

Комбинированные окна для газовых лазеров высокой мощности

© М.В. Рогожин¹, В.Е. Роголин², М.И. Крымский¹

¹Лаборатория лазерных навигационных систем, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

²Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
191186 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: v-rogalin@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2019 г.

В окончательной редакции 21.06.2020 г.

Принята к публикации 03.07.2020 г.

На основе ранее разработанной математической модели поведения окна лазера мультикиловаттной мощности с неустойчивым резонатором рассмотрен случай двухкомпонентного выходного окна. Двухкомпонентное окно состоит из прозрачного кольцевого поликристаллического алмаза и центральной непрозрачной области, разделенных пластичной вакуумирующей прокладкой. Для снижения тепловой нагрузки центральная непрозрачная часть снабжена криоаккумулятором. Проведены численные расчёты термомеханических процессов для таких окон, используемых в мощных CO₂-лазерах. Математическая модель, использованная для вычислений, состоит из трёх частей — теплофизической, механической и оптической. Продемонстрированы преимущества использования двухкомпонентной конструкции с криоаккумулятором в условиях функционирования газового лазера в мультикиловаттном диапазоне мощностей. Получены зависимости максимально допустимой мощности выходного излучения, распределения температур и механических напряжений от толщины окна. Рассмотрены условия, при которых такое выходное окно должно не только успешно выдерживать испытываемые экстремальные лучевые нагрузки, но и обеспечивать минимально возможную расходимость исходящего излучения.

Ключевые слова: выходное окно, высокомоощный лазер, расходимость, тепловая линза, материал, претерпевающий при нагреве фазовый переход (МФП), резонатор.

DOI: 10.21883/OS.2020.11.50173.268-20

Введение

Выходное окно газового лазера является наиболее уязвимым узлом его конструкции. Особенно это становится наглядным при рассмотрении CO₂-лазеров, излучающих в области 9–11 μm (основная длина волны λ = 10.6 μm) [1–4]. В этой области прозрачны лишь некоторые весьма дорогие кристаллические материалы, обладающие, как правило, низкими механическими и теплофизическими свойствами [5,6]. За время

существования лазерной техники проведена колоссальная работа по технологическому совершенству этих оптических материалов. Ключевой параметр материала — коэффициент поглощения снижен практически до физического предела. Тем не менее из-за остаточного поглощения термооптические процессы в окне приводят к значительному увеличению расходимости пучка.

Основные термооптические процессы в окне определяются величиной dn/dt — зависимостью изменений показателя преломления от температуры. Эта величина в различных оптических материалах может быть положительной (например, $+6.1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ в селениде цинка ZnSe), так и отрицательной (например, $-3.4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ в хлористом калии KCl) [6]. В работе [7] предложено создавать двухслойные окна из материалов с разнонаправленным dn/dt , используя это свойство. Однако

этот метод не получил развития ввиду его технической сложности.

В работах [8–10] проведен расчётно-теоретический анализ поведения выходного окна мощного газового лазера при воздействии интенсивного излучения. Видно, что с ростом мощности современных лазеров потенциал классических выходных окон становится почти исчерпанным.

После публикации работы [11], в которой сообщалось о рекордной стойкости алмаза в луче мощного CO₂-лазера при плотности мощности излучения 10^7 W/cm^2 , начались интенсивные исследования получения искусственных алмазов для различных технических применений, в частности для силовой оптики. По технологии химического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD) создан сравнительно новый оптический материал — поликристаллический алмаз [12–14]. Благодаря удачному сочетанию механических, теплофизических и оптических свойств этот уникальный материал, несмотря на дороговизну и технологические проблемы, связанные со сложностью получения и оптической обработки, сейчас достаточно часто используется для изготовления выходных окон мощных CO₂-лазеров [11,15–19]. Оптическая стойкость алмазных окон может быть в дальнейшем увеличена за счёт использования изо-

топически чистых алмазов [20, 21], которые обладают теплопроводностью в ~ 1.5 раза большей, нежели алмаз, полученный из углерода природного изотопического состава [21].

Для монокристаллических и поликристаллических алмазов коэффициент поглощения различается примерно в 1.5 раза [18]. Однако из-за небольших размеров монокристалла (как правило, не более 10 мм) лазерные окна из этого материала обычно не делают. Однако в связи с появлением непрерывных щелевых CO_2 -лазеров [22] мощностью несколько киловатт, широко применяемых в промышленности, проблема достаточно небольшого, но оптически стойкого выходного окна стала весьма актуальна. Дело в том, что для щелевых лазеров характерен компактный вывод излучения. Поэтому при сравнительно небольшой выходной мощности необходимо использовать оптические элементы, способные работать при экстремальной интенсивности излучения. В работе [15] для подобных задач нами была предложена и рассчитана конструкция выходного окна, изготовленного из поликристаллического алмаза с центральной областью, выполненной из монокристалла алмаза. Применение такого комбинированного алмазного окна позволяет повысить предел его оптической стойкости и, как следствие, максимальную мощность генерируемого излучения лазера не менее чем в 2 раза. Это обеспечивается за счет увеличения прочности окна и снижения количества поглощаемой в нем энергии вследствие снижения коэффициентов поглощения и рассеяния.

Настоящая работа посвящена поиску альтернативных практических путей повышения оптической стойкости выходных окон мощных широкоапертурных газовых лазеров, использующих неустойчивый резонатор. Очень часто такие лазеры используются в режиме сравнительно коротких пусков, длительность которых обычно не превышает десятки секунд [23]. Однако с точки зрения теории теплопроводности [9,10], это непрерывный режим работы. Рассмотрен частный случай увеличения практической стойкости окна применительно к конкретной конструкции мощного газового лазера. Расчет проведен применительно к окну из поликристаллического алмаза. Однако полученные результаты могут быть применены для других прозрачных материалов, используемых в различных типах мощных газовых лазеров, например в лазерах на CO , HF , DF , йодных лазерах, лазерах на парах щелочных металлов и т. д.

Поскольку мощные твердотельные лазеры часто используются в неблагоприятных климатических условиях, то в их конструкцию часто закладывается выводное окно, предохраняющее дорогостоящие оптические элементы от воздействия внешней среды. Полученные результаты могут быть также использованы для анализа поведения таких окон.

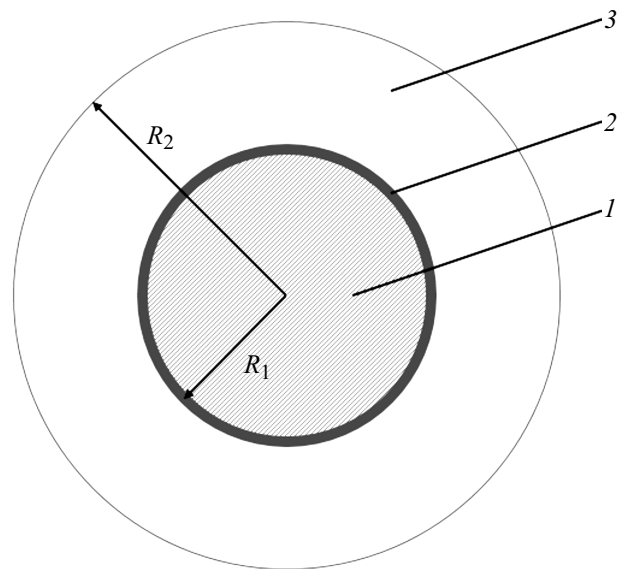


Рис. 1. Принципиальная схема составного окна. 1 — непрозрачная зона, 2 — пластиковая прокладка, 3 — прозрачная зона.

Расчетная часть

Мощные лазеры обычно проектируются с использованием неустойчивого резонатора. При соблюдении необходимых процедур это позволяет получить сравнительно неплохую расходимость излучения и распределение в дальней зоне, близкое к одномодовому [24]. Профиль интенсивности пучка в ближнем поле в таких лазерах обычно имеет форму кольца, поэтому центральная часть окна не подвергается лучевой нагрузке. В этом случае она может быть изготовлена из другого даже непрозрачного материала, который дешевле и механически прочнее. В этом случае центральная часть такого составного окна отделяется от периферийного прозрачного кольца с помощью пластиковой вакуумной прокладки (рис. 1). Тогда максимальная выходная мощность, а также качество луча, за счёт снижения искажений в окне, могут быть повышены путем размещения дополнительной системы охлаждения в центральной части для усиления теплоотвода. Данная конструкция окна выгодна не только по физическим, но и по экономическим соображениям. Так как окно мощного газового лазера изготавливается из весьма дорогих материалов, то вырезанная из него центральная часть может быть с успехом использована в другом приборе. Стоимость же вставки значительно ниже.

Прокладка между центральной и периферийной областью предназначена обеспечивать вакуумную герметичность, хорошо проводить тепло и обладать механическими свойствами для выполнения роли буфера с целью компенсации температурного расширения частей окна. Для изготовления прокладки обычно применяется пластичный металл индий.

Эффективность комбинированного окна можно повысить, дополнительно охлаждая непрозрачную область, используя радиатор с материалом, претерпевающим при нагреве фазовый переход (МФП) (рис. 2). Радиатор МФП (криоаккумулятор) представляет собой цилиндр из пористого металла, заполненный веществом, которое осуществляет фазовый переход в процессе поглощения тепла при рабочей температуре окна [5]. Этот способ позволяет создать дополнительный теплоотвод с поверхности $z = 0$ центральной части окна в течение достаточно длительного периода времени, не требуя дополнительной подачи хладагента. Учитывая, что центральная область окна выполняется из материала с высокой теплопроводностью (например, меди [25]), этот метод обеспечивает дополнительный эффективный теплоотвод по всей толщине окна.

Анализируем поведение выходного окна из поликристаллического алмаза [15]. Рассмотрим случай, когда периферийная часть окна подвергается длительному воздействию излучения мощного лазера с кольцевым профилем интенсивности. В данной конструкции периферийная часть окна охлаждалась при помощи периферийного жидкостного охлаждения с $T = 7^\circ\text{C}$. Центральная часть окна заменяется вставным медным диском, сопряженным с криоаккумулятором из МФП. Коэффициент поглощения алмаза на длине волны лазера принимаем равным $\alpha = 5 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-1}$ [26]. Схема окна с указанием геометрических размеров представлена на рис. 2.

Численное моделирование поведения выходного окна мощного газового лазера было проведено ранее [9,10]. Для расчетов распределения температур и механических напряжений в объеме окна была использована модель, модифицированная с учетом его двухкомпонентной структуры. Тепловая часть модели, подробно описанная в [9,10], была модифицирована с учетом того, что центральная и периферийная области окна изготовлены из разных материалов и находятся в плотном тепловом контакте друг с другом. Таким образом, ранее составленное уравнение теплопроводности [27] (1) приняло

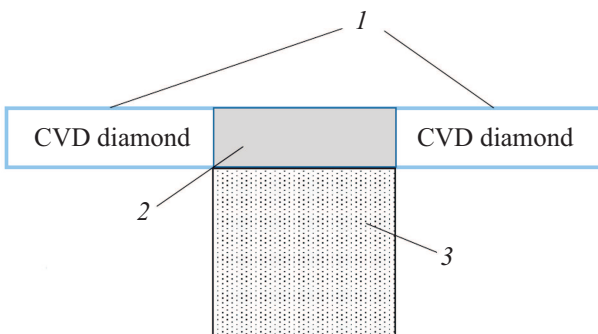


Рис. 2. Комбинированное окно с криоаккумулятором МФП. 1 — прозрачная периферийная часть, 2 — непрозрачная центральная часть, 3 — радиатор МФП.

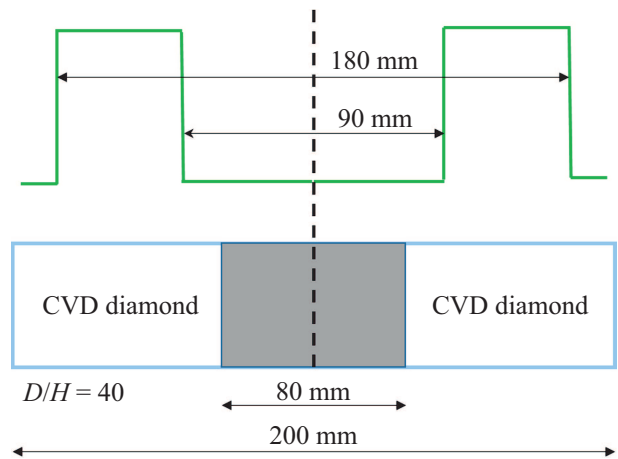


Рис. 3. Комбинированное окно с кольцевым профилем выходного излучения.

вид (3)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q(r, z), \quad (1)$$

где ρ — плотность материала окна, c — удельная теплоёмкость, T — температура, λ — значение коэффициента теплопроводности, $Q(r, z)$ — плотность мощности поглощаемого излучения, определяемая как

$$Q(r, z) = \begin{cases} \frac{4P_0\alpha}{3\pi W_0^2} e^{-\alpha z}, & W_1 \leq r \leq W_0 \\ 0, & r < W_1, r > W_0 \end{cases}, \quad (2)$$

$W_1 = 0.45R, \quad W_0 = 0.9R$

где P_0 — мощность лазерного излучения, α — коэффициент поглощения материала окна на длине волны лазера, W_1, W_0 — внутренний и внешний радиусы пятна излучения соответственно,

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_1 r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(r, z), & 0 \leq r \leq R_1, \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_3 r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(r, z), & R_1 \leq r \leq R_2, \end{cases} \quad (3)$$

где индексы „1“ и „3“ относятся к материалам центральной и периферийной части окна соответственно.

В качестве граничного условия (4) рассмотрен плотный тепловой контакт между центральной и периферийной областями. Толщиной прокладки и ее термическим сопротивлением пренебрегалось. При удельной теплопроводности индия $81.8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, обычно применяемого для этих целей, и используемой на практике толщине прокладки не более 2–3 мм данное допущение вполне обосновано

$$\begin{cases} -\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R_1-0} = -\lambda_3 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R_1+0}, \\ T(R_1 - 0, z) = T(R_1 + 0, z). \end{cases} \quad (4)$$

Плотность поглощаемой окном мощности излучения $Q(r, z)$ описывается выражением

$$Q(r, z) = \begin{cases} \left(\frac{4}{3} \frac{P\alpha}{\pi W_0^2} e^{-\alpha z}\right), & W_1 \leq r \leq W_0, \\ 0, & r < W_1, r > W_0. \end{cases} \quad (5)$$

Размер периферийной области окна был выбран таким образом, чтобы полностью пропускать излучение лазера, а также иметь некоторый запас на юстировку и вакуумирующую прокладку:

$$R_1 < W_1 < W_0 < R_2. \quad (6)$$

Для моделирования теплофизических процессов внутри криоаккумулятора на фазовом переходе была использована следующая математическая модель. Фазовый переход при передаче теплоты в процессе плавления или замораживания учитывается введением в уравнение теплопроводности δ -функции Дирака. Тогда уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах принимает вид

$$\left((\rho c)_{\text{ef}}(T) + r_m \delta(T - T_{\text{ph}})\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{ef}} r \frac{\partial T}{\partial r}\right), \quad (7)$$

где r_m и T_{ph} — теплота плавления и температура фазового перехода соответственно. При этом δ -функция Дирака отвечает условию нормировки

$$\int_{T_{\text{ph}} - \Delta T}^{T_{\text{ph}} + \Delta T} (T - T_{\text{ph}}) dT = 1, \quad (8)$$

где ΔT — температурный интервал (область „размывания“) фазового перехода. При расчетах в качестве δ -образной функции использовалась ее параболическая аппроксимация.

Учет теплофизических свойств пористой насадки и рабочего вещества криоаккумулятора осуществляется посредством введения эффективных значений плотности, теплоемкости и теплопроводности. При заданной пористости насадки Π эффективное значение произведения $(\rho c)_{\text{ef}}$ определяется по формуле

$$(\rho c)_{\text{ef}} = \Pi(\rho c)_w + (1 - \Pi)(\rho c)_p, \quad (9)$$

при этом индексы „w“ и „p“ относятся к рабочему телу, осуществляющему фазовый переход, и пористой насадке соответственно.

Для определения эффективной теплопроводности λ_{ef} используется соотношение

$$\lambda_{\text{ef}} = \lambda_{\text{ph}} \left(\frac{\Pi}{\frac{\lambda_{\text{ph}}}{\lambda_w} + 1 - \sqrt{\Pi}} + 1 - \sqrt{\Pi} \right). \quad (10)$$

Произведение $(\rho c)_w$ для рабочего вещества в уравнении (4.3) в широком диапазоне температур определяется

как

$$(\rho c)_w = \begin{cases} \rho_s c_s, & T < T_p - \Delta T, \\ \rho_s c_s(1 - x) + \rho_l c_l x + \frac{r_m}{2\Delta T}, & |T - T_{\text{ph}}| < \Delta T, \\ \rho_l c_l, & T > T_{\text{ph}} + \Delta T, \end{cases} \quad (11)$$

где x — массовая доля жидкости в области „размывания“ фазового перехода

$$x = \frac{T - T_{\text{ph}} + \Delta T}{2\Delta T}, \quad (12)$$

индексы „s“ и „l“ относятся к твердой и жидкой фазам рабочего вещества соответственно.

Соотношения (7)–(12) определяют уравнение теплопроводности внутри области криоаккумулятора. Совместно с соотношениями (3)–(6), описывающими уравнение теплопроводности внутри комбинированного выходного окна, а также граничным условием плотного теплового контакта между плоскостями окна и криоаккумулятора, они образуют математическую модель, описывающую распределение температурного поля в рассматриваемой задаче.

Расчет поля механических напряжений для окна сплошной конструкции был подробно описан в [10]. При расчете аналогичного поля для окна рассматриваемой составной конструкции пренебрегалось деформацией вакуумирующей прокладки вследствие теплового расширения частей окна, так как она принималась пластически деформируемой благодаря мягкости индия. Это позволило рассчитывать механические напряжения в центральной и периферийной частях окна независимо друг от друга, используя следующие граничные условия (13):

$$\begin{cases} \sigma_{rr}(R_1 - 0) = 0, \\ \sigma_{rr}(R_1 + 0) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

где σ_{rr} — радиальная компонента тензора механических напряжений. Поскольку поле механических напряжений реально представляет практический интерес лишь в прозрачной области окна, то изложенная в [10] модель расчета механических напряжений для $r \in (R_1, R_2)$ совокупно с правым граничным условием (13) описывают распределение механических напряжений в двухкомпонентном окне с центральной непрозрачной областью.

Результаты и обсуждение

Рассмотрено поведение кольцевого выходного окна с внешним диаметром $D = 20$ см и внутренним $D = 8$ см из поликристаллического алмаза. Центральная часть окна изготовлена из меди. Окно подвергалось воздействию излучения CO_2 -лазера с неустойчивым резонатором, работающего в непрерывном режиме с кольцевым профилем интенсивности. Время генерации $t = 60$ с. Коэффициент поглощения алмаза на длине волны лазера принимался $\alpha = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ [28]. Теплопроводность

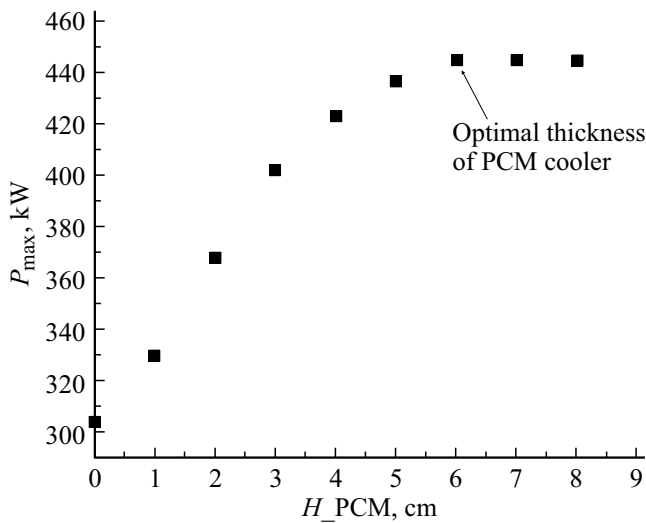


Рис. 4. Максимальная выходная мощность в зависимости от толщины криоаккумулятора МФП.

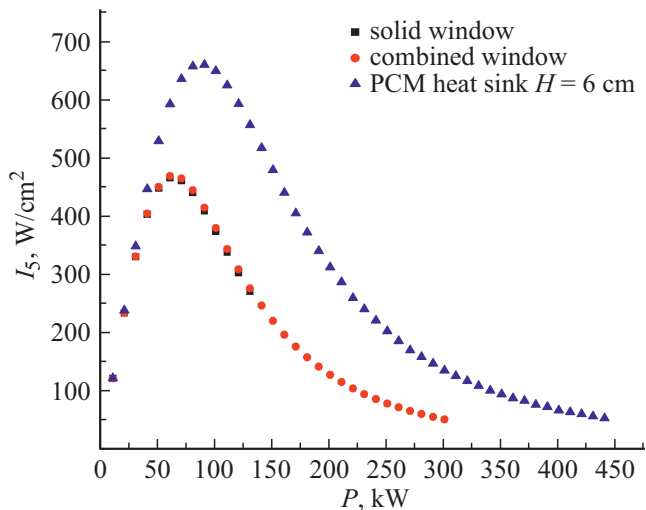


Рис. 5. Интенсивность пучка на удаленном объекте (5 km) при разных уровнях мощности.

алмаза — 2000 W/m·K [28], теплопроводность меди — 400 W/m·K [25]. Внешний периметр окна обеспечивался периферийным жидкостным охлаждением $T_1 = 7^\circ\text{C}$. Принципиальная схема со всеми необходимыми размерами показана на рис. 3.

Дополнительное охлаждение обеспечивалось криоаккумулятором МФП [29–32] диаметром 8 см, установленным в центральной области окна, как показано на рис. 2. Сопло радиатора было изготовлено из пористого алюминия с коэффициентом пористости $P_{ор} = 0.5$. В качестве рабочей жидкости МФП выбран глицерин с температурой плавления $T_{ph} = 18^\circ\text{C}$.

На рис. 4 показана максимальная выходная мощность лазера в зависимости от толщины теплоотвода МФП. Можно видеть, что максимальная мощность остается постоянной, когда толщина достигает значения 6 см,

Экономический эффект при использовании окон из поликристаллического алмаза без центральной части

D, mm	Экономия материала, mm³			Финансовая экономия, \$		
	1:30	1:40	1:50	1:30	1:40	1:50
100	4 187	3 140	2 512	75 360	56 520	45 216
150	14 130	10 598	8 478	254 340	190 755	152 604
200	33 493	25 120	20 096	602 880	452 160	361 728
250	65 417	49 063	39 250	1 177 500	883 125	706 500
300	113 040	84 780	67 824	2 034 720	1 526 040	1 220 832

которое является оптимальной толщиной для описанных условий. Это значение использовалось для дальнейших расчетов.

На рис. 5 показана интенсивность луча на объекте, расположенном на расстоянии 5 km от лазера, при разных уровнях мощности для традиционно используемого сплошного окна, комбинированного окна без криоаккумулятора МФП, показанного на рис. 1, и окна с криоаккумулятором МФП, показанным на рис. 2. Величина 5 km определяется дальностью прямой видимости при нормальных метеоусловиях. Расчет проводился в приближении гауссова профиля луча в дальней зоне с использованием следующего соотношения для осевой интенсивности излучения на расстоянии L от окна [10]:

$$\frac{I_L}{I_0} = \frac{L^{-2}}{(F^{-1}(w_0) - L^{-1})^2 + z_R^{-2}}, \quad (14)$$

где F — фокусное расстояние, индуцированное выходным окном лазера, z_R — линия Релея, определяемая как

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (15)$$

Наличие экстремумов на рис. 5 объясняется тем, что при некотором оптимальном уровне мощности удаленный объект находится в фокусе линзы, индуцированной выходным окном лазера, т. е. $F = L$ и значение интенсивности излучения (14) достигает своего максимума. Также следует отметить, что зависимости для сплошного и составного окна без криоаккумулятора не различаются по своей форме, однако при $P = 130 \text{ kW}$ для окна сплошной конструкции достигается предел прочности, при этом составное окно без криоаккумулятора продолжает функционировать до уровня мощности $P = 300 \text{ kW}$.

Результаты численного моделирования показывают, что дополнительное охлаждение криоаккумулятором МФП позволяет увеличить максимальную выходную мощность со 130 kW для сплошного окна более чем в 3 раза до 440 kW. Максимальная интенсивность излучения на расстоянии 5 km увеличена с 460 до 650 W/cm².

В таблице приведен размер удешевления стоимости окон из расчета цены алмаза оптического качества 18\$/mm³ (стоимостью центральной части, а также герметизирующей прокладки пренебрегалось) для случаев использования окон различной толщины.

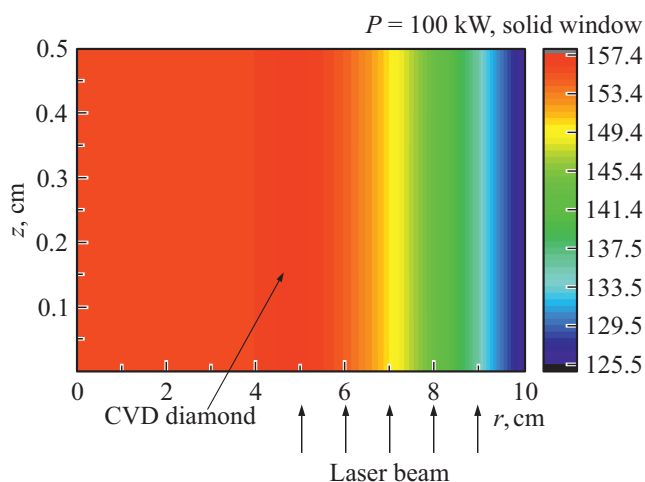


Рис. 6. Распределение температуры в сплошном окне $P = 100 \text{ kW}$, $t = 60 \text{ s}$.

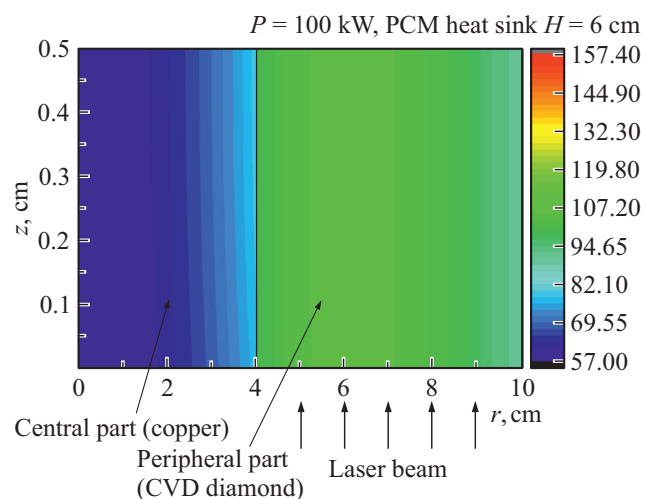


Рис. 7. Распределение температуры в комбинированном окне с радиатором МФП $P = 100 \text{ kW}$, $t = 60 \text{ s}$.

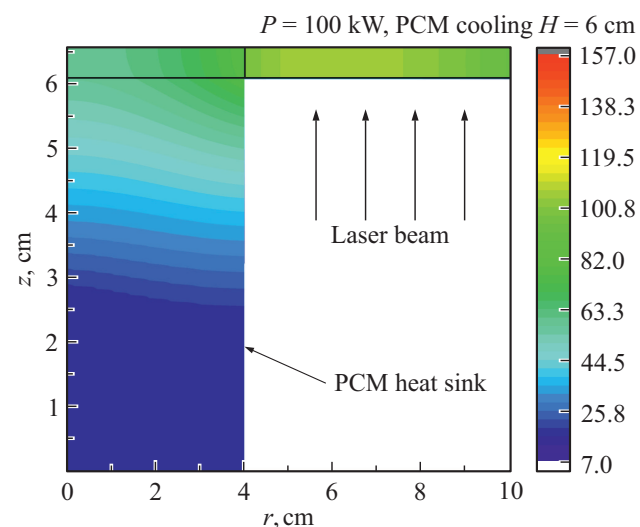


Рис. 8. Распределение температуры в комбинированном окне с радиатором МФП (полный вид).

На рис. 6–8 показано распределение температуры внутри сплошного окна и окна с криоаккумулятором МФП при мощности излучения лазера $P = 100 \text{ kW}$ после 60 с непрерывной работы.

Заключение

В рамках работы для лазера с неустойчивым резонатором было смоделировано поведение двухкомпонентного выходного окна с центральной непрозрачной областью, дополнительно охлаждаемой криоаккумулятором, при воздействии мультикиловаттного излучения с кольцевым профилем интенсивности. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения выходных окон двухкомпонентной конструкции с криоаккумулятором для увеличения прочности и снижения стоимости изготовления.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Witterman W.J. CO₂ Laser. Springer-Verlag. Berlin; Bumelman V. CO₂-лазер. М.: Мир, 1990. 360 с.
- [2] Шмаков В.А. Силовая оптика. М.: Наука, 2004. 318 с.
- [3] Аполлонов В.В. // Квант. электрон. 2014. Т. 44. № 2. С. 102 № 121; Apollonov V.V. // Quantum Electronics. 2014. V. 44. N 2. P. 102. doi 10.1070/QE2014v044n02ABEH015150
- [4] Карлов Н.В., Сисакян Е.В. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1980. Т. 44. № 8. С. 1631.
- [5] Роголин В.Е. // Известия вузов. Матер. Электрон. Техники. 2013. № 2. С. 11. doi http://dx.doi.org/10.17073/1609-3577-2013-2-11-18
- [6] Deutsch T.F. // J. Electronic Materials. 1975. V. 4. N 4. P. 663.
- [7] Ицкович С.А., Азуттов С.Н. Патент РФ. № 1823744. 1995.
- [8] Sparks M. // Proc. Symp. Laser Induced Damage in Optical Materials. Colorado: Boulder, 1972. P. 172.
- [9] Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И., Филин С.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 10. С. 1410. doi 10.7868/S0367676516100203; Rogozhin M.V., Rogalin V.E., Krinsky M.I., Filin S.A. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2016. V. 80. N 10. P. 1260. doi 10.3103/S1062873816100166
- [10] Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И. // Опт. и спектр. 2017. Т. 122. № 5. С. 873. doi 10.7868/S003040341705018X; Rogozhin M.V., Rogalin V.E., Krinsky M.I. // Opt. Spectrosc. 2017. V. 122. N 5. P. 843. doi 10.1134/S0030400X17050186
- [11] Douglas-Hamilton D., Hoad E.D., Seitz J.R.M. // J. Opt. Soc. Am. 1974. V. 64. N 1. P. 36.
- [12] Спицын Б.В., Дерягин Б.В. А.с. № 339134 (СССР). 1980.
- [13] Роголин В.Е., Аранчий С.М. Интеграл. 2012. № 5 (67). С. 7.
- [14] Granson V., Sumrain Sh., Daniel P., Villarreal Fr., Deile J. // Proc. SPIE. 2008. V. 6872. P. 687209.

- [15] Rogozhin M.V., Rogalin V.E., Krymsky M.I., Kaplunov I.A. // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2018. N 1. P. 34. doi 10.17804/2410-9908.2018.1.034-040
- [16] Rogalin V.E., Krymskii M.I., Krymskii K.M. // *Радиотехника и электроника*. 2018. Т. 63. № 11. С. 1188. doi 10.1134/S0033849418110098; Rogalin V.E., Krymskii M.I., Krymskii K.M. // *J. Communications Technology and Electronics*. 2018. V. 63. N 11. P. 1326. doi 10.1134/S1064226918110098
- [17] Dodson J.M., Brandon J.R., Dhillon H.K., Friel I., Geoghegan S.L., Mollart T.P., Scarsbrook G.A., Twitchen D.J., Whitehead A.J., Wilman J.J., Santini P., de Wit H. // *Proc. SPIE*. 2011. V. 8016. P. 80160L.
- [18] Anokin E., Muhr A., Bennett An., Twitchen D.J., de Wit H. // *Proc. SPIE LASE*, San Francisco, California, United States, 20 February 2015. V. 9346. P. 93460T. doi 10.1117/12.2079714
- [19] Pickles C.S.J., Coe S.E., Madgwick T.D., Sussmann R.S., Wort C.J.H., Lewis K.L. // *Proc. SPIE*. 2000. V. 3902. P. 204.
- [20] Померанчук И.Я. // *ЖЭТФ*. 1942. Т. 12. С. 245.
- [21] Kaminskii A.A., Hemley R.J., Lai J., Yan C.S., Mao H.K., Ralchenko V.G., Eichler H.J., Rhee H. // *Laser Phys. Lett.* 2007. V. 4. N 5. P. 350. doi 10.1002/lapl.200610127
- [22] Granson V., Sumrain S., Daniel P., Villarreal F., Deile J. // *Proc. SPIE*. 2008. V. 6872. P. 687209.
- [23] Малашко Я.И., Наумов М.Б. Системы формирования мощных лазерных пучков. Основы теории. Методы расчёта. Силовые зеркала. Монография. М.: Радиотехника, 2013. 328 с.
- [24] Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 207 с.
- [25] Николаев А.К., Костин С.А. Медь и жаропрочные медные сплавы. М.: ДПК Пресс, 2012. 715 с.
- [26] Каталог компании ООО „Электростекло“ [электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.elektrosteklo.ru/Catalog.htm>
- [27] Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
- [28] The Element Six CVD Diamond Handbook [электронный ресурс]. Режим доступа https://e6cvd.com/media/wysiwyg/pdf/E6_CVD_Diamond_Handbook_A_v10X.pdf
- [29] Лесюк Е.А. Исследование процессов в аккумуляторах холода с теплопроводящей насадкой и разработка расчетных методов их оптимизации. Автореф. канд. дис. М., 1999. 173 с.
- [30] Wirtz R.A., Zheng N., Chandra D. Thermal Management Using Dry Phase Change Materials, Proceedings, Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM), San Diego, Cal. USA. 1999. P. 74.
- [31] Fossett A.J., Maguire M.T., Kudirka A.A., Mills F.E., Brown D.A. // *J. Electronic Packaging*. 1998. V. 120. N 3. P. 238.
- [32] Rogozhin M.V., Rogalin V.E., Krymskii M.I. // *Стратегическая стабильность*. 2019. № 1 (86). С. 60.