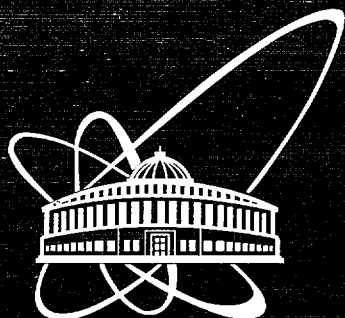




XJ0400056



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Дубна

P13-2003-234

А. А. Мальцев, М. А. Мальцев, М. В. Маслова

**КАЛИБРОВКА ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ИНФРАКРАСНОГО СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Направлено в журнал «Измерительная техника»

2003

Излучение кольцевых ускорителей – генераторов синхротронного излучения – широко используют для дистанционной диагностики, в частности для измерения числа элементарных заряженных частиц, участвующих в процессе ускорения. Интенсивность W синхротронного излучения пропорциональна числу заряженных частиц N_e :

$$W = wN_e,$$

где w – поток синхротронного излучения одной частицы.

Точность абсолютных измерений потока синхротронного излучения, а значит, и определения числа релятивистских заряженных частиц в ускоряемом сгустке определяется точностью калибровки измерительного канала с детектором. В данной статье рассмотрен метод калибровки детекторов инфракрасного синхротронного излучения на тепловом источнике, в качестве которого использован вольфрамовый "серый излучатель" [1, 2].

Цель представленной работы – исследование характера изменения интегральной чувствительности инфракрасных детекторов при изменении спектрального состава и интенсивности регистрируемого излучения. Актуальность задачи связана с тем, что интенсивность синхротронного излучения в основном сосредоточена в инфракрасной области, а спектральный состав может меняться в широких пределах вследствие изменения энергии электронов E , радиуса их орбиты R и числа ускоряемых частиц N_e в сгустке.

Для определения параметров и измерительного контроля синхротронного излучения в спектральной области длин волн 0,4 – 9 мкм и измерения абсолютного числа электронов в диапазоне 10^8 – 10^{13} частиц в кольцевом сгустке, сжимаемом в АДГЕЗАТОРЕ (адиабатическом

генераторе заряженных торов) [2], были отобраны и хорошо себя зарекомендовали в ускорительном эксперименте неохлаждаемые фотодетекторы из кремния и селенида свинца, а также охлаждаемые до температуры жидкого азота из сурьмянистого индия и германия, легированного золотом [3]. Фотодетекторы выбирали с учетом целей и задач, определяемых ускорительным экспериментом, а также временных, спектральных и радиационных параметров излучения. Эти детекторы существенно различаются своими спектральными характеристиками, исполнением и должны обеспечивать:

- регистрацию быстропротекающих ($\tau \approx 1$ мкс) процессов;
- диагностику и измерения интенсивности синхротронного излучения в спектральном диапазоне длин волн $\Delta\lambda \approx 0,4 \dots 9$ мкм (когда максимум спектрального распределения λ_{\max} меняется от 1 до 3 мкм) при возможности синхронного измерения потока синхротронного излучения на разных, не перекрывающихся участках его спектрального распределения;
- длительную работоспособность в условиях высокого уровня постоянных и импульсных электромагнитных и радиационных помех.

Второе условие связано с возможностью охвата более широкого спектрального диапазона ($\Delta\lambda / \lambda \gg 1$) по сравнению с тем, что используют в метрологии [4, 5] (оптический синхротронный метод измерения числа ускоряемых электронов, где $\Delta\lambda / \lambda = 1$), с целью повышения точности абсолютных измерений интенсивности синхротронного излучения [6], по которой определяется число релятивистских заряженных элементарных частиц.

Оптический метод измерений числа ускоряемых электронов и передачи размера единицы спектральной плотности энергетической

яркости эталонным излучателям основан на принципе "дифференциального фотометра". Реализующая оптический синхротронный метод конструкция измерительной установки (компаратора) [4] для воспроизведения единицы спектральной плотности энергетической яркости и передачи ее размера позволяет измерять число электронов в импульсе ускорения сравнением на длине волны 0,55 мкм синхротронного излучения с излучением ленточной вольфрамовой лампы СИ-10-300У, прокалиброванной по модели черного тела. Передача размера единицы спектральной плотности энергетической яркости от синхротрона эталонному излучателю вакуумного ультрафиолета и измерение тока ускорителя осуществляются на компараторе яркости в одном цикле ускорения.

Для повышения точности измерения потока синхротронного излучения (а значит, и точности определения числа электронов N_e в сгустке) был разработан специальный метод [2], в соответствии с которым в коротковолновой спектральной области $\lambda < \lambda_{\max}$, где мощность синхротронного излучения w зависит от энергии электронов E как $w \sim E^2$, излучение регистрировали оптическим детектором, например фотодиодом из кремния ($\Delta\lambda \approx 0,4 \dots 1,1$ мкм), а в длинноволновой области $\lambda > 2\lambda_{\max}$, где интенсивность синхротронного излучения практически не зависит от энергии электронов, – например фотоспротивлением из селенида свинца ($\Delta\lambda \approx 0,6 \dots 4,8$ мкм), т. е. использовали фотоприемники, существенно различающиеся характером спектральной чувствительности.

В качестве эталонных источников служили модель черного тела и вторичный эталонный источник на основе светоизмерительной вольфрамовой лампы [7].

Спектральное распределение плотности теплового излучения описывается законом Планка подобно спектральному распределению синхротронного излучения при одинаковых максимумах $\lambda_{\max}^{\text{СИ}} = \lambda_{\max}^{\text{ТИ}}$. На рис. 1 приведены в относительных единицах спектральные распределения интенсивности синхротронного излучения электронов с энергией $E = 20,1$ МэВ и радиусом орбиты $R = 3,58$ см и теплового излучения вольфрама при температуре $T = 2680$ °С. В обоих случаях максимум спектрального распределения приходится на длину волны $\lambda_{\max} = 1,2$ мкм.

Основные отличия предлагаемого в [2] метода от оптических синхротронных методов калибровки детектирующих систем по тепловому источнику излучения, применяемых в метрологии [4, 5], заключаются в использовании:

- широкой полосы оптического спектра, включающей в себя основную часть потока источника излучения;
- относительного соответствия максимумов λ_{\max} спектральных распределений мощности исследуемого источника излучения, например сгустка релятивистских электронов, и эталонного калибровочного источника, например теплового вольфрамового излучателя;
- галогенных кварцевых ламп в качестве калибровочных эталонных источников, наряду со светоизмерительными вольфрамовыми лампами накаливания.

Калибровка детекторов проведена в узкой полосе спектрального диапазона $\Delta\lambda/\lambda = 1$ на температурном эталонном источнике с фиксированной температурой, которая составляла 2360 и 2848 К для видимого диапазона длин волн и 100 – 500 °С для инфракрасного, либо на лазерном источнике с фиксированной длиной волны λ .

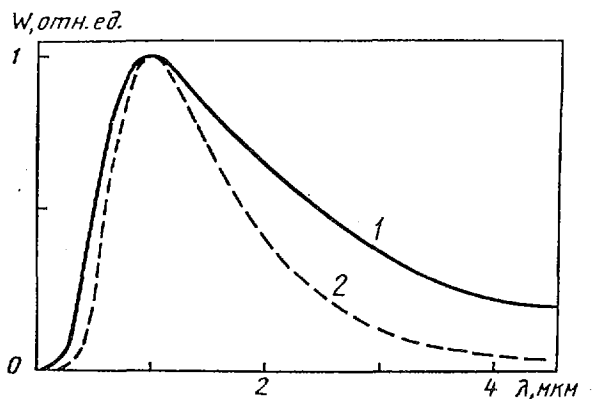


Рис. 1. Спектральная плотность потока излучения:
 1 – синхротронного излучения ($E = 20,1$ МэВ, $R = 3,58$ см); 2 – теплового излучения вольфрама ($T = 2680$ К)

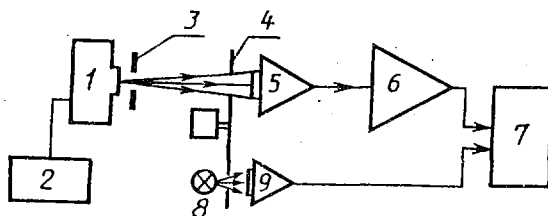


Рис. 2. Структурная схема стенда для калибровки фотоприемников – детекторов синхротронного излучения по температурному эталону:
 1 – источник стабилизированного питания лампы; 2 – вольфрамовая лампа;
 3 – диафрагма; 4 – дисковый модулятор; 5 – калибруемый детектор; 6 – усилитель; 7 – электронные блоки обработки информации; 8, 9 – приемник и источник синхронизирующих сигналов соответственно

Из условия соответствия максимумов спектрального распределения теплового и синхротронного излучений можно определить температуру T , К, эталонного источника, которая соответствовала бы излучению релятивистского электрона с заданными энергией E и радиусом орбиты вращения R , мкм. Для источника с вольфрамовым излучателем это соответствие может быть представлено выражением [8]

$$T = 1565 \gamma^3 / R.$$

Здесь $\gamma = E/mc^2$ – релятивистский фактор, где m , c – масса электрона и скорость света соответственно.

Схема стенда с тепловым эталонным источником – вольфрамовой лампой накаливания – и калибруемым измерительным каналом с фотоприемником приведена на рис. 2. Поток теплового излучения 1 от температурного стабилизированного сильноточного источника 2 ограничивается диафрагмой 3, модулируется механическим прерывателем (затвором) 4 и попадает на калибруемый приемник с предусилителем 5. По кабельной линии связи аналоговый сигнал передается на электронные блоки, выполненные в стандарте КАМАК, где усиливается в блоке 6 и обрабатывается в блоке 7, преобразующем аналоговый сигнал в цифровой код. Дальнейшая обработка сигнала проводится на ЭВМ. Для обеспечения стабильности работы измерительного канала предусмотрена система синхронизации, включающая источник света 8 и фотоприемник с предусилителем 9.

Модулируемый поток излучения от эталонной лампы попадает на приемник калибруемого измерителя. Механический модулятор представляет собой диск диаметром 300 мм с прямоугольным отверстием (щелью) шириной 0,8 мм на краю. Для обеспечения длительности импульса

излучения $\Delta t \approx 1$ мс выбрана частота $f \approx 30$ Гц, что соответствует частоте и длительности импульса синхротронного излучения на ускорителе.

Для синхронизации измерительно-регистрирующей аппаратуры (блока управления, ЭВМ, осциллографа) использован электрический импульс, привязанный к фазе светового импульса. Синхроимпульс формируется оптопарой, состоящей из лампы (НСМ 6-20) и фотодетектора (фототранзистор ФТГ-5), устанавливаемых на корпусе модулятора с разных сторон диска. С помощью двух транзисторов (КТ315) и операционного усилителя (К 140 УД 1Б) сигнал с выхода фотодетектора усиливается, формируется в виде короткого (5 мкс, 5 В) импульса и подается на вход синхронизации измерительно-регистрирующих блоков.

Эталонная лампа и модулятор могут свободно перемещаться вдоль оптической оси относительно жестко закрепленного фотоприемника. Перемещение лампы относительно фотодетектора обеспечено с погрешностью не более $\pm 0,5$ мм в пределах 250–1100 мм.

Для уменьшения числа трудно учитываемых факторов, влияющих на точность измерений, условия, в которых используется эталонный источник для калибровки прецизионных детекторов, максимально приближены к условиям регистрации синхротронного излучения на ускорителе. В данном случае диаметр выделяемой излучающей области составляет примерно 2 мм, расстояние до детектора $l = 1000$ мм, угол – 2 мрад.

Возможность изменения спектрального состава и интенсивности теплового излучения на чувствительной поверхности калибруемого приемника обеспечивается набором отрезающих фильтров из инфракрасных оптических материалов [9, 10]: германия, оптической керамики, бескислородного стекла и нейтральных поглотителей, а также

изменением расстояния между источником и приемником. Это позволяет вести регистрацию на линейном участке градуировочной характеристики измерительного канала.

Проведены исследования характеристик ламп с целью определения и сравнения возможностей их использования. В этих исследованиях в качестве вторичного эталонного источника использовали светоизмерительную лампу накаливания СИ 10-300У с вольфрамовым излучателем в виде пластины размером 2,72 x 19,7 мм. В качестве средства измерений спектральной плотности энергетической яркости применяли лампу. Длинноволновая граница потока излучения, пропускаемого колбой лампы, изготовленной из увиолевого стекла, составляла около 2,7 мкм. Для исключения грубого промаха при выходе эталонной лампы из строя предусмотрены запасные вольфрамовые лампы СИРШ 6-40 и СИРШ 6-100, регулярно сличаемые при проведении плановых калибровок.

Для работы с длинноволновым инфракрасным излучением ($\lambda > 3$ мкм) использована эталонная лампа накаливания с кремниевым окном (ИК 4-1,2) производства Саранского объединения «СВЕТОТЕХНИКА». Цветовая температура лампы при номинальном напряжении 3,91 В составляла 2360 К, потребляемая мощность – 1,1 Вт, тело накала – вольфрамовая спираль диаметром 0,331 мм и длиной 1,91 мм. Кремниевое окно закреплено в торцевой части цилиндрической колбы из кварцевого стекла, что позволяет применять лампу в видимом диапазоне спектра, а также определять температуру излучателя с помощью оптического пирометра.

Кроме двух основных эталонных ламп при измерениях использовали лампы СИРШ 6-40 и СИРШ 6-100 (2x8 мм), а также кварцевые малогабаритные галогенные лампы КИМ 12-100 и КГМ 12-100 (12 В, 100

Вт); КИМ 12-40 (12 В, 40 Вт). Тело накала галогенных ламп – плоская спираль из вольфрама с излучающей поверхностью, например для лампы КИМ 12-40, 1,5 x 3 мм.

В качестве источника питания для сильноточных вольфрамовых ламп выбран стабилизатор тока (9 В, 200 А), предназначенный для относительно низкоомных нагрузок. В источнике применена схема стабилизации с отрицательной обратной связью по току. Для измерения тока использован измерительный шунт ШСМ 75 А, а в качестве регулирующего транзисторного элемента – один блок на 50-ти транзисторах П210. Схема стабилизатора на основе операционных усилителей типа К140УД1В и высокостабильного параметрического источника опорного напряжения обеспечивает постоянство и повторяемость задаваемых выходных токов с погрешностью 0,1 %. В стабилизаторе тока имеется режим автоматического ввода и вывода тока со скоростью 0,02 – 4 А/с с цифровым интегратором, позволяющим осуществлять автоматическое цифровое управление опорным напряжением и задавать ток с цифровой индикацией его значения в десятичном коде. Нестабильность блоков питания для вольфрамовой лампы и пирометра не превышает 0,01 % за 8 ч работы.

Рабочая спектральная область, в которой можно использовать вольфрамовую лампу в качестве эталонного источника, ограничена и определяется оптическими свойствами материала стенок колбы лампы (как, например, в СИРШ 6-100) или окна лампы (как в СИ 10-300У). При калибровке даже эталонных ламп их спектральные характеристики либо вообще не указывают, либо указывают только коротковолновую границу, как в случае электрических светоизмерительных широкодиапазонных рабочих ламп накаливания типа СИРШ.

Так как спектральные характеристики оптических материалов, из которых изготовлены баллоны имеющихся в нашем распоряжении ламп, неизвестны (как правило, их не указывают), то были проведены специальные исследования спектральных характеристик этих материалов. С учетом того, что стеклянные колбы исследуемых ламп изготовлены практически из однотипного материала с близкими оптическими свойствами, за основу взяты увиолевое стекло толщиной 1 мм, из которого выполняют баллоны светоизмерительных ламп типа СИРШ, и кварцевое стекло марки КВ 12/3-57 толщиной 19 мм.

Спектральное пропускание стекол измеряли на инфракрасном спектрофотометре ИКС-22. Результаты представлены на рис. 3. Несмотря на большую разницу в толщине образцов, отличия в их пропускании незначительны, хотя и очевидно преимущество кварцевых стекол, выражающееся как в более высоком коэффициенте пропускания, так и в длинноволновой границе (примерно 2,9 мкм). Погрешность измерений составляла $\pm 0,5$ %.

Известно, что синхротронное излучение имеет выраженные поляризационные свойства. Проведены исследования этих свойств стекол и приемников излучения. Полученные результаты показали, что отсутствует зависимость откликов детекторов излучения и пропускания промежуточных оптических элементов, используемых при измерениях, от поляризации регистрируемого излучения.

Изучению поверхности излучателей уделено особое внимание, так как от этого зависит точность расчета потока излучения. С этой целью вблизи излучающей поверхности устанавливали подвижный экран со щелью-коллиматором размером 0,17 x 2 мм. Экран мог перемещаться в плоскости, параллельной исследуемой поверхности, с помощью двух

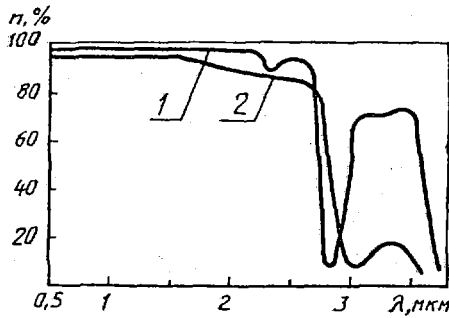


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания кварцевого окна для вывода синхротронного излучения (1) и увиолевой стенки колбы светоизмерительной лампы (2) от длины волны

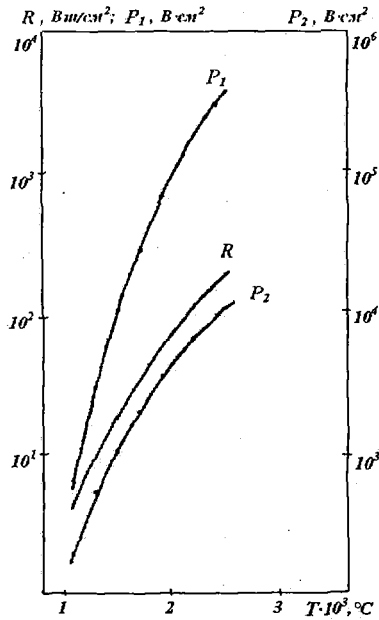


Рис. 4. Зависимость сигнала с детекторов Si (P_1) и PbSe (P_2) от температуры излучателя и расстояния до него:

R – мощность излучения вольфрамового источника; P_1 – реакция кремниевого фотодиода на изменение температуры и мощности излучения соответственно; P_2 – реакция неохлаждаемого фотосопротивления из селенида свинца на изменение температуры и мощности источника соответственно

микрометрических винтов с погрешностью фиксации положения $\leq 0,1$ мм. Интенсивность лучистого потока с неэкранированного участка определяли оптическим пирометром ЭОП-66 или по электрическому сигналу с выхода инфракрасного детектора. Такой детектор обладает более высоким пространственным разрешением и необходим, когда температура исследуемого источника ниже 700 °С (визуальная граница) или окно на источнике непрозрачно для видимого излучения.

Изучен также характер зависимости распределения температуры по длине излучающей поверхности. Оптическим пирометром ЭОП-66 визуально определяли температуру в центре средней части пластины излучателя, которую затем сравнивали с температурой на краях. Отмечено, что для светоизмерительных ламп с ленточным излучателем СИ 10-300У и СИРШ 6-100 края ленты (по ее длине) имели температуру на 2–3 % ниже, чем центральная часть. Непостоянство температуры вольфрамовой ленты размером 2 x 2 мм по ширине не превышало $\pm 0,5$ %, в центральной зоне, являющейся рабочей частью ленты, – $\pm 0,3$ %.

Характер зависимости распределения температуры вдоль вольфрамового излучателя с телом накала, выполненным в виде спирали, совпадает с результатом исследования ленточных излучателей. Измерения проводили вдоль спирали эталонного источника ИК 4-1,2 с окном из кремния. Экран с коллиматором располагали в непосредственной близости от кремниевого окна на расстоянии 1 мм. Судя по полученным данным, температура большей части спирали отличалась не более чем на $\pm 0,1$ %, и при расчетах излучаемой мощности эту часть тела накала можно принимать за сплошной цилиндр. Подобные результаты получены и для кварцевых галогенных ламп.

Полная плотность $Q(T)$ и спектральная плотность $q(\lambda, T)$ потока с единичной площадки излучателя могут быть представлены в следующем виде:

$$Q(T) = s\varepsilon(T)\sigma T^4;$$

$$q(\lambda, T) = \rho(\lambda, T)C_1\lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T - 1)]^{-1}, \quad (1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·град⁴) – постоянная Стефана–Больцмана; $\rho(\lambda, T)$ – коэффициент излучения вольфрама; $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-12}$ Вт·см²; $C_2 = 1,438 \cdot 10^4$ мкм·град. Значение коэффициента $\varepsilon(T)$ для вольфрама взято из таблиц в [1].

Расчетные значения мощности P , потребляемой (рассеиваемой) лампой накаливания, полученные в результате измерений тока I и напряжения U , отличаются от мощности излучения, рассчитанной по (1), на 7 %, что подтверждает данные, приводимые в [11, 12]. Таким образом, для оперативной оценки излучаемой мощности расчет можно проводить по электрическим параметрам. Калибровка лампы по оптическому пирометру позволяет получить зависимости $T = f(I, U)$ и зафиксировать необходимую температуру T , установив ток I и напряжение U . Соответствие потока излучения потребляемой электрической мощности проверяли на лампах с излучателями в виде ленты и спирали.

Результаты калибровок, приведенные на рис. 4, представляют собой зависимости амплитуд сигнала с выходов детекторов Si (P_1) и PbSe (P_2) от температуры T излучателя (вольфрамовой ленты). Разный характер зависимостей объясняется различной спектральной чувствительностью детекторов. На этом же рисунке показана зависимость излучаемой

мощности R с одного квадратного сантиметра поверхности тела накала от температуры.

Средняя квадратическая погрешность измерений амплитуд сигналов инфракрасных детекторов составляла 0,2 %, измерения относительных коэффициентов использования спектров теплового и синхротронного излучений (пропускания оптических сред, промежуточных между источником излучения и детектором) – 2 %, определения расстояния между детектором и излучателем – 0,4 %, измерения площади излучателя – 3 %. Погрешность определения спектральной плотности энергетической яркости излучения вольфрамовой ленточной лампы в основном обусловлена погрешностью калибровки этой лампы по модели абсолютно черного тела. Средняя квадратическая погрешность калибровки вольфрамовой ленточной лампы СИ-10-300У, служащей в качестве основного эталонного источника, по модели абсолютно черного тела на длине волны 0,55 мкм составляла в среднем 1,5 % и не превышала 4 %. Погрешности, связанные с поляризационными свойствами излучения, не учитывали. Специально проведенные исследования не обнаружили зависимости откликов детекторов излучения и пропускания промежуточных оптических элементов от состояния поляризации регистрируемых излучений.

Таким образом, суммарная погрешность метода калибровки прецизионных измерителей числа ускоряемых элементарных релятивистских частиц (электронов или протонов) на тепловом источнике в широком спектральном диапазоне позволяет определять чувствительность измерителя при различных энергиях ускоряемых частиц и радиусах их орбит.

Использование для калибровки и измерений на ускорителе спектральной области $\Delta\lambda / \lambda \gg 1$ повышает точность измерения числа ускоряемых заряженных частиц в сгустке (тока) за счет повышения точности измерения интенсивности излучения по сравнению с обычно используемой областью $\Delta\lambda/\lambda = 1$.

В заключение необходимо отметить, что в представленной работе продемонстрирована возможность успешного применения для калибровки детекторов инфракрасного синхротронного излучения в качестве вторичных эталонных источников вольфрамовых ламп накаливания. Полученные результаты могут служить справочным материалом. Описанный стенд отличается конструктивной простотой и универсальностью.

Широкий набор эталонных источников, гибкость стратегии калибровок при оперативности их проведения являются существенными преимуществами разработанного метода по сравнению с известными способами измерения чувствительности фотоприемных устройств.

С точки зрения разработки методов испытания информационно-измерительных систем и определения их основных характеристик (чувствительности к падающему на детектор потоку излучения, погрешности и т. п.), рассматриваемая в представленной работе задача интересна тем, что при ее решении основное внимание уделено специфическим условиям калибровки, информация о которых может быть полезна физикам-экспериментаторам при проектировании подобных измерительных систем и их практическом применении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свет Д. Я. Температурные излучения металлов и некоторых веществ. – М.: Металлургия, 1964.
2. Мальцев А. А. Методика измерения тока электронных колец КУТИ по синхротронному излучению в ИК-области: Сообщения ОИЯИ. – Дубна, 1986.
3. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Пер. с англ.; Под ред. В. И. Стафеева. – М.: Радио и связь, 1985.
4. Великанов С. П. и др. // Измерительная техника. – 1976. – № 9. – С. 34.
5. Аневский С. И. и др. // Измерительная техника. – 1977. – № 10. – С. 3.
6. Мальцев А.А., Мальцев М.А. // Атомная энергия. – 1995. – Т. 79. – Вып. 2. – С. 121.
7. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел. – М.: Наука, 1965.
8. Мальцев А. А., Мальцев М. А. // Измерительная техника. – 1995. – № 10. – С. 67.
9. Вольнец Ф. К. // Оптико-механическая промышленность. – 1973. – № 10. – С. 47.
10. Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В. Оптические постоянные природных и технических сред. – Л.: Химия, 1984.
11. Козелкин В.В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники. – М.: Машиностроение, 1967.
12. Левитин И.Б. Инфракрасная техника. – Л.: Энергия, 1973.

Получено 18 декабря 2003 г.

Мальцев А. А., Мальцев М. А., Маслова М. В.
Калибровка прецизионных детекторов
инфракрасного синхротронного излучения

P13-2003-234

Описана методика калибровки прецизионных детекторов синхротронного инфракрасного излучения, основанная на применении вольфрамовой лампы, а также на сходстве спектральных распределений синхротронного и теплового излучений. Приведены характеристики вторичных источников, использованных в качестве эталона. Проанализированы погрешности измерений.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Maltsev A. A., Maltsev M. A., Maslova M. V.

P13-2003-234

Precision Calibration of Infrared Synchrotron Radiation Detectors

The technique of calibration of synchrotron radiation precision detectors on a tungsten source based on similarity (close similarity) of character of spectral distributions of synchrotron and thermal radiations is given. The characteristics of various commonly used lamps, used as «standard» ones, are given. The errors of measurements are analyzed. The detectors are intended for absolute measurements of the number of electrons in a ring-shaped bunch.

The investigation has been performed at the Veksler–Baldin Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

Редактор *О. Г. Андреева*
Макет *Е. В. Сабатовой*

Подписано в печать 12.01.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 0,74. Тираж 305 экз. Заказ № 54258.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/