На конкурс научных работ ОИЯИ за 2024 год

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Представляется работа:

**«Исследование процессов генерации когерентных излучений при взаимодействии релятивистских заряженных частиц с мишенями-радиаторами и их применение для диагностики пучков ускорителей»**

**«Study of the processes of generation of coherent radiations in interaction of relativistic charged particles with radiator targets and their application for accelerator beam diagnostics»**

Раздел: **Научно-исследовательские экспериментальные работы**

**Коллектив соавторов:**

1. Балдин А.А.
2. Блеко В.В.
3. Блеко В.В.
4. Кобец В.В.
5. Коровкин Д.С.
6. Ноздрин М. А.
7. Каратаев П.В.
8. Карпов М. А.
9. Потылицын А.П.

В представленный цикл работ входят 10 публикаций:

1. R. Kieffer, V. Bleko, P. Karataev, A. Potylitsyn et al. Direct Observation of Incoherent Cherenkov Diffraction Radiation in the Visible Range // Phys. Rev. Lett. **121**(5), 054802 (2018). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.054802>
2. R. Kieffer, V. Bleko, P. Karataev, A. Potylitsyn et al. Generation of incoherent Cherenkov diffraction radiation in a Synchrotron ring // Phys. Rev. Accel. Beams. **23**(4), 042803 (2020). <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.042803>
3. A. Baldin, V. Bleko, P. Karataev, M. Karpov, D. Korovkin, A. V. Kobets, A. Potylitsyn et al. Flap Collaboration: Tasks and perspectives. Study of fundamentals and new applications of controllable generation of electromagnetic radiation by relativistic electrons using functional materials // PEPAN Lett. **18**(3), 338-353 (2021). <https://link.springer.com/article/10.1134/S1547477121030043>
4. A.P. Potylitsyn, A.A. Baldin, V.V. Bleko, P.V. Karataev et al.Monochromatic Optical Cherenkov Radiation of Moderately Relativistic Ions in Radiators with Frequency Dispersion // JETP Letters, **115**(8), 439-443 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0021364022100393>
5. Potylitsyn, A.P., Baldin, A.A., Bleko, V.V. et al. Characteristics of Coherent Transition Radiation in the Prewave Zone from a Finite-Size Target // Phys. Part. Nuclei Lett. **21**, 131–139 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124020110>
6. Potylitsyn, A.P., Vukolov, A.V., Shevelev, M.V. et al. On the Effect of Focusing of Coherent Diffraction Radiation by a Semi-Parabolic Target // Phys. Part. Nuclei Lett. **21**, 140–145 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124020122>
7. А.А. Балдин, В.В. Кобец, В.В. Блеко, М.А. Карпов и др. Применение фотонных кристаллов для генерации широкополосного излучения на линейном ускорителе ЛИНАК-200 // Ядерная физика и инжиниринг. **14**(3), 1-9 (2023)
8. V.V.Bleko, A.A. Baldin, V.V. Bleko, M.A.Karpov, V.V. Kobets, D.S. Korovkin et al. Characteristics of a neutron source based on an electron accelerator LINAC-200 // JINST **19** C08004 (2024) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/08/C08004>
9. M. Nozdrin, V. Kobets et al. LINAC-200: Linac-200: a new electron test beam facility at JINR // 12th International Particle Accelerator Conference (IPAC2021), Campinas, SP, Brazil, 2021, 2697-2699 <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB042>
10. P. Karataev, A. Baldin, V. Bleko, M. Nozdrin et al. Experimental Investigation of Coherent Cherenkov Diffraction Radiation in Super-radiant Regime // Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling-2024), Riccione (RN), Italy, 2024 (готовится к печати)

Выдвинутая на конкурс работа представляет собой цикл статей, опубликованных с 2018 г. по 2024 г. в научных журналах и материалах конференций в рамках темы 1087: «Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов на ускорительных комплексах Нуклотрон-NICA ОИЯИ и SPS ЦЕРН», активности «Фундаментальные и прикладные исследования физики на пучках релятивистских электронов в рамках коллаборации FLAP», «Изучение глубокоподпороговых процессов, прикладные и образовательные программы на установке Маруся».

Цикл работ [1-10] посвящен исследованию взаимодействия релятивистских заряженных частиц с различными мишенями-радиаторами. В результате взаимодействия поля релятивистских заряженных частиц с мишенью-радиатором в зависимости от геометрии эксперимента, материала мишени и ее конфигурации возможна генерация одного или нескольких типов поляризационного излучения: дифракционного излучения, переходного излучения, излучения Вавилова-Черенкова, излучение Смита-Парселла, параметрическое рентгеновское излучение.

Проблемы эмиссии излучения движущихся заряженных частиц в присутствии сред с различными электромагнитными свойствами продолжают привлекать к себе внимание несмотря на то, что начали изучаться в 30-х годах прошлого века. Одной из основных причин этого служит актуальность разработки новых и модернизации существующих прецизионных методов диагностики пучков заряженных частиц, обусловленная в свою очередь повышением требований к качеству генерируемых пучков.

В цикле работ представлены как экспериментальные, так и теоретические работы, служащие обоснованием для планируемых к проведению экспериментов. В основе теоретических расчетов и результатов моделирования лежит метод поляризационных токов [11,12], развиваемый на протяжении многих лет теоретической группой под руководством А.П. Потылицына.

**К основным результатам исследования можно отнести следующее:**

**1. Экспериментальное исследование Черенковского дифракционного излучения на Корнеллском электрон-позитронном коллайдере CESR**

В работах [1,2] представлены результаты экспериментальных исследований некогерентного черенковского дифракционного излучения (ЧДИ), проведенных на Корнеллском электрон-позитронном коллайдере CESR.

В экспериментах, проведенных при пролете пучка позитронов с энергией 5.3 ГэВ вблизи кварцевой мишени, наблюдалось некогерентное черенковское дифракционное излучение (ЧДИ) [1]. Измеренная зависимость интенсивности излучения от прицельного параметра (расстояния между пучком и поверхностью излучателя) показала хорошее согласие с теоретическими предсказаниями, выполненными методом поляризационных токов.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис. 1. Эмиссия ЧДИ от плоского радиатора с пескоструйной внешней поверхностью (а) и от радиатора в виде треугольной призмы (b). | Рис. 2. Сравнение экспериментально измеренной зависимости интенсивности излучения от прицельного параметра с результатами моделирования |

В эксперименте по наблюдению некогерентного ЧДИ от встречных пучков (электронов и позитронов), проходящих в непосредственной близости от кварцевой мишени (рис. 3) [2] были исследованы угловые (рис. 4) и спектральные свойства излучения как в видимом, так и в ближнем инфракрасном диапазоне. Измеренные данные находятся в хорошем соответствии с теоретической моделью.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | |
| Рис. 3. Схема призматической мишени для наблюдения за контрраспрастраняющимися пучками. Позитроны распространяются слева направо, а электроны справа налево. |  | |
|  | |
| Рис. 4. Угловые распределения вертикально поляризованных фотонов, генерируемых пучком позитронов с энергией 5.3 ГэВ и измеренных для разных прицельных параметров | |

Из сравнения экспериментально измеренных и теоретически рассчитанных размеров пучка (таблица 1) было показано, что при выборе подходящей поляризации возможно точное определения размера пучка.

|  |
| --- |
| Таблица 1. Сравнение между рассчитанными и измеренными ширинами угловых распределений (вертикальная поляризация) для различных прицельных параметров |
|  |

**2. Оценка длительности сгустка ускорителя LINAC-200**

В ходе пуско-наладочных работ на ускорителе LINAC-200 были проведены исследования когерентного переходного излучения (КПИ) в предволновой зоне от мишени конечных размеров [5]. Схема эксперимента представлена на рис 5.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 5. Схема эксперимента по измерению характеристик КПИ |

Измерения проводились с энергией электронов 100 МэВ и токе 16 мА. Длительность сброса электронов на мишень составляла 2 мкс при частоте сбросов 10 Гц. Пучок выводился через титановую фольгу толщиной 50 мкм, проходил через рассеивающий экран из пенополиэтилена суммарной толщины 0,028 г/см2, обращенный металлизированной стороной к патрубку (толщина алюминиевого напыления – 10 мкм) и попадал на мишень переходного излучения (фольгированный текстолит, толщина металлического покрытия – 18 мкм). Мишень размером 150×100 мм помещалась в гониометр, позволяющий вращать ее вокруг вертикальной оси, с точностью 0.1°. Под фиксированным углом  относительно электронного пучка располагался детектор (Шоттки диод) на расстоянии 150 мм. Паспортная полоса чувствительности детектора [13] – 100-700 ГГц с чувствительностью 10 В/Вт.

На рисунке 6 представлена измеренная ориентационная зависимость КПИ. В каждой точке измерения ориентационной зависимости выхода КПИ проводился набор информации за 3 макроимпульса.

|  |
| --- |
| Chart, line chart  Description automatically generated |
| Рис. 6. Ориентационная зависимость КПИ |

Анализ результатов моделирования для условий эксперимента и экспериментальных данных позволил оценить длительность сгустка ускорителя. Для начала проведена оценка энергии, излучаемой сгустками  в макроимпульсе, состоящими из  электронов:

. (1)

 – спектры КПИ приведенные на рисунке 7 для следующих параметров моделирования:  и  мм, радиус апертуры Ra =4.5 мм.  – полоса чувствительности детектора ( =100 ГГц,  =700 ГГц).

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 7. Спектры КПИ для угла поворота мишени : синяя кривая (1) – спектр некогерентного переходного излучения; жёлтая кривая (2) – длина сгустка  мм; оранжевая кривая (3) –  мм; зелёная кривая (4) –  мм. |

Измерения проводились при токе ускоренного пучка 16 мА, что при длительности макроимпульса 2 мкс и частоте ВЧ поля 2865 МГц соответствует параметрам: =0.37; . Оценка энергии, испускаемой одним сгустком и мощность излучения за макроимпульс (число сгустков ) приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Значения энергии, испускаемой электронным сгустком за один микроимпульс, и мощности излучения в течение макроимпульса длительностью 2 мкс

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| , мм | **,** эВ | P, Вт |
| 0.15 |  |  |
| 0.30 |  |  |
| 0.60 |  |  |

Паспортная эффективность детектора ~ 10 В/Вт, уровень сигнала, измеренный в эксперименте ~ 20 мВ, что соответствует уровню мощности ~ 2 мВт. Из сравнения с оценками в таблице 2 вытекает, что длительность сгустка ускорителя ЛИНАК-200 превышает ожидаемое значение ( мм). Таким образом, анализ результатов моделирования для условий эксперимента и экспериментальных данных позволил оценить длительность сгустка ускорителя.

**3. Монохроматизация ИВЧ умеренно-релятивистских ионов от CVD-алмаза**

В ходе сеанса на нуклотроне в январе 2023 года была проведена попытка по наблюдению эффекта монохроматизации излучения Вавилова-Черенкова умеренно релятивистскими ионами от мишени обладающей частотной дисперсией. Согласно работе [4] эффект монохроматизации может найти применение в диагностике пучков: определение дисперсии энергии ускоренных ионов. Ранее эффект монохроматизации ИВЧ от релятивистских электронов был изучен в работах [14,15].

Геометрия генерации ИВЧ от плоскопараллельной пластины представлена на рисунке 8. Пучок ускоренных ионов пролетая через наклонную пластину, генерирует в объеме мишени ИВЧ, которое преломляясь на выходной грани регистрируется в дальней зоне детектором. Наличие частотной дисперсии у материала мишени обеспечивает наблюдение излучения с различными длинами волн под разными углами. Это позволяет «расширить» конус ИВЧ и, соответственно, измерять «монохроматические» линии излучения при фиксированных углах наблюдения .

|  |
| --- |
|  |
| Рис.8. Геометрия генерации ИВЧ |

Теоретическое обоснование эксперимента представлено в работе [4]. В основе теоретических расчетов и результатов моделирования лежит метод поляризационных токов [11], развиваемый на протяжении многих лет теоретической группой под руководством А.П. Потылицына. Выражение для расчета и моделирования спектрально-угловых характеристик ИВЧ для представленной выше геометрии имеет вид [12]:

 (2)

где α – постоянная тонкой структуры; sinc(x) – кардинальный синус; *βy, βz* – компоненты скорости частицы; nx, ny, nz – направляющие косинусы выведенного ИВЧ; 

Для учета частотной дисперсии CVD-алмаза в выражении (2) используется эмпирическая формула Селлмейера [16]:

(3)



Зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения, приведенная на рис. 8а показывает, что излучение с различными длинами волн распространяется вне материала мишени под разными углами.

|  |  |
| --- | --- |
| а) | b) |
| Рис.9. Зависимость интенсивности ИВЧ от угла наблюдения (a); спектры для различных энергий ионов при фиксированном угле наблюдения θvac=79° и угле поворота мишени *ψ* = 17° (b) | |

Из спектров излучения (рис. 9b) построенных для различных энергий ионов при фиксированном угле наблюдения и угле поворота мишени видна потенциальная возможность разделения спектральных характеристик ИВЧ для ионов с различной энергией.

Схема эксперимента, внешний вид установки и мишени представлен на рисунке 10. Физически схема эксперимента собрана на базе установки МАРУСЯ в зоне SPD ускорительного комплекса NICA. Мишень представляет собой плоскопараллельную пластину. Материал мишени CVD-алмаз. Толщина пластины 100 мкм, поперечные размеры 10×10 мм. Мишень размещена на гониометре, установленном на линейном трансляторе. Для регистрации генерируемого излучения использовался спектрометр, предназначенный для измерений в оптическом диапазоне (200-800 nm), расположенный под фиксированным углом наблюдения (θvac=90°).

|  |  |
| --- | --- |
| a) | b) |
| Рис.10. Схема эксперимента (a), внешний вид установки и мишени (b) | |

В силу ограниченности времени были проведены только тестовые измерения. Энергия ускоренных ионов ксенона составляла 3 ГэВ/нуклон. Согласно проведенным оценкам до эксперимента и исходя из заявленных характеристик спектрометра планируемое время измерения составляло 10 сек. Однако из измеренных данных даже для фоновых измерений (мишень убрана с пучка) максимальное время измерения не может превышать 2 сек.

**4. Источники излучения на базе установки LINAC-200**

Помимо возможности использования излучения возникающего в результате взаимодействия электронного пучка с мишенью радиатором в целях диагностики пучков, существует возможность их применения непосредственно в качестве источников излучения.

В работе [6] теоретически рассмотрена возможность использования когерентного дифракционного излучения (КДИ) в качестве источника терагерцового/субтерегерцового излучения. Для достижения максимальной интенсивности КДИ предлагается использование полупараболической мишени с фокальным расстоянием равным расстоянию между мишенью и апертурой коллиматора. Проведено моделирование спектральных характеристик КДИ в зависимости от параметров пучка ускоренных электронов.

Проведены пробные испытания по генерации широкополосного излучения на LINAC-200 фотонными кристаллами [7]. В статье обсуждаются эксперименты с высокоэнергетическими электронными пучками и их взаимодействием с трехмерными фотонными кристаллами, представляющими собой метаматериалы с высокой упорядоченностью структуры.

Трехмерные фотонные кристаллы использовались для генерации оптического, гигагерцового, терагерцового и нейтронного излучения при облучении их электронным пучком. Нейтронное излучение генерировалось через электроядерные реакции, когда высокоэнергетические электроны взаимодействовали с мета-мишенями.



Рис. 11. Структура образца SiO2 50 нм до (слева) и после (справа) облучения электронным пучком

Для регистрации генерируемого электромагнитного и нейтронного излучения использовались специальные детекторы и антенны, включая рупорную антенну для диапазона 4–8 ГГц и нейтронные детекторы на основе сцинтилляторов. Было проведено сравнение нейтронных спектров от фотонных кристаллов со спектрами, полученными от гомогенных мишеней различного состава (вольфрам, свинец и др.). Также исследовано влияние криогенных температур на люминесценцию фотонных кристаллов. При низких температурах наблюдалось увеличение интенсивности люминесценции, что связано с изменением оптических свойств среды. Результаты показали, что излучение, генерируемое при взаимодействии электронного пучка с фотонными кристаллами, может быть использовано для нейтронной радиографии, которая, в отличие от рентгеновской, позволяет изучать материалы, содержащие легкие элементы.

**5. Когерентное Черенковское дифракционное излучение в режиме сверхизлучения**

В работе [10] представлены результаты экспериментов по исследованию ЧДИ в режиме сверхизлучения. ЧДИ позволяет проводить диагностику пучков частиц без физического воздействия на них. Этот бесконтактный метод минимизирует влияние на пучок и предотвращает повреждение оборудования. Оно обладает высокой направленностью, что позволяет отличить его от других типов излучения (например, синхротронного), которые могут распространяться вместе с пучком. Интенсивность ЧДИ можно контролировать, изменяя длину радиатора, что обеспечивает гибкость в оптимизации сигнала для различных диагностических задач.

Эксперименты были проведены на выведенном пучке микротрона МТ-25 (ОИЯИ) с энергией электронов 10 МэВ. Измерения проводились в двух геометриях эксперимента: геометрии переходного излучения (ПИ) и геометрии ЧДИ. Схема измерений представлена на рисунке 12. Измерения проводились с использованием анализатора спектров Ceyear 4052F.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| Рис. 12. Схема эксперимента в геометрии ЧДИ (а) и ПИ (б) | | |

Измерения с помощью анализатора спектра очень точны с точки зрения динамического диапазона и спектрального разрешения. В эксперименте наблюдались 6 гармоник (3-8) КПИ и ЧДИ. На рис.13 приведено сравнение для 3 и 6 гармоник. Измерения спектра проводились в максимуме ориентационной зависимости.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис. 13. Спектры когерентного ПИ и ЧДИ для 3 (а) и 6 (б) гармоник | |

Наблюдаемый экспоненциальный спад в зависимости от сканирования частоты может использоваться для оценки длины отдельного сгустка при выполнении определенных требований. Для расширения частотного диапазона планируется использовать смесители; готовится расширение частот до диапазона 110 – 170 ГГц для экспериментов на установке LINAC200 (после введения в эксплуатацию).

Таким образом, цикл работ представляет собой совокупность теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению взаимодействия релятивистских заряженных частиц с мишенями-радиаторами и возможности их применения как для диагностики пучков заряженных частиц, так и в качестве источников излучения.

Совместный интерес к проведению исследований на установке LINAC-200 [9] послужил базой для формирования коллаборации FLAP (Fundamental & applied Linear Accelerator Physics collaboration), направления исследований которой, представлены в [3].

Полученные результаты представлялись на сессиях ПКК по физике частиц ОИЯИ, совещаниях коллаборации FLAP, а также были представлены в докладах на следующих конференциях: IBIC-2018, IPAC-2021, RREPS-2023, Channeling-2024, ЛаПлаз-2023, XV-й Международной школе-конференции «The Actual Problems of Microworld Physics».

**Список литературы**

1. R. Kieffer, V. Bleko, P. Karataev, A. Potylitsyn et al. Direct Observation of Incoherent Cherenkov Diffraction Radiation in the Visible Range // Phys. Rev. Lett. **121**(5), 054802 (2018). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.054802>
2. R. Kieffer, V. Bleko, P. Karataev, A. Potylitsyn et al. Generation of incoherent Cherenkov diffraction radiation in a Synchrotron ring // Phys. Rev. Accel. Beams. **23**(4), 042803 (2020). <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.042803>
3. A. Baldin, V. Bleko, P. Karataev, M. Karpov, D. Korovkin, A. V. Kobets, A. Potylitsyn et al. Flap Collaboration: Tasks and perspectives. Study of fundamentals and new applications of controllable generation of electromagnetic radiation by relativistic electrons using functional materials // PEPAN Lett. **18**(3), 338-353 (2021). <https://link.springer.com/article/10.1134/S1547477121030043>
4. A.P. Potylitsyn, A.A. Baldin, V.V. Bleko, P.V. Karataev et al.Monochromatic Optical Cherenkov Radiation of Moderately Relativistic Ions in Radiators with Frequency Dispersion // JETP Letters, **115**(8), 439-443 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0021364022100393>
5. Potylitsyn, A.P., Baldin, A.A., Bleko, V.V. et al. Characteristics of Coherent Transition Radiation in the Prewave Zone from a Finite-Size Target // Phys. Part. Nuclei Lett. **21**, 131–139 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124020110>
6. Potylitsyn, A.P., Vukolov, A.V., Shevelev, M.V. et al. On the Effect of Focusing of Coherent Diffraction Radiation by a Semi-Parabolic Target // Phys. Part. Nuclei Lett. **21**, 140–145 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124020122>
7. А.А. Балдин, В.В. Кобец, В.В. Блеко, М.А. Карпов и др. Применение фотонных кристаллов для генерации широкополосного излучения на линейном ускорителе ЛИНАК-200 // Ядерная физика и инжиниринг. **14**(3), 1-9 (2023)
8. V.V.Bleko, A.A. Baldin, V.V. Bleko, M.A.Karpov, V.V. Kobets, D.S. Korovkin et al. Characteristics of a neutron source based on an electron accelerator LINAC-200 // JINST **19** C08004 (2024) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/08/C08004>
9. M. Nozdrin, V. Kobets et al. LINAC-200: Linac-200: a new electron test beam facility at JINR // 12th International Particle Accelerator Conference (IPAC2021), Campinas, SP, Brazil, 2021, 2697-2699 <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB042>
10. P. Karataev, A. Baldin, V. Bleko, M. Nozdrin et al. Experimental Investigation of Coherent Cherenkov Diffraction Radiation in Super-radiant Regime // Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling-2024), Riccione (RN), Italy, 2024 (готовится к печати)
11. D. V. Karlovets, A. P. Potylitsyn. Diffraction radiation from a finite-conductivity screen // J. Exp. Theor. Phys. **90**, 326 (2009).
12. M. V. Shevelev, A. S. Konkov. Peculiarities of the generation of Vavilov-Cherenkov radiation induced by a charged particle moving past a dielectric target // J. Exp. Theor. Phys. **118**, 501 (2014).
13. <https://terasense.com/products/detectors/>
14. Y. Takabayashi, E.I. Fiks, Yu.L. Pivovarov, First studies of 500-nm Cherenkov radiation from 255-MeV electrons in a diamond crystal // Phys. Lett. A, **379,** 1032–1035 (2015).
15. A. Potylitsyn, G. Kube, A.Novokshonov et al. First observation of quasi–monochromatic optical Cherenkov radiation in a dispersive medium (quartz) // Phys. Let. A, **417**, 127680 (2021)
16. G. Turri, S. Webster, Y. Chen et al. Index of refraction from the near-ultraviolet to the near-infrared from a single crystal microwave-assisted CVD diamond // Opt. Mater. Express, **7**(3), 855 (2017)

Председатель НТС ЛФВЭ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Е.А. Строковский

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ С.П. Мерц