

## ИНДУЦИРОВАННОЕ РАССЕЯНИЕ ВОЛН ВНУТРИ МЦР

*В.Л. Братман, А.А. Кузьмин, А.В. Савилов*

Для мазеров на циклотронном резонансе исследована возможность индуцированного комбинационного рассеяния встречной (по отношению к поступательному движению частиц) волны обратной связи в попутную волну более высокой частоты. Этот эффект может быть использован для получения мощного терагерцового излучения в генераторе миллиметрового диапазона длин волн.

*Ключевые слова:* Мазеры на циклотронном резонансе, волна обратной связи, индуцированное рассеяние, высокочастотная генерация.

### Введение

Индуцированное рассеяние волн на релятивистских электронных пучках с большим доплеровским преобразованием частоты представляет собой хорошо известный процесс [1], лежащий, по существу, в основе действия лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) [2–6]. В наиболее известной разновидности ЛСЭ в качестве волны накачки обычно используется сравнительно легко реализуемое пространственно-периодическое магнитное поле («волна с нулевой частотой») – поле ондулятора. При малых периодах накачки такое поле обладает однако очевидным недостатком: оно быстро спадает в поперечном направлении, что делает очень сложным использование ондуляторов с периодами менее 1 см. От этого недостатка свободна схема с бегущей волной накачки, но для ее реализации требуются очень высокие мощности накачки, которые, как правило, могут быть обеспечены лишь при использовании генераторов на сильноточных релятивистских электронных пучках или лазеров. Важным упрощением является схема [7–11], в которой один и тот же сильноточный электронный пучок используется как для возбуждения мощной волны накачки, так и для ее рассеяния с повышением частоты. Для накачки в таких системах [10] использовались наиболее простые и надежные релятивистские электронные СВЧ-генераторы типа релятивистских ламп обратной волны (ЛОВ), а рассеяние должно было происходить в отдельных секциях. Однако в экспериментах [10] было обнаружено мощное коротковолновое излучение в широком диапазоне частот, возникающее уже внутри самой релятивистской ЛОВ. Причиной этого излучения могла быть целая серия близких между собой и трудно различимых эффектов, а именно: индуцированное рассеяние внутри ЛОВ, происходящее благодаря наличию в ее

периодической электродинамической системе обнаруженных в [10] подходящих по структуре поля высокочастотных высокочастотных колебаний; прямое возбуждение этих колебаний одновременно с низкочастотной генерацией ЛОВ вследствие наличия поперечных осцилляций частиц в периодическом квазимагнитоэлектростатическом или квазиэлектростатическом поле, создаваемом при помещении периодической электродинамической системы ЛОВ в импульсное магнитное поле и поле сильнофокусированного электронного пучка, соответственно (механизм резонансной ондуляторной ЛБВ). Причина мощной высокочастотной генерации в ЛОВ не была окончательно выяснена, но из сказанного ясно, что ее картина является довольно сложной и трудно управляемой.

В настоящей работе рассмотрено рассеяние излучения внутри мазеров на циклотронном резонансе (МЦР). Следует отметить, что создание самого МЦР-генератора является, как правило, более трудной задачей, чем создание ЛОВ, но зато в таком генераторе может быть использован резонатор с гладкими стенками, что существенно упрощает возможность селективного возбуждения высокочастотных колебаний, а также облегчает последующую интерпретацию результатов. Рассмотрение индуцированного рассеяния внутри МЦР необходимо не только для оценки перспективности этого метода для генерации мощного коротковолнового (например, терагерцового) излучения, но и с точки зрения исследования спектра излучения МЦР.

Изложены результаты исследования двухчастотного генератора, в котором первичное излучение попутной электронам низкочастотной волны происходит за счет циклотронного механизма, а затем часть мощности генерируемой волны возвращается назад в рабочее пространство в виде встречной волны обратной связи. Встречное комбинационное рассеяние этой низкочастотной волны на электронном пучке и предлагается использовать для получения высокочастотного излучения.

## 1. Совместное возбуждение низкочастотной и высокочастотной волн

Исследуем совместную генерацию низкочастотной (НЧ) и высокочастотной (ВЧ) волн поперечно-электрического типа в МЦР-генераторе с высокочастотным резонатором (рис. 1). Для определенности примем, что резонатор образован отрезком волновода кругового сечения, ограниченным на катодном конце заградителем для обеих волн участком и выходным рефлектором, обеспечивающим коэффициенты отражения по мощности  $R_i$  и  $R_s$  для НЧ- и ВЧ-мод, соответственно. Предположим, что генератор возбуждается приосевым электронным пучком, все частицы которого двигаются по винтовым траекториям, совершая циклотронное вращение вокруг оси резонатора. Попутная электронам НЧ-волна «с» с частотой  $\omega_i$  и продольным волновым числом  $h_i$  (рис. 2) возбуждается электронным пучком в условиях циклотронного резонанса

$$\omega_i - h_i V_z \approx \Omega. \quad (1)$$

Здесь  $V_z$  и  $\Omega = (eB_0)/(mc\gamma)$  – продольная скорость и циклотронная частота электрона;  $e$ ,  $m$  и  $\gamma$  – его заряд, масса и лоренц-фактор, соответственно;  $c$  – скорость света;  $B_0$  – индукция магнитоэлектростатического поля.



Рис. 1. Схема двухчастотного генератора, в котором попутная (по отношению к поступательному движению электронов) низкочастотная волна возбуждается винтовым электронным пучком в условиях циклотронного резонанса; встречная низкочастотная волна обратной связи рассеивается на пучке в волну на более высокой частоте

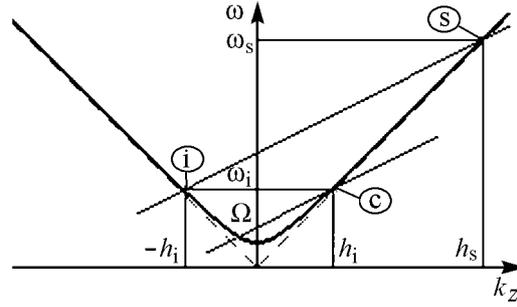


Рис. 2. Дисперсионная диаграмма для двойного резонанса: волна «с» находится в циклотронном резонансе с электронным пучком, часть её мощности за счёт элемента обратной связи преобразуется в волну накачки «i», которая резонансным образом рассеивается на том же пучке в высокочастотную волну «s»

Выходной рефлектор преобразует часть мощности попутной волны во встречную НЧ-волну обратной связи «i», рассеивающуюся на электронном пучке в попутную ВЧ-волну «s» (см. рис. 2), для которой выполнено условие комбинационного синхронизма

$$\omega_i + h_i V_z \approx \omega_s - h_s V_z. \quad (2)$$

Рассмотрим движение электрона в однородном магнитостатическом поле и поле волн «с», «i» и «s», вводя следующие комплексные комбинации поперечных компонент импульса электрона и поперечных компонент полей

$$p_+ = p_x + ip_y, \quad A_+ = A_x + iA_y, \quad E_+ = -\frac{1}{c} \frac{\partial A_+}{\partial t}, \quad B_+ = i \frac{\partial A_+}{\partial z}. \quad (3)$$

Пренебрегая продольным магнитным полем волн, представим уравнение движения электрона в виде

$$\frac{dp_+}{dz} = \frac{e}{c} \frac{dA_+}{dz} + i\Omega \frac{p_+}{V_z}, \quad (4)$$

$$\frac{dp_z}{dz} = -\frac{e}{c} \text{Re} \left( \frac{p_+}{p_z} \frac{\partial A_+^*}{\partial z} \right), \quad (5)$$

где  $A_+$  – суммарный (по трем волнам) вектор-потенциал, который вблизи пучка представляет собой комбинацию плоских волн

$$A_+ = -\frac{i}{2} \{ A_c \exp i(\omega_i t - h_i z) + A_i \exp i(\omega_i t + h_i z) + A_s \exp i(\omega_s t - h_s z) \}. \quad (6)$$

Подобно [4] и [12], произведем усреднение уравнений (4) и (5), считая, что взаимодействие электрона с несинхронными волнами приводит лишь к небольшим осцилляциям на фоне основного циклотронного движения. Учитывая эти осцилляции методом возмущений, запишем комплексный поперечный импульс электрона в следующем виде:

$$p_+ = -igmc(\alpha_i e^{i\theta_i} + \alpha_s e^{i\theta_s}) + p_c e^{i\varphi_c}. \quad (7)$$

Здесь  $\alpha = e|A|/(2mc^2)$  – нормированная амплитуда волны;  $\theta = \omega t - k_z z + \arg A$  – её фаза;

$$g = \frac{\omega_i + h_i V_z}{\omega_i + h_i V_z - \Omega} \approx \frac{\omega_s - h_s V_z}{\omega_s - h_s V_z - \Omega}$$

– фактор, описывающий увеличение амплитуды осцилляций электрона в поле несинхронных волн при приближении этих волн к циклотронному резонансу с электронами. Амплитуда и фаза циклотронной составляющей комплексного поперечного импульса описываются уравнениями

$$\frac{dp_c}{dz} = \alpha_c mc \frac{d\theta_c}{dz} \cos(\theta_c - \varphi_c), \quad \frac{d\varphi_c}{dz} = \frac{\Omega}{V_z} + \alpha_c \frac{mc}{p_c} \frac{d\theta_c}{dz} \sin(\theta_c - \varphi_c). \quad (8)$$

Усреднённое уравнение для энергии электрона  $W = mc^2\gamma$  представим в виде

$$mc^2 \frac{d\gamma}{dz} = \frac{e}{c} \operatorname{Re} \left\langle \frac{p_+}{p_z} \frac{\partial A_+^*}{\partial t} \right\rangle. \quad (9)$$

Выделим здесь составляющую, связанную с возбуждением НЧ-волны, и часть, описывающую рассеяние в ВЧ-волну:  $\gamma_0 - \gamma = (\gamma_0 - 1)(w_c + w_s)$ . Тогда из уравнения (9) находим

$$\frac{dw_c}{dz} = -\frac{\alpha_c \omega_i p_c}{cp_z(\gamma_0 - 1)} \cos \vartheta_c, \quad \frac{dw_s}{dz} = \alpha_s \alpha_i \frac{m(\omega_s - \omega_i)g}{p_z(\gamma_0 - 1)} \sin \vartheta_s. \quad (10)$$

Здесь введены медленные циклотронная и комбинационная фазы электрона. Их изменение описывается уравнениями

$$\frac{d\vartheta_c}{dz} = \frac{\omega_i - h_i V_z - \Omega}{V_z} - \frac{\alpha_c mc (\omega_i - h_i V_z)}{p_c V_z} \sin \vartheta_c, \quad \frac{d\vartheta_s}{dz} = \frac{\omega_s - \omega_i}{V_z} - (h_s + h_i). \quad (11)$$

Соответствующие начальные фазы  $\vartheta_c^{(0)}$  и  $\vartheta_s^{(0)}$  взаимно независимы, каждая из них равномерно распределена в интервале  $[0, 2\pi)$ . В правой части уравнения для комбинационной фазы  $\vartheta_s^0$  опущено слагаемое, пропорциональное амплитуде комбинационной волны  $\alpha_s \alpha_i$  и ответственное за так называемую «силовую» группировку электронов.

Усредняя уравнение для продольного импульса электрона в (5) по быстрым осцилляциям и интегрируя по  $z$ , находим изменение продольного импульса

$$\Delta p_z = -mc^2(\gamma_0 - 1) \left( \frac{h_i}{\omega_i} w_c + \frac{h_s + h_i}{\omega_s - \omega_i} w_s \right). \quad (12)$$

С квантовой точки зрения, первое слагаемое в правой части (12) соответствует однофотонному взаимодействию электрона с попутной НЧ-волной [12], в процессе которого переход электрона вниз на один уровень Ландау сопровождается излучением кванта с энергией  $\hbar\omega_i$  и импульсом  $\hbar h_i$ . Изменения энергии и продольного импульса электрона в результате такого процесса относятся как  $\Delta W/\Delta p_z = \omega_i/h_i$ . Второе слагаемое в правой части (12) описывает двухфотонный процесс рассеяния на электроне кванта встречной НЧ-волны в квант попутной ВЧ-волны [4]. Результатом этого процесса являются следующие изменения энергии и импульса частицы в каждом акте:  $\Delta W = \hbar(\omega_i - \omega_s)$  и  $\Delta p_z = \hbar(h_i + h_s)$ .

Согласно [13], уравнения возбуждения ВЧ- и НЧ-мод в рассматриваемой задаче имеют вид

$$\frac{d\alpha_s}{dz} + i\alpha_s \frac{d \arg A_s}{dz} = iG_s \alpha_i \left\langle g \frac{mc}{p_z} e^{-i\vartheta_s} \right\rangle_e, \quad (13)$$

$$\frac{d\alpha_c}{dz} + i\alpha_c \frac{d \arg A_c}{dz} = -G_i \left\langle \frac{p_c}{p_z} e^{-i\vartheta_c} \right\rangle_e, \quad (14)$$

$$\frac{d\alpha_i}{dz} + i\alpha_i \frac{d \arg A_i}{dz} = -iG_i \alpha_s \left\langle g \frac{mc}{p_z} e^{i\vartheta_s} \right\rangle_e, \quad (15)$$

где  $G_{i,s} = \kappa^2 e I / (2N m c^3 h_{i,s})$ ,  $N$  – норма волны,  $\kappa$  – поперечное волновое число (считаем поперечные структуры ВЧ- и НЧ-волн одинаковыми),  $I$  – величина электронного тока,  $\langle \dots \rangle_e$  – обозначает усреднение по ансамблю электронов. Из уравнений возбуждения (13)–(15) следуют уравнения баланса мощности в резонаторе и закон сохранения числа квантов при рассеянии

$$\frac{dP_c}{dz} = (\gamma_0 - 1) \frac{mc^2 I}{e} \frac{d \langle w_c \rangle_e}{dz}, \quad \frac{dP_s}{dz} + \frac{dP_i}{dz} = (\gamma_0 - 1) \frac{mc^2 I}{e} \frac{d \langle w_s \rangle_e}{dz}, \quad (16)$$

$$\frac{P_i}{\omega_i} + \frac{P_s}{\omega_s} = \text{const}, \quad (17)$$

где  $P_q = \omega_q k_{z,q} N |A_q|^2 / (4\kappa^2)$  – мощности, переносимые волнами ( $q = c, i, s$ ).

## 2. Анализ стартовых условий возбуждения высокочастотной волны

Если относительное изменение энергии электронов при их взаимодействии с волнами невелико, то уравнения движения могут быть сведены к форме, универсальной для всех приборов, основанных на инерционной группировке частиц [14]. Действительно, в таком приближении в правых частях уравнений (10) можно пренебречь изменением амплитудных множителей, преобразовав эти уравнения к следующему виду:

$$\frac{dw_{c,s}}{dz} = \text{Re}(a_{c,s} e^{i\vartheta_{c,s}}). \quad (18)$$

Здесь  $a_c = -\omega_i \beta_{\perp 0} \alpha_c / (c \beta_{z0} (\gamma_0 - 1))$ ,  $a_s = -i(\omega_s - \omega_i) g \alpha_s \alpha_i / (c \beta_{z0} \gamma_0 (\gamma_0 - 1))$  – нормированные амплитуды попутной низкочастотной и комбинационной волны соответственно. Для достаточно добротного резонатора амплитуды полей можно считать однородными (причем  $\alpha_i \approx \alpha_c$ ). Их величины связаны с усредненными потерями энергий электронов уравнениями баланса, которые следуют из (16) после интегрирования по всей длине резонатора с учётом (17), а также условий отражения волн на границах

$$\frac{\omega_i}{Q_i} W_i = \eta_{LF} IU, \quad \frac{\omega_s}{Q_s} W_s = \eta_{HF} IU. \quad (19)$$

Здесь  $U$  – ускоряющее напряжение;  $W_{i,s} = mc^2 N \omega_{i,s}^2 L \alpha_{i,s}^2 / (2\kappa c^2)$  – энергия, запасённая в НЧ- и ВЧ-моды резонатора;  $Q_q = 2\omega_q L \beta_{ph}^{(q)} / ((1 - R_q)c)$  – добротность моды,

$\beta_{ph}^{(q)} = \omega_q / (ch_q)$  ( $q = i, s$ ),  $L$  – длина резонатора;

$$\eta_{LF} = \langle w_c(L) \rangle_e - \frac{\omega_i}{\omega_s - \omega_i} \langle w_s(L) \rangle_e$$

– эффективность взаимодействия частиц с НЧ-модой с учётом отдачи, возникающей при рассеянии;

$$\eta_{HF} = \frac{\omega_s}{\omega_s - \omega_i} \langle w_s(L) \rangle_e$$

– эффективность взаимодействия частиц с ВЧ-модой.

Исследуем стартовые условия возникновения генерации ВЧ-волны на фоне установившейся низкочастотной циклотронной генерации, когда воздействие ВЧ-волны на циклотронную генерацию НЧ-волны пренебрежимо мало. Уравнения для фаз в пренебрежении силовой группировкой частиц приводятся в этом случае к универсальному виду

$$\frac{d\vartheta_{c,s}}{dz} = \delta_{c,s} + \nu_{c,s} w_{c,s}, \quad (20)$$

где  $\delta_c = \frac{\omega_i - \Omega_0}{V_{z0}} - h_i$ ,  $\delta_s = \frac{\omega_s - \omega_i}{V_{z0}} - (h_s + h_i)$  – начальные расстройки синхронизмов;  $\nu_c = \frac{\omega_i(\gamma_0 - 1)}{V_{z0}\gamma_0} ((\beta_{ph}^{(i)})^{-2} - 1)$ ,  $\nu_s = \frac{(\omega_s - \omega_i)(\gamma_0 - 1)}{V_{z0}\gamma_0} (\beta_{z0}^{-2} - 1)$  – параметры неизохронности.

Оценим условия, необходимые для эффективной циклотронной генерации НЧ-волны. Для формирования компактного электронного сгустка и оптимизации энергоотбора кинематическое и динамическое фазовые смещения на длине резонатора должны быть порядка  $\pi$  [14]:

$$\delta_c L \sim \pi, \quad |\nu_c| \Delta w L \sim \pi. \quad (21)$$

Оценивая изменение энергии электронов в поле попутной НЧ-волны как  $\Delta w \sim |a_c| L$ , получим оптимальное значение длины системы и расстройки циклотронного синхронизма

$$L \sim \sqrt{\pi / |\nu_c a_c|}, \quad \delta_c \sim \pi / L. \quad (22)$$

Решение стандартных асимптотических уравнений (18) и (20) для энергии  $w_s$  и фазы  $\vartheta_s$  в приближении малой амплитуды ВЧ-волны [14] дает следующее выражение для КПД в линейном режиме:

$$\eta_{HF} = \frac{\omega_s}{\omega_s - \omega_i} \frac{\nu_s |a_s|^2 L^3}{2} \left. \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=\delta_s L}, \quad (23)$$

где  $\varphi(\xi) = (1 - \cos \xi) / \xi^2$  – интенсивность спектра высокочастотной силы, действующей на электрон внутри резонатора. Линейный КПД генерации ВЧ-моды максимален, если начальная расстройка  $\delta_s \approx -5\pi/6L$ , при этом  $d\varphi/d\xi \approx 0.13$ .

Подстановкой (23) в (19) находим стартовый ток для генерации ВЧ-волны

$$\frac{eI_{st}}{mc^3} = \left( \frac{2N^2}{g^2 |\varphi'(\delta_s L)|} \frac{(1 - R_s)(1 - R_i)c^3 \omega_s}{\eta_{LF} \omega_i^2 (\omega_s - \omega_i)^2 L^3} \frac{(\beta_{ph}^{(i)})^3 \beta_{z0}^5 \gamma_0^3}{\beta_{ph}^{(s)} ((\beta_{ph}^{(i)})^2 - 1)^2 (1 - \beta_{z0}^2)(\gamma_0 - 1)} \right)^{1/2} \quad (24)$$

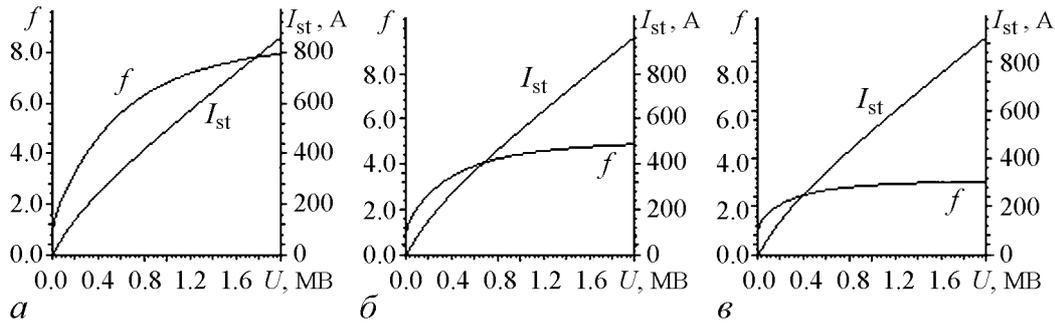


Рис. 3. Зависимости стартового тока высокочастотной генерации  $I_{st}$  и фактор преобразования частоты  $f = \omega_s/\omega_i$  от ускоряющего электроны напряжения  $U$  при значениях питч-фактора 0.7 (а), 1.0 (б) и 1.5 (в)

На рис. 3 показаны зависимости от ускоряющего электроны напряжения  $U$  стартового тока ВЧ-генерации  $I_{st}$  и преобразования частоты  $f = \omega_s/\omega_i$  при нескольких значениях питч-фактора  $\beta_{\perp 0}/\beta_{z0}$ . При получении этих кривых полагалось, что эффективность циклотронной генерации НЧ-волны составляет 10%. Считалось также, что фазовая скорость НЧ-волны достаточно сильно отличается от скорости света ( $\beta_{ph}^{(i)} = 1.4$ ), в то время как для ВЧ-волны полагалось  $\beta_{ph}^{(s)} = 1$ . Факторы обратной связи для обеих волн полагались одинаковыми и достаточно большими:  $R_i = R_s = 0.8$ .

Как видно из рис. 3, генерация ВЧ-моды при напряжении  $U = 500$  кВ возникает при токах, превышающих 300 А; при этом преобразование частоты относительно невелико ( $f = 2 \div 5$ ). Если же напряжение  $U = 1$  МВ, то необходим ток  $I > 450$  А (преобразование частоты при этом  $f = 7$ ). В принципе, стартовый ток генерации ВЧ-волны может быть снижен путем увеличения питч-фактора электронов. Однако такое увеличение ведет к снижению преобразования частоты.

### 3. Численное моделирование совместной генерации двух волн

Для более точного определения порога генерации ВЧ-моды, а также для исследования нелинейного режима вынужденного рассеяния было проведено численное моделирование уравнений (10), (11) и (13)–(15). При этом рассматривалась генерация волн  $TE_{11}$  приосевым электронным пучком. Фазовые скорости и факторы обратной связи волн были выбраны такими же, как в предыдущем разделе. Длина резонатора оптимизировалась для получения максимальной мощности излучения ВЧ-волны.

Выходные мощности НЧ-и ВЧ-волн в процессе установления стационарного режима приведены на рис. 4. Временную динамику в численной модели характеризует номер прохода волны по резонатору  $n$ . Переход на следующий проход описывается граничным условием

$$\alpha^{(n+1)}(z = 0) = \sqrt{R}\alpha^{(n)}(z = L). \quad (25)$$

Согласно расчетам, при напряжении 500 кВ и питч-факторе  $0.6 \div 0.7$  стартовый ток генерации ВЧ-волны оказывается равным 100 А. Расхождение с оценкой (24) из предыдущего раздела обусловлено тем, что при её получении длина резонатора оценивалась приближенно, причем исходя из условия оптимальной циклотронной

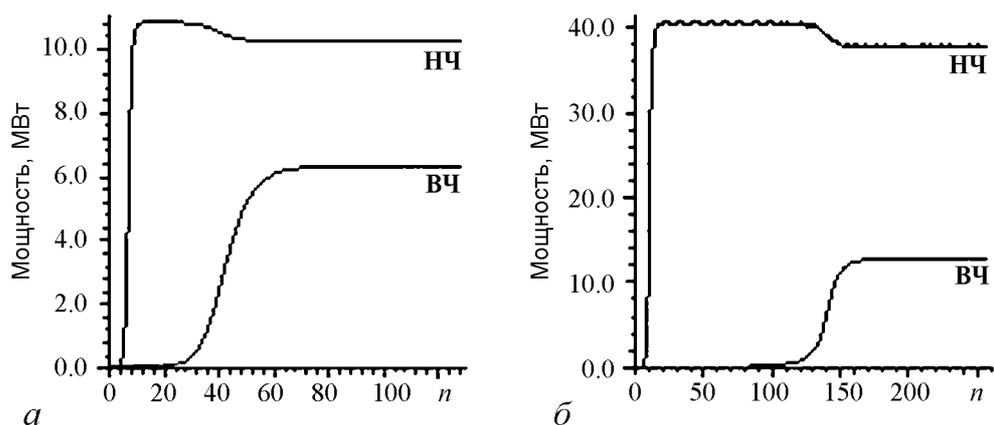


Рис. 4. Временная динамика выходной мощности высокочастотного и низкочастотного излучения в режимах  $U = 500 \text{ кВ}$ ,  $I = 200 \text{ А}$  (а) и  $U = 1 \text{ МВ}$ ,  $I = 250 \text{ А}$  (б)

генерации НЧ-волны. Выбор же оптимального режима ВЧ-генерации требует увеличения этой длины и, в соответствии с (24), это приводит к снижению стартового тока. При токе 200 А эффективность генерации НЧ-волны составляет 10%, преобразование частоты равно 5, а КПД генерации ВЧ-моды достигает 6%, что соответствует выходной мощности 12 МВт (рис. 4, а). Увеличение ускоряющего напряжения до 1 МВ приводит к росту как оптимального питч-фактора (до  $0.8 \div 0.9$ ), так и стартового тока генерации ВЧ-волны (до 200 А). При токе 250 А эффективности генерации НЧ- и ВЧ-волн составляют 15 и 5%, соответственно (рис. 4, б).

### Заключение

Использование в МЦР-генераторе встречной волны обратной связи для ее рассеяния на электронном пучке в попутную волну, излучаемую на более высокой частоте, может стать привлекательным методом повышения частоты генерации циклотронных мазеров. Согласно расчетам, в случае энергий частиц  $0.5 \div 1 \text{ МэВ}$  такой метод может обеспечить достаточно эффективную (с КПД, составляющим несколько процентов) ВЧ-генерацию на частоте, в пять раз превышающей частоту МЦР-генератора. Таким способом можно, например, получать мощное субмиллиметровое излучение в релятивистском МЦР-генераторе миллиметрового диапазона длин волн.

### Библиографический список

1. Motz H. Applications of the radiation from fast electron beams // J. Appl. Phys. 1951. Vol. 22. № 5. P. 527.
2. Pantell R.H., Soncini G., Puthoff H.E. Stimulated photon electron scattering // IEEE J. of Quant. Electr. 1968. QE-4, № 11. P. 905.
3. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Петелин М.И. Нелинейная теория вынужденного рассеяния волн на релятивистских электронных пучках // ЖЭТФ. 1979. Т. 76, вып. 3. С. 930.
4. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Петелин М.И., Сморгонский А.В. Убитроны и

- скаттроны // Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 1. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 217.
5. Free-electron generators of coherent radiation// Physics of quantum electronics. Vol.7-9 / Ed. S.F.Jacobs et al. Addison Wesley, 1980 (Vol. 7), 1982 (Vols 8-9).
  6. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах. Сборник статей. М.: Мир, 1983.
  7. Жуков П.Г., Иванов В.С., Рабинович М.С. и др. Вынужденное комптоновское рассеяние волн на релятивистском электронном пучке // ЖЭТФ. 1979. Т. 76, № 6, С. 2065.
  8. Carmel Y., Granatstein V.L., Gover A. Demonstration of a two-stage backward-wave-oscillator free-electron laser // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 51, № 7. P. 566.
  9. Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И. и др. Релятивистский генератор синхротронного излучения на резонансном рассеянии // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29, № 6. С. 1788.
  10. Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Smorgonsky A.V., Korovin S.D., Polevin S.D., Rostov V.V., Yalandin M.I. Stimulated scattering of waves in microwave generators with high-current relativistic electron beams: simulation of two-stage free-electron lasers // Int. J. Electron. 1985. Vol. 59. P. 24.
  11. Peskov N.Yu., Kaminsky A.K., Kalynov Yu.K., Kuzikov S.V., Kornishin S.Yu., Perelshtein E.A., Savilov A.V., Sedykh S.N. Sub-millimeter Bragg FEM based on moderately relativistic electron beam: project and first experiments // Proc. of 2007 Joint 32nd International Conference on Infrared Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics (Cardiff, UK, Sept. 2007), Vol. 2, P. 837.
  12. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Циклотронные и синхротронные мазеры // Релятивистская высокочастотная электроника. Вып.1. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 157.
  13. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: «Радио и связь», 1988.
  14. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Ковалёв Н.Ф., Нусинович Г.С., Петелин М.И. // В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький. Изд-во ИПФ АН СССР, 1979, с. 249.

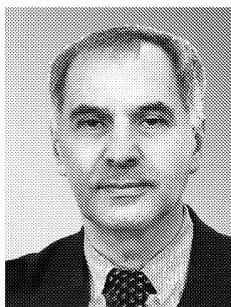
*Поступила в редакцию*    27.10.2008  
*После доработки*            17.02.2009

## INDUCED WAVES SCATTERING IN CYCLOTRON-RESONANCE MASERS

*V.L. Bratman, A.A. Kuzmin, A.V. Savilov*

For masers on cyclotron resonance it is researched a possibility of induced scattering of the opposite feedback wave on relativistic electron beam to the following wave of higher frequency. This effect can be used for powerful TGz-radiation receipt in a generator of millimeter range of wavelengths.

*Keywords:* Masers on cyclotron resonance, feedback wave, induced scattering, high-frequency generation.



*Братман Владимир Львович* – родился в 1945 году, окончил Горьковский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (1967). После окончания аспирантуры работал в НИИ «Салют», Научно-исследовательском радиофизическом институте и с 1977 года – в ИПФ РАН. Защитил кандидатскую (1977) и докторскую (1992) диссертации в области электроники. В настоящее время заведует отделом высокочастотной релятивистской электроники ИПФ РАН, профессор Нижегородского университета. Соросовский профессор, лауреат Государственной премии РФ. Член редакционной коллегии журнала «Известия вузов. Радиофизика».

E-mail: [bratman@appl.sci-nnov.ru](mailto:bratman@appl.sci-nnov.ru)  
Институт прикладной физики РАН  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46



*Кузьмин Алексей Александрович* – родился в Горьком (1986). Студент второго курса магистратуры Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (факультет «Высшая школа общей и прикладной физики»). Работает в ИПФ РАН.

Email: [alexeyhsgar@yandex.ru](mailto:alexeyhsgar@yandex.ru)  
Институт прикладной физики РАН  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46



*Савилов Андрей Владимирович* – родился в Рязанской обл. (1968), окончил с отличием Нижегородский государственный университет (Высшая школа общей и прикладной физики) в 1992 году. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИПФ РАН (1997) и доктора физико-математических наук (2005) в области физической электроники, физики плазмы и релятивистских электронных пучков. Работает в ИПФ РАН ведущим научным сотрудником отдела высокочастотной релятивистской электроники.

Опубликовал более ста научных статей по направлениям, указанным выше. Лауреат Премии и Медали РАН для молодых ученых (2000).

E-mail: [savilov@appl.sci-nnov.ru](mailto:savilov@appl.sci-nnov.ru)  
Институт Прикладной Физики РАН  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46