

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Дик Алексей Владимирович

ПРОЦЕССЫ КОГЕРЕНТНОГО И НЕКОГЕРЕНТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В НОВЕЙШИХ ИСТОЧНИКАХ
МОЩНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Лаборатории электронов высоких энергий Отделения ядерной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева и Национальной Лаборатории Фраскати (LNF INFN, Италия).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор НИЯУ МИФИ, в.н.с. ФИАН
Дабагов Султан Барасбиевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
г.н.с. ФГБУ ГНЦ ИФВЭ «Курчатовский институт»
Чесноков Юрий Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор Томского политехнического университета
Пивоваров Юрий Леонидович

Ведущая организация:

Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «3» июня 2013 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 при Физическом институте им. П. Н. Лебедева по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева.

Автореферат разослан «30» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.В. Серов

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1 Актуальность темы

Поиск новых мощных источников электромагнитного излучения занимает умы исследователей с тех пор как была построена стройная теория электромагнитного взаимодействия. Источники мощного высокоэнергетического излучения являются одними из наиболее эффективных инструментов изучения материи, причем размер изучаемых объектов напрямую зависит от длины волны излучения.

В основе современных источников мощного высокоэнергетического электромагнитного излучения лежит движение легких заряженных релятивистских частиц в электромагнитных полях различной конфигурации. Одним из самых мощных источников такого излучения является синхротрон; будучи самыми интенсивными, в настоящее время эти источники получили широкое распространение в мире. Синхротронные источники излучения получили свое развитие в современных установках с периодической структурой поля, так называемых ондуляторах. По своей природе синхротронное излучение и ондуляторное излучение являются магнитотормозными, однако спектр излучения имеют совершенно различный. Главным образом это связано с траекторией частицы: в синхротроне заряд движется по круговой макроскопической орбите, в то время как в ондуляторе (стоит указать и на другую разновидность ондуляторов, вигглеры) совершает малые быстрые осцилляции, перпендикулярные направлению релятивистского движения под действием периодического магнитного поля ондулятора. В вигглере траектория напоминает больше змейку, чем просто осцилляцию пучка возле более-менее устойчивой плавной траектории, наблюдаемой в ондуляторе, т.е. принципиальное различие между ондулятором и вигглером заключается в амплитуде колебаний заряженной частицы. Амплитуда колебаний в вигглере больше, чем в ондуляторе, поэтому электромагнитное излучение частицы, движущейся в ондуляторе обладает большей степенью когерентности.

Следующим этапом развития источников мощного излучения стали лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). В основе ЛСЭ лежит вынужденное ондуляторное излучение, а принципиальная схема работы аналогична обычным лазерам. Высокая когерентность излучения пучка электронов в ЛСЭ достигается за счет разбиения пучка на более короткие банчи (микробанчи) под действием поля элек-

ромагнитной волны, заключенной между двумя зеркалами, в ондуляторе. Это приводит к увеличению структурного фактора пучка, и тем самым к увеличению вклада когерентных процессов излучения. В отличие от обычных лазеров частота, излучения которых строго фиксирована, в ЛСЭ частота регулируется энергией электронного пучка, являющегося рабочим телом ЛСЭ. Наряду с интенсивностью излучения, возможность перестраивать частоту излучения является главным преимуществом ЛСЭ перед обычными лазерами, частота излучения которых определяется частотой переходов между энергетическими уровнями электронов в атомах. Современным установкам ЛСЭ уже доступна область мягкого рентгена, однако для столь высоких энергий фотонов не существует достаточно эффективных зеркал, необходимых для создания резонаторов. По этой причине большое внимание уделяется однопроходному режиму само усиления спонтанного излучения SASE (Self Amplified Spontaneous Emission). Суть метода SASE, заключается в том, что излученная электроном в ондуляторе электромагнитная волна взаимодействует с электроном, вошедшим в ондулятор ранее, в результате чего, часть электронов немного замедляется, а другая часть немного ускоряется. Таким образом, происходит микробанчивание исходного пучка электронов на более короткие, отстоящие друг от друга на длину волны генерируемого излучения. Такая периодическая структура приводит к тому, что в интенсивность излучения микробанчей основной вклад вносят когерентные процессы, тем самым увеличивая интенсивность излучения. Увеличение интенсивности в зависимости от пройденного пучком расстояния происходит по экспоненциальному закону [1-5]. Однако, для формирования микробанчей требуется некоторое время, и процесс не является стабильным (как выяснилось образуется всего несколько первых микробанчей).

В связи с этим представляет определенный интерес возможность разбиения на микробанчи пучка электронов еще до влета в ондулятор. Одним из решений этой проблемы является использование так называемых затравочных, или параметрических, ЛСЭ [6,7]. Такое решение является недешевым, что повышает интерес к альтернативным методам решения этой проблемы. Несмотря на достигнутые успехи в получении пучков электронов с хорошим эмиттансом, необходимым для работы ЛСЭ, а именно для увеличения вклада в излучение когерентных процессов, остаются плохо изученными процессы, происходящие в момент

генерации и формирования электронных пучков в около-катодной области. В частности, изучением вопроса о формировании электронных пучков в момент генерации под действием лазера занимается эксперимент COMB, реализуемый в рамках проекта SPARC_LAB в Национальном Институте Ядерной Физики (LNF INFN, Фраскати). Понятно, что образующаяся суперпозиция падающей и отраженной от поверхности катода электромагнитных волн и постоянного ускоряющего поля будет влиять на структуру электронного пучка и приводить к его модуляции. Анализ когерентного движения пучка электронов в таком поле показывает, что при определенном соотношении параметров полей возможно образование каналов [8], представляющих собой эффективные периодические потенциалы, способные захватывать (удерживать в связанном состоянии) электроны. посредством таких каналов можно управлять пучками захваченных электронов. Одно из самых примечательных свойств таких каналов заключается в возможности изменения глубины потенциальных ям, а также создания каналов различной геометрии. Заметим также, что взаимодействие пучка заряженных частиц в таком поле свободно от многократного рассеяния.

Еще одним интересным направлением получения излучения высокой энергии и интенсивности, а также компактных модулированных пучков электронов, являются процессы взаимодействия мощных ультра-коротких лазерных импульсов с плазмой. Одна из особенностей таких взаимодействий заключается в том, что за счет большого градиента поля лазерного импульса электроны плазмы могут ускоряться до ультрарелятивистских энергий на очень малых расстояниях. При таком взаимодействии за лазерным импульсом образуется полость, свободная от плазменных электронов и способная захватывать ускоренные лазерным импульсом электроны, образуя тем самым плотный пучок релятивистских электронов [9-12]. Интересно отметить, что в таком ионном канале захваченные электроны будут еще и ускоряться под действием поля ионной полости. Изучению процессов протекающих в плазме при взаимодействии мощных ультракоротких импульсов с плазмой посвящен эксперимент PLASMONX, также проводимый в рамках проекта SPARC_LAB [13]. Важно, что при определенной температуре захватываемого пучка электронов происходит модуляция пучка по плотности в фазовом пространстве, что будет влиять на процессы когерентного и некогерентного излучения захватываемого пучка.

1.2 Цель работы

Целью настоящей диссертации являлось с единых позиций в рамках феноменологии физики каналирования проведение теоретического исследования процессов, происходящих с пучком электронов в момент их генерации под действием лазера в фотоинжекторе, на примере установки SPARC, для определения возможности формирования модулированных в пространстве пучков электронов непосредственно в момент их генерации, процесса образования потенциальных каналов при когерентном движении ультрарелятивистских пучков электронов в поле скрещенных электромагнитных волн, способных удерживать пучки, а также проведение исследования когерентных и некогерентных процессов, протекающих с пучком электронов, захваченных ионной полостью (каналированных в ионно-плазменном канале), образованной мощным ультракоротким лазерным импульсом. Поставлены следующие задачи:

1. Изучить возможность формирования модулированного пучка электронов непосредственно в момент генерации электронного пучка под действием поля лазера в ВЧ пушке фотоинжектора установки SPARC. Найти спектральное распределение электромагнитного излучения пучка электронов в момент генерации.
2. Развить теорию захвата электрона полем электромагнитной волны, распространяющейся в планарном и круглом волноводе, каналирование электронов в лазерных волноводах, и рассмотреть возможность управления пучками электронов полем сформированных каналов.
3. Определить пределы применимости классической физики при описании процесса движения электрона в ионно-плазменном канале, образованном мощным ультракоротким лазерным импульсом. Рассмотреть кинетику процессов, происходящих с пучком электронов в ионном канале.

1.3 Научная новизна результатов

1. Рассмотрена динамика и излучение пучка фотоэлектронов в поле скрещенных лазерных волн и постоянном электрическом поле, впервые показана возможность модуляции электронного пучка в момент его генерации, определены условия микробанчевания и модуляции пучка.

2. Развита теория каналирования пучка электронов в каналах, образованных лазерной волной, распространяющейся в планарном и цилиндрическом волноводах. Впервые рассчитаны потенциалы каналов, образованных скрещенными лазерными волнами.
3. Впервые определен предел классического описания движения электрона в ионно-плазменном канале, образованном мощным ультракоротким лазерным импульсом. Найдена аналитическая функция распределения пучка электронов в ионном канале в пределе невзаимодействующих между собой электронов.
4. Обобщен метод Капицы, описывающий движение частицы в быстро осциллирующем поле, на случай ультрарелятивистских частиц, движущихся в поле скрещенных электромагнитных волн.

1.4 Научно-практическая значимость работы

Результаты, полученные в диссертации, используются для подготовки и проведения экспериментов COMB и PLASMONX в Национальной Лаборатории Фраскати (LNF INFN) по микробанчеванию и модуляции электронного пучка. Полученные результаты по каналированию пучков в поле стоячей лазерной волны представляют интерес для управления пучками частиц.

1.5 Положения, выносимые на защиту

1. Пучок электронов в околочатодной области фотоинжектора под воздействием поля выбивающего электроны лазера модулируется, приводя к изменению спектра излучения ускоряемых электронов в непосредственной близости от поверхности фотоинжектора из-за вклада когерентного излучения, что может быть использовано для диагностики пучка электронов.
2. Стоячие электромагнитные волны, образованные скрещенными лазерными полями, могут формировать устойчивые каналы, сравнимые с усредненными плоскостными (осевыми) каналами в кристаллах, которые способны не только модулировать пучок, но и затягивать их в потенциальные ямы каналов. Канализованные таким образом электроны могут быть эффективно отклонены на значительные углы с подавлением некогерентного рассеяния, что свидетельствует о возможности использования нового эффекта для управления пучками.

3. В результате кинетического описания процессов, протекающих с пучком электронов, захваченных полем ионного канала, образованного мощным ультракоротким лазерным импульсом, предложена теория каналирования релятивистского электрона в ионном плазменном канале и когерентного излучения каналированного в ионно-плазменном канале электрона в классическом и квантовом приближениях.

1.6 Достоверность научных результатов и выводов

Достоверность сформулированных в диссертации положений и выводов подтверждается согласием полученных результатов с опубликованными данными других авторов (в предельных случаях), а также согласием с численным анализом и численными моделями, построенными с использованием системы MATLAB и кода KARAT [14].

1.7 Личный вклад соискателя

В работах, выполненных в соавторстве, соискателем лично проделаны все аналитические расчеты, основные результаты получены лично автором. Соискатель принимал активное участие в численном анализе и построении численных моделей для компьютерного моделирования, а также в обсуждении результатов работы и их представлении на семинарах и конференциях, в подготовке публикаций.

1.8 Апробация работы

Результаты работы обсуждались на семинарах LNF INFN и ФИАН, а также докладывались на следующих конференциях:

1. The VIII International Symposium "Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures", Zvenigorod (Moscow region), Russia, September 7-11, 2009.
2. "Channeling 2010" - 4th International Conference on "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena", Ferrara, Italy, October 3 - 8, 2010.
3. "Channeling 2012" - 5th International Conference on "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena", Alghero, Italy, September 23-28, 2012.

1.9 Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 7 работах, список которых приведен в конце автореферата. Из них 5 статей в реферируемых журналах, 2 препринта ФИАН.

1.10 Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 112 страниц, включая список использованной литературы и приложение. Диссертация содержит 35 рисунков. Список литературы включает 119 наименований.

2 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели работы, указана новизна результатов, приведена структура и содержание диссертации, перечислены защищаемые положения.

В **главе 1** описаны основные принципы работы новейших источников мощного электромагнитного излучения таких, как ондуляторы, вигглеры, лазеры на свободных электронах ЛСЭ. Приведены основные направления решения задачи о генерации мощного электромагнитного излучения ЛСЭ за счет доминирования когерентных процессов. Описаны особенности излучения каналированных электронов и позитронов в кристаллах.

В **главе 2** проведен анализ процессов генерации пучка электронов за счет фотоэффекта под действием поля лазера. Показаны основные явления, сопровождающие процесс формирования пучка электронов, влияющие на его эмиттанс. Распределение электронов в плоскости, параллельной плоскости катода, определяется распределением интенсивности лазера в поперечном к направлению распространения лазерного импульса сечении, а распределение электронов в перпендикулярном к плоскости катода направлении зависит от длительности лазерного импульса и распределения по импульсам фотоэлектронов. В рамках классической физики проведен анализ движения электронов вблизи поверхности фотокатода под действием падающего и отраженного полей лазера, в частности, напряженностью $E_0 = 190$ МВ/м, и постоянного ускоряющего поля $E = 120$ МВ/м. Задача решалась с использованием метода, предложенного впервые Капицей для описания движения частицы в быстро осциллирующем поле, согласно

которому траектория движение частицы представляется в виде суммы плавно меняющейся со временем x_i и быстро осциллирующей ξ_i функций. Быстрые осцилляции имеют размерность $\xi_i \sim 0,1 \text{ \AA}$ и на траекторию электрона в целом влияния не оказывает. Анализ плавного движения тоже не дал ожидаемых результатов, действие постоянного ускоряющего поля на семь порядков превосходит действие лазерного поля. Тем не менее модуляция электронного пучка происходит, и за модуляцию ответственна постоянная дрейфовая скорость. Построена численная модель генерируемого электронного пучка в системе MATLAB (рис. 1). Так как эксперимент СОВБ направлен не только на решение задачи модуляции электронного пучка в момент его генерации, но и на диагностику генерируемых пучков, в рамках классической электродинамики посчитан спектр излучения одного электрона, а так же особенность спектра всего генерируемого пучка в целом, что необходимо для диагностики пучка.

В главе 3 показано, что при определенных соотношениях между амплитудами поля падающей и отраженной электромагнитных волн и постоянного ускоряющего поля образуются периодические стационарные каналы стоячей лазерной волны. Эффективная потенциальная энергия, описывающая эти каналы имеет вид (ось Oz направлена перпендикулярно катоду):

$$U_{\text{eff}} = -eEz + \frac{(eE_0)^2}{m\omega_0^2} \sin^2 \theta \cos(2kz \cos \theta),$$

где θ, ω_0, k, z - угол падения лазера на катод, частота и волновой вектор лазерной волны, координата, соответственно. Необходимое условие захвата электрона полем канала (условие каналирования) определяется параметром

$$\alpha = \frac{eE_0^2 k \cos \theta}{Em\omega_0^2} \sin^2 \theta > 1$$

Глубина каждого канала

$$\Delta U = \frac{e^2 E_0^2 \sin^2 \theta}{2m\omega_0^2 \alpha} \left[2 \left(\arcsin(\alpha^{-1}) + \sqrt{\alpha^2 - 1} \right) - \pi \right], \alpha \geq 1$$

может достигать значений $\Delta U \sim 10^2 \text{ эВ}$, сравнимых с усредненными потенциалами плоскостей и осей в кристаллах (каналирование заряженных частиц в кристаллах). Найдено условие захвата электрона каналом в случае взаимодействия

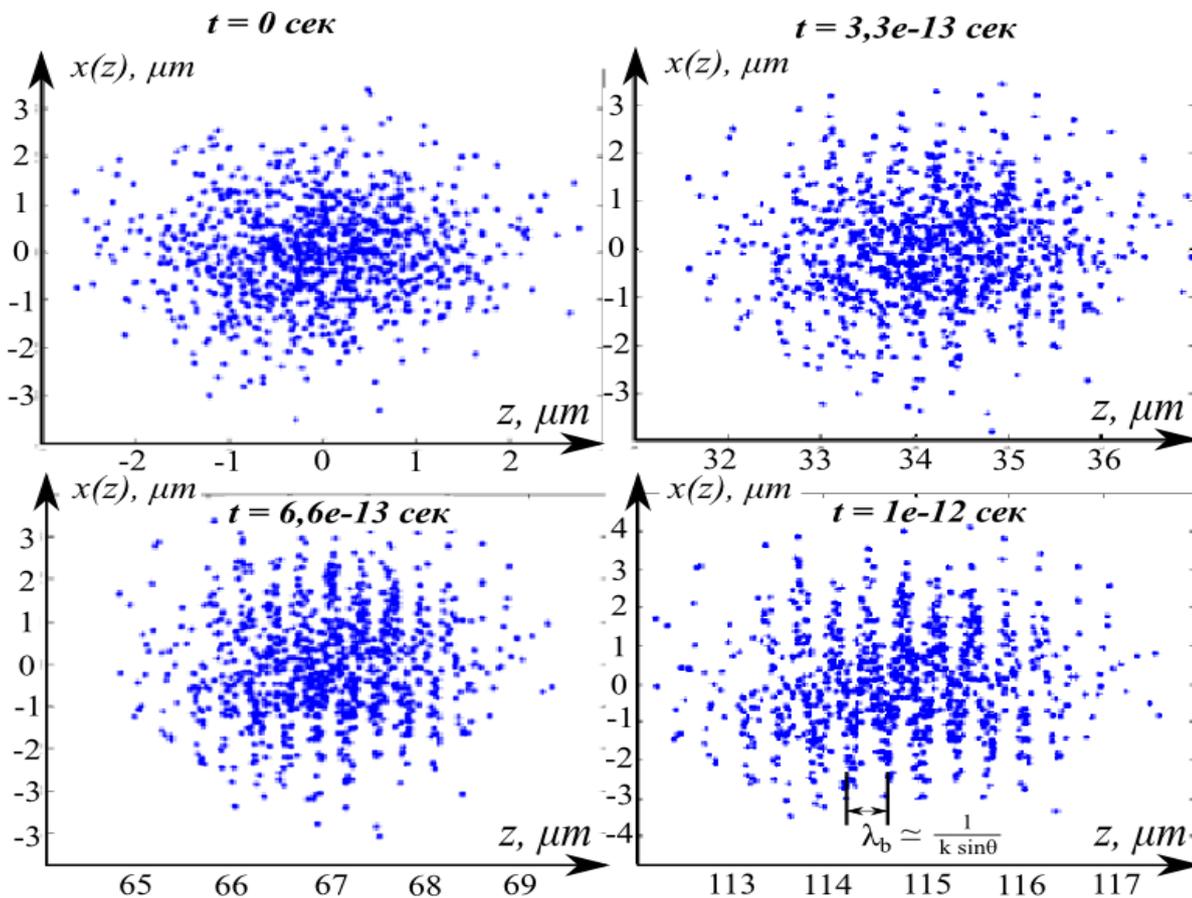


Рис. 1. Распределение электронов в плоскости поляризации лазерного импульса в различные моменты времени

электронов между собой и дополнительным внешним плавно меняющимся со временем полем (рис. 2). На основе анализа процесса образования каналов при движении не-релятивистского электрона развит математический формализм, описывающий движение ультрарелятивистского электрона в поле скрещенных электромагнитных волн. Показано, что при движении ультрарелятивистского электрона в поле распространяющейся электромагнитной волны внутри волновода (капилляра) образуются эффективные потенциальные ямы (каналы). Так, например, в случае цилиндрического волновода эффективный поперечный потенциал имеет вид:

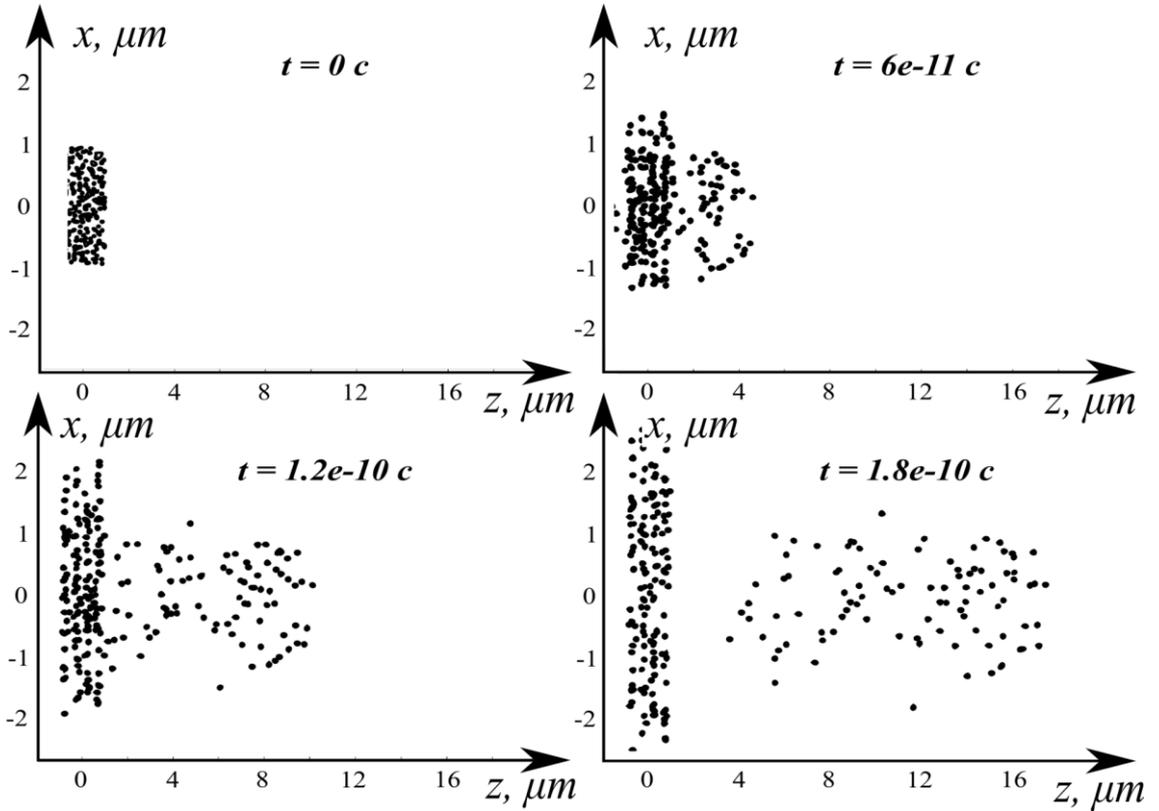


Рис. 2. Результаты численного моделирования пучка электронов в поле скрещенных лазерных волн и постоянном ускоряющем поле. Из результатов моделирования видно, что часть электронов рассеялась суммарным полем, а часть была захвачена полем каналов.

$$U_{\perp}^{eff}(\rho) = \frac{e^2 u_0^2 (\omega_0 k_z - v_0 k^2)^2}{4c^2 \gamma m k_{\perp}^2 (\omega_0 - k_z v_0)^2} J_1^2(k_{\perp} \rho),$$

где $v_0, \gamma, u_0, k, k_z, k_{\perp}, \rho$ - начальная скорость электрона, Лоренц-фактор электрона, амплитуда векторного потенциала электромагнитной волны, волновой вектор, продольная по отношению к оси канала составляющая волнового вектора, поперечная составляющая волнового вектора, расстояние от оси канала, соответственно. Также определен предельный угол захвата свободного электрона таким каналом, критический угол каналирования (подобно критическому углу Линдхарда в кристаллах). С помощью таких каналов можно управлять структурным фактором релятивистских пучков электронов, изменяя геометрию каналов.

В главе 4 рассмотрена задача о движении и излучении электрона в ионном плазменном канале, образованном мощным ультракоротким лазерным импульсом. Показано, что форма спектра излучения электрона в направлении релятивистского движения практически не зависит от начальных условий влета электрона.

трона в канал. Электрон является квантовой частицей, поэтому важен вопрос о применимости классического описания движения электрона в ионном канале. В результате рассмотрения электрона в приближении скалярной частицы получен предел применимости классического описания движения и излучения электрона. Ширина низколежащих энергетических уровней в приближении параболического потенциала, применение которого вполне оправдано, имеет вид:

$$\Delta E_n \sim \frac{e^2 \omega_0 \gamma_{\parallel}^2}{c} \left(\frac{\hbar \omega_0 \gamma_{\parallel} n^2}{mc^2} \right)^n, \quad \gamma_{\parallel} = \frac{E_{\parallel}}{mc^2},$$

где $\omega_0, E_{\parallel}, n$ - частота поперечных по отношению к оси канала колебаний, продольная энергия и номер уровня, соответственно. Анализ ширин энергетических уровней позволил определить уровни, начиная с которых, электрон можно рассматривать как классическую частицу. В приближении параболического потенциала в канале формируется огромное количество уровней (порядка 10^9), что еще раз подтверждает, что рассматриваемая задача является классической. Так как в канал непрерывно захватываются электроны, то интересен вопрос, связанный

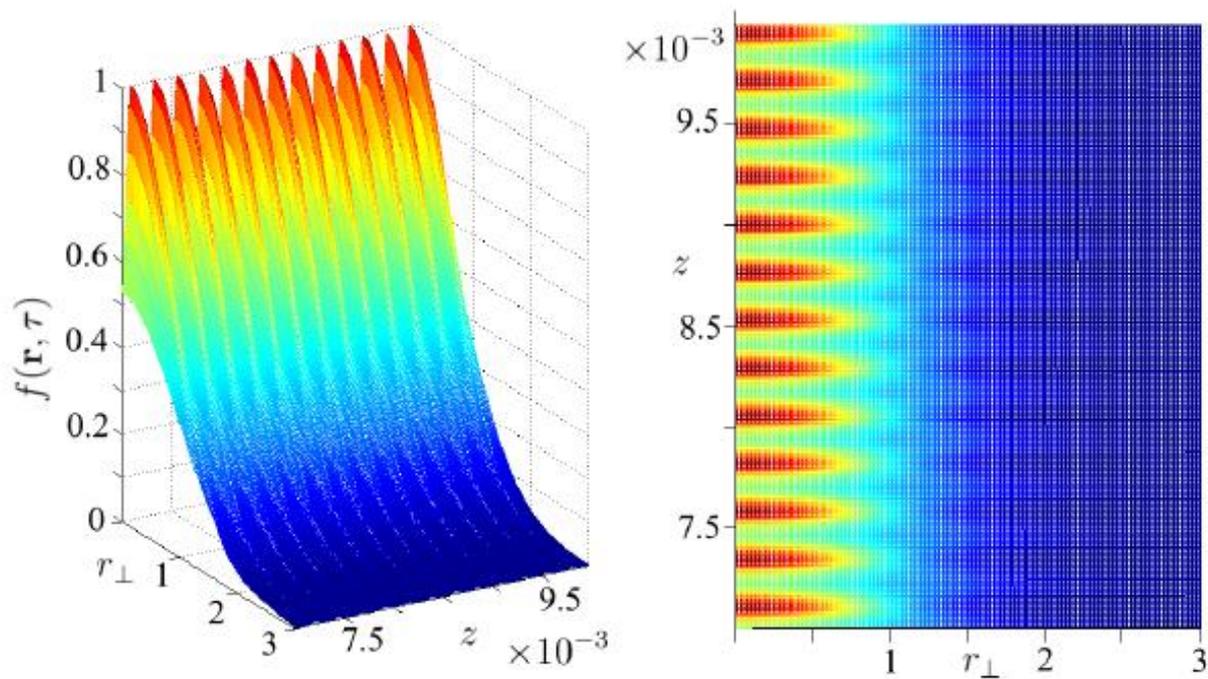


Рис. 3. Безразмерная функция распределения электронов в пространстве в момент времени $\tau=10$ пкс. Скорость ионной полости $v_0 \approx c$, а начальная температура $T=10^3 E_p$ (E_p - продольная энергия электронов).

с излучением всего пучка. Понятно, что когерентные и некогерентные процессы излучения будут определяться пространственным распределением пучка. Поэтому была найдена функция распределения пучка захватываемых каналом невзаимодействующих между собой электронов в фазовом пространстве. Показано, что при определенных условиях возможна модуляция каналированного электронного пучка (см. рис.3). Показана возможность учета взаимодействия электронов между собой в рамках теории возмущений.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

3 ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показано, что в околоскатодной области фотоинжектора SPARC происходит модуляция электронного пучка, и впервые определены условия, при которых модуляция может перейти в микробанчевание.
2. Найдена функция спектрального распределения излучения в околоскатодной области инжектора установки SPARC.
3. Исследована задача об образовании каналов при движении электрона в скрещенных электромагнитных полях и в поле электромагнитной волны, распространяющейся в планарном и цилиндрическом волноводах; определено условие захвата электрона такими каналами (условие каналирования в поле стоячей волны).
4. Впервые на основе формализма каналирования рассмотрена задача о движении и излучении классического и квантового (в приближении скалярной частицы) электрона в ионно-плазменном канале, образованном мощным ультракоротким лазерным импульсом. Определена граница применимости классического описания движения электрона в ионно-плазменном канале.
5. Найдена функция распределения в фазовом пространстве невзаимодействующих между собой электронов, каналированных в ионно-плазменном канале. Показано, что при определенных температурах (поперечных энергиях) возможна модуляция пучка.

4 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.Г. Бессонов, А.В. Виноградов // УФН. 1989. Т. 159. с. 143.
2. L.R. Elias et al. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57. p. 424.

3. L.H. Yu et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 91. p. 074801-1.
4. А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев // *Квантовая электроника.* 1978. Т. 5. с. 1543.
5. V.A. Buts, A.N. Lebedev, V.I. Kurilko // *The Theory of Coherent Radiation by Intense Electron Beams.* Springer. 2006. 259 с.
6. Е.Г. Бессонов // *Препринт ФИАН.* 1985. №195. 23 с.
7. В.И. Алексеев, Е.Г. Бессонов, А.В. Серов // *Препринт ФИАН.* 1988. №29. 15 с.
8. A.V. Andreev, S.A. Akhmanov // *Sov. Phys. JETP.* 1991. V. 72. p. 930
9. А. Пухов, С. Киселев, И. Костюков // *Прикладная физика.* 2006. № 6. с. 35
10. L.M. Chen et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. p. 045004.
11. V. Malka et al. // *Nature.* 2004. V. 431. p. 541.
12. T. Hosokai et al. // *Phys. Rev. E.* 2006. V. 73. p. 036407.
13. L. Serafini // *Stato dei Progetti Speciali SPARC/SPARCX e NTA-PLASMONX.* 2008. INFN/Milano.
14. V. Tarakanov // *Users Manual for Code KARAT.* 1992. Berkley Research Associates.

5 СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. A.S. Podlesnaya, A.V. Dik, S.B. Dabagov, M. Ferrario // *Spectral Distribution of SPARC Photoinjector electrons // Nuovo Cimento,* 2011, V. 34C, p. 359.
2. A.S. Podlesnaya, A.V. Dik, S.B. Dabagov, M. Ferrario // *On electron beam motion near the SPARC photoinjector cathode // Journal of Physics: CS,* 2010, V. 236, p. 012035.
3. А.В. Дик, С.Б. Дабагов // *Функция распределения электронов захваченных ионным каналом // Известия ВУЗов. Физика,* 2012, №12, с. 77.
4. А.В. Дик, С.Б. Дабагов // *Функция распределения электронов в ионном канале", Препринт ФИАН,* 2012, №7, 15 с.
5. А.В. Дик, Е.Н. Фролов, С.Б. Дабагов // *Каналирование свободного электрона в поле лазерной волны // Препринт ФИАН,* 2012, №15, 16 с.
6. A.V. Dik, A.Z. Ligidov, S.B. Dabagov // *Radiation by electrons channeled in a plasma-ion cavity // Nuclear Instruments and Methods, Section B,* 2013, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.03.04> (принято в печать).

7. A.V. Dik, E.N. Frolov, S.B. Dabagov // Dynamics of electrons acceleration in presents of crossed laser field // Nuclear Instruments and Methods, Section B, 2013, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.03.17> (принято в печать).