

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ

В.А. АРУТЮНЯН^{1*}, А.В. ПАПОЯН^{1,2}

¹Российско–Армянский университет, Ереван, Армения

²Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: vazrud@gmail.com

(Поступила в редакцию 19 апреля 2021 г.)

Продemonстрирована возможность использования отраженного от толстой плоскопараллельной стеклянной пластины излучения одночастотного непрерывного лазера для точного дистанционного измерения температуры. Предлагаемый подход основан на том, что плоскопараллельная диэлектрическая пластина представляет собой низкодобротный интерферометр Фабри-Перо, оптическая толщина которого зависит от температуры из-за двух характеристик диэлектрического материала: коэффициента линейного расширения и термооптического коэффициента. Для использованной стеклянной пластины с показателем преломления 1.5183 и толщиной 15.75 мм температурное расстояние между соседними интерференционными пиками составляло 1.4825°C, что дало возможность измерить температуру со средней точностью 0.005°C. Проанализированы практические аспекты использования предложенного сенсора и его применимость для прикладных задач.

1. Введение

Бесконтактное, беспроводное дистанционное измерение температуры представляет неослабевающий интерес для решения многих промышленных, технологических, медицинских, научных и оборонных задач. Наиболее прямое решение данной проблемы – непосредственное обнаружение теплового излучения, испускаемого нагретым телом, с помощью инфракрасных камер переднего обзора (FLIR) или аналогичных устройств. Параллельно с этим ведутся работы по изучению и развитию новых, в частности, оптических методов измерения температуры. К таковым можно отнести оптическую термометрию с использованием ап-конверсии и безызлучательного перераспределения энергии электронного возбуждения в люминесцентных материалах [1,2], измерение температуры на основе эффекта Гуса-Хенхен [3], измерения с использованием одиночных азотно-вакансионных центров в алмазе [4], методы волоконной оптики [5,6] и другие. При этом ключевыми характеристиками дистанционных измерителей температуры считаются высокая точность, большой диапазон измерений, высокое быстродействие и устойчивость к побочным внешним воздействиям.

Высокая чувствительность измерения может быть достигнута с помощью методов, использующих оптическую интерференцию. В [7] было предложено использовать управление температурой диэлектрических пластин с высокой плоскопараллельностью для предотвращения потерь на отражение в оптических ячейках с парами металлов. Очевидно, что тот же самый физический механизм, лежащий в основе температурного управления отраженным светом, может быть использован также для измерения температуры – путем измерения интенсивности отраженного света.

В данной работе сообщается о реализации дистанционного температурного датчика (сенсора) на основе плоскопараллельной стеклянной пластины, работающей в режиме интерферометра Фабри-Перо. Чувствительность к температурным изменениям достигается благодаря термическим и оптическим характеристикам материала стекла, а канал связи между удаленными друг от друга датчиком температуры (пластиной) и системой передачи и приема (одночастотным лазером и фотоприемником) обеспечивается противонаправленными коллимированными световыми пучками в свободном пространстве. Такое решение позволяет совместить высокую чувствительность регистрации, присущую интерференционному методу, с дальностью действия без помех и влияния побочных внешних воздействий.

2. Экспериментальная установка

Измерения проводились на простой установке, изображенной на Рис.1. Для освещения стеклянной пластины использовалось падающее по нормали коллимированное излучение одночастотного непрерывного диодного лазера с внешним резонатором ECDL-7850R (Atrix Management S.A.), работающего на длине волны 780 нм со спектральной шириной 1 МГц. Для обеспечения линейного режима работы фотоприемников мощность лазерного луча была ослаблена до 10 мкВт; встроенная система стабилизации температуры и тока инжекции лазерного диода позволила снизить дрейф частоты излучения в процессе измерений до ± 50 МГц. Для предотвращения модового скачка частоты лазерного излучения, вызванного попаданием отраженного от пластины излучения на лазерный диод, использовался оптический изолятор. Диафрагма с диаметром отверстия 1 мм, установленная на пути лазерного луча, позволяла коллимировать излучение,

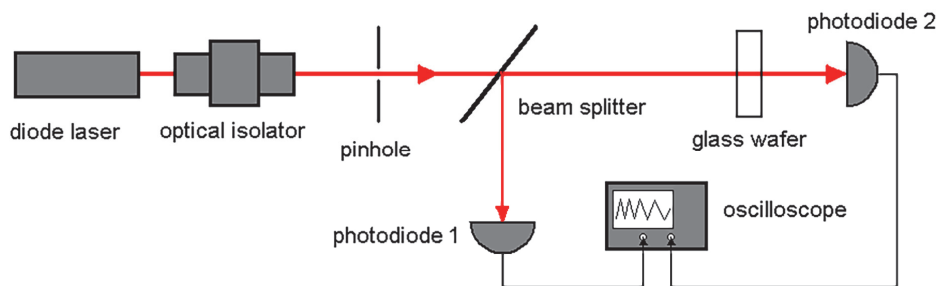


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

направляемое на стеклянную пластину. В эксперименте использовалась стандартная стеклянная плоскопараллельная калибровочная пластина ПМ15 из кронowego стекла К8 с диаметром 30 мм и толщиной 15.75 мм (максимальное отклонение от взаимной параллельности поверхностей по апертуре пластины < 0.6 мкм).

Излучение, отраженное от передней и задней поверхностей пластины, направлялось на фотодиод 1 с помощью светоделителя (тонкая стеклянная пластина, установленная под углом 45° к направлению лазерного луча). При этом плоскопараллельная пластина юстировалась так, чтобы отраженное излучение было соосно с падающим. Это достигалось совмещением падающего и отраженного лучей на отверстиях диафрагмы. Излучение, проходящее через плоскопараллельную пластину, регистрировалось фотодиодом 2. Сигналы с обоих фотодиодов одновременно регистрировались цифровым запоминающим осциллографом Atten ADS1102. Фотодиоды (ФД-10ГА) изначально были откалиброваны с использованием измерителя мощности ThorLabs PM130D, чтобы гарантировать линейную зависимость сигнала от мощности. В данной конфигурации измерения сигнал фотодиода 1 можно легко откалибровать, чтобы определить процент отраженного света – независимо от мощности лазерного излучения (предполагая, что на стеклянной пластине не происходит поглощения или рассеивания).

Стеклянная пластина нагревалась с помощью термофена. Цифровой термометр с термопарой К-типа, прикрепленной к пластине, позволял непрерывно контролировать температуру пластины в процессе измерения.

3. Результаты и обсуждение

Для проведения измерений стеклянная пластина сначала нагревалась термофеном до определенной температуры, а измерения начинались после выключения нагрева. Такой режим измерения позволял получать режим «свободного охлаждения», при котором изменение температуры описывается экспоненциально затухающей функцией.

Типичная временная зависимость отраженного сигнала, записанного при охлаждении пластины представлена на Рис.2 синей (осциллирующей) кривой. Красная (экспоненциальная) кривая показывает соответствующее изменение температуры. Видно, что отраженный сигнал испытывает сильные колебания от 0 до 15%, что является явным свидетельством интерференции волн, отраженных от передней и задней поверхности плоскопараллельной пластины.

Коротко проанализируем полученный результат. В предположении отсутствия поглощения в пластине, доля мощности отраженного света в случае бесконечной плоской волны с длиной волны λ для пластины с толщиной d и показателем преломления n определяется как:

$$\frac{P_{refl}}{P_{inc}} = \left(\frac{(1-R)^2}{4R \sin^2(\phi/2)} + 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

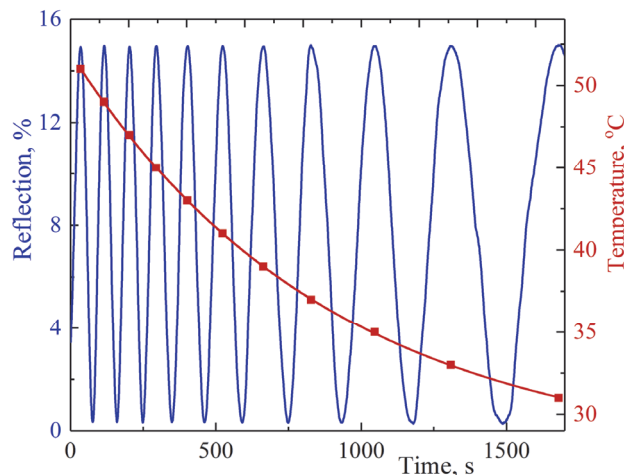


Рис.2. Осциллирующая кривая / левая шкала: временная динамика измеренного отраженного сигнала по мере охлаждения изначально нагретой стеклянной пластины толщиной 15.75 мм. Ноль по оси времени соответствует моменту выключения термофена. Экспоненциальная кривая / правая шкала: соответствующее изменение температуры; точки – измеренная температура, сплошная линия – аппроксимация экспоненциальным спадом с постоянной времени $\tau = 892.7$ с.

где P_{inc} и P_{refl} – мощности падающего и отраженного света, $R = \left(\frac{(n-1)}{(n+1)} \right)^2$, а $\phi = 4\pi nd/\lambda$ – набег фазы, полученный после двух отражений при нормальном падении луча (см., например [7]). В линейном приближении, зависимость фазы (ϕ) от температуры (T) дается формулой

$$\phi(T) - \phi(T_0) = \frac{4\pi d}{\lambda} \left(\frac{\partial n}{\partial T} + \alpha_T n \right) (T - T_0), \quad (2)$$

где $\partial n/\partial T$ и α_T – термооптический коэффициент и коэффициент линейного расширения, соответственно.

Для оптического стекла марки К8, использованного в эксперименте, показатель преломления $n = 1.5183$, соответственно $R = 0.042359$, а ожидаемое интерференционное изменение отраженной мощности должно находиться в диапазоне от 0 до 15.03% (см. уравнение (1)), что хорошо согласуется с экспериментом (Рис.2). Для того же стекла номинальные значения $\partial n/\partial T$ и α_T по ГОСТ 13659-78 составляют $2.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и $7.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Для $d = 15.75$ мм и $\lambda = 780$ нм ожидаемая разница температур для двух соседних интерференционных максимумов ($\Delta\phi = \pi$) согласно уравнению (2) составляет 1.1259°C . Различие с измеренным значением 1.4825°C следует отнести к тому, что указанные номинальные значения даны для $\lambda = 900$ нм и усреднены для диапазона $20\text{--}120^\circ\text{C}$. Более того, характеристики реального образца, использованного в эксперименте, могут отличаться от номинальных в допустимых пределах.

Вопросы практической возможности управления температурой и

требований, предъявляемых к пластинам, подробно обсуждены в [7]. Здесь стоит только отметить, что хотя в нашем эксперименте была использована диэлектрическая пластина с идеально параллельными поверхностями и качественной полировкой, реальные требования к пластинам могут быть гораздо менее строгими. Действительно, несовершенства параллельности и полировки могут снизить контраст интерференционных экстремумов в отраженном сигнале (уравнение (1)), но непосредственно не влияют на температурный период колебаний (уравнение (2)), который в большей степени зависит от оптических характеристик материала пластины, чем от качества обработки.

Что касается требований, предъявляемых к лазерному излучению, ключевыми характеристиками являются стабильность частоты (длины волны) и расходимости пучка. Для недорогих коммерчески доступных диодных лазерных систем стабильность частоты – не хуже $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-6}$, что вполне приемлемо для данной задачи. Кроме того, не составляет труда коллимация лазерного луча до расходимости в несколько мрад, что может обеспечить удаленную работу датчика на расстоянии в несколько десятков метров, в том числе благодаря высокой направленности френелевского (зеркального) отражения. Дальность работы могут ограничивать, скорее, механические/акустические колебания, а также тепловые конвекции, приводящие к сильным отклонениям и искажениям светового пучка, особенно при высоких температурах.

4. Выводы и перспективы

Продемонстрирована возможность дистанционного измерения (мониторинга) температуры с помощью оптического метода, основанного на измерении интенсивности излучения одночастотного лазера, отраженного от плоскопараллельной диэлектрической пластины. В случае стеклянной пластины периодические (по закону $\sin^2$) колебания мощности отраженного света в зависимости от температуры изменяются в диапазоне примерно от 0 до $\approx 15\%$. При толщине пластины 15.75 мм зарегистрированная температурная разница соседних пиков (или провалов) отражения составила 1.4825°C , что с учетом большого амплитудного размаха осцилляций обеспечивает высокую точность определения температуры (реально достижимое значение $\pm 0.005^\circ\text{C}$ при использовании измерительных приборов с разрешением выше 12 бит).

Дальнейшее улучшение рабочих характеристик (диапазон измерения, точность, временной отклик и т. д.) может быть достигнуто путем подбора подходящего диэлектрического материала и толщины пластины. Ключевыми требованиями к материалу диэлектрика являются высокие значения ее показателя преломления, коэффициента теплового расширения и термооптического коэффициента, а также высокая теплопроводность и однородность.

Метод, предложенный в данной работе, может быть использован, в частности, для точного дистанционного измерения или непрерывного мониторинга температуры в условиях, когда электронные устройства нецелесообразны из-за сильного поля возмущающих помех или возможного отказа (например, при

мониторинге температуры корпуса ядерного реактора).

Более того, представленная методика при соответствующей доработке может быть использована для определения характеристик оптических материалов, что продолжает оставаться актуальной задачей. Так, в [8,9] были представлены методики оценки коэффициентов теплового расширения аморфных диэлектриков и диэлектрических кристаллов. На основе подхода, предложенного в настоящей статье, планируется разработка метода для одновременного определения неизвестных значений показателя преломления, термооптического коэффициента и коэффициента линейного теплового расширения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Y. Zhao, X. Wang, Y. Zhang, Y. Li, X. Yao.** *J. Alloys Compd.*, **817**, 152691 (2020).
2. **А.Г. Демирханян, Г.Г. Демирханян, Э.П. Коканян.** *Изв. НАН Армении, Физика*, **52**, 515 (2017).
3. **C.W. Chen, W.C. Lin, L.S. Liao, Z.H. Lin, H.P. Chiang, P.T. Leung, E. Sijercic, W.S. Tse.** *Appl. Opt.*, **46**, 5347 (2007).
4. **P. Neumann, I. Jakobi, F. Dolde, C. Burk, R. Reuter, G. Waldherr, J. Honert, T. Wolf, A. Brunner, J. H. Shim, D. Suter, H. Sumiya, J. Isoya, J. Wrachtrup.** *Nano Lett.*, **13**, 2738 (2013).
5. **P. Roriz, S. Silva, O. Frazão, S. Novais.** *Sensors*, **20**, 2113 (2020).
6. **M. Mikolajek, R. Martinek, J. Koziorek, S. Hejduk, J. Vitasek, A. Vanderka, R. Poboril, V. Vasinek, R. Hercik.** *J. Sens.*, **2020**, 8831332 (2020).
7. **E. Jahier, J. Guéna, Ph. Jacquier, M. Lintz, A.V. Papoyan, M.A. Bouchiat.** *Appl. Phys. B*, **71**, 561 (2000).
8. **А.В. Еганян, А.С. Кузанын, В.Н. Статопоулос.** *Изв. НАН Армении, Физика*, **51**, 79 (2016).
9. **А.В. Еганян, Э.П. Коканян, К.Л. Ованесян, Т.И. Бутаева, Л.Э. Овсепян.** *Изв. НАН Армении, Физика*, **53**, 201 (2018).

REMOTE OPTICAL TEMPERATURE SENSING USING A FLAT-PARALLEL DIELECTRIC WAFER

V.A. HARUTYUNYAN, A.V. PAPOYAN

It is demonstrated that reflection of a continuous-wave single-frequency laser radiation from a thick flat-parallel glass wafer can be used for precise remote measurement of temperature. Such measurement relies on the low-finesse Fabry-Pérot nature of the dielectric wafer, whose optical thickness depends on temperature due to two characteristics of the dielectric material: the linear expansion coefficient and the thermo-optic coefficient. For the used glass wafer with a refractive index of 1.5183 and a thickness of 15.75 mm, the temperature distance between adjacent interference peaks was 1.4825°C, which made it possible to measure the temperature with a mean accuracy of 0.005°C. Performance aspects of the proposed temperature sensor and its practical applicability are analyzed.