

## ТЕРАГЕРЦОВОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

© 2025 г. Бин Хань<sup>1</sup>, Цзяньчао Ли<sup>2</sup>, Цин Хэ<sup>2</sup>, Чжэньвэй Чжан<sup>1,3</sup>, Юэцзинь Чжао<sup>1,\*</sup>,  
Хуэйин Ванг<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Школа оптоэлектроники, Пекинский технологический институт, Пекин 100081 Китай

<sup>2</sup>Институт технологии обработки поверхности, Китайская академия механизации сельского хозяйства, Пекин 100083 Китай

<sup>3</sup>Столичный педагогический университет, Пекин 100048 Китай  
E-mail: \*yuzhao@bit.edu.cn; \*\*wanghuiying@bit.edu.cn

Поступила в редакцию 24.11.2024; после доработки 22.01.2025  
Принята к публикации 24.01.2025

Теплозащитные покрытия в основном используются для тепловой защиты лопаток турбин, и точное неразрушающее измерение их толщины является ключевым фактором для оценки качества лопаток. В данной статье используется система отражательной терагерцовой спектроскопии с временной диаграммой направленности для измерения толщины образцов теплозащитных покрытий, получен показатель преломления нескольких образцов теплозащитных керамических покрытий при различных условиях подготовки в терагерцовом диапазоне частот. Затем отражательная терагерцовая измерительная система используется для получения сигналов во временной области образцов теплозащитных покрытий при различных условиях подготовки, извлечения различных характеристик во временной области, расчета толщины покрытия и их сравнения. Исследовано явление уширения формы волны, вызванное дисперсией при передаче терагерцовых волн в различных образцах, и качественно проанализировано влияние уширения формы волны на измерение толщины теплозащитного покрытия. По сравнению с результатами металлографического измерения толщины, отклонение результатов находится в пределах погрешности, а результаты сравнения демонстрируют хорошую согласованность. Это также является полезным справочным материалом для использования терагерцовой технологии для определения толщины теплозащитных покрытий на лопатках турбин и оценки качества конструкции.

*Ключевые слова:* терагерцовый диапазон, теплозащитное покрытие, измерение толщины, терагерцовая спектроскопия с разрешением по времени.

## TERAHERTZ DETECTION AND EVALUATION OF THERMAL BARRIER COATING THICKNESS

© 2025 Bin Han<sup>1</sup>, Jianchao Li<sup>2</sup>, Qing He<sup>2</sup>, Zhenwei Zhang<sup>1,3</sup>, Yuejin Zhao<sup>1,\*</sup>, Huiying Wang<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 China

<sup>2</sup>Institute of Surface Engineering Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization, Beijing 100083 China

<sup>3</sup>Capital Normal University, Beijing 100048 China  
E-mail: \*yuzhao@bit.edu.cn; \*\*wanghuiying@bit.edu.cn

Thermal barrier coatings are mainly used for thermal protection of turbine blades, and accurate non-destructive measurement of their thickness is a key factor in evaluating the integrity of blade quality. This article uses a reflective terahertz time-domain spectroscopy system to measure the thickness of thermal barrier coating samples, obtaining the refractive index of several thermal barrier ceramic coating material samples under different preparation conditions in the terahertz frequency band. Then, the reflective terahertz measurement system is used to obtain the time-domain signals of thermal barrier ceramic coating samples under different preparation conditions, extract different time-domain features, calculate the coating thickness, and compare them. The phenomenon of waveform broadening caused by dispersion during the transmission of terahertz waves in different samples was studied, and the impact of waveform broadening on the measurement of thermal barrier coating thickness was qualitatively analyzed. Compared with the results of metallographic thickness measurement, the deviation of the results is within the error range, and the comparison results show good consistency. It also provides useful reference for using terahertz technology to detect the thickness of thermal barrier coatings on turbine blades and evaluate structural quality.

*Keywords:* terahertz, thermal barrier coating, thickness measurement, terahertz time-domain spectroscopy.

DOI: 10.31857/S0130308225030062

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С развитием современных передовых отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая, энергетическая и электроэнергетическая, возникает необходимость в разработке лопаток

турбин с высоким отношением тяги к весу, низким расходом топлива и эффективностью. Высокотемпературные сплавы на основе никеля и кобальта в настоящее время являются наиболее широко используемыми материалами для лопаток турбин [1]. Рабочая температура лопаток составляет около 1500°C, теплозащитные покрытия (ТЗП) являются необходимыми мерами тепловой защиты для обеспечения эффективной и стабильной работы лопаток. ТЗП, обладающие превосходной технологичностью, экономичностью, высокой термостойкостью, низкой теплопроводностью, коррозионной стойкостью и износостойкостью, стали основным методом улучшения высокотемпературных характеристик легированных материалов. ТЗП в основном применяются для высокотемпературных металлических поверхностей турбинных лопаток, обычно состоящих из трех слоев: керамического слоя (Верхний слой покрытия, ТС), металлического связующего покрытия (Подслой, ВС) и подложки из высокотемпературного сплава на основе никеля. В настоящее время наиболее распространенным материалом керамического слоя является диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия (YSZ), а ВС в основном состоит из хромоникелевого сплава. Поверхностные покрытия обычно наносятся с помощью воздушно-плазменного напыления и электронно-лучевого физического осаждения паров, толщина которых обычно составляет 200–400 мкм. В процессе эксплуатации двигателя ТЗП разрушаются, что приводит к таким проблемам, как спекание керамического слоя, уменьшение толщины, откол и образование горячих окислителей, которые снижают теплоизоляционные и защитные свойства покрытия. Поэтому толщина покрытия является важным показателем для оценки теплозащитных характеристик покрытия, непосредственно влияющим на надежность и срок службы лопаток. Надлежащие методы контроля могут не только обеспечить безопасность компонентов горячего конца и снизить потери от отказов и повреждений, но и сократить ежедневные расходы на техническое обслуживание.

В последние годы постоянно развиваются и совершенствуются различные методы неразрушающего контроля для проверки качества и оценки дефектов теплозащитных покрытий [2–7]. Терагерцовые волны относятся к электромагнитному излучению с частотами между миллиметровыми и инфракрасными волнами, с диапазоном 0,1–10 ТГц. Широкополосное терагерцовое излучение проявляется как импульс пикосекундного масштаба во временной области, обладающий отличными проникающими свойствами в керамику, пластик и другие среды, а также сильными отражающими свойствами в металлических материалах. Ширина терагерцового импульса находится на пикосекундном уровне, разрешение достигает фемтосекундного уровня, а соответствующее разрешение по толщине — микрометрового уровня. Используя эти характеристики, терагерцовые волны могут быстро измерять толщину объектов и анализировать внутренние дефекты целей в бесконтактных и неразрушающих условиях [8–11]. Вихретоковый контроль требует контакта с испытуемым образцом, и морфология поверхности контакта существенно влияет на результаты измерений. Кроме того, при использовании этого метода сложно выполнить сканирование и визуализацию с полным охватом [12, 13]. Метод рентгеновской флуоресценции тесно связан с интенсивностью флуоресценции, на которую влияют эффекты подложки, что приводит к изменению интенсивности характерных рентгеновских линий. Точность стандартных образцов и однородность их состава существенно влияют на точность измерений толщины покрытий [14, 15].

Использование терагерцовых технологий для обнаружения и оценки качества теплозащитных покрытий стало актуальным направлением исследований в последние годы. Сюда относятся такие аспекты, как определение толщины покрытия [16–22], анализ пористости и микроструктуры слоя покрытия [23, 24], обнаружение термически выращенных оксидов на поверхности покрытия [25, 26], мониторинг коррозионной морфологии трещин покрытия [27] и т. д. Уайт [16] и др. использовали технологию формирования изображений с помощью терагерцовой спектроскопии с временной диаграммой для картирования лопаток турбин до и после эксплуатации, анализируя области, где на покрытиях лопаток могут появляться термически выращенные оксиды. Они определили показатель преломления материала покрытия YSZ, проанализировав временную задержку между эхоимпульсами на передней и задней поверхностях образца ТЗП известной толщины. Однако этот метод не может точно определить конкретные причины аномалий на сканированных изображениях деградировавших лопастей, а также гарантировать точность расчетов показателя преломления. Фукути и др. [17–19] сначала извлекли показатель преломления YSZ, передав терагерцовые сигналы, и определили толщину ТЗП и покрытий лопастей по отраженным сигналам. Они также извлекли показатель преломления керамического слоя и определили его толщину на основе временной задержки между двумя эхоимпульсами на передней и задней поверхностях керамического слоя. Они также учли влияние шероховатости поверхности на коэффициент отражения, чтобы повысить точность определения толщины. Однако этот метод позволяет определить только коэффициент преломления поверхностного покрытия. Если в теплозащитном покрытии присутствуют

оксиды или воздушные пустоты, множественные отраженные пики, вызванные наложением, затрудняют разделение отраженных сигналов от каждого слоя, что влияет на точность определения показателя преломления. Су и др. [10] рассмотрели характеристики поглощения и дисперсии материалов, создали стандартную модель пропускания для взаимодействия терагерцевых волн с теплозащитными покрытиями и извлекли оптические параметры керамического покрытия с помощью алгоритмов численной подгонки и стохастической оптимизации, рассчитав при этом толщину однослойного покрытия. Йе и др. [21] создали модель шероховатости поверхности, извлекли показатель преломления керамического слоя по отраженным сигналам, рассчитали толщину покрытия, а затем исследовали морфологию поверхности раздела образцов ТЗП с различной степенью коррозии, корректируя потери толщины поверхности, вызванные шероховатостью.

В данной работе для получения оптических свойств керамического материала YSZ используется терагерцевая спектроскопия с временной диаграммой пропускания. В эффективном диапазоне частот получены спектры показателя преломления и коэффициента поглощения образцов YSZ. Затем с помощью экспериментов на отражение проведено определение толщины ТВС. Средняя толщина и стандартное отклонение каждого образца рассчитываются на основе принципа передачи разности времен и сравниваются с толщиной, измеренной металлографическим методом. При измерении толщины методом отражения учитывается влияние временного уширения импульса, вызванного дисперсией, на измерение толщины покрытия, а также сравниваются и анализируются различия в определении толщины на основе различных характеристик временной области.

## 2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

### 2.1. Метод измерения оптических параметров YSZ

Терагерцевые сигналы проходят через образцы с определенным отношением сигнал/шум, представляясь в виде спектров во временной области. После предварительной обработки и преобразования Фурье они преобразуются в спектры в частотной области. Соотношение спектров между сигналом образца и опорным сигналом может быть использовано для получения передаточной функции материала, определения соответствующей амплитудной и фазовой информации и, таким образом, расчета оптических параметров материала.

Выражение для комплексного пропускания терагерцевых волн, проходящих через образец, выбирается путем удаления керамического материала YSZ с поверхности теплозащитного покрытия в качестве отдельного тестового образца без учета эффекта Фабри—Перо, вызванного многократным отражением терагерцевых волн внутри образца YSZ. Выбор соответствующего временного окна для обеспечения расчета по сигналу основного терагерцевого импульса. Комплексное пропускание терагерцевых волн, проходящих внутри образца, выражается следующим образом [28, 29]:

$$H(w) = \frac{E_s(w)}{E_r(w)} = \frac{4\tilde{n}_2(w)}{[\tilde{n}_1(w) + \tilde{n}_2(w)]^2} \exp\left(\frac{-j[\tilde{n}_2(w) - \tilde{n}_1(w)]dw}{c}\right) = |H(w)| e^{-j\varphi(w)}. \quad (1)$$

Показатель преломления образца может быть выражен как

$$\tilde{n}_2(w) = n_2(w) + j\kappa_2(w). \quad (2)$$

Действительная часть комплексного показателя преломления и коэффициент поглощения определяются следующими выражениями:

$$n_2(w) = 1 + \frac{\varphi(w)c}{wd}; \quad (3)$$

$$\alpha_2(w) = \frac{2wk_2(w)}{c} = \frac{2}{d} \ln \left[ \frac{4n_2(w)}{|H(w)| [n_1(w) + n_2(w)]^2} \right], \quad (4)$$

где  $w = 2\pi f$  — угловая частота;  $E_r(w)$  и  $E_s(w)$  — частотные характеристики опорного сигнала (без образца) и сигнала образца соответственно;  $\tilde{n}_1(w)$  — показатель преломления воздуха, обычно

считается константой, равной 1;  $\tilde{n}_2(\omega)$  — комплексный показатель преломления образца YSZ;  $n_2(\omega)$  — действительная часть комплексного показателя преломления образца;  $k_2(\omega)$  — коэффициент ослабления;  $\alpha_2(\omega)$  — коэффициент поглощения;  $d$  — толщина образца;  $\varphi(\omega)$  — фазовый сдвиг терагерцовой волны, проходящей через образец толщиной  $d$ .

## 2.2. Метод измерения толщины

При использовании системы терагерцовой спектроскопии с разрешением по времени для измерения толщины покрытий выбирается образец ТЗП с двухслойной структурой из металлической основы и керамического покрытия YSZ. Когда терагерцовые волны падают на образец, можно обнаружить поверхностные эхосигналы, как показано на рис. 1. Часть падающей терагерцовой волны отражается от поверхности покрытия ( $S$ ), часть проходит через поверхность и отражается от границы раздела между металлической основой и покрытием ( $R1$ ), а другая часть снова отражается от поверхности покрытия и границы раздела ( $R2$ ). Как правило, отношение сигнал/шум сигнала  $R2$  уже сильно ухудшилось, и последующие эхосигналы не регистрируются.

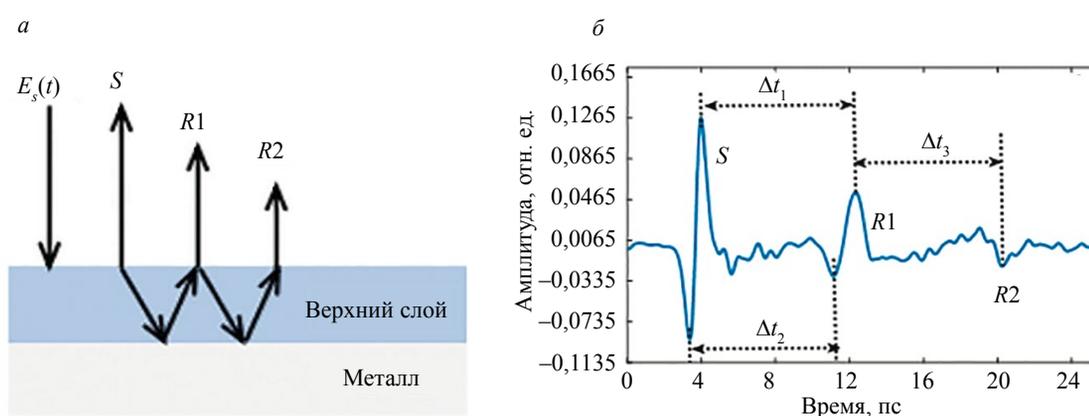


Рис. 1. Принцип отражения терагерцовых волн в образце (а); типичная форма волны отражения (б).

Временной интервал между соседними эхосигналами ( $S$  и  $R1$  или  $R1$  и  $R2$ ) определяется по сигналам отражения во временной области, как показано на рис. 1б. Временной интервал пика между  $S$  и  $R1$  составляет  $\Delta t_1$ , временной интервал долины между  $S$  и  $R1$  составляет  $\Delta t_2$ , а временной интервал пика-долины между  $R1$  и  $R2$  составляет  $\Delta t_3$ . Извлекая параметры пропускания для получения показателя преломления  $n$  материала покрытия YSZ, толщина покрытия ТЗП определяется таким образом:

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2n}, \quad (5)$$

где  $n$  — показатель преломления образца, а  $\Delta t$  — временной интервал между сигналами образца и эталона.

## 2.3. Экспериментальная установка

Мы используем систему терагерцовой спектроскопии с временной диаграммой направленности для определения оптических параметров YSZ, а затем используем систему отражения для определения толщины покрытия ТЗП. Конфигурации систем в основном одинаковы и включают в себя источник фемтосекундных лазерных импульсов, модуль управления задержкой, терагерцовый отражатель и модуль приемника. Структура системы показана на рис. 2, где излучатель и приемник расположены на противоположных сторонах образца для измерений пропускания, а излучатель и детекторная система расположены на одной стороне образца для измерений отражения. Фемтосекундный лазер генерирует фемтосекундные лазерные импульсы, которые затем разделяются на две части. Одна часть действует как луч накачки, возбуждая терагерцовый эмиссионный элемент для создания терагерцовых импульсов, которые проходят через образец

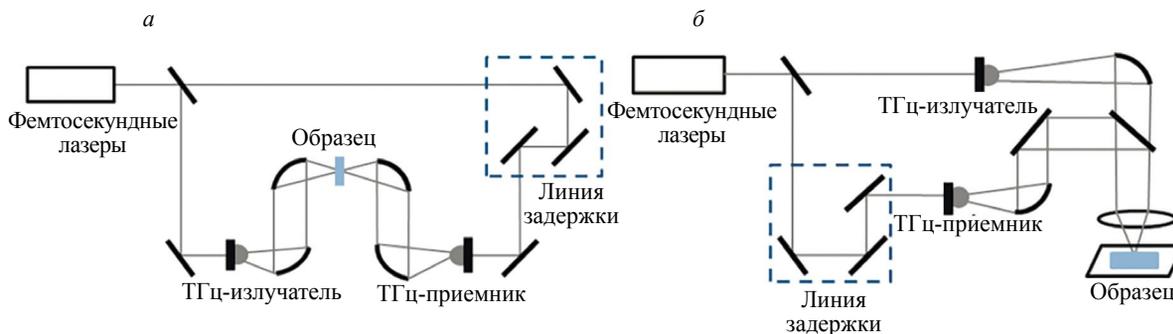


Рис. 2. Принципиальная схема системы режим передачи (а); режим отражения (б).

(терагерцовые волны возвращаются с поверхности и второго интерфейса в условиях отражения); другая часть служит в качестве зондирующего луча, который после прохождения через систему управления задержкой объединяется с сигналом терагерцового импульса, несущим информацию об образце, и действует вместе на терагерцовый элемент обнаружения для получения терагерцовых временных характеристик образца. Терагерцовые волны не могут распространяться через металлы, но могут проходить через материалы покрытия. Система передачи используется для измерения оптических свойств материалов YSZ, а система отражения — для обнаружения ТЗП.

Во время эксперимента по передаче терагерцовых волн падающая волна проходила вертикально через образец для передачи, получая форму терагерцовой волны с образцом и без него. Чтобы избежать влияния водяного пара в воздухе, эксперимент по передаче терагерцовых волн проводился в среде азота, при этом содержание водяного пара было снижено до 4 %, а температура контролировалась на уровне 21 °С. Использовался дискообразный образец YSZ диаметром 10 мм и известной толщины, снятый с образца ТЗП. Толщина каждого образца YSZ приведена в табл. 1 и измерена спиральным микрометром с точностью измерения 10 мкм и погрешностью измерения 5 мкм. PS1, PS2 и PS3 — образцы, изготовленные с помощью атмосферного плазменного напыления с различными параметрами процесса, как показано на рис. 3а. В процессе подготовки этого образца не было подготовлено подслоя, а основа имеет низкую шероховатость ( $R_a$  составляет около 1 мкм). Поэтому можно предположить, что шероховатость  $R_a$  одной стороны образца керамического слоя после отслоения составляет около 1 мкм, а шероховатость  $R_a$  на другой стороне находится в диапазоне 4—6 мкм. Определение пропускания повторялось 10 раз в одном и том же месте на каждом образце YSZ, для получения требуемого сигнала образца бралось среднее значение из 10 повторений, что обеспечило точность данных.

Таблица 1

Характеристики образцов YSZ

Номер образца	PS1	PS2	PS3
Толщина, мкм	581	556	755

В эксперименте на отражение подготовленный образец ТЗП состоит из керамического покрытия YSZ и металлической подложки. Процесс подготовки соответствует процессу подготовки образца YSZ для просвечивания. Диапазон контролируемой толщины 3 теплозащитных покрытий, нанесенных методом атмосферного плазменного напыления, составляет от 220 до 350 мкм. Процесс подготовки образца покрытия для отражательного режима следующий: сначала на поверхность основы из высокотемпературного сплава наносится слой металлической подложки, затем на поверхность слоя металлической подложки наносится слой керамики YSZ. Поскольку терагерцовые волны не могут проникнуть в слой металлической подложки, необходимо учитывать только шероховатость поверхностей слоя металлической подложки и слоя YSZ-керамики. Шероховатость образца для отражательного режима оценивается следующим образом: Шероховатость металлического связующего слоя готовится одним и тем же процессом напыления, поэтому можно предположить, что шероховатость образцов PS1, PS2 и PS3 в основном одинакова; процесс подготовки керамического слоя для трех групп образцов использу-

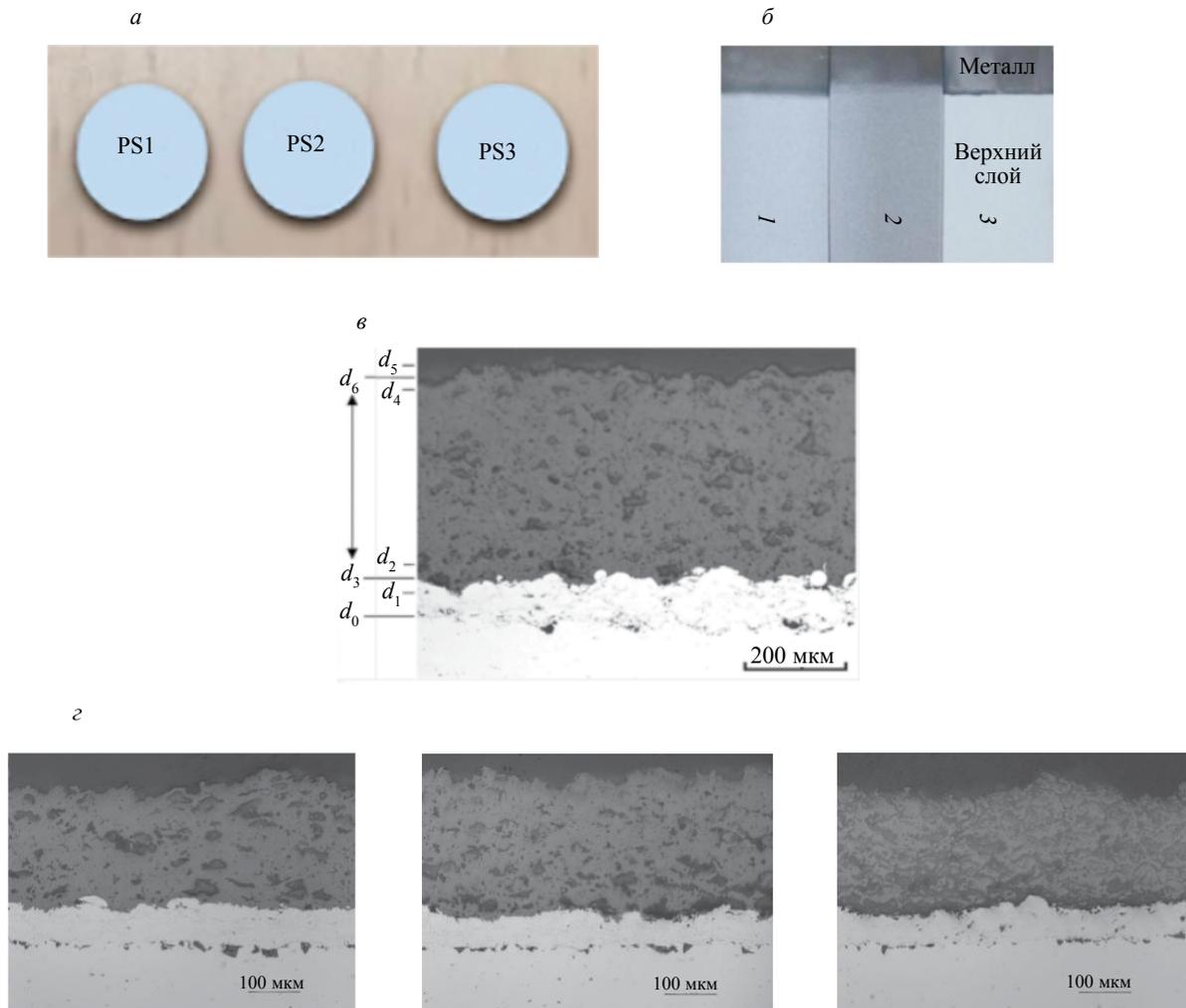


Рис. 3. Образец для измерения пропускания (а); образец для измерения отражения (б); область наблюдения при измерении (в); металлографическая микрофотография, соответствующая отраженному образцу (г).

ет атмосферное плазменное напыление с незначительными различиями в параметрах процесса подготовки, что приводит к относительно небольшим изменениям в шероховатости; шероховатость связующего слоя и керамического слоя, подготовленного этим процессом, была измерена ранее, и  $Ra$  обычно находится в диапазоне 4—6 мкм. Как показано на рис. 3б, при измерении толщины отражения необходимо убедиться, что показатель преломления образца соответствует результатам пропускания. Толщина покрытия, нарезанного в тех же условиях, может быть рассчитана с помощью металлографии. Вставьте, отполируйте и протравите определенное сечение образца, затем высушите образец и осмотрите его под микроскопом, чтобы получить микроскопическое структурное изображение образца с увеличением в 200 раз. Ни верхняя, ни нижняя границы раздела покрытий не являются идеальной плоскостью. Наблюдая и находя значения пика и впадины верхней и нижней поверхностей покрытия соответственно, среднее значение границ раздела поверхностей принимают за значение толщины покрытия  $d$ . Для каждого образца (PS1, PS2 и PS3) случайным образом выбираются три позиции для измерения толщины. Как показано на рис. 3в, он представляет собой область наблюдения для измерения. Наблюдаются и определяются значения пиков и впадин на верхней и нижней поверхностях покрытия, обозначенные на рисунке  $d_1$  и  $d_2$ ,  $d_4$  и  $d_5$  соответственно. Средняя толщина верхней поверхности покрытия рассчитывается как  $d_6 = d_5 - d_4$ , а средняя толщина нижней поверхности покрытия — как  $d_3 = d_2 - d_1$ . Толщина керамического слоя YSZ в этом поле зрения равна  $D1 = d_6 - d_3$ . Окончательная средняя толщина  $d$  образца YSZ — это средняя толщина трех полей зрения, рассчитанная как  $d = (D1 + D2 + D3)/3$ . Из-за неравномерного и неоднородного распределения толщины верхней и нижней поверхностей теплозащитного покрытия, а также из-за того, что металлогра-

фия может наблюдать информацию только в определенном сечении, возникают погрешности в результатах измерения толщины покрытия, и только металлографическое значение толщины используется в качестве эталона для результатов терагерцовых измерений. На рис. 3г показаны металлографические микроструктуры образцов PS1, PS2 и PS3. Во время измерения отражения диаметр светового пятна, излучаемого на образец, составляет менее 3 мм, а размер шага сканирования — 0,002 мм, что указывает на точность определения толщины покрытия в 2 мкм. Микрощероховатость на границе раздела взаимодействует с терагерцовыми волнами в диапазоне светового пятна.

### 3. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Результаты и анализ выделения параметров материала YSZ

В эксперименте по передаче сигнала во временной и частотной областях спектры опорного сигнала без образца и сигнала образца показаны на рис. 4. Сигнал образца имеет большее затухание по сравнению с опорным сигналом, а YSZ демонстрирует сильное поглощение терагерцовых волн. Спектр в частотной области показывает, что после частоты более 1,2 ТГц сигнал терагерцовой волны приближается к 0, и данные не могут быть использованы для расчета показателя преломления.

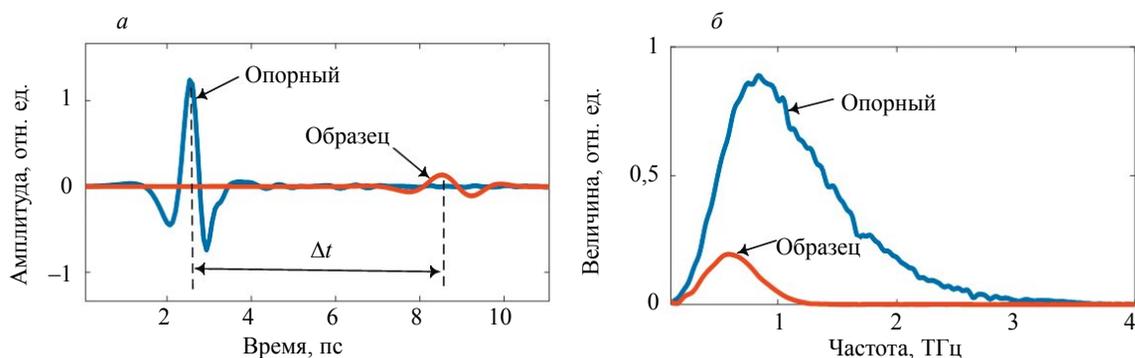


Рис. 4. Образец сигнала передачи: терагерцовая форма волны во временной области (а) и частотный спектр (б).

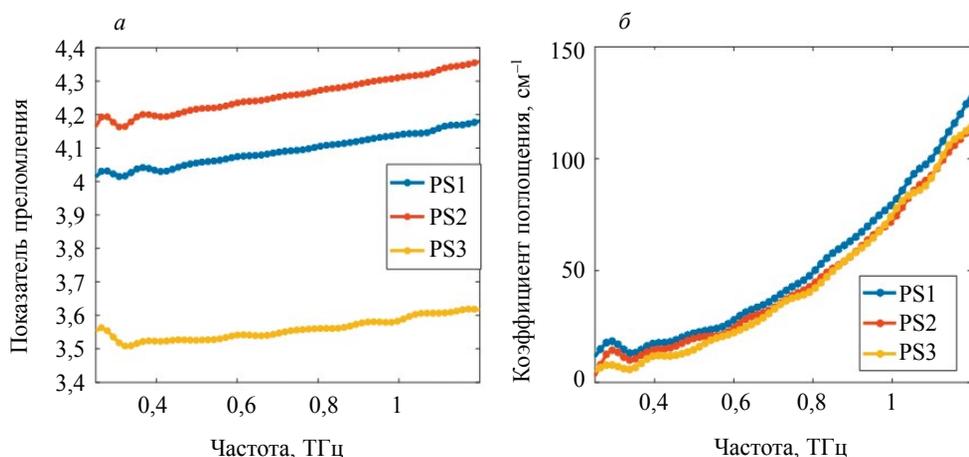


Рис. 5. Спектры показателя преломления (а) и коэффициент поглощения образца YSZ (б).

Используя принцип извлечения оптических параметров материала, представленный в разделе 2.1, были рассчитаны спектры показателя преломления и коэффициента поглощения для каждого образца, как показано на рис. 5, где представлены характеристические кривые образцов YSZ с тремя различными параметрами процесса. Эффективный диапазон частот для всех образцов составляет от 0,25 до 1,2 ТГц. Из кривых показателя преломления видно, что

показатель преломления каждого образца увеличивается практически линейно с частотой. Из-за влияния процессов подготовки, шероховатости, методов напыления и других факторов существуют определенные различия в показателе преломления каждого образца. Из кривых коэффициента поглощения видно, что коэффициенты поглощения различных образцов YSZ увеличиваются с ростом частоты. В диапазоне эффективных частот образцы YSZ не проявляют явных особенностей поглощения терагерцовых волн.

Мы рассчитываем средний показатель преломления каждого образца ( $\tilde{n}$ ) в диапазоне частот от 0,25 до 1,2 ТГц. В то же время мы рассчитываем показатель преломления образца ( $n$ ), используя временную задержку от пика до пика временного сигнала с образцом и без него. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Показатель преломления образцов

Таблица 2

Образец	PS1	PS2	PS3
$\tilde{n}$	4,09	4,26	3,56
$n$	4,10	4,24	3,54

Результаты расчета показателя преломления, полученные двумя методами, совпадают. Максимальное отклонение результатов расчета показателя преломления, вызванное ошибками измерения толщины, не превышает 0,03, а средний показатель преломления  $\tilde{n}$  каждого образца используется для расчета толщины покрытия при отражении.

### 3.2. Результаты и анализ измерений толщины ТЗП

При измерениях отражения используются образцы ТЗП, соответствующие условиям подготовки образцов пропускания. Три образца теплозащитных покрытий, нанесенных методом атмосферного плазменного напыления, каждый образец тестируется в 7 различных положениях. Расстояние между различными позициями каждого образца составляет более 3 мм, чтобы позиции определения толщины не перекрывались. На рис. 6 показаны эхосигналы  $S$  и  $R1$  во временной области образцов PS1, PS2 и PS3 с различными параметрами процесса. При регулировке фазового выравнивания пиков волн  $S$  сигналов отражения от верхней поверхности в различных положениях, фазовое выравнивание пиков волн  $R1$  сигналов отражения от нижней поверхности не полностью выравнивается из-за неравномерной толщины образцов. Покрытия образцов, напыленных методом атмосферного плазменного напыления, толще, и перекрытие отраженных сигналов на различных границах отсутствует. Пиковое значение  $t_r$  эхосигнала  $R1$  значительно шире по сравнению с пиковым значением  $t_s$  эхосигнала  $S$ .

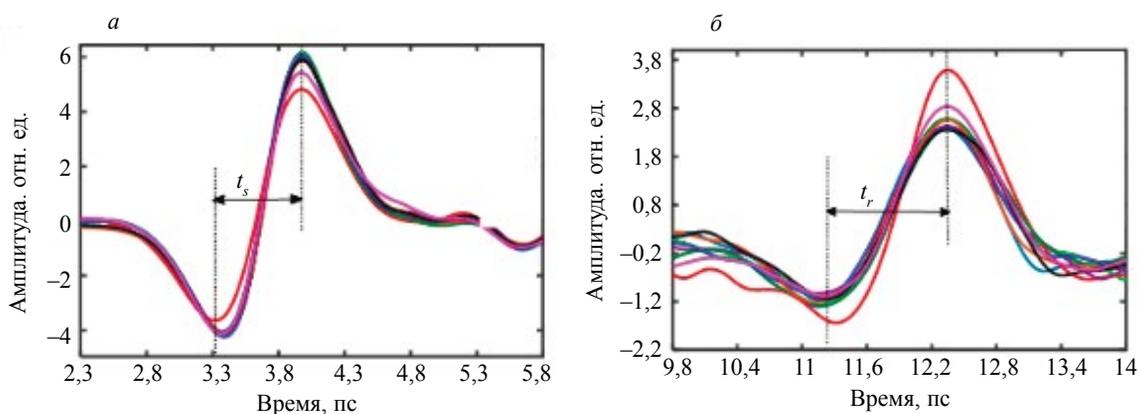
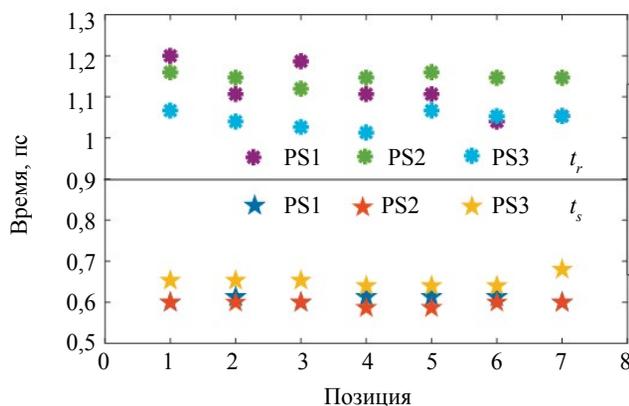


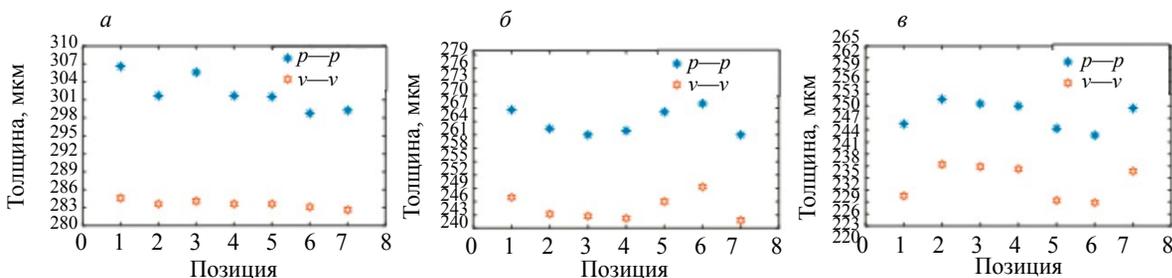
Рис. 6. Сигналы во временной области в различных положениях каждого образца.

При различных условиях подготовки материала количество микрочастиц и нерасплавленных частиц различно, что приводит к эффекту дисперсии при распространении терагерцовых импульсов во временной области в покрытии. Между тем материалы демонстрируют большие

Рис. 7. Ширина импульсов  $S$  и  $R1$  для образцов PS1—PS3.

потери для высокочастотных терагерцовых волн, что приводит к явному уширению терагерцовых импульсов во временной области. На рис. 6 сигнал отражения от границы раздела  $R1$  каждого сигнала временной области демонстрирует значительное уширение импульса по сравнению с сигналом  $S$ , что может привести к большим ошибкам при расчете толщины. Поэтому в данном исследовании толщина рассчитывается на основе временного интервала между сигналами отражения  $S$  и  $R1$ . Кроме того, чтобы исследовать влияние уширения импульсов на временные интервалы между пиками и впадинами сигналов отражения  $S$  и  $R1$ , ширины импульсов пиков и впадин  $S$  и  $R1$  рассчитываются отдельно, как показано на рис. 7.

Ширина импульса сигнала отражения поверхности  $S$  на верхней стороне трех образцов составляет от 0,55 до 0,7 пс, а ширина импульса сигнала отражения поверхности  $R1$  на нижней стороне — от 1,0 до 1,3 пс. При одинаковом методе нанесения покрытия распылением, из-за влияния микроструктуры, шероховатости и толщины покрытия, ширина импульсов образцов  $S$  и  $R1$  не одинакова, но ширина импульса  $R1$  примерно в два раза больше, чем  $S$ . Выделив временной интервал от пика до пика и от впадины до впадины импульсов  $S$  и  $R1$ , рассчитав толщину каждого образца по принципу временной разницы отраженного терагерцового сигнала, переданного в образец, и проанализировав специфическое влияние уширения импульса на точность измерения толщины покрытия, мы получили результаты, представленные на рис. 8. Толщина, рассчитанная по значению пик—пик ( $p-p$ ) для каждого образца в разных положениях, больше, чем толщина, рассчитанная по значению впадина—впадина ( $v-v$ ). Кривые толщины в разных положениях одного и того же образца имеют тенденцию быть параллельными. Поэтому уширение импульса одного и того же образца примерно одинаково.

Рис. 8. Толщины образцов PS1( $a$ ); PS2( $b$ ); PS3( $v$ ).

Мы рассчитали среднюю толщину и стандартное отклонение для каждого образца и сравнили с толщиной, полученной металлографическим методом. Отражательная терагерцовая система, используемая в данной работе, имеет фокусное расстояние 10 см и диаметр пятна 1,2 мм. Толщина образца, полученная с помощью терагерцового сигнала во временной области, представляет собой среднее значение в пределах диапазона пятна. Микроскопически шероховатые границы образца, включая границу раздела воздух—покрытие, а также границу раздела покрытие—основа, характеризуются в терагерцовом сигнале временной области. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Толщина образцов

Номер образца	Пик—пик, толщина $dp$ , мкм	Впадина—впадина, толщина $dv$ , мкм	Металлографическая, толщина $d$ , мкм	$(dp-d)/d \times 100 \%$	$(dv-d)/d \times 100 \%$
PS1	302,2±2,9	283,6±0,6	277,7	8,82	2,11
PS2	263,9±3,0	244,6±2,8	239,0	10,40	2,47
PS3	247,8±3,5	231,1±4,3	240,6	2,99	4,45

Средняя толщина  $dp$  каждого образца, как правило, больше, чем  $dv$ , с отклонениями от толщины 18,6, 19,3 и 16,7 мкм соответственно. При сравнении результатов измерения толщины  $d$  металлографическим методом с  $dp$ , отклонения составляют 24,5, 24,9 и 7,2 мкм. Отклонения между  $d$  и  $dv$  составляют 5,9, 5,6 и 9,5 мкм. Динамический диапазон отклонений между  $dv$  и  $d$  меньше, а относительные погрешности составляют менее 5 %, как показано в табл. 3. Погрешность измерения толщины может быть результатом ошибок при измерении показателя преломления, позиционирования пика сигнала, морфологии образца и т.д. На толщину, измеренную металлографическим методом, также влияет морфология поверхности. Точность результатов измерений двумя методами сопоставима, и их можно использовать для взаимного сравнения, чтобы лучше оценить фактическую структуру толщины образца.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проверяется возможность бесконтактного определения толщины теплозащитного покрытия на основе терагерцовых сигналов во временной области. Эффект уширения терагерцовых сигналов вносит дополнительные фазовые ошибки, однако результаты расчета временной задержки впадин терагерцовых сигналов показывают меньшее общее отклонение по сравнению с металлографией. Результаты обнаружения также показывают, что механизм взаимодействия между характеристиками поверхности образца и сигналами терагерцовых импульсов определяет, что точность терагерцового обнаружения может достигать микрометрового уровня. Точность обнаружения сопоставима с точностью металлографии, отклонения находятся в пределах погрешности. Сравнительные результаты демонстрируют хорошую согласованность, согласующуюся с характеристиками структуры поверхности образца, что дает ценные рекомендации по использованию терагерцовой технологии для определения толщины теплозащитных покрытий на лопатках турбин и оценки качества конструкции.

Данная работа была поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (грант № 61935001).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darolia R. et al. Thermal barrier coatings technology: critical review, progress update, remaining challenges and prospects // *International materials reviews*. 2013. V. 58. No. 6. P. 315—348.
2. David R.C., Simon R.P. et al. Thermal barrier coating materials // *Materials Today*. 2005. V. 8. No. 6. P. 22—29.
3. Yong L., Chen Z., Mao Y. et al. Quantitative evaluation of thermal barrier coating based on eddy current technique // *NDT and E international*. 2012. V. 50. P. 29—35.
4. Zhang D., Yu Y., Lai C. et al. Thickness measurement of multi-layer conductive coatings using multi-frequency eddy current techniques // *Nondestructive testing and evaluation*. 2016. V. 31. No. 3. P. 191—208.
5. Chen H.L.R., Zhang B., Alvin M.A. et al. Ultrasonic detection of delamination and material characterization of thermal barrier coatings // *Journal of thermal spray technology*. 2012. V. 21. No. 6. P. 1184—1194.
6. Ma Z., Zhao Y., Luo Z. et al. Ultrasonic characterization of thermally grown oxide in thermal barrier coating by reflection coefficient amplitude spectrum // *Ultrasonics*. 2014. V. 54. No. 4. P. 1005—1009.
7. Zhao Y., Chen J., Zhang Z. Nondestructive characterization of thermal barrier coating by noncontact laser ultrasonic technique // *Optical engineering*. 2015. V. 54. No. 9. P. 094—104.
8. David R.C., Simon R.P. Thermal barrier coating materials // *Materials Today*. 2005. V. 8. No. 6. P. 22—29.
9. Stoik C., Bohn M., Blackshire J. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy // *Optics Exp*. 2008. V. 16. No. 21. P. 17039—17051.
10. Su K., Shen Y.C., Zeitler J.A. Terahertz sensor for non-contact thickness and quality measurement of automobile paints of varying complexity // *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*. 2014. V. 4. No. 4. P. 432—439.

11. *Krimi S., Klier J., Jonuscheit J.* et al. Highly accurate thickness measurement of multi-layered automotive paints using terahertz technology // *Applied Physics Letters*. 2016. V. 109. P. 021105.
12. *Xiao L.W., Xie J.H., Song K.* et al. Experimental Study on Thermal Barrier Coating Thickness Measurement of Key Component of Aero-engine Based on Eddy-current Method // *Failure Analysis and Prevention*. 2020. V. 15. No. 2. P. 101—108.
13. *Garcia-Martin J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E.* Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // *Sensors*. 2011. V. 11. No. 2. P. 2525—2565.
14. *Zhang H., Xu L.K., Hou W.T.* et al. Determination of Thickness of Ti/IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Oxide Anode Coating by X-Ray Fluorescence // *Journal of Materials Protection*. 2010. V. 43. No. 2. P. 67—69.
15. *Jain S.K., Gupta P.P., Eapen A.C.* An X-Ray Fluorescence Method for Coating Thickness Measurement // *X-Ray Spectrometry*. 1979. V. 8. No. 1. P. 11—13.
16. *White J., Fichter G., Chernovsky A.* et al. Time domain terahertz non-destructive evaluation of aeroturbine blade thermal barrier coatings. Review of quantitative nondestructive evaluation // *American Institute of Physics*. 2009. V. 28.
17. *Fukuchi T., Fuse N.* et al. Measurement of topcoat thickness of thermal barrier coating for gas turbines using terahertz waves // *IEEJ Trans Fundam Mat*. 2012. V. 132. P. 166—172.
18. *Fukuchi T., Fuse N.* et al. Measurement of refractive index and thickness of topcoat of thermal barrier coating by reflection measurement of terahertz waves // *IEEJ Trans Fund Mater*. 2012. V. 132. No. 9. P. 702—708.
19. *Fukuchi T., Fuse N., Okada M.* et al. Topcoat thickness measurement of thermal barrier coating of gas turbine blade using terahertz wave // *Electrical engineering in Japan*. 2014. V. 189. No. 1. P. 1—8.
20. *Krimi S., Klier J.* et al. Self-Calibrating Approach for Terahertz Thickness Measurements of Ceramic Coatings. 2016.
21. *Ye D.D., Wang W.Z., Huang J.B., Lu X.* et al. Nondestructive interface morphology characterization of thermal barrier coatings using terahertz time-domain spectroscopy // *Coatings*. 2019. V. 9. No. 2. P. 89.
22. *Cao B.H., Wang M.Y., Li X.H.* et al. Noncontact Thickness Measurement of Multilayer Coatings on Metallic Substrate Using Pulsed Terahertz Technology // *IEEE Sensors Journal*. 2020. V. 20. No. 6. P. 3162—3171.
23. *Watanabe M., Kuroda S., Yamawaki H., Shiwa M.* Terahertz dielectric properties of plasma-sprayed thermal-barrier coatings // *Surf. Coat. Technol*. 2011. V. 205. No. 19. P. 4620—4626.
24. *Ye D.D., Wang W., Zhou H.T.* et al. In-situ evaluation of porosity in thermal barrier coatings based on the broadening of terahertz time domain pulses: simulation and experimental investigations // *Opt. Express*. 2019. V. 27. P. 28150—28165.
25. *Ye D.D., Wang W.Z., Zhou H.* et al. Nondestructive Evaluation of Thermal Barrier Coatings Interface Delamination Using Terahertz Technique Combined with SWT-PCA-GA-BP Algorithm // *Coatings*. 2020. V. 10. No. 9. P. 859.
26. *Chen C.C., Lee D.J., Pollock T.* et al. Pulsed-terahertz reflectometry for health monitoring of ceramic thermal barrier coatings // *Optics express*. 2010. V. 18. No. 4. P. 3477—3486.
27. *Dong J., Locquet A., Citrin D.S.* Terahertz Quantitative Nondestructive Evaluation of Failure Modes in Polymer-Coated Steel // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2017. V. 23. No. 4. P. 1—7.
28. *Dorney T.D., Baraniuk R.G., Mittleman D.M.* Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy // *Journal of the Optical Society of America A (Optics Image Science and Vision)*. 2001. V. 18. No. 7. P. 1562—1571.
29. *Zhang Z.W., Jia R., Xu J.* et al. Quasi-optical measurement and complex refractive index extraction of flat plate materials using single time-domain transmission model in Y-Band // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2022. V. 70. No. 11. P. 5224—5233.