

Потери в самокалибрующихся трап-детекторах за счет диффузного рассеяния

А. А. КОВАЛЕВ, А. А. ЛИБЕРМАН, А. С. МИКРЮКОВ, С. А. МОСКАЛЮК

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: mrsergik@mail.ru

Проанализированы потери в трап-детекторе в результате поглощения на его стенках части диффузно-рассеянного лазерного излучения. Приведены результаты измерений индикатрис диффузно-рассеянного излучения от рабочих поверхностей фотодиодов Hamamatsu S6337, S1337. Построена приближенная модель распределения излучения в трап-детекторе, учитывающая реальную форму индикатрис рассеяния. Изучены влияние количества актов диффузного рассеяния излучения и числа его отражений на точность расчета рассматриваемых потерь и их зависимость от поляризации падающего лазерного излучения.

Ключевые слова: лазерное излучение, трап-детектор, диффузное рассеяние.

The losses in the trap detector due to absorption of diffusely scattered laser radiation on its walls are analyzed. The measurements results for the indicatrix of this radiation from the working surface of photodiodes Hamamatsu S6337 and S1337 are given. The approximate model of distribution of radiation in the trap detector, which takes into account the real profile of the indicatrix of scattering is constructed. The effect of acts of the diffuse scattering quantity and of the number of scattering reflections on the accuracy of the considered losses calculation is analyzed. The influence of polarization of the incident laser radiation on these losses value is investigated.

Key words: laser emission, trap detector, diffuse scattering.

Высококачественные кремниевые фотодиоды фирмы Hamamatsu часто используют в качестве базовых элементов в трап-детекторах (ТД) — приборах, предназначенных для измерений мощности лазерного излучения в диапазоне 10^{-7} — 10^{-2} Вт [1, 2]. В таких конструкциях зеркально отраженное излучение практически полностью поглощается фотодиодами, а диффузное рассеяние приводит к потерям части излучения на стенках конструкции — диффузным потерям. Данное обстоятельство не является определяющим при получении ТД единицы измерения от внешнего более точного устройства, так как диффузные потери включены в коэффициент пересчета. В случае самокалибровки, когда число поглощенных фотодиодами квантов определяется по результатам независимых измерений, например вольт-амперных характеристик фотодиодов [3, 4], диффузное рассеяние может играть существенную роль, поскольку обусловленные им потери напрямую влияют на точность измерений.

В настоящей работе представлены результаты измерений индикатрис диффузного рассеяния двух фотодиодов, рассчитаны коэффициенты диффузного рассеяния и диффузные потери для конкретной конструкции трап-детектора.

Измерения диффузного рассеяния. Рассмотрим диаграммы распределения интенсивности диффузно-рассеянного излучения в ТД, т. е. при падении пучка излучения на поверхность фотодиода под углом 45° . Для единичных фотодиодов Hamamatsu S6337 и S1337 диаграммы были получены путем измерений интенсивности диффузно-рассеянного света высокочувствительным фотодиодом Hamamatsu S3447 со встроенной термостабилизацией и площадкой $2,4 \times 2,4$ мм².

На исследуемый фотодиод падало излучение He—Ne-лазера длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. Диффузно-рассеянное излучение регистрировали при помощи приемника, находяще-

гося на штанге, вращающейся вокруг оси, проходящей через точку рассеяния перпендикулярно плоскости падения излучения. Угол поворота штанги фиксировали с использованием специальной шкалы. Вся конструкция была размещена в зачерненном корпусе. Так как чувствительность приемника неизвестна, индикатрисы измеряли в относительных единицах. Для нормирования, т. е. перехода к абсолютным единицам, необходимо измерить индикатрисы рассеяния, соответствующие нормальному падению излучения на фотодиод. Коэффициент нормировки определяется при сопоставлении данных интегрирования измеренных индикатрис и диффузно-рассеянной составляющей в фотометрической сфере. Поскольку для измерения индикатрис рассеяния при нормальном падении излучения и под углом 45° использовали один и тот же приемник, коэффициент нормировки у них должен быть одинаковым.

Результаты измерений, полученные в фотометрической сфере [5], позволяют связать абсолютные значения диффузного рассеяния и зеркального отражения соотношением

$$S = D_{\perp} / (D_{\perp} + M_{\perp}), \quad (1)$$

где S — относительное значение диффузного рассеяния, получаемое экспериментально при помощи фотометрической сферы; $D_{\perp}$, $M_{\perp}$ — значения диффузно-рассеянного и зеркально отраженного излучений при нормальном падении, соответственно. Значения $M_{\perp}$ определяли отдельно и, следовательно, из (1) можно выразить

$$D_{\perp} = SM_{\perp} / (1 - S).$$

Измеренное значение индикатрисы рассеяния $I_{\perp}(\theta)$ при нормальном падении излучения и вычисленное значение $D_{\perp}$ можно связать следующим уравнением:

$$D_{\perp} = \alpha \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} I_{\perp}(\theta) \sin\theta d\theta, \quad (2)$$

где α — нормировочная константа; φ, θ — азимутальный и зенитный углы.

Для удобства дальнейших расчетов введем коэффициент диффузного рассеяния k_d , характеризующий долю диффузно-рассеянного излучения от падающего под углом 45° излучения и не зависящий от чувствительности приемника:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi = k_d \tilde{P},$$

где $I(\theta) = \alpha I_{\perp}(\theta)$, $I_{\perp}(\theta)$ — индикатриса рассеяния при падении излучения под углом 45° , которая в общем случае отличается от индикатрисы рассеяния излучения при нормальном падении $I_{\perp}(\theta)$; $\tilde{P}$ — мощность падающего на фотодиод излучения.

Для фотодиодов S6337 и S1337 значение k_d составляет соответственно 0,0056 и 0,00141. Полученные индикатрисы рассеяния в безразмерном виде и полярной системе координат относительно направления распространения пучка излучения показаны на рис. 1.

Вычисление поглощаемого диффузного рассеяния. Исследуемый ТД состоит из шести фотодиодов, расположенных так, что плоскость падения излучения на каждом фотодиоде перпендикулярна плоскости падения излучения на последующем фотодиоде. Аналогичная конструкция была рассмотрена в [6]. Схема одного каскада показана на рис. 2. Диффузное рассеяние происходит на фотодиоде ФДЗ. Трапедетектор включает в себя три таких каскада, состоящих из двух фотодиодов каждый. Корпус внутри ТД зачернен. Для независимой калибровки ТД необходимо количественное определение той части излучения, которая безвозвратно теряется на внутренних стенках.

Рассмотрим процесс преобразования излучения, падающего на фотодиод. Представим излучение, падающее на i -й фотодиод ($i = 1 \dots 6$), в виде вектора Стокса $\mathbf{S}_i$, представляющего сумму векторов излучений, падающих как со стороны предыдущего фотодиода $\mathbf{P}_i$, так и со стороны последующего $\mathbf{Q}_i$:

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{P}_i + \mathbf{Q}_i;$$

$$\mathbf{P}_i = \hat{m}\mathbf{P}_{i-1} + \hat{d}\mathbf{P}_{i-1} + \hat{r}\mathbf{Q}_{i-1};$$

$$\mathbf{Q}_i = \hat{m}\mathbf{Q}_{i+1} + \hat{d}\mathbf{Q}_{i+1} + \hat{r}\mathbf{P}_{i+1},$$

где $\hat{m}$ — оператор зеркального отражения излучения; $\hat{d}, \hat{r}$ — операторы диффузного рассеяния излучения вперед и назад, соответственно. При $i = 1$ $\mathbf{P}_{i-1} = \mathbf{P}_0$ — вектор Стокса падающего в ТД излучения.

Из рис. 1 и значения коэффициента k_d следует, что доля излучения, отраженного назад, составляет порядка 10^{-5} от зеркально отраженного. Поэтому в дальнейшем не будем рассматривать регистрацию излучения, диффузно-рассеянного назад, т. е. оператор $\hat{r}$. Таким образом, пренебрегая величинами второго порядка малости по диффузному рассеянию, получаем:

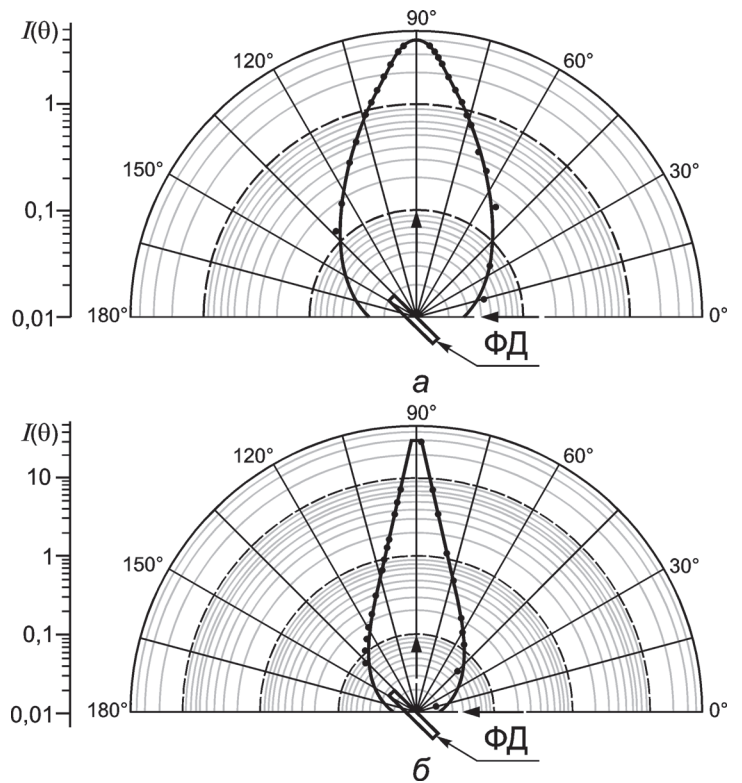


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния лазерного излучения, падающего под углом 45° на фотодиоды ФД Hamamatsu S6337 (а), S1337 (б); стрелками указано направление распространения пучка

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= (\hat{m} + \hat{d})^0 \mathbf{P} = \mathbf{P}; \\ \mathbf{S}_2 &= (\hat{m} + \hat{d})^1 \mathbf{P} = \hat{m}\mathbf{P} + \hat{d}\mathbf{P}; \\ \mathbf{S}_3 &= (\hat{m} + \hat{d})^2 \mathbf{P} = \hat{m}\hat{m}\mathbf{P} + \hat{m}\hat{d}\mathbf{P} + \hat{d}\hat{m}\mathbf{P}; \\ \mathbf{S}_4 &= (\hat{m} + \hat{d})^3 \mathbf{P} = \hat{m}\hat{m}\hat{m}\mathbf{P} + \hat{m}\hat{m}\hat{d}\mathbf{P} + \hat{m}\hat{d}\hat{m}\mathbf{P} + \hat{d}\hat{m}\hat{m}\mathbf{P}; \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для определения количества регистрируемого диффузного рассеяния необходимо знать операторы вида $\hat{m}^n \hat{d}$. Каждому $n = 0, 1, \dots$ соответствует свой диапазон интегрирования индикатрисы рассеяния, пределы которого определяются из геометрических характеристик ТД.

Для вычисления диффузных потерь в ТД упростим задачу, представив его модельную схему в виде развертки вдоль оси распространения излучения. При этом будем полагать, что все фотодиоды расположены перпендикулярно оптической оси на расстоянии l друг от друга, а их наклон учитывается как зависимость коэффициента отражения от координаты рассматриваемой точки (рис. 3). Введем следующие обо-

значения: $\theta_{i,j}^{\max}, \theta_{i,j}^{\min}$ — максимальный и минимальные углы распространения поглощаемого диффузного излучения; i — номер диффузно-рассеивающего фотодиода; j — номер зоны поглощения, отсчитываемый от рассеивающего фотодиода.

Зона поглощения — область разности углов $\Delta\theta_{i,j} = \theta_{i,j}^{\max} - \theta_{i,j}^{\min}$ (см. рис. 3).

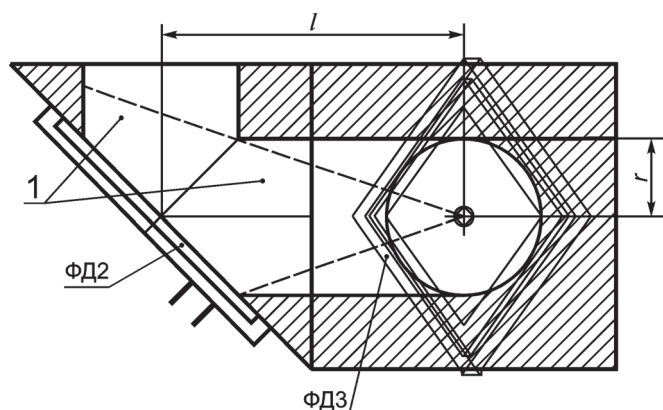


Рис. 2. Схема одного каскада ТД:

1 — канал для прохода излучения; ФД2, ФД3 — фотодиоды Hamamatsu S6337; l, r — размер элемента и радиус внутреннего отверстия ТД

Теперь запишем выражения для $\theta_{i,j}^{\max}$, $\theta_{i,j}^{\min}$ в виде

$$\theta_{i,j}^{\max} = \begin{cases} \pi/2, j=1; \\ \arctg[r/(l(j-1))], j=2, \dots, 6, \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta_{i,j}^{\min} = \begin{cases} \arctg[r/(lj)], j=1, \dots, 6-i; \\ 0, j=7-i, \end{cases}$$

где l — геометрический размер элемента ТД; r — радиус его внутреннего отверстия (см. рис. 2).

В данном случае основное упрощение задачи заключается в следующем. Из рис. 2 следует, что в реальности освещенная диффузным излучением область фотодиода не является цилиндрически симметричной, а имеет более сложную форму. Оценим погрешность, обусловленную сделанным упрощением. Потери, связанные с диффузным рассеянием

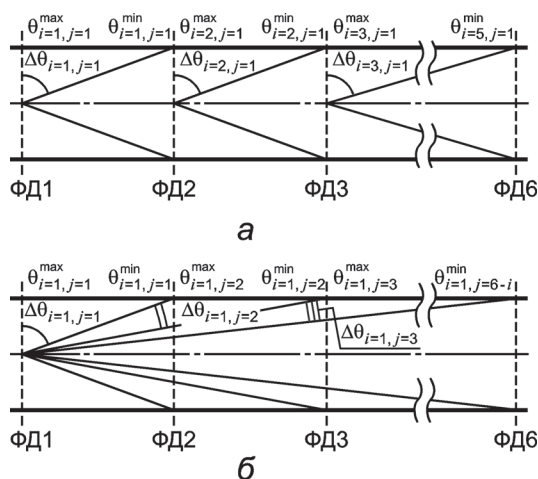


Рис. 3. Схема распространения излучения в развернутом ТД:

а — диффузное рассеяние излучения от каждого из фотодиодов; б — диффузное рассеяние излучения с учетом его отражений от первого из фотодиодов (штриховкой показаны области углов, в которых происходит поглощение излучения); ФД1...ФД6 — фотодиоды

излучения, можно получить, просуммировав интегралы от индикатрис рассеяния по интервалам $\Delta\theta_{i,j}$:

$$D = k_d \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{7-i} \int_0^{2\pi} \int_{\theta_{i,j}^{\min}}^{\theta_{i,j}^{\max}} K_{i,j}(\theta, \varphi) I(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (5)$$

Здесь φ, θ — азимутальный и зенитный углы в сферической системе координат, угол θ отсчитывается от направления распространения излучения; $K_{i,j}(\theta, \varphi)$ — коэффициент, характеризующий френелевские потери при отражении излучения от поверхности фотодиодов, который можно представить в виде

$$K_{i,j}(\theta, \varphi) = \left(\left[\hat{A}_{i,j}(\theta, \varphi) \hat{M}_{\text{дп}} \hat{B}_i \mathbf{P}_0 \right], \mathbf{e}_I \right), \quad (6)$$

где $\hat{A}_{i,j}(\theta, \varphi)$, $\hat{B}_i$ — матрицы Мюллера [7], характеризующие френелевское отражение диффузно-рассеянного излучения и френелевское отражение зеркально отраженного излучения, соответственно; $\hat{M}_{\text{дп}}$ — матрица деполяризации [7], возникающей при диффузном рассеянии излучения; $\mathbf{e}_I$ — единичный вектор Стокса, в результате скалярного произведения с которым получается интенсивность излучения.

Значение D , рассчитанное по (5), при $j=1$ соответствует поглощению диффузно-рассеянного излучения по схеме (см. рис. 3, а), а сумма по $j > 1$ — поглощению зеркально отраженного диффузно-рассеянного излучения внутри ТД (см. рис. 3, б). Следует отметить, что в приведенном решении количество слагаемых для зеркально отраженного диффузно-рассеянного излучения в (5) убывает по мере увеличения номера i фотодиода, от которого произошло диффузное рассеяние. Таким образом, суммирование проводится только по промежуткам j между фотодиодами, оставшимися после рассеивающего фотодиода до конца ТД. Предполагалось, что диффузно-рассеянное излучение, отраженное от последнего фотодиода и попадающее на отражающее зеркало или выходящее из ТД, тоже поглощается. Правомочность такого допущения будет обсуждена ниже.

Выражение (6) получено исходя из следующих соображений. Излучение, попадающее в ТД и описываемое вектором $\mathbf{P}_0$, зеркально отражается матрицей $\hat{B}_i$ от $(i-1)$ фотодиодов, после чего диффузно рассеивается на i -м фотодиоде. В результате диффузного рассеяния происходит деполяризация излучения $\hat{M}_{\text{дп}}$. Рассеянное излучение подвергается

$(j-1)$ отражениям $\hat{A}_{i,j}(\theta, \varphi)$ от оставшихся фотодиодов. Интенсивность этого диффузно-рассеянного излучения интегрируется в (5) для получения диффузных потерь.

Применив (3), можно представить матрицы Мюллера $\hat{A}_{i,j}(\theta, \varphi)$ и $\hat{B}_i$ в виде произведения матриц отражения излучения в горизонтальной $\hat{R}_r(\theta, \varphi)$ и вертикальной $\hat{R}_v(\theta, \varphi)$

плоскостях. Матрице $\hat{A}_{i,j}(\theta, \varphi)$, характеризующей зеркальное отражение диффузного излучения, будет соответство-

вать произведение последовательно чередующихся ($j - 1$) матриц $\hat{R}_r(\theta, \varphi)$, $\hat{R}_b(\theta, \varphi)$, а матрицу $\hat{B}_i$, описывающей зеркальное отражение падающего в ТД излучения, — произведение последовательно чередующихся ($i - 1$) матриц $\hat{R}_r(0, 0)$, $\hat{R}_b(0, 0)$. При этом $\theta = 0$, $\varphi = 0$, так как предполагается, что падающее в ТД лазерное излучение имеет пренебрежимо малую расходимость.

Матрицы отражений представляют матрицу идеального однородного поляризатора [7] в виде

$$\hat{R}_r(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} r_s^2 + r_p^2 & r_p^2 - r_s^2 & 0 & 0 \\ r_p^2 - r_s^2 & r_s^2 + r_p^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2r_s r_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2r_s r_p \end{pmatrix}, \quad (7)$$

Выражение для $\hat{R}_b(\theta, \varphi)$ получается из (7) при заменах $r_s \rightarrow r_p$, $r_p \rightarrow r_s$, где r_s , r_p — коэффициенты отражения для s- и p-поляризаций, соответственно, в зависимости от углов падения излучения на отражающие плоскости [8].

Анализ полученных результатов. Чтобы оценить влияние на диффузные потери D числа актов i диффузного рассеяния излучения и количества его последующих отражений ($j - 1$) в рассматриваемом ТД для случая излучения с круговой поляризацией были проведены расчеты по (5), результаты которых представлены на рис. 4. Кривая 2 соответствует расчету зависимости диффузных потерь $D = D(i)$ от числа фотодиодов, на которых учитывается диффузное рассеяние излучения и его отражения. Число возможных отражений растет с увеличением номера i . Характер кривой 2 показывает, что после учета диффузных потерь на первых четырех фотодиодах дополнительное приращение потерь излучения становится менее 0,1 % мощности падающего на ТД излучения.

Наиболее громоздким и существенно усложняющим задачу является учет отражений диффузно-рассеянного излучения внутри ТД. Для оценки влияния этого эффекта на диффузные потери были проведены специальные расчеты, в которых не учитывали отражения рассеянного излучения (см. рис. 4, кривая 3). На рис. 4 кривая 3 расположена на 10 % ниже кривой 2, что свидетельствует о необходимости учета зеркально отраженного диффузно-рассеянного излучения.

Для оценки числа отражений диффузно-рассеянного излучения, необходимых для корректного расчета значения поглощения, на рис. 4 построена зависимость диффузных потерь $D = D(j)$ от количества учитываемых отражений ($j - 1$), представленная кривой 1. Следует отметить, что крайняя левая точка этой кривой находится на одном уровне с крайней правой точкой кривой 3, поскольку соответствует поглощению диффузно-рассеянного излучения после каждого фотодиода при отсутствии его отражения. Построенная зависимость указывает на необходимость учета как минимум двух зеркальных отражений диффузно-рассеянного излучения, другими отражениями можно пренебречь.

Представленные выше результаты получены при аксиальном приближении (см. (4)) для модельной схемы ТД в виде развертки вдоль оси распространения пучка излучения. При этом не учитывали квадратную форму фотодиодов (см. рис. 2). Расчет диффузных потерь для интервала между соседними фотодиодами показал, что при учете реальной

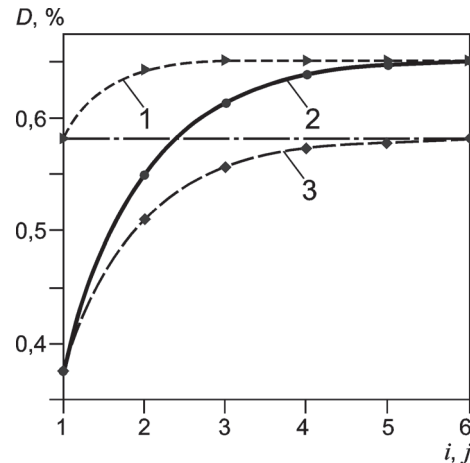


Рис. 4. Зависимость значения диффузных потерь D от числа i фотодиодов, на которых учитывается диффузное рассеяние излучения и его отражения в ТД:

1 — зависимость $D(j)$ при $i = 6$; 2 — $D(i)$, рассчитанная по (5); 3 — расчет $D(i)$ при $j = 1$

геометрии фотодиодов потери в относительном выражении увеличиваются примерно на 4 %. Очевидно, это значение и следует принять в качестве оценки погрешности использованного метода.

Как следует из результатов экспериментов, потери, связанные с диффузным рассеянием от одного фотодиода, не зависят от поляризации падающего излучения. Однако при зеркальном переотражении излучения от совокупности фотодиодов в ТД ситуация с поляризацией излучения меняется, что приводит к зависимости диффузных потерь от нее. Так, для излучения с вертикальной линейной поляризацией диффузные потери в ТД на фотодиодах Hamamatsu S6337 составляют 0,71 % мощности падающего излучения, а для излучения с горизонтальной линейной поляризацией — 0,59 %. Для точных измерений при помощи рассматриваемого ТД необходимо дополнительно контролировать поляризацию падающего излучения.

Для излучения с круговой поляризацией, деполаризованного излучения, а также для линейной поляризации с диагональной направленностью диффузные потери в ТД на фотодиодах Hamamatsu S6337 составили 0,65 %, а на фотодиодах Hamamatsu S1337 с соответствующей измененной конструкцией — 0,11 %. Это объясняется более низким значением k_d у данного типа фотодиодов и более узкой индикатрисой рассеяния.

Закключение. Оптимальная, с точки зрения независимости от поляризации измеряемого лазерного излучения, конструкция ТД должна включать диафрагмы, расположенные перед каждым фотодиодом и отсекающие большую часть диффузно-рассеянного излучения. В этом случае измеряемая мощность лазерного излучения характеризуется только зеркальной составляющей отраженного от фотодиодов излучения, которая для их четного числа не зависит от поляризации. Такая конструкция сложна для юстировки пучка излучения и обычно калибруется с использованием внешнего более точного приемника, например, криогенного радиометра [9].

Недостаток рассмотренного в настоящей работе ТД — зависимость результатов измерений от поляризации падающего излучения — можно легко устранить путем предвари-

тельных измерений отношения поляризаций в падающем пучке и последующего учета этого отношения в соответствующем коэффициенте, определяющем диффузные потери. Применение методики расчета диффузных потерь в ТД, представленной в данной работе, допускает возможность самокалибровки обоих типов ТД.

Л и т е р а т у р а

1. Fox N. P. Trap Detectors and their Properties // Metrologia. 1991. V. 28. P. 197—202.
2. Schrama C. A. e. a. Comparison of monochromator-based and laser-based cryogenic radiometry // Metrologia. 1998. V. 35. P. 431—435.
3. Ковалев А. А. и др. Определение внутренней квантовой эффективности фотодиода при помощи его вольт-амперных характеристик // Измерительная техника. 2011. № 2. С. 33—36; Kovalev A. A. e. a. Determination of the internal quantum efficiency of a photodiode by means of its current-voltage characteristic // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 2. P. 157—161.

4. Ковалев А. А. и др. Вычисление поглощенной фотодиодом мощности излучения по его экспериментальным вольт-амперным характеристикам // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 40—43; Kovalev A. A. e. a. Calculation of the radiation power absorbed by a photodiode from its experimental current-voltage characteristics // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 1. P. 57—62.

5. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Энергоатомиздат, 1983.

6. Eppeldauer G. P., Lynch D. C. Opto-Mechanical and Electronic Design of a Tunnel-Trap Si Radiometer // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2000. V. 105. P. 813—828.

7. Шерклиф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.

8. Ландау Л. В., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

9. Houston J. M., Livigni D. J. Comparison of Two Cryogenic Radiometers at NIST // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2001. V. 106. P. 641—647.

Дата принятия 25.09.2012 г.

53.088.2

Методические погрешности определения параметров спектра светодиодов двумя фотоприемниками

В. А. СЕРГЕЕВ*, В. Н. РОГОВ**, А. В. УЛЬЯНОВ**

* Ульяновский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия, e-mail: sva@ulstu.ru

** Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия, e-mail: ulyanov_a@bk.ru

Рассмотрен способ оперативного определения длины волны излучения в максимуме спектра светодиода и ширины спектра при помощи двух фотоприемников с гауссовой спектральной характеристикой и представленная структурная схема устройства. Получено выражение для методической погрешности способа.

Ключевые слова: излучение, светодиод, длина волны, фотоприемник, спектральная характеристика.

The method and structural scheme of the device intended for operational determination of the radiation wavelength in the LED spectrum maximum and of the spectrum width by means of two photoreceivers with Gauss spectral characteristics are considered. The expression for a methodical error is formulated.

Key words: radiation, LED, wavelength, photoreceiver, spectral characteristics.

Для измерения параметров спектра излучения светодиодов (СИД) используют спектроанализаторы, монохроматоры, полихроматоры и другие устройства с дисперсионными элементами [1, 2]. Эти средства измерений (СИ) имеют низкое быстродействие и достаточно сложны в настройке и калибровке. Для многих технических приложений, в частности, в системах контроля качества требуется оперативное измерение длины волны $\lambda_{\max}$ излучения в максимуме спектра $I(\lambda)$ СИД и ширины спектра σ_λ по заданному уровню. Наиболее простым методом для измерений цветности светодиодов является метод с использованием двух фотоприемников с различными, но одинаковыми по форме, функциями спектральной чувствительности [3, 4]. Однако анализ погрешностей метода применительно к спектрам светодиодов и

возможности минимизации указанной погрешности путем подбора характеристик фотоприемников в литературе авторы не обнаружили.

Рассмотрим спектрометрическое устройство, состоящее из двух фотоприемников, со спектральными характеристиками вида

$$\left. \begin{aligned} S_1(\lambda) &= \frac{S_{10}}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_1)^2}{2\sigma_1^2}\right); \\ S_2(\lambda) &= \frac{S_{20}}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_2)^2}{2\sigma_2^2}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$