

УДК 621.385

РАЗРАБОТКА МОЩНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ ВБЛИЗИ 30 ГГц: МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАЧАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

И. В. Бандуркин^{1*}, *Д. Е. Донец*², *А. К. Каминский*², *С. В. Кузиков*¹,
*Э. А. Перельштейн*², *Н. Ю. Песков*¹, *А. В. Савилов*¹, *С. Н. Седых*²

¹ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

² Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

Разработка мощного широкополосного усилителя на основе мазера на свободных электронах (МСЭ), работающего в частотном диапазоне 30 ГГц и предназначенного для ускорения частиц, ведётся на основе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000, формирующего электронный пучок с энергией электронов 0,8 МэВ, током 250 А и длительностью импульсов 200 нс. В качестве рабочего выбран режим касания дисперсионных кривых, который, согласно проведённому моделированию, позволяет обеспечить мгновенную полосу усиления около 5÷7 % в ондуляторе с регулярной обмоткой при мощности выходного излучения на уровне 20 МВт и коэффициенте усиления 30÷35 дБ. В статье представлены результаты первых экспериментов по исследованию данной схемы МСЭ, в которых в диапазоне в окрестности 30 ГГц достигнут указанный уровень мощности и продемонстрирована быстрая перестройка в полосе изменения частоты задающего магнетрона ±0,5 ГГц. Моделирование показывает, что использование режима нерезонансного захвата и торможения, реализуемого в ондуляторе с профилированными параметрами, позволяет в условиях экспериментов на ЛИУ-3000 ожидать увеличения мощности излучения до 35÷40 МВт при одновременном расширении полосы усиления до 30 %.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэффективный узкополосный мазер на свободных электронах (МСЭ) реализован в течение последних лет в совместных экспериментах ОИЯИ и ИПФ РАН на основе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 с энергией электронов 0,8 МэВ, током 250 А, длительностью импульса 200 нс и частотой следования импульсов до 1 с⁻¹ (ОИЯИ) [1, 2]. В настоящее время этот МСЭ работает в генераторном режиме в диапазоне в окрестности 30 ГГц с мощностью излучения на уровне 15÷20 МВт при длительности импульса 200 нс и близкой к теоретическому пределу ширине спектра до 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 электрон-позитронного коллайдера CLIC (Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire, CERN).

Вместе с тем для многих потенциальных приложений мощных релятивистских мазеров и, в частности, их использования в системах питания высокоградиентных ускоряющих структур коллайдеров требуется управление частотой и фазой излучения. Для этой цели в сотрудничестве ИПФ РАН и ОИЯИ начата разработка МСЭ-усилителя на основе ускорителя ЛИУ-3000. Одним из основных требований, предъявляемых к МСЭ в рамках указанных приложений, является возможность оперативного управления частотой излучения, которая должна с высокой точностью быть согласована с частотой нагрузки (например, ускоряющей структуры). Для ряда

* iluy@appl.sci-nnov.ru

других прикладных задач, в том числе задач радиотехники, локации, подавления и др., требуется расширение полосы усиления.

В данной статье приведены результаты моделирования высокоэффективных широкополосных схем МСЭ-усилителей в частотном диапазоне в окрестности 30 ГГц. Показана возможность обеспечения широкой мгновенной полосы усиления и, таким образом, оперативного управления частотой излучения в сочетании с высоким (мультимегаваттным) уровнем мощности выходного излучения в так называемом режиме касания дисперсионных кривых. Продемонстрирована перспектива одновременного улучшения указанных характеристик при использовании режима захвата и торможения, реализуемого в ондуляторе с оригинальным законом профилирования. Обсуждаются основные параметры для экспериментальной реализации данных схем на основе релятивистского электронного пучка, формируемого ускорителем ЛИУ-3000, и первые эксперименты по их исследованию.

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Условная схема МСЭ-усилителя с винтовым токовым ондулятором и ведущим магнитным полем изображена на рис. 1а. Поперечные колебания возбуждаются в электронном пучке 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 $v_{\parallel} = \beta_{\parallel}c$ (а при наличии разброса скоростей — вблизи таких траекторий) и взаимодействуют с попутной волной в условиях ондуляторного синхронизма (см. рис. 2а):

$$\omega - hv_{\parallel} \approx h_{\text{U}}v_{\parallel}, \quad (1)$$

где $h_{\text{U}} = 2\pi/d_{\text{U}}$, d_{U} — период ондулятора, ω и h — частота и продольное волновое число синхронной волны соответственно, c — скорость света.

Численные расчёты проводились в рамках стационарной модели [5], основанной на трёхмерных релятивистских уравнениях движения электронов в статическом (ведущем и ондуляторном) магнитном поле и электромагнитном поле рабочей волны, определяемом в одномодовом приближении скалярной комплексной амплитудой, а также на уравнении возбуждения для амплитуды этой волны. Параметры моделирования выбирались близкими к условиям экспериментов, проводимых на базе ускорителя ЛИУ-3000 (см. далее раздел 3). Были исследованы различные режимы работы, в которых можно обеспечить высокую мощность излучения в сочетании с широкой мгновенной полосой усиления.

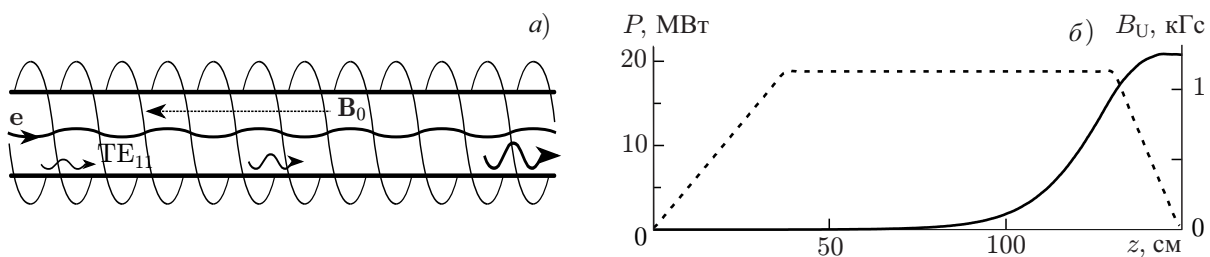


Рис. 1. Условная схема МСЭ-усилителя с винтовым ондулятором и обратным ведущим магнитным полем B_0 (а). Моделирование МСЭ-усилителя в режиме касания дисперсионных кривых (б): зависимости амплитуды ондуляторного поля B_{U} (штриховая линия) и мощности синхронной волны P (сплошная линия) от продольной координаты z при оптимальных параметрах (ускоряющее напряжение $U = 800$ кВ, ток пучка $I_{\text{beam}} = 175$ А, $B_0 = 1,5$ кГс, мощность входного излучения $P_{\text{in}} = 4$ кВт, частота излучения $f = 30$ ГГц, $d_{\text{U}} = 6$ см)

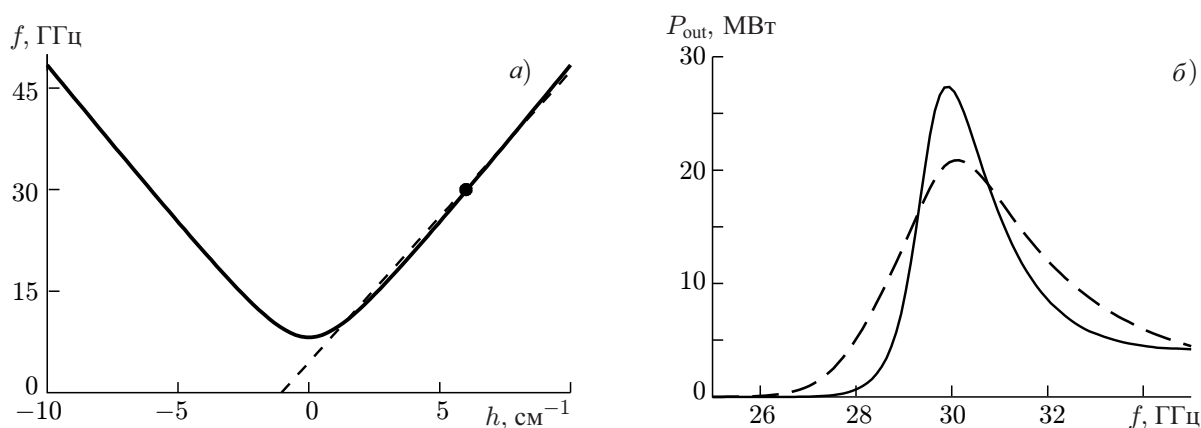


Рис. 2. Дисперсионная диаграмма, иллюстрирующая работу МСЭ-усилителя с рабочей частотой вблизи 30 ГГц в режиме касания: сплошная линия — дисперсионная кривая рабочей волны $TE_{1,1}$, штриховая — электронного пучка (а). Зависимость мощности выходного излучения МСЭ P_{out} от частоты входного сигнала в данном режиме при оптимальных параметрах и различном разбросе скоростей релятивистских электронов в пучке (б): $\Delta\beta_{||}/\beta_{||} = 0,5\%$ (сплошная кривая) и $1,5\%$ (штриховая линия)

Согласно результатам моделирования, в качестве одного из таких режимов может быть использован так называемый режим касания дисперсионных характеристик. В данном режиме параметры системы подбирались таким образом, чтобы продольная скорость частиц в пространстве взаимодействия совпадала с групповой скоростью рабочей волны, которая в условиях экспериментов на ЛИУ-3000 при радиусе волновода 0,93 см равна $v_{gr} = 0,95c$ (см. рис. 2а). При этом условие резонанса (1) оказывается выполненным в широком диапазоне частот, что обуславливает 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 МСЭ в режиме касания дисперсионных характеристик представлены на рис. 1б и 2б. Мазер на свободных электронах оптимизировался для работы на центральной частоте 30 ГГц при длине регулярной части ондулятора $90 \div 100$ см, ограниченной полной длиной фокусирующего пучок соленоида, и токе пучка 175 А (в условиях экспериментов ток пучка в области взаимодействия несколько меньше полного тока на выходе ускорителя). В результате при мощности входного сигнала $2 \div 6$ кВт коэффициент усиления составлял $30 \div 35$ дБ, а мощность излучения на выходе достигала 20 МВт (см. рис. 1б) в полосе (по уровню 80 % от максимальной мощности) до $1,5 \div 2,0$ ГГц (см. рис. 2б). Увеличение и уменьшение тока приводило к некоторому смещению полосы усиления в низкочастотную и высокочастотную области соответственно.

Учёт начального разброса скоростей электронов в моделировании осуществлялся путём разбиения пучка на фракции частиц с одинаковой энергией, но различными углами влёта в ондулятор (соответственно, с различными начальными продольными скоростями). Моделирование показывает (см. рис. 2б), что вплоть до начального разброса скоростей $\Delta\beta_{||}/\beta_{||} \sim 1 \div 2\%$ мощность выходного излучения уменьшается на $20 \div 25\%$ (согласно оценкам по результатам предварительных электронно-оптических экспериментов такой начальный разброс скоростей соответствует разбросу скоростей частиц в пучке, формируемым ЛИУ-3000). Это подтверждает достоинства рассмотренной схемы МСЭ с точки зрения низкой чувствительности к разбросу параметров.

Режим нерезонансного захвата может реализовываться в МСЭ на основе ондулятора с уменьшающимся вдоль него периодом [5, 6] (см. рис. 3). При этом в начале пространства взаимодей-

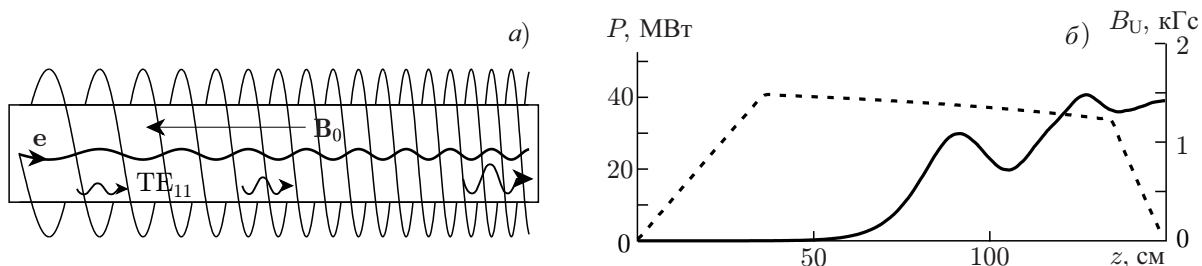


Рис. 3. Условная схема МСЭ-усилителя с профилированным ондулятором и обратным ведущим магнитным полем (а). Моделирование МСЭ-усилителя в режиме нерезонансного захвата (б) при оптимальных параметрах ($U = 800$ кэВ, $I_{\text{beam}} = 175$ А, $B_U = 1,15$ кГс, $B_0 = 1,2$ кГс, $P_{\text{in}} = 4$ кВт, $f = 30$ ГГц, период ондулятора меняется от 7,2 до 4 см). Обозначения кривых те же, что и на рис. 1

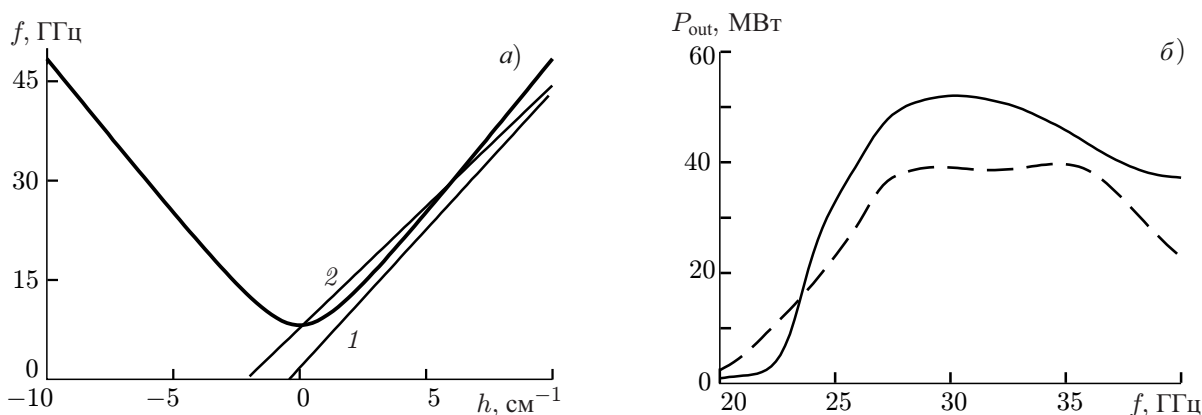


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, для МСЭ в режиме нерезонансного захвата: линии 1 и 2 соответствуют случаям, когда период ондулятора в начале пространства взаимодействия превышает значение, соответствующее резонансу (1), и уменьшается в некоторой промежуточной области по длине системы

ствия период превышает значение, соответствующее резонансу (1) (линия 1 на рис. 4а), а резонансное взаимодействие возникает с уменьшением периода в некоторой промежуточной области по длине системы (линия 2 на рис. 4а). 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 в обычном режиме с профилированными параметрами. Нужно отметить, что предложенный в работе [7] для подобных режимов термин «нерезонансный захват» отражает как отсутствие резонанса на входе в систему, так и нефиксированность положения резонансной области внутри системы (каждой фракции частиц с некоторой скоростью соответствует своя область, где выполняется условие (1) и возникает захват этой фракции), а также подчёркивает отличие от традиционных, резонансных, режимов захвата, в которых волна синхронна с основной частью пучка с самого начала взаимодействия.

Основными преимуществами режима нерезонансного захвата являются снижение критичности к разбросу скоростей пучка и расширение полосы усиления, т.к. в данном случае вариации продольной скорости во фракциях с различными скоростями пучка и изменение частоты рабочей волны приводят лишь к изменению положения резонансной области, в которой реализуется захват частиц, но практически не влияют на эффективность захвата (см. подробнее [5]). Другим достоинством этого режима, унаследованным от традиционных режимов резонансного усиления, реализуемых в системах с профилированными параметрами, является достаточно высокий коэффициент полезного действия (КПД), возможный благодаря длительному торможению частиц

в условиях подстраивающегося под уменьшающуюся энергию электронов условия резонанса (1). Однако, как показывает моделирование, для эффективной реализации этого режима необходимо увеличение длины системы. Ещё одним требованием для осуществления эффективного нерезонансного 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 некоторый пороговый электронный ток, ниже которого захвата и усиления не происходит.

Результаты моделирования МСЭ-усилителя на основе ускорителя ЛИУ-3 000 при использовании режима нерезонансного захвата представлены на рис. 3б и 4б. В данном случае при фиксированной полной длине пространства взаимодействия, равной 150 см, начальный и конечный периоды ондулятора на участке профилирования были выбраны равными 7,2 и 4 см соответственно, а закон изменения периода полагался линейным. При этом магнитное поле ондулятора вычислялось прямым интегрированием в соответствии с законом Био—Савара—Лапласа, поэтому в расчётах учитывалось спадание амплитуды этого поля с уменьшением периода обмотки (см. рис. 3б). В результате в оптимальном режиме при указанных выше мощности входного излучения и токе пучка коэффициент усиления в моделировании превышал 40 дБ, а мощность выходного излучения достигала уровня 35÷40 МВт (электронный КПД составлял примерно 30 %) в ультраширокой полосе от 26 до 40 ГГц. Увеличение тока пучка до 200 А приводило к дальнейшему увеличению коэффициента усиления практически во всей полосе при КПД более 35 %. Следует отметить, что при моделировании наблюдалось дальнейшее снижение чувствительности к разбросу скоростей пучка при увеличении длины взаимодействия, а также при росте электронного тока. Напротив, приближение тока пучка к пороговому значению, которое составляет около 50 А для параметров экспериментов на ЛИУ-3 000, сопровождается резким уменьшением эффективности данной схемы МСЭ.

2. РАЗРАБОТКА ВИНТОВЫХ ОНДУЛЯТОРОВ ДЛЯ МСЭ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Для достижения высокой эффективности работы МСЭ-усилителей была разработана улучшенная конструкция винтовых ондуляторов (см. рис. 5а и б), в которой регулярная часть представляет собой двойную бифилярную спираль. При этом обмотки с токами одного направления в этой спирали сдвинуты по фазе на угол около 60° , что обеспечивает повышенную поперечную однородность поля внутри ондулятора [8].

Для улучшения условий формирования винтового релятивистского электронного пучка также была оптимизирована секция пространственного включения и выключения ондуляторов. Для обеспечения необходимой плавности нарастания поперечного магнитного поля применялась комбинация двух способов профилирования, а именно использование конической секции, обеспечивающей удаление обмотки с токами от оси, и сближение обмоток с токами противоположного направления. Результаты моделирования пространственного распределения поля в винтовом ондуляторе с входной секцией данного типа, приведённые на рис. 5в, демонстрируют отсутствие на входе МСЭ каких-либо паразитных всплесков поля, характерных для случаев, когда вышеупомянутые методы профилирования используются по отдельности.

Для проведения «холодных» измерений ондуляторных полей в ОИЯИ был разработан оригинальный магнитометр на основе магниторезистивного датчика «Honeywell НМС5883L» с размерами $3,0 \times 3,0 \times 0,9$ мм, позволяющий проводить трёхкомпонентное измерение магнитного поля с величиной до 8 Гс с разрешением до 2 мГс. Результаты измерения поля ондулятора с профилированным периодом для реализации режима нерезонансного захвата приведены на рис. 5г и

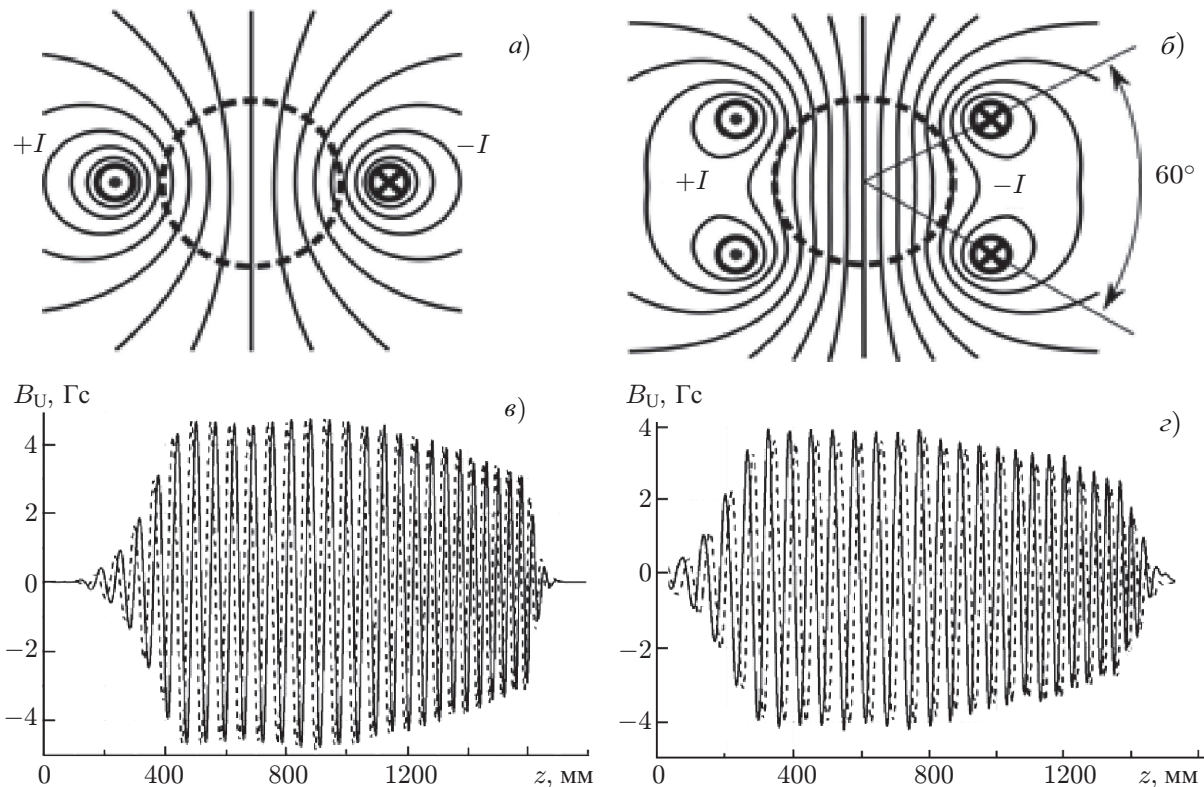


Рис. 5. Поперечная структура магнитного поля в регулярной секции винтового ондулятора с бифилярной (а) и оптимизированной двойной бифилярной (б) обмоткой с током I (трёхмерное моделирование). Результаты моделирования (в) и «холодных» (без пучка) измерений (з) продольного распределения магнитного поля на оси ондулятора с оптимизированной секцией пространственного включения/выключения и профилированным периодом средней части, изменяющимся от 7,2 до 4 см (для реализации МСЭ в режиме нерезонансного захвата) при токе в обмотке 10 А (сплошная и штриховая линии соответствуют x - и y -компонентам магнитного поля в декартовой системе координат (x, y, z))

хорошо согласуются с расчётом (ср. рис. 5в и 3б).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МСЭ-УСИЛИТЕЛЕЙ

Экспериментальное исследование МСЭ проводилось на базе ускорителя ЛИУ-3 000, формирующего электронный пучок с энергией электронов 0,8 МэВ, током 250 А, длительностью импульса 200 нс и частотой следования импульсов до 1 с^{-1} . Данный пучок инжектировался в пространство взаимодействия МСЭ и фокусировался соленоидом с ведущим магнитным полем B_0 до 5 кГс.

В экспериментах по исследованию МСЭ-усилителя в режиме касания дисперсионных характеристик использовался винтовой ондулятор с периодом $d_U = 6 \text{ см}$. Накачка рабочей поперечной скорости $\beta_{\perp} \approx 0,2 \div 0,3$ (нормированной на c) в ондуляторе осуществлялась на участке плавного пространственного включения поля, составляющего первые 6 периодов. В регулярной части амплитуда поперечной составляющей магнитного поля B_U на оси достигала 2 кГс.

Одной из ключевых особенностей МСЭ, разработанного в ОИЯИ и ИПФ, является использование обратного ведущего поля [9, 10]. Данная ориентация ведущего поля обеспечивает высокое качество формирования винтовых релятивистских электронных пучков и снижает чувствитель-

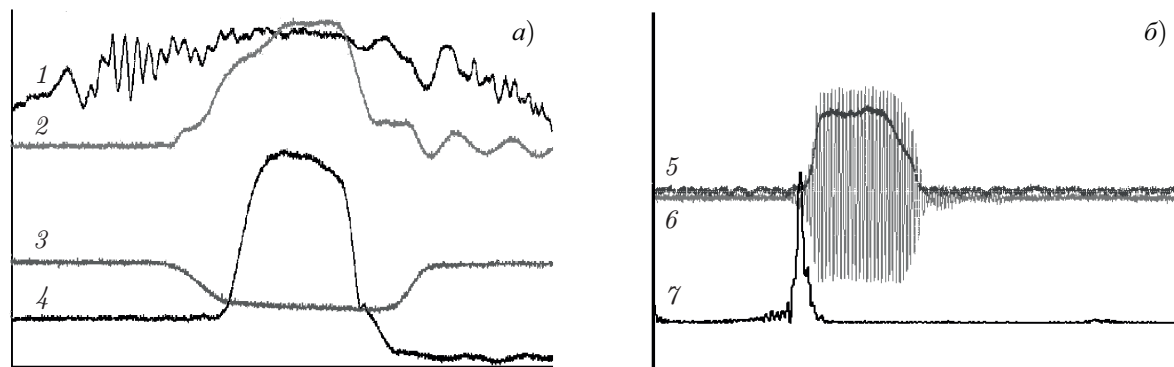


Рис. 6. Результаты экспериментального исследования МСЭ-усилителя в режиме касания дисперсионных кривых на ускорителе ЛИУ-3000: типичные осциллограммы (а) тока пучка на выходе ускорителя (кривая 1), тока пучка на выходе МСЭ (2), входного импульса магнетрона (3) и выходного сигнала с детектора мощности (4), а также (б) выходного сигнала с маломощного детектора (кривая 5), гетеродинированного сигнала (6) и спектра усиленного излучения (7)

ность системы к разбросу их параметров, обеспечивая, таким образом, высокий электронный КПД. Эти выводы подтверждены предшествующим теоретическим анализом [11, 12], а также результатами экспериментального исследования усилительных [9, 10] и генераторных [1–4, 13] схем МСЭ.

В качестве источника входного сигнала МСЭ-усилителя использовался магнетрон МИ-2643, допускающий механическую перестройку частоты в диапазоне $29,5 \div 30,5$ ГГц. В качестве системы ввода сигнала использовался отражатель в виде периодически расположенных на малом (в масштабе длины волны) расстоянии друг от друга ножевых пластин. Этот отражатель был установлен в электропроводе ускорителя и обеспечивал необходимую передачу входного сигнала в пространство взаимодействия в широкой частотной полосе, перехватывая при этом не более 15 % тока электронного пучка. Профиль отражателя оптимизировался для дополнительной фокусировки волнового пучка на входе в рабочий волновод. Согласно расчётам и результатам измерений, уровень сигнала магнетрона на входе пространства взаимодействия P_{in} составлял около 4 кВт. В качестве рабочей в исследуемом МСЭ была выбрана низшая волна цилиндрического волновода $TE_{1,1}$. Секция эллиптического волновода с длиной около 20 см сообщала входному плоско-поляризованному волновому пучку циркулярную поляризацию.

В ходе экспериментов наблюдался устойчивый режим усиления входного сигнала в расчётной области параметров. Настройка режима осуществлялась изменением полей ондулятора и соленоида, а также небольшой вариацией энергии частиц. В оптимальном режиме ($B_0 \approx 1,5$ кГс, $B_U \approx 1,0 \div 1,1$ кГс) на центральной частоте 30 ГГц мощность излучения согласно калориметрическим измерениям достигала 15 МВт, что находится в хорошем согласии с результатами моделирования. Длительность выходного сигнала была близка к 200 нс, т. е. практически равнялась полной длительности импульса тока (см. рис. 6а). Ширина спектра усиленного в МСЭ сигнала составляла $6 \div 7$ МГц (при ширине спектра излучения магнетрона около 3 МГц), что близко к естественной ширине спектра для наблюдаемой длительности импульса. При фиксированных параметрах пучка и электроно-оптической системы данный уровень мощности выходного излучения наблюдался во всей полосе перестройки частоты магнетрона ($\pm 0,5$ ГГц), что моделирует мгновенную полосу усиления. В то же время увеличение поля ондулятора до 1,3 кГс приводило к самовозбуждению системы на паразитных частотах. Экспериментальное исследование МСЭ-усилителя в режиме нерезонансного захвата в настоящее время продолжается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый теоретический анализ и результаты экспериментального исследования подтверждают перспективность реализации мощных широкополосных МСЭ-усилителей на основе умеренно релятивистских магнитонаправляемых электронных пучков. В реализованном прототипе такого устройства получен уровень мощности выходного излучения, аналогичный достигнутому ранее в гироклистронах, работающих в окрестности 30 ГГц [14, 15]. При этом важно, что полоса перестройки частоты последних не превышает 50 МГц, в то время как в МСЭ-усилителе в режиме касания продемонстрирована мгновенная полоса усиления на уровне $\pm 0,5$ ГГц, определяемом доступным источником входного сигнала. Следует также отметить, что в предшествующих экспериментальных исследованиях МСЭ-усилителей широкая полоса усиления в так называемом режиме касания дисперсионных характеристик была получена в сантиметровом диапазоне длин волн при относительно низкой эффективности [16]. В МСЭ-усилителе, разработанном в ОИЯИ и ИПФ, теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность совмещения широкой мгновенной полосы усиления с высокой эффективностью электронно-волнового взаимодействия.

Важно также подчеркнуть, что указанные параметры усиления реализованы в регулярном волноводе, т. е. без привлечения специальных электродинамических элементов (например, волноводов с высоким поглощением [17, 18], профилированных волноводов [19], винтовых структур [20, 21] и других), используемых для увеличения коэффициента усиления и расширения его полосы в мощных гиролампах бегущей волны. Другим важным достоинством МСЭ согласно проведённому моделированию является его низкая чувствительность к начальному разбросу скоростей релятивистских электронов в пучке, 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 вдоль него периодом теоретически позволяет ещё более снизить чувствительность МСЭ к начальному разбросу скоростей электронов в пучке, увеличить мощность выходного излучения и реализовать ультраширокую полосу усиления, равную ширине всего Ка-диапазона. Экспериментальные исследования данной схемы МСЭ продолжаются.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Песков Н. Ю., Гинзбург Н. С., Каминский А. А. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 11. С. 19.
2. Каминский А. К., Перельштейн Э. А., Седых С. Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 5. С. 37.
3. Ginzburg N. S., Golubev I. I., Kaminsky A. K., et al. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2011. V. 14. Art. no. 041002.
4. Баев В. Г., Вдовин В. А., Вихарев А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 719.
5. Бандуркин И. В., Каминский А. К., Перельштейн Э. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 8. С. 674.
6. Savilov A. V., Bandurkin I. V., Peskov N. Yu. // Nuclear Instr. and Meth. Phys. Res. A. 2003. V. A507, No. 1–2. P. 158.
7. Savilov A. V. // Phys. Rev. E. 2001. V. 64. Art. no. 066501.

8. Kaminsky A. K., Kaminsky A. A., Sedykh S. N., Sergeev A. P. // Proc. 18th Int. FEL Conf. Rome, Italy, 26–31 August 1996. P. II109.
9. Kaminsky A. A., Kaminsky A. K., Rubin S. B. // Particle Accelerators. 1990. V. 33. P. 189.
10. Conde M. E., Bekefi G. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67, No. 22. P. 3082.
11. Peskov N. Yu., Samsonov S. V., Ginzburg N. S., Bratman V. L. // Nuclear Instr. and Meth. Phys. Res. A. 1998. V. A407, No. 1–3. P. 107.
12. Ginzburg N. S., Peskov N. Yu. // Phys. Rev. ST. Accel. Beams. 2013. V. 16. Art. no. 090701.
13. Ginzburg N. S., Kaminsky A. K., Peskov N. Yu., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26, No. 3. P. 536.
14. Zaitsev N. I., Guznov Y. M., Danilov Y. Y., et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. Art. no. 173505.
15. Зайцев Н. И., Гвоздев А. К., Запечалов С. А. и др. // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 2. С. 179.
16. Whyte C. G., Jaroszynski D. A., Cross A. W., et al. // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 2000. V. A445, No. 1–3. P. 272.
17. Chu K. R., Chen H. Y., Hung C. L., et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 4760.
18. Park G. S., Choi J. J., Park S. J., et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 2399.
19. Pershing D. E., Nguyen K. T., Calame J. P., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. PS-32. P. 947.
20. Bratman V. L., Cross A. W., Denisov G. G., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 2746.
21. Братман В. Л., Денисов Г. Г., Самсонов С. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 2. С. 104.

Поступила в редакцию 28 апреля 2016 г.; принята в печать 28 июня 2016 г.

DEVELOPMENT OF A HIGH-POWER WIDEBAND AMPLIFIER ON THE BASIS OF A FREE-ELECTRON MASER HAVING AN OPERATING FREQUENCY NEAR 30 GHz: MODELING AND RESULTS OF THE INITIAL EXPERIMENTS

I. V. Bandurkin, D. E. Donets, A. K. Kaminsky, S. V. Kuzikov, E. A. Perel'shteyn, N. Yu. Peskov, A. V. Savilov, and S. N. Sedykh

We develop a high-power wideband amplifier based on a free-electron maser for particle acceleration, which will be operated in the 30 GHz frequency band, on the basis of the LIU-3000 linear induction accelerator forming an electron beam with an electron energy of 0.8 MeV, a current of 250 A, and a pulse duration of 200 ns. As the operating regime, we chose the regime of grazing of dispersion curves, since, according to the modeling performed, it allows one to ensure an instantaneous amplification band of about 5–7 % in an undulator with regular winding for an output radiation power at a level of 20 MW and an amplification coefficient of 30–35 dB. The results of the first experiments studying this FEM-based scheme are presented, in which the specified power level is achieved in the range around 30 GHz, and fast tuning of ± 0.5 GHz in the band of variations in the frequency of the master magnetron is demonstrated. Modeling shows that the use of the non-resonance trapping/braking regime, which is realized in an undulator with profiled parameters, allows one to expect an increase in the radiation power of up to 35–40 MW with simultaneous widening of the amplification band up to 30% under the conditions of the LIU-3000 experiments.