

На правах рукописи

ГОРБУНОВ Михаил Анатольевич

**Некоторые свойства частично когерентного
электромагнитного излучения электронного
пучка**

Специальность:

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва 2011 г.

Работа выполнена в «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель чл.-корр. РАН д.ф.-м. н., профессор
Лебедев Андрей Николаевич

Официальные оппоненты:
д.ф.-м.н., профессор Рухадзе Анри Амвросиевич
д.ф.-м.н. Серов Александр Васильевич

Ведущая организация НИЦ «Курчатовский Институт»


Защита состоится “14” марта 2012г. в 14:30
На заседании диссертационного совета Д 212.130.01 при НИЯУ
МИФИ
по адресу: г. Москва, Каширское ш. 31, тел. 323-95-26, в конференц-
зале К-608

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации

Автореферат разослан “01” февраля 2012г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

 И.С. Щедрин

ЦЕЛЬЮ работы является теоретическое исследование процессов индуцированного возникновения когерентности излучения, действующих на фоне спонтанных радиационных потерь; поиск принципиальных ограничений классической концепции индуцированного излучения, важных с практической и физической точки зрения, развитие математической модели пучка релятивистских частиц учитывающей динамику процессов корреляции фаз отдельных излучателей, расчёт оптимальных условий возникновения когерентности излучения и исследование его спектрально-углового состава. Всё это в первую очередь будет относиться к излучению коротковолнового диапазона и пучков малой плотности, когда на длину волны приходится мало частиц.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Физическое обоснование понятия частично когерентного излучения системы частиц.
2. Влияние радиационного трения на процесс индуцированного формирования когерентно излучающих сгустков.
3. Оценка эффективного числа частиц, принимающих участие в формировании спектрально-угловой компоненты когерентного излучения.
4. Определение полезного когерентного излучения связанного с угловой направленностью последнего.
5. Применение излучения боковых лепестков диаграммы направленности в качестве независимых источников коротковолнового излучения для разных экспериментов на одном пучке.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

- Впервые учтено и оценено влияние радиационных потерь на развитие индуцированных эффектов. Показана как положительная сторона этого эффекта, связанная с более быстрым развитием процесса группировки частиц, так и ограничивающее воздействие диссипации энергии, определяющее минимальный уровень сигнала, индуцирующего упорядоченное положение частиц в пучке.
- Исследована математическая модель пучка релятивистских частиц малой плотности, учитывающая корреляцию фаз элементарных излучателей на различных этапах развития индуцированного процесса.
- Представлены зависимости результирующей спектрально-угловой плотности излучения для пучков с различной плотностью излучателей, в том числе и в предельных случаях, когда на длину волны приходится меньше одной частицы.
- На основании этих результатов, предпринята попытка определить минимальное пороговое значение плотности пучка, при котором система теряет свою оптическую активность для развития индуцированных эффектов. Полученные результаты позволяют оценить перспективность развития индуцированных процессов для ультрарелятивистских генераторов, работающих в режиме SASE.
- Рассмотрены некоторые возможности адаптации ускорителей старших поколений для создания на их базе эффективных источников синхротронного излучения.

ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОБОСНОВАННОСТЬ полученных в диссертации результатов теоретического исследования обеспечивается

использованием апробированных методов математической физики, аналитической формой большинства конечных и промежуточных результатов, позволивших осуществить предельные переходы к надёжным хорошо известным результатам, полученным в более ранних исследованиях, кроме того, приведённые в диссертации результаты не противоречат данным, полученным экспериментально на действующих установках.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ работы определяется направленностью проведённых теоретических исследований на решение практически значимых задач:

- Получены оценки рамок применимости классической теории индуцированного излучения. В частности снято представление об индуцированных процессах как о беспороговых и протекающих между частицами вне зависимости от их пространственной удалённости.
- Получены спектрально-угловые характеристики частично когерентного излучения, т.е. излучения частично коррелированного пучка. Такая ситуация более реалистична с точки зрения реального распределения в пучке, а следовательно более значима с практической точки зрения.
- Оценена возможность адаптации ускорителей старших поколений, изначально предназначенных, для работы в физике высоких энергий для использования в качестве эффективных синхротронных источников. Размещение нескольких экспериментов на одном рабочем пучке позволяет повысить эффективность работы установки и адаптировать её к современным требованиям.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Промежуточные результаты представленной работы докладывались на следующих конференциях: On limits of induced radiation concept in FELs, VII International scientific workshop to the memory of Prof. V.P.Sarantsev, 2007; О концепции индуцированного излучения в ЛСЭ, XX International Workshop on Charged Particle Accelerators, 2007; О концепции индуцированного излучения в ЛСЭ, Научная сессия МИФИ-2008; Частичная когерентность излучения электронного сгустка, RuPAC-2008; Об одной возможности модификации источников синхротронного излучения, VII International scientific workshop to the memory of Prof. V.P.Sarantsev, 2009.

ПУБЛИКАЦИИ. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 4 статьях журналов рецензируемых ВАК. В Журнале Прикладной Физики: О концепции индуцированного излучения в пучковых системах, 2008, №5, с.5-9; Частичная когерентность излучения электронного сгустка, 2009, №4, с.37-41. В журнале «Краткие сообщения по физике»: О пределах когерентности излучения электронных пучков. ФИАН, 2012, Том 39, №1, с. 26-33. Перевод на английский язык: Bulletin of the Lebedev Physics Institute, vol. 39, no. 1, p. 16-20. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2010, Vol. 7, No. 7, pp. 498–501 On the Possibility of Synchrotron Radiation Source Modification.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Совершенно очевиден тот факт, что потребность в источниках коротковолнового излучения непрерывно растёт, пусть даже как инструмент нано-техники. Несмотря на очевидные успехи в области развития техники квантовых источников излучения, на сегодняшний

день, самыми перспективными генераторами являются приборы пучковой электроники, т.к. им доступны ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение. Давно и широко используемая рентгеновская трубка также является пучковым прибором, однако наибольший интерес вызывают методы генерации электромагнитного излучения использующие эффект когерентности индивидуальных излучателей в рабочем пучке. Когерентное излучение становится возможным благодаря развитию индуцированных процессов организации индивидуальных источников излучения в квазипериодические структуры под влиянием внешнего воздействия (ЛСЭ) так и без явного присутствия такового (SASE).

Исходя из принципиальной важности когерентных эффектов в процессе формирования излучения коллектива частиц, отойдём от классически рассматриваемых в большинстве курсов электротехники частных случаев полного отсутствия данного эффекта или, напротив, абсолютной когерентности и примем, что любая конкретная система индивидуальных излучателей когерентна, но лишь в некоторой степени.

Итак, пучковая излучающая система состоит из набора излучателей, так или иначе распределённых в пространстве. Мгновенная картина любого заданного распределения при любом механизме излучения даст результирующее поле отличное от суммы всех полей в случайной фазе, т.е. будет присутствовать интерференция излучателей и отклонение мощности излучения от его среднего значения.

Исследование радиационных свойств пучковых систем с различной степенью плотности и упорядоченности излучателей полезно для общефизического понимания процессов формирования излучения и для расчёта прикладных задач. В этой связи возникает ряд вопросов:

- Для пучков с высокой плотностью зарядов нужно исследование предельного перехода к режиму постоянного тока. Действительно, спонтанное излучение происходит из-за флуктуаций плотности тока, а постоянный однородный ток, как известно, не излучает.
- До какой степени сохраняется когерентность излучения для пучков имеющих системное и флуктуационное изменение плотности тока. И позволяют ли его спектрально-угловые свойства использовать когерентно сформированное излучение в прикладных целях.
- Насколько справедливо представление об интенсивности $\sim N^2$ для сгустка, размеры которого малы по сравнению с длиной волны.
- В применении к коротковолновым ЛСЭ – какова минимально возможная длина волны их излучения (отвлекаясь от технических трудностей), т.е. где лежит предел классической теории индуцированного излучения.
- В более практическом смысле – каково спектрально-угловое распределение излучения сформированных сгустков в ондуляторном радиаторе, служащим, например, вторым каскадом мощного ЛСЭ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются цели диссертации, обосновывается актуальность её тематики, научная новизна и практическая ценность. Проведён краткий обзор результатов научных исследований и

технологических разработок в области когерентного излучения приборов пучковой электроники.

В первой главе для рассмотрения части из выше поставленных вопросов рассмотрена максимально упрощенная модель, основным требованием к которой является возможность исследования когерентных эффектов. В качестве такой модели взята одномерная цепочка из N излучателей. Далее условимся что, излучатели расположены в среднем на одинаковых расстояниях Δ друг от друга с заданной степенью неопределённости пространственного положения, распределённой по нормальному закону с дисперсией σ , и движущихся вдоль оси x с некоторой скоростью βc . Другими словами, сосредоточимся на влиянии фазовых смещений излучателей, полагая что в целом плотность тока пучка есть величина постоянная. Причину обуславливающую излучение не конкретизируем, так как это может быть как ондуляторное так и черенковское излучение или другой механизм. Варьируя расстояние между частицами, такая модель позволяет анализировать спектрально-угловой состав излучения при различных степенях разреженности излучателей (вплоть до физически важного соотношения – одна частица на длине волны излучения). Кроме того, свободный выбор фактора упорядоченности частиц (неопределённость положения σ) позволяет проследить эволюцию изменения спектрально-угловых характеристик как в предельных случаях полной упорядоченности и абсолютно случайного распределения, так и любого промежуточного значения, более важного с практической точки зрения. Также сразу оговоримся, что рассмотренные рассуждения будут относиться к одной конкретной моде (ω, \mathbf{k}) .

Для описания когерентных эффектов удобно ввести понятие коэффициента когерентности, который показывает, насколько мощность излучения отдельной частицы отличается от её излучения в коллективе N частиц. Для нашей постановки задачи коэффициент когерентности задаётся выражением:

$$C = 1 + A^2 \left(\frac{1}{N} \frac{\sin^2 \alpha / 2}{\sin^2 \alpha / 2N} - 1 \right),$$

где $A = \exp(-\delta^2/4)$, переменной α обозначено произведение μN , имеющее смысл фазовой длины пучка. Заметим что выражение в скобках – это когерентная добавка или вычет к некогерентному излучению, т.е. к единице. Это говорит о том что индивидуальная частица даже в коллективе испытывает тот же энергообмен как если бы она излучала будучи в системе единственной, но с учетом поглощения излучения других частиц. Когерентность – эффект коллективного изменения результирующего поля, об этом свидетельствует тот факт что при $N=1$ коэффициент когерентности равен единице. Излучение многих частиц также может быть полностью некогерентным, если их положение абсолютно не коррелировано. Когерентная поправка умножена на размывающий фактор A , который всегда уменьшает интересующий нас эффект, но полностью разрушающий его только в предельном случае $A=0$.

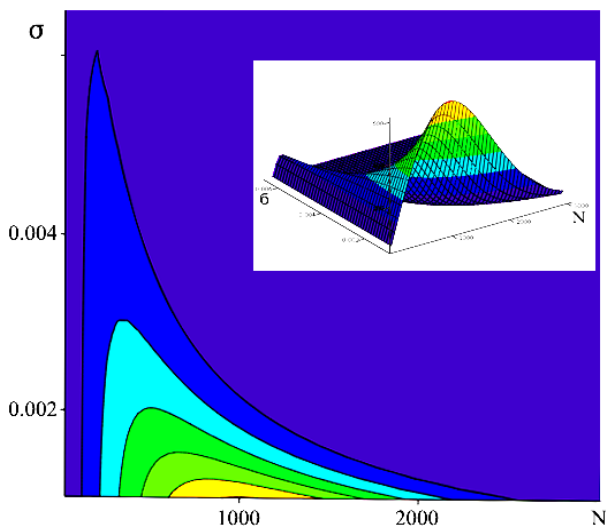


Рис. 1. Фактор когерентности при $\alpha \ll 1$.

Если среднее расстояние между частицами Δ много меньше длины волны ($\alpha \ll 1$), что соответствует плотному пучку, то когерентность максимальна (1): система излучает как одна частица увеличенного заряда. Однако это увеличение ограничено “размывающим” фактором и в наиболее интересном случае $\sigma/\Delta \ll 1$ достигает максимального значения $\Delta/\sigma e^{-1/2}$ при $N \approx \Delta/\sigma$.

$$C = 1 + (N - 1) \cdot \exp\left(-\frac{\sigma^2 N^2}{2\Delta^2}\right). \quad (1)$$

Увеличение числа частиц внутри пучка может полностью разрушить когерентность, если среднее расстояние между частицами становится меньше чем неопределённость их положения.

Для некоторых приложений пучковой техники значимой может оказаться оценка когерентных эффектов в случаях малой плотности частиц на длине волны излучения, т.е. случай $a \geq 1$. Для больших a излучение имеет когерентные минимумы и максимумы $\sim N$ с шириной порядка N^{-1} , т.к. интерференционная часть коэффициента когерентности проявляется, прежде всего, в направлениях с углами, для которых справедливо целочисленное значение отношения $\pi a/N$. Физически это соответствует случаю целого числа длин волн вдоль сгустка, под заданным углом наблюдения. Эти максимумы также ограничены размывающим фактором.

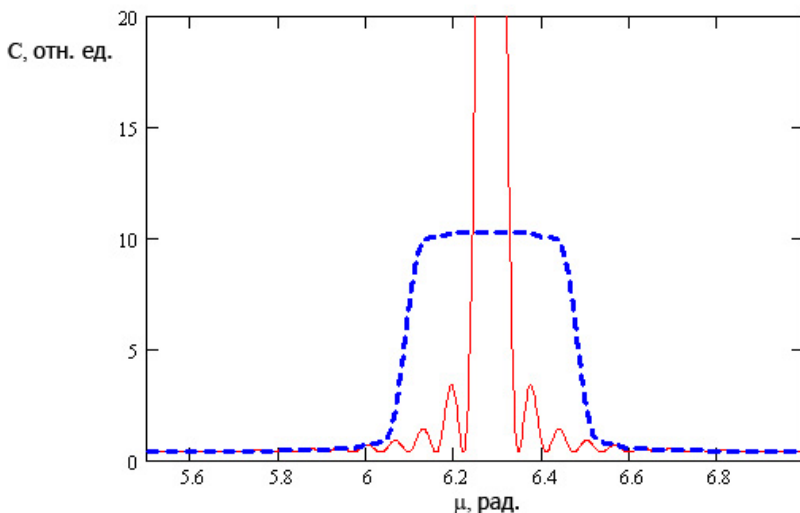


Рис. 2. Когерентность (пунктир), усредненная по разбросу фазовых расстояний между частицами ($\Delta\mu = \pi/8$).

Случай больших a соответствует ограничению когерентности для излучателей находящихся на больших расстояниях (много длин волн)

друг от друга. Формально когерентность в таком случае не исчезает, но из-за непредсказуемости углового распределения интерференционных максимумов использование такого режима как для поддержания индуцированных эффектов в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ), так и для результирующего излучения весьма проблематично. В данном случае индуцированный механизм предполагается рабочим, но ставит под сомнение возможность его развития из-за углового распределения излучения.

Следующий комментарий должен быть сделан относительно неожиданной формальной потери интерференционной картины от стянутого в точку пучка из N частиц, которые должны излучать в N^2 раз больше, чем одна частица, сохраняя спектрально-угловые характеристики некогерентного излучения. Действительно, даже не зная конкретного положения частиц (случай $\sigma \approx 1$), можно утверждать что “размывающий” фактор $A=1$, если $\lambda \geq l$. Тогда из рассмотренной модели следует, что вся система из N частиц излучает как одна частица увеличенного заряда и результирующее излучение $\sim N^2$.

Для очень плотных пучков в λ -объёме может оказаться так много частиц, что частота плазменных колебаний будет сравнима с частотой электромагнитного излучения. Ленгмюровская частота в собственной системе отсчёта: $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m_e}$, где n_e – концентрация электронов, e и m_e – заряд и масса электрона соответственно. Следовательно, представление о формировании когерентного излучения как результата интерференции электромагнитного излучения невзаимодействующих частиц может оказаться не совсем правильным в плотных пучках, где внутренние степени свободы оказывают существенное влияние на

динамику частиц. Определим критерий применимости модели несвязанных частиц соотношением $\omega_p < \omega_r$, где под ω_r подразумевается частота электромагнитного излучения системы частиц. Тогда, принимая во внимание, что число частиц в сгустке является релятивистским инвариантом, получаем в лабораторной системе условие $\sqrt{\frac{N\gamma_0}{\lambda^3}} < \frac{\pi}{\lambda}$.

Здесь в качестве объёма, содержащего N частиц, выбран цилиндр с сечением $\pi\lambda^2$ и продольным размером λ/γ , последнее учитывает сокращение продольных размеров системы при переходе из собственной системы отсчёта в лабораторную. Тогда критерий, ограничивающий число частиц, излучающих когерентно в традиционном смысле, описывается соотношением $N < \pi^2 \lambda/\gamma r_0$, где r_0 – класс. радиус электрона ($\sim 3,6 \cdot 10^{-13}$ см). Нарушение этого условия физически означает разрушение сгустка за время, меньшее периода волны.

Уменьшение степени когерентности происходит не только из-за случайных флуктуаций плотности, но и из-за систематического её изменения, так или иначе связанного с изменением среднего расстояния между частицами.

Для анализа влияния профилирования тока частиц примем распределение последних в параболическом виде, т.е. расстояние между частицами пучка положим медленно нарастающим с номером частицы. Из результата вычисления дифракционных сумм видно, что в пике когерентности значение суммы остаётся конечным даже при принятом бесконечном числе частиц.

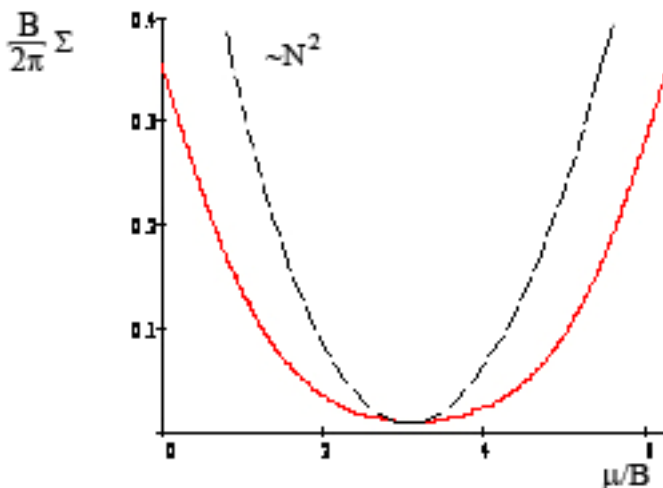


Рис. 3. Фактор когерентности при профилированной плотности пучка.

За оценку эффективного числа частиц, излучающих когерентно, примем количество излучателей, формирующих характерные когерентные пики. Для когерентного излучения с равномерным распределением максимумы коэффициента когерентности (на одну частицу) равны числу частиц пучка. Если следовать этому определению, то количество частиц, эффективно излучающих когерентно, с поправкой, разумеется, на уровень спонтанного (некогерентного) излучения равно примерно $N_{\text{эф}} = 0,7N/L^{1/2}$.

Определение качественной границы между когерентным и некогерентным излучением системы частиц допускает еще один подход, основанный на прямом сравнении их мощности на интересующей нас частоте. Действительно, выше уже упоминалось, что абсолютно некогерентное излучение, свойственное случайно неоднородным системам и совпадающее по своим спектрально-угловым

характеристикам с излучением индивидуальной частицы, обусловлено лишь случайными флуктуациями плотности, т.е. случайной кластеризацией распределения. С этой точки зрения оно должно быть подвержено флуктуациям мощности, связанным со стохастической природой кластеров. В то же время когерентное излучение, обусловленное структуризацией распределения, должно быть свободно от флуктуаций мощности. Этот переход можно проследить, вычисляя непосредственно флуктуации мощности (т.е. разницу между ее средним квадратом и квадратом среднего значения) для частично когерентного распределения. К сожалению, расчет оказывается весьма громоздким, так как связан с громоздким вычислением четвертого момента распределения случайной величины (электромагнитного поля), поэтому мы приводим его лишь в приложении. Основной вывод из него оказывается все тем же - разрушение когерентности возникает при плотности порядка одной частицы на длину волны.

Рассмотренные модельные задачи указывают на существование пределов когерентности как в пучках с малой плотностью, где основной вклад дают случайные процессы, влияющие на фазовые сдвиги элементарных излучателей, так и в плотных потоках частиц, где излучение во внутренние степени свободы может препятствовать зарождению и развитию индуцированных процессов – энергия расходуется на распад пучка.

Во второй главе рассмотрено влияние радиационных потерь на процесс индуцированной фазировки частиц рабочего пучка. Концепция самосогласованного поля исключает учёт собственного поля индивидуальной частицы на фоне дальнедействующего радиационного поля остальных частиц, т.е. пренебрежение “радиационным трением”.

Собственное радиационное поле индивидуальной частицы вдали от неё действительно мало, но оно действует на неё на протяжении всего процесса излучения и не зависит от фазы, в которой находится частица относительно внешнего поля. Учёт потерь на излучение меняет представление об индуцированных эффектах как о беспороговых, т.к. сигнал, инициирующий фазовую группировку частиц может быть меньше потерь частицы на спонтанное излучение. Само понятие спонтанного излучения можно определить как излучение, не дающее вклада в полезный сигнал.

Для учёта радиационного трения можно модифицировать уравнения самофазировки частиц, квазисинхронных с волной, добавив в них член, описывающий потери на спонтанное излучение. Таким образом, учёт радиационных потерь вносит нелинейность в уравнения фазовых соотношений:

$$\frac{d\Delta}{dz} = g \cos \varphi - w; \quad \frac{d\varphi}{dz} = \alpha \Delta.$$

Здесь Δ – отклонение безразмерной энергии γ от синхронного значения γ_s , g – так же выраженный в единицах mc^2 максимальный прирост энергии, который может получить частица от электромагнитной волны на единице длины взаимодействия. φ – фаза частицы, остающаяся постоянной при полном синхронизме. Коэффициент проскальзывания для несинхронных частиц мы возьмём в виде $\alpha \approx 2\pi/\lambda\gamma^3$, характерном для ондуляторного коротковолнового ЛСЭ. Величина w определяет величину “зазора” между сепаратрисами, попав в который частица безвозвратно теряет энергию в основном на спонтанное излучение, не дающее вклада в полезный сигнал. В качестве параметра, характеризующего эффективность передачи энергии от частицы волне, в данном случае

удобно взять кинематический набег фазы $\mu(z)=\alpha\Delta z$, обусловленный начальной расстройкой по энергии и пройденным расстоянием z .

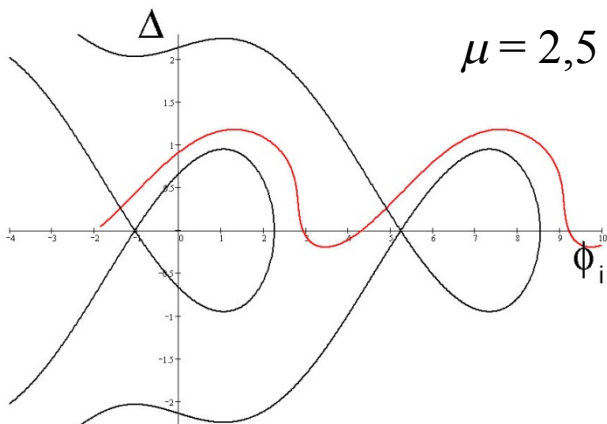


Рис.4. Фазовый портрет пучка при $w \neq 0$.

При начальном случайно-равномерном распределении по фазам в оптимальных условиях (с точки зрения индуцированного излучения) находятся частицы, имеющие небольшую положительную начальную расстройку по энергии, обеспечивающую на длине взаимодействия набег фазы около 2,6 радиан. Из рисунка ясно, что при малых g и достаточно больших w этот набег фазы может быть достигнут на очень короткое время, поскольку частица на фазовой плоскости “проваливается” между сепаратрисами. Более того, при $g < w$ фазировка вообще исчезает.

Решение приведённых уравнений даёт выражение для прироста энергии и описывает сразу два эффекта уменьшения интенсивности взаимодействия.

$$\frac{\overline{\Delta'} + w}{g} = \cos\left(\mu - W\mu^2 + \operatorname{arctg}\frac{C}{S}\right) J_1\left(\frac{g\sqrt{C^2 + S^2}}{\alpha\Delta_i^2}\right).$$

Первый характеризуется осцилляцией функции Бесселя при достаточно больших значениях аргумента и не связан непосредственно со спонтанными потерями в том смысле, что он сохраняется при $W=0$. Физически это означает насыщение и последующий распад фазировки, особенно сказывающийся при малых Δ_i . И это без учёта кулоновского расталкивания частиц излучающего сгустка. Однако, с точки зрения рассматриваемого эффекта более интересно уменьшение и обращение в нуль тригонометрического множителя при достаточно больших значениях W . Заметим, что возможно полное разрушение механизма индуцированного излучения.

Для не слишком больших поперечных колебаний электрон,двигающийся в плоском ондуляторе, с точки зрения спонтанного излучения можно приравнять к поперечному нерелятивистскому осциллятору, равномерно летящему с большой скоростью как целое вдоль оси z . Исходя из полученных оценок, потенциальные потери мощности на единицу длины для гармонических поперечных колебаний не должны быть больше $W_{\max} \approx 0,2$. С другой стороны, оптимальная расстройка примерно равна энергетическому размеру области устойчивости, т.е. $\alpha\Delta_i^2 \approx g$. Отсюда имеем оценку, практически не зависящую от энергии:

$$g > g_{\min} \cong \frac{r_0 (2\pi)^2}{0,6l^2}.$$

Ввиду малости r_0 полученное ограничение вряд ли имеет практическое значение, но, по крайней мере, разрешает

сформулированный выше парадокс для пучка исчезающе малой плотности (заметим, что ток пучка в этот критерий не входит, так что речь идет фактически об оценке порогового значения входного сигнала). Физически данный критерий означает, что входной сигнал достаточен для компенсации потерь на спонтанное излучение.

Изначально мы определили спонтанное излучение как излучение не дающее вклад в полезный сигнал. Попытаемся обсудить способ использования этого излучения, оно, как отмечалось выше, так же может иметь когерентный характер, а такие потери мощности должны быть по максимуму использованы с пользой.

В третьей главе обсуждается возможность использования ускорителей изначально проектируемых для использования в физике высоких энергий в качестве источников синхротронного излучения. Современная архитектура ускорителей позволяет снимать синхротронное излучение высокого спектрального качества с большого числа участков траектории рабочего пучка. Но существует вопрос повышения эффективности использования для этих целей уже имеющихся машин, изначально предназначенных для работы в физике высоких энергий. На таких машинах очень не просто, с точки зрения геометрии их конструкции, расположить большое количество экспериментов. Благодаря компактным размерам и высокой мощности современных вигглеров их можно использовать в ускорителях старших поколений. Такой способ модернизации ускоряющих систем может привести к значительному улучшению качества синхротронного излучения и адаптации для одновременного проведения нескольких экспериментов.

Довольно непривычным может оказаться применение термина когерентности в отношении одиночного излучателя и его собственной

электромагнитной волны. От качеств излучающей системы зависит способность заряженной частицы сохранять фазовый сдвиг испускаемой волны с различных участков траектории. Таким образом, когерентность может быть отнесена и к одночастичной модели излучателя, несмотря на то, что обычно интерференция предполагает когерентность нескольких (минимум двух) излучателей и обуславливается группировкой многих независимых частиц.

Условие когерентности – постоянство фазового положения частицы в волне. Такая ситуация является частным случаем более общей формулировки: если на разных участках траектории на длине формирования спектрально-угловой компоненты излучения проскальзывает фаза между волной и частицей достаточно близко к 2π , то такое излучение когерентно, по крайней мере, частично когерентно.

Повышение коэффициента ондуляторности увеличивает относительную интенсивность высоких гармоник, а следовательно и требования к стабильности фазовых соотношений. Другими словами, когерентные эффекты очень чувствительны ко всем изменениям параметров излучающей системы: в одном случае изменения могут повлиять на угловое распределение, в другом – привести к полному сбою когерентности. Высокие номера гармоник – это своего рода высокое временное разрешение в процессе образования поля излучения.

В смысле эффективного разделения излучения одновременно для разных экспериментов наибольший интерес представляют траектории с резким изменением радиуса кривизны. При соблюдении условий когерентного сложения полей от нескольких периодов ондулятора под любым углом удовлетворяющем неравенству

$\tan \alpha \leq A \cdot \frac{2\pi}{L}$ будет наблюдаться интерференционная картина (A и L – амплитуда и период колебаний излучателя в вигглере соответственно).

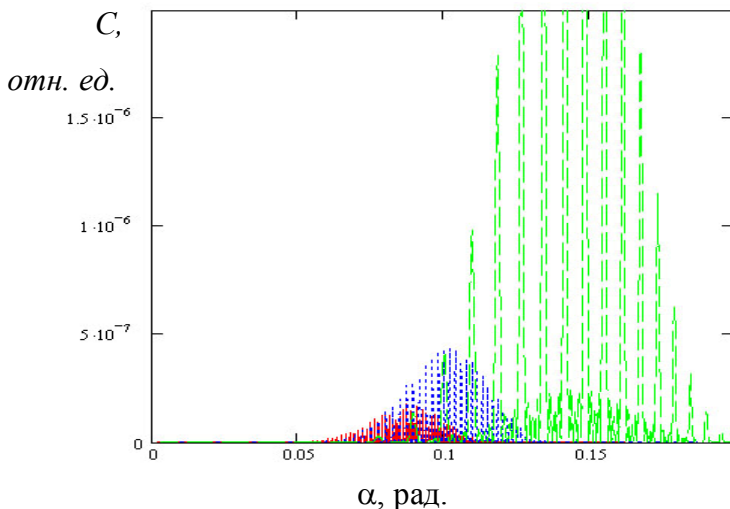


Рис. 5. Наблюдение излучения различных номеров гармоник.

Возможность разделения излучения напрямую зависит от коэффициента ондуляторности. Изменение этого параметра резко меняет угловую направленность излучения и его спектральный состав. Использование частотных фильтров также поможет разделить излучение на небольшом расстоянии от установки.

Для использования в качестве синхротронного источника ускоритель должен удовлетворять набору специальных требований. Следует помнить, что в нашем случае вопрос эмиттанса пучка стоит особенно остро и накладывает ряд своих ограничений. В этом смысле пучок должен быть достаточно качественным, в противном случае

потери тока сделают невозможным функционирование не только узла излучателя, но и всей машины. Сильный вигглер является сильным масс-спектрометром – это усугубляет вопрос продольного эмиттанса размытого по энергии пучка.

Основная же трудность – это сопряжение магнитного поля вигглера с полем ускорителя. По-видимому, применение вигглеров с большим полем (сверхпроводящих) будет возможно лишь в квазиаккумуляторном режиме синхротрона с переводом пучка в вигглер с помощью байпаса по достижении квазистационарной энергии.

Заключение

В работе теоретически исследованы процессы индуцированного возникновения когерентности излучения, действующие на фоне спонтанных радиационных потерь. Разработана математическая модель пучка релятивистских частиц, учитывающая динамику процессов корреляции фаз отдельных излучателей, и на её основе произведён расчёт оптимальных условий возникновения когерентности излучения и исследован его спектрально-угловой состав.

В рамках поставленных задач дано физическое обоснование понятия частично когерентного излучения системы частиц, т.е. введено понятие когерентности для системы излучателей с варьируемой степенью неопределённости своего пространственного (фазового) положения. Такая ситуация фазовых соотношений частиц более приближена к реальному начальному распределению излучателей в пучке, а следовательно более значима с практической точки зрения, т.к. способна более точно оценить угловую направленность и интенсивность излучения.

Выполнено теоретическое исследование влияния радиационного трения на процессы индуцированного излучения. В результате получена оценка величины минимального стартового сигнала индуцирующей волны, что разрушает представление о данном эффекте как о беспороговом. В рамках решения задачи о движении излучателя в самосогласованном поле, выявлен положительный аспект влияния радиационных потерь, связанный с более быстрой группировкой частиц в когерентно излучающие сгустки. Сделано замечание, что развитие индуцированной группировки частиц возможно только в случае, если потери энергии на излучение компенсируются энергией индуцирующей волны.

Оценено эффективное число частиц, принимающих участие в формировании спектрально-угловой компоненты когерентного излучения для различных механизмов нарушения корреляции частиц пучка: случайный разброс фазы отдельных излучателей и профилирование плотности тока пучка частиц. Развита методика позволяет оценить когерентные эффекты на всех этапах развития индуцированных процессов и даже на фоне спонтанных потерь.

Введено понятие полезного когерентного излучения, связанного с угловой направленностью последнего и апертурой регистрирующего приёмника. Показано, что в случае малой плотности частиц на длину волны излучения, угловая направленность некоторых мод делает невозможным их индуцированное усиление. Приведённые оценки в большей степени относятся к режиму SASE и генерации излучения в тех диапазонах длин волн, где создание длинных ондуляторных систем не эффективно. Ввиду малости абсолютных значений полученных поправок они имеют скорее общефизический интерес и позволяют получить более

полную картину зарождения и развития индуцированных эффектов когерентного излучения.

Рассмотрены предельные переходы системы излучающих частиц в случаях постоянного тока (случайно-равномерного потока излучателей) и сгустка стянутого в точку (большого числа частиц размещенного в объеме λ^3). Произведён расчет коэффициентов когерентности и соответствующих этим случаям поправок.

Для вигглеров обсуждена возможность применения излучения боковых лепестков диаграммы направленности в качестве независимых источников коротковолнового излучения для разных экспериментов на одном пучке. Рассмотренные на примере синхротрона «Пахра» параметры выходного излучения говорят о принципиальной возможности применения электрофизических установок ранних поколений в качестве источников когерентного высокочастотного излучения. Однако, для осуществления предложенной схемы модификации ускорителя следует выполнить ряд условий по обеспечению необходимых качеств электронного пучка.

В математическом приложении приведены наиболее громоздкие выкладки, связанные с вычислением флуктуаций мощности спонтанного излучения.

Список работ, опубликованных в рецензируемых журналах:

On the Possibility of Synchrotron Radiation Source Modification. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2010, Vol. 7, No. 7, pp. 498–501.

Частичная когерентность излучения электронного сгустка. М.А. Горбунов, А.Н. Лебедев. Прикладная физика, 2009, №4, с.37-41.

О концепции индуцированного излучения в пучковых системах.
М.А. Горбунов, А.Н. Лебедев. Прикладная физика, 2008, №5, с.5-9.

Статьи, опубликованные в сборниках трудов конференций:

Спектрально угловые характеристики излучения осциллятора в периодических структурах. М.А. Горбунов, А.Н. Лебедев. Труды XIX International Workshop on Charged Particle Accelerators, 2005.

On limits of induced radiation concept in FELs. М.А. Gorbunov, А.Н. Lebedev VII International scientific workshop to the memory of Prof. V.P.Sarantsev, 2007.

Частичная когерентность излучения электронного сгустка. М.А. Горбунов, А.Н. Лебедев. Труды RuPAC-2008.

Об одной возможности модификации источников синхротронного излучения. М.А. Горбунов, А.Н. Лебедев. VII International scientific workshop to the memory of Prof. V.P.Sarantsev, 2009.

О концепции индуцированного излучения в ЛСЭ. М.А. Горбунов, А.Н. Лебедев. Научная сессия МИФИ-2008. Сборник научных трудов. Т. 5, стр. 112.

Подписано в печать 30.01.2012. Формат 60x84 1/16.

Объём 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 11.

Типография НИЯУ МИФИ. 115409, г. Москва, Каширское ш., 31