

УДК 535.214.4:15

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАДИОМЕТР СРЕДНИХ ИК-ИЗЛУЧЕНИЙ

А. А. Волков, А. В. Иевский, А. В. Козарь, И. А. Левина, Е. Г. Мачулка,
В. К. Новик, В. А. Огневский, Ю. А. Пирогов, В. И. Терещенко,
В. П. Фомичев

(кафедра радиофизики СВЧ)

Введение. Проблема бесконтактного измерения температуры представляет собой актуальную задачу, так как в настоящее время практически отсутствуют надежные методы достоверного контроля теплового состояния объектов при их термообработке в массовом (поточном) промышленном производстве. Контактные способы измерения температуры, например с помощью термопар [1], в принципе неприемлемы для поточного производства из-за невозможности укреплять термопары на деталях, движущихся по конвейеру. Существующие способы цветовой пирометрии [2] также не годятся для заводских условий, так как пары воды, широко применяемой в термических цехах для охлаждения на ряде этапов термообработки, дымовые образования и окалина на поверхности раскаленного металла практически непрозрачны для света и ближних ИК-излучений. Даже при отсутствии окалины, а также непрозрачных дымовых и туманных аэрозолей достоверность световой пирометрии невысока, поскольку, согласно, например, исследованиям [2—4], излучательная способность металлов в области коротких длин волн ($\lambda < 5$ мкм) весьма нерегулярно зависит от температуры, состояния поверхности объекта и длины волны излучения.

В данной работе показано, что большинство проблем промышленной термометрии высокой точности можно решить на основе регистрации тепловых излучений в среднем ИК-диапазоне длин волн ($\lambda > 5$ мкм). В самом деле, атмосфера в этом диапазоне имеет ряд «окон прозрачности» [5]; частицы дыма, пыли и капли тумана, имеющие обычно диаметр $d \leq 1$ мкм, слабо рассеивают излучение, и состояние поверхности объектов более регулярно меняется с температурой [2], поскольку излучательная способность ϵ_λ в соответствии с эмпирической формулой $\epsilon_\lambda = a\lambda^{-1/2}$ ($a = \text{const}$), справедливой при $\lambda > 5$ мкм, слабо зависит от длины волны излучения. Следовательно, увеличение длины волны регистрируемого излучения повышает достоверность измерения температуры. В то же время рабочая длина волны не должна быть слишком большой, так как в области длинных волн, в соответствии с законом Планка, резко уменьшается интенсивность теплового излучения и чувствительность детектора может оказаться недостаточной. Поэтому оптимальным для измерения оказывается участок спектра от 8 до 12 мкм, на который и настраивается соответствующим просветлением германиевой оптики ИК-радиометр, разработанный по договору о научно-техническом содружестве между МГУ и Объединением АвтоЗИЛ, для бесконтактного контроля температуры в пределах 100—1300°С при индукционной термообработке деталей машин на ЗИЛе.

В качестве чувствительного элемента радиометра был выбран пироэлектрический датчик как наиболее простой в исполнении, надежный в работе и, что особенно важно для заводских условий, не требующий охлаждения, в отличие от других приемников этого диапазо-

на. Чувствительность и быстродействие пирозлектриков с большим запасом обеспечивает задачи контроля термической обработки деталей механизмов и машин.

Устройство радиометра. Радиометр (рис. 1) представляет собой радиометрическую головку 1, помещенную в массивный цилиндрический корпус-экран 2 из ферромагнитного сплава АРМКО. Внутри корпуса размещены ИК-оптика 3, просветленная в диапазоне 8—12 мкм, пирозлектрический датчик ИК-излучений 4 и транзисторный усилитель 12. Пирозлектрический модуль содержит пирозлектрический элемент на кристалле LiTaO_3 с рабочей площадкой $\sim 2 \text{ мм}^2$, согласующий усилитель на бескорпусных полевых транзисторах и просветленное окно из германия. Пирозлектрический элемент находится в фокусе германиевой линзы и регистрирует тепловое излучение, проходящее с площадки $\sim 1 \text{ см}^2$ поверхности исследуемой детали 6, которая может располагаться на расстоянии от 0,5 до 5 м. Модуляция теплового излучения, необходимого для проявления пирозлектрического эффекта, осуществляется на частоте $\sim 130 \text{ Гц}$ вращением перфорированного обтюратора 5, расположенного перед радиометрической головкой.

Радиометрическая головка с модулятором смонтирована на оси поворотного механизма 8, осуществляющего вращение головки по углу места и по азимуту. Для наводки на выбранную для измерений точку детали радиометр снабжен съемным перископическим прицелом, ось которого совпадает с оптической осью радиометра.

Сигнал с пирозлектрического датчика усиливается трехкаскадным транзисторным усилителем 12 и подается по кабелю с двойной экранировкой от мощных заводских наводок в отдельный блок 11 с измерительным стрелочным прибором и источником питания.

Возможны различные режимы работы радиометра: 1) измерение стрелочным прибором, 2) регистрация показаний с выходом на самописец 10 напряжения, снимаемого с сопротивления 10 Ом, включенного последовательно со стрелочным прибором. При коэффициенте усиления усилителя около $3 \cdot 10^4$ максимальное показание стрелочного прибора соответствует выходному напряжению $\sim 300 \text{ мВ}$. С применением схемы обратной связи 9 для управления работой индукционного генератора нагрева 7 сигнал радиометра может быть использован для автоматической фиксации заданного режима термообработки.

Методика измерений, результаты и их обсуждение. Испытания радиометра проводились в Центральной лаборатории высокочастотной электротермии Объединения АвтоЗИЛ. Измерялись потоки теплового излучения деталей в сериях по 10 шт. Нагрев деталей осуществлялся индукционным методом токами высокой частоты. Нагреваемая деталь (стальной цилиндр из стали марки 18ХГТ диаметром 70 мм и длиной 150 мм) располагалась соосно с индуктором в средней его части. На поверхности детали в месте измерения температуры и съема тепловых потоков зачеканивалась термопара. Радиометром регистрировался поток излучения, проходящий с круговой площадки 1 см^2 с центром, удаленным на 1 см от точки, в которой была зачеканена термопара. Радиометр располагался на расстоянии около 1—1,5 м от детали.

Результаты измерений регистрировались с помощью двухкоординатного самописца ПДС-021, на вертикальную развертку которого подавалось напряжение с термопары, а на горизонтальную — с выхода радиометра. Предварительно вертикальная развертка градуировалась в диапазоне 100—1300°С. Таким образом снималась зависимость температуры T от показаний радиометра I , т. е. функция $T(I)$.

При увеличении мощности генератора температура детали повышается от комнатной до 1300°C (прямой ход зависимости $T(I)$). Измерения проводились начиная с уровня $T \sim 100^{\circ}\text{C}$. После достижения максимальной температуры $T \sim 1300^{\circ}\text{C}$ генератор выключался, деталь остывала и в процессе ее охлаждения снимался обратный ход кривой $T(I)$. По результатам испытаний были построены графики зависимости уровня теплового излучения от температуры как

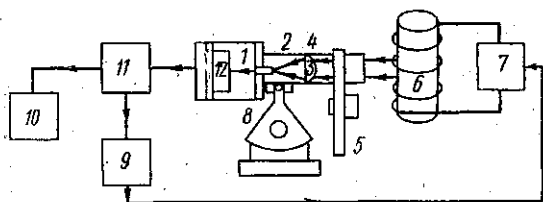


Рис. 1. Схема радиометра

при нагревании деталей до максимальных температур, так и при охлаждении до минимальной температуры излучаемого материала. На графиках (рис. 2) отмечается следующее.

1. Одинаковый с точностью до $\pm 1,3\%$ прямой ход кривых $T(I)$.
2. Для каждой из деталей обратный ход кривых $T(I)$ (при охлаждении) не совпадает с прямым, систематически отклоняясь от прямого хода сдвигом вверх на 5—6%. Однако кривые $T(I)$ при охлаждении (обратный ход) для разных деталей совпадают, правда, с меньшей точностью: $\pm 2-3\%$.

Причиной несовпадения прямого и обратного хода кривых является образование окалины (при температуре выше 900°C). Она экранирует нагретую поверхность металла и препятствует выходу тепловых потоков. Вместе с тем излучательная способность у окалины выше, чем у самого металла (близка к единице), что способствует интенсивному охлаждению ее поверхности. В результате при одинаковых температурах окалины и металла поток тепловой радиации с поверхности окалины оказывается больше, чем с оголенной поверхности металла, а при одинаковых потоках температура окалины ниже температуры металла (на рис. 2 по оси ординат отложена температура металлической поверхности, измерявшаяся в контрольных экспериментах зачеканенной в металл термопарой). Из рис. 2 видно, что скол окалины в процессе охлаждения детали № 1 (точка А) приводит к совпадению кривых прямого и обратного хода.

Была проведена также проверка надежности действия радиометра при наличии атмосферных и электромагнитных помех. При этом оказалось, что дым, пары воды, аэрозоли, непрозрачные для видимого излучения, и мощные электромагнитные поля практически не влияют на показания радиометра, т. е. меры, принятые по экранировке схемы и выбору спектрального диапазона чувствительности радиометра, оказались достаточно эффективными.

Таким образом, разработанный и испытанный в заводских условиях пироэлектрический радиометр средних ИК-излучений может применяться в промышленном поточном производстве для бесконтактного

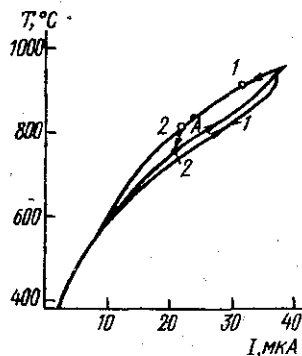


Рис. 2. Зависимость уровня теплового излучения от температуры для детали 1 (1) и 2 (2). Прямой и обратный ход кривых показан соответствующей стрелкой

контроля температуры серийных деталей с точностью $\pm 1-3\%$ (в зависимости от режима термообработки и интервала температур) как в условиях образования окалины, так и при повышенной задымленности и влажности атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел. М.: Наука, 1964.
 [2] Лебедева В. В., Новик В. К. Изв. АН СССР. Сер. Metallургия и горное дело, 1964, с. 143. [3] Свет Д. Я. В кн.: Проблемы металлургии. М.: Изд-во АН СССР, 1953, с. 99. [4] Топерверхи Н. И., Шерман М. Я. Теплотехнические измерительные и регулирующие приборы на металлургических заводах. М.: Metallургия, 1951. [5] Фуке М. К. Рассеяние света в газах, жидкостях и растворах. Л., 1977.

Поступила в редакцию
14.10.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 4

УДК 621.315.592

НЕЛИНЕЙНАЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ ПРИМЕСНОГО ЦЕНТРА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ. II

Ю. П. Дрожжев

(кафедра физики полупроводников)

§ 1. Сильное поле. В случае, когда низкочастотное поле, прикладываемое к образцу, достаточно сильно (критерий будет указан ниже), уже нельзя использовать разложение в ряд по амплитуде ϵ_{ω_0} .

В электромодуляционной спектроскопии измеряется разность

$$\epsilon_{ik}^F(\omega) - \epsilon_{ik}^0(\omega), \quad (1)$$

где ϵ_{ik}^F — диэлектрическая проницаемость при наличии (отсутствии) внешнего модулирующего поля.

С помощью метода [1] можно показать, что (1) соответствует изменению потенциальной функции

$$\Delta V = -e^2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T dt \int \frac{d^3 p}{(2\pi\hbar)^3} \left\{ \epsilon(t) R_p^{ic} G_c^{(0)}(\epsilon_0) \frac{ie\hbar \epsilon(t) \nabla_p}{i\hbar \frac{\partial}{\partial t} - \epsilon_p + i\delta} \epsilon(t) R_p^{ic} \right\}. \quad (2)$$

Пусть β — направление сильно модулирующего поля и направление распространения света.

Используя разложение поля в ряд Фурье и определение оператора G_c^0 [1], можно преобразовать (2) к виду:

$$\begin{aligned} \Delta V = & - \frac{e^3}{(2\pi\hbar)^3} \sum_{\omega, \omega_0} \text{Re} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T dt \cdot e^{i\omega_0 t - i(\omega + \omega_0)t} \times \\ & \times \int d^3 p \int_{-\infty}^t dt' \epsilon_{\omega_0} \epsilon_{\omega} \epsilon_{\omega_0} \times R_{p-\frac{e}{c} \Lambda(t)}^{ic} \left(\nabla_p \frac{R_p^{ic}}{\hbar\omega - \epsilon_p} \right)_{p=p-\frac{e}{c} \Lambda(t)} \times \\ & \times \exp \left\{ -\frac{i}{\hbar} \int_{t'}^t \left[\epsilon_{p-\frac{e}{c} \Lambda(x)} - \hbar(\omega + \omega_0) \right] dx \right\}, \\ & \epsilon_p \equiv \epsilon_0 + i\delta. \end{aligned} \quad (3)$$