Министерство общего
и профессионального образования РФ
Новосибирский Государственный Университет

Никулин Максим Александрович
Терехов Иван Сергеевич

Определение относительной квантовой эффективности мультищелочного фотокатода

курсовая работа

Новосибирск, 1999

Аннотация

В данной работе описано измерение относительной квантовой эффективности мультищелочного фотокатода ФЭУ-100 с кварцевым окном. Это было необходимо для создания автоматизированной спектрометрической установки, которая используется в обсерватории «Вега». В литературе спектральная характеристика либо отсутствует, либо прорисована недостаточно подробно, кроме того даже фотокатоды одного типа могут различаться по своим параметрам. В качестве спектра, по которому производилась калибровка был использован спектр лампы накаливания. Работа также может представлять интерес для тех, кто занимается спектрометическими измерениями с использованием ФЭУ с мультищелочными катодами. Приведен график полученной квантовой эффективности фотокатода в диапазоне 320–830 нм с погрешностью не более 17%.

1 Введение

В этой работе исследовалась спектральная характеристика фотокатода ФЭУ-100. В этом ФЭУ используется мультищелочной SbKNaCs катод. Фотокатоды этого типа имеют наибольшую абсолютную квантовую эффективность и ширину спектра. Кварцевое окно этого ФЭУ позволяет вести измерения в ультрафиолетовой области спектра. В качестве излучающего прибора с известным распределением энергии в спектре использовалась лампа накаливания, которую можно считать серым телом.

2 Краткая теория

2.1 Модели абсолютно черного и серого тел

Светящиеся поверхности характеризуются светимостью R и яркостью B [2]. Светимость — это поток энергии P, излучаемый единицей площади в пределах полупространства. Если θ угол между нормалью к площадке, а $d\Omega$ элемент телесного угла, то яркостью называют коэффициент B в выражении

$$dP = BdS\cos\theta d\Omega.$$

Яркость и светимость связаны между собой соотношением $R = \pi B$. Вводят также понятие спектральной яркости b_λ, которая связана с B выражением

$$B = \int_0^\infty b_\lambda \, d\lambda.$$

Излучение тела, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей средой называется излучением абсолютно черного тела. Однако при этом коэффициент поглощения тела должен быть равен единице. При этом плотность возрастает с увеличением температуры, кроме того, максимум смещается в коротковолновую область. Спектральная плотность абсолютно черного тела описывается формулой Планка

$$b_\lambda^0 = frac2\pi hc^2\lambda^5 \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}. \tag{1}$$

Если коэффициент поглощения отличен от единицы, при этом он может зависеть от длины волны, то спектральная плотность изменяется.

Тела характеризуются коэффициентом серости a, равном отношению яркостей рассматриваемого и абсолютно черного тела при заданной длине волны. Если коэффициент серости зависит от длины волны или тело имеет цвет, то максимум излучения смещается.

Кроме термодинамической температуры, вводят цветовую и яркостную. Это разделение по способу измерения.

Если при измерении температуры пирометром добиваются совпадения яркостей объекта и калиброванной нити накаливания, то полученную температуру называют яркостной. Яркостную температуру обычно измеряют на длине волны $\lambda = 0{,}66$ мкм. Соотношение между яркостной и термодинамической температурой можно получить следующим образом. Спектральная плотность серого тела b_λ и абсолютно черного b_λ^0 связаны формулой $b_\lambda(T_{\text{яр}}) = ab_\lambda^0(T)$. Отсюда, используя (1), можно получить

$$T = \frac{hc}{\lambda k} \frac{1}{\ln(1 + a(e^{hc/\lambda k T_{\text{яр}}} - 1))}. \tag{2}$$

2.2 Принцип работы ФЭУ

Фотоумножители являются одними из самых чувствительных приборов. Кратко их работу можно описать так. Свет проходящий через кварцевое окно 1 ФЭУ с нанесенным на его внутреннюю поверхность фотокатодом 2, выбивает из последнего фотоэлектроны, которые ускоряются приложенным напряжением и размножаются на динодах 3. В результате от фотона на анод 4 прилетает лавина электронов (рис. 1). По способу снятия сигнала схемы включения делятся на счетные и работающие в непрерывном режиме [1]. В данной установке использовался непрерывный режим работы ФЭУ. Это было обусловлено тем, что лампа накаливания и Солнце, для снятия спектра которого также применялась данная установка, имеют большую яркость.

Фотокатоды характеризуются квантовой эффективностью. Эта величина равна отношению зарегистрированных фотонов к общему числу при заданной длине волны. Для мультищелочных катодов максимальное значение порядка 0,2. Также вводится относительная квантовая эффективность, равная в максимуме 1.

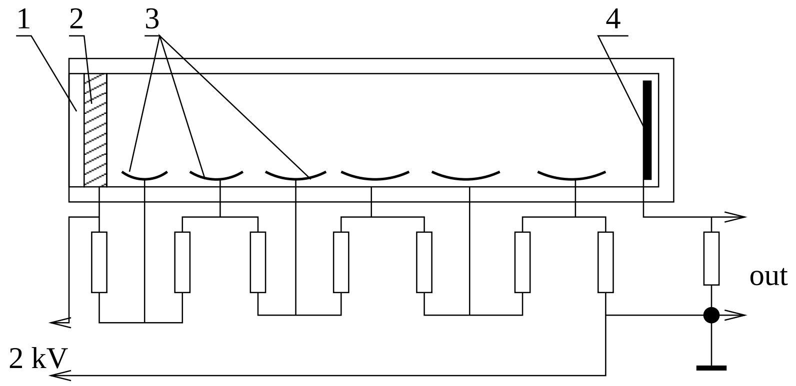

Рис. 1: схема ФЭУ: 1 кварцевое окно, 2 фотокатод, 3 диноды, 4 анод

3 Описание установки

Свет лампы 1 попадает в фокусирующую систему 2. В фокусе системы 2 помещается щель монохроматора 4. Между лампой и монохроматором может помещаться светофильтр или световод 3, однако в данной работе световод не применялся, так как он вносит дополнительное искажение спектра. Шаговым двигателем 14 посредством редуктора 13 на монохроматоре выбирается нужная длинна волны. С помощью монохроматора выделяется нужная длинна волны. Свет с заданной длинной волны идет в ФЭУ. На выходе ФЭУ идет ток пропорциональный интенсивности света. Ток идет в усилитель 6. На выходе усилителя имеем напряжение пропорциональное току ФЭУ. Напряжение с усилителя подается на вход вольтметра.

В осветителе использовалась лампа ОП-33-03. Осветитель и формирователь пучка были взяты от МДР-23.

Преобразователь ток-напряжение был собран на операционном усилителе к155уд1а.

Характеристики монохроматора МУМ: в качестве диспергирующего элемента служит вогнутая нарезная дифракционная решетка. Радиус кривизны 250 мм. Рабочая область спектра 0,2–0,8 мкм.

Напряжение измерялось 20-разрядным интегрирующим вольтметром «Липенок» Ц-0609. С точностью 16 мкВ. Управление шагового двигателя 14 производилось с помощью блока УШД-2.

Для управления КАМАК-модулями испозовался контроллер крей-

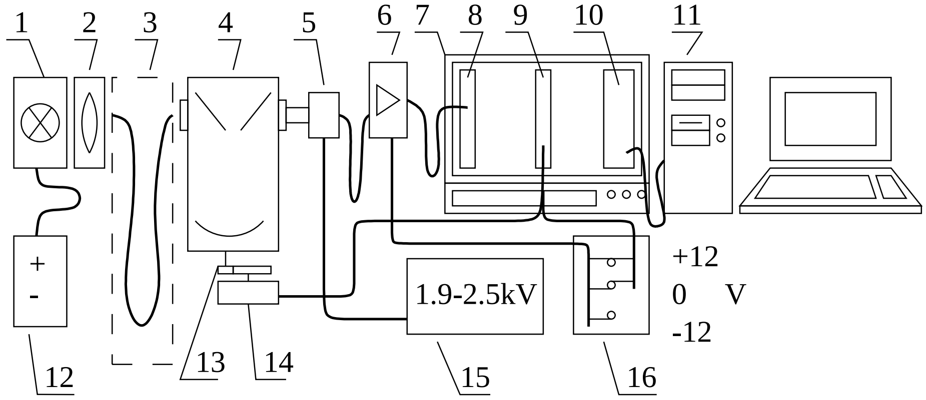

Рис. 2: Схема установки. 1. лампа. 2. фокусирующая система. 3. световод. 4. монохроматор, 5. ФЭУ, 6. усилитель, 7. крейт, 8. вольтметр, 9. блок управления шаговым двигателем, 10. контроллер крейта 11. персональный компьютер, 12. блок питания лампы, 13. редуктор, 14. шаговый двигатель 15. блок питания ФЭУ, 16. блок питания усилителя и шагового двигателя.

та К-0607. На компьютере была установлена ОС linux, RedHat. Крейт-контроллер подключался к плате ППИ-2, драйвер КАМАК А. Никифорова. Для проведения измерений была написана специальная программа, использующая интерфейс командной строки.

4 Методика измерений

4.1 Калибровка усилителя

При калибровке на вход усилителя подавалось напряжение −36–36 В, через сопротивление 999 кОм. Напряжение на выходе измерялось вольтметром В7-40, им же контролировалось напряжение на сопротивлении, подключенному ко входу.

4.2 Измерение температуры нити лампы накаливания

Температура нити измерялась оптическим пирометром ОППИР-0,9. К сожалению предел температуры пирометра ниже, чем температура, использовавшаяся при снятии спектра лампы, поэтому использовался следующий способ измерения. Мощность, излучаемую лампой, с одной стороны можно представить, как $P = RI^2$, а с другой как $P = aS\sigma T_{\text{яр}}^4$, согласно закону Стефана-Больцмана, где R сопротивление нити (в измерениях пренебрегалось зависимостью сопротивления от температуры), I ток, текущий через лампу; a, как уже упоминалось, коэффициент серости, S площадь поверхности, σ постоянная Стефана-Больцмана, $T_{\text{яр}}$ температура нити лампы. Сравнивая эти выражения, можно получить соотношение

$$T_{\text{яр}} = k\sqrt{I},$$

где k — коэффициент, подлежащий определению. В рабочем диапазоне пирометра определялся этот коэффициент, затем вычислялась яркостная температура лампы при снятии ее спектра и по формуле (2) определялась термодинамическая температура.

4.3 Измерение квантовой эффективности фотокатода

Для определения квантовой эффективности были сняты спектры лампы. По теоретическому спектру лампы накаливания можно определить спектральную характеристику фотокатода. Для проверки перекрывания разных максимумов дифракционной решетки были проведены измерения с фильтром gg11. Спектр этого фильтра был снят на микрофотометре СФ-26. Спектры, снятые при различном напряжении на ФЭУ, сопоставлялись с экспериментально подбираеиыми коэффициентами. В результате был получен спектр, по которому была определена относительная квантовая эффективность. При обработке коэффициента пропускания фильтра, спектра лампы использовалась аппроксимация сплайнами, которая также использовалась при обработке спектров Солнца.

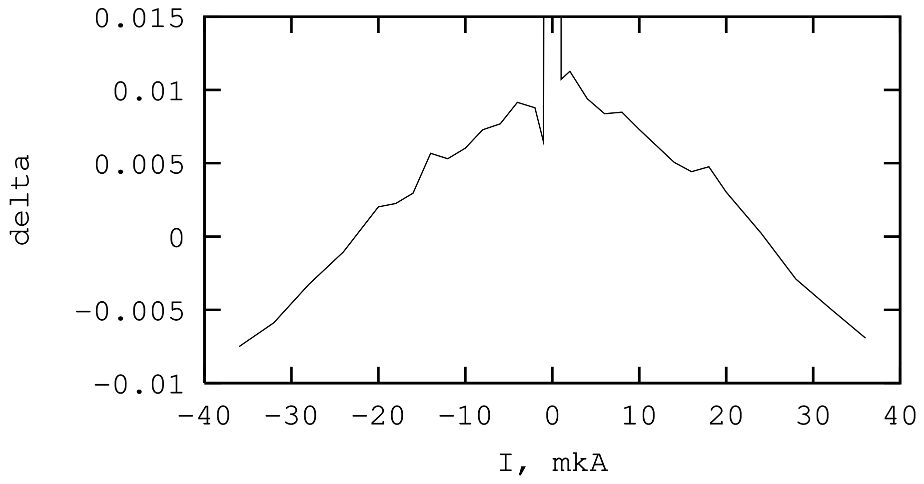

Рис. 3: Относительная погрешность коэффициента преобразования ток-напряжение

5 Проведенные измерения

5.1 Калибровка усилителя

В результате измерений было выяснено, что отклонение коэффициента преобразования ток-напряжение от линейного не превышает 1% и точность снятия спектра не превышает этой величины. Однако точность измерений при необходимости ее можно повысить, учтя нелинейности.

5.2 Измерение температуры лампы

Для определения коэффициента k были проведены измерения, приведенные в таблице 1. Измерения осложнялись малой площадью излучающей поверхности. По этим данным можно определить, что среднее значение $k = 4514$. При снятии спектра ток через лампу был 0,298 А, значит $T_{\text{яр}} = 2472$. По формуле (2) можно вычислить, что $T = 2740 \pm 20$ — термодинамическая температура с учетом погрешностей измерения.

Таблица 1: определение коэффициента k

температура нити		ток	k
$t\,^\circ$C	$T_{\text{яр}}$, K	I, A	
2000	2270	0.2500	4540
1960	2230	0.2401	4551
1970	2240	0.2502	4478
1930	2200	0.2403	4488

5.3 Определение относительной квантовой эффективности фотокатода

Для определения квантовой эффективности фотокатода была снята зависимость тока ФЭУ от длинны волны. В ходе эксперимента зависимость тока от длинны волны была снята без фильтра и с фильтром GG11 (спектры и функция пропускания фильтра приведены на рисунке). Это делалось для того, чтобы выяснить пропускает ли монохроматор второй порядок. Выяснилось, что монохроматор второй порядок не пропускает. Были объединены полученные спектры с подбираемыми коэффициентами (для спектра, снятого с фильтром, предварительно делилось на функцию пропускания) и получена аппроксимация спектра кубическим сплайном $s(\lambda)$. Относительная квантовая эффективность f вычисляется по формуле

$$f(\lambda) = \frac{s(\lambda)}{\lambda b_\lambda \mu},$$

где μ коэффициент нормировки, подобран так, чтобы значение в максимуме было равно 1. Погрешность определения квантовой эффективности определяется, главным образом, неточностью определения температуры источка излучения и составляет 27% при $\lambda = 300$ нм, 10% — $\lambda = 800$. Так как эта величина относительная и нормируется на 1, а отклонение возможно только в одну сторону, можно сказать что погрешность на самом деле не превышает 17%. Присутствующие на графике волнообразные отклонения могут быть объяснены интерференцией света в покрытиях фотокатода.

6 Выводы

Проведенные измерения показали, что пока необходимости усложнять схему усилителя для компенсации нелинейности и устранения дрейфа нуля. Гораздо большее значение для повышения точности калибровки имеет более точное определение температуры нити накаливания лампы. Полученная характеристика позволила начать спектрометрические измерения Солнца. И при получении более точной спектральной характеристики фотокатода, соответственно повысится точность спектрометрических измерений.

7 Заключение

Цель работы была достигнута, но исследования в этой области еще не завершены. Одним из направлений дальнейших измерений может стать калибровка в диапазоне 220–350 нм, например по спектру водородной лампы. Возможен перевод ФЭУ в счетный режим работы, что позволит снимать спектры объектов с меньшей яркостью.

Список литературы

[1] *Матвеев В. В, Соколов А. Д.* Фотоумножители в сцинтилляционных счетчиках, М.—1962

[2] *Лебедева В. В.* Техника оптической спектроскопии, М.—1986

[3] *Миронов В. В.* Прецизионная фотометрия, М.—1997