

Антиотражающее покрытие элементов силовой алмазной оптики для CO₂-лазеров

П.А.Пивоваров, В.С.Павельев, В.А.Сойфер, К.В.Черепанов, В.И.Анисимов, В.В.Бутузов, В.Р.Сороченко, Н.В.Артюшкин, В.Е.Рогалин, Н.И.Щебетова, В.Г.Плотниченко, В.И.Конов

Разработана технология нанесения на алмазные подложки однослойного антиотражающего для излучения CO₂-лазеров с $\lambda = 10.6$ мкм покрытия из PbF₂. В качестве подложек использованы пластины из поликристаллического CVD алмаза. Коэффициент пропускания алмазных пластин с двухсторонним покрытием достигал 98.5%–99%. Измеренная лучевая стойкость таких пластин в нормальных условиях окружающей среды для импульсного ($\tau \sim 100$ нс) и непрерывного излучения CO₂-лазеров составила 250 и 4 МВт/см² соответственно. Эти значения сравнимы с порогами разрушения алмазных подложек. Обнаружено увеличение порога разрушения антиотражающего покрытия в непрерывном режиме воздействия до 5.5 МВт/см² при предварительном многократном облучении образцов менее интенсивным лазерным излучением. Этот эффект может быть объяснен удалением с поверхности пленки частиц и слоя адсорбата без ее разрушения (эффект лазерной очистки).

Ключевые слова: антиотражающее покрытие, лучевая стойкость, алмазная оптика, CO₂-лазер.

1. Введение

Для удовлетворения потребностей бурно развивающейся лазерной техники необходимо уменьшать массогабаритные размеры лазеров и других компонентов при одновременном увеличении мощности и снижении расходимости лазерного излучения. Для решения этих задач требуются новые оптические материалы со значительно улучшенными эксплуатационными свойствами. Одним из наиболее интересных с этой точки зрения материалов является синтетический алмаз, промышленные технологии получения которого активно развиваются с конца XX века.

П.А.Пивоваров, В.И. Конов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: p_pivovarov@hotmail.com

В.С.Павельев, В.А.Сойфер. Самарский университет, Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34; Институт систем обработки изображений РАН, Россия, 443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151

К.В.Черепанов. Самарский университет, Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт “Экран”», Россия, 443022 Самара, просп. Кирова, 24

В.И.Анисимов, В.В.Бутузов. Акционерное общество «Научно-исследовательский институт “Экран”», Россия, 443022 Самара, просп. Кирова, 24

В.Р.Сороченко. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Н.В.Артюшкин, Н.И.Щебетова. АО «Национальный центр лазерных систем и комплексов “Астрофизика”», Россия, 125424 Москва, Волоколамское ш., 95

В.Е.Рогалин. АО «Национальный центр лазерных систем и комплексов “Астрофизика”», Россия, 125424 Москва, Волоколамское ш., 95; Тверской государственный университет, Россия, 170100 Тверь, ул. Желябова, 33

В.Г.Плотниченко. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 12 октября 2018 г., после доработки – 19 октября 2018 г.

Алмаз обладает уникальными оптическими (диапазон прозрачности – от ближнего ультрафиолета до миллиметровых длин волн за исключением области фононного поглощения (2–6 мкм)) [1, 2] и теплофизическими (коэффициент теплопроводности свыше 20 Вт·см⁻¹·К⁻¹) [3] свойствами. Благодаря рекордной теплопроводности алмаз способен выдерживать значительно большие лучевые нагрузки, чем традиционно применяемые оптические материалы [4–9]. Эти факты в комбинации с современными возможностями синтеза методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) поликристаллических алмазных пластин больших размеров [10, 11] открывают новые перспективы использования алмаза как основного материала для элементов силовой оптики мощных лазеров – делительных пластин, выходных окон, линз и дифракционных оптических элементов (ДОО). В частности, это относится к CO₂-лазерам, являющимся наиболее мощными источниками импульсного и непрерывного излучения в среднем ИК диапазоне [9, 12, 13].

Однако большой показатель преломления алмаза приводит в нормальных условиях к значительным потерям энергии излучения на френелевское отражение (до ~30% на одном оптическом элементе). Использование микропрофилирования алмазной поверхности [14–16] или нанесение на нее антиотражающих (АО) тонких пленок [9, 17–20] позволяет уменьшить такие потери до единиц процентов. При этом данные подходы не лишены недостатков. Создание поверхностных антиотражающих микроструктур затруднительно для исходно профилированной алмазной поверхности, например для поверхности ДОО. В случае интерференционных АО покрытий для получения минимальных потерь на отражение обычно используют многослойные и многокомпонентные покрытия. В то же время хорошо известно, что их лучевая прочность заметно снижается с ростом толщины и числа слоев [21, 22]. Выбор состава пленки определяется показателем преломления материала просветляемого элемента (подложки) и ее оптическими характеристиками в рабочем диапазоне

длин волн лазерного излучения. При этом также необходимо учитывать адгезионные и теплофизические характеристики покрытия. Существенное отличие последних от характеристик материала подложки может привести к разрушению покрытия под действием тепловых полей при лазерном воздействии [20–22] или даже к усталостному разрушению покрытия под действием внутренних напряжений в процессе хранения.

Цель настоящей работы – создание однослойного АО покрытия для алмазных оптических элементов, подвергающихся воздействию высокоэнергетичного импульсного или непрерывного излучения CO₂-лазера с длиной волны 10.6 мкм, и исследование лучевой стойкости этого покрытия.

2. Технология нанесения и оптические свойства покрытия

Разработка архитектуры просветляющих покрытий, а также численное моделирование их спектральных характеристик проводилось с использованием программных пакетов OptiLayer (МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия) и MCalc Multilayer Calculation (Detlef Arhilger, Германия).

Нанесение покрытия проводилось методом электронно-лучевого напыления в высоком вакууме на установке SYRUSpro 710 (LEYBOLD OPTICS, Швейцария). Контроль роста пленки осуществлялся при помощи спектрофотометрической системы OMS-5000 (LEYBOLD OPTICS). Скорость напыления контролировалась кварцевой измерительной системой (INFICON, Швейцария). Для повышения качества наносимого покрытия и его адгезии перед напылением подложки прогревались, а затем подвергались обработке ионным пучком (ионная очистка аргоном).

Спектральные характеристики алмазной пластины с пленочным просветляющим покрытием контролировались ИК фурье-спектрометром Spectrum 100 Optica (Perkin Elmer, США). Измерение оптических констант (показателей преломления и поглощения) проводилось с использованием ИК эллипсометра IR-VASE (J.A.Woolam, США).

Для силовой лазерной оптики ИК диапазона ($\lambda \leq 8$ мкм) обычно используются покрытия на основе окислов [18, 19, 22]. В более длинноволновом диапазоне коэффициент поглощения окислов начинает заметно возрастать [23], что препятствует их применению в силовой оптике CO₂-лазеров. Покрытия на базе фторидов прозрачны в средней ИК области спектра (до 15 мкм) и имеют хорошие адгезионные свойства. Также такие покрытия обладают высокой климатической стойкостью и минимальными внутренними напряжениями на алмазной подложке, что особенно важно при их использовании в элементах силовой оптики.

В качестве пленкообразующего материала для АО покрытия был выбран фторид свинца (PbF₂), измеренный показатель преломления которого для излучения CO₂-лазера на $\lambda = 10.6$ мкм $n_{AR} = 1.55–1.56$ (при отсутствии заметного (измеримого) поглощения). Для покрытия из фторида свинца величина n_{AR} практически идеально удовлетворяет условию минимума потерь на отражение для однослойного четвертьволнового АО покрытия: $n_{AR} = \sqrt{n_d n}$, где $n_d = 2.4$ и $n = 1$ – показатели преломления алмазной пластины и окружающей среды (воздуха) соответственно. Рассчитанная зависимость коэффициента от-

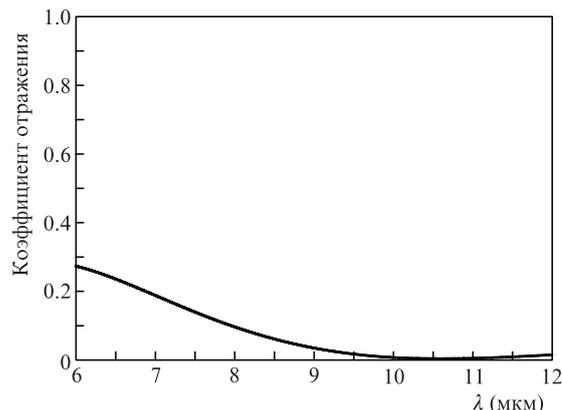


Рис.1. Расчетный спектр отражения однослойного АО покрытия, нанесенного на обе поверхности CVD-алмазной подложки.

ражения покрытия от длины волны в среднем ИК диапазоне с учетом дисперсии показателя преломления пленки и подложки приведена на рис.1.

На полированную пластину из поликристаллического алмаза диаметром 1 см и толщиной 600 мкм было нанесено четвертьволновое АО покрытие из PbF₂ (с двух сторон). Измеренные спектры пропускания пластины в среднем ИК диапазоне до и после нанесения пленки показаны на рис.2.

Из рис.2 видно, что коэффициент пропускания достигает максимального значения 98.5% как раз в области длин волн 10–11 мкм (спектр 2 на рис.2), соответствующей рабочей длине волны генерации CO₂-лазеров. Изменение длины волны как в более коротковолновую, так и в длинноволновую области среднего ИК диапазона приводит к заметному увеличению оптических потерь излучения. Измерения коэффициента пропускания с использованием излучения CO₂-лазера с фиксированной длиной волны 10.6 мкм при малых интенсивностях излучения, заведомо не повреждающих покрытия, дало еще более оптимистическое значение – 99% ± 0.5%. Таким образом, на $\lambda = 10.6$ мкм коэффициент пропускания алмазной пластины за счет нанесения однослойного АО покрытия удалось увеличить более чем на 30% (относительно исходного значения для алмазной пластины, равного 68.5%). При этом измеренные потери R на отражение от поверхностей пластины с АО покрытием не превысили 0.5%.

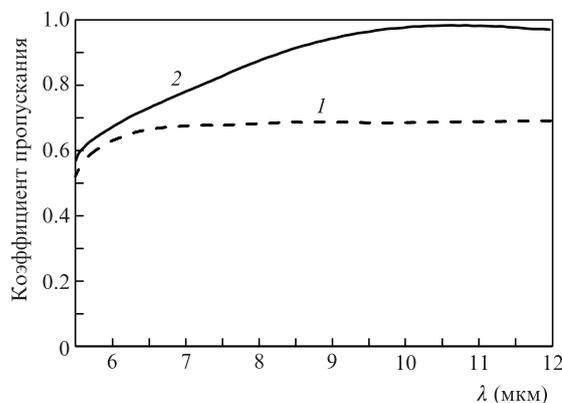


Рис.2. Спектры пропускания алмазной пластины до нанесения АО пленки (1) и с двухсторонним антиотражающим покрытием из PbF₂ (2).

3. Исследования лучевой стойкости АО покрытия

В экспериментах по изучению лучевой стойкости покрытия из PbF_2 на алмазной пластине использовались CO_2 -лазеры, работающие как в непрерывном, так и в импульсном режимах генерации. Импульсное воздействие осуществлялось тем же CO_2 -лазером, что и в работе [20], в которой изучалась стойкость многослойного широкополосного покрытия на алмазной пластине, подробно описанным в работе [24]. Лазерный импульс состоял из пика длительностью по полувысоте 85–90 нс и последующего плогого участка длительностью до 1 мкс. При этом в переднем пике содержалось $\sim 70\%$ энергии всего импульса.

В качестве источника непрерывного лазерного излучения был выбран технологический лазер ТЛ 2.5 (ООО «Лазерный технологический центр», Россия). Использование в лазере внутривибрационной диафрагмы для улучшения качества излучения позволило получить близкое к одномодовому излучение с выходной мощностью до 1100 Вт. Лазерная мощность измерялась калориметром, встроенным в схему лазера. Поскольку в процессе эксперимента алмазная пластина не охлаждалась, то во избежание термодинамических разрушений образца максимальное время воздействия лазерного пучка не превышало 1 с.

Методики регистрации параметров падающего на алмазную пластину и прошедшего через нее излучения CO_2 -лазера, а также проведения экспериментов по лазерному воздействию в целом повторяют описанные в работе [20].

Излучение фокусировалось на поверхность алмазного образца сферическими линзами из ZnSe с фокусными расстояниями 127 и 63.5 мм (импульсный режим воздействия) и из KCl с фокусным расстоянием 93 мм (воздействие непрерывного излучения). В первом случае размер перетяжки лазерного пучка по уровню $1/e^2$ в фокусе линзы составлял 400 и 200 мкм соответственно, что позволило получить предельные интенсивности излучения 150 и 600 $\text{МВт}/\text{см}^2$. В случае фокусировки непрерывного излучения (в пятно диаметром 160 мкм) максимальная интенсивность была равна 5.5 $\text{МВт}/\text{см}^2$.

Признаки повреждения покрытия регистрировались (как в процессе лазерного облучения, так и после его завершения) оптическими методами. В первом случае начало процесса разрушения фиксировалось по уменьшению коэффициента пропускания пластины и/или по изменению распределения интенсивности излучения в пятне пробного пучка непрерывного излучения He-Ne -лазера. Пробный пучок, прошедший через область воздействия излучения CO_2 -лазера, проецировался на экран так, что характерный размер лазерного пятна на нем составлял ~ 7 мм. Любое, даже малое по размеру, повреждение пленочного покрытия вызывало дифракцию излучения с $\lambda = 0.63$ мкм, приводящую к появлению в изначальном однородном пятне черной точки размером 0.5–1.0 мм, окруженной ярким ореолом. После окончания воздействия излучения CO_2 -лазера состояния АО покрытия и объема алмаза контролировались с помощью оптического микроскопа AxioTech Vario (Carl Zeiss, Германия). Измерялись также спектры оптического пропускания в среднем ИК диапазоне (5–14 мкм) облучаемой пластины. Спектральные характеристики контролировались как в областях, подвергавшихся интенсивному лазерному воздействию, так и вне их (исходная алмазная пластина с двух-

сторонним покрытием). Измерения ИК спектров в ходе исследований лучевой стойкости покрытия проводились с помощью вакуумного ИК фурье-спектрометра IFS-113v (Bruker, США) с микроскопом, позволяющим измерять спектры оптического пропускания при диаметре пучка зондирующего излучения на образце вплоть до 40 мкм, что соответствовало условиям нашего эксперимента.

4. Результаты экспериментальных исследований лучевой стойкости АО покрытия и их обсуждение

Импульсный режим. Первая серия экспериментов проводилась с линзой с $f = 127$ мм, которая ранее применялась в наших исследованиях лучевой стойкости широкополосного многослойного АО покрытия алмаза [20]. Установлено, что даже при максимально достижимых в этих условиях интенсивностях излучения CO_2 -лазера (до 150 $\text{МВт}/\text{см}^2$) каких-либо признаков повреждения пленки PbF_2 и алмаза не наблюдается. Дальнейшие исследования при этом режиме воздействия проводились с более короткофокусной линзой ($f = 63.5$ мм), позволяющей получать интенсивность излучения до 600 $\text{МВт}/\text{см}^2$.

При импульсном воздействии излучения CO_2 -лазера порог возникновения приповерхностной плазмы и изменения пространственного распределения интенсивности пробного излучения He-Ne -лазера были зафиксированы при $I_{\text{th}}^{\text{pulse}} = 250$ $\text{МВт}/\text{см}^2$. Однако на облучаемой поверхности имелись области, в которых при появлении свечения плазмы вблизи пятна фокусировки изменений в распределении интенсивности пробного излучения He-Ne -лазера не наблюдалось вплоть до 500–600 $\text{МВт}/\text{см}^2$. Контроль поверхности алмазной пластины с помощью оптического микроскопа при этом показал наличие заметного симметричного повреждения пленки PbF_2 как в случае регистрируемых изменений в пространственном распределении интенсивности пробного излучения при $I \approx I_{\text{th}}^{\text{pulse}}$ (рис.3,а), так и в случае их отсутствия в подобном распределении при $I \approx 600$ $\text{МВт}/\text{см}^2$.

Далее были проведены измерения коэффициента пропускания пластины с двухсторонним АО покрытием в зависимости от числа импульсов воздействующего излучения с интенсивностями, превышающими $I_{\text{th}}^{\text{pulse}}$. При однократном воздействии лазерного импульса с $I \approx 300$ $\text{МВт}/\text{см}^2$ происходит уменьшение коэффициента пропускания от исходного, равного $99\% \pm 0.5\%$, до $96\% \pm 0.5\%$. При увеличении числа импульсов воздействия с указанной интенсивностью никакого дополнительного изменения пропускания не наблюдалось. Также не было зафиксировано заметных изменений характера поврежде-

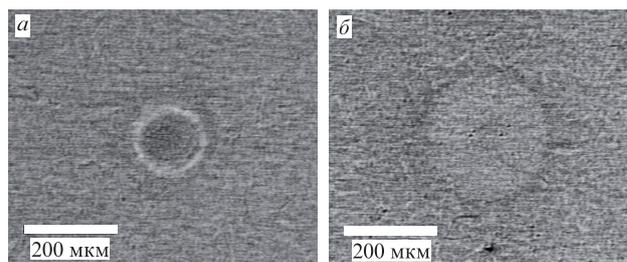


Рис.3. Микрофотографии областей повреждения антиотражающего покрытия после воздействия одного импульса CO_2 -лазера с $I = 300$ (а) и 550 $\text{МВт}/\text{см}^2$ (б).

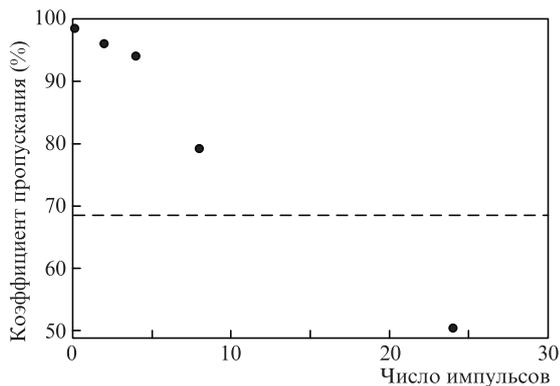


Рис.4. Зависимость коэффициента пропускания алмазной пластины с двухсторонним покрытием из RbF₂ от числа лазерных импульсов с $I \approx 600$ МВт/см². Штриховая линия соответствует коэффициенту пропускания алмазной пластины без АО покрытия.

дений покрытия с ростом числа импульсов воздействия в сравнении с представленными на рис.3,а. Заметные изменения были зафиксированы только при увеличении интенсивности лазерного излучения до максимально достижимого в нашем эксперименте значения 600 МВт/см². На рис.4 представлена зависимость коэффициента пропускания алмазной пластины с АО покрытием на обеих ее сторонах от числа импульсов лазерного воздействия при $I \approx 600$ МВт/см². Штриховая линия на рис.4 соответствует коэффициенту пропускания 68.5% неосветленной алмазной пластины.

При увеличении числа лазерных импульсов с выбранной интенсивностью до 24 наблюдались не только повреждения покрытия, но и повреждения в объеме алмаза, что приводило к уменьшению коэффициента пропускания ниже исходного уровня для чистой алмазной пластины, т. е. имел место эффект накопления повреждений в алмазе, иначе называемый оптической усталостью.

Воздействие непрерывным излучением. В процессе исследования лучевой прочности АО покрытия при работе с излучением непрерывного CO₂-лазера интенсивность облучения варьировалась от 100 кВт/см² до максимально достижимой в условиях нашего эксперимента (5.5 МВт/см²). Временной интервал τ , в течение которого осуществлялось лазерное воздействие, выбирался в диапазоне 0.6–1 с с помощью механического затвора, установленного на выходе CO₂-лазера. Состояние покрытия и объема алмаза контролировалось после каждого пуска с помощью оптического микроскопа. Постепенное увеличение интенсивности облучения показало, что при $I_{th}^{CW} = 4.2–4.4$ МВт/см² в 75% случаев наблюдалось повреждение АО покрытия алмазной пластины.

Микрофотография типичной области повреждения, полученная с помощью оптического микроскопа, представлена на рис.5. Обращает на себя внимание несимметричность зоны разрушения пленки, в отличие от случая импульсного воздействия. Исходное пространственное распределение интенсивности лазерного излучения в пятне фокусировки было, как и в случае с импульсным воздействием, симметричным относительно оси пучка и близким к гауссову. Темное пятно, смещенное на рис.5 выше центра пятна облучения (характерный размер области повреждения 160 мкм), отвечает области максимального повреждения поверхности пленки. Полагаем, что данная несимметричность связана с тем, что эпицентрами начала разрушения покрытия могут служить неоднородности самой пленки, дефекты исходной поверхности алмаза, а также осевшие из воздуха частицы пыли и слой поверхностного адсорбата [25].

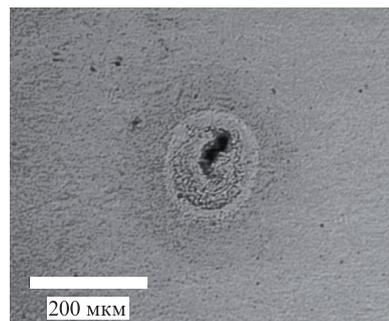


Рис.5. Микрофотография области повреждения АО покрытия при воздействии излучения непрерывного CO₂-лазера с $\lambda = 10.6$ мкм при $I = 4.5$ МВт/см² и $\tau = 0.6$ с.

Экспериментально нами обнаружено достаточно заметное влияние поверхностного адсорбата (по-видимому, смесь воды и частиц) на процесс разрушения АО покрытия под действием непрерывного лазерного излучения. Тестируемый образец сдвигался из фокальной плоскости навстречу лазерному пучку, к линзе. Постепенно, путем передвижения образца в обратном направлении, характерный размер пятна облучения на поверхности алмазной пластины варьировался от 1 мм до исходных 160 мкм. Плавно изменяя мощность излучения и размер пятна, мы смогли достичь предельной для наших экспериментов интенсивности 5.5 МВт/см². При этом признаков повреждения АО покрытия и объема алмазной пластины обнаружено не было. Этот эффект мы связываем с лазерной очисткой поверхности пленки [25] в допороговом режиме.

На рис.6 показаны спектры пропускания областей алмазной пластины с АО покрытием, в которых наблюдалось повреждение просветляющей пленки (спектры 2 и 3), и спектр области, предварительно обработанной методом лазерной очистки, после воздействия излучения с $I = 5.5$ МВт/см² (спектр 4). Для сравнения на рис.6 также показан спектр исходной просветленной пластины (спектр 1). Спектр 2 на рис.6 соответствует области повреждения АО покрытия, показанной на рис.5. Из рис.6 видно, что повреждение пленки приводит к заметным потерям излучения на рабочей длине волны 10.6 мкм (спектры 2 и 3), а

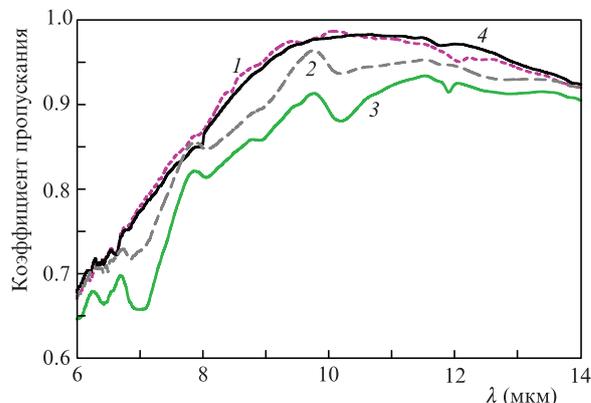


Рис.6. Спектры пропускания алмазной пластины с АО покрытием: 1 – до воздействия излучения непрерывного CO₂-лазера, 2 и 3 – для поврежденных областей пленки после воздействия с $I = 4.4$ ($\tau = 0.8$ с) и 4.5 МВт/см² ($\tau = 0.6$ с) соответственно, 4 – после процедуры лазерной очистки и последующего облучения с $I = 5.5$ МВт/см² ($\tau = 1$ с).

лазерная очистка и последующее лазерное воздействие с $I > I_{\text{th}}^{\text{CW}}$ не изменяют спектральных характеристик АО покрытия (спектр 4). В связи с этим возможной причиной различия спектров 2 и 3 на рис.6 для зон повреждения, полученных в близких экспериментальных условиях, является наличие поверхностного адсорбата и частиц на исходной необлученной поверхности. Уменьшение коэффициента пропускания ниже уровня, характерного для поликристаллического алмаза без АО покрытия (горизонтальная штриховая линия) в случае $I = 4.5 \text{ МВт/см}^2$ (спектр 3), объясняется, вероятнее всего, рассеянием и поглощением излучения как на дефектах разрушенной пленки PbF_2 , так и на возможных дефектах в алмазной подложке.

Наши оценки температуры покрытия T в центре пятна облучения на поверхности пластины, исходя из решения уравнения теплопроводности [26] (без учета нелинейного поглощения), показали, что наибольшие изменения температуры достигаются, если предположить, что все наблюдаемые в эксперименте потери излучения ($\sim 0.1\%$), с учетом отражения $R \leq 0.5\%$, в просветленном элементе определяются оптическим поглощением покрытия толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$. При этом реализуется модель поверхностного источника тепла с преимущественным теплоотводом в алмазную подложку (коэффициент теплопроводности алмаза $k_d \geq 20 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ значительно превышает коэффициент для PbF_2 ($k = 0.014 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ [27])). Такое предположение дает максимальное изменение температуры $\Delta T \leq 100 \text{ К}$ как при импульсном, так и при непрерывном лазерном воздействии, что намного ниже температуры плавления PbF_2 ($T \approx 1100 \text{ К}$). Таким образом, лазерный нагрев в наших условиях не может привести к разрушению покрытия. По-видимому, определяющую роль в реальных процессах поглощения энергии лазерного излучения и теплоотвода из области воздействия должны играть дефекты самой алмазной пластины или локальное отслоение и неоднородности покрытия [28], а также поверхностный водный адсорбат и частицы из окружающего алмазный элемент воздуха [25]. Такое объяснение также допускает зафиксированный в наших экспериментах разброс по порогу разрушения при импульсном воздействии (см. рис.3).

Экспериментально полученные пороги разрушения однослойного АО покрытия сравнимы с порогами разрушения поликристаллического алмаза [6–9, 14] и значительно превышают порог разрушения многослойного покрытия для диапазона длин волн 8–12 мкм [20], в состав которого также входит PbF_2 , при импульсном воздействии излучения CO_2 -лазера (с $I = 50 \text{ МВт/см}^2$ до $I \geq 250 \text{ МВт/см}^2$). В случае непрерывного воздействия также наблюдается увеличение лучевой стойкости однослойной пленки, но менее выраженное (с $I \geq 3 \text{ МВт/см}^2$ до $I = 4\text{--}5.5 \text{ МВт/см}^2$ соответственно). Мы связываем это с заметным увеличением размера пятна облучения в настоящих исследованиях лучевой стойкости при непрерывном воздействии (с 35 до 160 мкм), что сказывается на процессах поглощения и теплоотвода из области лазерного воздействия, определяемых дефектами алмазного образца с АО покрытием.

5. Заключение

Нами продемонстрирована большая перспективность использования однослойных четвертьволновых пленок из PbF_2 в качестве АО покрытий для алмазной оптики

мощных CO_2 -лазеров как в импульсном, так и в непрерывных режимах облучения. Пороговые интенсивности разрушения таких просветляющих пленок оказались сравнимыми с лучевой стойкостью собственно алмазных пластин [6–9, 14], а также не уступают порогам лазерного разрушения субволновых поверхностных структур [15], обладая при этом целым рядом преимуществ (простота технологий изготовления, возможность использования на неплоских поверхностях оптических элементов и др.).

Исследования лучевой стойкости АО покрытия выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-22-00243), разработка технологии АО покрытия частично финансировалась Минобрнауки РФ (проект № 16.7894.2017/6.7).

- Zaitsev A. *Optical Properties of Diamond* (Berlin, Heidelberg: Springer, 2001)
- Sussmann R.S., Brandon J.R., Scarsbrook G.A., Sweeney C.G., et al. *Diam. Rel. Mater.*, **3**, 303 (1994).
- Nazare M.H. *Properties, Growth and Applications of Diamond* (Liverpool: Inspec, 2001).
- Роголин В.Е. *Изв. вузов. Сер. Матер. электрон. техники*, № 2, 11 (2013).
- Sussmann R.S., Scarsbrook G.A., Wort C.J.H., Wood R.M. *Diam. Rel. Mater.*, **3**, 1173 (1994).
- Pickles C.S.J., Madgwick T.D., Sussmann R.S., Wort C.J.H. *Diam. Rel. Mater.*, **9**, 916 (2000).
- Rogalin V.E., Ashkenazi E.E., Popovich A.F., Ral'chenko V.G., Konov V.I., Aranchii S.M., Ruzin M.V., Uspenskii S.A. *Rus. Microelectron.*, **41** (8), 464 (2012).
- Rogalin V.E., Ashkinazi E.E., Popovich A.F., Ral'chenko V.G., Konov V.I., Aranchii S.M., Ruzin M.V., Rogozhin M.V. *Phys. Wave Phenom.*, **26** (2), 75 (2018).
- Massart M., Union P., Scarsbrook G. A., Sussmann R.S., Muys P. *Proc. SPIE*, **2714**, 177 (1996).
- Конов В.И. (ред.) *Углеродная фотоника* (М: Наука, 2017).
- Хмельницкий Р.А. *УФН*, **185**, 143 (2015).
- Godfried H.P., Coe S.E., Hall C.E., Pickles Ch.S., Sussmann R.S., Tang X., van der Voorden W.K.L. *Proc. SPIE*, **3889**, 553 (2000).
- Кононенко В.В., Конов В.И., Пименов С.М., Прохоров А.М., Павельев В.С., Сойфер В.А. *Квантовая электроника*, **26** (1), 9 (1999) [*Quantum Electron.*, **29** (1), 9 (1999)].
- Kononenko T.V., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Garnov S.V., Tishchenko A.V., Prokhorov A.M., Khomich A.V. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Proc.*, **68** (1), 99 (1999).
- Muhr A., Mulligan G. *Photon. Spectra*, **50** (3), 46 (2016).
- Гололобов В.М., Кононенко В.В., Конов В.И. *Квантовая электроника*, **46** (12), 1154 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (12), 1154 (2016)].
- Mollart T.P., Lewis K.L. *Diam. Rel. Mater.*, **10** (3–7), 536 (2001).
- Klemm K.A., Patterson H.S., Johnson L.F., Moran M.B. *Proc. SPIE*, **2286**, 347 (1994).
- Lu F.X., Guo H.B., Guo S.B., He Q., Li C.M., Tang W.Z., Chen G.C. *Diam. Rel. Mater.*, **18** (2), 244 (2009).
- Komlenok M.S., Pivovarov P.A., Volodkin B.O., Pavelyev V.S., Anisimov V.I., et al. *Phys. Lett.*, **15** (3), 036001 (2018).
- Song Z., Cheng X., Ma H., et al. *Appl. Opt.*, **56** (4), 188 (2017).
- Свечников М.Б. *Лучевая прочность диэлектрических покрытий в диапазоне длин волн 0.25–100–1.0 мкм* (С.Пб.: ВНИЦОИИМ.С.И. Вавилова, 1992).
- Traylor Kruschwitz, J.D., Pawlewicz, W.T. *Appl. Opt.*, **36** (10), 2157 (1997).
- Сороченко В.Р. *Квантовая электроника*, **47** (1), 20 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (1), 20 (2017)].
- Ковалёв В.И., Файзуллоев Ф.С. *Квантовая электроника*, **4** (3), 587 (1977) [*Quantum Electron.*, **4** (3), 587 (1977)].
- Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Под ред. В.И. Конова. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика* (М.: Физматлит, 2008).
- Popov P.A., Sidorov A.A., Kul'chenkov E.A., Anishchenko A.M., Avetissov I.Ch., Sorokin N.I., Fedorov P.P. *Ionics*, **23**, 233 (2017).
- Артемьев А.А., Бонч-Бруевич А.М., Свечников М.Б. *ЖТФ*, **48** (12), 2566 (1978).