ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 8.944— 2018

Государственная система обеспечения единства измерений

СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Алюминий, ртуть. Отражательная и излучательная способности в около- и сверхкритической области

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2018

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Главным научным метрологическим центром «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов» (ГНМЦ «ССД»), Международным учебно-научным лазерным центром (МЛЦ) МГУ

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 180 «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 августа 2018 г. № 498-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2018

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственная система обеспечения единства измерений

СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Алюминий, ртуть. Отражательная и излучательная способности в около- и сверхкритической области

State system for ensuring the uniformity of measurements. Standard reference data. Aluminium Mercury. Reflectivity and emittance in near and supercritical region

Дата введения — 2019—02—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на стандартные справочные данные (ССД) об отражательной и излучательной способности металлов ртути и алюминия в около- и сверхкритической области их термодинамических параметров состояния. Данные получены на рабочей длине волны импульсного лазера λ = 1,062 мкм. Область применения сверхкритических технологий — от производства лекарств до ядерных реакторов на сверхкритических теплоносителях, создание уникальных покрытий для специальной техники и т. п.

Критические параметры:

ртути — $T_{кр}$ = 1763 К; $P_{кр}$ = 0,154 ГПа [1];

алюминия — $T_{кр}$ = 7990 К; $P_{кр}$ = 0,271 ГПа [1].

Диапазон исследованных параметров:

ртути: температура от 1500 К до 2800 К;
давление от 165 до 635 МПа;

алюминия: температура от 3000 К до 7200 К;
давление от 18 до 200 МПа.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использована нормативная ссылка на следующий стандарт:

ГОСТ Р 54500.3/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

3 Общие положения

3.1 Основой для составления таблиц ССД являются данные, полученные в результате обработки экспериментального материала. Теоретические оценки, методика проведения эксперимента, расчетные соотношения пирометрии представлены в приложении А.

3.2 Отражательная способность — величина, описывающая способность металла отражать падающий на нее поток электромагнитного излучения.

3.2.1 Отражательную способность рассчитывают по формуле

$$\rho = P_{отр} / P_{пад}, \quad (1)$$

где $P_{отр}$ — поток зеркально отраженного излучения;

$P_{пад}$ — поток падающего излучения.

3.2.2 ρ_0 — отражательная способность образцов при низком уровне энергии лазерного импульса (на длине волны λ = 1062 нм), полученная в тестовых режимах, рассчитываемая по формуле (1).

Для ртути (Hg) ρ_0 = 0,51 ± 0,05; для алюминия (Al) ρ_0 = 0,80 ± 0,045.

3.2.3 ρ_t — отражательная способность образцов при высоком уровне энергии лазерного импульса (на длине волны λ = 1062 нм), полученная в результате экспериментальных исследований, рассчитываемая по формуле (1).

3.2.4 Относительную величину отражательной способности рассчитывают по формуле

$$\rho_{отн} = \rho_t / \rho_0. \quad (2)$$

3.3 В случае непрозрачных тел (металлы вдали от фазового перехода металл — диэлектрик) величина $\tau(\lambda) = 0$ и излучательная (поглощательная) способность $\alpha(\lambda)$, как спектральная, так и интегральная по длинам волн, определяется в соответствии с законом Кирхгофа следующим образом:

$$\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda); \rho_t(\lambda) = \rho_{отн} \cdot \rho_0;$$

$$\alpha_t(\lambda) = 1 - \rho_t(\lambda) = 1 - \rho_{отн} \cdot \rho_0.$$

4 Стандартные справочные данные об отражательной и излучательной способности ртути и алюминия в диапазоне температур от 1500 К до 7200 К и давлений от 18 до 635 МПа

Стандартные справочные данные об отражательной и излучательной способности ртути в диапазоне температур от 1500 К до 2800 К и давлений от 165 до 635 МПа приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1 — Стандартные справочные данные об отражательной и излучательной способности ртути в диапазоне температур от 1500 К до 2100 К и давлений от 165 до 290 МПа (λ = 1062 нм; ρ_0 = 0,51 ± 0,05; $P_{пад}$ = 400 МДж/см^2)

T, K	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
$\rho_{отн}$	0,64 ± 0,07	0,56 ± 0,06	0,53 ± 0,06	0,48 ± 0,05	0,40 ± 0,04	0,32 ± 0,04	0,28 ± 0,03
ρ_t	0,33	0,29	0,27	0,24	0,20	0,16	0,14
α_t	0,67	0,71	0,73	0,76	0,80	0,84	0,86
P, МПа	165	185	220	235	260	280	290

Таблица 2 — Стандартные справочные данные об отражательной и излучательной способности ртути в диапазоне температур от 1500 К до 2800 К и давлений от 300 до 635 МПа (λ = 1062 нм; ρ_0 = 0,51 ± 0,05; $P_{пад}$ = 530 МДж/см^2)

T, K	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
$\rho_{отн}$	0,62 ± 0,08	0,61 ± 0,08	0,59 ± 0,08	0,57 ± 0,07	0,56 ± 0,07	0,49 ± 0,06	0,43 ± 0,06
ρ_t	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,25	0,22
α_t	0,68	0,69	0,70	0,71	0,71	0,75	0,78
P МПа	300	305	310	325	365	400	445

Окончание таблицы 2

T, K	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800
$\rho_{отн}$	0,38 ± 0,05	0,33 ± 0,04	0,26 ± 0,03	0,25 ± 0,03	0,23 ± 0,03	0,20 ± 0,026	0,17 ± 0,02
ρ_t	0,19	0,17	0,13	0,13	0,120	0,10	0,09
α_t	0,81	0,83	0,87	0,87	0,88	0,90	0,91
P, МПа	460	500	560	570	585	600	635

Стандартные справочные данные об отражательной и излучательной способности алюминия в диапазоне температур от 3000 К до 7200 К и давлений от 18 до 200 МПа приведены в таблицах 3, 4.

Таблица 3 — Стандартные справочные данные об отражательной и излучательной способности алюминия в диапазоне температур от 3000 К до 3900 К и давлений от 18 до 38 МПа (λ = 1062 нм; ρ_0 = 0,80 ± 0,045; $P_{пад}$ = 1,0 Дж/см^2)

T, K	3000	3100	3200	3300	3400	3500	3600	3700	3800	3900
$\rho_{отн}$	0,97 ± 0,11	0,93 ± 0,12	0,92 ± 0,12	0,92 ± 0,12	0,87 ± 0,1	0,80 ± 0,10	0,74 ± 0,10	0,69 ± 0,09	0,64 ± 0,08	0,62 ± 0,08
ρ_t	0,78	0,74	0,74	0,74	0,70	0,64	0,59	0,55	0,51	0,50
α_t	0,22	0,26	0,26	0,26	0,30	0,36	0,41	0,45	0,49	0,50
P, МПа	18	38	41	52	52	51	48	38		

Таблица 4 — Стандартные справочные данные об отражательной и излучательной способности алюминия в диапазоне температур от 3000 К до 7200 К и давлений от 36 до 200 МПа (λ = 1062 нм; ρ_0 = 0,80 ± 0,045; $P_{пад}$ = 3,0 Дж/см^2)

T, K	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7200
$\rho_{отн}$	0,78 ± 0,11	0,82 ± 0,11	0,80 ± 0,11	0,77 ± 0,11	0,72 ± 0,10	0,67 ± 0,09	0,60 ± 0,08	0,52 ± 0,07	0,43 ± 0,06	0,18 ± 0,03
ρ_t	0,62	0,66	0,64	0,62	0,58	0,54	0,48	0,42	0,34	0,14
α_t	0,38	0,34	0,36	0,38	0,42	0,46	0,52	0,58	0,66	0,86
P, МПа	36	38	45	51	60	69	88	106	130	200

Погрешность относительной величины отражательной способности обусловлена систематической (инструментальной) погрешностью и случайной погрешностью. Инструментальная погрешность составляет ~ 5 %, случайная погрешность и связанный с ней разброс точек при проведении эксперимента составляет ~ до 15 % в отдельных экспериментах.

Средняя квадратическая погрешность определения относительной отражательной способности состоит из суммы двух указанных составляющих и для таблиц 1 и 2 равна 11,6 %; для таблиц 3 и 4 — 14,4 %. Расчет погрешностей проводят по ГОСТ Р 54500.3/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008.

Методические вопросы экспериментального исследования и вопросы температурных измерений представлены в приложении А.

Приложение А
(справочное)

Исследование оптических свойств металлов в сверхкритической области

А.1 Технологические процессы, основанные на использовании сверхкритических флюидов (СКФ), являются процессами следующего поколения, которые кардинальным образом качественно превосходят традиционные процессы, а сверхкритические флюиды рассматривают как основу новых экологически чистых технологий 6-го технологического уклада.

В настоящий момент практически не исследована область вырожденного состояния вещества с температурами свыше 3000 К и давлениями более 200 МПа. Особый интерес представляет диапазон состояний металлов с температурами более 10 000 К и давлениями более 2 ГПа, недостижимый статическими методами, которому, согласно теоретическим оценкам, соответствуют параметры критических точек практически всех металлов, составляющих ~ 80 % таблицы Менделеева. Определение истинной температуры методами оптической пирометрии невозможно без знания излучательной способности металла в околокритическом диапазоне термодинамических параметров. Измерение величин отражательной способности в процессе проведения эксперимента позволяет определить излучательную способность вещества [2].

А.2 Исследование оптических свойств металлов в сверхкритической области при указанном уровне температур и давлений возможно только динамическими методами.

Выбор металлов ртути и алюминия обусловлен относительно низким уровнем параметров их критических точек [1], [3], что облегчает отработку методики проведения эксперимента, кроме того, ртуть — единственный жидкий металл, перспективный для применения в сверхкритических технологиях создания новых видов покрытий. Алюминий при создании на его поверхности лазерно-индуцированных покрытий (в околокритических условиях нагрева) приобретает прочностные свойства, сопоставимые с титаном и высокопрочными сталями.

А.3 Для определения истинной температуры методами пирометрии принципиально необходимо знать излучательную способность нагретого вещества.

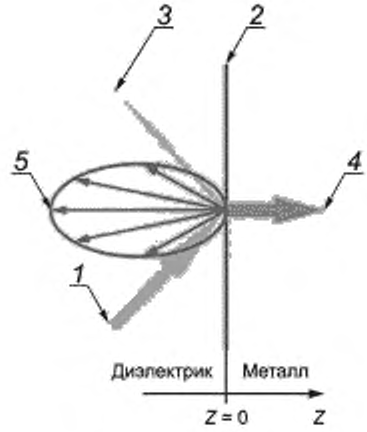
Для исследования оптических свойств металлов используют диски, отполированные по оптической технологии (среднеарифметическая высота шероховатости ~ 50 нм), также использовали образцы с напыленным слоем металла толщиной ~ 200 мкм. Ртутные образцы получали «раздавливанием» микрокапли ртути между двумя стеклами марки К8, толщина слоя ртути составляет ~ 50 мкм и контролируется цифровым микрометром.

А.4 Методика измерений

Настоящая методика представляет динамический метод генерации и исследования фазовых диаграмм металлов. Методика основана на управляемом достижении высокоэнергетического состояния вещества при облучении импедансной поверхности металла мощным наносекундным импульсом излучения лазера (импедансная поверхность — поверхность, нагруженная слоем диэлектрика). В этом случае происходит квазиизохорный нагрев веществ, и эффективность генерации давления резко возрастает (на два порядка). Нагружающий металл диэлектрик предотвращает возникновение абляции — выброса плазменного факела с облучаемой поверхности исследуемого вещества. Это, в свою очередь, позволяет изучать оптические свойства вещества: отражательную и, соответственно, излучательную способность металла при указанном уровне температур и давлений. Достижение заданной точки фазовой диаграммы определяется интенсивностью излучения лазера и физическими свойствами диэлектрика, нагружающего облучаемую поверхность.

А.5 При исследовании теплофизических свойств веществ динамическими методами принципиально важно правильно выбрать длительность внешнего воздействия. При использовании сверхкоротких лазерных воздействий, фемто- и пикосекундных, возможны ситуации, когда нельзя говорить о наступлении термодинамического равновесия в системе [3]. В этих случаях состояние системы не описывается набором термодинамических параметров, таких как температура и давление. При лазерном облучении поверхности металла характерным временем установления локального термодинамического равновесия в системе является время выравнивания температур электронной и фононной подсистем $\tau_{э\text{-}ф}$, которое по порядку величины составляет 10^{-12}—10^{-11}с [4]. Характерное время формирования границы раздела фаз для металлов составляет ~10^{-13}—10^{-10}с, время выхода на «стационарный» режим нуклеации ~ $5 \cdot 10^{-10}$с. На временах больших $\tau_{э\text{-}ф}$ поведение системы можно описывать на языке термодинамических параметров. Для металлических мишеней, облучаемых лазерными импульсами наносекундной длительности, указанное условие выполняется, и можно считать, что система находится в области локального термодинамического равновесия.

А.6 На рисунке А.1 показана схема постановки экспериментального исследования: лазерный импульс *1* падает на границу металл — диэлектрик *2* (такая граница называется импедансной). Часть энергии падающего излучения поглощается в металле, вызывая нестационарный неоднородный нагрев как самого металла, так и прозрачного диэлектрика, часть энергии отражается *3*. Нестационарный неоднородный нагрев приводит к генерации термоупругих напряжений, которые уносятся из приповерхностной области акустической волной *4*. Также на рисунке А.1 схематически указано тепловое излучение поверхности *5*.



1– лазерный импульс; 2 — граница металл — диэлектрик 3 — отраженный импульс; 4 — акустическая волна; 5 — тепловое излучение

Рисунок А.1 — Геометрия задачи

Характерные пространственные масштабы задачи нагрева алюминия лазерным импульсом наносекундной длительности приведены на рисунке А.2.

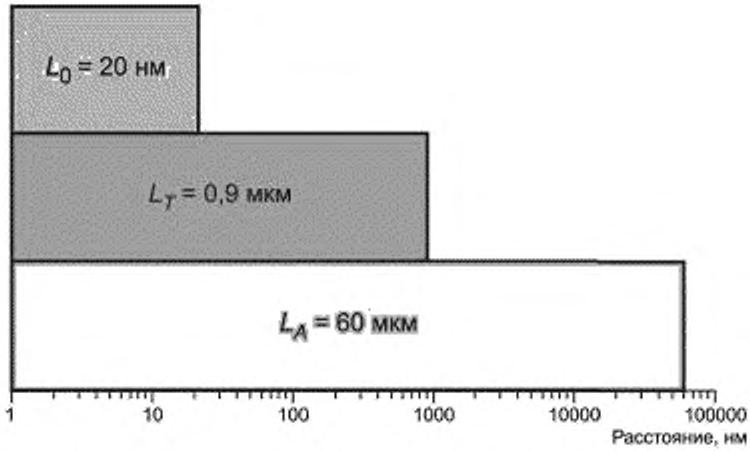


Рисунок А.2 — Характерные пространственные масштабы задачи нагрева алюминия лазерным импульсом наносекундной длительности

В данной задаче можно выделить ряд характерных пространственных масштабов: глубина проникновения света $L_0 = 1/\alpha$; длина диффузии тепла за время лазерного воздействия $L_T = \sqrt{\chi \tau_L}$, м, и пространственная протяженность акустического импульса $L_A = C_L \tau_L$, м, где α — коэффициент поглощения света, м$^{-1}$; $\chi = \lambda / \rho C_P$ — температуропроводность, м^2/с; λ — теплопроводность, Вт/м$^2 \cdot$К; ρ — плотность, кг/м^3; C_P — изобарная теплоемкость, Дж/(кг$\cdot$К); C_L — скорость продольных акустических волн, м/с; τ_L – длительность лазерного импульса, с. Для металлов при наносекундной длительности лазерных импульсов справедливы следующие соотношения между приведенными выше масштабами:

$$L_0 / L_T << 1; \quad (А.1)$$

$$L_T / L_A << 1. \quad (А.2)$$

Соотношение (А.1) является условием поверхностного нагрева, а условие (А.2) — условием адиабатического распространения звука (и, как следствие, одним из условий применимости акустического приближения).

Для задачи исследования локально-равновесных высокоэнергетических состояний металлов оптимальная длительность лазерного импульса лежит в диапазоне от 10 до 100 нс, который представляет собой компромисс между простотой эксперимента, эффективностью нагрева и генерацией давления.

А.7 Методика температурных измерений

Для изучения процессов, индуцируемых лазерным излучением наносекундной длительности, требуемое временное разрешение определения температуры должно составлять не менее 1 нс. Указанное временное разрешение можно получить только методами оптической пирометрии. Однако при этом возникают сложности с абсолютной калибровкой пирометров.

В настоящем стандарте использован новый способ калибровки оптического тракта пирометра при помощи так называемой квазимонохроматической модели абсолютно черного тела нетеплового происхождения (КМАЧТ) [5].

КМАЧТ можно представить в виде обычной (спектральной) модели черного тела, в выходном отверстии которого установлен интерференционный фильтр с полосой пропускания $\Delta\lambda$ ~ (10—20) нм. Если далее подобрать параметры интерференционного фильтра так, чтобы спектральная полоса пропускания фильтра совпадала с узкой полосой излучения лазера, то с «точки зрения регистрирующего фотоприемника» в этой узкой спектральной полосе равновесное тепловое излучение нагретой полости классической модели абсолютно черного тела (МАЧТ) будет идентично излучению квазимонохроматического лазерного источника (нетеплового происхождения). Этот лазерный источник можно рассматривать как некоторую виртуальную КМАЧТ, имеющую температуру T, спектральная интенсивность излучения которой описывается законом Планка. При этом необходимо учесть, что тепловое излучение модели носит ламбертовский характер: в полусферу распространяется излучение одинаковой яркости (интенсивности) вне зависимости от направления (данное требование обычно никогда не выполняется). Это условие реализуется при пропускании излучения лазера через пластину «молочного» (вспененного) стекла со шлифованной внешней поверхностью. Интенсивность излучения лазера в узком спектральном диапазоне на многие порядки превосходит интенсивность излучения МАЧТ, температура которого ограничена жаростойкостью используемых материалов нагревателей и составляет ~ 3500 К для самых современных МАЧТ на основе металл-графитовых эвтектик.

Формальная оценка «максимальной температуры, которой соответствует интенсивность монохроматического излучения современного лазера» на основе закона Планка была проведена в [4] и составила $T \sim 10^{23}$ К при плотности излучения лазера ~ 5 МВт/см^2 в телесном угле, соответствующем расхождению лазерного луча. При излучении в полусферу $T \sim 10^{15}$ К.

Принцип работы КМАЧТ с лазерным источником излучения основан на следующем математическом соотношении, описывающем мощность излучения некоторого источника в узком спектральном диапазоне [6].

Мощность излучения в телесном угле 2π:

$$P = \pi \cdot b\left(\lambda_p, T\right)\Delta\lambda \cdot S, \tag{А.3}$$

где P — мгновенная мощность излучения источника, Вт;

$b\left(\lambda_p, T\right)$ — спектральная интенсивность излучения источника на его рабочей длине волны λ_p при температуре T, Вт/м^3;

λ_p — рабочая длина волны лазера, нм;

$\Delta\lambda$ — ширина спектрального диапазона (~ 10—20 нм), в котором излучает источник (полоса пропускания интерференционного фильтра) и которому принадлежит λ_p;

S — площадь излучающей поверхности источника, м^2.

Откуда для спектральной интенсивности излучения получаем:

$$b\left(\lambda_p, T\right) = \frac{P}{\pi\Delta\lambda S}. \tag{А.4}$$

В качестве источника эталонного излучения в предлагаемой КМАЧТ используют импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер (активный элемент — алюмо-иттриевый гранат), работающий в режиме модуляции добротности, длина волны излучения 1062 нм, но это не принципиально, в качестве источника излучения может быть использован непрерывный лазер. Величины $\Delta\lambda$ и λ_p, входящие в формулу (А.4), являются паспортными для данного лазера, но при необходимости могут быть измерены стандартными методами с высокой точностью. Мгновенная мощность излучения источника рассчитывается по измеренным величинам энергии лазерного излучения, измеренного с помощью приемника лазерного излучения (оригинальная разработка авторов), и временной форме лазерного импульса. Площадь излучающей поверхности источника S определяется удобством проведения калибровки и легко измеряется, следовательно, на основании формулы (А.4) может быть определена величина спектральной

интенсивности излучения $b(\lambda_p, T)$. Эту величину можно сопоставить со спектральной интенсивностью излучения КМАЧТ — $b_0(\lambda_p, T)$, которая описывается законом Планка:

$$b_0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (A.5)$$

где $C_1 = 3{,}7413 \cdot 10^{-16}$ Вт/м^2, $C_2 = 1{,}4388 \cdot 10^{-2}$ м · К. Объединяя соотношения (А.4) и (А.5), получаем:

$$b(\lambda_p, T) = P/\pi\Delta\lambda S = b_0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T} \cdot 1\right)}. \quad (A.6)$$

Предлагаемая КМАЧТ имеет огромный запас по величине верхней температуры (теоретически до $T \sim 10^{15}$ К, [5]), и для калибровки можно использовать маломощный импульсный лазер. При проведении эксперимента в реальных условиях максимальная температура калибровки не превысит величины ~ 10^4—10^5 К. После несложных преобразований из (А.6) получаем:

$$T = \frac{C_2}{\lambda \ln\left(C_1 \pi \Delta\lambda S / P\right)}. \quad (A.7)$$

Формула (А.7) определяет температуру КМАЧТ с лазерным источником излучения в зависимости от мощности излучения P лазерного источника при заданных величинах λ, $\Delta\lambda$, S.

Проведение калибровки всего оптического тракта пирометра тем не менее не позволяет определить истинную температуру нагретого образца, т. к. тепловое излучение реальных тел определяется их излучательной способностью, величина которой существенно зависит от рода металла и его температуры. При проведении пирометрических измерений именно отсутствие данных по оптическим свойствам — излучательной способности представляет основную проблему измерений. Это замечание относится к пирометрическим измерениям, использующим для калибровки любые типы «моделей черных тел». Знание излучательной способности металла и ее зависимости от температуры принципиально необходимо. Определение излучательной способности по измеренной отражательной способности осуществляется на основании закона Кирхгофа (это закон сохранения энергии), справедливого только для случая зеркальной отражающей поверхности:

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1,$$

где $\rho(\lambda)$; $\alpha(\lambda)$; $\tau(\lambda)$ — соответственно спектральные коэффициенты отражения, поглощения и пропускания.

В случае непрозрачных тел (металлы вдали от перехода металл — диэлектрик) величина $\tau(\lambda) = 0$, и излучательная способность, как спектральная, так и интегральная по длинам волн, определяется следующим образом:

$$\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda). \quad (A.8)$$

Окончательно истинную температуру рассчитывают по формуле

$$T_{ист} = T/(1 - \rho(\lambda)), \quad (A.9)$$

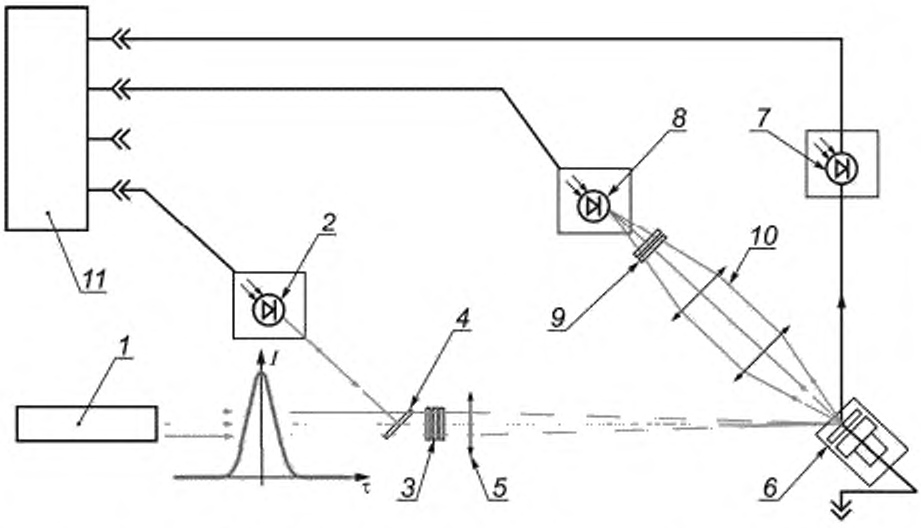
где T определяется по формуле (А.7).

А.8 Экспериментальная установка. Результаты измерений

А.8.1 Экспериментальное исследование сверхкритических состояний ртути и алюминия

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке А.3. В качестве источника лазерного излучения в работе используется твердотельный Nd:YAG-лазер *1*, работающий в режиме модуляции добротности, со следующими характеристиками: длина волны излучения 1,06 мкм, длительность импульса ~ 10 нс, предельная энергия в импульсе 0,6 Дж. Лазерное излучение ослабляется набором нейтральных светофильтров *4*, после чего фокусируется собирающей линзой (f = 30 см) *5* на поверхность мишени *6* в пятно диаметром ~ 2 мм. Изменение коэффициента ослабления позволяет варьировать плотность энергии падающего излучения. Временная форма падающего на мишень излучения регистрируется кремниевым PIN-диодом *2* (время нарастания 1 нс), на который направляется часть излучения при помощи делительной пластинки *3*. По сигналу этого же фотоприемника происходит запуск осциллографа. Запись формы зеркально отраженного излучения осуществляется аналогичным фотодиодом *7*.

Измерение падающего, отраженного, теплового излучения и сигнала калиброванного пьезоприемника, с помощью которого измеряется давление, осуществляется с наносекундным временным разрешением.



1 — Nd:YAG-лазер (τ_L ~ 10 нс, *W* ~ 1 Дж); *2*, *7*, *8* — высокоскоростные фотоприемники PIN-диоды DET 210A (THORLABS), *3* — светоделительная пластинка; *4* — ослабляющие фильтры; *5* — собирающая линза, *6* — мишень; *9* — фильтры пирометра *10* — объектив; *11* — цифровой осциллограф TDS 3034

Рисунок А.3 — Схема экспериментальной установки

Система регистрации теплового излучения мишени состоит из объектива *10*, фильтров СЗС-24 и СЗС-27-*9* и фотоприемника *8*. Тепловое излучение мишени собирается объективом и проходит через фильтры СЗС-24, СЗС-27, отсекающие излучение на длине лазерного излучения, после чего направляется на фотоприемник теплового излучения. При необходимости к упомянутым фильтрам добавляются нейтральные светофильтры для ослабления теплового излучения во избежание насыщения фотоприемника. Измерение акустического сигнала осуществляется широкополосным акустическим пьезоприемником на основе ниобата лития *6*. Сигналы от фотоприемников и датчика давления регистрируются цифровым запоминающим четырехканальным осциллографом Tektronix TDS 3034B — *11*, с полосой пропускания 300 МГц и частотой дискретизации до 2,5 ГГц. Осциллограф управляется компьютером по интерфейсу Ethernet, что позволяет автоматизировать сбор и обработку экспериментальных данных.

А.8.1.1 Положение образца-мишени

На схеме экспериментальной установки показано, что облучение мишени импульсом лазерного излучения осуществляется под углом ~ 45°, тепловое излучение нагретого металла регистрируется по нормали к мишени, отраженное от мишени излучение лазера регистрируется под углом ~ 90° по отношению к падающему лазерному пучку. В [2] отмечено, что излучательную способность металлов при углах падения излучения в диапазоне ± 45° от нормали можно считать постоянной. Это значит, что при регистрации теплового излучения по нормали к нагретой поверхности отражательную (излучательную только для случая зеркального отражения) способность допустимо регистрировать под углом ~ 45°. Использование такой оптической схемы облучения позволяет развести падающее и отраженное излучение лазера и тепловое излучение нагретой мишени и максимально исключить их взаимное влияние (паразитную «засветку»). При этом величина отраженного излучения регистрируется на длине волны излучения лазера (λ = 1,062 мкм). Такая схема измерений не требует синхронизации падающего и отраженного пучков, но длительность регистрации отраженного излучения определяется длительностью лазерного импульса.

А.8.2 Измерение отражательной способности поверхности образца

Измерение отражательной способности поверхности образца необходимо для определения температуры, однако эта величина представляет самостоятельный интерес.

Для измерения изменений отражательной способности образца относительно ее первоначального значения в процессе импульсного лазерного нагрева использовались два фотоприемника, регистрирующих падающее излучение и зеркально отраженное от исследуемого образца. Отношение сигналов, зарегистрированных фотоприемниками отраженного и падающего излучения, пропорционально отражательной способности поверхности в каждый момент времени. Однако в силу различного положения в пространстве доли излучения, собираемые фотоприемниками, отличаются, поэтому их эффективная чувствительность различна. Кроме того, сигналы с обоих приемников смещены во времени относительно друг друга в силу временных задержек между каналами осциллографа. Так как в дальнейшем находится отношение этих сигналов, временные задержки и различие

чувствительности фотоприемников необходимо компенсировать. По этой причине перед каждым выстрелом с большой плотностью энергии проводят калибровку приемников — определение различия в чувствительности и временной задержки.

В работе используют ртутные и алюминиевые образцы, отражательная способность мишеней до воздействия мощного лазерного импульса (на длине волны λ = 1062 нм) равна:

ρ_a = 0,51 ± 0,05 — для микрокапель ртути, зажатых между двумя стеклами К8,

ρ_a = 0,80 ± 0,045 — для полированных образцов и образцов, полученных методом магнетронного напыления алюминия на оптическое стекло толщиной ~ 200 нм.

А.9 Динамика измерения отражательной способности поверхности металлов Hg и Al при воздействии лазерного излучения

Примеры экспериментального исследования динамики изменения температуры, давления и отражательной способности ртутных образцов при воздействии мощного импульса лазерного излучения приведены на рисунках А.4—А.6.

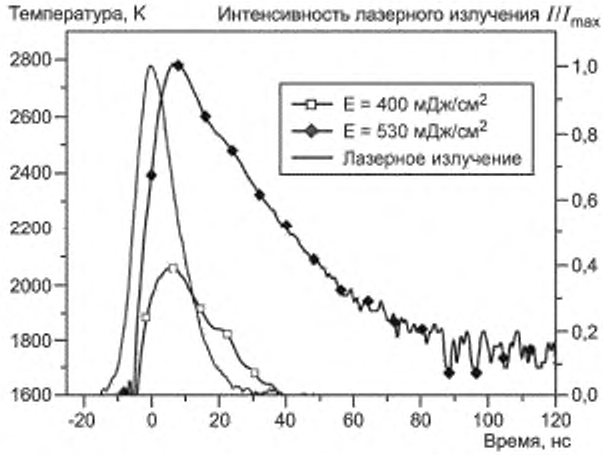


Рисунок А.4 — Динамика изменения температуры ртути при больших плотностях энергии лазерного излучения

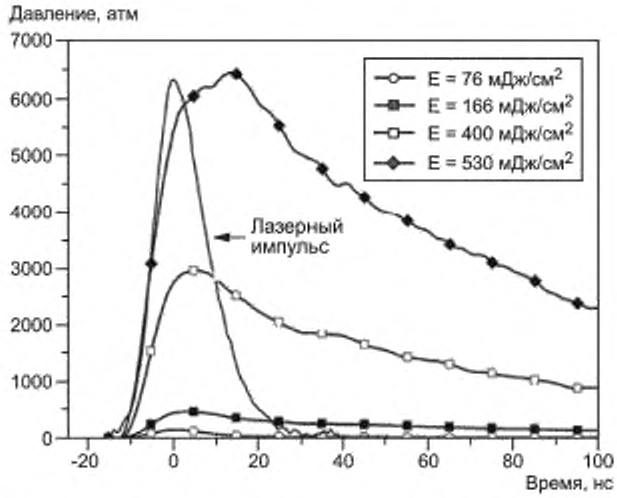


Рисунок А.5 — Динамика изменения давления в ртутном образце при больших плотностях энергии лазерного излучения



Рисунок А.6 — Динамика изменения отражательной способности поверхности ртути при больших плотностях энергии лазерного излучения

На рисунке А.6 представлена динамика изменения отражательной способности поверхности образца. При относительно высокой плотности энергии лазерного импульса ~ 120 мДж/см^2 изменяется характер поведения отражательной способности, что в совокупности с изменением характера поведения температуры поверхности подтверждает предположение об ионизации приповерхностного слоя нагружающего диэлектрика. Отражательная способность поверхности ртути падает практически в пять раз по сравнению с первоначальной.

Примеры экспериментального исследования динамики изменения температуры, давления и относительной отражательной способности алюминиевых образцов при больших плотностях энергии лазерного излучения приведены на рисунках А.7—А.9.

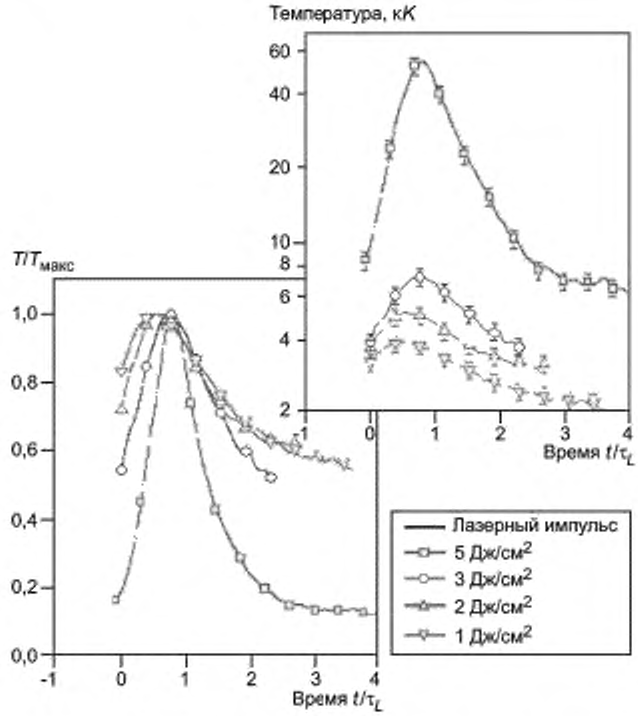


Рисунок А.7 — Динамика изменения температуры алюминиевых образцов при относительно высоких уровнях энергии лазерного импульса

На рисунке А.7 представлены распределения температуры во времени при различных уровнях энергии лазерного импульса. Температуры представлены в «нормальзованном» и «абсолютном» виде. При энергиях E = 3 Дж/см^2 температура в максимуме достигает критической ($T_{кр}$ = 7990 К). В случае E = 5 Дж/см^2 происходит нарушение условия «механического нагружения» облучаемой поверхности и в пространстве между слоем металла и диэлектриком в момент облучения образуется «плазменная линза», температуру которой $T_{пл}$ = 60 000 К фиксирует пирометр.

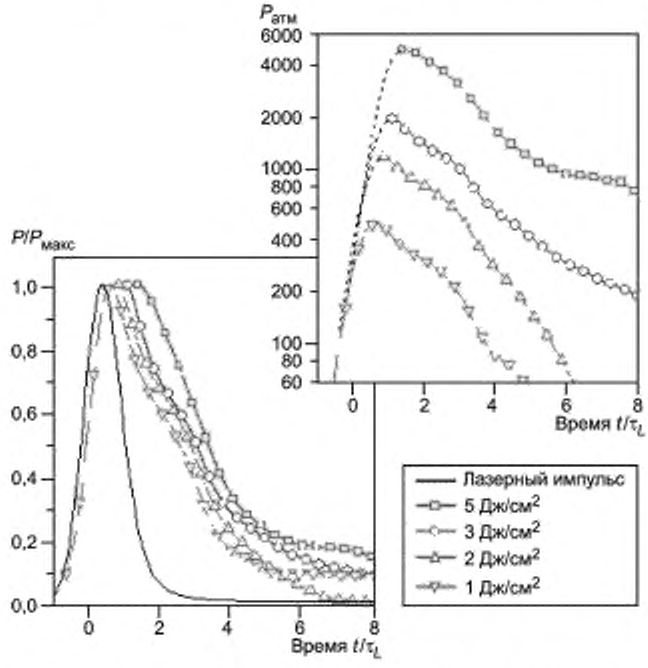


Рисунок А.8 — Динамика изменения давления в алюминиевом образце при больших плотностях энергии лазерного излучения

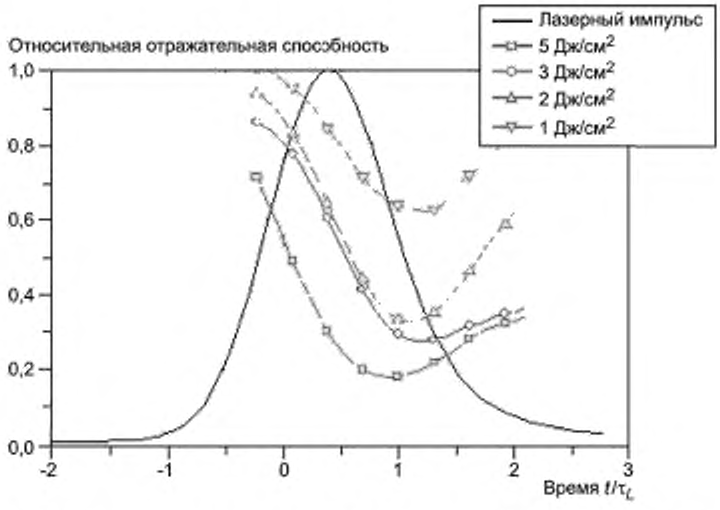


Рисунок А.9 — Динамика изменения относительной отражательной способности поверхности образца Al при высоких плотностях энергии

При достаточно высоком уровне плотности энергии лазерного импульса, начиная с величин ~ 1 Дж/см^2, поведение отражательной способности алюминия полностью аналогично результатам, полученным для ртути: отражательная способность поверхности Al падает практически в пять раз. Критической точке алюминия соответствует значение относительной отражательной способности ~ 0,24. Для всех исследованных металлов минимум отражательной способности точно коррелируется с максимумом температуры образца, нагреваемого импульсом лазерного излучения.

Библиография

[1] Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. — М.: Физматлит, 2004. 528 с.

[2] Свет Д.Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. — М.: Наука, 1967. 236 с.

[3] Фортов В.Е. Динамические методы в физике плазмы // УФН. 1982. Т. 138. Вып. 3. С. 36

[4] Крохин О.Н. и др. Лазерная плазма. Физика и применения. — М.: МИФИ, 2003. 400 с.

[5] Методика ГСССД МЭ 179—2011. Методика экспериментального определения температуры исследуемых объектов до ~ 10^5 К с наносекундным временным разрешением при специальной калибровке оптического тракта пирометра // Ивочкин А.Ю., Каптильный А.Г., Карабутов А.А., Ксенофонтов Д.М. Деп. в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 13.04.2011 г., № 873а-2011кк

[6] Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. — М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. 656 с.

УДК 536.21:006.354 МКС 17.020

Ключевые слова: стандартные справочные данные, вещества, материалы, свойства, неопределенность

БЗ 5—2018/43

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Е.Р. Ароян*
Компьютерная верстка *Ю.В. Половой*

Сдано в набор 15.08.2018. Подписано в печать 03.09.2018. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86 Уч.-изд. л. 1,68.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

Создано в единичном исполнении ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
123001 Москва, Гранатный пер., 4. gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru