

УДК 536.3:681.586.5

ГОРНОСТАЕВ Г.Ф., ПАСИЧНЫЙ В.В.,
ТКАЧЕНКО Г.В.

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВКАХ

Запропоновано алгоритм вимірювання радіаційного теплового потоку (РТП), що підводиться в процесі нагріву теплозахисного матеріалу на установках променевого нагріву. Встановлено взаємозв'язок показань розподіленого датчика РТП з показаннями термопар у зразку. Розроблено конструкцію сенсора, запропоновано алгоритм вимірювання і регулювання положення торця електроду, що оплавляється в установці плазмового розпилення порошків.

Предложен алгоритм измерения подводимого радиационного теплового потока (РТП) в процессе нагрева теплозащитного материала на установках лучистого нагрева. Установлена взаимосвязь показаний распределенного датчика РТП с показаниями термопар в образце. Разработана конструкция сенсора, предложен алгоритм измерения и регулирования положения торца оплавляемого электрода в установке плазменного распыления порошков.

The algorithm is proposed for the measurement of supplied radiative thermal flow (RTF) in the process of the heating of heat-reflecting material in the installations of radiant heating. The interconnection of the indications of the distributed RTF sensor and the indications of the thermocouples located within a sample is determined. Sensor construction, algorithm of coordinate measurement and regulation the position of the end of electrode being melted are proposed for the installation of plasma powder spraying.

РТП – радиационный тепловой поток;

УФ – ультрафиолет;

A_{21} – вероятность спонтанного излучения частиц:
 $2 \rightarrow 1$;

B_{12} – вероятность квантового перехода из состояния 1 в состояние 2;

B_{21} – коэффициент стимулированного или вынужденного излучения ($2 \rightarrow 1$);

$D_{ди}$ – диаметр диафрагмы;

D_1 – диаметр сердцевины световода;

f – функция;

H – высота диафрагмы;

$J_{фп}$ – плотность лучистого потока на приемнике;

J_{wr} – падающий лучистый поток на датчик РТП;

k – постоянная Больцмана;

$k_{св}$ – коэффициент поглощения материала световода;

L – длина оптоволоконка;

N_1, N_2 – количество частиц на невозбужденных уровнях 1 и 2;

NA – числовая апертура световода;

n – показатель преломления;

P – мощность Рэлеевского рассеяния;

P_0 – подводимая мощность излучения;

P_w – мощность потока излучения, упавшего на открытую сердцевину оптоволоконка;

Q – часть рассеянной энергии, перехваченной оптоволоконком;

$q_{свw}$ – средняя по сечению диафрагмы плотность лучистого потока, рассчитанная по показаниям датчика;

R – фотосопротивление;

S_w – площадь освещенной боковой поверхности сердечника световода;

T – абсолютная температура;

$t_{НА}$ – время нарастания;

$t_{СП}$ – время спада;

$U(\omega_{12})$ и $U(\omega_{21})$ – энергия излучения на частоте в единичном интервале частот;

$X_{БО}$ – длина оптоволоконка без оболочки;

X_0 – расстояние приемника до оси стеклянного световода; линейная координата вдоль боковой поверхности оптоволоконка;

α_w – угол падения лучей, град;

β – сжимаемость;

$\Delta R = (R_{л} - R_{п})$ – разность показаний фотосопротивлений, установленных на 2-х торцах оптоволоконка;

δ – расстояние торца стеклянного световода от боковой поверхности сердцевины кварцевого оптоволоконка;

λ – длина волны излучения;
 ρ – плотность;
 $\tau_{\nu}(X_0, \alpha_w)$ – “эффективный” коэффициент пропускания сердцевин;
 $\bar{\tau}_{\nu}$ – среднее по длине ХБО значение;
 ω – оптическая частота.

Индексы

А, Б, В, Г – последовательные значения;
 БО – без оболочки;
 ДИ – диафрагма;
 на – нарастание;
 с – световой;
 св – кварцевый световод;
 сп – спад;

ст – стеклянный световод;
 т – темновой;
 фп – фотоприемник;
 э – “эффективный”;
 m – максимум;
 г – радиационный;
 w – боковая поверхность;
 0 – ось;
 1 – уровень 1;
 2 – уровень 2;
 10 – сердцевина;
 12 переход 1 → 2;
 21 – переход 2 → 1.

I. Высокая прозрачность современных кварцевых оптоволокон (ОВ) объясняется их нейтральностью (до определенного предела) по отношению к падающей лучистой энергии.

Состояние квантовой системы в энергетическом отношении характеризуется уравнением [1]

$$U(\omega_{12})B_{12}N_1 = A_{21}N_2 + U(\omega_{21})B_{21}N_2. \quad (1)$$

Левая часть выражения (1) характеризует поглощение квантов энергии и переход частиц на верхний энергетический уровень - 2 (уровень 1 – невозбужденный энергетический уровень).

Когда $N_2 \cong N_1$, $U(\omega_{21})B_{21}N_2 = 0$ и $B_{12} \cong B_{21}$ система является нейтральной по отношению к падающей на нее энергии. Если система находится в состоянии, когда $N_2 > N_1$, она описывается полным выражением (1) и становится излучающей. Если ее не поддерживать с помощью внешнего возбуждающего излучения, она будет неустойчивой. Современные ОВ изготавливаются главным образом из химически чистой SiO_2 (возможно, с необходимыми присадками). Они содержат небольшую составляющую гидроксильной группы ОН, которая заметно поглощает на длинах волн 1,38...1,41 мкм (хотя из-за ангармонизма колебательных процессов в ионе ОН могут возникать обертоны, что приведет к появлению поглощения на $\lambda = 0,72, 0,95$ и $1,36$ мкм и комбинационных пиков поглощения на $\lambda = 0,88; 1,13$ и $1,24$ мкм).

Считают [1], что затухание света в среде SiO_2 происходит только вследствие рассеяния на неоднородностях. В веществах, из которых изготов-

ливают современные ОВ, существуют только неоднородности, размер которых много меньше длины волны – это пространственные флуктуации показателя преломления порядка размера молекул, а также сами молекулы. Мощность Рэлеевского рассеяния в чистом веществе равна

$$P = P_0 \frac{kT}{\lambda^4} \beta \left(\rho n \frac{dn}{d\rho} \right)^2$$

Конкретная часть рассеянной энергии, перехватываемая оптическим волокном, определяется из выражения

$$Q = (NA)^2 / 4n_{10}^2.$$

Рэлеевское рассеяние происходит во все стороны, поэтому часть излучения рассеяния проходит сквозь оболочку волокна и покидает его.

В одномодовых волокнах нагрев от 20 до 140 °С приводит к уменьшению коэффициента пропускания (~ 5 %) за счет изменения модовой структуры [2]. Перепады температуры окружающей среды так же вносят анизотропию в среду распространения излучения, вследствие чего в одномодовых оптоволоконках возникают дополнительные шумы и потери. Это обуславливает выбор в качестве чувствительного элемента датчика РТП многомодового кварцевого оптоволоконка (диаметр сердечника 0,4 мм).

Рэлеевское рассеяние обусловлено мелкомасштабными флуктуациями (по сравнению с λ) плотности или химического состава вследствие

неравновесных состояний, возникающих в момент стеклования. Неоднородности вызывают почти изотропное Рэлеевское рассеяние ($\lambda \leq 1,55$ мкм). Для $\lambda \leq 1,2$ мкм ход Рэлеевских потерь монотонно ($\sim \lambda^{-4}$) убывающий [3]. Поглощение энергии компонентами вещества световода ведет к квантовым переходам между различными электронными и молекулярными (колебательными) энергетическими уровнями вещества. Электронные переходы в чистом плавленом кварце соответствуют энергии квантов, относящихся к УФ-диапазону (ширина запрещенной зоны соответствует $\lambda = 0,14$ мкм).

Основные потери в кварцевом ОВ вызваны упругим Рэлеевским рассеянием, при котором не происходит изменения длины волны подводимого излучения. Подводимое излучение возбуждает мелкомасштабные неоднородности в волокне, которые действуют как вторичные индуцированные дипольные излучатели, генерирующие излучение в широком угловом спектре. Световод с конечной числовой апертурой захватывает часть рассеянного излучения и канализирует его по направлению к торцам световода. При формировании полного рассеянного поля в обоих направлениях излучения от каждого элементарного рассеивателя суммируются векторно (образуя преимущественно моды оболочки и вытекающие моды). Следовательно, если в контуре оптоволоконного будут отсутствовать дестабилизирующие возмущения, то амплитуда и фаза рассеянного поля будут стабильны во времени. Поэтому, в принципе, рассеянные волны могут обладать некоторой степенью когерентности относительно первичных (подводимых) световых волн.

Сравнительно небольшой вклад в общие потери вносит поглощение при взаимодействии фотонов с электронами или с колебательными состояниями основных компонентов материала сердцевины световода. Для кварца это поглощение существенно возрастает при $\lambda > 1,7$ мкм и для УФ – области спектра [4]. Минимум потерь в кварцевых световодах определяется только фундаментальными механизмами, а не примесями и дефектами, и приходится на спектральную область 1,2–1,7 мкм [5].

Уникальны свойства кварцевых волоконных световодов. Это в первую очередь огромная лучевая прочность кварцевого волокна, достигающая

нескольких десятков гигаватт через квадратный сантиметр, а также идеальные тепловые характеристики волокна как за счет свойств самого кварцевого стекла, так и благодаря уникальному отношению площади поверхности к объему рассеивающей среды.

Использование на оптических печах распределенного датчика – с боковым освещением оптоволоконного позволит реализовать автоматическое управление режимами нагрева исследуемого материала.

Основные положения методики измерения концентрированного РТП на установках лучистого нагрева с помощью распределенного волоконно-оптического датчика на Рэлеевском рассеянии можно представить следующим образом.

1. Обеспечение инвариантности результатов измерений РТП к тепловому излучению образца путем установки датчика над диафрагмой (проверяется в моменты кратковременного перекрытия потока J_{wr} модулятором).

2. Исключение нагрева тела световода поглощенной частью J_{wr} обеспечивается подбором минимального значения параметра ($D_1 k_{cb}$).

3. Достоверность результатов измерений обеспечивается градуировкой датчика РТП с помощью водяного калориметра.

4. Оптимизация чувствительности датчика обеспечивается путем минимизации параметров $H, X_0, X_{BO}, \alpha_{wm}$ (при $\alpha_w > 30^\circ$ потери на отражение от стекла резко растут [6]). Чем меньше α_{wm} , тем меньше может быть параметр X_{BO} , т. е. тем ближе к линейной будет зависимость $\tau_3(X_0)$.

5. Нивелирование влияния параметра wm осуществляется установкой фотоприемников на обоих торцах световода.

6. Распределение $q_{cbw}(X_0)$ может быть измерено датчиком РТП с помощью щелевой диафрагмы, которая перемещается вдоль оси световода.

Для меридиональных лучей в оптоволоконном основное соотношение распределенного датчика РТП можно представить в виде (рис. 1 и рис. 3):

$$J_{\text{фп}} = 0,5 \int_{X_0=X_1}^{X_0=X_1+X_{\text{БО}}} \int_{\alpha_w=0}^{\alpha_w=\alpha_{wm}} J_{wr}(X_0, \alpha_w) \tau_3 \times \\ \times (X_0, \alpha_w) dX_0 d\alpha_w.$$

Теоретический расчет затруднен из-за отсутствия данных о реальном распределении параметров $J_{wr}(X_0, w)$ и $\tau_3(X_0, \alpha_w)$. Можно пользоваться упрощенной формулой $J_{фп} = J_w \bar{\tau}_3$, где $\bar{\tau}_3$ для конусного пучка был определен экспериментально по методике, проиллюстрированной на рис. 1. Обобщенный параметр $\bar{\tau}_3$ учитывает как меридиональные, так и косые лучи.

С целью исследования метрологических возможностей датчика проведены модельные эксперименты на установке, показанной на рис. 1. На участке гибкого световода $X_{БО}$ были сняты обе полимерные оболочки и кварцевая сердцевина освещалась вольфрамовой лампой (150 Вт), установленной в центре полусферического концентратора диаметром 200 мм. Освещение датчика конусным пучком осуществлялось через жесткий стеклянный световод $\varnothing 1$ мм. Используя полученную ранее энергетическую характеристику фотоприемника, выполнен расчет τ_3 по следующей методике.

- ◆ $J_w = J_{фпс}(R_c) - J_{фпг}(R_r) = 2 \cdot 996 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²;
- ◆ $P_w = J_w \cdot S_w = 3 \cdot 77 \cdot 10^{-6}$ Вт;
- ◆ $J_{ФПА}(X_0 = 1,5 \text{ мм}) = 2 \cdot 9 \cdot 10^{-10}$ Вт,
 $J_{ФПБ}(X_0 = 10 \text{ мм}) = 1,52 \cdot 10^{-10}$ Вт,
 $J_{ФПВ}(X_0 = 20 \text{ мм}) = 0,75 \cdot 10^{-10}$ Вт,
 $J_{ФПГ}(X_0 = 28,5 \text{ мм}) = 0,54 \cdot 10^{-10}$ Вт.
- ◆ $\tau_{ЭА} = 0,71 \cdot 10^{-4}$, $\tau_{ЭБ} = 0,4 \cdot 10^{-4}$,
 $\tau_{ЭВ} = 0,2 \cdot 10^{-4}$, $\tau_{ЭГ} = 0,14 \cdot 10^{-4}$,
 $\bar{\tau}_3 = 0,375 \cdot 10^{-4}$.

Чем меньше X_0 , тем ближе $\bar{\tau}_3$ к истинному значению.

На установке “Кристалл – М” три ксеноновые лампы с концентраторами (диаметром 0,6 м) расположены под углом 120°. Датчик установлен над водоохлаждаемой диафрагмой, рис. 2. Аналоговый сигнал датчика РТП выводился на экран персонального компьютера вместе с показаниями термопары, расположенной в поверхностном слое исследуемого материала. Целесообразно устанавливать фотоприемники на обоих торцах световода. Ток на лампах последовательно увеличивался: 0 – 50 – 100 – 150 А. Для каждого значения тока сигнал датчика был постоянен (рис. 3, а). Изменение температуры нагретой поверхности образца (Ni – Carbon), расположенного под диа-

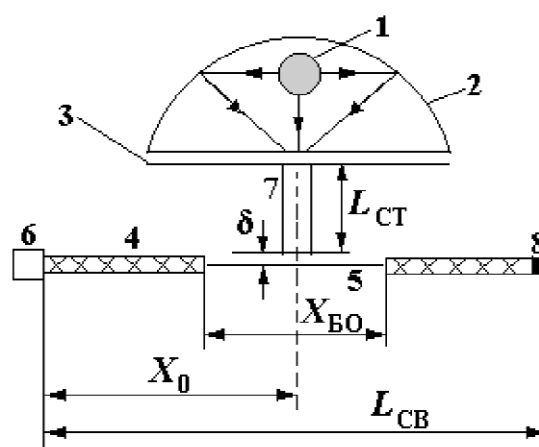


Рис. 1. Схема модельного эксперимента:
 (1 – лампа, 2 – отражатель $\varnothing 200$ мм,
 3 – диафрагма, 4 – кварцевый световод $\varnothing 1$ мм в оболочке, 5 – жила световода $\varnothing 0,4$ мм,
 6 – приемник, 7 – стеклянный световод $\varnothing 1$ мм;
 $L_{СТ} 20$ мм, $L_{СВ} = 1000$ мм; $\delta = 1,5$ мм, $X_{БО} = 30$ мм,
 $X_0 = 850$ мм).

фрагмой, коррелирует с показаниями датчика РТП. Аналогичная картина имела место при последовательном снижении тока 150 – 100 – 50 – 0 А. Используя значения $\bar{\tau}_3$, получены значения мощности потока, упавшего на боковую поверхность световода (13,6 Вт), и средней плотности подводимого потока (330 Вт/см²) в пятне диаметром, равным $X_{БО} = 65$ мм, при токе на трех лампах по 150 А. Коэффициент пересчета на плотность потока, прошедшего через отверстие в диафрагме, определяется путем сравнения с показаниями водяного калориметра.

Условия испытаний были следующие: $H = 12$ мм, $D_1 = 0,4$ мм, $L_{СВ} = 1000$ мм; $X_{БО} = 65$ мм, $D_{ди} = 10$ мм, $\lambda_m = 0,78$ мкм.

На рис. 3, б хорошо видно, что после всплеска РТП, зафиксированного с помощью датчика, наблюдается плавный рост температуры образца ($t_{НА}$), а при резком снижении РТП – плавное уменьшение температуры ($t_{СП}$).

II. При плазменном распылении порошков (РП) целью автоматического контроля оплавления электрода и управления его подачей является оптимизация производительности и энергозатрат процесса. Ввиду сложности контроля процесса, протекающего в вакуумной установке и сопровождающегося интенсивным разбрызги-

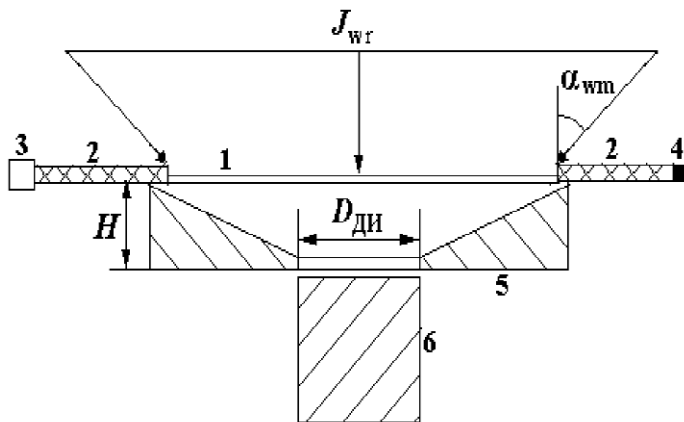


Рис. 2. Схема эксперимента на установке “Кристалл-М”: ($H = 12$ мм, $D_{ди} = 10$ мм, $J_{вр}$ – падающий поток, $\alpha_{вп}$ – максимальный угол падения лучей): 1 – жила световода; 2 – оптоволокно в оболочке, 3 фотоприемник, 4 – черный лак, 5 – диафрагма, 6 – образец.

ванием жидких металлических капель, управление подачей электрода осуществляется, как правило оператором. Однако оператор не в состоянии быстро реагировать на резкие изменения скорости оплавления, вызванные наличием локальных дефектов в материале электрода. Это может реализовать только автоматическая система управления. Проектирование устройства для автоматического контроля за оплавлением электрода основано на экспериментальных оценках чувствительности волоконно-оптического датчика к линейному перемещению торца светового имитатора электрода. Имитатор представляет собой трубу из матового стекла ($\varnothing 50$ мм), освещенную изнутри лампой мощностью 100 Вт. Изображение торца имитатора через объектив и гибкий волоконно-оптический жгут диаметром 13 мм \times 1000 мм с регулярной укладкой волокон проецируется на боковую поверхность световода $\varnothing 1$ мм \times 80 мм (рис. 4, а). На обоих торцах световода установлены фотоспротивления. С помощью специального кожуха световодный датчик и выходной торец жгута светозащищены от фонового излучения. Применение гибкого волоконно-оптического жгута позволяет обеспечить параллельность пучка, падающего на боковую поверхность световода, что исключает зависимость величины светового потока на фотоприемник от угла падения пучка на боковую поверх-

ность световода. Кроме этого, применение жгута для передачи изображений позволяет визуализировать контур электрода, что существенно облегчает процесс градуировки на имитаторе, а также процесс юстировки сенсора на реальном объекте. Справа от светящегося торца имитатора располагался объектив, в фокальной плоскости объектива располагался входной торец световодного жгута для передачи изображения. Взаимное расположение торца имитатора и объектива соответствовало расположению торца электрода и смотрового окна установки плазменного распыления порошков в ИПМ НАН Украины. Установлено, что при сочетании длиннофокусного объектива с волоконно-оптическим жгутом $\varnothing 13$ мм, большая ось эллипса изображения составляет 70 % выходного диаметра жгута; линейное перемещение границы контура изображения вдоль малой оси эллипса составляет в среднем 0,1 мм на 1 мм продольного перемещения имитатора; при продольном перемещении имитатора на десятки миллиметров граница изображения его торца уходит за пределы диаметра выходного сечения световодного жгута.

При оплавлении электрода одновременно будут изменяться следующие признаки изображения его торца на выходном сечении световодного жгута: кривизна контура (отличие от круга) – ск; масштаб изображения – см; координаты расположения контура – ср. Влияние “веера” капель вокруг торца электрода на “размытость” контура изображения можно нивелировать частотным фильтром. Таким образом, совокупность признаков изображения оплаваемого торца электрода можно представить в виде вектора признаков $S = F[b(X, Y)] = (c_k, c_m, c_p)$, где $b(X, Y)$ – двумерная функция изображения торца электрода. Непосредственная обработка изображения с целью классификации всех дискретных значений двумерной функции изображения $b(X, Y)$ не целесообразна [7]. При измерениях и контроле важнее селективное выделение информации, характеризующей различие между отдельными частями этого изображения. В данном случае вектор S можно классифицировать как расстояние вертикальной оси эллипса изображения торца имитатора от середины ($X = 0$) световода. Это расстояние можно определить, предварительно

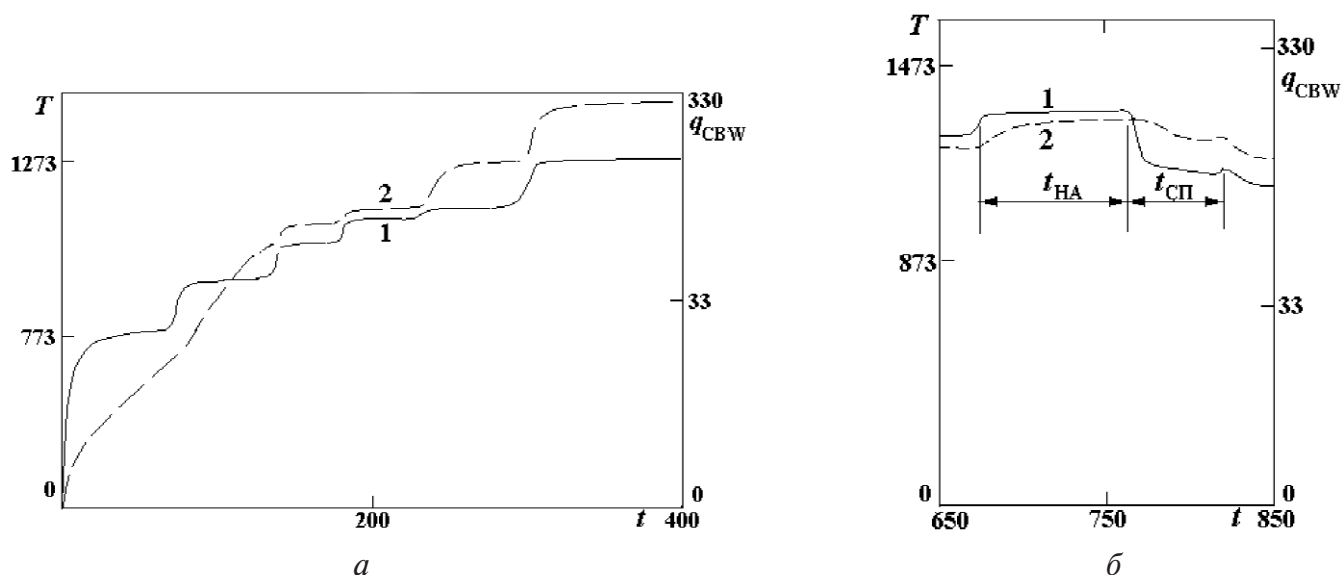


Рис. 3. Изменение потока q_{CBW} (1) на жилу оптоволоконна и температуры (2) в поверхностном слое ТЗМ (Ni – Carbon): а – при ступенчатом увеличении тока нагрева трех ламп; б – при изменении РТП (t_{HA} и $t_{CП}$ – время увеличения и уменьшения РТП);

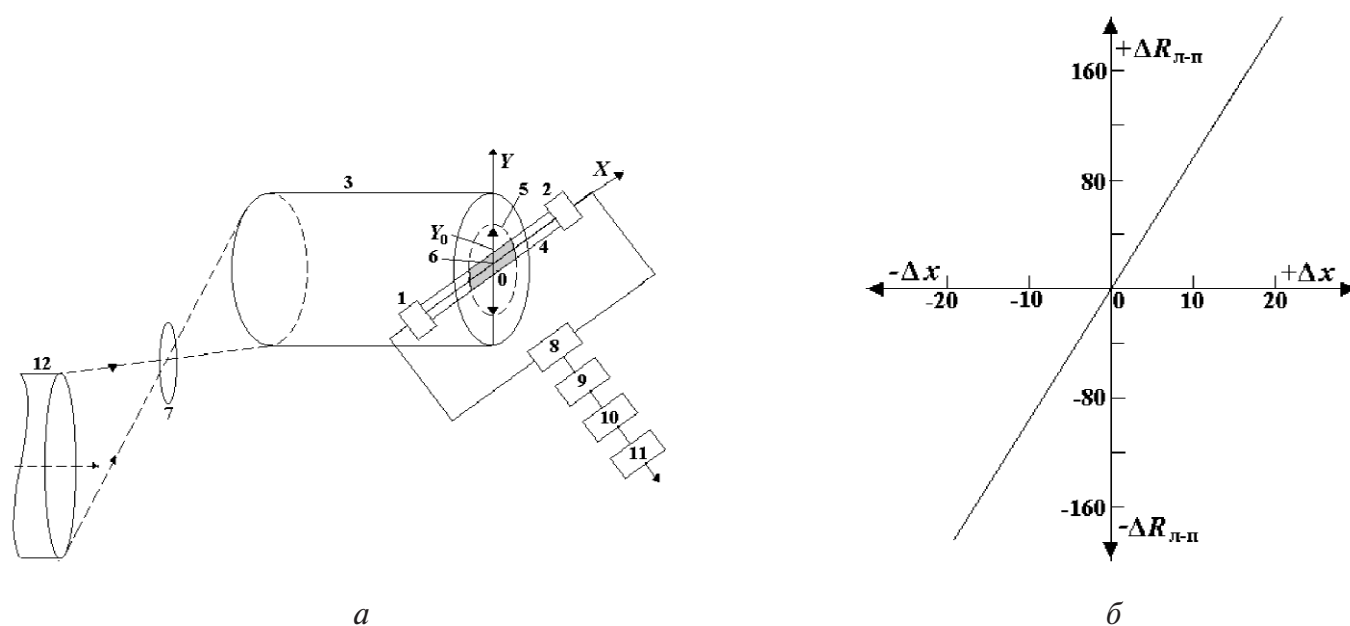


Рис. 4. Датчик для системы управления подачей электрода в установке ПРП: а – конструкция датчика (1, 2 – фоторезисторы, 3 – волоконно-оптический жгут, X – координата вдоль оси световода; Y_0 – вертикальная ось изображения; 4 – световод \varnothing 1 мм, 5 – контур изображения торца имитатора, 6 – ось световода, 7 – объектив, 8 – мостовая схема, 9 – усилитель, 10 – дискриминатор, 11 – двигатель подачи электрода, 12 – имитатор); б – статическая характеристика датчика: зависимость разницы фотосопротивления $\Delta R_{л-п}$ от расстояния ΔX оси Y_0 эллипса изображения до середины световода.

получив на имитаторе градуированную зависимость: $\Delta R_{л-п} = f(\Delta X)$.

Полученная зависимость (рис. 4, б) свидетельствуют, что чувствительность сенсора к продольному перемещению торца имитатора: 1 кОм/мм. Алгоритм управления подачей электрода в установке ПРП может состоять в следующем. При включении двух фотосопротивлений в измерительную схему с двумя источниками питания результирующий электрический ток будет менять полярность (направление) в зависимости от того, $R_{л} > R_{п}$ или $R_{л} < R_{п}$. Этот ток после усиления и нормирования уровня подается на двигатель подачи электрода. Алгоритм регулирования подачи электрода: $R_{л} - R_{п} \rightarrow 0$.

Выводы

1. Доказана возможность измерения концентрированного лучистого потока, падающего на боковую поверхность неохлаждаемого кварцевого оптоволокна $\varnothing 0,4$ мм, используя экспериментально определенный параметр $\bar{\tau}_3$. Получено основное уравнение для распределенного датчика РТП, а также упрощенное соотношение для практического использования. Датчик РТП на Рэлеевском рассеянии использовался при испытании теплозащитных материалов на установке "Кристалл-М".

2. Разработана конструкция сенсора с боковым освещением оптоволокна для контро-

ля положения торца оплаваемого электрода в установке ПРП. Используя световой имитатор электрода, получена линейная статическая характеристика датчика. Предложены методика и алгоритм управления подачей электрода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Скляров О.К.* Современные волоконно-оптические системы передачи. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 237 с.
2. *Бутусов В.М., Верник С.М.* Волоконно-оптические системы передачи. – М.: Радиосвязь, 1992. – 250 с.
3. *Бутусов М.М., Галкин С.П., Орбинский С.П.* Волоконная оптика и приборостроение. – Л.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
4. *Красюк Б.А., Семенов О.Г., Шереметьев А.Г.* Световодные датчики. – М.: Машиностроение, 1990. – 250 с.
5. *Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.М.* Введение в оптоэлектронику. – М.: Высшая школа, 1991. – 191 с.
6. *Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К.* Оптика световодов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 310 с.
7. *Шмидт Д., Шварц В.* Оптоэлектронные сенсорные системы. – М.: Мир, 1991. – 96 с.

Получено 01.11.2005 г.