УДК 621.385

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО МАЗЕРА-УСИЛИТЕЛЯ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ ОКОЛО 30 ГГЦ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО УСКОРЕНИЮ ЧАСТИЦ

И. В. Бандуркин<sup>1\*</sup>, А. К. Каминский<sup>2</sup>, Э. А. Перельштейн<sup>2</sup>, Н. Ю. Песков<sup>1</sup>, А. В. Савилов<sup>1,3</sup>, С. Н. Седых<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;
 <sup>2</sup> Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна;
 <sup>3</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Исследована возможность создания мощного мазера-усилителя на свободных электронах с рабочей частотой около 30 ГГц, предназначенного для экспериментов по ускорению частиц. Рассмотрены различные режимы работы, способные обеспечить широкую мгновенную полосу усиления с высоким электронным коэффициентом полезного действия. Показано, что при использовании умеренно релятивистского электронного пучка, формируемого линейным индукционным ускорителем ЛИУ-3000, в ондуляторе с регулярной обмоткой возможно получение коэффициента усиления более 25 дБ и выходной мощности на уровне 20 МВт в частотной полосе с шириной до 20 % относительно рабочей частоты в так называемом режиме касания дисперсионных кривых. Применение профилированного ондулятора позволяет получить мощность излучения до 50 МВт в полосе с шириной более 50 % относительно рабочей частоты в режиме нерезонансного захвата и торможения частиц.

### ВВЕДЕНИЕ

Мазеры на свободных электронах (МСЭ) на основе интенсивных магнитонаправляемых релятивистских электронных пучков являются перспективными источниками когерентного микроволнового излучения, поскольку в таких приборах высокая выходная пиковая мощность сочетается с принципиальной возможностью широкополосной перестройки рабочей частоты. Высокоэффективный узкополосный мазер-генератор на свободных электронах с рабочей частотой около 30 ГГц был создан в течение последних лет в ходе совместных работ ОИЯИ (г. Дубна) и ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) [1, 2]. В нём при использовании электронного пучка с энергией электронов 0,8 МэВ, силой тока 200 А и длительностью 250 нс, формируемого линейным индукционным ускорителем ЛИУ-3000 (ОИЯИ), была получена мощность излучения на уровне 20 МВт при длительности импульса 200 нс и близкой к теоретическому пределу ширине спектра, достигающей 6÷7 МГц. Достигнутые мощность и стабильность узкополосного режима генерации позволили использовать этот МСЭ в ряде актуальных приложений [3, 4], в том числе для тестирования компонентов коллайдеров нового поколения. В частности, был исследован эффект циклического высокочастотного нагрева и деградации поверхности меди в тестовом резонаторе, моделирующем температурный режим высокоградиентной ускоряющей структуры проекта CLIC (Conseil Europeen pour la Recherche Nucléaire) [3]. Вместе с тем многие потенциальные приложения мощных сверхвысокочастотных источников, например их использование в системах питания высокоградиентных ускоряющих структур суперколлайдеров, требуют управления частотой и фазой излучения. Для этой цели в настоящее время при сотрудничестве ИПФ РАН и ОИЯИ разрабатывается проект мазера-усилителя на свободных электронах (МСЭ-усилителя) на основе

674

И. В. Бандуркин, А. К. Каминский, Э. А. Перельштейн и др.

<sup>\*</sup> iluy@appl.sci-nnov.ru

ускорителя ЛИУ-3000. Одним из основных требований к этому мазеру, предназначенному для экспериментов по ускорению частиц, является возможность оперативного управления частотой излучения, которая должна быть с высокой точностью согласована с частотой нагрузки (например, ускоряющей структуры). Ряд других приложений, в том числе задач радиотехники, локации и подавления, требует расширения полосы усиления. В данной работе исследована возможность создания мощного высокоэффективного МСЭ-усилителя с рабочей частотой около 30 ГГц на основе ускорителя ЛИУ-3000, предназначенного для указанных приложений. Проведено моделирование различных схем МСЭ с ведущим магнитным полем, способных обеспечить широкую мгновенную полосу усиления и, таким образом, оперативное управление частотой излучения. Следует отметить, что в предшествующих экспериментальных реализациях МСЭ-усилителей миллиметрового диапазона длин волн на основе магнитонаправляемых релятивистских электронных пучков было продемонстрировано достижение высокого электронного коэффициента полезного действия (КПД) на фиксированной частоте при использовании как регулярного [5], так и профилированного ондуляторов [6]. Широкая полоса усиления в так называемом режиме касания дисперсионных характеристик была получена в МСЭ сантиметрового диапазона длин волн, однако при относительно низкой эффективности [7]. В данной работе показана возможность совмещения в МСЭ широкой мгновенной полосы усиления с высокой эффективностью электронно-волнового взаимодействия. Продемонстрирована перспектива одновременного улучшения указанных характеристик при использовании режима захвата и торможения в ондуляторе с оригинальной формой профилирования.

### 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ

Условная схема МСЭ-усилителя с винтовым токовым ондулятором и ведущим магнитным полем  $\mathbf{B}_0$  изображена на рис. 1. Поперечные колебания в пучке возбуждаются на участке плавного пространственного включения поля ондулятора. В области взаимодействия, где амплитуда ондуляторного поля достигает постоянного значения, электроны движутся вблизи оси по винтовым траекториям с продольной скоростью  $v_{\parallel}$  (а при наличии разброса скоростей — вблизи таких траекторий) и взаимодействуют с попутной высокочастотной волной в условиях ондуляторного синхронизма



Рис. 1. Условная схема МСЭ-усилителя с обратным ведущим магнитным полем. Винтовая линия на оси изображает траекторию электрона

$$\omega - h v_{\parallel} \approx h_{\rm U} v_{\parallel},\tag{1}$$

где  $h_{\rm U} = 2\pi/d_{\rm U}, d_{\rm U}$  — период ондулятора,  $\omega$  и h — круговая частота и продольное волновое число синхронной волны. В качестве рабочего режима установки выбран режим обратного ведущего поля [5, 6], в котором направление вращения электронов в поле винтового ондулятора противоположно направлению их возможного (т. е. имеющего место в отсутствие ондулятора) вращения в ведущем магнитном поле. Данный режим обеспечивает высокое качество винтовых релятивистских электронных пучков и снижает чувствительность к разбросу их параметров, обеспечивая таким образом высокий электронный КПД. Эти выводы подтверждены предшествующим теоретическим анализом [8, 9], а также результатами экспериментального исследования усилительных [5, 6] и генераторных [1–4, 9] схем МСЭ. Процесс электронно-волнового взаимодействия в МСЭ в стационарном режиме может быть описан самосогласованной системой уравнений, состоящей из уравнений движения частиц

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{r}_{\perp}}{\mathrm{d}z} = \frac{\mathbf{p}_{\perp}}{p_{\parallel}}, \ \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}z} = \frac{1}{v_{\parallel}}, \ \frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}z} = -\frac{e}{v_{\parallel}}\mathbf{E} - \frac{e}{cv_{\parallel}}\left[\mathbf{v}, \mathbf{B} + \mathbf{B}_{\mathrm{st}}\right]$$
(2)

и уравнения возбуждения

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}z} = 2i \frac{I_{\mathrm{beam}}}{chR^2 N_{\perp}} \left\langle \frac{\mathbf{p}_{\perp} \mathbf{A}_0^*}{p_{\parallel}} \exp(ihz - i\omega t) \right\rangle \tag{3}$$

для плавно меняющейся комплексной амплитуды *a* высокочастотной волны. Здесь ось *z* декартовой системы координат (x, y, z) направлена против магнитного поля  $\mathbf{B}_0$ ,  $\mathbf{r}_{\perp} = (x, y)$ , t — время,  $p_{\parallel}$  — проекция импульса частицы на ось *z*,  $\mathbf{p}_{\perp}$  — поперечная составляющая импульса, *e* — элементарный заряд, *c* — скорость света в вакууме,  $\mathbf{v}$  — скорость частицы, звёздочка обозначает комплексное сопряжение,  $\mathbf{B}_{st} = \mathbf{B}_U + \mathbf{B}_0$  — суммарная индукция поля ондулятора  $\mathbf{B}_U$  и продольного фокусирующего магнитного поля  $\mathbf{B}_0$ , **E** и **B** — напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля рабочей волны соответственно, т.е.

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \ \mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \ \mathbf{A} = \operatorname{Re}\left[a(z)\mathbf{A}_0(\mathbf{r}_{\perp})\exp(i\omega t - ihz)\right],$$
(4)

 $\mathbf{A}_{0}(\mathbf{r}_{\perp}) = -R \operatorname{rot} [J_{m}(\nu_{n}r_{\perp}/R) \exp(-im\varphi) \mathbf{z}_{0}]$  — мембранная функция для рабочей моды типа  $\operatorname{TE}_{m,n}, \mathbf{z}_{0}$  — единичный вектор, направленный вдоль оси  $z, \varphi$  — полярный угол в плоскости  $(x,y), J_{m}(x)$  и  $\nu_{n}$  — функция Бесселя *m*-го порядка и *n*-й нуль её производной соответственно, R — радиус волновода,  $I_{\text{beam}}$  — сила тока пучка,  $N_{\perp} = (\nu_{n}^{2} - 1)J_{m}^{2}(\nu_{n})/2$  — поперечная норма рабочей моды, а угловые скобки означают усреднение по всему ансамблю электронов. В представленном далее моделировании магнитное поле ондулятора  $\mathbf{B}_{U}$  находилось с помощью закона Био—Савара—Лапласа путём интегрирования вкладов от токов в его обмотках, распределение которых принималось близким к экспериментальному.

На входе в пространство взаимодействия для уравнений (2) выполнены граничные условия

$$\mathbf{r}_{\perp}\big|_{z=0} = 0, \qquad (\omega t)\big|_{z=0} \in [0, 2\pi), \qquad \sqrt{p_{\perp}^2 + p_{\parallel}^2 + m_{\rm e}^2 c^4}\Big|_{z=0} = m_{\rm e} c^2 + eU,$$

$$p_{\perp} / p_{\parallel}\Big|_{z=0} \in [0, \operatorname{tg}(\alpha_{\rm spr}/2)], \tag{5}$$

где  $m_{\rm e}$  — масса электрона, U — ускоряющее напряжение пучка,  $\alpha_{\rm spr}$  — максимальный угол разброса начальных скоростей (для идеального пучка  $\alpha_{\rm spr} = 0$ ). Равномерное распределение времени влёта частиц по периоду колебаний соответствует отсутствию начальной группировки частиц и нулевому высокочастотному току в правой части уравнения (3). Для уравнения возбуждения граничное условие имеет вид

$$a(0) = a_0 \tag{6}$$

и определяется мощностью входного сигнала  $P_0 = \omega h R^2 N_{\perp} |a_0|^2 / 4.$ 

## 2. МАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В РЕЖИМЕ КАСАНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ

Моделирование МСЭ-усилителя проводилось при параметрах, близких к условиям экспериментов на базе ускорителя ЛИУ-3000. В данных экспериментах электронный пучок с энергией

И. В. Бандуркин, А. К. Каминский, Э. А. Перельштейн и др.

676

Рис. 2. Дисперсионная диаграмма, иллюстрирующая работу тридцатигигагерцевого МСЭусилителя в так называемом режиме касания. Взаимное расположение дисперсионных кривых волноводной моды  $TE_{1,1}$  (сплошная линия) и электронного пучка (штриховая линия) обусловливает широкую полосу усиления входного сигнала и слабую чувствительность к начальному разбросу скоростей электронов пучка



электронов 0,8 МэВ, силой тока 200 А и длительностью 250 нс, формируемый этим ускорителем, инжектируется в пространство взаимодействия МСЭ и фокусируется соленоидом свеличиной магнитного поля  $\mathbf{B}_0$  до 0,5 Тл. Внутри соленоида расположен ондулятор с периодом  $d_U = 6$  см, обмотка которого выполнена в виде двойной бифилярной спирали. Плавное пространственное включение поля ондулятора реализуется на первых шести периодах путём распределённого перемыкания токов противоположного направления. В регулярной части амплитуда поперечной составляющей магнитного поля  $B_U$  на оси составляет примерно 0,1÷0,15 Тл. В качестве рабочей волны в установке выбрана низшая волна типа  $TE_{1,1}$  цилиндрического волновода.

В режиме касания дисперсионных характеристик параметры системы подбирались таким об-



Рис. 3. Моделирование МСЭ-усилителя в режиме касания дисперсионных кривых, оптимизированного для достижения максимального электронного КПД: панель (a) — зависимость амплитуды ондуляторного магнитного поля  $B_{\rm U}$  и мощности синхронной высокочастотной волны P от продольной координаты z на центральной частоте 29 ГГц (сверху показан профиль обмотки ондулятора); панель ( $\delta$ ) — зависимость мощности  $P_{\rm out}$  на выходе из пространства взаимодействия (длина этого пространства l = 1,4 м) от частоты входного сигнала



И. В. Бандуркин, А. К. Каминский, Э. А. Перельштейн и др.

677



Рис. 4. Моделирование МСЭ-усилителя в режиме касания дисперсионных кривых, оптимизированного на достижение широкой полосы усиления. Зависимость мощности  $P_{\rm out}$  на выходе пространства взаимодействия (l = 1 м) от частоты входного сигнала при различных значениях силы электронного тока  $I_{\rm beam}$  и величинах разброса начальных скоростей электронов  $\alpha_{\rm spr}$ :  $I_{\rm beam} = 150$  A,  $\alpha_{\rm spr} = 5^{\circ}$  — кривая 1;  $I_{\rm beam} = 150$  A,  $\alpha_{\rm spr} = 10^{\circ}$  — кривая 2;  $I_{\rm beam} = 150$  A,  $\alpha_{\rm spr} = 20^{\circ}$  — кривая 3;  $I_{\rm beam} = 200$  A,  $\alpha_{\rm spr} = 10^{\circ}$  — кривая 4

разом, чтобы продольная скорость частиц в пространстве взаимодействия совпадала с групповой скоростью рабочей волны, которая при R = 0.93 см равна  $v_{\rm gr} \approx 0.95 c$  (рис. 2). При этом условие резонанса (1) оказывается выполненным в широком диапазоне частот, что обусловливает привлекательность данного режима с точки зрения расширения полосы усиления в МСЭ при использовании ондулятора с регулярной обмоткой. Кроме того, за счёт касания дисперсионных кривых снижается критичность системы к разбросу скоростей электронов в пучке.

Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4. Настройка режимов осуществлялась изменением величины поля ондулятора и небольшой вариацией энергии частиц. При оптимизации МСЭ на центральной частоте 29 ГГц ( $B_U = 0,1$  Тл,  $B_0 = 0,15$  Тл, U = 0,85 MB) при мощности входного сигнала 30 кВт и силе тока пучка 150 А коэффициент усиления составлял около 30 дБ на длине 140 см, а мощность волны при этом возрастала до  $28\div30$  МВт (рис. 3). При несколько меньшем значении продольной скорости (т. е. ондуляторном поле  $B_U = 0,11$  Тл и энергии частиц 0,82 МэВ) наблюдалось значительное расширение полосы усиления, сопровождаемое сокращением оптимальной длины пространства взаимодействия до 1 м и некоторым снижением максимального КПД примерно до  $10\div15$  %. Как показало моделирование, коэффициент усиления составил более 25 дБ в частотном диапазоне  $27\div32$  ГГц при максимальной выходной мощности в центре полосы около 20 МВт (рис. 4). Увеличение силы тока пучка до 200 А приводило к увеличению коэффициента усиления до 28 дБ и некоторому смещению полосы усиления в низкочастотную область  $24\div30$  ГГц.

Учёт начального разброса скоростей электронов в рамках описанной в разделе 1 модели осуществлялся путём разбиения пучка на фракции с одинаковой энергией частиц, но различными углами влёта в ондулятор. Моделирование показывает (рис. 4), что вплоть до угла разброса начальных скоростей  $\alpha_{\rm spr} = 10^{\circ}$  КПД усилителя практически не меняется. Это подтверждает достоинства рассмотренной схемы МСЭ с точки зрения низкой чувствительности к разбросу параметров пучка.

## 3. МАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В РЕЖИМЕ НЕРЕЗОНАНСНОГО ЗАХВАТА И ТОРМОЖЕНИЯ ЧАСТИЦ

Режим нерезонансного захвата частиц реализуется в МСЭ на основе ондулятора с уменьшающимся вдоль координаты z периодом [10]. При этом в начале пространства взаимодействия период превышает значение, соответствующее резонансу (1), и, таким образом, с уменьшением периода резонансное взаимодействие реализуется в некоторой точке внутри системы (рис. 5). В этой области за счёт быстрого роста амплитуды рабочей волны частицы захватываются её полем и при дальнейшем уменьшении периода теряют энергию аналогично тому, как это происходит

678

И. В. Бандуркин, А. К. Каминский, Э. А. Перельштейн и др.



Рис. 5. Дисперсионная диаграмма, иллюстрирующая работу МСЭ-усилителя в режиме нерезонансного захвата и торможения частиц. Положение дисперсионной характеристики электронного пучка в начале пространства взаимодействия (прямая 1) далеко от резонанса с рабочей высокочастотной волной. При уменьшении периода ондулятора и приближении частиц к резонансу происходит захват частиц полем волны (прямая 2), а при дальнейшем профилировании ондулятора пучок отдаёт энергию полю (прямые 3 и 4). Толстая кривая соответствует волноводной моде  $TE_{1,1}$ 

в обычном режиме с профилированными параметрами. Нужно отметить, что предложенный в работах [10–12] для подобных режимов термин «нерезонансный захват» используется в том смысле, что отражает отсутствие резонанса на входе в систему. Более того, положение «резонансной точки» не фиксировано и внутри системы: каждой описанной в разделе 2 фракции соответствует своя точка, где выполняется условие резонанса (1) и происходит захват этой фракции. Таким образом, данный термин подчёркивает отличие от традиционных резонансных режимов захвата, в которых волна синхронна с частицами с самого начала взаимодействия. Экспериментальное исследование МСЭ-усилителя в режиме резонансного захвата на основе ускорителя ЛИУ-3000 описано в работах [6, 13]. Использование такой разновидности режима захвата позволяет увеличить КПД и выходную мощность усилителя, но, очевидно, делает весьма узкой частотную полосу в резонансной системе.

В свою очередь, основными преимуществами режима нерезонансного захвата являются распирение полосы усиления (например, по сравнению с режимом касания), а также дальнейшее снижение критичности к разбросу скоростей электронов. В самом деле, изменение частоты рабочей волны теперь приводит лишь к изменению положения резонансной области, в которой реализуется захват частиц, но практически не влияет на эффективность захвата. То же самое можно сказать о вариациях продольной скорости в различных фракциях пучка. Единственным требованием для эффективного захвата является достаточная скорость роста амплитуды поля в резонансной области, которая, в свою очередь, определяется током электронного пучка. Последнее означает, что в данном режиме существует некоторое пороговое значение электронного тока, ниже которого захвата и усиления не происходит. Ещё одним немаловажным достоинством режима, унаследованным им от традиционного резонансного режима с профилированными параметрами, является достаточно высокий КПД, возможный благодаря длительному торможению частиц в условиях «подстраивающегося» под уменьшающуюся энергию электронов условия резонанса (1). Однако как показывают расчёты, для эффективной реализации этого режима необходимо увеличение длины системы.



Рис. 6. Моделирование МСЭ-усилителя в режиме нерезонансного захвата. Зависимость мощности рабочей волны P от продольной координаты z при различных частотах входного сигнала f ( $I_{\text{beam}} = 150 \text{ A}$ ). Также показаны профиль обмотки ондулятора и соответствующая зависимость амплитуды ондуляторного магнитного поля  $B_{\text{U}}$ 



Рис. 7. Зависимости выходной мощности от частоты в режиме нерезонансного захвата при различных значениях угла, характеризующего разброс скоростей электронов  $\alpha_{\rm spr}$ :  $I_{\rm beam} = 150$  A (a) и 200 A (b)



Рис. 8. Результаты моделирования МСЭ-усилителя в режиме нерезонансного захвата, демонстрирующие пороговый характер зависимости электронного КПД  $\eta$  от силы тока пучка (частота входного сигнала f = 30 ГГц, начальный угол разброса скоростей  $\alpha_{\rm spr} = 10^\circ$ )

И. В. Бандуркин, А. К. Каминский, Э. А. Перельштейн и др.

Результаты моделирования МСЭ-усилителя на основе ускорителя ЛИУ-3000 при использовании режима нерезонансного захвата представлены на рис. 6-8. Начальный и конечный периоды ондулятора на участке профилирования составили 8 см и 3,5 см соответственно. При этом согласно закону Био-Савара-Лапласа при моделировании учитывалось спадание амплитуды ондуляторного поля с уменьшением периода обмотки. Как уже отмечалось выше, длина пространства взаимодействия по сравнению с режимом касания увеличилась в два раза и достигла 2 м. При этом в оптимальном режиме ( $B_{\rm U} = 0.11$  Тл,  $B_0 = 0.15$  Тл, U = 0.82 MB) при входной мощности 30 кВт и силе тока 150 А коэффициент усиления превысил 31 дБ в ультраширокой частотной полосе 18÷42 ГГц, а КПД усилителя составил более 35 %. Увеличение силы тока пучка до 200 А приводит к дальнейшему увеличению коэффициента усиления до 33 дБ практически во всей полосе при КПД более 40 %. Кроме того, с ростом электронного тока заметно снижение чувствительности усилителя к разбросу скоростей (рис. 7), что также объясняется зависимостью инкремента роста амплитуды поля при захвате различных фракций пучка от удельного электронного тока этих фракций. При уменьшении тока пучка согласно проведённому выше анализу происходит резкое уменьшение эффективности данной схемы МСЭ (рис. 8), при этом пороговое значение тока равняется 50 А.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ подтверждает перспективность использования МСЭ на основе умеренно релятивистских магнитонаправляемых электронных пучков для получения высокого коэффициента усиления (на уровне 25÷30 дБ) в широкой частотной полосе (до 15÷20 % от рабочей частоты). Важно подчеркнуть, что указанные параметры усиления могут быть реализованы в режиме касания дисперсионных кривых в регулярном волноводе, т.е. без привлечения специальных электродинамических элементов (например, волноводов с высоким поглощением [14, 15], профилированных волноводов [16], винтовых структур [17, 18] и др.), используемых для увеличения коэффициента усиления и расширения полосы усиления в мощных гиролампах бегущей волны. Другим важным достоинством МСЭ согласно проведённому моделированию является его низкая чувствительность к начальному разбросу скоростей частиц в релятивистских электронных пучках, в частности в режимах с обратным ведущим полем, что позволяет обеспечить относительно высокий электронный КПД. В то же время использование режима нерезонансного захвата в ондуляторе с уменьшающимся по длине периодом позволяет ещё более уменьшить чувствительность МСЭ к начальному разбросу скоростей в пучке, увеличить выходную мощность излучения и реализовать ультраширокую полосу усиления до 80 % при двукратном увеличении длины пространства взаимодействия. В настоящее время проводятся экспериментальные исследования МСЭ-усилителя на основе ускорителя ЛИУ-3000.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 14–19–01723).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Песков Н. Ю., Гинзбург Н. С., Каминский А. А. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 11. С. 19.
- Каминский А. К., Перельштейн Э. А., Седых С. Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 5. С. 37.
- Ginzburg N. S., Golubev I. I., Kaminsky A. K., et al. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2011. V. 14. Art. no. 041002.

И. В. Бандуркин, А. К. Каминский, Э. А. Перельштейн и др.

681

- Баев В. Г., Вдовин В. А., Вихарев А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 719.
- 5. Conde M. E., Bekefi G. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67, No. 22. P. 3082.
- 6. Kaminsky A. A., Kaminsky A. K., Rubin S. B. // Particle Accelerators. 1990. V. 33. P. 189.
- Whyte C. G., Jaroszynski D. A., Cross A. W., et al. // Nuclear Instr. and Meth. Phys. Res. A. 2000. V. 445, No. 1-3. P. 272.
- Peskov N. Yu., Samsonov S. V., Ginzburg N. S., Bratman V. L. // Nuclear Instr. and Meth. Phys. Res. A. 1998. V. 407, No. 1-3. P. 107.
- Ginzburg N. S., Kaminsky A. K., Peskov N. Yu., et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1998. V. 26, No. 3. P. 536.
- Savilov A. V., Bandurkin I. V., Peskov N. Yu. // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 2003. V. 507, No. 1-2. P. 158.
- 11. Savilov A. V. // Phys. Rev. E. 2001. V. 64. Art. no. 066501.
- 12. Bandurkin I. V., Phelps A. D. R., Savilov A. V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. P. 929.
- Kaminsky A. A., Kaminsky A. K., Sarantsev V. P., et al. // Nuclear Instr. and Meth. Phys. Res. A. 1994. V. 341, No. 1–3. P. 105.
- 14. Chu K. R., Chen H. Y., Hung C. L., et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 4760.
- 15. Park G. S., Choi J. J., Park S. J., et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 2399.
- Pershing D. E., Nguyen K. T., Calame J. P., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 3. P. 947.
- 17. Bratman V. L., Cross A. W., Denisov G. G., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 2746.
- Братман В. Л.,Денисов Г. Г., Самсонов С. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 2. С. 104.

Поступила в редакцию 25 мая 2015 г.; принята в печать 7 августа 2015 г.

# MODELING OF A HIGH-POWER WIDEBAND FREE-ELECTRON MASER AMPLIFIER WITH AN OPERATING FREQUENCY OF 30 GHz TO BE USED IN PARTICLE ACCELERATION EXPERIMENTS

I. V. Bandurkin, A. K. Kaminsky, E. A. Perelshteyn, N. Yu. Peskov, A. V. Savilov, and S. N. Sedykh

We study the possibility to develop a high-power free-electron maser amplifier with an operating frequency of 30 GHz to be used in particle acceleration experiments. Various operation regimes are considered, which are capable of ensuring a wide instantaneous amplification band with a high electron efficiency. It is shown that it is possible to achieve a gain ratio of more than 25 dB and an output power of 20 MW in a frequency band with a width of up to 20% of the operating frequency in the so-called dispersion curve contact regime by using a moderately relative electron beam formed by the LIU-3000 induction accelerator in an undulator with aregular winding. Application of the profiled undulator allows one to achieve a radiation power of up to 50 MW in a band having a width of more than 50% of the operating frequency in the regime of non-resonant capture and deceleration of particles.