

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ НЕПРЕРЫВНЫМ Nd:YAG ЛАЗЕРОМ

© 2011 г. А.О. ЗАХАРОВ, Б.А. ЛАПШИНОВ, А.Н. МАГУНОВ

НИИ перспективных материалов и технологий, г. Москва

Метод спектральной пирометрии [1] позволяет определять температуру по оптическим спектрам теплового излучения объектов с неизвестной излучательной способностью. Для кремния регистрация спектров и вычисление температуры проводится независимо от фазового состояния (твердое, жидкое) и состояния поверхности (полированная, шероховатая). Однако в экспериментах по нагреванию монокристаллов кремния с помощью мощного оптического излучения (быстрые термические процессы микротехнологии) обычно проводится регистрация лишь одного спектра излучения и вычисление одного значения температуры. Этого недостаточно для описания нестационарных процессов, в котором температура изменяется за время порядка 1-30 с от $T_0 \approx 300$ К до $T \approx 1500-1700$ К. В данной работе впервые проведена регистрация последовательностей из сотен спектров теплового излучения (время накопления единичного спектра 15-35 мс, частота регистрации спектров 30-66 Гц) при лазерном нагревании монокристаллов кремния. Создана программа для автоматизированной обработки последовательности спектров и определения нестационарной температуры. Определены зависимости температуры монокристалла Si от времени после начала нагревания.

Отсутствие данных по излучательным свойствам исследуемого объекта компенсируется в методе спектральной пирометрии обширной спектральной информацией. С помощью спектрометра регистрируется широкий спектр излучения объекта, проводится проверка его подобия планковскому спектру и вычисление температуры по тем интервалам, где спектры подобны. В частности, спектр излучения любого, даже обладающего селективным поглощением, непрозрачного объекта подобен спектру черного тела в коротковолновой области [2]. В данной работе спектр теплового излучения монокристалла кремния регистрируется с помощью дифракционных спектрометров HR 2000+ (Ocean Optics) с кремниевыми ПЗС-линейками фотоприемников, состоящими из 2048 пикселей. Один из спектрометров работает в интервале длин волн $\lambda = 350-760$ нм, второй в интервале $\lambda = 650-1000$ нм. Минимальные температуры, которые удастся измерить с помощью кремниевых ПЗС-линеек, находятся вблизи 1000 К. Для продвижения в область более низких температур и регистрации всей температурной кинетики, необходимы фотоприемники с чувствительностью до $\lambda \approx 2.5$ мкм.

Экспериментальная установка включает непрерывный Nd:YAG лазер с длиной волны 1.064 мкм и мощностью до 30 Вт, держатель образца и спектрометры с волоконно-оптическим входом. Облучаемый образец – монокристалл кремния КЭФ-4.5 (электронная проводимость, легирующая примесь – фосфор, удельное электрическое сопротивление 4.5 Ом·см). Размер кристалла от 1х1 до 2х2 мм², толщина 0.45 мм. Кристалл свободно лежит на горизонтальной подложке из поликора, прозрачного для лазерного излучения. Лазерный пучок падает на образец по нормали сверху. Приемные торцы оптических волокон диаметром 0.6 мм расположены на расстоянии 3-4 см от поверхности образца. Тепловое излучение кристалла, попадающее на торец, распространяется по волокну и падает на входную щель спектрометра. Оба спектрометра

прокалиброваны с помощью эталонной вольфрамовой лампы LS-1-CAL с известным спектром излучения.

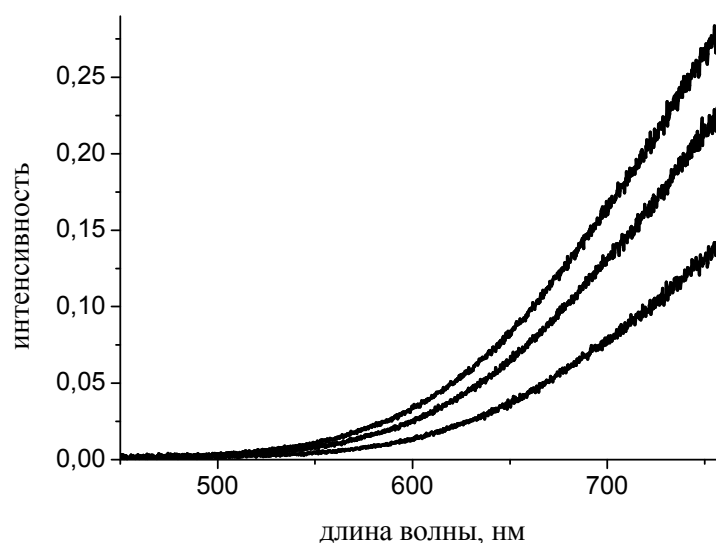


Рис. 1. Спектры излучения монокристалла кремния при лазерном нагревании. Время от начала нагревания (снизу вверх): 1, 2 и 3 с.

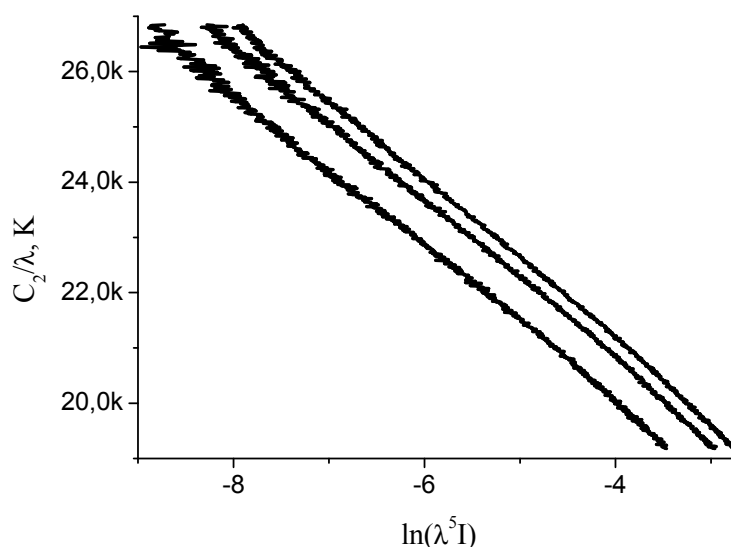


Рис. 2. Те же спектры излучения в координатах Вина. Температура кристалла (снизу вверх): 1385, 1424 и 1452 К.

На Рис. 1 показаны три спектра излучения нагретого кремния в интервале длин волн $\lambda = 450 - 760$ нм, зарегистрированные с интервалом 1 с. На Рис. 2 показаны те же спектры в координатной плоскости, в которой спрямляется спектр серого излучателя, зарегистрированный в области Вина. Наклон прямых определяется искомой температурой кристалла. Температура вычисляется с помощью метода наименьших квадратов. Никакие данные по излучательной способности (коэффициенту черноты) при этом не требуются. Три спектра, показанные на Рис. 1, выбраны из последовательности, состоящей из нескольких сотен спектров. Обработка полученных спектров и вычисление температур проводится с помощью программы, окно которой показано на Рис. 3.

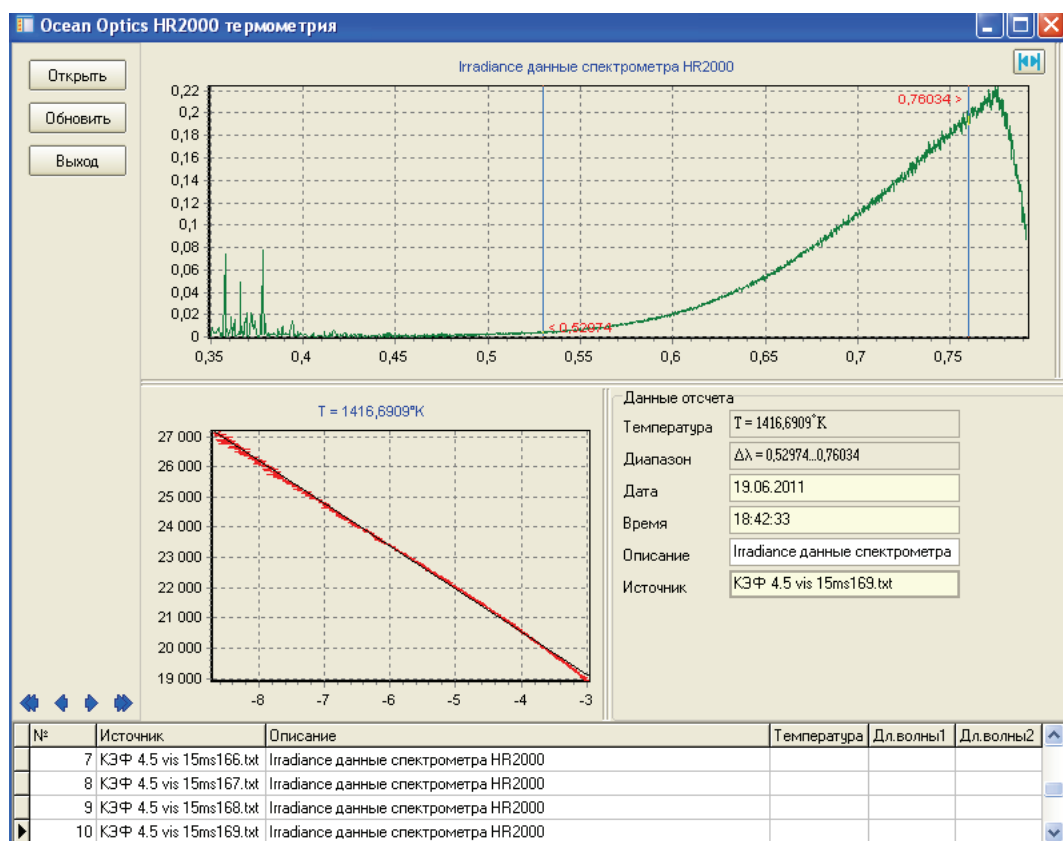


Рис. 3. Окно программы “Спектральная пирометрия”. Сверху показан первичный спектр, внизу результат обработки. В данном случае температура вычисляется по интервалу длин волн $\lambda = 530\text{--}760$ нм и составляет $T \approx 1417$ К.

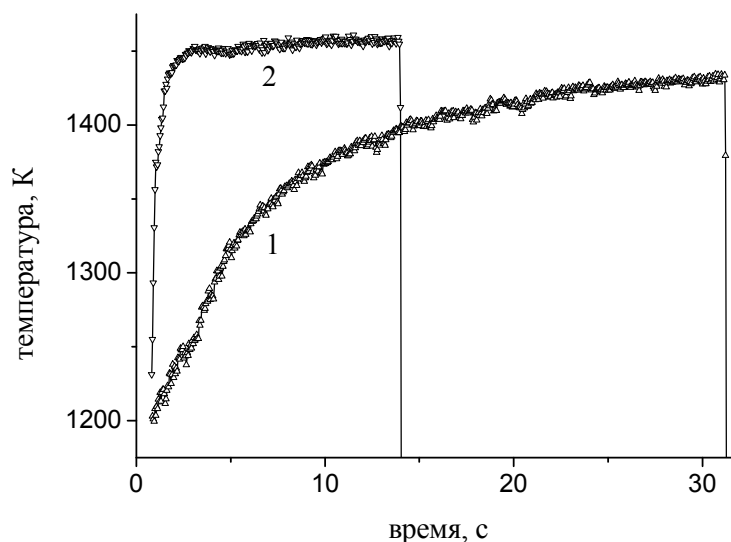


Рис. 4. Зависимость температуры монокристалла Si от времени после включения и выключения лазера. Плотность мощности излучения на поверхности образца ($\text{Вт}/\text{см}^2$): 130 (1) и 180 (2).

В окно программы поочередно вызываются спектры зарегистрированной последовательности. Для первого из спектров выбирается интервал длин волн, по которому будет вычисляться температура (на Рис. 3 выбранный интервал обозначен двумя вертикальными линиями). Все последующие спектры обрабатываются таким же образом.

Количество зарегистрированных спектров может превышать 1000. На Рис. 4 показаны зависимости $T(t)$ при разных уровнях мощности лазера. Одна из зависимостей получена путем обработки последовательности, состоящей из 300 спектров, вторая – из 700 спектров. Зависимости $T(t)$ можно дифференцировать для получения скоростей нагревания dT/dt и анализа тепловых потоков, нагревающих и охлаждающих образец. При увеличении мощности лазера наблюдается нагревание до температур, превышающих температуру плавления. При достижении точки плавления падает интенсивность спектра излучения кремния, но форма спектров остается неизменной. Аналогичные спектры излучения и зависимости $T(t)$ получены с помощью спектрометра ближнего ИК диапазона спектра. Форма спектров и возможность определения температуры не зависят и от того, является ли поверхность монокристалла шероховатой или полированной.

Для регистрации спектров за время порядка 1 мс (с частотой порядка 1 кГц) необходимо применять собирающую оптику, поскольку интенсивность излучения, регистрируемая с помощью открытого торца оптического волокна, невелика, и накапливать спектр приходится в течение времени, составляющего 15 мс. При этом не удастся получить большое количество спектров при остывании образца после выключения лазера.

Полученные результаты дают методическую основу для изучения кинетики не-изотермических высокотемпературных режимов в быстрых термических процессах, где требуется точное измерение температуры кристаллов (подложек) большой площади. На протяжении последних десятилетий разрабатываются методы оптического нагревания и бесконтактного измерения нестационарной температуры кристаллов [3]. В случае, когда нагревание проводится с помощью лазера, спектральная пирометрия позволяет измерять температуру с высокой точностью. При использовании газоразрядных ламп возникает сложная проблема разделения двух непрерывных спектров – спектра теплового излучения кристалла и спектра излучения разряда высокого давления. Вероятно, в этом случае можно измерять температуру тыльной поверхности подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магунов А.Н., Спектральная пирометрия (обзор) // Приборы и техника эксперимента. 2009. №4. С.5-28.
2. Магунов А.Н., Выбор спектрального интервала, в котором нагретый непрозрачный объект излучает как серое тело // Приборы и техника эксперимента. 2010. №6. С.148-152.
3. Reichel D., Skorupa W., Lerch W., Gelpey J.C., Temperature Measurement in Rapid Thermal Processing with Focus on the Application to Flash Lamp Annealing // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2011. Vol.36, No.2. P.102-128.