

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ДАНАГУЛЯН САМВЕЛ СЕРЕЖАБЕВИЧ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С
ЭНЕРГИЕЙ 4.5 ГэВ В УСЛОВИЯХ КАНАЛИРОВАНИЯ В МОНОКРИСТАЛ-
ЛЕ АЛМАЗА.

(01.04.16- физика атомного ядра и элементарных частиц)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кан-
дидата физико-математических наук

Е р е в а н - 1986

Работа выполнена в Ереванском физическом институте

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Р.О.Авакян

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук Испирян К.А.

кандидат физико-математических наук Потылицын А.П.
(НИИЯФ ТПИ г.Томск)

Ведущая организация – Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова

Защита состоится "28" сентября 1986г. в 14-00 часов на заседании Специализированного совета Д 034.03.01 при Ереванском физическом институте (г.Ереван-36, ул.Маркаряна 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института.

Автореферат разослан "_____" _____ 1986г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

В.А.Шахбазян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В последние годы значительно возрос интерес к проблеме излучения легких заряженных частиц при прохождении через монокристаллы. Теория когерентного тормозного излучения (КТИ), развитая в 50-х годах, нашла свое экспериментальное подтверждение во многих работах. Однако, уже в первых экспериментальных исследованиях возникали особенности, когда измерения переносились в область малых углов влета частиц относительно кристаллографических осей и плоскостей и малых энергий излученных фотонов, которые не могли быть объяснены в рамках существующей теории. Теория КТИ, построенная в первом борновском приближении, нарушается в области малых углов влета и малых энергий фотонов. Экспериментальные исследования показывали рост интенсивности излучения фотонов малых энергий ($\alpha \leq 0,05$, где $\alpha = \hbar\omega/E_0$), когда импульс налетающих электронов составлял небольшой угол относительно кристаллографической оси, тогда как теория КТИ предсказывала спад. Кроме того измерения, относящиеся к электронам и позитронам, показали существенное различие в ориентационной зависимости полного выхода вблизи осей монокристаллов для электронов и позитронов, а теория КТИ – зарядово-независима.

Интерпретация приведенных экспериментальных фактов, а также многих других, вышла за рамки теории КТИ и потребовала привлечение нового механизма, описывающего взаимодействие частиц с монокристаллами при малых углах влета, а именно механизма канализованного движения заряженной частицы в кристаллах.

Изменение каналирования наблюдается при углах вылета $\theta < \theta_k$, где θ_k — критический угол каналирования. Значение критического угла θ_k получается из условия малости энергии поперечного движения частицы:

$$\epsilon_{\perp} = E_e \cdot \theta^2 / 2 + u(x)$$

где E_e — полная энергия частицы, θ — угол между импульсом частицы и кристаллографической осью или плоскостью, $u(x)$ — величина непрерывного потенциала поля атомной цепочки или плоскости на расстоянии x в поперечной плоскости. При $\epsilon_{\perp} < 0$ (когда $\theta < \theta_k$) частица оказывается заключенной в потенциальной яме глубиной u_0 , где u_0 — максимальное (по модулю) значение непрерывного потенциала, и энергия поперечного движения принимает дискретные значения. При переходе между уровнями энергии частица излучает фотоны низкой энергии. Учет Доплер-эффекта продольного движения смещает характерную частоту излучения в сторону жестких энергий. Иными словами, при уменьшении энергии поперечного движения, когда $\theta < \theta_k$, частица захватывается в "канал", образованный кристаллографическими плоскостями или атомными цепочками, отражаясь от стенок "канала" (в случае положительного заряда), либо "нанизываясь" на плоскость или накручиваясь на атомную цепочку (в случае отрицательного заряда). Таким образом траектория частицы в канале имеет либо синусоидальную форму, либо спиралевидную, а в поперечной плоскости частица совершает гармоническое колебание, которое сопровождается интенсивным излучением. Интенсивность излучения каналированной частицы превосходит (в районе наиболее вероятной частоты) интенсивность тормозного излучения в аморфной мишени эквивалентной толщины

на несколько порядков, т.к. в последнем случае излучение, в основном, происходит при однократном рассеянии частицы на изолированном атоме. В случае плоскостного каналирования излучение обладает направленностью ($\sim 1/E_0$) и высокой степенью линейной поляризации.

Таким образом, такие особенности излучения при каналировании электронов, как направленность, большая спектральная плотность, квазимонохроматичность и высокая степень поляризации подтверждают актуальность проблемы исследования излучения при каналировании с точки зрения практического применения. Кроме того всесторонние экспериментальные и теоретические исследования излучения существенно дополняют общую картину взаимодействия заряженных частиц с веществом.

Цель работы заключается в исследовании спектральных, спектрально-угловых и интегральных характеристик излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ в условиях каналирования в монокристаллах алмаза разных толщин и сравнение с аналогичными характеристиками тормозного излучения Бете-Гайтлера.

Научная новизна работы. Впервые измерены абсолютные спектры излучения электронов энергии 4,5 ГэВ в монокристаллах алмаза трех толщин: 0,1, 1, 1,7 мм. Спектры сравнены со спектрами тормозного излучения в разориентированном кристалле и аморфном радиаторе эквивалентной толщины.

Впервые измерены спектрально-угловые и интегральные характеристики излучения электронов энергии 4,5 ГэВ в монокристаллах алмаза 1 и 1,7 мм и в аморфной мишени эквивалентной толщины в зависимости от угла вылета фотонов.

Научная и практическая ценность работы. Полученные экспериментальные данные и их сравнения с теоретическими предсказаниями способствуют развитию теории излучения и динамики прохождения электронов высоких энергий в монокристаллах.

Проведенные экспериментальные исследования указывают на возможность получения интенсивных потоков рентгеновского и γ -излучения. Источники такого излучения с высокой спектрально-угловой плотностью найдут широкое применение в различных областях науки и техники.

Созданный уникальный электронный тракт, формирующий пучок электронов с угловой расходимостью не более $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ рад. в горизонтальной и вертикальной плоскостях, энергетическим разбросом не более $\pm 0.5\%$ и с интенсивностью от нескольких десятков до 10^7 частиц в секунду, может быть использован для целого ряда экспериментов по взаимодействию электронов высоких энергий с монокристаллами.

На защиту выносятся:

1. Проектирование и создание тракта выведенных электронов Эрванского электронного синхротрона с малой угловой расходимостью пучка.

2. Методика экспериментального исследования характеристик излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ при каналировании в монокристалле алмаза.

3. Экспериментальные результаты исследования основных характеристик излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ при малых углах влета в кристалл, а именно:

а/ спектральных характеристик излучения;

б/ спектрально-угловых и интегральных характеристик в зависимости от угла вылета фотонов;

в/ зависимость угловой плотности полной энергии излучения от толщины кристаллического радиатора.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались на XI и XII Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами (Москва, 1981 и 1982 гг.), на II Всесоюзной конференции по электромагнитному излучению релятивистских частиц в кристаллах (Терскол, 1983 г.), на III Всесоюзной школе по взаимодействию ускоренных частиц с веществом (Минск, 1984 г.), на Научной сессии совета по электромагнитным взаимодействиям АН СССР (Томск, 1985 г.) и на семинарах ЕРФИ.

Публикации. Основной материал диссертации опубликован в тринадцати статьях в журналах "Ядерная физика", "Известия АН Арм.ССР", "Письма в ЖТФ" и в виде препринтов ЕРФИ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 6 таблиц и 45 рисунков. Список цитируемой литературы включает 91 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении приводится краткий обзор литературы, посвященной проблеме излучения электронов и позитронов высоких энергий в монокристаллах, обсуждается актуальность исследований в этой области, формулируется основная цель диссертации и приводится краткое содержание каждой из глав диссертационной работы.

Первая глава посвящена созданию выведенного электронного пучка в Бреванском физическом институте, необходимого для проведения исследований по взаимодействию электронов с монокристаллами при малых углах влета относительно кристаллографических осей и плоскостей. Приводится обоснование необходимости создания такого пучка. Для измерения абсолютного выхода излучения электронов при прохождении через монокристаллы в условиях каналирования возникает необходимость измерения полного числа электронов, падающих на кристалл. В экспериментах, проведенных на внутреннем пучке синхротрона, мониторинг числа начальных электронов представляет собой сложную задачу, и для получения абсолютных выходов прибегают к дополнительным измерениям, а также к выбору специальных режимов работы ускорителя. Между тем, каждое новое измерение вносит свои погрешности, которые в итоге снижают уровень достоверности полученных результатов, а выбор новых режимов работы ускорителя вносит свою неопределенность в значение параметров внутреннего пучка ускорителя.

На выведенном пучке электронов задача мониторинга начального числа электронов упрощается, и появляется возможность непосредственного измерения абсолютного выхода излучения электронов в монокристаллах.

В главе приводится описание электронного тракта. Подробно изложены программы расчета и оптимизации параметров тракта. Расчет проводился в два этапа.

На первом этапе проводилась предварительная оптимизация параметров тракта с выбором необходимого количества магнитных элементов, исходя из требований, накладываемых на окончательные

параметры пучка. Основным требованием, вытекающим из условий эксперимента по исследованию процесса излучения электронов в монокристаллах при каналировании, является малость угловой расходимости сформированного пучка, средняя величина которой по горизонтали и вертикали не должна превышать критический угол каналирования, значение которого равно $0,1$ мрад для кристалла алмаза в случае плоскостного каналирования при энергии электронов, равной $4,5$ ГэВ, и $0,2$ мрад - случае осевого каналирования.

Предварительная оптимизация проводилась с помощью стандартной программы **TRAMP** из библиотеки стандартных программ ЭМ БЭСМ-6.

На втором этапе проводилась дальнейшая оптимизация параметров электронного тракта при учете реальных экспериментальных условий на основе результатов первого этапа. Оптимизация проводилась по программе численного моделирования (по методу Монте-Карло) процесса прохождения частиц по тракту.

Приводятся координатные, угловые и энергетические распределения частиц пучка, полученные с помощью программы моделирования. Двухмерные координатные распределения частиц, полученные в тех точках на трассе, где экспериментально измерен профиль пучка, сравниваются с экспериментальными распределениями. Совпадение результатов расчета с экспериментальными данными показывает правильность метода расчета.

Описаны методы мониторинга, использованные при проводке пучка и измерении его параметров.

Значение средней угловой расходимости пучка, оцененное из разных измерений, не превосходит $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ рад в горизон-

тальной и вертикальной плоскостях, что хорошо согласуется с результатами расчета. Размеры сечения пучка на мишени (на расстоянии более 50 метров от начала тракта) равны $(6 \times 10) \text{ мм}^2$ при величине апертуры первого коллиматора, равной 3,3 мм по диаметру, когда вторая коллимация отсутствовала.

Таким образом, в Ереванском физическом институте создан магнитно-оптический тракт, формирующий пучок выведенных электронов с параметрами, удовлетворяющими требованиям экспериментальных исследований излучения электронов в монокристаллах в условиях каналирования, и интенсивностью от нескольких десятков до 10^7 частиц в сек. Сформированный электронный пучок по своим параметрам соответствует лучшим мировым достижениям в этой области.

Во второй главе описана экспериментальная методика. Приводится описание основных узлов экспериментальных установок, с помощью которых измерены спектральные и угловые характеристики излучения электронов в монокристаллических и аморфных радиаторах. Приведены результаты характеристик спектрометра полного поглощения на основе кристалла NaJ(Tl) . Исследованы возможности применения спектрометра для измерения спектров излучения электронов.

Для точной ориентации кристаллической мишени под пучком была использована гониометрическая установка, позволяющая вращать мишень в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Область изменения углов вращения в обоих направлениях составляла $\pm 6^\circ$, точность установки угла - $\pm 10^{-5}$ рад, шаг изменения угла - $4,4 \cdot 10^{-5}$ рад. Описана процедура лабораторных измерений характеристик гониометрического устройства.

Для измерения угловых характеристик излучения электронов в монокристаллах создан многоканальный магнитный координатный спектрометр на многопроволочных пропорциональных камерах, скитилляционном телескопе для регистрации вторичных электронов и спектрометре полного поглощения на основе кристалла NaJ(Tl) с автоматическим съемом информации в стандарте КАМАК и дальнейшей передачей информации на ЭВМ ЕС-1022 по линии связи. Магнитный координатный спектрометр позволял измерять следующие величины:

1. Энергию вторичных электронов в диапазоне 4.0 ± 4.5 ГэВ с точностью $\sim 3 \pm 5\%$.

2. Энергию фотонов, родившихся в мишени гониометрического устройства, в диапазоне $0,03 \pm 3$ ГэВ с энергетическим разрешением $(18 \pm 5)\%$, соответственно.

3. Угловое распределение γ - квантов, родившихся в мишени, с точностью $\Delta \theta \approx 0,1$ мрад.

Описаны основные узлы магнитного координатного спектрометра, процедура съема информации и накопления во внешней памяти ЭВМ ЕС-1022. Приведены результаты расчета параметров спектрометра.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ в кристаллах алмаза разных толщин в условиях плоскостного и осевого каналирования, проведенных на выведенном пучке электронов.

Дано описание процедуры измерений и метода обработки физических результатов. Обработка результатов проводилась на ЭВМ ЕС-1022. Приводятся абсолютные спектры интенсивности излучения электронов в монокристаллах алмаза трех толщин: 0,1 мм,

1,0 мм и 1,7 мм, а также спектр от графитовой мишени эквивалентной толщины. Спектры излучения приведены на единицу длины (см) и на один электрон. На рис.1 изображены абсолютные спектры, полученные для кристалла алмаза толщиной 0,1 мм, когда импульс электрона направлен вдоль кристаллографической плоскости {011} (темные треугольники), или составляет небольшой угол с плоскостью {011} (крестики, — $\theta_e = 0,22$ мрад, точки — $\theta_e = 0,65$ мрад). На рис.2 приведены спектры интенсивности, полученные для того же кристалла при разных углах влета относительно оси (100) кристалла (• — $\theta_e = 0$, ▲ — $\theta_e = 0,086$ мрад). Темными квадратиками на рис. 2 обозначен спектр от аморфной мишени ($\times 10$), сплошной линией — расчетный спектр Бете-Гайтлера. Как видно из рис.2, измеренные точки спектра от аморфной мишени хорошо ложатся на теоретическую кривую. Необходимо отметить, что спектр от разориентированного кристалла совпадает со спектром от аморфной мишени эквивалентной толщины.

Из рис. 1 и 2 видно, что интенсивность излучения в условиях каналирования в районе пиковой энергии превосходит интенсивность тормозного Бете-Гайтлеровского излучения в 50 раз в случае плоскостного каналирования и в 80 раз — в случае осевого каналирования.

Результаты сравнения экспериментального спектра излучения в условиях плоскостного каналирования с теоретическим предсказанием показывают хорошее совпадение экспериментальных и теоретических спектров для тонкого кристалла алмаза.

Далее приводятся результаты исследований интегральных характеристик излучения в условиях каналирования в зависимости

от угла вылета фотонов при двух толщинах кристаллического радиатора: 1 мм и 1.7 мм и аморфной мишени (для сравнения).

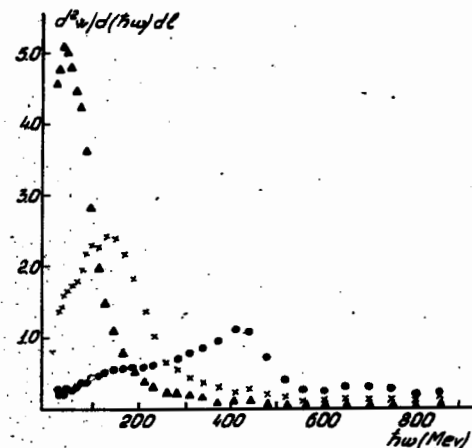


Рис. 1.

На рис. 3 представлены кривые угловых плотностей полной энергии излучения, которые рассчитывались по следующей формуле:

$$\frac{dE}{d\Omega} = \eta(\theta) \cdot \frac{E_0}{4\theta^2},$$

где E_0 — энергия электрона, θ — угол вылета фотона относительно кристаллографической оси (100) или плоскости {011} (угол влета электрона относительно оси (100) или плоскости {011} был равен нулю), $\eta(\theta)$ — полный сброс энергии излучения в заданный телесный угол с плоскими углами, равными $\pm \theta$, измеренный на эксперименте:

$$\eta(\theta) = \frac{1}{E_0} \int_0^E \frac{dW(\theta)}{d\omega} d\omega.$$

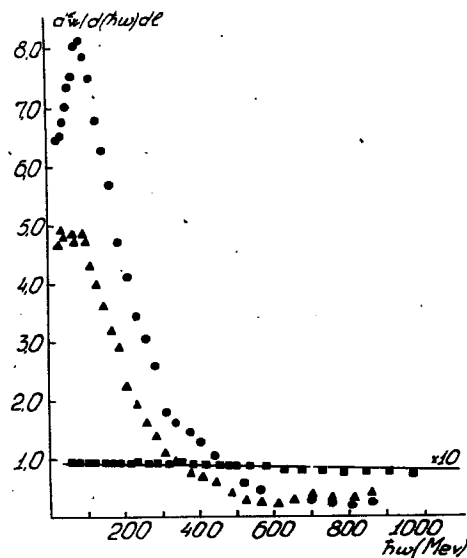


Рис. 2.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

◊ - угловая плотность излучения в графитовой мишени толщиной 2,6 мм, эквивалентной по плотности толщине алмазной мишени 1,7 мм (кривая 1), ◊ - то же в разориентированном кристалле алмаза толщиной 1 мм (кривая 2), +, Δ - в ориентированном кристалле толщиной 1 мм (кривые 3 и 4) и ▲, X - кристалле толщиной 1,7 мм (кривые 5 и 6) в условиях плоскостного и осевого каналирования, соответственно.

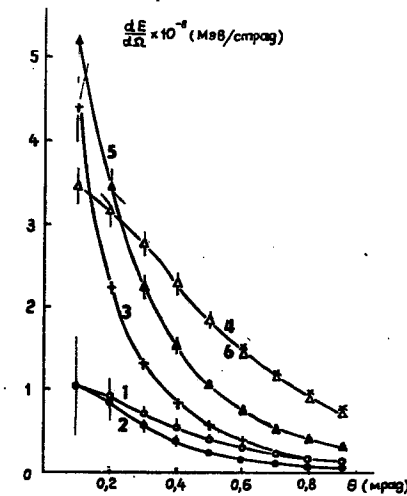


Рис. 3.

Кривые проведены по точкам.

На рис. 3 можно сделать следующие выводы:

1/ Угловая плотность излучения достигает насыщения при осевом каналировании в кристалле толщиной - 1 мм.

2/ Наблюдается линейный рост угловой плотности излучения в условиях плоскостного каналирования от толщины кристалла в пределах исследуемых толщин. Продолжение данных исследований в области больших толщин позволит определить значение оптимальной толщины кристалла, при которой все еще наблюдается рост угловой плотности.

В четвертой главе приводятся результаты исследований излучения электронов в условиях каналирования, выполненных на внутреннем луче Ереванского синхротрона. Описаны экспериментальная методика и основные узлы экспериментальной установки.

Исследования, проводимые на внутренних пучках ускорителей, имеют определенные трудности, связанные с невозможностью непосредственного измерения абсолютных выходов, приходящихся на один электрон. Это связано с многократностью прохождения пучка через тонкую мишень. Кратность прохождения приводит к постоянству выхода тормозных фотонов для разных толщин радиаторов. В случае кристаллического радиатора сечение взаимодействия электрона с мишенью сильно зависит от ориентации кристалла, что приводит к зависимости кратности прохождения от угла ориентации кристалла. Это затрудняет абсолютное мониторинговое и возможность непосредственного проведения абсолютных измерений. Однако, эти трудности можно преодолеть путем использования специальных режимов работы выводных систем ускорителя и проведения дополнительных измерений. Следует отметить, что кратность прохождения не влияет на форму измеренных спектральных распределений.

В главе приводятся относительные спектры интенсивности излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ в монокристалле алмаза толщиной 0,1 мм в условиях осевого и плоскостного каналирования. Из сравнения относительных спектров, полученных на внутреннем пучке в условиях жесткой коллимации фотонов и на выведенном, где отсутствовала коллимация фотонного пучка, сделан вывод относительно большой направленности излучения при плоскостном каналировании.

В заключении излагаются основные результаты диссертации:

I. Спроектирован тракт выведенных электронов Ереванского синхротрона с малой угловой расходимостью пучка. Проведены расчеты оптимальных параметров электронного тракта на ЭВМ

БЭСМ-6. Показана практическая возможность сконструирования такого тракта, обеспечивающего формирование параллельного пучка электронов с расходимостью не более $\pm 5 \times 10^{-5}$ радиан в горизонтальной и вертикальной плоскостях и энергетическим разбросом частиц не более $\pm 0,5\%$. Расчет оптимальных параметров тракта и конечных распределений частиц проведен по методу Монте-Карло. Определены границы допустимых изменений параметров электронного тракта.

2. Создан тракт выведенных электронов Ереванского электронного синхротрона с малой угловой расходимостью пучка. Реализована проводка электронного пучка по тракту и транспортировка сформированного пучка в малый экспериментальный зал института. Общая протяженность электронного тракта до малого экспериментального зала составляет более 50 метров. В формировании пучка задействованы 6 магнитных элементов и 2 коллиматора. На всем протяжении электронного тракта в пучкопроводе обеспечен вакуум на уровне 2×10^{-2} торр. Проведены измерения параметров электронного пучка. Угловая расходимость пучка, оцененная по увеличению размеров профиля пучка на расстоянии 10 и 20 метров от последнего коллиматора, не превосходит 5×10^{-5} радиан. Экспериментальный профиль пучка полностью совпадает с расчетным во всех точках трассы, где проведены измерения профиля.

3. Созданы и налажены экспериментальные установки для исследования спектральных, спектрально-угловых и интегральных характеристик излучения электронов в монокристаллах.

4. Проведены исследования характеристик спектрометра полного поглощения на основе кристаллов $NaJ(Tl)$ и

$CsJ(Tl)$ с целью выбора оптимальной длины кристалла для измерения спектральных распределений излучения электронов в монокристаллических мишенях.

5. Созданы математические программы для расчета параметров электронного тракта и характеристик пучка по методу Монте-Карло, для расчета параметров вторичного электронного пучка, на котором проведены калибровочные измерения характеристик спектрометра полного поглощения на основе кристалла

$NaJ(Tl)$, по методу Монте-Карло, для обработки калибровочных кривых и кривых энергетического разрешения спектрометра полного поглощения, для расчета параметров экспериментальных установок, для обработки физической информации, полученной в экспериментах, проведенных на выведенном пучке электронов,

6. Впервые измерены абсолютные спектральные характеристики излучения электронов энергии 4,5 ГэВ в монокристаллах алмаза трех толщин: 0,1, 1 и 1,7 мм.

7. Впервые измерены спектрально-угловые и интегральные характеристики излучения электронов энергии 4,5 ГэВ в монокристаллах алмаза толщинами 1 и 1,7 мм и в аморфной мишени эквивалентной толщины в зависимости от угла вылета фотонов.

8. Впервые исследована зависимость угловой плотности полной энергии излучения от толщины кристаллического радиатора и получено, что угловая плотность полной энергии излучения в режиме плоскостного каналирования при малых углах вылета фотонов растет с толщиной радиатора в пределах исследуемых толщин. Это свойство кристалла, возможно, связано с уменьшением среднесквадратичного угла многократного рассеяния электронов при движении вдоль кристаллографической плоскости,

Большая угловая плотность энергии излучения при плоскостном каналировании в области малых углов вылета фотонов открывает новые возможности для создания источников излучения высокой спектрально-угловой плотности.

9. Получены результаты экспериментальных исследований ориентационных зависимостей энергетических спектров излучения в области малых углов вылета относительно оси (100) и плоскости {011} кристалла алмаза, проведенных на внутреннем пучке синхротрона. Обнаружено подавление когерентных максимумов в спектрах излучения при углах вылета, равных нескольким критическим углам каналирования.

Основные результаты, включенные в диссертацию, опубликованы в следующих работах:

1. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Данагулян С.С. и др.
Исследование амплитудных и временных характеристик спектрометра полного поглощения на основе кристалла $NaJ(Tl)$ — Ереван, 1977, — 14 с. (Препринт/ФЭИ-223 (15)-77).
2. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Данагулян С.С. и др.
Аппаратура для регистрации электронов и γ -квантов (АРЭГАН) на основе кристаллов $NaJ(Tl)$. Изв. АН Арм. ССР, серия физика, 1979, т.14, с. 50-53.
3. Данагулян С.С., Эдбагян Г.М., Адицев В.Н., Курков А.А.
Использование больших кристаллов $NaJ(Tl)$ и $CsJ(Tl)$ для измерения энергии электронов в широкой энергетической области — Ереван, 1983, — 13 с. (Препринт/ФЭИ-620(10)-83).

4. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Данагулян С.С. и др.
Использование больших кристаллов $NaJ(Tl)$ для измерения спектра тормозного излучения электронов высоких энергий.-Ереван, 1984-10 с (Препринт/ЕФИ-714 (29)-84).
5. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Данагулян С.С. и др.
Экспериментальное оборудование и методика для создания и исследования параметров квазимонохроматических и поляризованных пучков фотонов Ереванского синхротрона - Ереван, 1982,-25 с. (Препринт/ЕФИ-523(10)-82).
6. Данагулян С.С. Расчет и моделирование электронного тракта - Ереван, 1985,-17 с. (Препринт/ЕФИ-776(3)-85).
7. Авакян Р.О., Агаронян А.В., Данагулян С.С. и др.
Электронный тракт Ереванского ускорителя с малой угловой расходимостью пучка.-Ереван, 1985-12 с. (Препринт/ЕФИ-779(6)-85).
8. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Данагулян С.С. и др.
Подавление когерентных максимумов интенсивности излучения электронов при малых углах влета в кристалл, Ереван, 1982-7 с. (Препринт/ЕФИ-546(33)-82).
9. Авакян Р.О., Аганьянц А.О., Данагулян С.С. и др.
Ориентационная зависимость энергетических спектров излучения электронов на монокристалле алмаза-Ереван, 1982-13 с. (Препринт/ЕФИ-568(55)-82).
10. Авакян Р.О., Аганьянц А.О., Данагулян С.С. и др.
Спектры излучения электронов высоких энергий в монокристаллах различной толщины и ориентации.-ЯФ, 1982, т.35, вып.2, с. 387-389.

11. Авакян Р.О., Авакян Э.О., Данагулян С.С. и др.
Излучение электронов высоких энергий вблизи кристаллографических осей и плоскостей кристалла алмаза.-Ереван, 1984,- 13 с. (Препринт/ЕФИ-704 (19)-84).
12. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Данагулян С.С. и др.
Угловые характеристики излучения ультрарелятивистских электронов в толстых монокристаллах алмаза-Письма в ЖТФ, 1985, т. II вып. 22, с. 1393-1397.
13. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Данагулян С.С. и др.
Угловая зависимость полного сброса энергии электронов в толстых монокристаллах алмаза.-Ереван, 1985-17 с. (Препринт/ЕФИ-828(55)-85).

Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 19.09.86г. ВФ-05705 : Формат 60x84/16
Офсетная печать. Уч.изд.л.0,5 Тираж 170 экз..
Зак. тип. № 505

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, Маркаряна 2