

К-553

14-84-730

УДК 537.87

КОБЗЕВ
Александр Павлович

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ
ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА
В РАДИАТОРАХ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель : доктор физико-математических наук, академик И.М.ФРАНК.

Официальные оппоненты : доктор физико-математических наук, профессор В.Г.БАРЫШЕВСКИЙ, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник В.П.ЗРЕЛОВ.

Ведущая организация : Ордена Ленина Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР, Москва

Защита состоится " _____ " _____ 1985 года в _____ часов на заседании специализированного совета Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований по адресу : 141980, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1984 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА

Ю.В.ТАРАН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Около 50 лет назад в работе И.Е.Тамма и И.М.Франка / 1 / в рамках макроскопической теории поля была решена задача об излучении заряда, движущегося в бесконечной прозрачной среде. Эта работа заложила основы теории излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ), которое впоследствии нашло широкое применение в различного рода детекторах заряженных частиц и ряде других приложений. Но этим не исчерпывается значение данной работы. В ней впервые был дан способ учёта влияния поляризации среды на величину потерь энергии заряженной частицы в среде. Пользуясь данным методом в широком спектральном диапазоне, Э.Ферми / 2 / внёс существенное изменение в энергетическую зависимость потерь энергии заряженной частицы в среде (плато Ферми). Кроме того, влияние поляризации среды нашло своё выражение в эффекте плотности.

Как в основополагающей работе / 1 /, так и в расчётах энергетических потерь / 2 / рассматривалось движение частицы по бесконечной траектории. Решение задачи о переходном излучении / 3 / и, в частности, в пластинке, помещённой в вакуум / 4 /, эквивалентное учёту граничных условий в теории ИВЧ, привело к бурному развитию исследований этого явления. Появились перспективы использования переходного излучения для регистрации ультрарелятивистских частиц.

Вопрос о влиянии длины радиатора на свойства ИВЧ возникал уже в ранних работах / 5,6 /, но он стал особенно актуальным в связи с развитием исследований переходного излучения. И действительно, во всех практических приложениях, таких, как создание детекторов заряженных частиц, разработка излучателей для различных спектральных диапазонов, определение показателя преломления веществ и других, используются радиаторы конечной толщины. Расчёты же проводятся, как правило, в рамках теории Тамма-Франка для бесконечной траектории частицы. Из этой теории, в частности, следует, что при скорости частицы, меньшей фазовой скорости света в среде (до порога), ИВЧ отсутствует. В некоторых экспериментах достаточно чувствительная методика позволяла обнаружить излучение и ниже порога ИВЧ, но авторы относили его на счёт сопутствующих фоновых процессов.

В настоящей диссертации упоминаются известные свойства ИВЧ, но основное внимание сосредоточено на их особенностях, обусловленных конечной толщиной радиатора.

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

Цель работы – исследовать свойства ИВЧ в радиаторах конечной толщины и показать их изменение в зависимости от толщины радиатора, выраженной в длинах волн.

Новизна работы. Создана экспериментальная установка, обладающая широкими возможностями исследования свойств ИВЧ, возбуждаемого электронами в тонких радиаторах. С помощью этой установки впервые были выполнены:

1. Исследования формы угловых распределений излучения с длиной волны 2500, 3000, 4000, 5000 Å при толщине слюдяных радиаторов 10400, 12400, 25000, 41000, 77000 Å в области энергии электронов как выше, так и ниже порога ИВЧ.
2. Исследование отклонения положения максимума в угловых распределениях от характерного угла ИВЧ при различных энергиях электронов.
3. Исследование относительных зависимостей выхода излучения под углом 40° и полного выхода от энергии электронов.
4. Исследование влияния многократного рассеяния электронов в среде на свойства ИВЧ.

Из анализа экспериментальных результатов и сопоставления их с расчётами различных характеристик ИВЧ установлены новые факты:

1. Отсутствие порога ИВЧ при скорости частицы, равной фазовой скорости света в среде, для радиаторов конечной толщины.
2. Наличие двух скоростей частицы, отличающихся от фазовой скорости света в среде, одной из которых условно можно приписать пороговые свойства.
3. Нелинейная зависимость выхода излучения от толщины радиатора, проявляющаяся при малых (по сравнению с длиной волны) толщинах радиатора вдали от порога и при всё увеличивающихся толщинах по мере приближения к порогу.

Научная ценность. Экспериментально исследованы и подтверждены расчётами новые свойства ИВЧ, существенные для радиаторов конечной толщины.

Практическая ценность. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке различного рода черенковских детекторов и черенковских излучателей для различных спектральных диапазонов.

Публикации. В основу диссертации положены результаты шести работ /7-12/, опубликованных в виде статей в журналах "Ядерная физика" и "Приборы и техника эксперимента", а также в виде препринтов и сообщений ОИЯИ.

Апробации. Основные результаты диссертации доложены на научных семинарах Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Работа изложена на 98 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков, 2 таблицы. Библиография включает 63 наименования.

На защиту выносятся:

1. Методика исследования пространственных, спектральных, поляризационных, энергетических характеристик излучения, возбуждаемого электронами в радиаторах различной толщины.
2. Результаты исследования угловых распределений и относительных зависимостей выхода ИВЧ в радиаторах конечной толщины.
3. Результаты исследования влияния многократного рассеяния электронов в среде на направленность и поляризационные свойства ИВЧ.
4. Положение об отсутствии порога ИВЧ при скорости частицы, равной фазовой скорости света в среде, для радиаторов конечной толщины.
5. Формула для практических порогов ИВЧ и результаты ее экспериментальной проверки.
6. Положение о нелинейной зависимости выхода излучения от толщины радиатора.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении отмечается актуальность исследования зависимости свойств ИВЧ от толщины радиатора. Обсуждаются также вопросы соотношения между ИВЧ, переходным и тормозным излучениями. Отмечены общие моменты и некоторое различие между этими тремя видами излучения. Сформулирована цель работы, перечислены основные результаты.

В главе I дан краткий обзор исследований, имеющих непосредственное отношение к вопросу об ИВЧ в радиаторах конечной толщины. Излагается теория Тамма-Франка – решение задачи об излучении заряда, движущегося в прозрачной диэлектрике по бесконечной траектории. Приведены формулы для расчёта характеристик излучения, возбуждаемого зарядом, движущимся на конечном участке пути в бесконечной среде. Выполнено интегрирование по углам формулы для углового распределения ИВЧ в общем виде без каких-либо ограничений на длину траектории заряда в среде. В результате получена сумма элементарных функций, каждая из которых плавно изменяется во всём диапазоне возможных значений β и не обнаруживает каких-либо особенностей при скорости частицы, равной фазовой скорости света в среде. Подчёркнуто, что зависимость выхода излучения от длины траектории частицы оказывается

нелинейной при длинах, сравнимых с длиной волны излучения, а для скорости частицы, близкой к фазовой скорости света в среде, нелинейность сохраняется и при значительно больших длинах траектории частицы. Приведены формулы для расчёта излучения с ограниченной длины траектории частицы в среде, вышедшего в вакуум, а также излучения, возбуждаемого зарядом, пересекающим диэлектрическую пластинку, помещённую в вакуум. Рассмотрено влияние многократного рассеяния электронов в среде на свойства ИВЧ.

В главе II представлена методика экспериментального исследования свойств ИВЧ. Кратко описан ускоритель электронов с предельной энергией 300 кэВ. Подробно рассмотрена техника измерения различных характеристик излучения, возбуждаемого электронами в радиаторах, представляющих собой пластинки слюды, толщина которых в несколько раз больше длины волны исследуемого излучения. Описана оптическая система, позволяющая измерять угловые распределения узкого участка спектра излучения без перемещения монохроматора. Отмечено важное преимущество используемой методики по сравнению с применявшимися ранее для аналогичных задач. Оно заключается в том, что вклад катодolumинесценции в исследуемое излучение определяется не только в результате измерения поляризации, как это обычно делается, но, кроме того, привлекается критерий длительности затухания. Это достигается путём измерения времени задержки импульсов, соответствующих отдельным зарегистрированным фотонам, относительно момента попадания короткого сгустка электронов на радиатор.

Описаны также различного рода калибровочные измерения, а именно: измерение относительной зависимости чувствительности регистрирующего устройства от угла наблюдения, спектральная калибровка монохроматора и определение временной аппаратной функции разрешения.

В заключение главы рассмотрены вопросы измерения толщины радиаторов и вычисления показателя преломления для слюды в исследуемом спектральном диапазоне.

В главе III излагаются результаты экспериментального исследования различных характеристик ИВЧ и проводится сопоставление их с расчётными зависимостями. Были измерены угловые распределения излучения с длиной волны 4000 Å и 5000 Å с помощью слюдяного радиатора толщиной 10400 Å. Измерения проводились для энергии электронов как выше, так и ниже порога, положение которого в соответствии с теорией Тамма-Франка определяется известным соотношением между скоростью частицы и показателем преломления среды:

$$\beta = \frac{1}{n} \quad (I)$$

Наблюдались (рис. I) довольно широкие угловые распределения, которые хорошо описываются кривыми, рассчитанными по формуле для излучения, возбуждаемого в пластинке, помещенной в вакуум, при прохождении через неё заряженной частицы. Положение максимума как рассчитанного углового распределения, так и экспериментально наблюдаемой зависимости существенно отличалось от характерного угла ИВЧ, который с учётом преломления света на границе слюда-вакуум определяется формулой:

$$\sin \theta_0 = \sqrt{n^2 - \frac{1}{\beta^2}} \quad (2)$$

Подробно исследовались угловые распределения вблизи порога (I). Форма их не претерпевает каких-либо изменений при переходе от скоростей частицы, больших фазовой скорости света в среде, к существенно меньшим скоростям. Главный максимум в угловом распределении, который обычно связывают с ИВЧ, плавно перемещается в сторону малых углов при уменьшении энергии электронов и достигает угла 0° при энергии значительно ниже пороговой (рис. 2), определяемой из условия (I). Этот результат непосредственно следует из анализа угловых распределений ИВЧ. В диссертации показано, что существуют две скорости частицы, одну из которых можно условно принять в качестве практического порога ИВЧ для радиатора толщиной a :

$$\beta_{1,2} = \frac{1}{n \pm \frac{a}{\lambda}} \quad (3)$$

На рис. 2 экспериментальная зависимость и расчётные кривые указывают на реализующийся при данных условиях практический порог со знаком плюс в формуле (3), который находится при значительно более низкой энергии, чем порог, определяемый из условия (I).

Отсутствие каких-либо экспериментально наблюдаемых эффектов, которые указывали бы на наличие порога при скорости частицы, равной фазовой скорости света в среде, подтверждает зависимость выхода излучения под углом 40° от энергии электронов (рис. 3). Расчётная и экспериментальная зависимости имеют плавный ход и дают величину выхода для пороговой энергии, определяемой из условия (I), около 15 % от максимального. Аналогичный характер имеет и зависимость полного выхода от энергии электронов.

Эксперименты с радиаторами толщиной 41000 Å и 77000 Å при энергии электронов 170-250 кэВ показали сильное влияние многократного рассеяния электронов на свойства возбуждаемого ими ИВЧ. Ширина угловых распределений существенно возрастает по сравнению с дифракционной, степень поляризации уменьшается. Экспериментально на-

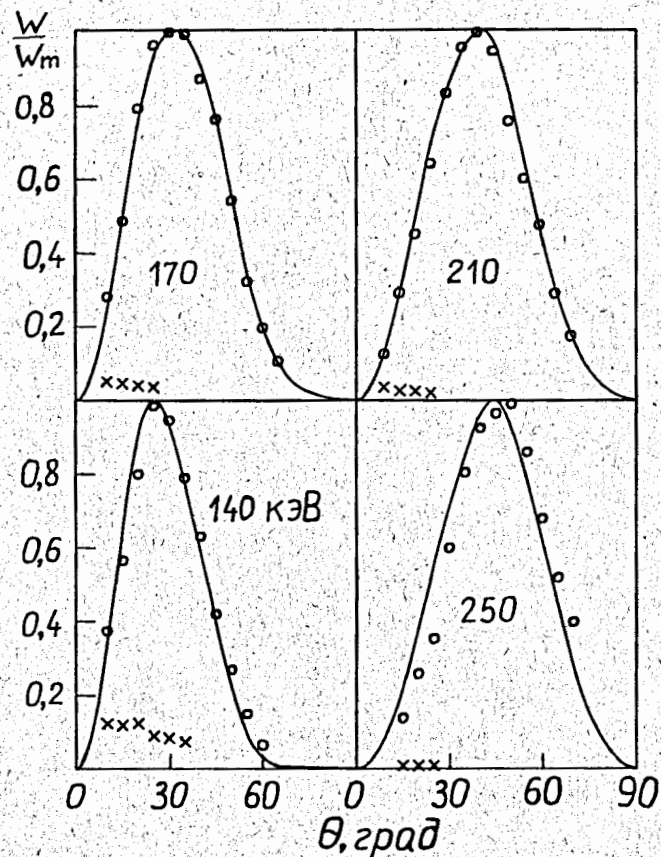


Рис. 1.

Нормированные к максимуму угловые распределения излучения с длиной волны 4000 \AA при толщине радиатора 10400 \AA . Сплошной линией показан расчёт по формуле для излучения в диэлектрической пластинке. Экспериментальные точки для двух направлений поляризации: электрический вектор в плоскости наблюдения (\circ) и в перпендикулярной плоскости (\times).

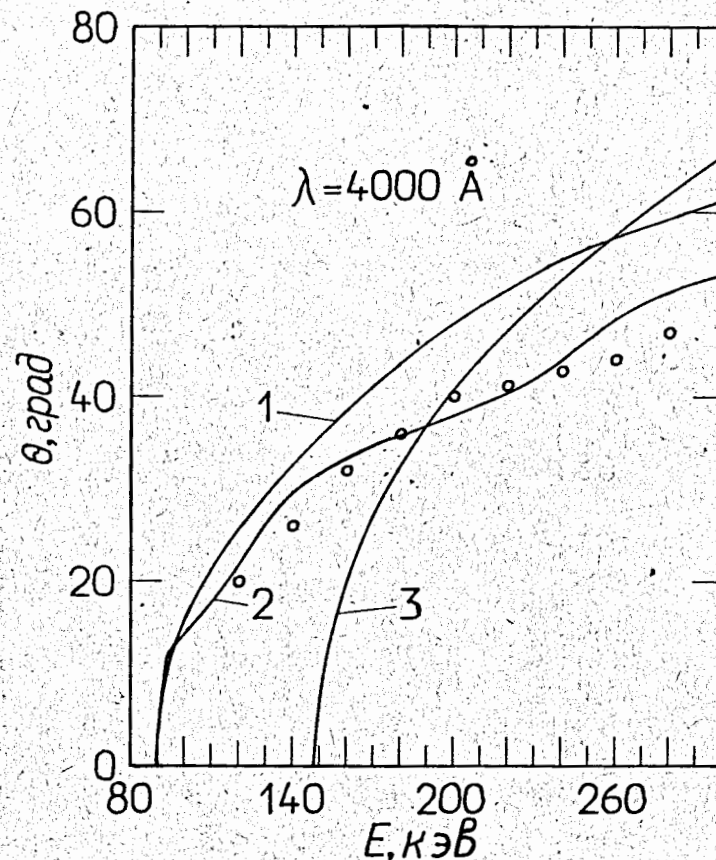


Рис. 2.

Зависимость положения максимума в угловом распределении от энергии электронов: кривая 1 - расчёт по формуле для излучения с ограниченного участка траектории в среде, кривая 2 - по формуле для излучения в диэлектрической пластинке, кривая 3 - по формуле (2), точки - экспериментальные результаты.

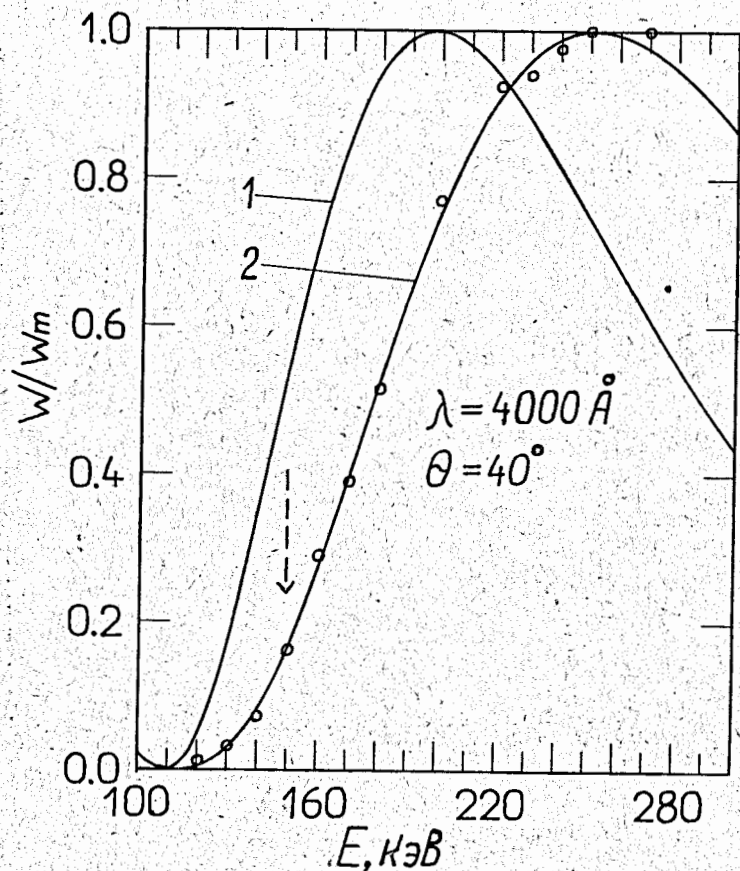


Рис.3.

Относительная зависимость выхода излучения под углом 40° от энергии электронов. Кривая 1 - расчёт по формуле для излучения с ограниченного участка траектории частицы в среде; кривая 2 - по формуле для излучения в диэлектрической пластинке; точки - экспериментальные результаты. Стрелкой показана пороговая энергия, определяемая из условия (1).

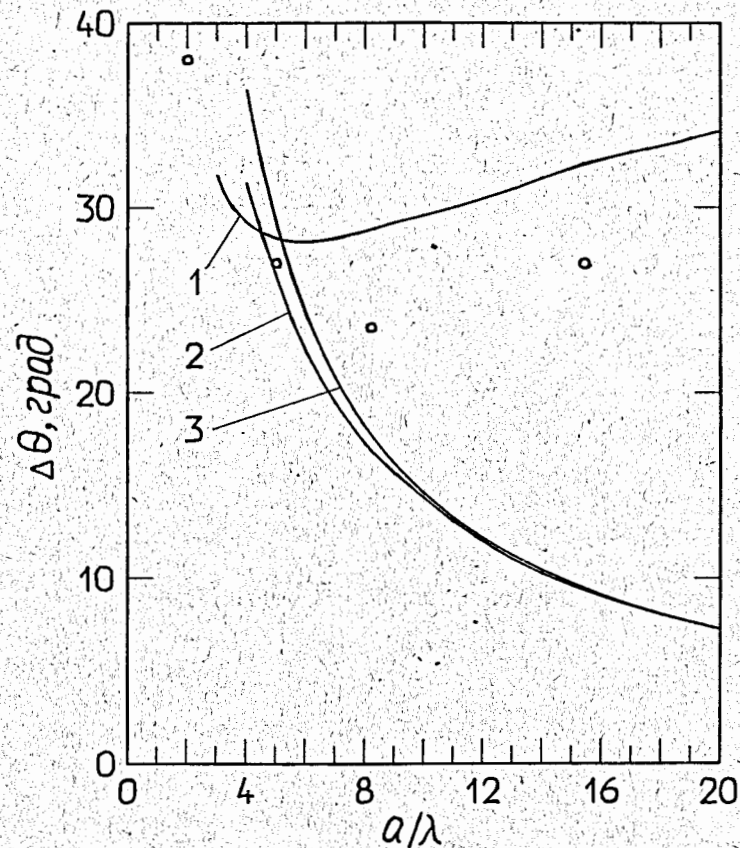


Рис.4.

Зависимость полуширины угловых распределений от толщины радиатора для энергии электронов 210 кэВ и длины волны 4000 Å. Кривая 1 - расчёт по формуле, учитывающей многократное рассеяние электронов в среде; кривая 2 - дифракционная полуширина угловых распределений; кривая 3 - расчёт по формуле для излучения в диэлектрической пластинке; точки - экспериментальные результаты.

блюдаемые угловые распределения согласуются с расчётными, как для излучения, поляризованного в плоскости наблюдения, так и для излучения, поляризованного в перпендикулярной к ней плоскости, когда в расчётах учитывается влияние многократного рассеяния электронов. Согласие экспериментальных и расчётных результатов свидетельствует,

кроме того, об отсутствии заметного вклада каких-либо сопутствующих процессов излучения, отличных по характеру от ИВЧ.

Зависимость полуширины угловых распределений от толщины радиатора для энергии электронов 210 кэВ (рис. 4) показывает также сильное влияние многократного рассеяния электронов на направленность ИВЧ. При толщине радиатора больше 5λ полуширина угловых распределений резко возрастает по сравнению с дифракционной. Тем не менее уменьшение полуширины с ростом $\frac{Q}{\lambda}$ удалось наблюдать при измерении угловых распределений в широком спектральном диапазоне от 2500 до 5000 Å.

ВЫВОДЫ

Свойства ИВЧ для радиаторов конечной толщины существенно отличаются от широко известных характеристик, вытекающих из теории Тамма-Франка, в которой рассматривается движение заряда по бесконечной траектории в неограниченной среде. В работе экспериментально подтверждены известные ранее свойства ИВЧ:

1. Угловые распределения имеют дифракционный характер с главным максимумом.

2. Полуширина главного максимума уменьшается с увеличением отношения $\frac{Q}{\lambda}$.

3. Положение главного максимума приблизительно следует зависимости (2), но может существенно отличаться от неё, причём отличие уменьшается с возрастанием $\frac{Q}{\lambda}$.

Обнаружены новые свойства ИВЧ, некоторые из них подтверждены экспериментально:

1. Для радиаторов конечной толщины отсутствует порог ИВЧ при скорости частицы, равной фазовой скорости света в среде.

2. Имеются две характерные скорости частицы, одна из которых может быть условно принята в качестве практического порога.

3. Зависимость полного выхода ИВЧ от длины радиатора нелинейна при малых значениях $\frac{Q}{\lambda}$, нелинейность сохраняется для всё больших значений $\frac{Q}{\lambda}$ по мере приближения скорости частицы к фазовой скорости света в среде.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тамм И.Е., Франк И.М. Когерентное излучение быстрого электрона в среде. - Докл. АН СССР, 1937, т.14, №3, с. 107-113.

2. Fermi E. The Ionization Loss of Energy in Gases and in Condensed Materials. - Phys.Rev., 1940, v.57, p.485-493.
3. Гинзбург В.Л., Франк И.М. Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую. - Ж.эксперим. и теор.физ., 1946, т.16, вып.1, с. 15-28.
4. Пафомов В.Е. Излучение электрона, пролетающего через пластинку. - Ж.эксперим. и теор.физ., 1957, т.33, вып.4(10), с.1074-1075.
5. Франк И.М. Явление интерференции для радиации Черенкова. - Докл. АН СССР, 1944, т.42, №8, с.354-358.
6. Tamm I.E. Radiation Emitted by Uniformly Moving Electrons. - J.Phys. USSR, 1939, v.1., p.439-461.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

7. Богдзель А.А., Кобзев А.П., Рутковски Е. Отделение катодолуминесценции от переходного излучения по времени высвечивания. - Дубна, 1974.-9с. (Препринт/Объед.ин-т ядер.исслед.: П13-8226); Приборы и техн.экспер., 1975, т.5, с.61-63.
8. Кобзев А.П. Установка для исследования переходного излучения. - Дубна, 1977. - 16с. (Сообщения/Объед.ин-т ядер.исслед.: П13-10385).
9. Кобзев А.П. К вопросу о направленности излучения Вавилова-Черенкова. - Дубна, 1977. - 12с. (Препринт/Объед.ин-т ядер.исслед.: П14-10925); Ядер.физ., 1978, т.27, вып.5, с. 1256-1261.
10. Кобзев А.П., Пафомов В.Е., Франк И.М. Угловые распределения излучения Вавилова-Черенкова, возбуждаемого в слюде электронами с энергией 170-250 кэВ. - Дубна, 1978, - 23с. (Препринт/Объед.ин-т ядер.исслед.: П14-11638); Ядер.физ., 1979, т.29, вып.1, с. 122-132.
11. Кобзев А.П., Франк И.М. Спектральная зависимость полуширины угловых распределений излучения Вавилова-Черенкова. - Дубна, 1979, - 11с. (Препринт/Объед.ин-т ядер.исслед.: П14-12653); Ядер.физ., 1980, т.31, вып.5, с. 1253-1258.
12. Кобзев А.П., Франк И.М. Некоторые особенности излучения Вавилова-Черенкова, связанные с конечной толщиной радиатора. - Дубна, 1980, - 11с. (Препринт/Объед.ин-т ядер.исслед.: П14-80-793); Ядер.физ., 1981, т.34, вып.1(7), с. 125-133.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 ноября 1984 года.