

Ա.Ի. ԱԼԻԽԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ

Հովհաննիսյան Կորյուն Բեգլարի

ԱԶԱՏ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԼԱԶԵՐՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2016

НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ИМЕНИ А.И. АЛИХАНИЯ

Оганесян Корюн Бегларович

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЕРЕВАН 2016

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական
լաբորատորիայում

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ

Ֆիզմաթ գիտությունների դոկտոր

Պրոֆ Է. Մ. Լազիև

ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ,

Ֆիզմաթ գիտությունների դոկտոր

Գ. Յու. Կրյուչյան

Ֆիզմաթ գիտությունների դոկտոր

Կ. Զ. Հացագործյան (ՄՖ

Մաքս-Պլանկի Ինստիտուտ

Հայդելբերգ, Գերմանիա)

Առաջատար կազմակերպություն՝
ք.Աշտարակ, ՀՀ

ՀՀ ԳԱ Ռադիոֆիզիկայի եվ էլեկտրոնիկայի

Ինստիտուտ,

Պաշտոնական կայանալու է 2016 թ. ապրիլի 05 - ին ժամը 14-ին, ԱԱԳԼ-ում գործող ԲՈՀ-ի
024«Միջուկի և տարրական մասնիկների ֆիզիկա» մասնագիտական խորհրդում (Երեվան-36,
Ալիխանյան եղբայրների փ. 2)

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ ՊՈԱԿ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2016 մարտի 5 - ին

Մասնագիտական խորհրդի
ֆիզմաթ գիտ. դոկտոր



գիտական քարտուղար
Դ. Ռ. Կարախանյան

Тема диссертации утверждена в Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Э. М. Лазиев (КЕНДЛ ИСИ, г. Ереван, РА)

Член корр. НАА, доктор физико-математических наук

Г. Крючян (ИФИ, г. Аштарак, РА)

доктор физико-математических наук

К. З. Ацагорця (МПИ ЯФ, г. Айделверг, Германия)

Ведущая организация: Институт Радиофизики и Электроники НАН, г. Аштарак, Армения.

Защита состоится 05 апреля 2016 г. В 14 часов на заседании специализированного совета ВАК РА
024 Физика ядра и элементарных частиц”, действующего в Национальной научной лаборатории
имени А.И. Алиханяна (375036, г. Ереван. Ул. Братьев Алиханян 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНКО ННЛА.

Автореферат разослан 5 марта 2016 г.

Ученый секретарь спец. совета

Доктор физико-математических наук



Караханян Д. Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Лазеры на свободных электронах - мощные, перестраиваемые, когерентные источники излучения, которые используются в научном исследовании, нагревании плазмы, физике конденсированных сред, атомной, молекулярной и оптической физике, биофизике, биохимии, биомедицина и т.д. В настоящее время ЛСЭ производят излучение в пределах от волн миллиметра, вплоть до ультрафиолетовых и рентгеновских, включая часть спектра, в котором никакие другие интенсивные, перестраиваемые источники не существуют. Эта область современной науки является интересной с точки зрения фундаментального исследования и очень многообещающей для дальнейших применений.

Диссертация посвящена исследованию возможностей создания новых типов ЛСЭ основанных на использовании поперечных осцилляций электронов, имеющих конфигурации типа потенциального параболического желоба. Такое движение имеет характер каналирования, а соответствующие осцилляции носят название строботронных колебаний. По своей природе они отличаются от ондуляторных колебаний, используемых в обычных ЛСЭ на основе

магнитного ондулятора. В диссертации рассматриваются также и другие схемы создания ЛСЭ: ЛСЭ без инверсии, ЛСЭ типа Смита-Парселла и каналирование позитронов в некоторых ионных кристаллах.

Цель работы:

Целью диссертационной работы является исследование характеристик различных типов лазеров на свободных электронах. В частности:

- Нахождение систем, в которых с помощью внешних полей можно создать условия для каналирования электронов.
- Изучение спонтанного излучения и усиления в таких системах на основной резонансной частоте и на ее высших гармониках с учетом таких реально существующих и принципиально важных факторов как возможные неоднородное уширение и перекрытие линий.
- Исследование влияния неоднородности поля накачки в стоячей световой волне на спектральные особенности усиления при каналировании электронов в интенсивной стоячей волне.
- Исследование влияния неоднородности магнитного поля плоского виглера на спектральное распределение и на коэффициент усиления.

- Изучение усиления в Лазерах на Свободных Электронах без инверсии.
- Изучение усиления в Лазерах на Свободных Электронах типа Смита-Парселла .
- Изучение каналирования малоэнергетических позитронов в некоторых ионных кристаллах.

Научная новизна данной работы состоит в том, что в ней получены следующие результаты:

- Впервые предложен релятивистский строботрон в качестве альтернативной схемы для ЛСЭ [1-4].
- Впервые предложена интенсивная световая стоячая волна для каналирования электронов в целях создания ЛСЭ [5,6].
- Получены выражения для спектрального распределения спонтанного излучения и коэффициента усиления с учетом неоднородности магнитного поля плоского виглера [7-9] .
- Получено выражение для порога лазерной мощности в Лазерах на свободных электронах без инверсии [10-14] .

- Предложена и исследована схема Лазера на свободных электронах на основе эффекта Смита-Парселла [15-19].
- Показана возможность осевого каналирования позитронов в некоторых типах ионных кристаллах [20-23].

Научная и практическая ценность

Практическая ценность работы обусловлена актуальностью темы диссертации. Проведенные в работе теоретические исследования и разработанные методы могут быть непосредственно использованы при планировании экспериментов по ЛСЭ.

Основные положения выносимые на защиту:

- При определенных условиях движение электрона поперек интенсивной стоячей электромагнитной волны имеет характер каналирования в периодическом потенциале.
- Коэффициент усиления в системе релятивистский строфотрон представляет собой совокупность большого числа эквидистантных линий. Численно коэффициент усиления в такой системе не мал в ИК диапазоне.

- Вычисление вероятностей аннигиляции позитрона с электроном среды при каналировании позитронов в ионных кристаллах.
- В системе с интенсивной стоячей волной основанное на эффекте каналирования усиление порядка 1% в ИК диапазоне может быть обеспечено на очень коротких расстояниях (порядка 1мм) при весьма малой энергии электронов (меньше 100КэВ) и энергии в лазерном импульсе накачки порядка 1Дж.
- Учтено влияние неоднородности магнитного поля плоского вилгера на спектральное распределение спонтанного излучения и на коэффициент усиления.
- В ЛСЭ типа Смита -Парселла исследованы зависимости темпа роста от таких параметров как угол наблюдения, релятивистский фактор.
- Оценен порог угла отклонения в первом ондуляторе в Лазерах на свободных электронах без инверсии.

Апробация работы.

Материалы диссертации были представлены и докладывались на международных конференциях:

- Physics of Quantum Electronics , 2009; 2010
- Central European Workshop on Quantum Optics Belgrade 2009; Turku 2010
- International Laser Physics Workshops Trieste 2004; Kyoto 2005; Lousanne 2006; Trondheim 2008; Barcelona 2009; Sarajevo; Calgary 2012; Prague 2013; Sofia 2014; Shanghai 2015
- FEL New York 2013
- IPAC, New Orlean 2012; Shanghai 2012; Kyoto 2011;
- NAPAC , Pasadena, 2014
- SPIE & Photonics, San Diego 2014
- NCTS Workshops on Critical Phenomena and Complex Systems, Taipei, Taiwan, 2000-2011.

Материалы диссертации докладывались также на семинарах Национальной Научной Лаборатории им. А.И. Алиханяна (Ереванский Физический Институт); Института Физики, Академии Синики, Тайпей, Тайвань; Университета Нью Мексико(Албукуеркуе); Университета АиМ Колледж Стейшена (Техас); Унивеситета Северного Техаса (Дентон); Брукхевенской Национальной Лаворатории (Нью Йорк); Лаборатории Томаса Джефферсона.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 23 статей в рецензируемых журналах

.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения; содержит 204 страниц печатного текста, включая 23 рисунка, и список литературы из 174 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **Главе 1** описана система состоящая из большого числа специально подобранных и установленных магнитных квадрупольных линз в которой движение электронов стабильно и которая может быть использована для создания ЛСЭ. В качестве упрощенной модели такой системы принята и исследована модель плоского параболического желоба.

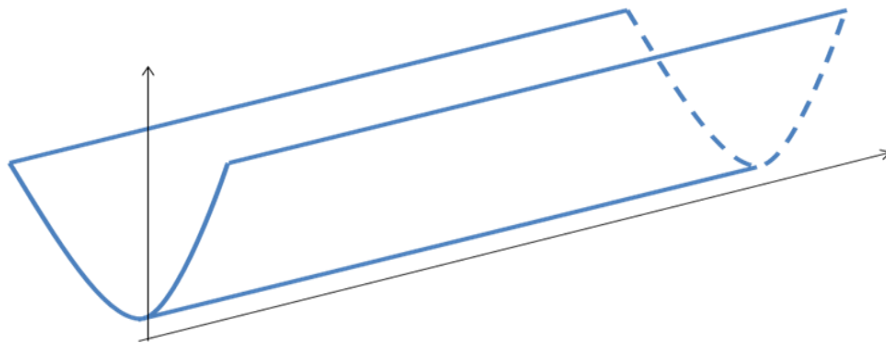


Рис.1. Модель плоского параболического желоба для ЛСЭ.

Рассмотрено движение электронов в электрическом и магнитном полях строфотрона.

Вычислено спектральное распределение спонтанного излучения электронов движущихся в полях строфотрона. Показано, что при сравнительно больших энергиях электронов 10-50 МэВ в системе

релятивистский строботрон спектральное распределение спонтанного излучения имеет вид большого числа эквидистантных линий, положение которых зависит от начальной координаты электрона. При больших энергиях имеет место сильное неоднородное уширение и перекрытие линий.

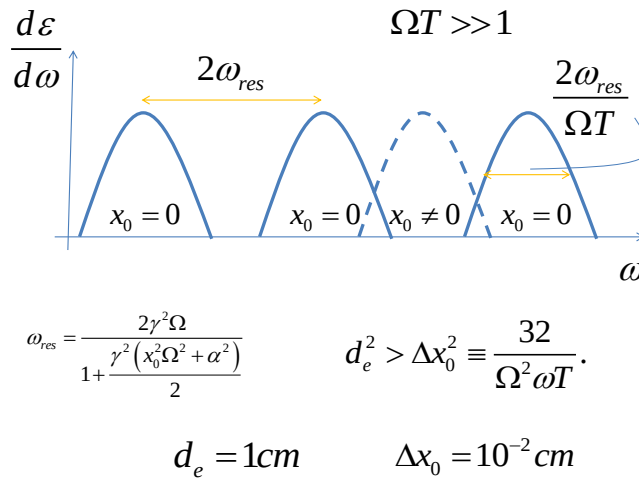


Рис.2. Зависимость спектрального распределения спонтанного излучения электронов в релятивистском строботроне от частоты.

Произведено усреднение спектра излучения по распределению электронов в пучке.

Главе 2 Посвящена вопросам вынужденного излучения в ЛСЭ типа релятивистского строботрона. Показано, что при сравнительно

больших энергиях электронов 10-50 МэВ в системе релятивистский строфотрон изменение энергии при взаимодействии с волной распространяющийся вдоль пучка имеет вид большого числа эквидистантных линий, положение которых зависит от начальной координаты электрона. При больших энергиях имеет место сильное неоднородное уширение и перекрытие линий.

Построена нелинейная теория усиления в системе релятивистский строфотрон. Показано что к. п. д. системы обратно пропорционален номеру гармоники основной резонансной частоты.

Построена квантовая теория усиления в ЛСЭ типа релятивистского строфотрона. Исследованы условия при которых возможно эффективное усиление на высоких гармониках основной резонансной частоты.

Показано, что в системе релятивистский строфотрон усиление в ИК-диапазоне может достигать нескольких долей процента.

В Главе 3 Найдены резонансная частота и коэффициент усиления при каналировании электронов на интенсивной стоячей волне.

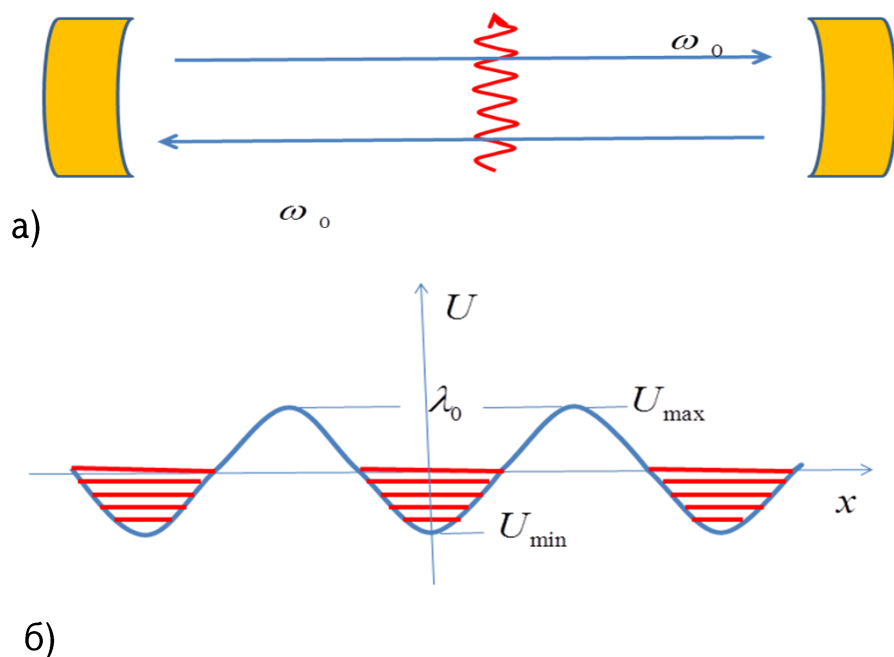


Рис. 3. Схематическое представление ЛСЭ со стоячей электромагнитной волной (а) и эффективная потенциальная энергия электрона в поле стоячей волны (б) .

Учтена пространственная неоднородность поля приводящая к необычной спектральной структуре коэффициента усиления в зависимости от частоты усиливаемой волны: он содержит много пиков сгущающихся по мере уменьшения частоты. Показано что в такой системе усиление порядка 1% в ИК диапазоне на очень малых длинах порядка 1мм при весьма низкой энергии электронов порядка 100Кэв.

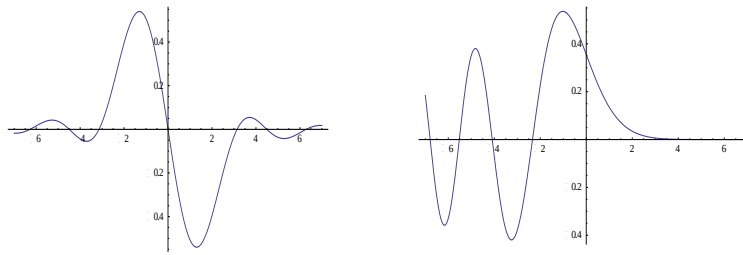


Рис.4. Спектральная зависимость коэффициента усиления в случае однородной (левый рис.) и неоднородной (правый рис.) полей.

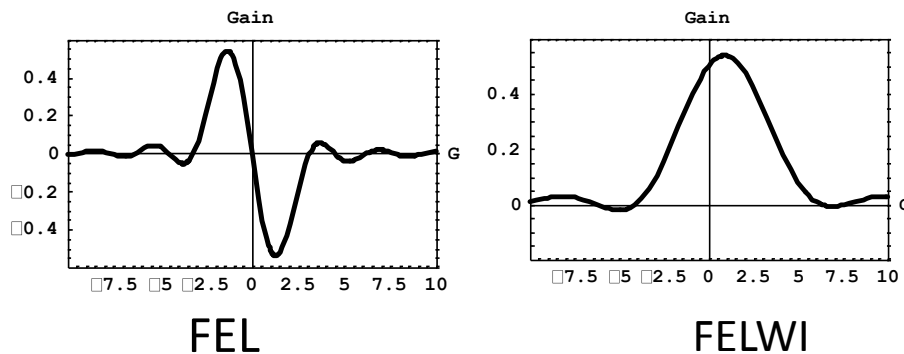
Показано, что при помощи такой системы с энергией в лазерном импульсе порядка 1КДж можно осуществить переход из инфракрасного диапазона $\lambda = 9.6$ мкм в видимый ($\lambda = 0.56$ мкм с усилением порядка 1% при $\gamma = 5$) и в ультрафиолетовый ($\lambda = 0.18$ мкм с усилением порядка 0.2% при $\gamma = 10$).

Вычислены спектральное распределение спонтанного излучения электронов, движущихся в плоском виглере (ондуляторе) с неоднородным магнитным полем и коэффициент усиления. Показано, что электроны совершают сложное движение, состоящее из медленной (строфотронной) и быстрой (ондуляторной) частей. Усредняя уравнения движения по быстрой части, получаем уравнения для связанного

движения. Показано, что учет неоднородности магнитного поля приводит к появлению дополнительных пиков в спектральном распределении спонтанного излучения и в коэффициенте усиления. Из множества этих пиков с помощью известного метода синхронизации мод можно получить ультракороткие импульсы. Пики спектрального распределения спонтанного излучения и коэффициента усиления локализованы на комбинационных частотах нечетных гармоник ондуляторной резонансной частоты и четных гармоник строфотронной резонансной частоты.

В **Главе 4** обсуждается возможность реализации ЛСЭ без инверсии. Идея создания лазеров на свободных электронах без инверсии (ЛСЭБИ) была предложена впервые в работе [1], и затем развивалась и совершенствовалась в работах [2-4]. Конкретные схемы реализации ЛСЭБИ предлагались и рассматривались в работах [5,6]. Одним из ключевых моментов в схемах реализации ЛСЭБИ является предложение об использовании неколлинеарного распространения электронного пучка и усиливаемого излучения. В обычных лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) такие схемы известны и обсуждаются давно [7]. Применительно к ЛСЭБИ с двумя ондуляторами основная идея состоит в том, что при неколлинеарном взаимодействии лазерного и электронного пучков у электронов после первого ондулятора возникает разброс по поперечным скоростям, а значит и по углам, и этот разброс напрямую связан с

приростом энергии электронов. Поэтому селекция электронов по направлениям в межондуляторном промежутке оказывается эквивалентной селекции по энергии. Это позволяет изменять контролируемым образом длину пути электронов с разными энергиями в межондуляторном пространстве и распределение по энергиям на входе во второй ондулятор. Если устройства в межондуляторном промежутке обладают свойством отрицательной дисперсии (т. е. более быстрые электроны тратят больше времени на прохождение межондуляторного пространства, чем медленные), то интегральный (по энергиям электронов) коэффициент усиления $G(\omega)$ может быть сделан положительным практически во всей области изменения частоты ω усиливаемой волны в окрестности резонансной частоты ондулятора. Это и есть ЛСЭБИ.



$$\int G(\Omega)d\Omega = 0 \quad \int G(\Omega)d\Omega > 0$$

Рис.5. Зависимость коэффициент усиления от расстройки резонанса, которая характеризует отклонение скорости электрона или лазерной частоты от резонансного условия для обычного ЛСЭ (левый рис.) и для ЛСЭ без инверсии (правый рис.).

Данный механизм может работать только, если разброс по углам α , возникающий в результате взаимодействия электронов с полем ондулятора и усиливаемой волны больше, чем естественный разброс $\Delta\alpha_{\text{пучок}}$ по направлениям скорости в электронном пучке. Практически $\Delta\alpha_{\text{пучок}}$ не может быть сделана меньше чем 10^{-6} рад. Условие $\alpha > \alpha_{\text{пучок}}$ приводит к возникновению порога реализации ЛСЭБИ либо по интенсивности лазерного излучения, либо по плотности электронного пучка.

Показано, что возможность создания лазеров на свободных электронах без инверсии (ЛСЭБИ) имеет пороговый характер по интенсивности усиливаемой волны. Дано описание пороговых условий как в одночастичном так и в коллективном подходах. Показано, что порог наблюдения усиления без инверсии достаточно высок, что может существенно затруднить возможность экспериментальной реализации ЛСЭБИ.

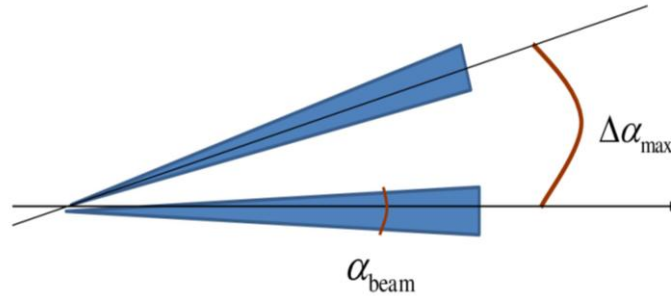


Рис.5. Схематическое изображение пучка электронов после выхода из первого ондулятора в ЛСЭ без инверсии.

Данный механизм может работать только, если разброс по углам $\Delta\alpha$, возникающий в результате взаимодействия электронов с полем ондулятора и усиливаемой волны, больше, чем естественный разброс α_{beam} по направлениям скорости в электронном пучке. Оценен угол отклонения в первом виглере.

Полученное значение порога для мощности лазерного излучения является верхней границей в условиях слабого усиления. Как следует из приведенных выше оценок реализация ЛСЭБИ в одночастичном режиме со слабым усилением $k''L \ll 1$ встречает большие проблемы, что по-видимому, приводит к практической невозможности его реализации в данном режиме в том варианте, в котором оно рассматривалось. Имеется два выхода из этой ситуации. Первое, это использование рамановского режима усиления. Как показало численное моделирование [8] в данном режиме идея ЛСЭБИ имеет большие возможности. Второе - это использование сильного усиления на длине $k''L \gg 1$ в томсоновском

режиме. Как первое так и второе требует использование пучков большой плотности.

В Главе 5 В рамках дисперсионных уравнений исследовано излучение Смита - Парселла релятивистских электронов без резонатора. Нами предложен теоретический подход режима слабого усиления в ЛСЭ типа Смита - Парселла. Аналитическое выражение получено для темпа роста неустойчивости Смита - Парселла. Анализируются зависимости темпа роста от релятивистского фактора пучка от высоты пучка до решетки, от угла наблюдения.

Мы нашли что дисперсионное уравнение описывающее вынужденную неустойчивость Смита - Парселла квадратично по частоте. Показано, что условия для возбуждения томсоновского и рамановского неустойчивостей не зависят от тока пучка, а зависят от расстояния пучка до решетки. Рост темпа в обоих случаях пропорционален квадратному корню от тока пучка. Для применения полученных нами результатов, как важный пример, вычислен темп роста для ЛСЭ типа СП для прямоугольной решетки. Наши результаты совпадают с экспериментальными данными полученными в Дартмутском колледже [9].

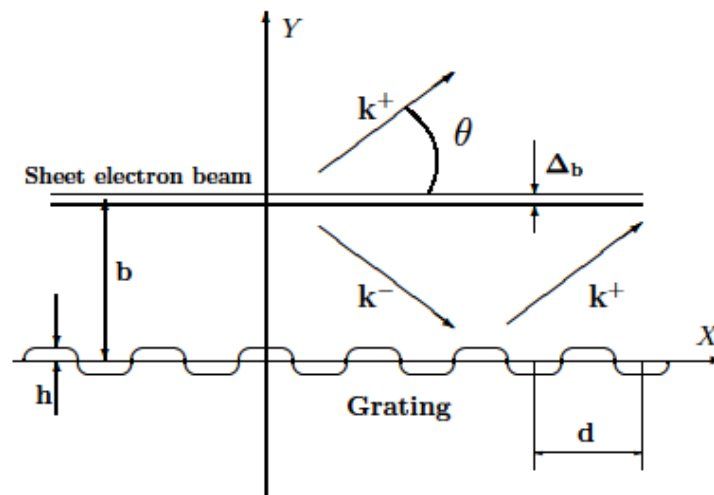


Рис.6. Схема ЛСЭ типа СП. Плоский электронный пучок в плоскости $y=b$. θ угол наблюдения, Δ_b толщина пучка, d и h период и амплитуда решетки, соответственно.

В **Главе 6** Показана возможность каналирования низкоэнергетических релятивистских позитронов вокруг отдельных кристаллографических осей с коаксиальной симметрией отрицательных ионов в некоторых типах кристаллов. Детально изучен процесс аннигиляции позитронов с электронами среды. Найдено время жизни позитрона в режиме каналирования (10^{-6} сек), которое в 10^9 – 10^8 раз больше, чем в обычных случаях.

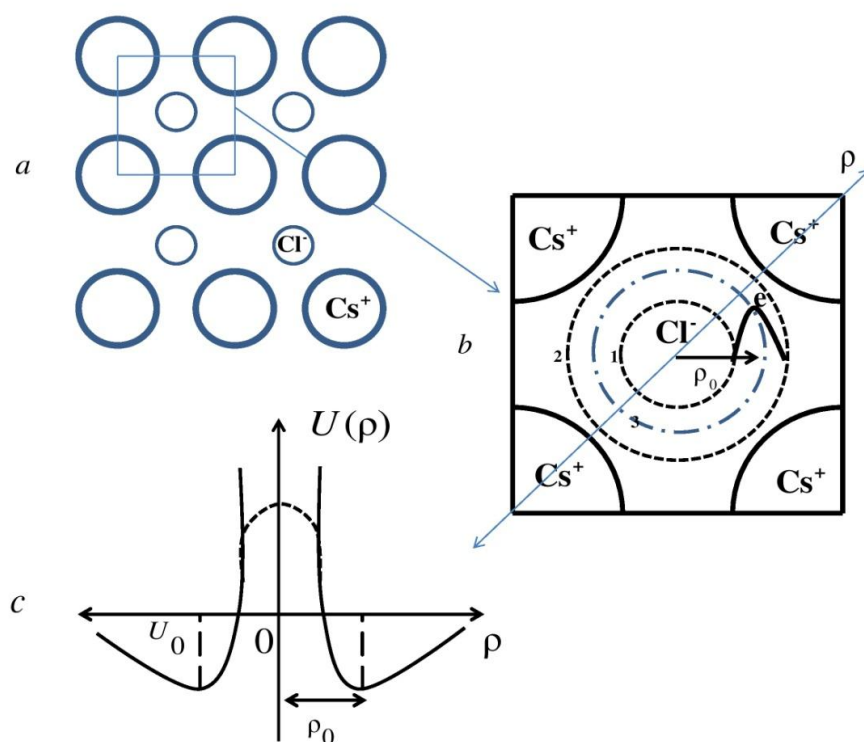


Рис.7. а) Решетка кристалла $CsCl$, б) ячейка решетки , в) эффективный потенциал каналирования позитронов вокруг оси отрицательно заряженных ионов Cl^- показан вдоль радиуса ρ , который в области локализации позитрона описывается потенциалом Морса.

Наши исследования показали, что проблема, связанная с короткой длиной деканалирования, решается, если рассматривать каналирование позитронов с энергией 5–20 МэВ, в частности, в ионных кристаллах типа $CsCl$ вдоль ионов хлора (ось $\langle 100 \rangle$). В этом случае в кристалле

образуется двумерная релятивистская позитронная система (ПС), которая с фононами подсистемы решетки практически не взаимодействует. Все другие типы воздействия на ПС, а именно: столкновения с электронами среды, рассеяние на дискретностях решетки и т.д., являются возмущениями. Другими словами, вышеупомянутым способом с высокой долей вероятности можно создать 2D релятивистскую ПС в среде со временем жизни больше, чем $10^{-6} - 10^{-7}$ сек. Это означает, что решена основная проблема создания наноондуляторов, имеющих большие времена жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Kurizki, M.O. Scully, C. Keitel. Phys. Rev. Lett., 70, 1433 (1993).
2. B. Sherman, G. Kurizki, D.E. Nikonov, M.O. Scully. Phys. Rev. Lett., 75, 4602 (1995).
3. D.E. Nikonov, B. Scherman, G. Kurizki, M.O. Scully. Opt. Commun., 123, 363 (1996).
4. D.E. Nikonov, M.O. Scully, G. Kurizki. Phys. Rev. E, 54, 6780 (1996).
5. A.I. Artemiev, M.V. Fedorov, Y.V. Rostovtsev, G. Kurizki, M.O. Scully, Phys. Rev. Lett., 85, 4510 (2000).
6. Yu. Rostovtsev, S. Trendafilov, A. Artemyev, K. Kapale, G. Kurizki, and M. O. Scully. Phys. Rev. Lett., 90, 214802 (2003).

7. M.V. Fedorov. Atomic and Free Electrons in a Strong Light Field, Singapore, World Scientific, 1997.
8. http://sbfel3.ucsb.edu/www/vl_fel.html, www.hasylab.desy.de/facility/fel/ and www.vanderbilt.edu/fel/.
9. J. Urata, M. Goldstein, M. F. Kimmitt, A. Naumov, C. Platt, and J. E. Walsh, Phys. Rev. Lett. **80**, 516 (1998).

ВЫВОДЫ

- Мы показали возможность использования релятивистского строфотрона для создания Лазеров на свободных электронах.
- Мы привели систематическое исследование каналирования электронов на интенсивной стоячей световой волне для создания ЛСЭ.
- Мы нашли аналитическое выражение для спектрального распределения спонтанного излучения и коэффициента усиления с учетом неоднородности магнитного поля плоского виглера.
- Мы нашли ограничения для устойчивой работы Лазеров на свободных электронах без инверсии.
- Мы нашли зависимости темпа роста в ЛСЭ типа Смита-Парселла от параметров системы.
- Найдены вероятности аннигиляции позитрона с электроном среды на один и на два гамма фотона при каналировании позитронов в ионных кристаллах..

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. M.V. Fedorov, **K.B. Oganessian**, Classical theory of amplification in relativistic strophotron FEL, IEEE J. of Quant. Electr. **QE-21**, pp.1059-1068, 1985
2. **К.Б. Оганесян**, М.В. Федоров, Нелинейная теория усиления в Лазере на свободных электронах типа Релятивистского строфотрона, ЖТФ, т. **57**, стр. 2105-2114, 1986 .
3. Д.Ф. Зарецкий, Э.А. Нерсесов, К.Б. Оганесян, М.В. Федоров, Лазер на свободных электронах движущихся в полях с поперечным градиентом, Квантовая Электроника (Москва) **13**, 4, 685-692 (1986);
4. Э.А. Нерсесов, К.Б. Оганесян, М.В. Федоров, О возможной реализации Лазеров на свободных электронах типа релятивистского строфотрона, ЖТФ, т. **56**, р. 2402-2404, 1986.
5. M.V. Fedorov, **K.B. Oganessian**, A.M. Prokhorov, Free-electron laser based on the effect of channeling in an intense standing light-wave, Appl. Phys. Lett., **53**, pp.353-354, 1988;
6. К.Б. Оганесян, А.М. Прохоров, М.В. Федоров, Поперечное каналирование на интенсивной стоячей волне и лазер на свободных электронах, ЖЭТФ **94**, стр. 80-86, 1988;

7. **K.B. Oganessian**, Strophotron spontaneous emission in a Free-Electron Laser with transversally inhomogeneous magnetic field, J. of Modern Optics, **61**, Issue 9, pp. 763-765, 2014
8. **K.B. Oganessian**, The Gain in the Plane Wiggler with Inhomogeneous Magnetic Field, J. of Modern Optics, , **61**, Issue 17, pp. 1398-1399, (2014).
9. **К.Б. Оганесян**, О влиянии неоднородности магнитного поля плоского вигглера на спектральное распределение спонтанного излучения и на коэффициент, Изв. НАН Армении, Физика т.**50**, н. 2, 169-175, (2015).
10. A.I. Artemiev, D.I. Klochkov, **K.B. Oganessian**, M.V. Fedorov, and Yu. Rostovtsev, Spatial Amplification of a Laser Wave and the Transverse Spread of Electrons in an Undulator with a Noncollinear Configuration, Laser Physics **17**, no.10, pp. 1213-1216, (2007).
11. M.V. Fedorov, G. Kurizki, **K.B. Oganessian**, M.L. Petrosyan, Y.V. Rostovtsev, M.O. Scully, C.K. Hu, The threshold conditions for FELWI, Physica Scripta **T 140**, 014058 (2010).
12. D.N. Klochkov, **K.B. Oganessian**, Y.V. Rostovtsev, G. Kurizki . Threshold characteristics of free electron lasers without inversion , Laser Physics Letters, **11**, Number 12, 125001, (2014).

13. **К. .Б Оганесян**, Некоторые особенности реализации Лазеров на свободных электронах типа релятивистского строфотрона, Изв. НАН Армении Физика, **т.51**, №1, с.15-19, (2015).
14. **К.В. Oganessian**, FELWI realization difficulties, NIM **A**, **812**, 33-36 (2016).
15. D.N. Klochkov, A.I. Artemiev, **К.В. Oganessian**, Y.V. Rostovtsev, M.O. Scully, C.K. Hu, The dispersion equation of the induced Smith–Purcell instability, Physica Scripta, v.**T140**, 014049 (2010).
16. D. N. Klochkov, A. I. Artemyev, **К. В. Oganessian**, Y. V. Rostovtsev, M. O. Scully, Chin-Kun Hu, Generation of induced Smith-Purcell radiation in the absence of resonator, Journal of Physics: Conference Series **236**, 012022 (2010).
17. D.N. Klochkov, A.I. Artemiev, **К.В. Oganessian**, Y.V. Rostovtsev, C.K. Hu, Induced Smith-Purcell Radiation , J. Modern Optics, V. **57**, Issue 20, 2060-2068, (2010).
18. D.N. Klochkov, **К.В. Oganessian**, E.A. Ayryan, N.Sh. Izmailian, Induced Smith-Purcell radiation: Free electron laser in open system, J. of Modern Optics, **63**, n.7, 653-659, (2016).
19. **К.В. Oganessian**, Smith-Purcell radiation amplifier, Laser Physics Letters, **12**, Issue 11, 116002, (2015).
20. A.I. Artemyev, M.V. Fedorov, A.S. Gevorgyan, N.Sh. Izmailyan, R.V. Karapetyan, A.A. Akopyan, **К.В. Oganessian**, Yu.V. Rostovtsev,

M.O.Scully, G.Kuritzki, Radiation processes accompanying the axially channeled positrons. Problem of stimulation of resonant transitions between different quantum States, J.Mod. Optics, v.**56**,N.18, pp. 2148-2157, (2009).

21.A.S. Gevorkyan, **K.B. Oganessian**, Y.V. Rostovtsev, G. Kurizki, Gamma Radiation Production Using Positron Channeling in Ionic Crystals, Laser Physics Letters, June, **12**, 076002, (2015).

22.**K.B. Oganessian**, Creation of Nanoundulators for Radiation Using Positron Annihilation in Ionic Crystals, J. of Modern Optics, **62**, Issue 11, pp. 933-936, (2015).

23.**К. .Б Оганесян**, Канализированные позитроны как источник гамма излучения , Изв. НАН Армении Физика, **т.50**, №4, с.422-427, (2015)

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ամփոփման մեջ բերվում են ատենախոսության հետևյալ հիմնական արդյունքները:

- Ուսումնասիրված է Ռեյատիվիստիկ ստրոֆոտրոնը որպես Ազատ էլեկտրոնային լազերների այլընտրանքային տեսակ: Գտնված են էլեկտրոնների սպոնտան ճառագայթման սպեկտրալ ինտենսիվությունը եվ արտաքին ալիքի ուժեղացման գործակիցը: Նրանք իրենցից ներկայացնում են ճառագայթման եվ ուժեղացման հիմնական ռեզոնանսային հաճախության կենտ հարմոնիկների վերադրում:
- Արված են սովորական օնդուլատորի եվ ստրոֆոտրոնի վրա հիմնված Ազատ փլեկտրոնային լազերների համեմատություններ:
- Ուսումնասիրված է հզոր կանգուն լուսային ալիքի վրա էլեկտրոնների կանալացման երեվոյթը: Առաջարկված է օգտագործել այս երեվոյթը Ազատ էլեկտրոնային լազերներ ստեղծելու համար: Հաշվված է եվ գնահատված է ուժեղացման գծային գործակիցը:
- Հաշվի են առնվել հարթ վիզերի մագնիսական դաշտի անհամասեռության ազդեցությունը էլեկտրոտրոնների սպոնտան ճառագայթման սպեկտրալ բաշխման եվ ուժեղացման գործակցի վրա: Դա բերում է ճառագայթման սպեկտրալ բաշխման եվ ուժեղացման գործակցի լրացուցիչ պիկերի ի հայտ գալուն: Այդ

պիկերի միջոցով օգտագործելով հայտնի մոդերի սինխրոնիզացիայի մեթոդը կարելի է ստանալ գերկարճ իմպուլսներ: Ճառագայթման սպեկտրալ բաշխման եվ ուժեղացման գործակցի պիկերը տեղակայված են օնդուլյատորային ռեզոնանսային հաճախականության կենտ եվ ստրոֆոտրոնային ռեզոնանսային հաճախականության զույգ հարմոնիկների կոմբինացիոն հաճախությունների վրա:

- Կատարվել են Առանց վերաբնակեցման Ազատ էլեկտրոնային լազերների ուսումնասիրությունը եվ առաջարկվել են պայմաններ, որոնց դեպքում հնարավոր է նրանց կայուն աշխատանքը:
- Կատարել ենք Սմիթ Պարսելի տիպի Ազատ էլեկտրոնային լազերների ուսումնասիրությունը: Դիսպերսիոն հավասարումների շրջանակներում ուսումնասիրել ենք ստիպողական Սմիթ Պարսելի ճաղագայթումը ռելյատիվիստիկ էլեկտրոնային փնջի համար առանց ռեզոնատորի: Գտել ենք, որ ստիպողական Սմիթ Պարսելի անկայունությունը բնութագրող դիսպերսիոն հավասարումը քառակուսային է ըստ հաճախականության: Հաշվված է աճի տեմպը ուղղանկյուն ցանցի համար:
- Ցույց է տրված ցածր էներգիայով ռելյատիվիստիկ պոզիտրոնների առանցքային կանալացման հնարավորությունը որոշ իոնական բյուրեղներում: Մենք լուծել ենք նանոօնդուլյատորների ստեղծման

հնարավորությունը, որոնք ունեն երկար կյանքի տեվողություն եվ որոնք կարող են ղեկավարվել:

SUMMARY

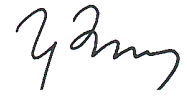
In conclusion we enumerate the main results obtained in the thesis.

- Relativistic strophotron is investigated as an alternative scheme for Free Electron Laser. Spectral intensity of a spontaneous emission and the gain of an external wave in the strophotron are found by a superposition of contributions from emission or amplification at different (odd) harmonics of the main resonance frequency $\omega_{res}(x_0)$.
- Comparison is done to indicate features of the strophoton FEL differentiating this device from the usual undulator FEL.
- Channeling of electrons moving across an intense standing light wave is described. This effect is proposed to be used for the creation of Free Electron Laser. Its linear gain is calculated and estimated. Estimates indicate that the gain should be sufficient for the construction of a free-electron laser operating in the infrared range.
- We have shown that as a result of the allowance for magnetic field inhomogeneity, some additional peaks appear in the spectral distribution of spontaneous radiation and in the gain. Out of the multitude of these peaks one can obtain ultra short pulses using the well-known mode-locking method. The peaks in the spectral distribution of spontaneous radiation and of the gain are localized at

combined frequencies of the odd harmonics of $(2n+1)\omega_{\text{res,und}}$ undulator resonant frequency and even harmonics of $2m\omega_{\text{res,str}}$ strophotron resonance frequency.

- Taking into account the finite sizes of the beams, the value of the threshold laser power at the entry of the first undulator of FELWI, above which the selection of electrons via the transverse velocity in the drift region is possible, have been obtained for an FEL without inversion (FELWI).
- We have used the framework of the dispersion equation to study coherent Smith-Purcell (SP) radiation induced by a relativistic magnetized electron beam in the absence of a resonator. We have found that the dispersion equation describing the induced SP instability is a quadratic equation for frequency; The growth rate of the instability in both cases is proportional to the square root of the electron beam current. No feedback is needed to provide the coherent emission. As an important example of the application of our obtained results in [17] the growth rate of SP FEL in the case with a rectangular grating was calculated. The calculated results are consistent with the experimental data obtained by J. Urata, M. Goldstein, M. F. Kimmitt, A. Naumov, C. Platt, and J. E. Walsh, Phys. Rev. Lett. **80**, 516 (1998).
- A possibility of channeling of low-energy relativistic positrons in some ionic crystals with axial symmetry with coaxial symmetry around

separate crystal axes of negative ions in some types of crystals, is shown. We solved the main problem of creation of nanoundulators, which have very large lifetimes and by which we can control.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Y. Zhang'.