСЭ (рис. 5).

При отстройке частоты резонатора от частоты генерации МСЭ (рис. 6) происходит увеличение отражений от тестового резонатора. Это приводит к снижению КПД МСЭ и уменьшению поля, накапливаемого в тестовом резонаторе. Как уже отмечалось, настройка нагрузки на частоту генерации МСЭ осуществлялась путем изменения величин  $\varphi_{1,2}$ . Согласно (11), сдвиг частоты моды тестового резонатора от частоты собственной моды „холодного“ брэгговского резонатора составляет  $\Delta\omega/\bar{\omega} \approx (\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi$ . Моделирование показывает, что, если указанный сдвиг меньше величины обратной добротности тестового резонатора, т.е.  $\Delta\omega/\bar{\omega} \leq Q_{test}^{-1}$ , то отраженный сигнал достаточно мал, и его влияние на КПД генератора и накапливаемые в тестовом резонаторе поля незначительно (рис. 6, а). В то же время при большой отстройке частоты тестового резонатора возникают сильные отражения, существенно влияющие на процесс генерации МСЭ вплоть до срыва автоколебаний. В результате проникающая в тестовый резонатор ВЧ-энергия стремится к нулю (рис. 6, в).

## Выводы

Таким образом, проведенный анализ показывает возможность работы МСЭ-генератора на высокодобротную резонансную нагрузку при достаточно точном согласовании частот. Положительными факторами, уменьшающими влияние нагрузки на работу МСЭ, являются наличие временной развязки отраженного от нагрузки сигнала и небольших потерь в тракте.

На основе проведенных расчетов спроектирован стенд для тестирования свойств материалов под воздействием мощных СВЧ-импульсов на частоте 30 GHz [7], который включает в себя двухзеркальную линию передачи и необходимые преобразователи мод, осуществляющие транспортировку ВЧ-мощности от МСЭ в тестовый резонатор на расстояние более 2 м. Медный резонатор с рабочей модой  $TE_{0,1,1}$  и добротностью  $\sim 10^3$  спроектирован для моделирования тепловых нагрузок, возникающих в высокодобротной ускоряющей структуре проекта CLIC [1]. Профиль резонатора оптимизирован таким образом, чтобы увеличить магнитное поле в определенной зоне поверхности резонатора и при достигнутых параметрах МСЭ (мощность излучения 15–20 MW, длительность СВЧ-импульса 200 ns, ширина спектра излучения 8–12 MHz) обеспечить омический нагрев меди до 200°C в течение одного импульса. В ходе экспериментов предполагается изучить процесс деградации поверхности меди в последовательности большого числа (до  $10^6$ ) СВЧ-импульсов. При этом в соответствии с результатами проведенного выше моделирования пре-

дусмотрена механическая подстройка частоты тестового резонатора под частоту излучения МСЭ.

Результаты первых экспериментов, приведенные на рис. 7, подтверждают принципиальную возможность работы МСЭ-генератора на резонансную нагрузку. Видно, что при совпадении собственной частоты тестового резонатора с частотой генерации МСЭ в течение СВЧ-импульса происходит уменьшение отражения от нагрузки (просветление), увеличение прошедшего сигнала и, таким образом, накопление в нагрузке СВЧ-энергии.

Авторы выражают благодарность М.И. Петелину за полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (№ 04-02-17118, № 03-02-16530) и ИНТАС.

## Список литературы

- [1] Wuensch W., Wilson I., Braun H., Luong M. // Proc. of European Particle Accelerator Conf. „EPAC-2000“, Vienna, Austria, 2000. P. 271.
- [2] Wilson P.B. // Proc. of ITP conf. Santa Barbara, USA, 1997. P. 1; SLAC-PUB-7449. April. 1997.
- [3] Nezhevenko O.A., Hirshfield J.L., Yakovlev V.P. et al. // Proc. of European Particle Acceleration Conf. „EPAC-2000“, Vienna, Austria, 2000. P. 2087.
- [4] Песков Н.Ю., Гинзбург Н.С., Каминский А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 11. С. 19.
- [5] Ginzburg N.S., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 3574.
- [6] Kaminsky A.K., Ginzburg N.S., Elzhov A.V. et al. // Proc. of the 22<sup>nd</sup> Int. FEL Conf., Durham, USA, 2000. P. II-41.
- [7] Kaminsky A.K., Ginzburg N.S., Elzhov A.V. et al. // Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Workshop „Strong microwaves in plasma“, N. Novgorod, Russia, 2002. P. 184.
- [8] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Резников М.Г. „Резонатор“. А. С. № 720592. Бюл. № 9. 1980.
- [9] Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Petelin M.I. // IEEE. J. Quant. Electr. 1983. Vol. QE-19. N 3. P. 282.
- [10] Ginzburg N.S., Kaminsky A.K., Kaminsky A.A. et al. // IEEE. Trans. on Plasma Sci. 1998. Vol. 26. N 3. P. 542.
- [11] Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B. // Particle Accelerators. 1990. Vol. 33. P. 189.
- [12] Conde M.E., Bekefi G. // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67. N 22. P. 3082.
- [13] Peskov N.Yu., Samsonov S.V., Ginzburg N.S., Bratman V.L. // Nucl. Instr. and Math. in Phys. Res. A. 1998. Vol. A4-7. P. 107.
- [14] Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 5. С. 859.