На правах рукописи



ЛОГИНОВ Павел Владимирович

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ МИКРООНДУЛЯТОРОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.3.4. Радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: **Бандуркин Илья Владимирович**, кандидат физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: **Полозов Сергей Маркович**, доктор физико-математических наук, доцент, Институт ядерной физики и технологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования НИЯУ «МИФИ» (г. Москва)

Шевченко Олег Александрович, кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук» (г. Москва)

Защита диссертации состоится 30 ноября 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ipfran.ru ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Автореферат разослан 20 октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук  Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [1–7] являются одним из ключевых типов источников когерентного электромагнитного излучения, перекрывающим диапазон частот от сверхвысокочастотного до жёсткого рентгеновского. В основе их работы лежит индуцированное излучение релятивистских электронов, совершающих колебания в периодическом поперечном магнитном поле ондулятора. Длина волны излучения ЛСЭ определяется условием синхронизма $\lambda \approx \lambda_u (1 + K^2) / (2\gamma^2)$, где λ_u — период ондуляторного поля, K — ондуляторный параметр, γ — релятивистский масс-фактор электронов. Эта зависимость обеспечивает возможность перестройки частоты генерации в широких пределах за счёт изменения энергии частиц, а также периода и амплитуды ондуляторного поля. В длинноволновых диапазонах ЛСЭ, как правило, работают в режиме генератора, в котором обратная связь обеспечивается открытым или волноводным резонатором. В коротковолновой части УФ-спектра и в рентгеновском диапазоне, где создание резонаторов с малыми потерями затруднено, основным является однопроходный режим самоусиления спонтанного излучения (*self-amplified spontaneous emission, SASE*), теория которого была развита в работах [8; 9]. Пространственный инкремент усиления в этом режиме определяется параметром Пирса, который возрастает с ростом тока пучка и ондуляторного параметра и убывает с ростом энергии частиц [2]. По этой причине длина ондуляторов рентгеновских ЛСЭ, работающих на пучках с энергией в единицы и десятки ГэВ, составляет десятки метров и более.

Лазеры на свободных электронах, генерирующие излучение с длинами волн от единиц нанометров до долей ангстрема, находят применение в структурной биологии [10], материаловедении [11], физике плотной плазмы и высоких давлений [12]. Кроме того, диапазон экстремального ультрафиолета (ЭУФ) востребован в нанолитографии [13; 14] при производстве микросхем с проектными нормами единицы нанометров. Практическое освоение коротковолнового диапазона началось с установки FLASH, на которой была получена генерация от экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона до так называемого окна прозрачности воды [15]. В 2010 г. на установке LCLS впервые получена генерация в ангстремном диапазоне длин волн [16]. Для этого использовался участок линейного ускорителя SLAC с энергией электронов до 13,6 ГэВ и ондулятор с периодом 3 см, состоящий из 33 секций общей длиной около 132 м. Впоследствии были введены в строй рентгеновские ЛСЭ SACLA [17], PAL-XFEL [18], European XFEL [19] и SwissFEL [20]. Существенно, что уменьшение габаритов и стоимости подобных установок во многом достигается путём уменьшения периода ондулятора. Так, в установке SwissFEL излучение с длиной волны 1 Å генерируется пучком с энергией 5,8 ГэВ в вакуумных ондуляторах с периодом 15 мм [20], тогда как в European XFEL,

где используется сверхпроводящий линейный ускоритель на энергию 17,5 ГэВ, период ондуляторов жёсткого рентгеновского диапазона составляет 40 мм [19]. Вместе с тем даже в наиболее компактных из этих установок длина ускорителя измеряется сотнями метров, а период ондулятора остаётся сантиметровым.

В последние годы существенный прогресс достигнут в развитии компактных ускорителей нового поколения. Лазерно-плазменные ускорители с кильватерным полем обеспечивают ускоряющие градиенты, более чем на три порядка превышающие достижимые в высокочастотных ускорителях [21]. Уже в 2006 г. при каналировании лазерного импульса с пиковой мощностью 40 ТВт в газонаполненном капилляре длиной 3,3 см были получены электронные пучки с энергией 1 ГэВ [22], а позднее с использованием петаваттного лазера энергия квазимоноэнергетических сгустков была доведена до 7,8 ГэВ [23]. Препятствием для применения таких пучков в ЛСЭ долгое время оставалось их сравнительно низкое качество, характеризующееся значительными энергетическим разбросом и угловой расходимостью. Тем не менее в 2021 г. было продемонстрировано экспоненциальное усиление ондуляторного излучения на длине волны 27 нм при использовании сгустков лазерно-плазменного ускорителя с энергией частиц около 500 МэВ и зарядом 30 пКл [21]. Затем была получена генерация в ИК-диапазоне на пучке плазменного ускорителя длиной 3 см с возбуждением кильватерного поля электронным сгустком и реализован ЛСЭ на лазерно-плазменном ускорителе с внешним затравочным сигналом [24]. Следует отметить, что в эксперименте [21] ондулятор с периодом 2,5 см имел длину 4,5 м, многократно превышающую масштаб ускоряющей плазменной структуры. Для пучков с энергией в сотни МэВ сокращение длины волны излучения при сохранении компактности схемы естественно связывать с уменьшением периода ондулятора.

Широко используются ЛСЭ и в более длинноволновых, инфракрасном (ИК) и терагерцовом (ТГц), диапазонах, где они служат источниками излучения для центров коллективного пользования. К таким установкам относятся, например, ЛСЭ FELIX [25], ЛСЭ Лаборатории им. Джефферсона, на котором с использованием сверхпроводящего ускорителя с рекуперацией энергии получена непрерывная генерация мощностью 1,72 кВт на длине волны 3,1 мкм [26], и Новосибирский ЛСЭ на основе многооборотного ускорителя-рекуператора, лазеры которого перекрывают, в частности, диапазоны 80–240 мкм и 40–80 мкм при средней мощности до 0,5 кВт и пиковой мощности около 1 МВт [3; 27]. Интерес к мощным источникам ТГц- и ИК-излучения обусловлен широким кругом их приложений в спектроскопии, материаловедении, биомедицине и диагностике [28]. Перечисленные установки обладают уникальными характеристиками, но представляют собой крупные ускорительные комплексы с энергией электронов в десятки МэВ.

Более компактной альтернативой являются фотоинжекторные ускорители, способные формировать пикосекундные сгустки с энергией 3–5 МэВ, за-

рядом до 1 нКл и малым эмиттансом [29; 30]. Разработанные изначально как источники электронов для рентгеновских ЛСЭ, они в последние годы рассматриваются и как самостоятельные драйверы ЛСЭ ТГц-диапазона. На фотоинжекторном стенде PITZ с использованием ондулятора установки LCLS получена однопроходная генерация на длине волны 100 мкм с энергией импульса более 100 мкДж при энергии электронов около 17 МэВ и заряде сгустка около 2,4 нКл [31]. В работе [32] на пучке с энергией 5,5 МэВ и зарядом 200 пКл в спиральном ондуляторе длиной 0,96 м с сильным профилированием поля и волноводом, согласующим скорости волны и частиц, достигнута эффективность преобразования энергии пучка в излучение на частоте 0,16 ТГц около 10 %; возможность продвижения таких схем в область более высоких частот исследована в работе [33]. Источники когерентного спонтанного ТГц-излучения на основе сгустков фотоинжектора с энергией 5,5 МэВ предложены в работах [34; 35], а теория ондуляторного сверхизлучения коротких электронных сгустков развита в работах [36; 37]. Частота излучения таких источников ограничена сравнительно малой энергией частиц на выходе фотоинжектора. Так, при энергии электронов 5 МэВ и $K = 1$ ондулятор с периодом 3 см обеспечивает длину волны излучения около 260 мкм (частоту около 1,2 ТГц), тогда как уменьшение периода до 3 мм переводит генерацию в дальний ИК-диапазон с частотой более 10 ТГц.

В миллиметровом и сантиметровом диапазонах ЛСЭ, называемые в этом случае также мазерами на свободных электронах (МСЭ), традиционно строятся на сильноточных пучках линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) и ускорителей прямого действия с энергией частиц от сотен кэВ до единиц МэВ. На установке ELF в усилителе на частоте 34,6 ГГц с профилированным ондулятором была получена выходная мощность 1 ГВт при КПД 34 % [38], а позднее излучение МСЭ на частоте 140 ГГц использовалось в экспериментах по нагреву плазмы в токамаке MTX [39]. МСЭ миллиметрового диапазона для задач управляемого термоядерного синтеза разрабатывались также в рамках проекта FOM [40]. Широкий цикл исследований МСЭ, в том числе с брэгговскими резонаторами, выполнен в совместных работах ИПФ РАН, ОИЯИ и ИЯФ СО РАН [41–43]. Сильноточные ЛИУ формируют пучки с током более 1 кА при энергии частиц до 10 МэВ и длительности импульса от 100–200 нс до 1,5 мкс [44], и на их основе разрабатываются мощные длинноимпульсные ЛСЭ субмиллиметрового и ТГц-диапазонов [45; 46]. Для пучка ЛИУ с энергией 10 МэВ уменьшение периода ондулятора до нескольких миллиметров позволило бы перейти в средний ИК-диапазон, включающий длину волны CO_2-лазера около 10 мкм.

Ещё более компактными являются сильноточные взрывоэмиссионные ускорители прямого действия [47], формирующие релятивистские электронные пучки (РЭП) с током в килоамперы при субмегавольтной энергии частиц. На ускорителе «СИНУКИ» с ленточным РЭП (650 кэВ, 1 кА) в ИПФ РАН реализованы релятивистские генераторы поверхностной волны планарной

геометрии с выходной мощностью 25 МВт на частоте 75 ГГц [48] и 30 МВт на частоте 160 ГГц [49; 50]. Однако при столь малой энергии частиц применение ЛСЭ с ондуляторами сантиметрового периода для продвижения в субтерагерцовый диапазон невозможно. Действительно, при энергии электронов 500 кэВ и периоде ондулятора 3 см частота излучения в попутную волну даже в пределе малого ондуляторного параметра составляет около 60 ГГц, а для получения частоты порядка 300 ГГц период должен быть уменьшен до нескольких миллиметров.

Таким образом, для всех рассмотренных классов компактных ускорителей (плазменных, фотоинжекторных, индукционных и взрывоэмиссионных) уменьшение периода ондулятора позволяет существенно повысить частоту излучения при заданной энергии частиц либо снизить энергию, необходимую для работы в заданном диапазоне. Кроме того, при переходе к короткопериодному ондулятору можно ожидать сокращения длины пространства взаимодействия и снижения чувствительности ЛСЭ к угловой расходимости электронного пучка.

Традиционные ондуляторы строятся на постоянных магнитах, в том числе в гибридной конфигурации с полюсами из магнитомягкого материала, а также на электромагнитах, включая сверхпроводящие [51; 52]. Амплитуда поля на оси таких систем экспоненциально убывает с ростом отношения зазора к периоду [51; 52], поэтому уменьшение периода при сохранении ондуляторного параметра требует одновременного уменьшения зазора и повышения индукции. Размещение магнитной структуры в вакууме позволяет уменьшить зазор до нескольких миллиметров [53], а охлаждение постоянных магнитов до криогенных температур повышает амплитуду поля на 30–50 % [54]. Сверхпроводящие ондуляторы [55; 56] позволяют получать ещё более сильные поля; в частности, в ондуляторе с периодом 10 мм на основе объёмных высокотемпературных сверхпроводников при зазоре 4 мм получено рекордное для таких параметров поле 2,1 Тл [57], что соответствует ондуляторному параметру около 2. Для периодов в единицы миллиметров предлагались микроондуляторы на постоянных магнитах, размещённых в соленоиде [58], гибридные ондуляторы на постоянных магнитах с периодом 2,7 мм [59], спиральные ондуляторы, основанные на перераспределении однородного магнитного поля соленоида ферромагнитной спиралью [35], и схемы с наведёнными вихревыми токами [60]. Созданы электромагнитные микроондуляторы, в том числе с ферромагнитными сердечниками: планарный с периодом 1 см и полем на оси 0,46 Тл [61], импульсный 70-периодный с периодом 8,8 мм и полем 0,42 Тл [62], спиральный с периодом 7,9 мм и полем 0,3 Тл [63]; исследовались также импульсные микроондуляторы с периодом 9 мм, где был достигнут ондуляторный параметр ~ 1 [64]. Предложены микроондуляторы, изготавливаемые методами микромеханической обработки поверхности, с периодом от 12,5 мкм до 1 мм; в аналогичных микроэлектромеханических индукторах экспериментально получены поля 0,1–0,5 Тл в зазорах шириной

до 15 мкм, а расчётное поле при зазоре 50 мкм достигает 1,5 Тл [65], что при периоде 1 мм соответствует $K \approx 0{,}14$.

Наряду с магнитными системами рассматриваются ондуляторы, в которых поперечные колебания электронов возбуждаются электромагнитными или плазменными полями. В СВЧ-ондуляторе экспериментально получены эквивалентные период 13,9 мм и магнитное поле 0,65 Тл [66], а для ВЧ-ондулятора с периодом 1,75 мм на частоте 91,4 ГГц обеспечение эквивалентного ондуляторного параметра 0,1 требует мощности накачки около 1,4 МВт [67]. Предложены также ВЧ-ондулятор, в котором роль ондуляторного поля играет мощный короткий импульс, распространяющийся вместе с электронным сгустком в спирально гофрированном волноводе [68], схемы ЛСЭ с оптическим (лазерным) ондулятором [69], плазменный ондулятор с субмиллиметровым периодом на основе кильватерных полей, возбуждаемых лазерным импульсом в плазменном канале [70], и ондулятор, образованный полем импульсного тока, который возбуждается в тонкой металлической проволоке фемтосекундным лазерным импульсом [71]. Такие системы способны обеспечить очень малый период, однако либо дают малый ондуляторный параметр, либо требуют мощных источников накачки и её точной синхронизации с электронным пучком, что существенно усложняет их реализацию.

Основная трудность создания эффективного микроондулятора миллиметрового масштаба состоит, таким образом, в обеспечении достаточного ондуляторного параметра: для $K \sim 1$ при $\lambda_u = 1$ мм требуется ондуляторное поле на уровне 10 Тл, что недостижимо в схемах на основе постоянных магнитов и ферромагнитных сердечников, ограниченных полем насыщения ферромагнетиков ($\sim$2 Тл), и в несколько раз превышает поля, полученные в ондуляторах других типов с периодом менее 1 см. Перспективным решением является применение токовых ондуляторов, в которых сильное ондуляторное поле создаётся пропусканием тока по периодической системе проводников без магнитных сердечников [45; 55–57]. В импульсном режиме сравнительно просто достигаются токи в десятки килоампер, чего, в принципе, достаточно для сильной раскачки ондуляторных колебаний при миллиметровом периоде. При этом ключевыми ограничениями становятся джоулев нагрев проводников и действующие на них пондеромоторные силы, которые определяют предельные параметры импульса тока и требования к конструкции. Сочетание импульсного токового микроондулятора с компактными ускорителями нового поколения открывает путь к построению практически реализуемых компактных источников когерентного излучения терагерцового, ИК- и ЭУФ-диапазонов, востребованных в спектроскопии, биомедицине, диагностике плазмы [28] и ЭУФ-литографии следующего поколения [72]. Сказанное определяет актуальность темы настоящей диссертационной работы.

Цель и задачи исследования

Цель работы — разработка импульсных микроондуляторов периодом менее 1 см и ондуляторным параметром порядка единицы, а также моделирование компактных схем лазеров на свободных электронах на их основе, работающих в диапазоне от субтерагерцового до экстремального ультрафиолетового.

Задачи диссертационной работы:

1. Разработка конструкции импульсного планарного микроондулятора с миллиметровым пространственным периодом и ондуляторным полем на уровне 10 Тл, построение аналитической и численной моделей формирования ондуляторного поля и определение предельных по нагреву и механической нагрузке параметров рабочего импульса тока. Экспериментальное тестирование конструкции на электромеханическую прочность.

2. Проектирование двухслойных биметаллических вариантов микроондулятора, способных обеспечить достаточную электромеханическую прочность конструкции при работе в присутствии сильных внешних магнитных полей и/или в спиральной конфигурации.

3. Самосогласованное численное моделирование субтерагерцового ЛСЭ-генератора на основе сильноточного ленточного РЭП и двухслойного планарного импульсного микроондулятора с использованием как одномерной модели усреднённых уравнений, так и прямого трёхмерного PIC-моделирования; оптимизация резонатора ЛСЭ на основе модифицированных брэгговских отражателей.

4. Моделирование различных вариантов ЛСЭ дальнего ИК-диапазона, работающих на основе микроондуляторов и умеренно-релятивистских фотоинжекторных и линейных индукционных ускорителей электронов.

5. Анализ возможности и преимуществ использования микроондулятора с периодом 1 мм в схеме ЭУФ-генератора на электронных сгустках лазерно-плазменного кильватерного ускорителя.

Научная новизна

В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Предложена и реализована концепция планарного импульсного микроондулятора с периодом 1 мм, в котором сильное, порядка 10 Тл, ондуляторное поле с соответствующим ему рекордным для данного периода ондуляторным параметром около единицы формируется протеканием короткого мощного импульса тока по системе из пары проводящих пластин с периодическими встречными разрезами.

2. Предложены двухслойные биметаллические планарные и спиральные конструкции микроондулятора, обеспечивающие достаточную механическую жёсткость и теплоотвод при работе, в том числе в условиях сильного ведущего магнитного поля.

3. Проведена оптимизация субтерагерцового ЛСЭ-генератора на основе импульсного двухслойного микроондулятора с периодом 5 мм и сильноточного ленточного РЭП с энергией электронов 500 кэВ; численно продемонстрирована возможность генерации когерентного излучения мощностью порядка 20 МВт на частоте 289 ГГц при электронном КПД около 10 %.

4. Предложены и промоделированы компактные мультимегаваттные схемы генераторов и усилителей дальнего ИК-диапазона на основе микроондуляторов и умеренно-релятивистских электронных пучков.

5. Показано, что в ЛСЭ диапазона экстремального ультрафиолета на основе лазерно-плазменного ускорителя электронов уменьшение периода ондулятора при условии поддержания значительного ондуляторного параметра позволяет снизить требуемую энергию электронов, чувствительность к угловой расходимости пучка и полную длину генератора.

Теоретическая и практическая значимость работы

Значимость работы определяется продемонстрированной в ней возможностью обеспечения значительного параметра ондулятора при уменьшении его периода вплоть даже до 1 мм. Это открывает возможности реализации компактных и коротковолновых ЛСЭ на базе таких микроондуляторов и различных компактных же вариантов электронных ускорителей. Так, двухслойный микроондулятор с периодом 5 мм совместно с сильноточным ленточным РЭП может обеспечить выходную мощность порядка 20 МВт на частоте около 300 ГГц при компактных размерах пространства взаимодействия (125–150 мм). Применение микроондулятора с периодом 3 мм в схеме сверхизлучения на пикосекундных сгустках фотоинжектора даёт возможность достижения пиковой мощности в десятки МВт на частоте около 15 ТГц. Усилитель сигнала CO_2-лазера на пучке ЛИУ и микроондуляторе с периодом 5 мм допускает усиление до 50 дБ и выходную мощность более 100 МВт при длине усилителя 35 см (однородная схема) и около 28 см (схема клистронного типа). Использование микроондулятора с периодом 1 мм в схеме на пучке лазерно-плазменного кильватерного ускорителя позволяет получить ЭУФ-излучение с длиной волны 18,75 нм и пиковой мощностью до 100 ГВт на длине пространства взаимодействия менее 10 см. Полученные результаты востребованы при создании компактных когерентных источников ТГц-, ИК- и ЭУФ-диапазонов для биомедицины, ЭУФ-литографии, нелинейной ИК-спектроскопии и диагностики плазмы.

Положения, выносимые на защиту

1. В планарном импульсном токовом ондуляторе ондуляторный параметр, близкий к единице, обеспечивается двумя проводящими металлическими пластинами с периодической системой тонких встречных разрезов при ондуляторном периоде вплоть до 1 мм. При меньших периодах джоулев нагрев приводит к разрушению структуры вне зависимости от длительности импульсов питающего тока из-за скин-эффекта.

2. Биметаллическая конструкция ондулятора с сильно различающейся удельной проводимостью материалов слоев позволяет одновременно обеспечить близкий к единице ондуляторный параметр и достаточную механическую прочность конструкции в присутствии внешних магнитных полей, требуемых для транспортировки умеренно-релятивистских сильноточных электронных пучков.

3. Использование планарных микроондуляторов с близким к единице ондуляторным параметром в схемах ЛСЭ с мегавольтным ленточным сильноточным электронным пучком позволяет обеспечить мультимегаваттный уровень мощности излучения в субтерагерцовом диапазоне.

4. Использование ондуляторов с периодом в несколько миллиметров и близким к единице ондуляторным параметром совместно с мультимегавольтными электронными пучками, формируемыми фотоинжекторами или линейными индукционными ускорителями, позволяет реализовать компактные генераторы и усилители дальнего инфракрасного диапазона с мультимегаваттным уровнем мощности.

5. Использование микроондулятора позволяет на порядок уменьшить длину ЛСЭ-диапазона экстремального ультрафиолетового излучения на основе компактного лазерно-плазменного ускорителя электронов по сравнению с традиционными ондуляторами сантиметрового периода. Также значительно снижается чувствительность к угловой расходимости используемого электронного пучка.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается согласованием значений ондуляторного поля и предельных параметров рабочего импульса, полученных в рамках аналитической модели, методом конечных элементов и в экспериментах. Результаты численного моделирования субтерагерцового ЛСЭ согласуются между собой в двух независимых подходах (одномерная модель усреднённых уравнений и прямое трёхмерное PIC-моделирование) по частоте, выходной мощности и электронному КПД. Результаты 3D-квазиоптического моделирования ЛИУ-усилителя независимо подтверждены расчётами в коде Genesis 1.3.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были представлены в виде докладов на следующих конференциях и научных школах:

- Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и Микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2023 и 2024 г.);
- Школа для молодых учёных «Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ: источники и приложения» (Нижний Новгород, 2023 г.);
- Международная конференция «Терагерцевое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и приложения» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2023 г.);
- 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC, 2023 г.);
- Photonics & Electromagnetics Research Symposium (Чэнду, Китай, 2024 г.);
- Международная конференция «Frontiers of Nonlinear Physics» (Россия, 2024 г.);

а также посредством публикации результатов в ведущих рецензируемых журналах. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении научного проекта, поддержанного грантом РНФ № 21-72-30027. Всего по теме диссертации опубликовано 12 работ [A1–A12], из них 5 статей в рецензируемых журналах, 3 статьи в сборниках трудов конференций и 4 тезиса докладов.

Личный вклад автора

Все результаты, включенные в диссертационную работу и вошедшие в работы [A1–A12], получены лично автором либо при его непосредственном участии. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами. Результаты, полученные в расширенном коллективе авторов, включают в себя проектирование и экспериментальное исследование ондуляторов, которое проводились совместно с А. Э. Федотовым, а также моделирование схем ЛСЭ в модели усредненных уравнений, которое проводилось совместно с М. Н. Вилковым с применением программного кода, разработанного А. С. Сергеевым.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка литературы из 105 источников и списка публикаций автора. Общий объём основного текста составляет 118 страниц, включает 79 рисунков, 8 таблиц и 74 нумерованные формулы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, аргументированы новизна и научная и практическая значимость работы, представлены выносимые на защиту положения, обоснована достоверность полученных результатов, приведены данные об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объёме диссертации.

Глава 1 посвящена разработке и экспериментальному исследованию импульсных планарных микроондуляторов миллиметрового масштаба периода. Предложена концепция планарного импульсного микроондулятора в виде пары проводящих пластин с периодическими встречными разрезами; развита аналитическая модель формирования ондуляторного поля и предельных параметров рабочего импульса; численно и экспериментально исследованы однослойный (период 1 мм, для компактных пучков), двухслойный медно-стальной (период 5 мм, для сильноточных ленточных РЭП) и спиральные варианты микроондулятора.

В **разделе 1.1** рассмотрен простейший вариант микроондулятора, предназначенный для использования в ЛСЭ с компактными электронными пучками, не требующими для своего сопровождения сильных внешних магнитных полей. В качестве такой системы предлагается использовать систему двух тонких медных пластин, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга с обеих сторон от траектории электронного пучка и имеющих каждая систему периодических встречных разрезов (рис. 1) [А1, А6–А9]. Ондуляторное поле в такой системе создаётся электрическим током, протекающим вдоль пластин по искривлённой траектории, огибающей разрезы. Если величина перекрытия встречных вырезов велика по сравнению с периодом, выражение для ондуляторного поля между двумя пластинами токового микроондулятора может быть получено из решения простой двумерной задачи о распределении скалярного потенциала безвихревого магнитного поля, создаваемого периодической системой бесконечных проводников прямоугольного сечения.

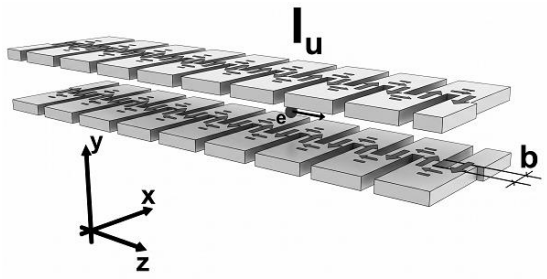


Рис. 1. Схематичное изображение микроондулятора, состоящего из пары проводящих пластин с системой встречных вырезов, формирующих искривлённые линии импульсного ондуляторного тока

Это позволяет сделать начальную оценку требуемых параметров ондулятора, исходя из желаемой величины магнитного поля. Так, представляет интерес рассмотреть сразу предельный (как показано в работе)

случай, соответствующий периоду 1 мм и амплитуде ондуляторного параметра K = 1, что требует ондуляторного поля, близкого к 10 Тл. При выбранных геометрических размерах системы, обусловленных необходимостью обеспечить одновременно беспрепятственное прохождение раскачанного электронного пучка и достаточную механическую жесткость конструкции, величина питающего ондулятор тока должна составлять для этого 8 кА.

За счёт малого пересечения встречных разрезов конструкция допускает простую реализацию плавного нарастания ондуляторного поля вдоль траектории пучка, что может быть полезно для предотвращения поперечного дрейфа частиц в ондуляторе, возникающего при резком влёте в сильное поле. Такое нарастание можно обеспечить, постепенно увеличивая перекрытие встречных вырезов вдоль пластины. Проведены прямые расчёты такой системы и экспериментальная визуализация поля с помощью жидкокристаллической плёнки на макете пластины с периодом 3 мм, полученное распределение хорошо совпадает с результатами моделирования (рис. 2) [А1].

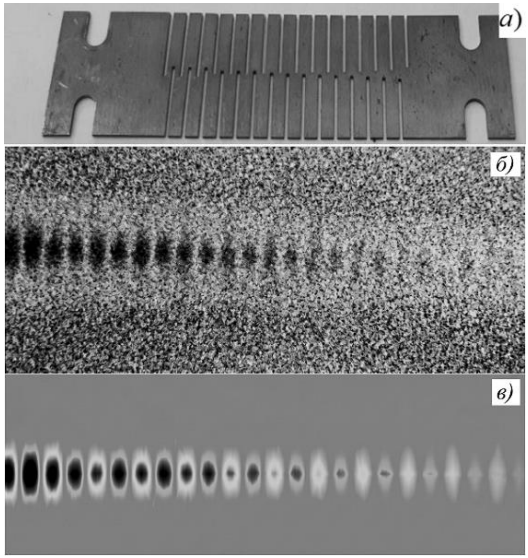


Рис. 2. Масштабная модель ондулятора с плавным включением ондуляторного поля (*а*), след магнитного поля на жидкокристаллической плёнке между двумя пластинами (*б*) и распределение поперечной компоненты поля, полученное при помощи численного моделирования (*в*)

Импульсная сила, действующая со стороны ондуляторного поля на проводники с током в 10 кА, не превышает 5 кг на период, благодаря чему токоведущие части практически не подвержены деформации, что подтверждается результатами численного моделирования. Основным фактором, ограничивающим максимально допустимую длительность импульса через пластины, является омический нагрев узкой части проводников. Теоретические оценки показывают, что при заданной геометрии и токе в 10 кА максимальная длительность синусоидального импульса составляет около 6 мкс. Нижний порог длительности импульса связан со скин-эффектом. Глубина скин-слоя для рассматриваемого микроондулятора становится меньше толщина пластины при длительности импульса менее 3 мкс, что ведёт к неоднородности распределе-

ния плотности тока плотности тока и, соответственно, к уменьшению магнитного поля.

Способность микроондулятора выдерживать пропускание импульсов тока требуемой величины была исследована экспериментально, для чего были изготовлены и протестированы несколько прототипов пластин. В результате эксперимента по пластинам удалось пропустить синусоидальный импульс тока с амплитудой до 10,5 кА длительностью 6 мкс, что подтверждает возможность создания таким микроондулятором магнитного поля величиной 10 Тл [А1].

Раздел 1.2 посвящен разработке варианта планарного микроондулятора, предназначенного для раскачки интенсивных и относительно слаборелятивистских электронных пучков с большим поперечным сечением, которые могут быть сформированы, например, ускорителями прямого действия со взрывоэмиссионными катодами. Для транспортировки таких пучков необходимо сильное ведущее магнитное поле, которое в течение импульса ондуляторного тока оказывает значительную нагрузку на более пространственно-развитый ондулятор. Это обязывает предпринимать дополнительные усилия для обеспечения достаточной механической прочности системы.

Данную проблему предлагается решить путём модифицированной конструкции планарного ондулятора, в которой пластины имеют двухслойную биметаллическую структуру (рис. 3). Тонкий токопроводящий медный слой соединен с массивным слоем из нержавеющей стали [А4, А12]. Последний, вследствие низкой относительно меди проводимости стали, вносит лишь небольшой вклад в пропускание ондуляторного тока, но при этом обеспечивает требуемую механическую жёсткость конструкции, и в результате значительной теплоёмкости может служить стоком тепла для медного слоя в промежутках между рабочими импульсами.

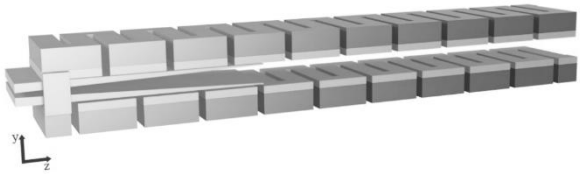


Рис. 3. Двухслойный микроондулятор с клиновидными медными пластинами в области влёта пучка в ондуляторное поле

Одну из реализаций такого микроондулятора планируется использовать в конструкции ЛСЭ субтерагерцового частотного диапазона с ленточным РЭП (500 кэВ, 1 кА, поперечные размеры 20 мм × 0,3 мм), реализованным в ИПФ РАН [48; 49]. Учитывая относительно большую толщину пучка, в данном случае интересных результатов удаётся достичь при периоде ондулятора не менее 5 мм, что при параметрах пучка соответствует рабочей частоте около 300 ГГц. Чтобы обеспечить транспортировку пучка и достаточно далеко

отстроиться от резонанса между циклотронной и ондуляторной частотами [2; 45], для ведущего поля принята оценка B_0 = 5 Тл. Ориентируясь на результаты моделирования соответствующего ЛСЭ, описанные в главе 2, выбрано значение амплитуды ондуляторного поля на оси ондулятора в 1 Тл, что соответствует ондуляторному параметру K = 0,33 и требует пропускания по ондулятору тока 6,6 кА, что обуславливает и выбор его геометрических параметров.

Результаты численного моделирования показали пренебрежимо малую деформацию двухслойных пластин под действием ведущего и ондуляторного магнитных полей. Трудностей, связанных с омическим нагревом пластин, не возникает благодаря довольно значительному по сравнению с примером из предыдущего раздела размеру системы. Плавное нарастание ондуляторного поля вдоль траектории пучка в данном случае удобно реализовать путём добавления в зазор между пластинами проводящих клиньев, которые вследствие импульсного характера ондуляторного поля частично экранируют поле в области пучка (рис. 3).

Для проверки величины ондуляторного поля в ондуляторе такой конструкции были изготовлены масштабные модели с увеличенным периодом 15 мм, чтобы иметь возможность с большей точностью измерить поле на оси в зазоре между пластинами (рис. 4, *а*). Были проведены измерения с малым постоянным током 50 А, которые с высокой точностью совпали с результатами численного моделирования, что говорит об адекватности модели распределения тока в двухслойных пластинах.

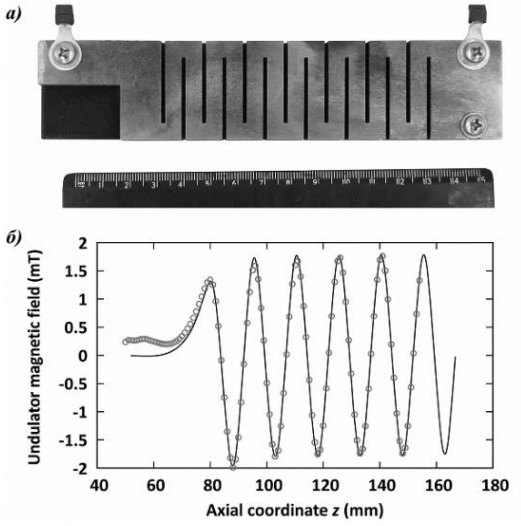


Рис. 4. Изготовленный двухслойный макет ондулятора с периодом 15 мм (*а*) и результаты моделирования (сплошная линия) и измерения в нём (круглые маркеры) ондуляторного поля (*б*)

Для демонстрации работоспособности ондулятора в ведущем магнитном поле были изготовлены макеты двухслойных пластин с проектным периодом 5 мм (рис. 4, *б*). Пластины были размещены в оснастке и зафиксированы эпоксидной смолой. На одну из пластин для изоляции сверху была нанесена тонкая плёнка из слюды, на другую нанесён тонкий изоляционный слой, а сверху нанесена медная фольга как имитация стенки планарного волновода. Ток по пластинам протекал последова-

тельно, на одном из концов они были соединены. Макет был помещен в соленоид, способный создавать ведущее поле 4 Тл. Такая схема создавала импульсы тока длительностью 38 мкс и амплитудой до 11 кА. В ходе испытаний на пластины были поданы более 10 импульсов тока амплитудой 10 кА. После этого не было обнаружено никаких деформаций ни на самих пластинах, ни на изолирующем слое из слюды. Визуальных следов пробоя между ондуляторными проводниками, пластинами ондулятора и медной фольгой или изменения электрических свойств ондулятора также не наблюдалось.

Заметным недостатком планарного ондулятора является непостоянство ондуляторного параметра вдоль траектории пучка, что приводит к снижению коэффициента связи с пучком до среднеквадратичного значения и осцилляциям продольной скорости частиц. Поэтому в **разделе 1.3** в качестве альтернативы рассмотрен ондулятор спиральной геометрии, выполненный в виде двухслойной биметаллической бифилярной спирали. В такой геометрии ондуляторный параметр остаётся постоянным на всём ондуляторном периоде, повышая параметр Пирса в $\sqrt[3]{2}=1{,}25$ раза. При периоде такого ондулятора в 5 мм, внутреннем диаметре 3 мм, и толщинах стального и медного слоёв 2 и 0,5 мм соответственно пропускание по нему тока в 10 кА создаёт на оси спиральное ондуляторное поле с амплитудой 1,18 Тл, что соответствует постоянному ондуляторному параметру K = 0,55.

Равномерное наращивание меди на внутренней поверхности бифилярной спирали может оказаться трудной задачей. Поэтому в качестве более простой в производстве модели ондулятора рассмотрена система из четырёх планарных пластин. Каждая следующая по часовой стрелке пластина сдвинута на $\lambda_u/4$ по продольной оси z, образуя квази-спиральную геометрию. Такая конструкция микроондулятора совмещает в себе преимущества спиральной (увеличенный ондуляторный параметр) и планарной (простота изготовления и реализации плавного входа) геометрий, что делает её перспективной при использовании в ЛСЭ с пучками малых поперечных размеров. При толщине пластин 0,5 мм и зазоре между ними 2,4 мм амплитуда магнитного поля при пропускании по пластинам тока в 10 кА достигает 1,08 Тл, что соответствует ондуляторному параметру K = 0,5.

В **разделе 1.4** приводятся основные результаты главы 1.

В **Главе 2** излагаются результаты моделирования ЛСЭ с интенсивным ленточным РЭП и планарным двухслойным микроондулятором, описанным в разделе 1.2. Показано, что использование ондулятора с периодом 5 мм и килоамперного пучка с энергией частиц порядка 500 кэВ может обеспечить генерацию импульсов миллиметрового излучения с мощностью в несколько десятков мегаватт.

В **разделе 2.1** ключевые параметры ЛСЭ на линейной стадии усиления рабочей волны оцениваются в рамках модели одномерных усреднённых

уравнений движения частиц [1; 2]. Оценка параметров производилась для двух вариантов сильноточных ускорителей в ИПФ РАН, отличающихся, главным образом, ускоряющим напряжением — ускорителя «СИНУС» с характерной энергией частиц пучка около 500 кэВ и ускорителя «СИНУКИ» с энергией около 650 кэВ. Оптимальный режим вычислялся исходя из минимизации обратного инкремента при условии достаточной отстройки от резонанса между ондуляторными и циклотронными колебаниями и так называемого режима «отрицательной массы» [2; 34]. Эти оценки показывают, что для пучка с энергией 500 кэВ наилучших результатов удаётся добиться при периоде ондулятора в 5 мм, что позволяет получить выходной сигнал на частоте около 300 ГГц. Для пучка же с ускоряющим напряжением в 650 кВ, в связи с ограниченностью доступного ведущего магнитного поля в ускорителе «СИНУКИ» величиной 3 Тл, близким к оптимальному является период в 10 мм, и при этом существенно снижается частота генерации (до ~220 ГГц) и увеличивается обратный инкремент. Поэтому дальнейшие расчёты проводились только для ондулятора с периодом 5 мм.

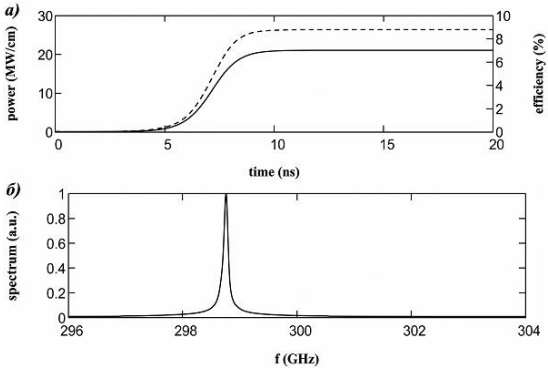


Рис. 5. Результаты численного моделирования в рамках модели усреднённых уравнений: *а* — зависимость выходной мощности (сплошная линия) и электронного КПД (пунктирная линия) от времени; *б* — спектр выходного излучения

В исследуемой модели уравнения ЛСЭ были дополнены условиями, соответствующими использованию брэгговских отражателей [41; 73–76] для организации обратной связи в ЛСЭ-генераторе. В рассмотренном варианте предполагается использование модифицированного брэгговского отражателя [75; 76], в котором за счёт связи падающей и отражённой волн через возбуждение квазикритической волны внутри самого рефлектора достигается более узкая полоса отражения, чем в обычном брэгговском зеркале. Результаты моделирования с ленточным пучком с энергией частиц 500 кэВ и током 1 кА показывают выход на стационарный режим генерации при электронном КПД 8,8 % и выходной мощности около 21 МВт/см (рис. 5).

В **разделе 2.2** планарный ЛСЭ с ленточным РЭП и 5 мм-микроондулятором, проектируемый под ускоритель с энергией электронов 500 кэВ, исследуется с помощью прямого трёхмерного численного PIC-моделирования. Для этого сначала исследуется динамика электронного пучка в комбинации рабо-

чих полей, и при помощи однопроходных расчётов определяются ожидаемая эффективность схемы и оптимальные параметры резонатора, затем подбираются «холодные» параметры брэгговских отражателей и проводится полное моделирование временной динамики лазера.

Численное моделирование динамики пучка с помощью PIC-кода показало, что при плавном нарастании поля в ондуляторе вдоль траектории пучка амплитуда ондуляторных колебаний нарастает также плавно, без существенной раскачки циклотронных колебаний. Максимальное значение ондуляторного параметра, при котором пучок ещё не задевает стенок волновода с поперечным сечением $24 \times 2{,}3$ мм^2, составляет в этом случае 0,43, что соответствует амплитуде ондуляторного поля $B_u = 1{,}3$ Тл. Поскольку инкремент в рабочей области параметров слабо зависит от K, в дальнейшем используется меньшее значение $K = 0{,}33$ ($B_u = 1$ Тл), позволяющее отстроиться от этого предельного случая. При резком «включении» ондуляторного поля к ондуляторным колебаниям подмешиваются циклотронные с другим периодом, и траектория частиц перестаёт быть синусоидальной, что приводит к увеличению скоростного разброса и оседанию частиц на стенках волновода при меньшем ондуляторном поле и подтверждает необходимость плавного входа в ондулятор.

Прямое трёхмерное PIC-моделирование длительных процессов с большим числом макрочастиц весьма ресурсоёмко, особенно если размеры расчетной области намного превышают длину волны излучения. Поэтому расчёты проводились для узкой квазидвумерной системы с пучком шириной 1 мм вместо 20 мм с сохранением его плотности тока. По бокам узкого волновода задавались магнитные граничные условия, что соответствовало бесконечному вдоль оси x пучку. Кроме того, без принятия специальных мер PIC-моделирование сопровождалось численной неустойчивостью, связанной с паразитной генерацией на сетке, развивающейся на частотах от 1,5 ТГц и выше, что существенно увеличивает время старта ЛСЭ и его выходную мощность. Поэтому пространство взаимодействия в расчётах заполнено не вакуумом, а средой с комплексной диэлектрической проницаемостью, сильно поглощающей излучение в диапазоне 1,5–4 ТГц, которая, однако, вносит некоторые потери и на рабочей частоте, избежать которых невозможно.

Первым делом была проведена серия расчетов с моделированием отдельных проходов рабочей волны через ондулятор. Варьируя частоту и мощность волны на входе в пространство взаимодействия и вычисляя изменение этой мощности к его концу, можно найти либо зависимость коэффициента усиления от частоты в линейном режиме, если входная мощность мала, либо оптимальный нелинейный режим генерации и соответствующие ему потери мощности волны за обход резонатора. Впоследствии эта информация используется для выбора оптимальных центральной частоты и коэффициента отражения брэгговских рефлекторов. Расчёты были проведены при различных значениях тока пучка и длины пространства взаимодействия, с сохранением величины

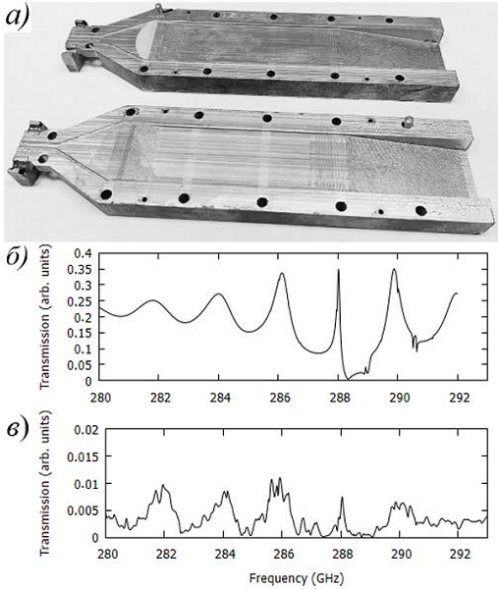


Рис. 6. Макет резонатора (*а*), результаты моделирования (*б*) и измерения (*в*) коэффициента прохождения через резонатор

ведущего магнитного поля и энергии частиц. Наилучших результатов удалось достичь при токе узкого пучка в 50 А и длине ондуляторной части 125 мм (25 периодов ондулятора) на частоте 288 ГГц. Волновой КПД составил 9 %, электронный КПД – 14 %, а оптимальный коэффициент отражения брэгговских зеркал по мощности – 0,5. Разность волнового и электронного КПД объясняется излучением в высшие моды при отражении от модифицированного брэгговского зеркала, статическим провисанием потенциала в волноводе, а также численными ошибками и влиянием возникающей численной неустойчивости.

Для организации обратной связи в ЛСЭ был спроектирован резонатор с использованием модифицированного брэгговского отражателя. Его максимум коэффициента отражения достигается на частоте 289 ГГц и составляет 0,974 при ширине полосы по уровню 0,7, равной 2,5 ГГц. Число периодов гофрировки выбрано равным 10, в отражателе возбуждается квазикритическая TM_4-мода.

Для экспериментального исследования характеристик резонатора был изготовлен его макет методом фотополимерной 3D-печати с последующей металлизацией (рис. 6, *а*). Он представлял собой фактически резонатор Фабри – Перо в виде сверхразмерного прямоугольного волновода сечением 21 мм × 2,1 мм с рабочей модой TE_{10}. С одного конца резонатор был ограничен классическим брэгговским рефлектором с расчётным коэффициентом отражения по мощности около 95 % в широкой полосе частот, а с другой стороны — описанным выше модифицированным брэгговским рефлектором с резонансной частотой 289 ГГц. Межмодовый интервал в резонаторе составлял около 2 ГГц, так что в полосу рефлектора попадало не более одной продольной моды.

Результаты измерений коэффициента прохождения через резонатор показывают наличие гребёнки продольных мод, среди которых видна одна высокодобротная мода с добротностью примерно 2200 и несколько низкодобротных мод, что хорошо соотносится с теорией (рис. 6, *б, в*).

На основе параметров, полученных в однопроходном моделировании, были проведены нестационарные расчёты временной динамики ЛСЭ с полным резонатором (рис. 7). В расчётах использовались различные резонаторные системы, лучших результатов удалось достичь при применении классической компоновки с модифицированным брэггом с катодного конца, и классическим широкополосным брэггом с коллекторного конца. При токе узкого пучка 50 А и длине ондуляторной части 125 мм выходная мощность на частоте 289 ГГц составила 1 МВт/мм, что в пересчёте на широкий пучок соответствует выходной мощности 20 МВт.

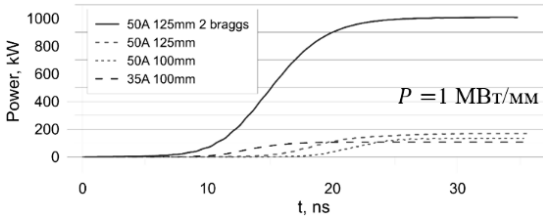


Рис. 7. Результаты численного моделирования в рамках трёхмерного PIC-моделирования для разных конфигураций резонатора

В **разделе 2.3** приводятся основные результаты главы 2.

Глава 3 посвящена исследованию возможности и преимущества использования разработанных микроондуляторов для генерации излучения в более коротковолновых диапазонах — дальнем инфракрасном и экстремальном ультрафиолетовом.

В **разделе 3.1** исследуется возможность использования микроондулятора, рассмотренного в разделе 1.1, для генерации ИК-излучения короткими плотными электронными сгустками, формируемыми фотоинжекторным ускорителем, в режиме сверхизлучения [А2, А10]. Обычно такие ускорители обеспечивают энергию частиц в единицы МэВ при очень малом энергетическом и скоростном разбросе и используются в том числе как источники пучков в первых каскадах ГэВ-ных ускорителей для проектов типа XFEL [30; 31]. Здесь предполагается, что пучок с выхода фотоинжектора попадает сразу в пространство взаимодействия с микроондулятором и излучает в более длинноволновом диапазоне в режиме сверхизлучения [36; 37]. Для моделирования этой системы

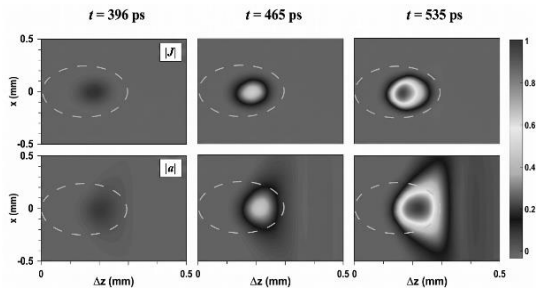


Рис. 8. Формирование импульса излучения ИК-диапазона. Сверху — амплитуда высокочастотного тока внутри эллипсоидного электронного сгустка; снизу — x-компонента электрического поля излучения в те же моменты времени. Все графики приведены в сечении, движущемся вместе со сгустком

используется квазиоптическая модель на основе усреднённых уравнений, подобная использованной ранее в разделе 2.1.

Было проведено моделирование излучения электронного сгустка с энергией частиц 5 МэВ, длиной 0,15 мм, поперечным радиусом 0,25 мм и полным зарядом 0,25–1 нКл (рис. 8). Общее число макрочастиц составляло 2 миллиона. Электроны двигались в поле микроондулятора с периодом 3 мм, длиной 160 мм и амплитудой ондуляторного поля 3,6 Тл ($K \approx 1$); излучение распространялось в планарном волноводе с зазором между пластинами в 1 мм, центральная частота импульса излучения составила 15,5 ТГц. При заряде сгустка 250 пКл пиковая мощность достигает 20 МВт, а длительность импульса составляет около 0,3 пс.

В **разделе 3.2** рассмотрена возможность генерации и усиления импульсного излучения относительно большой длительности в ИК-диапазоне. Для этого могут использоваться интенсивные электронные пучки линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) [44]. Применение микроондулятора совместно с пучком ЛИУ позволяет сократить продольный размер ЛСЭ-усилителя, обеспечивающего высокую пиковую мощность в ИК-диапазоне [А5]. Для расчётов также использовалась квазиоптическая модель, но в отличие от случая сверхизлучения, граничное условие для поля на левой границе соответствовало ненулевому входному сигналу с гауссовым поперечным распределением.

В качестве источника ондуляторного поля в исследуемой схеме предполагается импульсный токовый микроондулятор с периодом 5 мм и амплитудой магнитного поля 2,147 Тл, что соответствует ондуляторному параметру на оси $K = 1$, а в качестве источника электронов — интенсивный пучок ЛИУ с энергией частиц 10 МэВ, током 0,5 кА и диаметром 1 мм. Входным сигналом служит излучение CO_2-лазера или неодимового лазера с выходной мощностью 1–1,5 кВт и длиной волны 10 мкм. Согласно проведённому моделированию, усиление до 50 дБ и выходная мощность до 170 МВт достигаются на длине усилителя около 35–40 см. Для дальнейшего сокращения длины ондулятора рассматривается схема клистронного типа, в которой ондулятор разделён на входную секцию (где пучок приобретает модуляцию по энергии) и

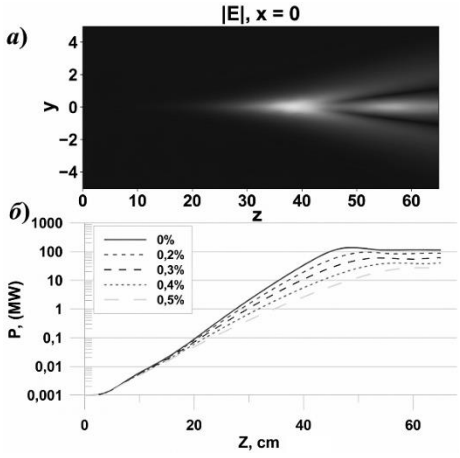


Рис. 9. Амплитуда поля в продольном сечении, полученная с помощью кода Genesis 1.3 (*а*), рост мощности рабочей волны при разных значениях относительного энергетического разброса (*б*)

выходную секцию (где излучается усиленный сигнал), разделённые дрейфовой областью, в которой модуляция по энергии преобразуется в модуляцию плотности.

Для независимой проверки результатов расчётов использовался код Genesis 1.3 [77], способный учитывать трёхмерную динамику частиц, продольный пространственный заряд пучка, а также эффекты дифракции и каналирования лазерного излучения (рис. 9). Максимальная выходная мощность при идентичных входных параметрах с учётом продольного пространственного заряда достигает 140 МВт, что хорошо соответствует 170 МВт в предыдущей модели. Учёт энергетического разброса снижает её до 30 МВт при относительном разбросе в 0,5 %, однако в литературе встречаются примеры ЛИУ с характерным разбросом около 0,2 %, для которых расчёты предсказывают выходную мощность на уровне 100 МВт.

В **разделе 3.3** исследованы преимущества, которые может дать использование микроондуляторов в ЛСЭ диапазона ЭУФ с плазменными укорителями электронов. Показано, что переход от классического ондулятора с периодом 1 см к микроондулятору с миллиметровым периодом позволяет не только снизить требуемую энергию частиц, но также сократить общую длину ондулятора и уменьшить чувствительность к угловому разбросу частиц в пучке [А3, А11]. Моделирование проводилось с использованием кода Genesis 1.3, в качестве базовых параметров моделирования были выбраны значения, близкие к лучшим характеристикам имеющихся в настоящее время плазменных ускорителей: заряд сгустка 100 пКл, поперечный радиус 3 мкм и длительность 10 фс. Рассматривался планарный ондулятор с периодом 1 мм и ондуляторным параметром $K = 0{,}7$; при лоренц-факторе электронов $\gamma = 200$ длина волны излучения составила 18,75 нм. Проведено моделирование чувствительности к энергетическому разбросу частиц для ондуляторов с периодом 1 и 10 мм. Для сохранения длины волны излучения лоренц-фактор увеличен в $\sqrt{10}$ раз в случае периода 10 мм. При отсутствии разброса результаты для 1 мм хорошо согласуются с аналитическими оценками, и усиление остаётся эффективным вплоть до разброса 4–6 %. Для периода 10 мм инкремент уменьшается более чем в 10 раз, а чувствительность к разбросу возрастает.

Моделирование влияния углового разброса выявило существенно большую критичность длиннопериодного ондулятора к расходимости пучка. При расходимости 0,03 мрад усиление в ондуляторе с периодом 10 мм практически отсутствует, в то время как при периоде 1 мм оно остаётся достаточно эффективным. Угловая расходимость в первую очередь геометрически снижает плотность тока вдоль траектории пучка, и этот эффект значительно сильнее на большой длине при слабой фокусировке. В **разделе 3.4** приводятся основные результаты главы 3.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработаны несколько вариантов импульсных планарных микроондуляторов с периодом миллиметрового масштаба, а также промоделированы несколько схем ЛСЭ, использующих такие микроондуляторы. Получены следующие основные результаты:

1. Разработаны, изготовлены и экспериментально протестированы при рабочих значениях параметров различные варианты импульсных микроондуляторов с периодом 5–1 мм, способные обеспечить рекордно высокие (до единицы) значения ондуляторного параметра, в т. ч. при минимальном периоде. Реализованные микроондуляторы пригодны к использованию в системах с сильным ведущим магнитным полем и связанных с ним дополнительных механических нагрузках.

2. При помощи численного анализа в рамках усредненных моделей и прямого PIC-моделирования (код CST) показано, что использование микроондулятора при реализации субтерагерцового ЛСЭ с ленточным сильноточным релятивистским электронным пучком позволяет обеспечить уровень мощности в десятки мегаватт в импульсах излучения с длиной волны около 1 мм и длительностью несколько десятков наносекунд при полной длине пространства взаимодействия около 20 см.

3. При помощи моделирования в рамках трёхмерного квазиоптического приближения показано, что при пролёте через микроондулятор интенсивных электронных пучков, формируемых в фотоинжекторных или линейных индукционных ускорителях, возможна реализация режимов сверхизлучения и усиления излучения в дальнем ИК-диапазоне с выходной импульсной мощностью в десятки мегаватт при длине пространства взаимодействия в несколько десятков сантиметров.

4. При помощи численного моделирования в рамках кода Genesis показано, что использование микроондулятора с периодом 1 мм позволяет реализовать источник экстремального ультрафиолетового излучения на основе электронных сгустков, получаемых в плазменном ускорителе с кильватерным полем. Микроондуляторы позволяют на порядок сократить длину пространства взаимодействия и тем самым существенно снизить требования к угловой расходимости электронного пучка по сравнению с ЛСЭ, основанной на использовании традиционного ондулятора с сантиметровым периодом.

Совокупность полученных результатов открывает практическую возможность построения нового класса компактных источников когерентного электромагнитного излучения на единой ондуляторной основе — импульсном токовом планарном микроондуляторе с миллиметровым пространственным периодом. Такие источники охватывают широкий диапазон длин волн (от субтерагерцового до экстремального ультрафиолетового), обеспечивают ме-

гаваттный и гигаваттный уровень пиковой мощности и требуют пространства взаимодействия от единиц до десятков сантиметров. Они могут быть востребованы в нелинейной ИК-спектроскопии и физике сильных полей, биомедицинских ТГц-приложениях, ЭУФ-литографии следующего поколения, диагностике плазмы и атмосферном дистанционном зондировании. Перспективы развития работы связаны с экспериментальной реализацией субтерагерцового ЛСЭ на установке «СИНУС» ИПФ РАН, проектом ТГц-ЛСЭ на ЛИУ в кооперации с ИЯФ им. Г. И. Будкера, а также с возможностью повышения КПД за счёт профилирования периода микроондулятора и применения его в схемах с компактными ускорителями нового поколения.

Список литературы

1. Bratman V. L. Nonlinear theory of stimulated wave scattering by relativistic electron beams / V. L. Bratman, N. S. Ginzburg, M. I. Petelin // Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki. — 1979. — Vol. 76. — P. 930–943.
2. Freund H. P. Principles of free-electron lasers / H. P. Freund, T. M. Antonsen. — Springer, 1992.
3. Vinokurov N. Free electron lasers as a high-power terahertz sources / N. Vinokurov // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. — 2011. — Vol. 32, no. 10. — P. 1123–1143.
4. Motz H. Experiments on Radiation by Fast Electron Beams / H. Motz, W. Thon, R. N. Whitehurst // Journal of Applied Physics. — 1953. — Vol. 24, no. 7. — P. 826–833.
5. Madey J. M. J. Stimulated Emission of Bremsstrahlung in a Periodic Magnetic Field / J. M. J. Madey // Journal of Applied Physics. — 1971. — Vol. 42, no. 5. — P. 1906–1913.
6. Deacon D. A. G. First Operation of a Free-Electron Laser / D. A. G. Deacon [et al.] // Physical Review Letters. — 1977. — Vol. 38, no. 16. — P. 892–894.
7. Девятков Н. Д. и др. Особенности механизма когерентного оптического излучения в релятивистских ондуляторных приборах // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67. – №. 11. – С. 131-132.
8. Kondratenko A. M. Generation of coherent radiation by a relativistic electron beam in an ondulator / A. M. Kondratenko, E. L. Saldin // Particle Accelerators. — 1980. — Vol. 10. — P. 207–216.
9. Bonifacio R. Collective instabilities and high-gain regime in a free electron laser / R. Bonifacio, C. Pellegrini, L. M. Narducci // Optics Communications. — 1984. — Vol. 50, no. 6. — P. 373–378.
10. Barends T. R. M. et al. Serial femtosecond crystallography // Nature Reviews Methods Primers. — 2022. — Vol. 2, no. 1. — P. 59.
11. Geneaux R. et al. Transient absorption spectroscopy using high harmonic generation: a review of ultrafast X-ray dynamics in molecules and solids // Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences. — 2019. — Vol. 377, no. 2145. — P. 20170463.
12. Kraus D., Preston T. R., Zastrau U. Warm dense matter studies with X-ray free-electron lasers //Nature Reviews Physics. — 2026. — Vol. 8, no. 1. — P. 27–39.
13. Socol Y. et al. Compact 13.5-nm free-electron laser for extreme ultraviolet lithography //Physical Review Special Topics — Accelerators and Beams. — 2011. — Vol. 14, no. 4. — P. 040702.
14. Kawata H. High power light source for future extreme ultraviolet lithography based on energy-recovery linac free-electron laser / H. Kawata [et al.] // Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology. — 2022. — Vol. 21, no. 2. — P. 021210.

15. Ackermann W. Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window / W. Ackermann [et al.] // Nature Photonics. — 2007. — Vol. 1, no. 6. — P. 336–342.
16. Emma P. First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser / P. Emma [et al.] // Nature Photonics. — 2010. — Vol. 4, no. 9. — P. 641–647.
17. Yabashi M. Overview of the SACLA facility / M. Yabashi, H. Tanaka, T. Ishikawa // Journal of Synchrotron Radiation. — 2015. — Vol. 22, no. 3. — P. 477–484.
18. Kang H.-S. Hard X-ray free-electron laser with femtosecond-scale timing jitter / H.-S. Kang [et al.] // Nature Photonics. — 2017. — Vol. 11, no. 11. — P. 708–713.
19. Decking W. A MHz-repetition-rate hard X-ray free-electron laser driven by a superconducting linear accelerator / W. Decking [et al.] // Nature photonics. — 2020. — Vol. 14, no. 6. — P. 391–397.
20. Prat, E. A compact and cost-effective hard X-ray free-electron laser driven by a high-brightness and low-energy electron beam / E. Prat [et al.] // Nature Photonics. — 2020. — Vol. 14, no. 12. — P. 748–754.
21. Wang W. Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator / W. Wang [et al.] // Nature. — 2021. — Vol. 595, no. 7868. — P. 516–520.
22. Leemans W. P. GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator / W. P. Leemans [et al.] // Nature Physics. — 2006. — Vol. 2, no. 10. — P. 696–699.
23. Gonsalves A. J. Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide / A. J. Gonsalves [et al.] // Physical Review Letters. — 2019. — Vol. 122, no. 8. — P. 084801.
24. Labat M. Seeded free-electron laser driven by a compact laser plasma accelerator / M. Labat [et al.] // Nature Photonics. — 2023. — Vol. 17, no. 2. — P. 150–156.
25. Oepts D. The Free-Electron-Laser user facility FELIX / D. Oepts, A. F. G. van der Meer, P. W. van Amersfoort // Infrared Physics & Technology. — 1995. — Vol. 36, no. 1. — P. 297–308.
26. Neil G. R. Sustained Kilowatt Lasing in a Free-Electron Laser with Same-Cell Energy Recovery / G. R. Neil [et al.] // Physical Review Letters. — 2000. — Vol. 84, no. 4. — P. 662–665.
27. Kulipanov G. N. Novosibirsk Free Electron Laser—Facility Description and Recent Experiments / G. N. Kulipanov [et al.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. — 2015. — Vol. 5, no. 5. — P. 798–809.
28. Dhillon S. S. The 2017 terahertz science and technology roadmap / S. S. Dhillon [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2017. — Vol. 50, no. 4. — P. 043001.

29. Faillace L. High field hybrid photoinjector electron source for advanced light source applications / L. Faillace [et al.] // Physical Review Accelerators and Beams. — 2022. — Vol. 25, no. 6. — P. 063401.
30. Stephan F. Detailed characterization of electron sources yielding first demonstration of European X-ray Free-Electron Laser beam quality / F. Stephan [et al.] // Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams. — 2010. — Vol. 13, no. 2. — P. 020704.
31. Krasilnikov M. First high peak and average power single-pass THz free-electron laser in operation / M. Krasilnikov [et al.] // Physical Review Accelerators and Beams. — 2025. — Vol. 28, no. 3. — P. 030701.
32. Fisher A. Single-pass high-efficiency terahertz free-electron laser / A. Fisher [et al.] // Nature Photonics. — 2022. — Vol. 16, no. 6. — P. 441–447.
33. Fisher A. Towards higher frequencies in a compact prebunched waveguide THz-FEL / A. Fisher [et al.] // Nature Communications. — 2024. — Vol. 15. — P. 7582.
34. Balal N. Negative-mass mitigation of Coulomb repulsion for terahertz undulator radiation of electron bunches / N. Balal [et al.] // Applied Physics Letters. — 2015. — Vol. 107, no. 16.
35. Balal N. Helical undulator based on partial redistribution of uniform magnetic field / N. Balal [et al.] // Physical Review Accelerators and Beams. — 2017. — Vol. 20, no. 12. — P. 122401.
36. Гинзбург Н. С. Коллективное индуцированное излучение пространственно ограниченных ансамблей электронов-осцилляторов: эффекты канализации и сверхизлучения / Н. С. Гинзбург, А. С. Сергеев // Журнал технической физики. — 1990. — Т. 60, № 8. — С. 40–52.
37. Гинзбург Н. Эффект ондуляторного сверхизлучения и возможность его использования для генерации мультимегаваттных импульсов терагерцевого диапазона / Н. Гинзбург [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2014. — Т. 146, № 4. — С. 720–729.
38. Orzechowski T. J. High-Efficiency Extraction of Microwave Radiation from a Tapered-Wiggler Free-Electron Laser / T. J. Orzechowski [et al.] // Physical Review Letters. — 1986. — Vol. 57, no. 17. — P. 2172–2175.
39. Allen S. L. Generation of high power 140 GHz microwaves with an FEL for the MTX experiment / S. L. Allen [et al.] // Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference. — Washington: IEEE, 1993. — P. 1551–1553.
40. Verhoeven A. G. A. First microwave generation in the FOM free-electron maser / A. G. A. Verhoeven [et al.] // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 1998. — Vol. 40, 8A. — A139–A156.
41. Песков Н. Мощные мазеры на свободных электронах на основе линейных индукционных ускорителей / Н. Песков [и др.] // Известия ВУЗов: Радиофизика. — 2020. — Т. 63, № 12. — С. 1032–1081.

42. Peskov N. Y. High-power broadband 30-GHz FEM amplifier operated in the grazing incident regime / N. Y. Peskov [et al.] // Applied Physics Letters. — 2017. — Vol. 110, no. 1.
43. Kaminsky A. K. Experimental demonstration of free electron maser operation in the regime of non-resonant trapping / A. K. Kaminsky [et al.] // Applied Physics Letters. — 2019. — Vol. 115, no. 16.
44. Humphries, S. Principles of charged particle acceleration / S. Humphries. — Courier Corporation, 2013.
45. Аржанников А. В. Разработка мощных длинноимпульсных лазеров на свободных электронах субмиллиметрового диапазона на основе ускорительного комплекса «ЛИУ» / А. В. Аржанников, П. А. Бак, В. И. Белоусов [и др.] // Известия ВУЗов: Радиофизика. — 2021. — Т. 64, № 11. — С. 905–916.
46. Peskov N. Y. Project of powerful long-pulse sub-THz/THz band FEL: development of selective oversized electrodynamic system / N. Y. Peskov [et al.] // The 5-th International Conference “Terahertz and microwave radiation: generation, detection and applications” (TERA-2023). — 2023. — P. 54–54.
47. Gang W. Development of a 20 GW compact lightweight Tesla-transformer pulsed power driver / W. Gang [et al.] // High Power Laser and Particle Beams. — 2026. — Vol. 38. — P. 1–9.
48. Palitsin A. V. 75 GHz relativistic surface-wave oscillator of planar geometry / A. V. Palitsin [et al.] // IEEE Electron Device Letters. — 2022. — Vol. 44, no. 2. — P. 317–320.
49. Zaslavsky V. Y. High-power G–band Relativistic Surface-Wave Oscillator with 2D-periodic Slow-Wave Structure of Planar Geometry / V. Y. Zaslavsky [et al.] // IEEE Electron Device Letters. — 2025. — Vol. 46, no. 5. — P. 848–851.
50. Ginzburg N. S. Production of High-Power Sub-THz Radiation in Oversized Surface-Wave Oscillators Using 2D Feedback / N. S. Ginzburg [et al.] // 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring). — IEEE. 2025. — P. 1–4.
51. Brown G. Wiggler and undulator magnets — A review / G. Brown [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1983. — Vol. 208, no. 1–3. — P. 65–77.
52. Pflueger J. Undulator technology / J. Pflueger // CERN Yellow Reports: School Proceedings. — 2018. — No. 1.
53. Calvi M. Magnetic assessment and modelling of the Aramis undulator beamline / M. Calvi [et al.] // Journal of Synchrotron Radiation. — 2018. — Vol. 25, no. 3. — P. 686–705.
54. Hara T. Cryogenic permanent magnet undulators / T. Hara [et al.] // Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams. — 2004. — Vol. 7, no. 5. — P. 050702.
55. Ben-Zvi I. The performance of a superconducting micro-undulator prototype / I. Ben-Zvi [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec-

tion A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1990. — Vol. 297, no. 1/2. — P. 301–305.
56. Zhang K. Review and prospects of world-wide superconducting undulator development for synchrotrons and FELs / K. Zhang, M. Calvi // Superconductor Science and Technology. — 2022. — Vol. 35, no. 9. — P. 093001.
57. Zhang K. Record field in a 10 mm-period bulk high-temperature superconducting undulator / K. Zhang [et al.] // Superconductor Science and Technology. — 2023. — Vol. 36, no. 5. — 05LT01.
58. Varfolomeev A. A. Strong magnetic field microundulator with permanent magnets inserted into a solenoid / A. A. Varfolomeev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1993. — Vol. 331, no. 1–3. — P. 745–747.
59. Papadichev V. A. A 2.7 mm period hybrid PM undulator / V. A. Papadichev, G. V. Rybalchenko // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1998. — Vol. 407, no. 1– 3. — P. 419–422.
60. Balal N. New varieties of helical undulators / N. Balal, V. L. Bratman, E. Magory // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Vol. 971. — P. 163895.
61. Stoner R. A planar electromagnet microwiggler for free electron lasers / R. Stoner, S. C. Chen, G. Bekefi // IEEE Transactions on Plasma Science. — 1990. — Vol. 18, no. 3. — P. 387–391.
62. Stoner R. A 70-period high-precision microwiggler for free electron lasers / R. Stoner, G. Bekefi // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1995. — Vol. 31, no. 6. — P. 1158–1165.
63. Ohigashi N. Development of an electromagnetic helical microwiggler with permanent magnets / N. Ohigashi [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1998. — Vol. 34, no. 12. — P. 2265–2274.
64. Warren R. W. High-field pulsed microwigglers / R. W. Warren, D. W. Feldman, D. Preston // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1990. — Vol. 296, no. 1–3. — P. 558–562.
65. Harrison J. Surface-micromachined magnetic undulator with period length between 10 μm and 1 mm for advanced light sources / J. Harrison [et al.] // Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams. — 2012. — Vol. 15, no. 7. — P. 070703.
66. Tantawi S. Experimental demonstration of a tunable microwave undulator / S. Tantawi [et al.] // Physical Review Letters. — 2014. — Vol. 112, no. 16. — P. 164802.
67. Toufexis F. Development of a millimeter-period rf undulator / F. Toufexis, S. G. Tantawi // Physical Review Accelerators and Beams. — 2019. — Vol. 22, no. 12. — P. 120701.

68. Kuzikov S. V. Flying radio frequency undulator / S. V. Kuzikov, A. V. Savilov, A. A. Vikharev // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 105, no. 3.
69. Chang C. High-Gain Thompson-Scattering X-Ray Free-Electron Laser by Time-Synchronic Laterally Tilted Optical Wave / C. Chang, C. Tang, J. Wu // Physical Review Letters. — 2013. — Vol. 110, no. 6. — P. 064802.
70. Rykovanov S. G. Plasma undulator based on laser excitation of wakefields in a plasma channel / S. G. Rykovanov [et al.] // Physical Review Letters. — 2015. — Vol. 114, no. 14. — P. 145003.
71. Tian Y. Femtosecond-laser-driven wire-guided helical undulator for intense terahertz radiation / Y. Tian [et al.] // Nature Photonics. — 2017. — Vol. 11, no. 4. — P. 242–246.
72. Nakamura N. EUV-FEL light source for future lithography / N. Nakamura [et al.] // Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC2023). — Venice: JACoW Publishing, 2023. — P. 5149–5152.
73. Denisov G. Corrugated cylindrical resonators for short-wavelength relativistic microwave oscillators / G. Denisov, M. Reznikov // Radiophysics and Quantum Electronics. — 1982. — Vol. 25, no. 5. — P. 407–413.
74. Bratman V. FEL's with Bragg reflection resonators: Cyclotron autoresonance masers versus ubitrons / V. Bratman [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 1983. — Vol. 19, no. 3. — P. 282–296.
75. Ginzburg N. S. Free-electron maser with high-selectivity Bragg resonator using coupled propagating and trapped modes / N. S. Ginzburg [et al.] // Technical Physics Letters. — 2010. — Vol. 36, no. 10. — P. 952–956.
76. Ginzburg N. Application of modified Bragg structures in high-power submillimeter cyclotron autoresonance masers / N. Ginzburg [et al.] // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2017. — Vol. 59, no. 12. — P. 1017–1025.
77. Reiche S. GENESIS 1.3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code / S. Reiche // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1999. — Vol. 429, no. 1–3. — P. 243–248.

Список статей автора по теме диссертационного исследования

Статьи в рецензируемых журналах

A1. Bandurkin I. V., **Loginov P. V.**, Peskov N. Y., Savilov A. V., Fedotov A. E. Pulsed Micro-Undulator for Terahertz and X-Ray Free-Electron Lasers // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2023. — Vol. 66, no. 7. — P. 529–537.
A2. Ginzburg N. S., Vilkov M. N., Malkin A. M., Sergeev A. S., Bandurkin I. V., Fedotov A. E., **Loginov P. V.** Terahertz Super-Radiance from Picosecond Electron Bunches Moving through a Micro-Undulator // Physics of Plasmas. — 2024. — Vol. 31, no 3.
A3. Bandurkin I. V., **Loginov P. V.**, Peskov N. Y., Savilov A. V. Prospects for the Development of a Compact Free-Electron Laser in the Extreme Ultraviolet Range

on the Basis of a Plasma Accelerator and a Microundulator // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2025. — Vol. 67, no. 11. — P. 870–874.

A4. Bandurkin I. V., Fedotov A. E., Ginzburg N. S., **Loginov P. V.**, Vilkov M. N. Planar Micro-Undulator for a Sub-Terahertz FEL with a High-Current Sheet Electron Beam // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2026. — Vol. 73, no. 8. — P. 5010–5016.

A5. Ginzburg N. S., Vilkov M. N., **Loginov P. V.**, Sergeev A. S., Bandurkin I. V., Fedotov A. E. Compact IR FELs Based on Micro-Undulators and Moderately Relativistic Electron Beams // Physics of Plasmas. — 2026. — Vol. 33, no. 8.

Материалы конференций

A6. **Логинов П. В.** Микроондулятор для рентгеновского ЛСЭ // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и Микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, Россия, 2023: Тез. докл. — С. 310–314.

A7. **Логинов П. В.** Микроондулятор для рентгеновского ЛСЭ // V Школа для молодых учёных «Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ: источники и приложения», Санкт-Петербург, 2023: Тез. докл.

A8. Bandurkin I., Fedotov A., **Loginov P.**, Martyanov I., Peskov N., Savilov A. Micro-undulator for the X-ray FEL based on plasma accelerator // 5-я Международная конференция «Терагерцевое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и приложения», Москва, НИЯУ МИФИ, 2023: Тез. докл.

A9. Bandurkin I. V., Fedotov A. E., Ginzburg N. S., **Loginov P. V.**, Peskov N. Yu., Savilov A. V. Project of pulsed undulator with millimeter period for THz and X-ray sources // 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2023: Proceedings. — P. 1–2.

A10. Ginzburg N. S., Bandurkin I. V., Fedotov A. E., Zaslavsky V. Yu., Peskov N. Yu., Vilkov M., Malkin A. M., Sergeev A. S., **Loginov P. V.** Compact High-power Sub-THz and THz FELs Based on Planar Micro-undulators and Relativistic Electron Beams // 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). — IEEE, 2024: Proceedings. — С. 1–5.

A11. Bandurkin I. V., Fedotov A. E., **Loginov P. V.**, Peskov N. Yu., Savilov A. V. Concept of a compact EUV FEL with a micro-undulator // VIII Международная конференция «Frontiers of Nonlinear Physics», 2024: Proceedings. — С. 116.

A12. **Логинов П. В.** Планарный микроондулятор для терагерцового ЛСЭ с ленточным сильноточным релятивистским пучком // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и Микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, Россия, 2024: Тез. докл. — С. 122–126.

ЛОГИНОВ Павел Владимирович

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ МИКРООНДУЛЯТОРОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 28.09.2026 г.
Формат 60×90¹⁄₁₆. Усл. печ. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 21 (2026).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46