

К-182

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**9-94-139**

**На правах рукописи**

**УДК 621.3.038.612/624+  
621.3.038.8**

**КАМИНСКИЙ  
Алим Константинович**

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭФФЕКТИВНОГО ЛАЗЕРА  
НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ  
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

**Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника  
01.04.04 — физическая электроника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Дубна 1994**

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор

В.П.Саранцев

**Официальные оппоненты:**  
доктор физико-математических наук (ИПФ РАН, г.Нижний Новгород)  
доктор физико-математических наук (ОИЯИ, Дубна)

В.Л. Братман

Э.А. Перельштейн

**Ведущая организация:**

Московский радиотехнический институт

Защита состоится *"31" мая* 1994 года в *11* часов на заседании специализированного совета Д047.01.03 при ЛЯП ОИЯИ по адресу: 141980, г.Дубна, ЛЯП, ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан *"26" 04* 1994 года.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
Д047.01.03 при ЛЯП ОИЯИ  
Доктор ф.-м.н., профессор

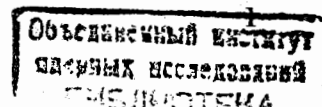
Ю.А. Батусов

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Во многих научных центрах мира проводятся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования источников когерентного излучения - лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Интерес к ЛСЭ обусловлен тем, что на их основе физика СВЧ и техника впервые получили источники мощного когерентного электромагнитного излучения в диапазоне длин волн от миллиметрового до мягкого рентгеновского с возможностью плавной перестройки частоты. Получение больших величин импульсной и средней мощности излучения в ЛСЭ-источниках оказалось возможным из-за использования для накачки ЛСЭ электронных ускорителей, а также сверхразмерных волноводов в качестве области взаимодействия. Создание источников, обладающих перечисленными выше свойствами, открывает широкие перспективы в ряде научно-технических направлений, например, в радиолокации, в ускорительной технике.

С целью значительного повышения величины ускоряющего электрического поля в создаваемых и проектируемых ускорителях в различных лабораториях мира интенсивно разрабатываются и исследуются новые схемы ускорения: коллективный метод ускорения, лазерно-плазменный метод и др. Одной из наиболее перспективных и проработанных схем в настоящее время считается схема двухпучкового ускорителя (ДПУ), предложенная Э. Сесслером в 1982 году. В этой схеме ускорение электронного пучка, инжектированного из слаботоочного, высокоэнергетичного ускорителя, осуществляется в высокоградиентной ускоряющей структуре, работающей на частоте (10-40) ГГц. В ряде работ по ДПУ обосновывается возможность получения в этой схеме напряженности ускоряющего поля от  $100 \text{ МВ/м}$  до  $500 \text{ МВ/м}$ . Расчеты показывают, что для получения требуемых значений ускоряющего поля необходимо создать в указанном частотном диапазоне источники импульсной мощности с погонной мощностью на уровне (100 - 1000)  $\text{МВт/м}$ .

С учетом специфики ускорительного подразделения, в кото-



ром были начаты исследования ЛСЭ, обсудим более детально требования к ЛСЭ, формулируемые сегодняшними проблемами ускорительной техники. Одной из важнейших задач ускорительной науки и техники в настоящее время является задача создания ускорителей электронов тэвного диапазона энергий (электронных коллайдеров). Основными проблемами при решении указанной задачи традиционным способом являются громадная стоимость (миллиарды долларов) и огромные размеры ускорителя (его длина составила бы сотни километров).

Для оптимизации линейного электронного коллайдера необходимо определиться в выборе путей решения большого числа весьма сложных, порой противоречивых научных, технических и технологических задач. Назовем некоторые из них: создание источников большой импульсной СВЧ-мощности в указанном частотном диапазоне с жесткими требованиями на амплитудную и фазовую стабильность излучения, создание высокоградиентных ускоряющих структур с требуемой электрической прочностью и жесткими условиями на механические и тепловые допуски, выбор способа вывода излучения из источника СВЧ-мощности и систем запитки и фазировки ускоряющих структур, обеспечение требуемых характеристик задающего ЛИУ на длине коллайдера и так далее.

Из вышеизложенного следует, что экспериментальные исследования ЛСЭ-источников коротковолнового излучения, повышение их эффективности и улучшение характеристик СВЧ-излучения на выходе ЛСЭ является весьма актуальной задачей как при создании и оптимизации ЛСЭ-источников СВЧ-излучения, так и при исследовании и оптимизации новых высокоэффективных ускорительных схем. С 1984 года исследования ЛСЭ проводятся в ОИЯИ.

Ко времени начала исследований по ЛСЭ в ОИЯИ в литературе уже имелось довольно значительное количество работ по исследованиям функциональных зависимостей выходных характеристик ЛСЭ (СВЧ-мощности, спектрального состава излучения

и др.) от характеристик электронного пучка, выбранной схемы ЛСЭ и режима его работы. Кроме того, в ряде научных центров были созданы ЛСЭ-генераторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с уровнем СВЧ-мощности от долей до десятков мегаватт. Как правило, эти ЛСЭ создавались на базе сильноточных (с токами в единицы и десятки килоампер) линейных ускорителей, а их эффективности составляли доли или единицы процентов. Хотя эффективность ЛСЭ зависит от многих характеристик пучка и режима работы ЛСЭ, она, как правило, является растущей функцией тока пучка и падающей функцией по отношению к энергетическому разбросу в пучке. С учетом того, что ток на выходе ускорителя ЛИУ-3000 была в десятки или сотни раз меньше величины тока в ускорителях, на базе которых были созданы ЛСЭ-генераторы с эффективностью около процента, вопрос создания высокоэффективного ЛСЭ-источника на базе ускорителя ЛИУ-3000 требовал детальной проработки.

Цель работы состояла в создании высокоэффективных ЛСЭ-генератора и ЛСЭ-усилителя миллиметрового диапазона, экспериментальном и теоретическом исследованиях их характеристик и возможностей в различных режимах работы и оптимизации этих характеристик. Так как основным направлением экспериментальных работ ОНМУ все время было направление, связанное с исследованиями новых методов и схем ускорения заряженных частиц (коллективный метод ускорения, создание новых ЛИУ), то и в направленности исследований по генерации коротковолнового излучения учитывалась также возможность применения их в ускорительной проблематике.

Научная новизна работы состоит в том, что на базе линейного индукционного ускорителя ОИЯИ ЛИУ-3000 созданы и исследованы ЛСЭ-источники 8мм-диапазона: генератор, усилитель и усилитель с профилированием поля вигглера. Эксперименты по созданию и исследованиям ЛСЭ с обратным ведущим полем опередили исследования по этому вопросу в других научных центрах. В этих экспериментах, а также в экспериментах,

выполненных в Массачусетском Технологическом Институте и опубликованных спустя два года после публикаций Дубненской группы, показано, что эффективность таких ЛСЭ не ниже (а в некоторых случаях существенно выше), чем эффективность традиционных ЛСЭ. Кроме того, на выходе ЛСЭ с обратным ведущим магнитным полем получается довольно узкополосный, регулируемый спектр излучения, что выгодно отличает его от ЛСЭ, работающего в режиме двойного циклотронного резонанса. Эти особенности ЛСЭ с обратным полем можно использовать для создания мощных импульсных узкополосных ЛСЭ-генераторов и ЛСЭ-усилителей. Исследованы также характеристики излучения ЛСЭ-генератора, работающего в режиме широкополосной неустойчивости.

**Практическая ценность работы.** Результаты исследований, изложенных в диссертации, в основном, направлены на применение их для целей генерации мощного импульсного коротковолнового излучения с помощью релятивистских электронных пучков. В исследованных схемах ЛСЭ-источников СВЧ-излучения получена высокая эффективность генерации и усиления. В диссертации показано, что схема ЛСЭ с обратным ведущим магнитным полем, экспериментально исследованная впервые в работах диссертанта с сотрудниками, обеспечивает возможность создания высокоэффективных источников СВЧ-излучения в узком частотном диапазоне, что весьма перспективно для создания мощных высокоэффективных источников излучения для запитки ускоряющих структур в диапазоне (10-40) ГГц. Этот диапазон является перспективным для сооружения электронных коллайдеров.

**Апробация работы.** Результаты диссертации докладывались и обсуждались на научно-методических семинарах ОНМУ и ЛСВЭ ОИЯИ, на научных семинарах ИОФ РАН, ИФФ РАН, на всесоюзных конференциях и симпозиумах по ускорителям, на конференции по релятивистской СВЧ электронике в Свердловске, на международных конференциях по линейным коллайдерам

в Протвино и Гармиш-Партенкирхене, на международных конференциях по ускорителям Цукубо и Гамбурге, на международных конференциях по ЛСЭ в Кобэ.

**Публикации.** Основу диссертации составили 12 публикаций: 11 статей в научных журналах и одно сообщение ОИЯИ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 74 страницы, включая 31 рисунок, 1 таблицу и список литературы на 58 наименований.

## 2 СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе (введении) сформулированы актуальность, научная значимость, новизна диссертационной работы, показана перспективность использования ЛСЭ-источников миллиметрового излучения при сооружении электронных коллайдеров тэвного диапазона энергий и требования, предъявляемые в этой схеме к ЛСЭ-источникам. Сформулированы тезисы, выносимые на защиту.

Во второй главе обсуждаются физические принципы работы ЛСЭ, преимущества ЛСЭ по сравнению с источниками ондуляторного излучения. Приводится классификация ЛСЭ по величине усиления на длине области взаимодействия. Дан краткий анализ публикаций по коротковолновым ЛСЭ. Более детально анализируются ЛСЭ миллиметрового диапазона, тенденция их развития и возможные области их использования. Сформулирована задача проектирования, создания и исследования ЛСЭ-источников миллиметрового диапазона с высокой эффективностью на основе ускорительной базы ускорительного подразделения ОИЯИ - Отдела Новых Методов Ускорения (ОНМУ) и созданной на основе этого подразделения Лаборатории Сверхвысоких Энергий (ЛСВЭ). Базовой установкой, на основе которой предполагалось создание ЛСЭ, являлся импульсный линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-3000 с энергией 1.5 МэВ, током 200 А и длительностью импульса 200 нс.

В третьей главе приведено описание систем измерения параметров электронного пучка ускорителя ЛИУ-3000 (тока, эмиттанса, координат центра тяжести и когерентного угла) на выходе ускорителя и в волноводе ЛСЭ. Результаты измерений позволили сделать вывод, что яркость пучка ускорителя ЛИУ-3000 сравнима с величинами яркости пучка лучших электронных ускорителей, на которых проводились эксперименты по ЛСЭ в миллиметровом диапазоне длин волн.

Был выбран вариант схемы ЛСЭ со спиральным ондулятором и продольным магнитным полем. Основное внимание было сосредоточено на обеспечении согласованной инжекции электронного пучка в канал ЛСЭ, исследовании его динамики в продольном и суммарном (продольном  $B_0$  и ондуляторном  $B_w$ ) магнитных полях, минимизации искажений пучка при входе в область взаимодействия от неадиабатичности ввода (от длины плавного ввода) и т. д. Эти исследования проводились, в основном, при значениях полей  $B_w$ ,  $B_0$ , близких к полученным из оценочных расчетов, приведенных в главе 4. Однако, с учетом специфики пучка ускорителя ЛИУ-3000 эксперименты по оптимизации инжекции пучка в область взаимодействия проводилось также в более широком интервале полей ( $B_w$ ,  $B_0$ ), включая возможность изменения направления (знака) этих полей на противоположные. Это давало возможность сравнения различных схем ЛСЭ, включая также неисследованные ранее.

В этих экспериментах в волноводе длиной 1 м и диаметром 19 мм при выключенном ондуляторном поле осуществлена транспортировка пучка с током около 100 А и радиальным размером, не превышающим 6 мм. В результате настройки и оптимизации магнитных систем ускорителя и ЛСЭ при транспортировке пучка в волноводе была достигнута плотность тока около  $J = 1 \div 3 \text{ кА/см}^2$ , при малых колебаниях плотности тока  $\Delta J/J < 20\%$ . Результаты этих экспериментов находятся в удовлетворительном согласии с расчетами по уравнению Владимирского-Калчинского. При включении магнитного поля  $B_w$ , создаваемого

токовым спиральным ондулятором, и оптимизации распределения этого поля по длине и радиусу осуществлена транспортировка электронного пучка с плотностью тока около  $1 \text{ кА/см}^2$  (величина тока равнялась  $I_b = 50 \div 75 \text{ А}$ ) при изменении поля  $B_w$  до 2.5 кГс. Приведено описание разработанной и опробованной системы коррекции когерентного угла электронного пучка.

В четвертой главе обосновывается выбор схемы и основных параметров ЛСЭ на базе ускорителя ЛИУ-3000. Показано, что в ЛСЭ может быть реализован режим высокого усиления, параметры установки находятся между комптоновским ЛСЭ высокого усиления и рамановским ЛСЭ. При исследовании характеристик СВЧ-излучения в зависимости от параметров электронного пучка и магнитных полей ЛСЭ наряду с традиционным режимом ЛСЭ-генератора был реализован экспериментально неисследованный ранее режим работы ЛСЭ, в котором направления вращения электронов пучка в продольном и ондуляторном магнитных полях являются противоположными. Особенности работы ЛСЭ в этом режиме можно проиллюстрировать на рис. 1. На этом рисунке показана зависимость продольной скорости электронов в ЛСЭ от величины продольного магнитного поля при фиксированном поле ондулятора. Такие зависимости, получившие название диаграмм Фройнда, появляются в результате решения уравнения четвертой степени для скорости электронов. Незначительное увеличение поля ондулятора приводит "к увеличению раскрыва диаграммы Фройнда". Из рис. 1а видно, что фиксированному значению продольного магнитного поля соответствует, вообще говоря, три действительных значения продольной скорости электронов. Устойчивые решения, на которых возможно создание ЛСЭ, получаются на ветвях 1 и 4 (рис. 1а), ветви 2 и 3 соответствуют большим значениям поперечной скорости. Большинство экспериментов по ЛСЭ были выполнены на ветви 4. Это не в последнюю очередь связано с необходимостью использования больших величин продольного магнитного поля для транспортировки высокоэнергетических электронных пучков.

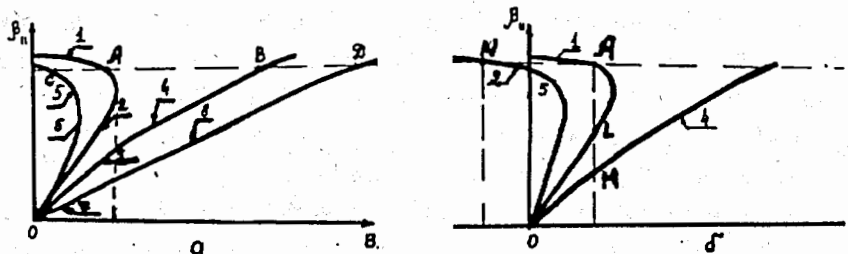


Рис. 1. Диаграммы Фройнда. Иллюстрация выбора режима работы ЛСЭ.

Четвертый корень уравнения для скорости получается при отрицательных значениях продольного магнитного поля. Этот корень соответствует отрицательному значению продольной скорости электрона (т. е. скорости, противоположной направлению распространения пучка) и в силу этого обычно отбрасывался, как нефизичный. В наших работах, выполненных совместно с сотрудниками Киевского Государственного Университета, было показано, что при "отрицательных" значениях продольного магнитного поля можно получить требуемое для ЛСЭ значение продольной скорости электронов (см. ветвь 9 рис. 16). Этот режим назван нами "ЛСЭ с обратным ведущим магнитным полем". Естественно, такие режимы реализуются при других значениях ондуляторного поля, т. е. на других ветвях диаграмм Фройнда. Одним из очевидных достоинств работы ЛСЭ в этом режиме является то, что в этом случае значительно слабее проявляются нежелательные явления, связанные с циклотронным резонансом и упрощается отстройка от резонанса при выборе режима работы ЛСЭ.

В этой главе приведены также результаты экспериментов по исследованию характеристик ЛСЭ в традиционном режиме (с согласным направлением ведущего магнитного поля, вблизи режима циклотронного резонанса) и в режиме с обратным ведущим магнитным полем. В обоих случаях на выходе ЛСЭ получена

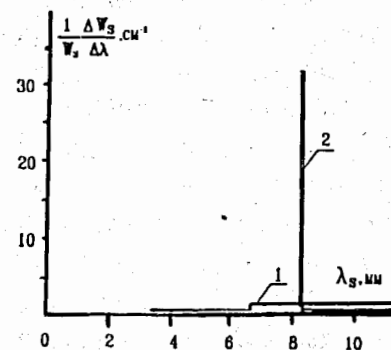


Рис. 2. Измеренная спектральная характеристика ЛСЭ-генераторов в режимах с согласным (1) и обратным (2) направлениями ведущего магнитного поля.

мощность СВЧ-излучения (3 – 5) МВт, что соответствует эффективности ЛСЭ-генератора (5 – 7)%. Однако, спектральные характеристики излучения в этих режимах сильно различаются. В ЛСЭ с согласным направлением поля наблюдался широкий спектр излучения (от 4 мм до 12 мм). В ЛСЭ с обратным магнитным полем излучение было сосредоточено в узком спектральном интервале, причем найден и экспериментально опробован простой способ регулировки длины волны излучения. Естественно, что в указанном интервале длин волн инкремент излучения в ЛСЭ-генераторе с обратным полем получился существенно выше, чем в реализованном ЛСЭ с согласным направлением поля. Это иллюстрируется на рис. 2.

В пятой главе приведены результаты экспериментов по созданию ЛСЭ-усилителя в режиме с обратным направлением ведущего магнитного поля. На основе результатов, полученных при исследовании ЛСЭ-генераторов, в режиме с обратным направлением продольного магнитного поля был создан ЛСЭ-усилитель на частоте 36,4 ГГц. Получена эффективность ЛСЭ-усилителя,

равная (5–7)%, как и в генераторном режиме. В режиме с согласным направлением продольного магнитного поля не удалось реализовать аналогичный эксперимент по запуску ЛСЭ-усилителя.

С целью повышения эффективности ЛСЭ-усилителя было реализовано несколько схем профилирования магнитного поля ондулятора. Приведено описание параметров эксперимента, в котором в результате профилирования поля вигглера эффективность ЛСЭ-усилителя удалось повысить до (20 – 30)% (мощность на выходе ЛСЭ составила около 25 МВт.) Проанализированы основные источники уширения спектра в ЛСЭ. Основное внимание обращалось на режимы, в которых проводились исследования на данной установке.

В заключении изложены выводы работы и указаны возможные применения результатов работы.

### 3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации решена задача создания на основе ускорительной базы ЛСВЭ ОИЯИ ЛСЭ-генераторов и ЛСЭ-усилителей с высокой эффективностью и исследованы их характеристики и особенности их работы в различных режимах.

На защиту выносятся следующие основные результаты работы.

1. На базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-3000 создан ЛСЭ-генератор миллиметрового диапазона, работающий по схеме со спиральным токовым ондулятором и ведущим магнитным полем. Впервые наряду с традиционным ЛСЭ-генератором, в котором направление вращения электронов в проолном и ондуляторном магнитных полях совпадают, экспериментально реализован ЛСЭ-генератор, в котором эти направления вращений противоположны. Этот ЛСЭ-генератор назван нами ЛСЭ с обратным веду-

щим магнитным полем. В обоих режимах получена мощность генерации (3 – 5) МВт, что соответствует КПД генераторов (5 – 7)% при токе пучка на выходе области взаимодействия (50 – 75) А.

2. Исследованы зависимости мощности и спектра СВЧ-излучения на выходе ЛСЭ от параметров электронного пучка и магнитных полей ЛСЭ. Экспериментально показано, что при одинаковом уровне СВЧ-мощности на выходе ЛСЭ в обоих исследованных режимах в ЛСЭ с обратным ведущим магнитным полем получается в десятки раз более высокая спектральная плотность излучения, чем в традиционной схеме ЛСЭ. (Под спектральной плотностью понимается отношение величины СВЧ-мощности в данном интервале длин волн к величине этого интервала). Полученный результат делает схему ЛСЭ с обратным ведущим полем перспективной для создания мощных импульсных узкополосных генераторов и усилителей коротковолнового излучения.

3. Впервые в схеме со спиральным вигглером и обратным ведущим магнитным полем создан ЛСЭ-усилитель на частоте 36.4 ГГц. Проведено исследование характеристик излучения усилителя. На выходе ЛСЭ получена СВЧ-мощность (3 – 5) МВт, что соответствует эффективности усилителя (5 – 7)%. Этот уровень мощности соответствует режиму насыщения усилителя.

4. В режиме ЛСЭ-усилителя с обратным ведущим магнитным полем осуществлено профилирование магнитного поля вигглера по определенному закону, что позволило увеличить КПД усилителя до (20 – 30)%.

5. Проведены исследования характеристик пучка ЛИУ-3000 и оптимизация системы инжекции пучка в магнитную систему ЛСЭ. В области взаимодействия

получена плотность  $J$  тока пучка  $J = (1 - 3) \text{кА/см}^2$  при колебаниях  $(\Delta J/J) < 20\%$ .

Основные результаты работы доложены на 11 и 13 Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1988г., Дубна 1992г.), на втором всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц (Нор-Амберд 1989), на седьмом семинаре по высокочастотной релятивистской электронике (Томск, 1991г.), на 14 международной конференции по ускорителям высоких энергий (Цукубо, Япония 1989), на третьей (Протвино 1991) и четвертой (Гармиш-Партенкирхен, Германия, 1992) международных рабочих группах по линейным коллайдерам, на 14 и 15 международных конференциях по ЛСЭ (Кобэ, Япония 1992 и Хагуэ, Нидерланды, 1993), на SPIE Symposium on Intense Microwave and Particle Beams III (Лос-Анджелес, 1992).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Викторов Ю.Б., Каминский А.К., Косухин В.В. и др. Формирование плотного электронного пучка и его транспортировка в поле соленоида.- Сообщение ОИЯИ, 9 -89 -388, 8 с.

2. Викторов Ю.Б., Каминский А.К., Сергеев А.П. и др. Эксперименты по усилению в ондуляторе излучения миллиметрового диапазона.- Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, Дубна, 1989, с.95-98.

3. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B. et al. Experiments on the efficiency increase of FEL amplifier on the base of LIU-3000.- Particle Accelerators, 1990, Vol.33, p.189-194.

4. Viktorov Ju.B., Draganov A.B., Kaminsky A.K. et al. Broadband instability in free electron lasers. - Optics Communications, 1990, vol. 79, N 1, 2 p. 81 - 87.

5. Каминский А.А., Каминский А.К., Рубин С.Б. и др. Эксперименты по повышению эффективности ЛСЭ-усилителя на базе ЛИУ-3000. - Вопросы атомной науки и техники, серия: Ядерно-физические исследования, вып. 6(14), 1990, с. 75-78.

6. Викторов Ю. Б., Драганов А. Б., Каминский А. К. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование параметрической неустойчивости в РЭП.- ЖТФ, том 61, вып.4, 1991, с. 133-140.

7. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B. et al. Investigation of FEL with strong helical pump and backward guide field.- Proceeding of Third International Workshop on Linear Colliders LC91, BINP, Protvino (1991), p. 228-241.

8. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B. et al. Investigation of FEL with strong helical pump and backward guide field. - Proceeding of SPIE Conference 1629 "Intense Microwave and Particle Beams III", Los-Angeles, 1992, p.581.

9. Буланов Н.А., Голубев И.И., Каминский А.А. и др. Подготовка эксперимента по двухпучковому ускорению в ЛСВЭ ОИЯИ.- Аннотации докладов на тринадцатом совещании по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1992.

10. Каминский А.А., Каминский А.К., Рубин С.Б. и др. Исследование ЛСЭ с сильной спиральной накачкой и обратным ведущим полем. - Релятивистская высокочастотная электроника, Нижний Новгород, вып. 7, 1992, с. 60-80.

11. A.A. Kaminsky, A.K. Kaminsky, N.I. Karbushev et al. Cyclotron resonance in a FEL with a spiral undulator and an inverse axial magnetic field. Nuclear Instrument and Methods in Physical Research, A331 (1993), p. 531-534.

12. Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Sarantsev V.P. et al. Investigation of Microwave FEL with Reversed Guide Field.- 15th International FREE Electron Laser Conference. Book of Abstracts, Hague, 1993, p.13.

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 апреля 1994 года.