

УДК 535.247

Калибровка измерителей мощности оптического излучения в широких пределах

© 2019 г. Э. В. Кувалдин, канд. техн. наук; А. А. Шульга

АО «ГОИ им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург

E-mail: ekuvaldin@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.08.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-12-15-20

Рассмотрены метод расширения пределов измерения мощности оптического излучения с применением ослабителей и способы их калибровки. Метод использует дополнительный ослабитель совместно с мощным источником сравнения. Предложено фотоприёмное устройство с динамическим диапазоном измерения 10^5 раз, что позволяет калибровать измерители мощности и источники излучения по эталонному калориметру или самокалибруемому фотодиоду. Проведены сравнительные измерения приборами разных типов и оценены погрешности измерений.

Ключевые слова: мощность излучения, калибровка, фотоприёмное устройство, пироприёмное устройство, калориметр.

Коды OCIS: 120.3940, 120.5240.

ВВЕДЕНИЕ

При проведении исследований, настройки и ремонта различной оптико-электронной аппаратуры возникает необходимость измерений мощности оптического излучения. Не всегда удаётся воспользоваться стандартными средствами измерения. Они могут не подходить по пределам измерения или конструкции и габаритам оптического блока измерительного прибора. Для измерений в труднодоступных местах изготавливают приёмные устройства подходящей для данного эксперимента конструкции. Пределы измерения этими устройствами часто составляют 6 и более порядков измеряемой мощности. Калибровка измерителей классическими методами трудоёмка и требует применения сложного и дорогого оборудования. Конструкции приёмных блоков измерителей могут быть различными. В качестве регистрирующих устройств используют стандартные электроизмерительные приборы и осциллографы. Фотоэлектрические приёмники представляют собой источники тока для регистрирующего прибора, поэтому их целесообразно использовать совместно с регистрирующими приборами, имеющими большое входное сопротивление. Однако они восприимчивы к электромагнитным наводкам на соединяющие провода, поэтому в выносных фото-

приёмных блоках используют преобразователь ток-напряжение (ПТН), имеющий небольшое выходное сопротивление. Широко распространённые вольтметры и осциллографы, измеряющие напряжение сигнала с ПТН, имеют динамический диапазон измерений не более 3 порядков. У них нижний предел измерения ограничен шумами, а верхний — напряжением источника питания ПТН. Для расширения пределов измерения по мощности выносного фотоприёмного устройства используют широкий линейный динамический диапазон фотоэлектрических приёмников излучения по току. В схеме включения с операционным усилителем без дополнительного смещения на фотоприёмнике напряжение на нём с высокой точностью поддерживается постоянным при изменении тока через фотоприёмник. Это позволяет получить линейную шкалу во всех пределах измерения и минимальный темновой ток, определяющий нижний предел измерения. Верхний предел ограничен током насыщения фотоприёмника, который не превышает 10–20 мкА для большинства кремниевых фотодиодов. В схеме радиометра [1] пределы измерения переключаются сопротивлениями в цепи обратной связи операционного усилителя. Динамический диапазон радиометра составляет 10^5 [2], и его используют при измерении мощности излу-

чения и при калибровках. Переделки оптического блока, вызванные новой измерительной задачей, приводят к новой калибровке устройства. В статье рассматривается простой метод калибровки измерителей мощности оптического излучения, использующий рассматриваемый радиометр в качестве фотоприёмного устройства (ФПУ).

Это ФПУ используют также для измерения отражённого, рассеянного и ослабленного оптического излучения в видимой и ближней ИК области спектра в пределах 10^{-5} – 10^{-9} Вт. Расширение предела измерения до 10^{-2} –1 Вт достигается применением оптических ослабителей различного типа. Способ калибровки ослабителей и ФПУ рассмотрен в статье. Ослабители могут применяться также совместно с измеренными ФПУ маломощными светодиодными источниками для калибровки на малых уровнях мощности вплоть до пороговых значений.

ВЫБОР ЭТАЛОНА

Для калибровки измерителей мощности используются три основных рабочих эталона: тепловой приёмник излучения для больших уровней мощности [3], самокалибруемый фотодиод в области спектра 0,5–0,7 мкм для малых уровней и калибруемый электрическим током пироэлектрический приёмник излучения на средние уровни мощности 10^{-6} – 10^{-1} Вт (модель Rs-5900 фирмы Laser Precision Corp США). Для калибровки используется целый ряд вспомогательных источников сравнения с набором оптических ослабителей для получения нужного предела измерений или же фотометрический метод с применением закона квадратов расстояния. Такая трёхуровневая система калибровки позволяет перекрыть весь широкий используемый диапазон мощностей оптическими ослабителями со сравнительно небольшой погрешностью. При этом используются достаточно сложные установки, основная проблема в которых — трудности устранения влияния рассеянного света на результат измерения. Перечисленный набор эталонов и калибровочных установок доступен специализированным метрологическим центрам. Широкому кругу потребителей желательно пользоваться методиками калибровки по доступному эталону. В случае ответственных измерений необходимо проводить проверку ещё и по эталону другого физического принципа действия.

Измерители мощности и ФПУ можно калибровать по эталонному калориметру и самокалибруемому фотодиоду. Калориметр пригоден только для калибровки устройств с пределами измерения более 1 мВт. Самокалибруемый фотодиод имеет высокую чувствительность, 100-процентный квантовый выход по поглощённой мощности и в нём отсутствует зонная неравномерность чувствительности.

Коэффициент отражения таких фотодиодов близок к 30%. В литературе [4] приведено описание конструкции эталона Trap detector, в которой отражённый от фотодиода поток поглощается другими аналогичными фотодиодами. Сигнал со всех фотодиодов суммируется, и тем самым компенсируются потери на отражение. При измерении коэффициента отражения от приёмной поверхности фотодиода было замечено, что индикатриса отражения составляет 10–20 градусов. Зеркальная составляющая коэффициента отражения ρ_s у двух фотодиодов типа ФД-288 («Квант») составила 64 и 67% от полного отражённого потока. Для трёх фотодиодов типа ФД-7К зеркальная составляющая составила 40, 40 и 57% от отражённого потока соответственно. Конструкция Trap detector с такими фотодиодами не работоспособна, так как значительная часть отражённого от фотодиода потока не попадает на следующий фотодиод. Поэтому в качестве эталона следует применять одиночный фотодиод с измеренным полным коэффициентом отражения шаровым фотометром, например, типа ФО-1. Фотодиоды ФД-288 («Квант») подходят для этой цели. Из фотодиодов ФД-7К тоже можно выбрать подходящий. Расширить пределы калибровки по калориметру в сторону меньших значений мощности и по фотодиоду в сторону больших значений позволяет метод дополнительного ослабителя.

МЕТОД КАЛИБРОВКИ

Рассмотрим метод калибровки с дополнительным ослабителем, позволяющий использовать эталонный калориметр и фотоэлектрический приёмник излучения. Для проведения калибровки необходимо иметь источник сравнения и ФПУ сравнения.

Применение совместно с ФПУ дополнительного ослабителя позволяет расширить пределы измерения в несколько раз. Коэффициент ослабления ослабителя подбирают равным или несколько меньшим линейного динамического диапазона ФПУ. Мощность источника сравнения подбирают соответствующей верхнему пределу линейности ФПУ. Изменяя чувствительность ФПУ, измеряют коэффициент пропускания ослабителя. Затем мощность источника излучения увеличивают так, чтобы вместе с калиброванным ослабителем выйти на верхний предел измерения ФПУ и измеряют мощность излучения источника. Калиброванным таким образом источником излучения совместно с ФПУ можно измерить коэффициент пропускания более плотного ослабителя. Такой приём можно проделать несколько раз. Обычно для этих целей используют нейтральные светофильтры, коэффициент пропускания которых измеряют спектрофотометрами. Для получения ослабления на 3–4 порядка часто используют набор из таких светофильтров. Сложение оптических плотностей

нескольких светофильтров не позволяет получить калиброванное ослабление излучения измеряемой величины из-за невоспроизводимости положения установки светофильтров в разных измерениях. При этом из-за переотражений между поверхностями отдельных светофильтров общий коэффициент пропускания может изменяться и не соответствовать расчётному значению. Расхождение может достигать нескольких раз [5]. Устранить этот недостаток можно заменой нескольких светофильтров одним с большей оптической плотностью, который измеряют описанным методом. В калибровочной установке [6] для таких измерений было применено фотоприёмное устройство с фотоумножителем, работающим в режиме счёта фотонов.

В упомянутом выше ФПУ с фотодиодом [1] пределы измерения переключаются сопротивлениями в цепи обратной связи операционного усилителя, которые одновременно служат нагрузочными сопротивлениями фотоприёмника (рис. 1). ФПУ имеет чувствительность $1,5 \times 10^{-10}$ Вт/мВ с кремниевым фотодиодом и с распространённым вольтметром — тестером VM830. Верхний предел измерения равен $7,5 \times 10^{-5}$ Вт. Динамический диапазон ФПУ составляет 5×10^4 .

Таким фотоприёмным устройством можно измерить коэффициент пропускания нейтрального светофильтра плотностью 3–4 или фотометрического шара методом прямых измерений. Пределы измерения ФПУ с шаром из алюминия диаметром 35 мм составили 10^{-6} – 10^{-2} Вт. Пределы измерения можно сдвигать в сторону больших значений установкой диафрагмы в выходном отверстии шара. Калибровка шарового ослабителя проводилась таким же образом, как и калибровка нейтрального светофильтра. Для работы в труднодоступных местах, например, между элементами оптической схемы, используют плоскую конструкцию осла-

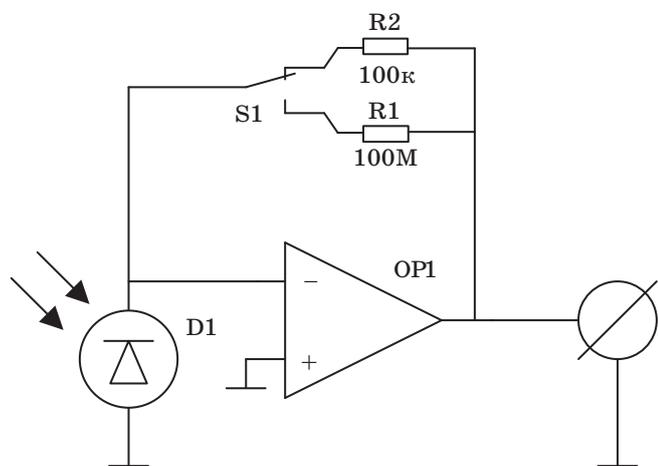


Рис. 1. Схема включения фотодиода с операционным усилителем без дополнительного смещения на приёмнике.

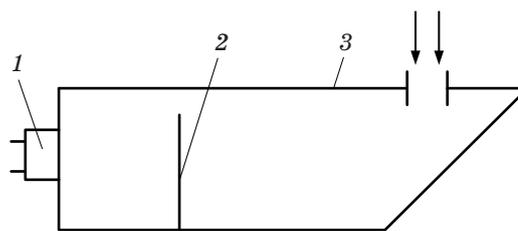


Рис. 2. ФПУ с плоским аттенуатором из алюминия. 1 — фотодиод, 2 — экран, 3 — алюминиевый корпус. Коэффициент ослабления $\tau = 1 \times 10^{-3}$, с диафрагмой перед фотодиодом — $\tau = 1 \times 10^{-4}$. Размеры — $40 \times 25 \times 8$ мм.

бителя (рис. 2). Работа с нейтральным светофильтром требует применения лазерного источника сравнения, поэтому его целесообразно использовать только при калибровках. В измерителях мощности на базе ФПУ следует применять ослабители шаровой или плоской конструкции. С такими ослабителями верхний предел измерения расширяется до 1 Вт.

Калибровка таких ослабителей проводилась рассмотренным методом дополнительного ослабителя с применением более плотного светофильтра или ослабителя. В качестве источника сравнения использовали полупроводниковый лазер с длиной волны 650 нм от указки. Мощность излучения лазера, которая составляет несколько милливатт, измеряли также калориметром, что позволило сравнить результаты измерения с калибровкой по эталонному фотодиоду. Набор калиброванных ослабителей совместно с калиброванными этим методом источниками позволяет расширить пределы калибровки методом прямых измерений в сторону меньших значений мощности вплоть до 10^{-12} Вт и менее с использованием метода дополнительного ослабителя.

ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ КАЛИБРОВКИ

В работе сравнивались по чувствительности три приёмных устройства: калориметр типа ИМО-2Н, радиометр Rs-5900 и ФПУ сравнения с кремниевым фотодиодом типа ФД-7К, калиброванный по эталону 1-го разряда поверочной схемы ГОСТ 8.195. В комплекте с ФПУ применяли нейтральный светофильтр, который измеряли в эксперименте. В качестве источника сравнения в измерениях применяли полупроводниковый лазер с диаметром луча примерно 4 мм. Питание лазера стабилизировано по току. Длина волны лазера в максимуме излучения равна 640 нм, полуширина спектрального распределения излучения составила 35 нм. Мощность излучения равна 1,7 и 0,5 мВт с дополнительным ослабителем. Калибруемый электрический ток пироэлектрический радиометр Rs-5900 фирмы Laser Precision Corp. имеет диаметр приёмной площадки 7,8 мм и нижний

предел измерений – 1×10^{-6} Вт. Калориметр типа ИМО-2Н имеет диаметр входного отверстия 15 мм и нижний предел измерения мощности излучения 1 мВт. В связи с малым диаметром луча лазера относительно входного отверстия калориметра были проведены измерения мощности при различных углах излучения лазера относительно оптической оси калориметра. При 10 различных положениях максимальное изменение отсчётов по калориметру составило 28%. Измерения калориметром и радиометром проводились методом прямых измерений. Для измерения фотоприёмным устройством с фотодиодом применяли стеклянный нейтральный поглотитель с коэффициентом пропускания примерно 0,002. Измерения ФПУ проводили в два этапа: на первом измеряли коэффициент пропускания светофильтра, а на втором — мощность излучения лазера через измеренный светофильтр. Измерение коэффициента пропускания светофильтра проводили при двух значениях тока фотодиода 1 и 5 мкА. Для этого перед лазером устанавливали дополнительные стеклянные поглотители, обеспечивающие указанные значения токов через фотодиод ФПУ. Снимали отсчёт n_1 без калибруемого светофильтра, затем устанавливали калибруемый светофильтр, увеличивали сопротивление нагрузки фотодиода и снимали отсчёт n_2 , пересчитанный через отношение сопротивлений нагрузки фотодиода. Отношение отсчётов $n_2/n_1 = k$ давало коэффициент пропускания светофильтра. Среднее значение из семи измерений при двух начальных значениях тока через фотодиод составило 0,00213. Размах результатов измерений, определяющих погрешность измерений, равен 0,00010, что составляет 4,7%. Измерения при двух значениях тока через фотодиод (потоков на фотоприёмнике) позволило убедиться в том, что фотоприёмное устройство работает в линейном режиме при максимальном потоке. При этом возможное отклонение от линейности вошло в размах результатов измерений. В процессе проведения измерений было обнаружено, что мощность излучения лазера 0,5 мВт постепенно уменьшается, поэтому окончательные измерения были проведены через

фиксированные интервалы времени t после включения лазера. Светодиод при той же мощности излучения работает стабильнее из-за меньшей плотности тока питания. Излучение в нём происходит с большей излучающей поверхности, поэтому оптической системой не удаётся сформировать параллельный пучок излучения, как это делается в лазере. Для уменьшения расходимости сформированного оптической системой излучения приходится уменьшать мощность излучения светодиода применением диафрагм. При этом для устранения рассеянного света должно быть применено не менее 2-х диафрагм. Применение объектива позволяет сформировать изображение излучающей поверхности светодиода на некотором расстоянии от выходного торца излучателя. Это позволяет получить его на приёмном элементе измерителя мощности излучения, расположенного в глубине прибора. У современных светодиодов мощность излучения на 2–3 порядка превышает верхний предел линейности работы кремниевых фотодиодов, что позволяет использовать рассматриваемые схемы формирования пучка излучения.

Результаты расчёта отклонений, измеренных калориметром, ФПУ с фотодиодом типа ФД-7К № 110415 от измеренной радиометром мощности излучения лазера приведены в таблице. Здесь же приведены результаты измерения эталонным фотодиодом в том же ФПУ и с тем же светофильтром. Это позволяет оценить погрешность калибровки ФПУ сравнения по эталонному фотодиоду.

В измерениях получено, что результат измерения калориметром относительно измерения радиометром отличается на +8,6%, фотодиодом № 110415 относительно радиометра на +11,8%. Для эталонного фотодиода эта разность составляет +7,9%. Калориметр и эталонный фотодиод отличаются между собой по чувствительности на 0,7%.

Из сравнения двух последних столбцов таблицы видно, что погрешность калибровки фотодиода № 110415 по эталонному фотодиоду составляет +3,9%. В скобках приведено значение максимального размаха результатов измерений каждым прибором. Большой размах отсчётов по калориметру

Отклонение измеренных значений от измеренных радиометром

| № п.п | t , мин | Радиометр $P \times 10^{-4}$, Вт | Калориметр, % | Фотодиод 110415, % | Эталонный фотодиод, % |
|------------------|-----------|--------------------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|
| 1 | 2 | 5,03 | 4,7 | 11,5 | 4,7 |
| 2 | 5 | 4,74 | 17,8 | 17,8 | 7,4 |
| 3 | 10 | 4,63 | 13,7 | 11,8 | 8,4 |
| 4 | 15 | 4,56 | 4,2 | 11,7 | 9,2 |
| 5 | 20 | 4,53 | 2,6 | 12,6 | 9,9 |
| Среднее значение | | | 8,6 (15,2) | 11,8 (6,1) | 7,9 (5,2) |

можно объяснить неравномерностью зонной характеристики и работой на самом чувствительном пределе измерений. Дополнительно были проведены сличения результатов измерения радиометром и калориметром при мощности излучения лазера 1,7 мВт. Показания калориметра были на 5,2% больше, чем радиометра.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И КАЛИБРОВОК

Считая максимальный размах результатов измерений равным доверительной границе случайной погрешности оценки измеряемой величины ε , вычисляем среднее квадратическое отклонение среднего арифметического $S_{\bar{x}}$ по формуле

$$S_{\bar{x}} = \varepsilon / t,$$

где t — коэффициент Стьюдента. При доверительной вероятности $P = 0,95$ и при числе измерений $n = 5t = 2,776$. Так как размах результатов измерений в данном случае входит в неисключённую систематическую погрешность абсолютных измерений, то СКО $S_{\bar{x}}$ можно считать границей погрешности оценки измеряемой величины Δ без учёта знака.

В случае измерения коэффициента пропускания светофильтра $\tau = 0,00213$ максимальный размах составил 0,00010. Коэффициент Стьюдента для семи измерений $t = 2,447$. Тогда $S_{\bar{x}} = \varepsilon / t = 0,000041$ и погрешность $\Delta = 0,000041$, что соответствует 1,9% от измеренного τ . Окончательный результат измерений τ на установке можно записать в виде

$$\tau \pm \Delta\tau = \tau \pm 0,019\tau.$$

Аналогичные вычисления для случая из пяти измерений мощности каждым прибором дают погрешность калориметра равной $\pm 5,5\%$, ФПУ № 110415 — $\pm 2,2\%$ и эталонного ФПУ — $\pm 1,9\%$. Эти значения оценены относительно измерений радиометром, погрешность измерений которым следует добавить к указанным значениям. Судя по данным графы 3 таблицы, воспроизводимость показаний радиометра лучше, чем других приборов, и приведённые значения погрешностей увеличатся незначительно.

РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Предложенный способ обеспечения измерения мощности в пределах 10^{-5} – 10^{-3} Вт подходит только для области спектра работы фотоэлектрических приёмников излучения. Для более широкой области спектра используют термоэлементы и болометры с известной или измеренной площадью приёмной площадки. Их калибровку проводят в выходном отверстии фотометрического шара. Перед эталонным фотодиодом устанавливают ма-

ленькую калиброванную диафрагму. Измеряют освещённость в выходном отверстии шара и через приёмные площади рассчитывают поток на калибруемом приёмнике. Рассмотрим также пироэлектрический измеритель больших уровней мощности, более дешёвый аналог прибора Rs-5900. Пироэлектрический радиометр неселективен по спектру и работает во всем оптическом диапазоне. В качестве такого измерителя мощности был применён измеритель энергии излучения [7] с механическим модулятором перед ним. Измеритель энергии использует две пироэлектрические пластины размером 20×20 мм, установленных под углом друг к другу, обеспечивая приёмный конус. Боковые поверхности конуса выполнены в виде зеркал. Входное отверстие конуса — 20×20 мм. Пластины подключены параллельно к общему усилителю. Конструктивно устройство оформлено в виде выносной головки размером $110 \times 76 \times 60$ мм. В головке расположен аналого-цифровой преобразователь (АЦП), работающий по принципу линейного разряда накопительного конденсатора в цепи приёмника излучения. В результате в блок регистрации и питания передаётся единичный код измеряемой энергии излучения. Код считывается десятиразрядными счётчиками с цифровой индикацией. В счётчике имеются три дополнительных десятичных делителя без индикации. Подключение первого делителя уменьшает масштаб в 10 раз, и цифровой индикатор показывает среднее значение из 10 измерений. Подключение второго и третьего делителя позволяет получить среднее значение из 100 и 1000 измерений. Дополнительный счётчик считает число измерений и обеспечивает сброс результата измерения. Такое устройство обеспечивает улучшение отношения сигнала к шуму при работе на частоте повторения измеряемого источника излучения. При работе прибора совместно с механическим модулятором измеряемого излучения показания прибора будут пропорциональны мощности излучения. При усреднении повышение чувствительности происходит за счёт цифровой обработки, а не за счёт сужения полосы пропускания усилителя, как это делается в приборе Rs-5900. В цифровом способе модулятор может быть любого типа, и он не требует синхронизации с работой прибора, как это необходимо делать в радиометре Rs-5900.

ВЫВОДЫ

Рассмотренный метод расширения пределов измерения фотоэлектрического измерителя мощности излучения позволил получить средство измерения с пределами измерения 10^{-10} – 10^{-2} Вт с применением дополнительного поглотителя. По результатам проведённых сличений погрешность калибровки фотодиодного измерителя мощности по эталонному

фотодиоду составила $\pm 6\%$, а по калориметру типа ИМО-2Н — $\pm 14\%$. Приведённые значения соответствуют поверочным схемам существующих ГОСТов в разряде рабочих средств измерений. Показана возможность использовать для калибровки измерителей мощности оптического излучения

в пределах 10^{-10} –1 Вт один эталон. В качестве такого эталона предпочтительно использовать самокалибруемый фотодиод. Расширение спектрального диапазона калибровки производится применением пироэлектрических измерителей энергии излучения в комплекте с механическим модулятором.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кувалдин Э.В.* Измерители энергии и мощности оптического излучения // Международная конференция «Прикладная оптика». С. Петербург. Ноябрь 2006. Т. 1. С. 217–221.
2. *Кувалдин Э.В., Шульга А.А.* Калибровка измерителей мощности оптического излучения в широких пределах // XII Международная конференция «Прикладная оптика–2018». Сб. тр. Санкт-Петербург. 17–21 декабря 2018. Т. 2. С. 148–152.
3. *Иванов В.С., Золотаревский Ю.М., Котюк А.Ф., Либерман А.А., Саприцкий В.И., Улановский М.В., Чупраков В.Ф.* Основы оптической радиометрии. М.: Физматлит, 2003. 541 с.
4. *Parr Albert C.* The Candela and photometric and radiometric measurements // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 2000. V. 106 (1). P. 151–186.
5. *Шульга А.А.* Калиброванный ослабитель лазерного излучения // Сборник трудов международной конференции «Прикладная оптика». СПб. 2018. Т. 2. С. 34–39.
6. *Ефимцева Л.А., Мартынюк А.С., Никитин Н.В.* Образцовый источник мощности непрерывного квазимонохроматического излучения // Импульсная фотометрия. Вып. 8. Сб. статей. Л.: Машиностроение, 1983. С. 57–60.
7. *Кувалдин Э.В., Левин В.А., Лухминская М.О., Цветкова С.Н.* Образцовое средство измерения энергии излучения средних уровней с полостным пироэлектрическим приемником // Тезисы 7 Всесоюзной научно-технической конференции «Фотометрия и её метрологическое обеспечение». Москва. 1988. С. 31.