

Определение температуры излучающего объекта методом спектральной пирометрии

Б. Лапшинов, к. т. н.¹, А. Суворинов, д. т. н.², Н. Тимченко³

УДК 535.233.43 | ВАК 05.11.01

Развитие высокотемпературных технологий (лазерных, плазменных, радиационных), где температура – критический параметр большей части процессов, требует использования новых методов термометрии, способных преодолеть ограниченные возможности традиционных методов, как контактных, так и бесконтактных. Один из них – спектральная пирометрия.

ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

По актуальности измерение параметра «температура» в производственных процессах и научных исследованиях занимает второе место после параметра «время». Число новых объектов, температуру которых необходимо измерять, растет быстрее, чем появляются новые методы, способные это реализовать. Во многих технологических операциях необходимо не только наблюдать за температурой, но и обеспечивать автоматизированное управление температурным режимом.

Широко использовать контактные методы измерения температуры (термопары, терморезисторы) не удается из-за труднодостижимого теплового равновесия объекта и датчика. Для выполнения этого условия необходимо обеспечить надежный тепловой контакт между датчиком и объектом, сведя к минимуму тепловое сопротивление между ними. При этом измеряемая температура относится только к датчику, а не к объекту исследования. Бесконтактные методы измерения температуры (пирометрия), несмотря на достоинства, не подходят во многих случаях, поскольку интерпретация результатов зачастую требует проведения достаточно сложных дополнительных исследований в целях правильного учета оптических характеристик объекта. Методы пирометрии активно используются при измерении относительно высокой температуры (выше 1000 °С), где другие методы трудно или невозможно применить.

В течение последних десятилетий одной из основных задач при разработке новых технологических процессов в микроэлектронике было снижение температуры. Это привело к тому, что в большом количестве технологических операций измерение температур с помощью

радиационной термометрии стало невозможным, и должный температурный контроль не обеспечивается. В последние десятилетия разработан ряд методов измерения температуры, основанных на использовании зондирующего светового пучка (лазера), а термочувствительным элементом является сам исследуемый объект [1]. Световой сигнал можно передавать как в свободном пространстве, так и с помощью оптического волокна.

Тем не менее, в производстве микроэлектронных приборов многие процессы (выращивание полупроводниковых монокристаллов, окисление и диффузия примеси, отжиг после ионного легирования, эпитаксия и др.) относятся к высокотемпературным, где температура является критическим параметром. На большей части технологически отлаженных производств ограничиваются нахождением и поддержанием необходимого температурного диапазона технологического процесса, а не точных значений температуры. При этом из-за невозможности учесть все влияющие факторы присутствует систематическая ошибка, но условия проведения процесса всегда одни и те же. Здесь важна воспроизводимость температуры в условной шкале, а не точное ее значение. Однако при проведении научных исследований и отладке новых технологий знание относительно точной температуры (от долей процента до нескольких процентов) – необходимое условие.

Бесконтактная радиационная термометрия – наиболее распространенный метод измерения температур $T \geq 1300\text{--}1500\text{ K}$ – основана на регистрации теплового излучения нагретых объектов. Спектр теплового излучения реального объекта с произвольной излучательной способностью (коэффициентом излучения) $\epsilon(\lambda, T) \leq 1$ описывается формулой:

$$I_{(\lambda, T)} = \epsilon \cdot C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]^{-1}, \quad (1)$$

где $C_1 = 2\pi^5 h^2 c^2 / 15 = 37418\text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4 \cdot \text{см}^{-2}$ и $C_2 = hc/k = 14388\text{ мкм} \cdot \text{К}$ – первая и вторая пирометрические константы соответственно, h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, c – скорость света в вакууме, λ – длина волны излучения.

¹ ФГБНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий» («НИИ ПМТ»), старший научный сотрудник, lbaniipmt@mail.ru.

² ФГБНУ «НИИ ПМТ», ведущий научный сотрудник, suv1945@mail.ru.

³ ФГБНУ «НИИ ПМТ», ведущий программист, njtim@mail.ru.

Значение $\epsilon(\lambda, T)$ реальных объектов определяется расчетными методами либо экспериментально. Обычно зависимость ϵ от температуры выражена слабее, чем от длины волны. Зависимость $\epsilon(\lambda)$ для твердых тел носит сравнительно плавный характер, а для газообразных – характер резких колебаний.

Большую роль в технике играют понятия о так называемых серых телах и сером излучении. Серым считается неселективный тепловой излучатель, способный излучать сплошной спектр, со спектральной интенсивностью, определяемой (1), и коэффициентом излучения $\epsilon < 1$, не зависящим от длины волны.

Строго говоря, серых тел, так же, как и абсолютно черных тел, в природе не существует. В диапазоне от видимой до далекой инфракрасной области спектра ни одно тело не является серым. Однако на ограниченных участках спектра, различных по протяженности для разных тел, коэффициент ϵ остается практически неизменным, и многие тела могут с достаточной точностью считаться серыми. Прежде всего к серым можно отнести твердые тела с шероховатыми поверхностями, особенно диэлектрики, полупроводники и окислы металлов.

Традиционные методы радиационной термометрии – яркостная пирометрия (на одной длине волны), цветовая пирометрия (на двух длинах волн) и многоволновая пирометрия, несмотря на широкое распространение, отличаются рядом существенных недостатков, связанных с неопределенностью значений $\epsilon(\lambda, T)$ для выбранных длин волн при измерении температуры.

В научных исследованиях увеличивается количество материалов, об излучательной способности которых вообще нет данных. К таким материалам можно отнести многокомпонентные смеси, композиционные и модифицированные материалы, новые материалы электроники и многие другие. Кроме этого, существует необходимость измерения динамики температуры в нестационарных и быстропротекающих процессах с временным диапазоном от 10^{-12} с.

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПИРОМЕТРИЯ

В последнее десятилетие активно развивается модификация метода пирометрии – спектральная пирометрия [2]. Она основана на регистрации широкого спектра излучения объекта и определении его температуры без знания коэффициента излучения ϵ . В спектральном пирометре используется малогабаритный оптический спектрометр с ПЗС-линейкой фотоприемников. Такой прибор позволяет за достаточно короткое время (порядка 1 мс) зарегистрировать абсолютный спектр излучения объекта (в $\text{мкВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$) в определенном интервале длин волн – УФ, видимом или ближнем ИК.

Преимущество метода в том, что он дает возможность получать значительно больше первичной информации

об объекте, чем это доступно на основе традиционных методов пирометрии. Вместо одного или двух значений интенсивности света с помощью спектрометров с полупроводниковой ПЗС-линейкой регистрируется несколько сотен или тысяч значений. Это позволяет компенсировать нехватку исходных знаний об объекте, без которых традиционные методы пирометрии работать не могут. В спектральной пирометрии нет необходимости заранее знать или предполагать, как изменяется излучательная способность с длиной волны излучения или с температурой. Информация об этом содержится в спектре теплового излучения. Не надо знать, является ли объект изотермическим, это тоже можно определить по особенностям спектра. Линии и полосы постороннего излучения (плазмы, пламени) легко выявляются и устраняются из спектра, чтобы температуру объекта можно было вычислять по непрерывному спектру.

Для области Вина формула (1) принимает вид:

$$\ln(\epsilon C_1) - C_2 / (\lambda T) = \ln(\lambda^5 I). \quad (2)$$

Для серого тела ($\epsilon = \text{const}$) это выражение является уравнением прямой в координатах $x = C_2 / \lambda$ и $y = \ln(\lambda^5 I)$, при этом наклон прямой определяется температурой. При исследовании высокотемпературных объектов (выше ~4500 К) необходимо использовать формулу Планка, тогда координатами будут $x = C_2 / \lambda$ и $y = \ln[1 + C_1 / (\lambda^5 I)]$. Построив зарегистрированный спектр или его участок в этих координатах, можно сразу рассчитать температуру объекта в случае, если зависимость спрямляется, то есть объект является серым телом.

Для определения температуры по спектру объекта необходимо воспользоваться спектральным пирометром [3], который функционально состоит из двух блоков – сбора информации и ее обработки (рис. 1). Блок сбора информации содержит малогабаритный спектрометр и оптическое волокно для доставки излучения объекта в спектрометр. Блок работает под управлением программного обеспечения, соответствующего используемому спектрометру. В блоке обработки спектральной информации используется специализированная программа вычисления температуры по спектру, например Spectral Pyrometry [4]. Она позволяет сравнивать экспериментальный спектр с рассчитанным спектром абсолютно черного тела и выявлять области спектра, где они максимально совпадают; удалять участки спектра с линиями и полосами; рассчитывать температуру по спектру излучателя в указанном диапазоне длин волн (по методу наименьших квадратов решается уравнение прямой $y = ax + b$, откуда температура находится как $T = 1/a$). Возможно одновременное подключение нескольких спектрометров для различных областей спектра (ближней УФ, видимой и ближней ИК) с их синхронным запуском, что расширяет диапазон определяемых

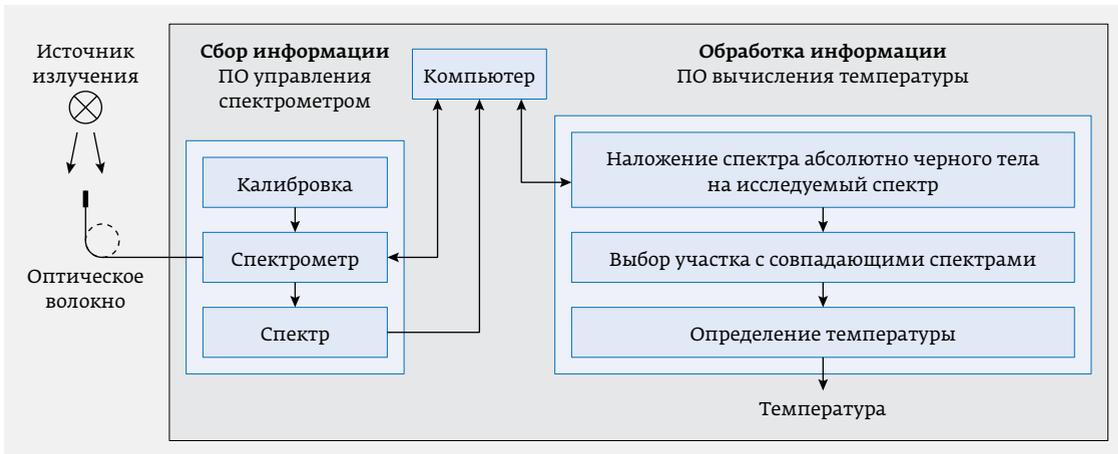


Рис. 1. Блок-схема спектрального пирометра

температур. Программа позволяет оперативно в интерактивном режиме обработать огромные массивы результатов измерений спектров в интересующих исследователя диапазонах длин волн.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ОБЪЕКТА

Правильный выбор участка, на котором спектр излучения реального объекта близок к спектру серого тела, во многом определяет достоверность полученного значения температуры. Точность определения температуры

можно проверить путем параллельного ее измерения независимым методом, определением температуры различных материалов с известной температурой плавления или расчетом.

В качестве стационарного излучающего объекта использовалась вольфрамовая нить накала автомобильной лампы, спектр излучения которой регистрировался спектрометрами HR2000+ (компания Ocean Optics) в видимой (350–800 нм) области. Лампа питалась от стабилизированного источника постоянного тока, мощность питания изменялась в пределах 13–23 Вт. Температура

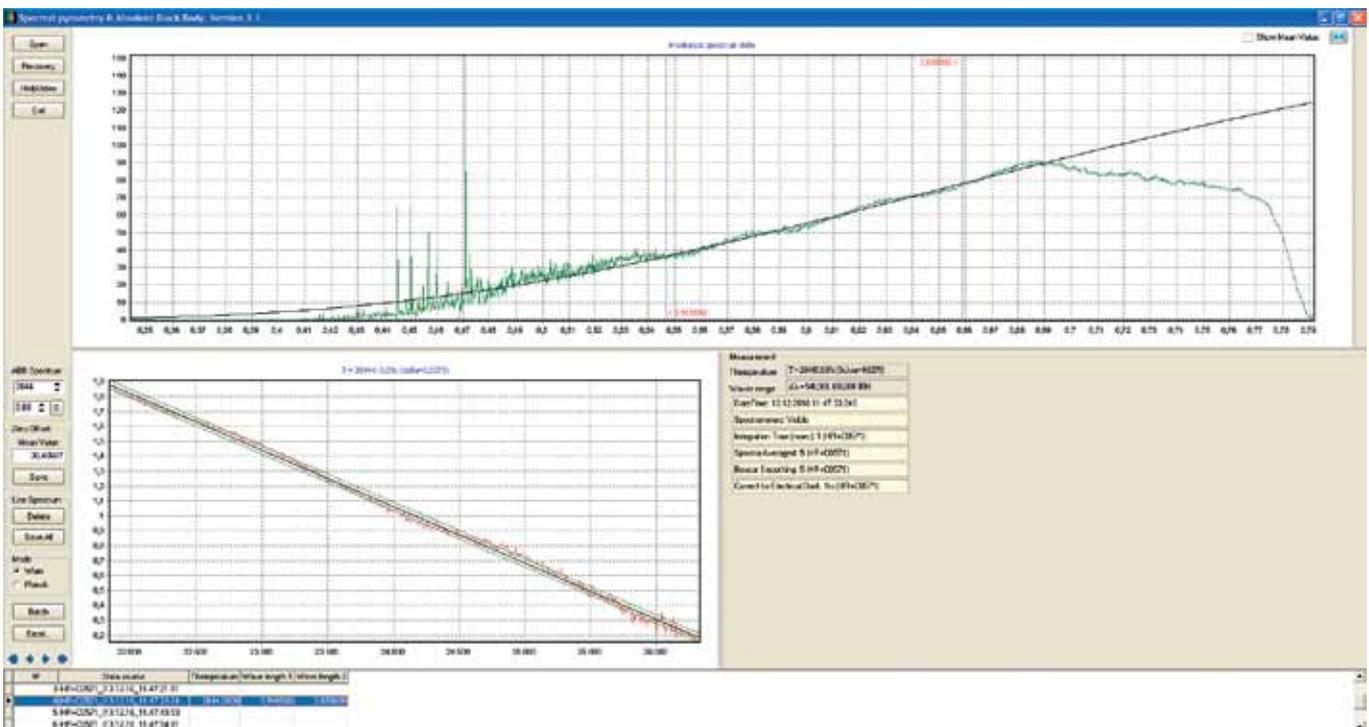


Рис. 2. Окно программы Spectral Pyrometry. Верхний график – спектр спирали с наложенным на него спектром абсолютно черного тела. Нижний график – выделенный участок спектра в координатах $x = C_2/\lambda$ и $y = \ln(\lambda^5 I)$. Температура спирали $T = 2644$ К

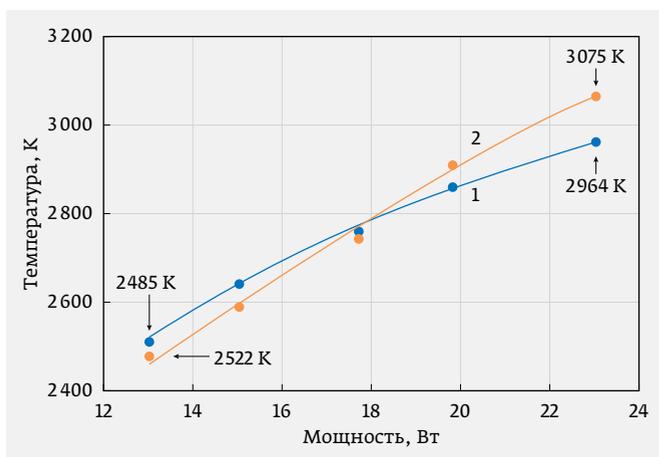


Рис. 3. Температура спирали, определенная методом спектральной пирометрии (1) и расчетом (2)

спирали (в К) определялась методом спектральной пирометрии и проводился также ее расчет по формуле

$$T = 273 + \frac{(R_t - R_0) + R_t \cdot \alpha \cdot t}{\alpha \cdot R_0}, \quad (3)$$

где R_0 и R_t – сопротивление спирали при 20 °С и рабочей температуре соответственно, α – температурный коэффициент сопротивления вольфрама при рабочей температуре, $t = 20$ °С. Коэффициент α рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 (T - T_0)}, \quad (4)$$

и для предполагаемой средней температуры спирали при данных условиях ($T = 2600$ К) принято усредненное значение $\alpha = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

На рис. 2 показаны результаты, полученные в программе Spectral Pyrometry, а на рис. 3 – сравнение температур спирали, определенных методом спектральной пирометрии и вычисленных по формуле (3) при различных мощностях питания. Наибольшее расхождение наблюдается в области больших мощностей питания и, соответственно, высоких температур спирали. Возможно, это обусловлено усреднением температурного коэффициента сопротивления вольфрама и завышением значений температур при расчетах.

К достоинствам спектральной пирометрии можно отнести возможность определять температурную динамику процесса нагрева материалов. Время накопления спектров приборами компании Ocean Optics составляет единицы миллисекунд. Таким образом, возможна фиксация последовательности спектров с минимальной периодичностью 5–10 мс. При этом количество зафиксированных спектров ограничивается только объемом памяти компьютера. Обработка полученных спектров программой Spectral Pyrometry позволяет за короткое время получить

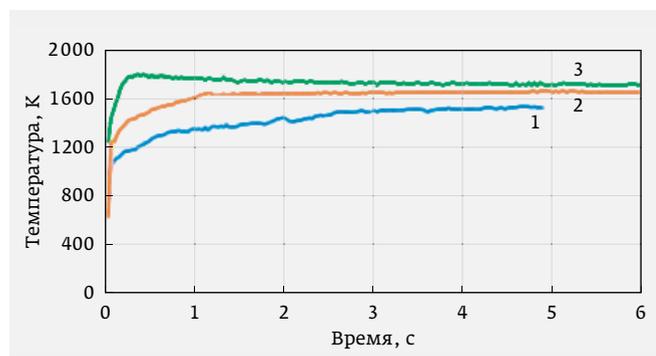


Рис. 4. Температурная динамика лазерного нагрева кремния. Удельная мощность пучка: 1 – 600 Вт·см⁻²; 2 – 700 Вт·см⁻²; 3 – 900 Вт·см⁻²

временную зависимость температуры в процессе нагрева материала. На рис. 4 показана температурная динамика лазерного нагрева полоски кремния толщиной 0,4 мм и шириной 2,5 мм. Полоска была закреплена консольно, ее свободная часть подвергалась воздействию непрерывного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм. Диаметр пучка на поверхности пластины составлял ~2 мм. Спектры излучения фиксировались спектрометром с периодичностью 30 мс.

Таким образом, сравнение зарегистрированного сплошного спектра излучающего объекта со спектром абсолютно черного тела во многих случаях позволяет выявить их подобие хотя бы на некоторых участках. Это дает основание считать, что на данном участке спектра излучающий объект соответствует модели серого тела. Температура объекта вычисляется как параметр наблюдаемого распределения интенсивности излучения, и нет необходимости измерять или вычислять коэффициент излучения $\epsilon(\lambda)$. Преимущество спектральной пирометрии по сравнению с традиционными методами заключается в более широкой области применения, включая многочисленные новые объекты, об оптических свойствах которых нет данных.

Научные исследования выполнены в ФГБНУ «НИИ ПМТ» при финансовой поддержке Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Магунов А. Н.** Лазерная термометрия твердых тел. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 224 с.
2. **Магунов А. Н.** Спектральная пирометрия. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 248 с.
3. **Магунов А.Н., Лапшинов Б. А., Суворонов А. В.** Разработка приборов для измерения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью // Инновации. 2015. № 4 (198). С. 111–114.
4. **Тимченко Н. И.** Программа для ЭВМ "SPECTRALPYROMETRY" v.3.1. Номер гос. регистрации 2016661057 от 28.09.2016.