

Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Պետրոսյան Մարգիկ Լյուդվիգի

ԱՐԱԳԱՑՎԱԾ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՓՆՁԵՐԻ ՓՈԽԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԱՐՁՐ
ՀԱՃԱԽԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԷԿԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ԴԵՏ

Ա.04.20-«Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և
արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների
դոկտորի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան -2008

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.И. Аликханяна

Петросян Марзик Людвигович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С
ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических
наук по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника»**

Ереван-2008

Ատենախոսության բեման հաստատված է Ա. Ալիխանյանի անվան
Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում:

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝
ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր, ակադեմիկոս Ռ.Յ. Ավագյան (ԵրՖԻ),
ֆիզմաթ գիտ. դոկտոր Ս.Գ. Հովհաննիսյան (ՓԲԸ Լազերային
տեխնիկա),
ֆիզմաթ գիտ. դոկտոր Է.Ա. Բեղլոյան (ԵրՖԻ):

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի Պետական
համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2008թ. հուլիսի 22-ին. ժամը 14⁰⁰-
ին ԵրՖԻ-ում գործող ԲՈՅ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում
(375036, Երևան, Ալիխանյան եղբայրների փող. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա. Ալիխանյանի անվան
Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտի գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է հունիսի 21 -ին 2008 թ.
Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,

ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր *Զ. Գալստյան* Է.Դ. Գալստյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте
им. А.И. Алиханяна

Официальные оппоненты:
доктор физ.-мат. наук, академик Р.О. Авакян (ЕрФИ),
доктор физ.-мат. наук С.Г. Оганесян (АОЗТ Лазерная техника),
доктор физ.-мат. наук Э.А. Беглоян (ЕрФИ).

Защита состоится 22 июля 2008г. в 14⁰⁰ ч. на заседании
специализированного совета ВАК 024, действующего при Ереванском
физическом институте им. А.И. Алиханяна, (375036, ул. Братьев Алиханян
2, г. Ереван)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского
физического института им. А.И. Алиханяна.

Автореферат разослан 21 июня 2008г.

Ученый секретарь спец. совета, д. ф. м. н. *Զ. Գալստյան* Э. Д. Галсгян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации обусловлена следующим. Вопросы взаимодействия электронных пучков с высокочастотным электромагнитным полем представляют первостепенную важность. Они определяют в существенной мере развитие таких направлений, как ускорительная физика и техника, радиотехника и электроника, освоение новых диапазонов частот электромагнитных волн и т.д. Интенсивные исследования, ведущиеся в этом направлении за последние 20-30 лет, связаны, в основном, с поиском новых методов ускорения и новых источников излучения в виде синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах.

Настоящая диссертация посвящена исследованиям следующих основных проблем, связанных с взаимодействием электронного пучка с высокочастотными полями:

1. Оптимизация параметров традиционных ускорителей.

В традиционных ускорителях вопросы инжекции частиц в ускоритель представляют первостепенную важность. Они определяют, в значительной степени, такие основные параметры, как интенсивность ускоренного пучка и его стабильность. Важной является при этом проблема инжекции частиц в электронный синхротрон. Специфика здесь обусловлена тем, что частота ускоряющего поля линейных ускорителей, используемых в качестве инжекторов, обычно существенно больше ускоряющей частоты самих синхротронов. Это означает, что на один период ускоряющего поля синхротрона приходится несколько ступок частиц, выходящих из инжектора, причем лишь часть инжектируемых ступок попадает в область устойчивости фаз кольцевого ускорителя. Ступки частиц, инжектируемые вне области устойчивости фаз, вскоре теряются.

Существование таких, заведомо обреченных на потерю, сгустков весьма нежелательно по ряду причин:

- а) загружается ВЧ система синхротрона,
- б) загружается инжектор, что приводит к уменьшению предельно достижимой величины тока ускоренных частиц в области фазовой устойчивости синхротрона при требуемой конечной энергии частиц на выходе инжектора,
- в) увеличивается вероятность радиационного повреждения вакуумной камеры синхротрона.

Устранение нежелательных сгустков пучка инжектора может быть достигнуто с помощью группирования или прерывания пучка инжектора. При прерывании происходит отсечка тока пучка источника электронов в тех фазовых интервалах, где сгустки не захватываются в режим ускорения в синхротроне. А при группировке электроны из этих интервалов собираются, группируются в области равновесной фазы ускоряющего напряжения синхротрона. Следовательно, если при прерывании тока в сформированных сгустках на выходе группирователя равна среднему току электронного источника, то при группировке она может быть больше.

2. Исследование новых методов ускорения.

Новые методы ускорения предполагают в частности использование для этой цели сильных полей излучения мощных лазеров или кильватерных волн в плазме. Как известно традиционная ускорительная техника не может удовлетворить возросшие требования современной физики элементарных частиц из-за резкого возрастания масштабов и стоимости ускорителей с ростом энергии ускоряемых частиц. В этой связи становится важным исследование новых методов ускорения, которые могли бы удешевить расходы на единицу энергии, уменьшить размеры машин путем значительного увеличения темпа ускорения и увеличить таким образом, предельную энергию ускоряемых частиц. Среди возможных схем

рассматриваются, в первую очередь, те, которые используют очень сильные поля, получаемые в мощных лазерах.

В настоящее время лазерные ускорители разделены на три основные группы:

- ускорение частиц полями поверхностных волн, образующихся вблизи металлических или диэлектрических границ;
- ускорение полями, возбужденными в газах (обращенный черенковский эффект, плазменные волны);
- ускорение частиц "дальними" полями - обращенные лазеры на свободных электронах.

В последние годы широко обсуждается метод лазерного ускорения заряженных частиц в ондуляторах как одно из перспективных направлений развития техники ускорителей. Преимуществом этого метода является возможность ускорения интенсивных пучков (~кА) и отсутствие сред и поверхностей, ограничивающих напряженность электрического поля и темп ускорения. Поперечные осцилляции пучка накладывают ограничения на предельно достижимую энергию. При этом энергии порядка сотен ГэВ, по видимому, лежат в пределах возможностей метода. Теория этого метода достаточно хорошо разработана, и созданы предпосылки перехода к экспериментальным исследованиям, которые были начаты в ЕрФИ и продолжают во многих научных центрах мира по сей день.

Идеи о возможности использования продольных кильватерных волн, возбуждаемых движущимися в плазме сгустками электронов, для ускорения заряженных частиц были высказаны еще в 50-х годах. Интерес к PWA (Plasma Wakefield Accelerator) возродился в середине 80-х годов в серии теоретических работ, выполненных в SLAC, ЕрФИ и UCLA.

В схеме PWA первый - более сильноточный сгусток - возбуждает в плазме продольные кильватерные волны, а второй сгусток, находящийся в подходящей фазе плазменной волны, ускоряется. В теоретических работах

предсказывается возможность обеспечения темпа ускорения в несколько ГэВ/м.

3. Исследования для создания новых источников излучения и освоение новых диапазонов частот электромагнитных волн.

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) являются перспективными источниками когерентного излучения благодаря возможности перестройки частоты в широком диапазоне длин волн и высокой яркости излучения. Физический механизм генерации когерентного излучения основан на взаимодействии релятивистского электронного пучка с магнитным полем со специальной пространственной конфигурацией. После запуска первой установки в Стэнфордском Университете около тридцати лет назад ЛСЭ были построены во всем мире. Они охватывают электромагнитный спектр от миллиметровых длин волн до рентгеновского излучения. Специфические особенности ЛСЭ сделали возможным их применение в спектроскопии, физике твердого тела, биологии, медицине.

Цель работы. Целью диссертации является:

1. исследования по оптимизации параметров традиционных ускорителей;
2. исследования возможности создания новых методов ускорения с целью получения высокого темпа ускорения с высокой интенсивностью ускоренного пучка;
3. исследования с целью создания новых источников излучения и освоения новых диапазонов частот электромагнитных волн.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Доказана возможность «идеальной» группировки с помощью одночастотного многорезонаторного группирователя. Фактически доказана возможность разложения пилообразной функции в тригонометрический ряд особого вида, предложенного автором, в котором, в отличие от ряда Фурье, все члены ряда имеют одну и ту же частоту, однако отличаются амплитудой и фазой. Возможность такой группировки имеет важное значение не только в области ускорительной

техники, но и в области генерирования миллиметровых и субмиллиметровых волн [1].

2. Создана установка для генерации когерентного вынужденного ондуляторного излучения на пучке микротрона 7,5 МэВ. Приведены первые результаты измерения излучения в диапазоне длин волн порядка 30 мкм. Это был первый терагерцевый лазер на свободных электронах [2] и второй после Стэнфордской установки.

3. Предложены две новые схемы ускорения электронов. Показана возможность ускорения электронов в среде с помощью двух пересекающихся под малым углом лазерных пучков [3]. Рассмотрена схема ускорения частиц полоской плоско-поляризованной электромагнитной волны, распространяющейся под малым углом к направлению движения частицы. Ширина полоски электромагнитной волны, угол между направлением движения частицы и направлением электромагнитной волны, скорость частицы и длина волны электромагнитного поля выбираются так, чтобы во время движения частицы в зоне электромагнитного поля электрическое поле не меняло направление [4, 5].

4. Проведена экспериментальная проверка идеи лазерного ускорения в ондуляторах. Пучок микротрона после взаимодействия в ондуляторе с излучением CO₂ лазера проходит через магнитный спектрометр и анализируется по энергии. Увеличение энергии электронов после взаимодействия хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями. Это был первый демонстрационный эксперимент, подтверждающий возможность лазерного ускорения частиц в ондуляторе. После совершенствования установки была получена кривая энергообмена электронного пучка в зависимости от основных параметров установки [6, 7, 8].

5. Экспериментально подтвержден эффект сложения кильватерных волн в плазме от последовательности электронных слаботочных сгустков

[9]. Создана фотоэлектронная пушка для формирования сгустков с заданными параметрами и заданным распределением заряда в сгустках [10]; предложена схема для увеличения коэффициента трансформации при ускорении электронов кильватерными волнами в плазме [11].

Практическая ценность работы:

1. Разработан и изготовлен двухрезонаторный одночастотный группирователь для Ереванского синхротрона. Исследования группирователя показали, что заряд в группирователе, основном, концентрируется в области с фазовой протяженностью 30^0 , где концентрируется около 30% тока пушки. Проведены экспериментальные исследования работы синхротрона с группирователем. В результате ввода в действие разработанного автором группирователя пучка инжектора максимальная интенсивность Ереванского синхротрона была увеличена в 2 раза [12-16].
2. Создана фотоэлектронная пушка для формирования сгустков с заданными параметрами и заданным распределением заряда в сгустках [10], предложена схема для увеличения коэффициента трансформации при ускорении электронов кильватерными волнами в плазме [11].

Апробация работы.

Диссертация и отдельные ее разделы обсуждались и получили положительную оценку на следующих конференциях и совещаниях:

1. Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, том 1, стр.477, Москва 1968.
2. Тр. XIII международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Новосибирск, 1987.
3. Conference on Laser Physics-99, Ashtarak, 1999.
4. Conference EPAC-04. Lucerne, Switzerland 2004.
5. Particle Accelerator Conference, May 16-20, Knoxville, Tennessee, USA, (2005)

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликована 21 работа,

Структура работы.

Диссертация изложена на 160 страниц машинописного текста: состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы; 78 рисунков, 5 таблиц, 132 наименования литературных источников.

На защиту выносятся следующие тезисы

1. Результаты теоретического и экспериментального исследования одночастотной многокаскадной группировки. Разработка и создание двухкаскадного группирователя для Ереванского синхротрона.
2. Результаты теоретического и экспериментального исследования нагрузки током линейного ускорителя при ускорении модулированного пучка.
3. Разработка, создание и исследование лазера на свободных электронах. Разработана методика учета реальных параметров ондулятора и электронного пучка на ондуляторное излучение.
4. Новый метод ускорения электронов полосками лазерного излучения.
5. Новый метод компенсации неустойчивостей при лазерном ускорении электронов в среде применением двух лазерных пучков.
6. Экспериментальное подтверждение возможности лазерного ускорения в ондуляторах.
7. экспериментальное подтверждение эффекта сложения кильватерных волн от последовательности электронных сгустков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и определены основные направления исследований.

В главе 1, посвященной взаимодействию электронного пучка с полем высокочастотного резонатора, проводится анализ работы клистронного однорезонаторного группирователя в совокупности со входной секцией линейного ускорителя. Полученные результаты показали, что эффективность группировки зависит не только от параметров группирователя, но и от параметров входной секции линейного ускорителя. Кроме того, возможности однорезонаторного группирователя ограничены. В этой главе приводятся результаты поисков более эффективных методов группировки: оценка эффективности группировки при больших углах пролета в зазоре резонатора без последующего дрейфового пространства и кинематический анализ многокаскадной группировки. Наиболее интересные результаты получаются при рассмотрении многокаскадного одночастотного группирователя. Известно, что для получения идеальной группировки (группировка в одну точку) необходимо формировать пилообразное модулирующее напряжение. Пилообразное напряжение практически можно реализовать, используя многокаскадную группировку с резонаторами на высших гармониках. Величину и начальную фазу каждой гармоники можно определить при помощи разложения пилы в ряд Фурье. Техническое осуществление усложняется необходимостью применения высших гармоник. Нами было показано, что тот же самый результат получается применением одночастотной многокаскадной группировки [1]. Было доказано, что пилообразную кривую можно представить в виде тригонометрического ряда, где члены которого имеют основную частоту, но отличаются амплитудой и фазой. Уравнение движения для n-ого каскада имеет следующий вид

$$\theta_n = \theta_{n-1} - x \sin \theta_{n-1}$$

Здесь $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ определяют фазу, когда частица достигает точки фазовой фокусировки соответственно для одного-, двух-, трех- и n-каскадных группирователей,

$$x = \frac{U_p M \theta_0}{2U_n} - \text{параметр группировки,}$$

$$M = \frac{\zeta_0}{\sin \zeta_0} \text{ называется коэффициентом электрического взаимодействия,}$$

ζ_0 - угол пролета электрона через зазор резонатора,

U_n - ускоряющее напряжение электронной пушки,

U_p - напряжение на зазоре резонатора,

$\theta_0 = \omega l / v_0$ - угол пролета электрона через дрейфовое пространство длиной l , при вылете из модулятора со скоростью v_0 .

v_0 - скорость электронов при входе в резонатор,

На рис.1 приведена зависимость фазы выхода частицы из группирователя θ от фазы входа φ .

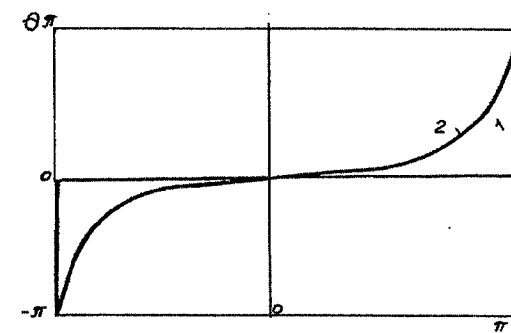


Рис.1. Фазовая зависимость 1) при бесконечном числе каскадов, 2) при четырех каскадах.

Был создан двухкаскадный группирователь для Ереванского синхротрона [12, 13], общий вид которого приведен на рис.2. Экспериментально было подтверждено, что в фазовой области 30° группируется около 30% полного тока пушки, что примерно в два раза превышает ток в той же области для однокаскадных группирователей. На рис.3 приведено распределение тока на выходе группирователя в зависимости от фазы, которое было получено с помощью круговой развертки пучка (рис. рис.4,5).

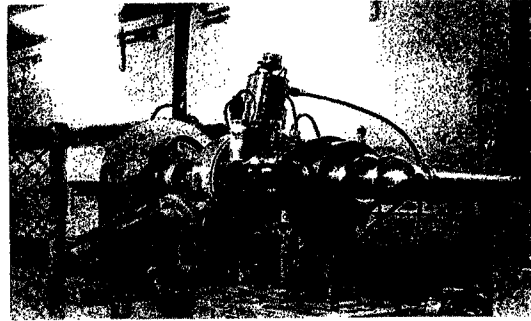


Рис. 2. Общий вид группирователя.

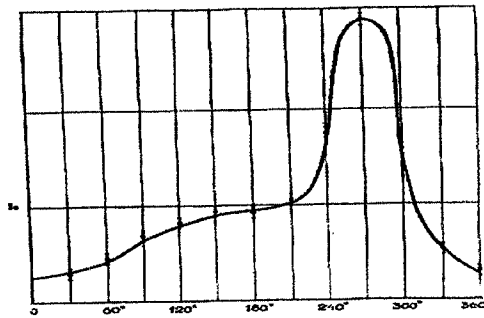


Рис.3. Распределение тока пушки по коллекторам после группировки.

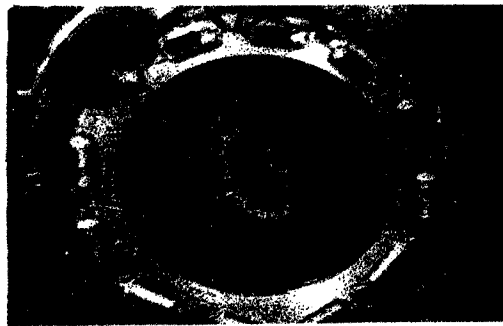


Рис.4. Круговая развертка пучка в отсутствие группировки.

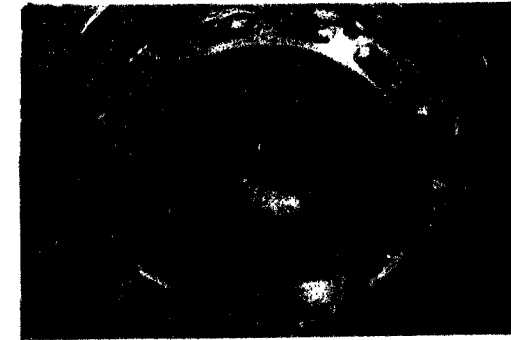


Рис.5. Круговая развертка пучка при группировке.

В главе II рассматривается работа линейного ускорителя с группирователем. В этом случае, в течение времени инъекции ток в линейном ускорителе модулируется в виде цугов, коротких импульсов, с частотой следования, равной частоте ВЧ системы синхротрона. Известно, что при ускорении очень коротких цугов ток прекращается раньше, чем поле черенковского излучения достигает своего стационарного значения, и в цуге можно ускорить ток, намного превышающий ток в стационарном режиме. В данном случае, в синхротроне ЕрФИ, цуги действительно короткие, но они не единичные. Из-за высокой частоты следования (130 МГц) в ускоряющей секции они попадают в поле излучения предыдущих цугов.

Приобретаемая частицами энергия $W = qE_{cp}l$, где E_{cp} средняя величина поля вдоль ускорителя. Относя ее к максимально возможной энергии $W_M = qE_M l$, получим для безразмерной $w = W/W_M$ энергии следующие выражения [14]:

$$w = \frac{1 - e^{-\lambda}}{\lambda} - \chi \alpha \frac{v_g}{v} l_1 \frac{n+1}{2}$$

Здесь $\lambda = \alpha l$ – безразмерная длина ускоряющей секции,
 l – длина ускоряющей секции,

α - коэффициент затухания волны в волноводе,

$$\chi = \frac{E_{\omega}}{E_M} - \text{коэффициент нагрузки,}$$

E_M - значение поля, создаваемого внешним генератором в начале секции,

$E_{\omega} = Ir$ - стационарное значение черенковского поля в бесконечном волноводе,

I - средний ток в цуге,

r - шунтовое сопротивление волновода,

v_g - групповая скорость распространения волны в ускоряющей секции

v - скорость частиц,

l_l - длина цуга,

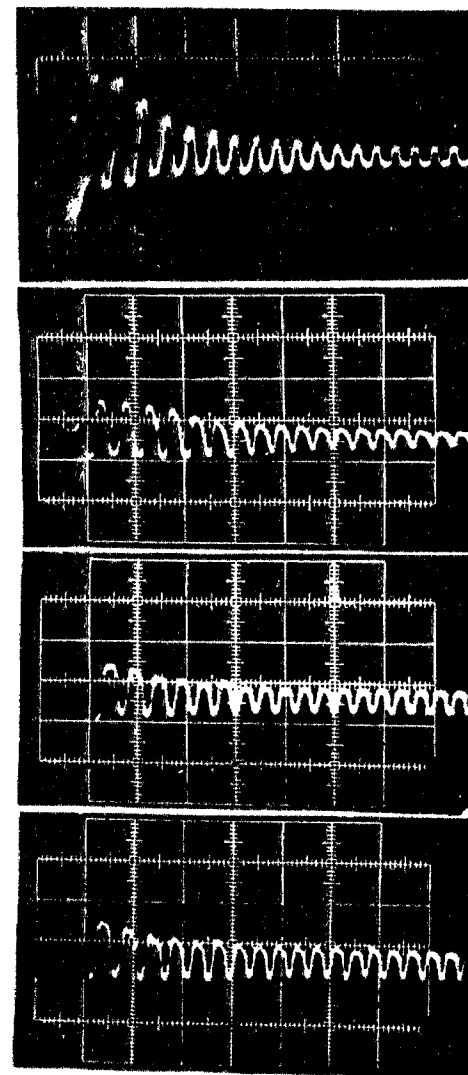
$$n = \frac{l(v - v_g)}{\Lambda v_g} - \text{номер предыдущих цугов, в поле которого рассматриваемый}$$

сгусток входит в конце секции.

Проведенные нами расчеты [14] показали, что при установке группирователя, при ускорении до одной и той же конечной энергии в линейном ускорителе ток в цуге можно увеличить приблизительно в 3 раза.

Приведены результаты работы синхротрона с группирователем [16]. При работе была зафиксирована 100% зависимость величины ускоренного тока в синхротроне от разности фаз между напряжением группирователя и ВЧ системы синхротрона. Максимальный ускоренный ток в кольце с группирователем был в 2 раза больше, чем ток, наблюдаемый в кольце без применения группирователя. Эффективность захвата частиц в синхротрон определялась путем сравнения тока пучка на первых оборотах при включенном группирователе и без него. Приведенные осциллограммы первых 19 оборотов тока пучка (рис.6) наглядно демонстрируют эффективность применения группирователя. При включенном группирователе ток в процессе захвата мало меняется (ток 10-ого оборота составляет 70% от тока первого оборота), а при выключенном

группирователе ток 10-ого оборота составляет всего 23% от тока первого оборота.



а) без группирователя

б) включен только I резонатор

в) включен только II резонатор

г) включены оба резонатора.

Рис. 6. Осциллограммы тока пучка на нескольких оборотах пучка синхротрона

Глава III посвящена исследованию ондуляторного излучения и лазерам на свободных электронах. Во многих существующих и проектируемых лазерах на свободных электронах используются спиральные магнитные ондуляторы. Для проектирования лазеров на свободных электронах и источников ондуляторного излучения необходимо знать распределение магнитного поля по поперечному сечению ондуляторного магнита. Это распределение, в принципе, неоднородное и может привести к расширению спектра и уменьшению мощности излучения, а в лазерах на свободных электронах к уменьшению коэффициента усиления. В ранее опубликованных работах приводятся соотношения для значения магнитного поля на оси ондулятора при тонкой обмотке, т.е. размеры обмоточной проволоки не учитываются. Использование этих соотношений не всегда достаточно при проектировании ондуляторов. Приводятся результаты расчета распределения магнитного поля в реальных спиральных ондуляторах и рекомендации по выбору основных параметров ондулятора, исходя из физических требований к источнику излучения [17].

Получена формула спектрального распределения ондуляторного излучения с учетом начального углового распределения (параболического типа) электронного пучка для поперечного ондулятора [18]. Показано, что на оси ондулятора (под углом $\theta = 0$) из-за углового разброса пучка вместо одной главной частоты получается спектр частот. Влияние углового разброса электронного пучка увеличивается с уменьшением энергии электронов.

В результате этих исследований был создан ЛСЭ на пучке микротрона 7,5 МэВ ЛСЭ [2]. Первый ЛСЭ в террагерцовой области и второй после Стенфордской установки. Схема и общий вид установки приведены на рис.7 и рис.8 соответственно.

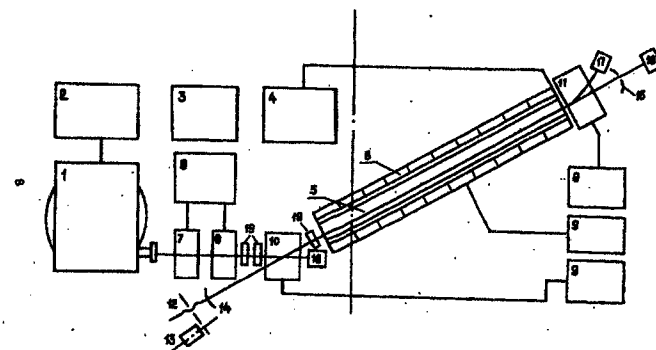


Рис.7. Схема экспериментальной установки ЛСЭ. 1-микротрон; 2- ВЧ система микротрона; 3- пульт управления; 4- модулятор ондуляторного магнита; 5- ондуляторный магнит; 6- фокусирующий соленоид; 7,8- квадрупольные линзы; 9- блок питания; 10,11-поворотные магниты; 12- механизм передвижения зеркала; 13- сельсины; 14,15- зеркала; 16, 17- цилиндр фарадея; 18-пирозлектрический детектор; 19- корректирующий магнит.



Рис.8.Общий вид экспериментальной установки ЛСЭ.

Основные параметры экспериментальной установки следующие:
 энергия электронов 7,5 МэВ

длина периода ондуляторного магнита	1.6 см
длина волны излучения	30 – 40 мкм
длина ондуляторного магнита	200 см
число периодов ондулятора	125
магнитное поле на оси ондулятора	до 4000 Э
длина оптического резонатора	290 см
ток электронного пучка в микроимпульсе	0.2 А
длительность электронного пучка в макроимпульсе	3 мксек
диаметр электронного пучка	5 мм
коэффициент потерь зеркал	0.02
дифракционные потери	0.02
усиление с учетом потерь	0.18
ожидаемое общее усиление	10^8
ожидаемая максимальная мощность	100 Вт

Спиральный ондуляторный магнит - импульсный, безжелезный, с внутренним диаметром 16 мм. Выведенный пучок микротрона фокусируется на вход ондуляторного магнита посредством двух квадрупольных линз, поворотных и корректирующих магнитов. Размер пучка далее поддерживается продольным магнитным полем 400э. Эмиттанс выведенного пучка микротрона равен в вертикальном направлении 10^{-3} см·мрад, а в горизонтальном - $2 \cdot 10^{-2}$ см·мрад, поэтому в горизонтальном направлении пучок диафрагмировался, что привело к потере ~60 % выведенного пучка микротрона. На выходе установки размер пучка контролировался секционным цилиндром Фарадея.

Для уменьшения дифракционных потерь в оптическом резонаторе использовалось сферическое зеркало с радиусом кривизны 3 м. Второе зеркало - плоское с центральным отверстием для вывода излучения.

Сферическое зеркало имеет систему дистанционного перемещения для настройки оптической длины резонатора, которая должна быть кратной по отношению к длине волны высокочастотной системы микротрона.

Точность установки оптической длины резонатора определяет число отражений в оптическом резонаторе. При заданных величинах (число отражений ~100, длина микроимпульса тока пучка 1 см и оптическая длина резонатора 2.9 м), точность установки оптической длины резонатора составляет $2 \cdot 10^{-3}$. Для регистрации излучения использовался пьезоэлектрический датчик с чувствительностью 10^{-7} Дж в импульсе. Энергия излучения в импульсе была $2 \cdot 10^{-7}$ Дж, что соответствовала мощности 10Вт в импульсе. С помощью фильтров был определен спектр излучения, который соответствует длинам волн 20-40 мкм.

Нами был разработан и создан ондулятор для терагерцового ЛСЭ из ферритовых материалов [19]. Длина периода ондулятора составляет 9 см, число периодов - 27. С помощью подбора и перераспределения магнитных элементов удалось снизить разброс по амплитудам магнитного поля до 7 %. Для компенсации остаточного разброса были использованы дополнительные обмотки на магнитных элементах. Необходимый фокусирующий градиент магнитного поля получается за счет относительного смещения вдоль оси x чередующихся полюсов с противоположным знаком магнитного поля.

В главе приведено описание экспериментальной установки и результаты исследования ондуляторного излучения в терагерцовой области частот.

Исследовано также влияние структуры электронных сгустков на интенсивность и частотное распределение излучения в однородных средах [20]. Средняя интенсивность излучения сгустка выражается через интенсивность излучения одной частицы и структурный форм-фактор, зависящий также от типа излучения. Исследован форм-фактор ондуляторного излучения сгустков с конкретными распределениями электронов в сгустке, близкими к практически осуществимым.

В этой главе рассмотрено также нелинейное комптоновское излучение высших гармоник для практического применения в медицине [21]. Показано, что существующее импульсное chirped лазеры с интенсивностью

до 10^{20} Вт/см² и сильноточные ускорители с энергиями до 10 МэВ и зарядом сгустка 100 нК, могут служить базой для создания компактных рентгеновских источников для внутривенной коронарной ангиографии, основанной на томсоновском нелинейном обратном рассеивании и совместимой с требованиями для клинического использования.

В главе IV рассматриваются схемы лазерного ускорения электронных пучков.

Исследован механизм ускорения частиц в поле линейно поляризованной электромагнитной волны в среде. Рассматривается метод компенсации неустойчивости режима ускорения с помощью включения второй электромагнитной волны, которая так же находится в резонансе с ускоряемой частицей [3].

В большинстве случаев электрон - лазерное взаимодействие происходит на малой длине, соизмеримой с длиной волны излучения. В этих методах к размерам электронного пучка и лазерного излучения предъявляются очень высокие требования. Предложена схема, где эти требования значительно смягчены [4, 5]. Рассматривается схема ускорения частиц «полоской» плоско-поляризованной электромагнитной волны, распространяющейся под малым углом по отношению к направлению движения частицы (см. рис.9). Ширина полоски электромагнитной волны, угол между направлением движения частицы и направлением электромагнитной волны, скорость частицы и длина волны электромагнитного поля выбираются так, чтобы за время движения частицы в зоне электромагнитного поля электрическое поле не меняло направление. Это требование выполняется при

$$d = \frac{1}{2} \frac{\lambda \sin \alpha}{1 - \cos \alpha + \frac{1}{2\gamma^2}}$$

Рассматривалась возможность компенсации поперечных составляющих электрического и магнитного поля волны внешним магнитным полем или второй волной. Рассматривалась также возможность многократного

ускорения многими полосками, расстояние между которыми равно кратной величине ширины полосок.

Нами впервые было зарегистрировано лазерное ускорение электронов в ондуляторе [6, 7, 8]. Для экспериментальной проверки идеи лазерного ускорения была создана установка на пучке микротрона. Пучок микротрона

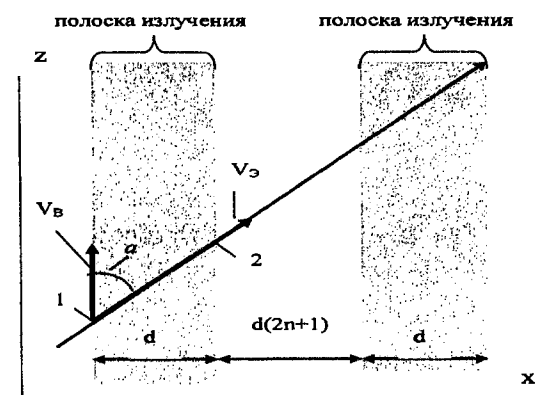


Рис.9.Схема ускорения частиц с полосками электромагнитных волн

после взаимодействия в ондуляторе с излучением CO₂ лазера проходил через магнитный спектрометр и анализировался по энергии. Увеличение энергии электронов после взаимодействия хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями [6, 7]. Зависимость изменения максимума распределения энергии электронов от магнитного поля ондулятора приведена на рис.10.

В другом эксперименте [8] применяется безжелезный плоский ондулятор с переменным периодом. Начальная длина периода ондулятора 10 мм, конечная длина 12 мм, напряженность магнитного поля до 1000 Э. Мощность импульсного CO₂ лазера 1-4 ГВт позволил получить прирост энергии 60 кэВ (при начальной энергии электронов 12 МэВ). Схема

экспериментальной установки приведена на рис.11. Спектр пучка после взаимодействия с лазерным пучком приведен на рис.12.

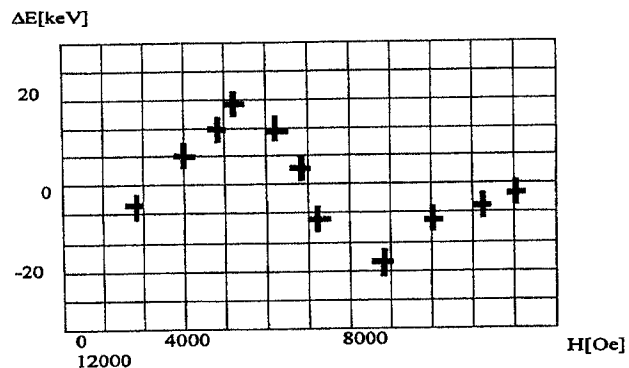


Рис.10. Зависимость изменения максимума распределения энергии электронов в зависимости от поля ондулятора.

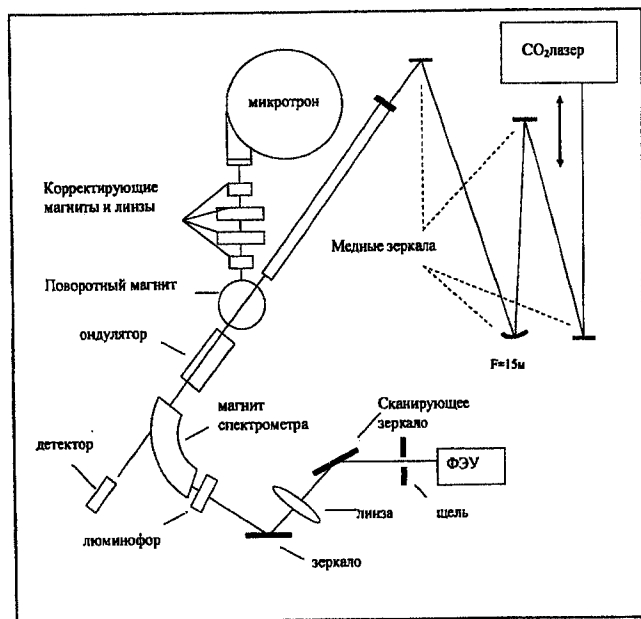


Рис.11. Схема экспериментальной установки

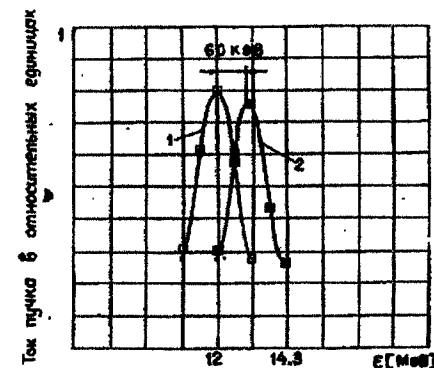


Рис.12. Спектральное распределение электронного пучка на выходе установки

1. При отсутствии лазерного пучка, 2. При включенном лазере
Глава V посвящена исследованию взаимодействия электронных сгустков с кильватерными волнами в плазме. Проведено экспериментальное исследование возбуждения кильватерных волн в плазме последовательно сгустков пучка микротрона [9]. Для наблюдения эффекта суммирования волн от нескольких сгустков необходимо:

1. использовать идентичные сгустки, особенно по количеству заряда в сгустках.
2. начальный энергетический разброс сгустка должен быть меньше, чем ожидаемое изменение энергии электронов.
3. амплитуда возбуждаемой волны от одного сгустка должен быть намного меньше возможного максимального значения амплитуды волны в плазме. Это даст возможность наблюдать пропорциональное увеличение амплитуды кильватерной волны в зависимости от числа сгустков.

Эти требования обеспечиваются при выполнении исследований на пучке микротрона. Основное преимущество микротрона состоит в том, что при сравнительно высокой монохроматичности пучка ($\sim 3 \cdot 10^{-3}$) и при

сравнительно низкой энергии электронов (7,5МэВ) можно провести более точные измерения влияния плазменных волн на спектральный состав электронного пучка, т.к. прирост энергии не зависит от первоначальной энергии электронов, и относительный прирост будет больше.

Схема экспериментальной установки, созданная на пучке микротрона ЕрФИ, приведена на рис.13. Ниже приводятся основные параметры пучка микротрона:

Энергия электронов.....	7,5 МэВ
Длина сгустков.....	5 мм
Диаметр пучка.....	3 мм
Расстояние между сгустками.....	11 см
Длительность импульса (длительность цуга сгустков).....	1,5 мкс
Плотность электронов в сгустке.....	10^8 см^{-3}
Энергетический разброс электронов.....	$2 \cdot 10^{-3}$
Заряд в сгустке	10 пК

Пучок электронов микротрона после прохождения через поворотные магниты и квадрупольные линзы пропускаться через плазменную камеру.

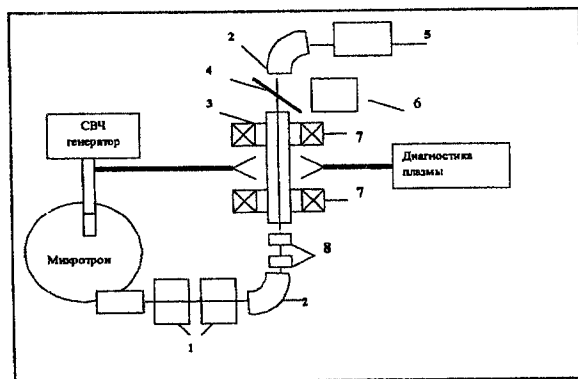


Рис.13. Схема экспериментальной установки. 1-квадрупольные линзы, 2- поворотные магниты, 3- плазменная камера, 4-передвижное зеркало, 5- система регистрации спектрометра, 6- телекамера, 7- соленоиды, 8- корректирующие магниты.

Плазма в камере создавалась с помощью тлеющего разряда, при этом использовался полый катод. Основные параметры плазменной камеры следующие:

Длительность разряда.....	40 мкс
Импульсный ток в разряде.....	~3 А
Напряжение источника питания.....	~20 кВ
Давление газа в камере.....	$10^{-1}-10^{-2} \text{ торр}$
Плотность плазмы.....	$10^8 - 1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$
Длина плазменной камеры	1 м
Диаметр плазменной камеры	5 см

При данных значениях параметров пучка и плазмы напряженность поля от одного сгустка получается порядка одного 1В/см, а прирост энергии порядка 100эВ. Разрешение спектрометра равно 10^{-3} , или 7,5КэВ при энергии электронов 7,5 МэВ. Т.е. спектрометр будет чувствовать изменение спектра если будет сложение кильватерных волн ~100 сгустков. Если не учитывать затухание волн, то при суперпозиции волн всех 4000 сгустков, темп ускорения мог бы составить ~0,4МэВ/м.

Спектральное распределение электронов до и после взаимодействия с плазмой приведено на рис.14.

Результаты измерения спектра электронов после прохождения через плазму иллюстрирует эффект сложения волн от последовательности сгустков, что приводит к увеличению напряженности поля от 1В/см до 100В/см.

Кроме спектрального распределения измерялось также поперечное сечение пучка на выходе плазменной камеры. Предполагается что, плазменная волна имеет и поперечную составляющую пропорциональную продольной составляющей. Поперечная составляющая, приводит к изменению поперечного размера электронного пучка. Зависимость

изменения поперечного сечения от плотности плазмы приведена на рис.15.
Как видно из рисунка, минимальное значение получается при плотности

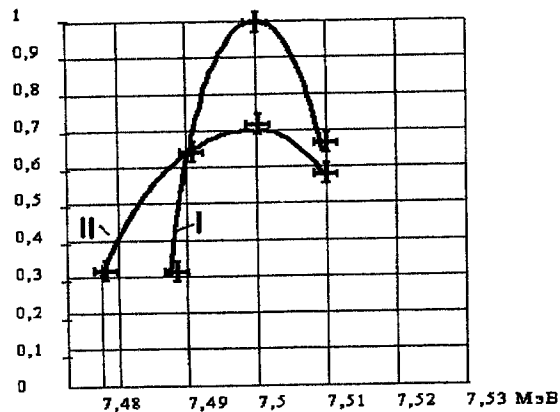


Рис.14. Спектральное распределение электронов до и после взаимодействия с плазмой. По оси ординат приведена интенсивность электронов в относительных единицах. Спектральное распределение I без плазмы и II с плазмой. Крестиками обозначены величины возможных ошибок по двум координатам.

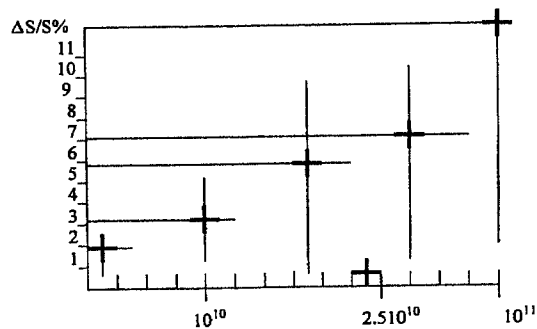


Рис.15. Относительное изменение поперечного сечения пучка в процентах в зависимости от плотности плазмы. Крестиками обозначены размеры ошибок по двум координатам.

плазмы $1,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, и при этом расстояние между электронными сгустками составляет половину длины плазменных волн и каждый сгусток уменьшает поле предыдущего сгустка.

Была разработана и создана фотоэлектронная пушка и исследованы ее параметры [10]. Фотоэлектронная пушка позволяет получить единичные или двойные электронные сгустки со следующими параметрами: энергия электронов до 2 МэВ; длина сгустков 1-3 см; управляемое расстояние между сгустками 5-20 см; ток в первом сгустке до 100А и ток во втором сгустке до 10 А. Подобные конфигурации электронных сгустков необходимы при исследованиях новых методов ускорения, в частности, при ускорении электронов в плазме. Схематическое изображение фотоэлектронной пушки приведено на рис.16.

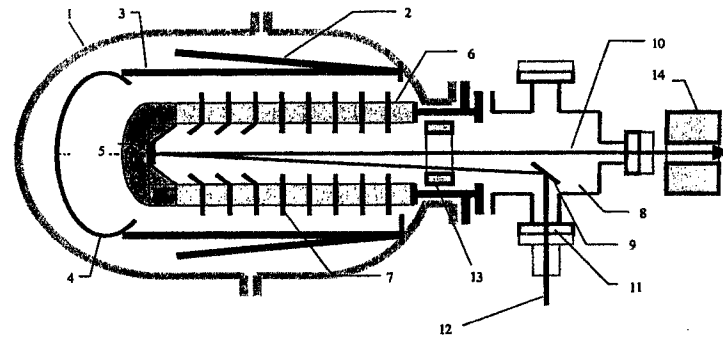


Рис.16. Схематическое изображение ускорителя электронных сгустков с фотокатодом. 1- бак для газа, 2- первичная обмотка импульсного трансформатора, 3- вторичная обмотка импульсного трансформатора, 4- высоковольтный электрод, 5- фотокатод, 6- изоляционные кольца ускоряющей трубки, 7- электроды ускоряющей трубки, 8- вакуумная камера, 9- зеркало, 10- электронный пучок, 11- вакуумный патрубок, 12- лазерный пучок. 13- фокусирующая линза из постоянного магнита, 14- электромагнитная фокусирующая линза.

Фотоэлектронная пушка представляет собой ускоритель прямого действия с питанием от импульсного источника высокого напряжения. Источник высокого напряжения – безжелезный импульсный трансформатор, расположенный в металлическом баке с газом под давлением до 10 атм. В качестве материала для фотокатода был выбран сплав магния с малым содержанием цинка и алюминия. Для фотоэмиссии электронов использовались четвертая гармоника Nd:YAG лазера с энергией в импульсе 0.1 мДж.

При облучении катода излучением пикосекундных длительностей будут эмитироваться в основном те электроны, которые были накоплены на фотокатоде благодаря ее емкости относительно анода. То есть из-за короткой длительности импульса из высоковольтного источника питания катода новые заряды не успевают поступить на фотокатод и снимаемый с катода заряд не может быть больше, чем заряд на емкости катод-анод. Тогда величина эмитированного из катода заряда Q определится как:

$$Q = CU = E_{\text{ускор}} S / 2\pi$$

При принятых значениях, $E = 25$ кВ/см, $S = 1$ см² получается $Q = 2$ нК. Или при $E = 100$ кВ/см, $S = 10$ см², получается $Q = 80$ нК. В этом случае напряжение на катоде падает по мере снятия заряда из катода, так как новые заряды из источника не успевают поступать на катод. Если допустить, что уменьшение напряжения на фотокатоде не должно превышать 10%, то с катода можно снять заряд не более 8 нанокулон.

Таким образом, основными особенностями этой установки являются во – первых, применение фотокатода в новом типе ускорителя, а именно, в импульсном ускорителе прямого действия для получения комбинации сгустков заданной конфигурации, и во- вторых, комбинация сгустков задается лазерным пучком. Одним из центральных вопросов решения поставленной задачи было осуществление временной синхронизации работы лазера и ускоряющего напряжения. Формирование лазерного импульса субпикосекундного диапазона наиболее доступно с помощью

фототропных красителей. Однако при этом имеется значительная временная нестабильность начального момента формирования пикосекундного импульса. Решение этой проблемы было найдено в совместном применении активного и пассивного модулятора добротности лазера. Следующим важным моментом является факт ограничения максимального тока пушки поверхностным зарядом катода. В этом случае существует оптимальное значение интенсивности лазерного пучка, при котором на поверхности катода еще остается достаточный заряд для второго сгустка электронов.

Рассмотрена возможность увеличения предельной энергии ускорения электронных сгустков кильватерными волнами в плазме (увеличение коэффициента трансформации) с помощью последовательности сгустков [11].

В заключении диссертации приведены основные полученные результаты и вытекающие из них выводы.

Основные результаты работы

1. Показано, что для формирования коротких сгустков возможности однорезонаторных группирователей ограничены [12]. Доказана возможность «идеальной» группировки с помощью одночастотного многорезонаторного группирователя с помощью разложения пилообразной функции в тригонометрический ряд особого вида, предложенный автором, в котором, в отличие от ряда Фурье все члены ряда имеют одну и ту же частоту, но отличаются амплитудой и фазой [1].

2. Разработан и изготовлен двухрезонаторный одночастотный группирователь для Ереванского синхротрона. Исследование группирователя показало, что заряд в основном сконцентрирован в области 30°, где находятся около 30% тока пушки. В результате ввода в действие

группирователя пучка инжектора максимальная интенсивность Ереванского синхротрона была увеличена в 2 раза [13- 16].

3. Создана установка для генерации когерентного вынужденного ондуляторного излучения на пучке микротрона 7,5 МэВ (ЛСЭ). Приведены первые результаты измерения излучения в диапазоне длин волн порядка 30мкм. Это был второй лазер на свободных электронах после Стенфордской установки и первый терагерцовый лазер [2].

4. Создан ондуляторный магнит для субмиллиметрового диапазона излучения из ферромагнитных материалов, зарегистрировано ондуляторное излучение на пучке микротрона с длиной волны 0,2мм [19].

5. Предложен новый метод компенсации неустойчивостей при лазерном ускорении электронов в среде с применением двух лазерных пучков [3].

6. Предложен новый метод ускорения электронов полосками лазерного излучения [4, 5].

7. Проведена экспериментальная проверка идеи лазерного ускорения в ондуляторах. Увеличение энергии электронов после взаимодействия с полем лазера в ондуляторе хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями [6]. Это был первый демонстрационный эксперимент, подтверждающий возможность лазерного ускорения частиц в ондуляторе. Получена кривая зависимости взаимодействия от основных параметров установки [7, 8]. Проведено экспериментальное исследование лазерного ускорения электронов в ондуляторе с использованием импульсного CO₂ лазера мощностью 1-4 ГВт. Получен прирост энергии 60кэВ при начальной энергии электронов 12 МэВ [8].

8. Экспериментально подтвержден эффект сложения кильватерных волн в плазме от последовательности электронных слаботочных сгустков [9].

9. Создана фотоэлектронная пушка для формирования последовательности сгустков с заданными параметрами и заданным распределением заряда в сгустках [10], и предложена схема для увеличения коэффициента

трансформации при ускорении электронов кильватерными волнами в плазме [11].

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- ✓ 1. М.Л. Петросян. К кинематической теории многокаскадной группировки заряженных частиц. Препринт ЕрФИ УФТ – 7(69), Радиотехника и Электроника 4, стр.826-829, (1972).
2. А. Ts. Amatuni, M. L. Petrosian, B.V. Petrosian, N.T. Shahbazian, K/V/Oganesian. Generation of Coherent induced undulators radiation. ЦНИИ по атомной науке и технике ЕрФИ- 727(42) – 84.
3. Г. А. Нагорский, М. Л. Петросян. Устойчивость движения и ускорения заряженных частиц в поле двух линейно поляризованных электромагнитных волн в среде. Научное сообщение ЕрФИ – 154(76), (1976).
4. Амадуни А.Ц., Петросян М.Л. Ускорение заряженных частиц пространственно- модулированной электромагнитной волной. Вопросы атомной науки и техники, вып 6(16), стр.79, (1990).
5. Robert Melikian, Marzik Petrosyan, Vazgen Pogosyan. Acceleration of Charged Particles by Spatially Modulated Laser Wave. EPAC-04. page 527, Lucerne, Switzerland, (2004).
6. Амадуни А.Ц., Петросян М.Л., Петросян Б.В., Л.В. Хачатрян, А.С. Овсепян, Р.Ц. Арутюнян. Экспериментальное обнаружение лазерного ускорения в ондуляторе. Тр. XIII международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Стр. 138, Новосибирск, (1987).
7. А.Тs. Amatuni, M.L. Petrossyan, B.V. Petrossyan, A.S. Ovsepyan, R.Ts. Harutunyan and L.V. Khachatryan. The study of interaction of electrons with an electromagnetic wave in undulator. Review of Scientific Instrument, #7, July 1989.
- ✓ 8. Амадуни А.Ц., Петросян М.Л., Петросян Б.В., А.С. Овсепян, Р.Ц. Арутюнян, (Ереванский Физический Институт), В.Ю. Баранов,

- А.М. Стрельцов, С.А. Козочкин (Филиал института атомной энергии). Экспериментальное исследование лазерного ускорения в ондуляторе. Вопросы Атомной Науки и Техники, серия: ядерно физические исследования, вып.6(14), стр.72, (1990).
9. М. Л. Петросян, Б. В. Петросян, Г. М. Петросян. Возбуждение кильватерных волн в плазме пучком микротрона. Известия НАН Армении, Физика, т.42, №5, с. 309-315. (2007).
10. М. Петросян, Э. Лазыев, Г. Товмасын, Г. Петросян, Л. Петросян, М. Оганесян, М. Акопов, Р. Меликян, В. Погосян, Ю. Назарян, Ю. Фотозлектронная пушка для формирования электронных сгустков заданной конфигурации. Известия НАН Армении, Физика, т.41, №3, с.216-220 (2006).
11. М. Petrosyan, М. Akopov, Yu. Garibyan, E. Laziev, R. Melikian, Yu. Nazaryan, M. Oganesyanyan, G. Petrosyan, L. Petrosyan, V. Pogosyan, G. Tovmasyan. Experiments on Wake Field Acceleration in Plasma and the Program of the Further Works in YerPhi. Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference, page 752. May 16-20, Knoxville, Tennessee, USA, (2005).
12. С.К. Есин, М.Л. Петросян. Группировка пучка инжектора на частоте ускоряющих резонаторов синхротрона. Изв. АН Армянской ССР, Физика, 3, стр. 211-216, (1968).
13. С.К. Есин, Г.Г. Матевосян, М.Л. Петросян. Группирователь на частоте 132,79 Мгц для Ереванского синхротрона. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. том 1, стр.477, Москва (1968).
14. М.Л. Петросян. К вопросу нагрузки током линейного ускорителя. Изв. АН Арм. ССР, Физика, 6, стр.312-314, (1971).
15. С.К. Есин, М.Л. Петросян, В.Л. Серов. Исследование режимов работы линейного ускорителя-инжектора Ереванского синхротрона. Изв. АН Арм. ССР, Физика, 6, стр. 398-401, (1971).

- ✓ 16. С.К. Есин, М.Л. Петросян, В.Л. Серов. Исследование режимов ускорения Ереванского синхротрона при инъекции сгруппированного пучка на частоте ускоряющих резонаторов. Атомная энергия, том 33 вып.6, стр. 908, 1972.
17. К. Б. Оганесян, М. Л. Петросян. Магнитные поля спиральных ондуляторов. Научное сообщение ЕрФИ– 475(18) – 81, (1981).
18. Ю. Л. Мартиросян, М. Л. Петросян. Влияние углового расхождения электронного пучка на спектральное распределение ондуляторного излучения. Научное сообщение ЕрФИ – 318(43)-78, (1978).
- ✓ 19. М. L. Petrosyan, L. A. Gabrielyan, Yu. R. Nazaryan, G. Kh. Tovmasyan, and K. B. Oganesyanyan. FEL Undulator with Permanent Ferromagnetic Magnets. Laser Physics, 2007, Vol. 17, No. 8, pp. 1077–1079.
- ✓ 20. Н. А. Корхмазян, Л. А. Геворгян, М. Л. Петросян. Влияние плотности распределения электронов на когерентность излучения сгустков. Журнал технической Физики. Том 47, в. 8, стр 1583 – 1597, (1977).
21. А. Ts. Amatuni, M.L. Petrossyan. Coronary Angiography with Nonlinear Backward Thomson Scattering. Научное сообщение ЕрФИ -154(16)-99. Conference on Laser Physics-99, Ashtarak, (1999).

Ամփոփում

Ատենախոսությունում ներկայացված են հետեւյալ աշխատանքները՝

1. Առաջարկվել է կարճ էլեկտրոնային թանձրուկներ ձևավորելու նույն հաճախականության բազմակասկադային խմբավորիչ: Մշակվել է նրա տեսությունը և ստեղծվել երկու կասկադով խմբավորիչ երեվանի սինքրոտրոնի համար:
2. Ուսումնասիրվել է գծային արագացուցիչների աշխատանքը մոդուլացված էլեկտրոնային փնջերի արագացման դեպքում: Գծային արագացուցիչում էլեկտրոնային փնջի մոդուլացման շնորհիվ արագացված փնջի հոսանքը սինքրոտրոնում հնարավոր եղավ մեծացնել երկու անգամ:
3. Ստեղծվել է 30միկրոն ալիքի երկարության ազատ էլեկտրոններով լազեր, որը առաջինն էր տերահերցային տիրույթում և երկրորդը՝ Ստենֆորդի լազերից հետո:
4. Առաջարկվել է միջավայրում էլեկտրոնների լազերային արագացման դեպքում, անկայունությունը վերացնելու համար, օգտագործել փոքր անկյան տակ հատվող երկու լազերային փնջեր:
5. Առաջարկվել է էլեկտրոնների արագացման նոր եղանակ լազերային փնջերի շերտերի միջոցով:
6. Առաջին անգամ իրականացվել է էլեկտրոնների լազերային արագացումը օնդուլատորներում: Առաջին անգամ գիտափորձի միջոցով գրանցվել է հաջորդական էլեկտրոնային թանձրուկների միջոցով պլազմայում գոգնված կիլվատերային ալիքների գումարումը:
7. Նախագծվել և ստեղծվել է ֆոտոէլեկտրոնային աղբյուր՝ նախապես ծրագրավորված պարամետրերով զույգ էլեկտրոնային թանձրուկներ ձևավորելու համար:

Մ. Մ. Կարապետյան