УДК 621.385

СИСТЕМЫ НАКАЧКИ КОМПТОНОВСКИХ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ: ИСТОЧНИКИ И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ОНДУЛЯТОРЫ

Э.Б. Абубакиров¹, А.А. Вихарев¹, Н.С. Гинзбург^{1,2}, А.Н. Денисенко¹, В.Ю. Заславский^{1,2}, Т.О. Крапивницкая^{1,2}, С.В. Кузиков¹, Н.Ю. Песков^{1,2*}, А.В. Савилов^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Концепция лазеров на свободных электронах комптоновского типа, работающих в коротковолновых диапазонах при высоком уровне эффективности и мощности, развивается в настоящее время в ИПФ РАН. Целью этих работ является снижение энергии запитывающего релятивистского электронного пучка и, таким образом, увеличение коэффициента полезного действия электронноволнового взаимодействия в лазерах на свободных электронах, а также достижение относительной компактности генератора. Основой концепции являются сверхвысокочастотные (СВЧ) ондуляторы нового типа — так называемые «летящие» ондуляторы. Статья посвящена результатам текущих исследований данных ондуляторов, приведены результаты их моделирования и «холодных» электродинамических тестов в Ка-диапазоне. Для запитки ондуляторов в указанном диапазоне разрабатывается пространственно развитый генератор поверхностной волны черенковского типа на основе сильноточного ускорителя «Синус-6» с энергией частиц 0,5 МэВ, током 5 кА и длительностью импульса 25 нс. Требуемый субгигаваттный уровень мощности выходного излучения в сочетании с высокой стабильностью режима узкополосной генерации достигается в условиях существенной сверхразмерности путём использования двумерной распределённой обратной связи, реализуемой в замедляющей структуре с двумерно-периодической гофрировкой. Приведены расчётные параметры и результаты моделирования генератора поверхностной волны, предназначенного для запитки СВЧ ондуляторов, с частотой 32 ГГц и мощностью 0,5 ГВт.

ВВЕДЕНИЕ

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) являются наиболее мощными источниками когерентного излучения, работающими в коротковолновых диапазонах длин волн вплоть до рентгеновского. Их разработка активно ведётся в настоящее время мировым научным сообществом (см., например, [1, 2]). Однако основные проблемы этих проектов связаны с колоссальными размерами установок, низкой эффективностью электронно-волнового взаимодействия и жёсткими требованиями к качеству рабочих пучков. Одним из подходов, ориентированных на решение указанных проблем, может быть создание комптоновских ЛСЭ-скаттронов [3-6]. Использование в ЛСЭ данного типа встречной частицам волны накачки (так называемые сверхвысокочастотные (СВЧ) ондуляторы) миллиметрового диапазона (вместо «традиционных» магнитостатических ондуляторов, период которых ограничен несколькими сантиметрами) приводит к существенному снижению энергии электронного пучка, необходимой для работы в рентгеновском диапазоне. С одной стороны, это даже при фиксированном темпе ускорения даёт возможность снизить длину ускорителя. С другой стороны, уменьшение энергии частиц приводит к существенному увеличению интенсивности электронно-волнового взаимодействия за счёт сразу двух факторов: во-первых, при фиксированной амплитуде ондуляторного поля уменьшение релятивистской массы электронов ведёт к росту скорости их поперечных ондуляторных колебаний, что улучшает связь с волной;

582

^{*} peskov@appl.sci-nnov.ru

во-вторых, существенно увеличивается фактор инерционной группировки частиц. Всё это принципиально обеспечивает сокращение длины пространства электронно-волнового взаимодействия, необходимого для выхода процесса взаимодействия на стадию насыщения, а также приводит к повышению электронного коэффициента полезного действия (КПД), достигаемого на этой стадии.

Экспериментальное исследование комптоновского рассеяния волн в различных типах релятивистских мазеров проводилось в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн [7–10]. В последние годы разработка микроволновых ондуляторов становится актуальной задачей применительно к развитию рентгеновских ЛСЭ. В частности, успешный эксперимент с СВЧ ондулятором на основе гофрированного волновода выполнен в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (США) на частоте 11,4 ГГц, в котором в результате комптоновского рассеяния продемонстрировано получение излучения оптического диапазона [11].

Концепция комптоновского ЛСЭ-скаттрона развивается в последние годы в ИПФ РАН [12]. Основой данной концепции является новый тип СВЧ ондуляторов — так называемый «летящий» ондулятор [13]. В настоящее время проведено моделирование различных схем подобных ондуляторов, в том числе с профилированными параметрами. Показано, что на их основе может быть реализован режим нерезонансного мультиимпульсного захвата, который позволяет обеспечить снижение чувствительности к качеству (т. е. разбросу энергий и скоростей) рабочего электронного сгустка и, таким образом, дальнейшее увеличение эффективности ЛСЭ данного типа [14].

Экспериментальные исследования прототипа системы накачки ЛСЭ-скаттрона начаты в ИПФ РАН в К_а-диапазоне. В данной статье представлены результаты моделирования и «холодного» тестирования макета «летящего» ондулятора указанного диапазона. Для проведения полномасштабного исследования данного СВЧ ондулятора на высоком уровне мощности разрабатывается пространственно развитый генератор черенковского типа субгигаваттного уровня мощности на основе сильноточного наносекундного ускорителя «Синус-6».

1. РЕЖИМ НЕРЕЗОНАНСНОГО ЗАХВАТА В ЛСЭ КОМПТОНОВСКОГО ТИПА

В лазерах на свободных электронах характерные радиационные потери кинетической энергии электронов пучка (т.е. изменение их релятивистского лоренц-фактора γ относительно его начального значения γ_0) определяются параметром интенсивности электронно-волнового взаимодействия ρ (FEL parameter):

$$\Delta \gamma_{\rm rad} / \gamma_0 \sim \rho,$$
 (1a)

который объединяет в себе факторы электронно-волновой связи (ондуляторную скорость электронов), фактор возбуждения волны (пропорциональный отношению тока пучка к эффективной площади поперечного сечения излучаемого волнового пучка) и фактор инерционной группировки частиц в поле волны. В современных коротковолновых ЛСЭ величина этого параметра находится на уровне 10^{-3} [15]. Аналогичное ограничение справедливо и для допустимого разброса $\Delta \gamma_{\rm spr}$ по начальным энергиям электронов:

$$\Delta \gamma_{\rm spr} / \gamma_0 \sim \rho. \tag{16}$$

Одним из методов повышения эффективности ЛСЭ является режим захвата и адиабатического торможения частиц [16, 17]. В его «классической» версии осуществляется профилирование резонансных параметров системы таким образом, что резонансная энергия $\gamma_{\rm res}(z)$ медленно спадает с координатой z (см. рис. 1a). Это осуществляется за счёт профилирования периода ондулятора и/или амплитуды ондуляторного поля. При этом некоторая фракция электронного пучка захватывается волной и энергия захваченных частиц уменьшается вместе с изменением величины



Рис. 1. Различные схемы режимов захвата в ЛСЭ: «традиционный» режим захвата и адиабатического торможения (a) и режим мультиимпульсного нерезонансного захвата, реализуемого в системе профилированных ондуляторных секций U_1 , U_2 , U_3 , запитываемых независимыми СВЧ генераторами S_1 , S_2 и S_3 (δ)

 $\gamma_{\rm res}$. Данная схема позволяет преодолеть ограничение на КПД электронно-волнового взаимодействия (1a), однако в условиях большого начального разброса скоростей (1б) трудно обеспечить захват волной достаточно большой фракции пучка.

В работе [14] предложено использование нового режима электронно-волнового взаимодействия, который может обеспечить высокий электронный КПД,

$$\Delta \gamma_{\rm rad} / \gamma_0 \gg \rho,$$
 (2a)

даже при использовании рабочего электронного сгустка с большим разбросом энергий

$$\Delta \gamma_{\rm spr} / \gamma_0 \gg \rho.$$
 (26)

Данный режим является развитием идеи так называемого «нерезонансного» захвата [18, 19], позволяющего осуществить эффективную работу ЛСЭ даже при использовании электронных пучков с относительно низким качеством. В настоящее время возможность реализации данного режима продемонстрирована в усилителе на основе мазера на свободных электронах, разработанном в К_а-диапазоне в совместных экспериментах ИПФ РАН и ОИЯИ (г. Дубна) [20].

Рассмотренный в статье [14] нерезонансный мультиимпульсный захват представляет собой многосекционный процесс, в котором захват организуется несколько раз в нескольких последовательных секциях СВЧ ондуляторов (см. рис. 16). В каждой отдельной секции захватывается

Э.Б. Абубакиров, А.А. Вихарев, Н.С. Гинзбург и др.

584



Рис. 2. Моделирование мультиимпульсного нерезонансного захвата в ЛСЭ, работающем в режиме SASE: усреднённое изменение энергии электронов сгустка $\langle \gamma_0 - \gamma \rangle$ в зависимости от продольной координаты *z* при использовании пяти секций СВЧ ондуляторов U_1, \ldots, U_5 . Показано профилирование резонансной энергии $\langle \gamma_0 - \gamma_{res} \rangle$ в этих секциях, а также распределение амплитуды высокочастотной (ВЧ) волны внутри сгустка на выходе каждой секции

лишь небольшая часть пучка, однако повторение этого процесса от секции к секции постепенно вовлекает во взаимодействие большинство электронов. Важной особенностью указанного многосекционного захвата является то, что в каждой секции электронно-волновое взаимодействие (захват) начинается заново. Это означает, что согласование ондуляторных фаз разных секций не требуется. Таким образом, в секционированной системе СВЧ ондуляторов (см. рис. 16) разные ондуляторные секции могут запитываться независимыми генераторами мощных и относительно коротких СВЧ импульсов, для которых не требуется взаимная фазировка.

В работе [14] нерезонансный мультиимпульсный режим захвата рассмотрен в предположении усиления узкополосного волнового импульса. Однако при определённых условиях этот режим может быть реализован и в традиционном для современных рентгеновских ЛСЭ и принципиально широкополосном режиме спонтанного усиления собственных шумов (Self-Amplified Spontaneous Emission, SASE). На рис. 2 представлены результаты моделирования секционированного процесса усиления начального шумового сигнала коротким электронным сгустком, проведённого на основе пространственно-временны́х уравнений, описывающих ЛСЭ в режиме SASE (в рамках модели, приведённой в [15]). При этом первая секция пространства электронно-волнового взаимодействия является регулярной ($\gamma_{\rm res} = {\rm const}$), а её длина соответствует насыщению электронного КПД (относительного изменения энергии частиц $\langle \gamma_0 - \gamma \rangle$, усреднённого по всему электронному сгустку). Использование последующих четырёх профилированных секций увеличивает электронный КПД приблизительно в 25 раз по сравнению с уровнем насыщения в регулярной системе. При этом на выходе пятой секции усреднённые изменения энергии частиц составляют примерно половину от обеспеченного профилированием перепада резонансной энергии, $\langle \gamma_0 - \gamma \rangle \approx 0.5 (\gamma_0 - \gamma)$ $-\gamma_{\rm res}$). Это соответствует тому, что примерно 50 % электронов сгустка эффективно участвовали в процессе энергообмена с волной. Важно также, что многосекционный процесс захвата является принципиально нелинейным и вследствие этого сужает изначально широкополосный (шумовой) спектр усиливаемого волнового сигнала за счёт эффекта нелинейной конкуренции разночастотных волн [21–23].



Рис. 3. (*a*) Фотография макета «летящего» СВЧ ондулятора на основе винтового волновода и (*б*) результаты трёхмерного моделирования (чёрные кривые) и «холодных» измерений (красные кривые) амплитуды T (слева) и фазы φ (справа) коэффициента прохождения волны $TM_{0,1}$ -типа через этот ондулятор (f — частота)

2. «ЛЕТЯЩИЙ» СВЧ ОНДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДА С ВИНТОВОЙ ГОФРИРОВКОЙ

Предложенный авторами «летящий» СВЧ ондулятор представляет собой мощный короткий импульс когерентного микроволнового излучения, который движется вместе с рабочим электронным сгустком. Основу электродинамической системы данного СВЧ ондулятора составляет секция цилиндрического волновода с винтовой гофрировкой, которая обеспечивает присутствие в микроволновом импульсе волновой компоненты (парциальной волны) с отрицательной по отношению к направлению движения электронов фазовой скоростью. Таким образом, близость групповой скорости микроволнового импульса и скорости электронов обеспечивает относительно протяжённое электронно-волновое взаимодействие, в то время как наличие парциальной волновой компоненты с отрицательной фазовой скоростью обусловливает стимулированное рассеяние ВЧ импульса в коротковолновое излучение с высоким фактором доплеровского преобразования частоты.

В настоящее время разработан макет «летящего» СВЧ ондулятора (см. рис. 3a) с рабочей частотой в районе 32 ГГц в виде волноводной цилиндрической секции с диаметром 12,2 мм и однозаходной спиральной гофрировкой с периодом 6 мм и амплитудой 3 мм, обеспечивающей связь и взаимное рассеяние парциальных волн $TM_{0,1}$ - и $TM_{1,1}$ -типа. Согласно проведённому трёхмерному моделированию данная гофрировка в рабочей области параметров обеспечивает формирование нормальной моды с групповой скоростью, близкой к скорости света (около 0,7c), обладающей малой частотной дисперсией. При этом в нормальной моде присутствует заметная доля (около 50 % энергии) парциальной параксиальной волны $TM_{1,1}$, распространяющейся навстречу дви-

жению электронов. В разработанном макете «летящего» ондулятора волновое число встречной рабочей компоненты поля соответствует эффективному периоду ондулятора $d_{\rm u} \approx 5.4$ мм, а расчётный фактор ондуляторности в рабочей области составляет около $0.15\div0.20$ при мощности СВЧ импульса порядка 0,5 ГВт. Следует отметить, что циркулярная поляризация этой волны даёт вдвое больший (по сравнению с планарным ондулятором) фактор электронно-волнового взаимодействия. Важно, что в центре волновода (где транспортируется электронный пучок) «паразитное» поперечное поле попутной волны $TM_{0,1}$ отсутствует. Результаты «холодных» электродинамических тестов макета «летящего» ондулятора представлены на рис. 36 и находятся в хорошем соответствии с расчётом.

Примеры оценки параметров рентгеновских ЛСЭ с секционированными системами «летящих» ондуляторов различных типов приведены в [24].

3. ПРОЕКТ СУБГИГАВАТТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ К_а-ДИАПАЗОНА С ДВУМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СТРУКТУРОЙ

Для тестирования работы «летящих» СВЧ ондуляторов на высоком уровне мощности в настоящее время разрабатывается пространственно развитый релятивистский мазер черенковского типа на основе сильноточного ускорителя «Синус-6» (ИПФ РАН). Достижение субгигаваттного уровня мощности в генераторе, который требуется для получения в запитываемом им СВЧ ондуляторе расчётной величины параметра ондуляторности, предполагается осуществить за счёт увеличения поперечного сечения пространства взаимодействия при сохранении плотности тока и плотности волновых потоков на умеренном уровне. Высокую степень когерентности излучения и узкополосный режим работы генератора, который необходим для запитки СВЧ ондуляторов, в условиях существенной сверхразмерности электродинамических систем предполагается достичь путём использования двумерной распределённой обратной связи (РОС). Данный механизм обратной связи предложен авторами [25] и является достаточно универсальным методом получения когерентного излучения в пространственно развитых генераторах, основанных на различных механизмах индуцированного излучения релятивистских электронных пучков. В настоящее время работоспособность механизма двумерной РОС подтверждена экспериментально в мазерах на свободных электронах при рекордных поперечных размерах системы (до 50 длин волн) и уровне мощности выходного излучения 50÷100 МВт [26, 27]. В данных экспериментах получен узкополосный режим генерации с шириной спектра излучения, близкой к теоретическому пределу, продемонстрирована высокая когерентность излучения и стабильность частоты как в течение одного импульса, так и от импульса к импульсу [27].

Перспективным развитием концепции двумерной РОС является создание релятивистских мазеров, основанных на черенковском механизме электронно-волнового взаимодействия. В отличие от мазеров на свободных электронах (МСЭ), в генераторах данного типа используются прямолинейно движущиеся электронные пучки, что существенно упрощает систему их формирования и транспортировки, а также значительно снижает требования к разбросу параметров частиц. Черенковский механизм взаимодействия допускает использование более интенсивных (по сравнению с МСЭ) пучков с умеренно-релятивистской энергией и, таким образом, несомненно перспективен с точки зрения получения высоких мощностей в коротковолновых диапазонах при относительной компактности установок.

В проекте черенковского мазера, разрабатываемого на основе ускорителя «Синус-6», в качестве режима работы выбран так называемый π -режим (генераторы данного типа принято также называть генераторами поверхностной волны), характеризующийся замедлением основной гар-



Рис. 4. Результаты трёхмерного моделирования субгигаваттного генератора поверхностной волны K_a -диапазона на основе ускорителя «Синус-6»: зависимость от времени t полной мощности выходного излучения P_{total} и мощностей парциальных волн, формирующих это излучение (a), спектр излучения $P_f(f)$ в стационарном режиме генерации (δ)

моники поля и обладающий, таким образом, высоким импедансом связи с электронным потоком. Механизм двумерной РОС в генераторе данного типа реализуется с помощью двумернопериодических замедляющих структур, которые совмещают в себе свойства замедляющей системы, создающей условия эффективного черенковского взаимодействия с сильноточным прямолинейным ленточным релятивистским электронным пучком, и высокодобротного резонатора, обеспечивающего селективное возбуждение рабочей моды в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия.

Для работы в К_а-диапазоне реализован макет пространственно развитого генератора поверхностной волны. Изготовлена электродинамическая система генератора на основе двумерно-периодической замедляющей структуры со средним диаметром 46 мм (периметр около 16 длин волн), периодом гофрировки 7 мм, азимутальным числом вариаций (заходов гофрировки) 16 и амплитудой гофрировки 2,5 мм. Длина замедляющей системы (пространства взаимодействия) составляет около 85 мм. Проведены «холодные» электродинамические тесты изготовленного макета структуры, продемонстрировано хорошее соответствие их результатов с расчётом.

Результаты моделирования двумерно-периодического генератора поверхностной волны в K_aдиапазоне на основе сильноточного взрывоэмиссионного ускорителя «Синус-6» с энергией частиц 0,5 МэВ, током 5 кА и длительностью импульса 25 нс представлены на рис. 4. Моделирование проводилось с использованием трёхмерного коммерческого кода CST Studio Suite. Геометрия замедляющей структуры принимались близкой к экспериментальному макету, описанному выше, парамеры пучка соответствовали условиям планируемых экспериментов. Результаты моделирования демонстрируют установление узкополосного режима с азимутально-симметричным пространственным распределением поля. Мощность выходного излучения (с учётом омических потерь в замедляющей структуре) достигает 0,5 ГВт при электронном КПД около 25 %. Эксперименты по реализации данного генератора и исследованию его когерентных свойств начаты в настоящее время на ускорителе «Синус-6».

Следует отметить, что мощность излучения, на которую рассчитан обсуждаемый проект, ограничена «энергетическими возможностями» (током и напряжением) используемого ускорителя. Данный уровень мощности в K_a-диапазоне был получен ранее и в черенковских генераторах

на основе «традиционных» замедляющих систем с одномерно-периодической гофрировкой. Перспективой развития обсуждаемых экспериментов (в случае их успешного завершения) является переход в более высокочастотные диапазоны вплоть до субмиллиметрового, где предлагаемая концепция позволит реализовать генераторы с рекодной сверхразмерностью и уровнем мощности выходного излучения.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 18–02–40009). Разработка и эксплуатация экспериментального оборудования проводится в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035–2019–0001) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН (проект 0035–2018–0022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. LCLS SLAC home page: https://portal.slac.stanford.edu/sites/lcls_public/Pages/Default.aspx.
- 2. European XFEL home website. https://www.xfel.eu.
- Pantell R. H., Soncini G., Puthoff H. E. // IEEE J. Quantum Electron. 1968. V. QE-4, No. 11. P. 905.
- 4. Братман В. Л., Гинзбург Н. С., Петелин М. И. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28, № 4. С. 207.
- McDermot D. B., Marshall T. C., Sclesinger S. E., et al. // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 41, No. 5. P. 1368.
- 6. Gover A., Sprangle P. // IEEE J. Quant. Electr. 1981. V. QE-17, No. 8. P. 1196.
- 7. Жуков П. Г., Иванов В. С., Рабинович М. С. и др. // ЖЭТФ. 1979. Т. 76, № 6. С. 2065.
- 8. Carmel J., Granatstein V. L., Gover A. // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 51, No. 7. P. 566.
- Bratman V. L., Denisov G. G., Ginzburg N. S., et al. // Int. J. of Electron. 1985. V. 59, No. 3. P. 247.
- Peskov N. Yu., Kaminsky A. K., Kalynov Yu. K., et al. // Digest of Joint 32nd Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 15th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 3–7 September 2007. V. 2. P. 837.
- Toufexis F., Dolgashev V.A., Limborg-Deprey C., Tantawi S.G. // Conf. on Advances in Laboratory-Based X-Ray Sources, Optics, and Applications VI, San Diego, USA, 7–9 August 2017. Proc. SPIE. V. 10387. Art. no. 1038704.
- 12. Песков Н. Ю., Абубакиров Э. Б., Вихарев А. А. и др. // XI Всерос. семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 25–28 февраля 2019. С. 57.
- 13. Kuzikov S. V., Savilov A. V., Vikharev A. A. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. Art. no. 033504.
- 14. Kuzikov S. V., Savilov A. V. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. Art. no. 113114.
- 15. Pellegrini C., Marinelli A., Reichel S. // Rev. Modern Phys. 2016. V. 88. Art. no. 015006.
- 16. Sprangle P., Tang C. M., Manheimer W. M. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 43. P. 1932.
- 17. Kroll N. M., Morton P. L., Rosenbluth M. N. // IEEE J. Quant. Electr. 1981. V. 17. P. 1436.
- 18. Savilov A. V. // Phys. Rev. E. 2001. V. 64. Art. no. 066501.
- Savilov A. V., Bandurkin I. V., Peskov N. Yu. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 507. P. 158.
- Kaminsky A. K., Sedykh S. N., Bandurkin I. V., et al. // Proc. of the 43rd Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018), Nagoya, Japan, 9–14 September 2018. Art. no. 4057938.
- 21. Antonsen Jr. T. M., Levush B. // Phys. Fluids B. 1989. V. 1, No. 5. P. 1097.
- 22. Гинзбург Н. С., Сергеев А. С. // Журн. техн. физ. 1991. Т. 61, № 6. С. 133.
- 23. Bratman V. L., Savilov A. V. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1995. V. 358, No. 1–3. P. 182.

- 24. Kuzikov S., Antipov S., Vikharev A., et al. // Proc. of the 2018 IEEE Advanced Accelerator Concepts Workshop (AAC 2018), Breckenridge, CO, USA, 12–17 August 2018. Art. no. 865942.
- 25. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, № 9. С. 23.
- Arzhannikov A. V., Cross A. W., Ginzburg N. S., et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2009. V. 37, No. 9. P. 1792.
- Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Kalinin P. V., et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. Art. no. 114801.

Поступила в редакцию 29 апреля 2019 г.; принята в печать 5 июля 2019 г.

PUMPING SYSTEMS FOR COMPTON FREE-ELECTRON LASERS: MICROWAVE UNDULATORS AND POWERING SOURCES

E. B. Abubakirov, A. A. Vikharev, N. S. Ginzburg, A. N. Denisenko, V. Yu. Zaslavsky, T. O. Krapivnitskaya, S. V. Kuzikov, N. Yu. Peskov, and A. V. Savilov

The concept of Compton-type free-electron lasers (FELs) operating in short wavelength ranges with a high efficiency and power level is currently underway at the IAP RAS (Nizhny Novgorod). This concept is aimed at reducing the energy of a driving relativistic electron beam and thereby increasing the efficiency of the electron–wave interaction in FELs, as well as making the oscillator relatively compact. The basis of this concept is microwave undulators of a new type — the so-called "flying" undulators. This paper is devoted to the results of the current studies of these undulators, their simulation, and "cold" electrodynamic tests in the K_a band. For powering microwave undulators, a spatially extended narrow-band Čerenkov surface-wave oscillators (SWOs) are developed in the specified frequency range driven by Sinus-6, a high-current accelerator, with a particle energy of 0.5 MeV, a current of 5 kA, and a pulse duration of 25 ns. The required sub-gigawatt power level of output radiation combined with a high stability of the narrow-band oscillation regime is achieved under conditions of a strongly oversized oscillator by using two-dimensional distributed feedback provided in a 2D doubly-periodic slow-wave structure. The design parameters of a 32 GHz/0.5 GW SWO intended for powering microwave undulators are presented and the results of its simulation and reported.