

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОХОДНОЙ ОПТИКИ МОЩНЫХ ИК-ЛАЗЕРОВ

**Блистанов А. А., Васильева Л. А., Петраков В. С.,
Казанцев С. Г., Кугаснко О. М.**

Московский институт стали и сплавов, Москва,
crystalXXI@misis.ru

Волгоградская государственная архитектурно-строительная академия,
postmaster@vgasa.ru

Проблема создания надежной и долговечной проходной оптики для широкоапертурных лазерных систем среднего ИК-диапазона — лазерных окон, призм, клиньев и других элементов оптических схем потребовала решения ряда тесно взаимосвязанных задач: исследования физики взаимодействия мощного лазерного излучения с материалами силовой ИК-оптики; выяснения механизмов разрушения материалов лазерным излучением при различных режимах облучения; исследования влияния характеристик излучения, свойств материала, технологии его получения и оптической обработки на прочность к лазерному воздействию; определения влияния особенностей конструкции узлов проходной лазерной оптики на лазерную прочность и долговечность оптических элементов.

Экспериментальные работы проводили с использованием наиболее перспективных из применявшихся для изготовления элементов силовой ИК-оптики материалов — ионных (KCl, NaCl, BaF₂, KRS-5) и полупроводниковых (ZnSe, Ge, CdTe) монокристаллов промышленного качества [1, 2]

Установлено [3–5], что под действием непрерывного излучения с интенсивностью $q \sim 0,3 \div 3,0$ кВт см⁻² и квазинепрерывного с плотностью энергии $W \sim 0,2 \div 2,7$ кДж см⁻² и длительностью импульса излучения $\tau \sim 0,01 \div 1,0$ с, происходит постепенное накопление внутренних напряжений, достигающих в щелочно-галлоидных кристаллах величины $\sim 260\text{--}420$ Н см⁻². Это вызывает раскалывание монокристаллов KCl, NaCl, KRS-5 и Ge по плоскостям спайности, а BaF₂, CdTe, ZnSe по границам блоков.

Воздействие короткоимпульсного излучения сопровождается образованием плазмы оптического пробоя, при этом по мере увеличения интенсивности излучения вначале возникают повреждения на поверхности, а затем — в объеме кристаллов. Повреждения поверхности представляют собой сетку трещин глубиной 0,1–1,0 мм и протяженностью 1–100 мм, у полупроводниковых кристаллов возникают также кратеры и каверны размером до 1–3 мм и глубиной до 0,05–0,3 мм. Ориентировка трещин определяется структурой и симметрией кристалла. Значения плотности энергии, при которых возникают повреждения поверхности в различных монокристаллах под действием излучения с $\tau \sim 1$ мкс в 1,5–2 раза ниже, чем в объеме. Повреждения объема являются локальными концентраторами внутренних напряжений и представляют собой в ионных кристаллах сферические полости диаметром 5–60 мкм, а в полупроводниковых — полости до 100 мкм, имеющие огранку, а также каверны произвольной формы, достигающие размеров $\sim 0,01\text{--}3,0$ мм [6–8]. При облучении импульсами с $\tau \sim 1$ мкс и $W \geq 10 \div 12$ Дж · см⁻² в ШГК обнаружено окрашивание стенок трещин, окружающих сферические поры, образующиеся в области пробоя. Методами оптической спектроскопии установлено, что центры окраски являются F-, R₁-, R₂-, M-центрами и коллоидными частицами металла.

При многократном облучении импульсами допороговой интенсивности в ШГК наблюдается явление лазерного старения, проявляющееся в последовательном накоплении лазерного повреждения от импульса к импульсу, что приводит к разрушению по-

сле определенного количества импульсов облучения N . О накоплении повреждений свидетельствуют нелинейный рост акустического отклика из области взаимодействия от интенсивности лазерного излучения при допороговом воздействии и гистерезисный характер этой зависимости [9–11]. Характер экспериментальной зависимости напряженности электрического поля световой волны E от времени облучения до разрушения $t = N\tau$ (где N – число импульсов, которое образец выдерживает до разрушения) аппроксимируется выражением $E \sim t^{-0,125}$.

Зависимость получена на образцах хлористого калия при облучении импульсами лазера на итрий-алюминиевом гранате с неодимом (длина волны $\lambda = 1,06$ мкм) в импульсно-периодическом режиме облучения с частотой следования 12,5 Гц импульсов длительностью $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с. При интенсивности лазерного излучения $I < 0,4I_{\text{пор}}$, (где $I_{\text{пор}}$ – порог лазерного повреждения, т. е. интенсивность разрушения одним импульсом с вероятностью 0,5) наблюдается устойчивость к многократному лазерному облучению, а следовательно, разрушить образец не удастся. При минимальном значении интенсивности лазерного излучения $0,4I_{\text{пор}}$ образец хлористого калия выдерживает 10^3 импульсов до разрушения.

Для выяснения природы наблюдаемого эффекта проведены ЭПР-спектроскопические исследования продуктов фотохимических реакций, проходящих в ЦГК под действием импульсного излучения ближнего ИК-диапазона допороговой интенсивности. Установлено, что в ЦГК в результате фотохимического взаимодействия в областях, где находятся скопления инородных микровключений, образуются τ - и F_n -центры окраски с последующей коагуляцией их в коллоиды щелочного металла размером, (оцененным из ширины и формы линии в ЭПР-спектрах), 10–50 нм. Причем в легированных щелочноземельными примесями Sr, Ca, Ba образцах размеры коллоидных частиц, формирующихся в результате облучения, примерно на порядок превышают размеры коллоидного калия, возникающего в чистых образцах.

Результаты экспериментов по исследованию накопления лазерного повреждения в ЦГК объясняются протеканием фотохимических реакций под действием лазерного излучения с образованием и накоплением структурных дефектов, в частности F-центров, с последующей коагуляцией их в коллоиды. Щелочноземельная примесь оказывает катализирующее влияние на эти процессы.

Методами высокоскоростной фоторегистрации и спектроскопии временных, пространственных и спектральных характеристик плазменных образований, возникающих при оптическом пробое вблизи поверхности оптических элементов, установлены основные закономерности появления и развития оптического пробоя и предложен механизм повреждения поверхности, разграничение на этапы в котором определяется характеристиками факторов, воздействующих на поверхность оптического элемента [12, 13].

Повреждение объема непрерывным лазерным излучением носит термомеханический характер, что подтверждено экспериментальными и теоретическими исследованиями пороговых условий разрушения ЦГК. Разработан критерий, связывающий параметры лазерного излучения, характеристики материала и конструкционные особенности оптического узла. Проведенные испытания по наработке на отказ лазерных окон из ЦГК, подвергнутых различным видам оптической и химико-механической обработки, показали высокую корреляцию полученных данных с результатами расчетов и анализа тепловых, упругих и упругопластических полей (нестационарных и стационарных) для лазерных окон из монокристаллов KCl при различных условиях облучения: сфокусированный и широкоапертурный пучок при различных соотношениях облученной и полной апертуры окна; без охлаждения и с принудительным (периферийным и поверхностным) охлаждением; при свободном и жестком креплении оптического элемента.

Полученные экспериментальные данные позволили разработать ряд технологических и конструктивных способов повышения лазерной прочности материалов силовой ИК-оптики: химико- и термомеханическую обработку кристаллов, термический и лазерный отжиг ЦГК, лазерную очистку поверхности оптических элементов, сегментирование проходных оптических узлов [14—16].

Разработанный химико-механический способ обработки поверхности ЦГК основан на растворении нарушенного приповерхностного слоя. Для этого технологические операции грубой шлифовки кристаллов с применением крупнозернистых шлифовальных порошков заменяются безабразивной шлифовкой в спирто-водяной суспензии с последующей доводкой на мелкозернистых пастах и порошках и финишным травлением в концентрированной соляной кислоте. Такая обработка поверхности позволяет удалить нарушенный трещиноватый слой с повышенной плотностью дислокаций и, тем самым, приблизить прочность поверхностного слоя к объему. Испытания при воздействии непрерывного излучения показали, что значительно более высокую лазерную стойкость имели кристаллы, обработанные по предложенной технологии, чем по традиционной технологии.

Разработан способ высокотемпературного отжига облученных непрерывным лазерным излучением оптических элементов для снятия внутренних напряжений в ЦГК. Оптический элемент, в котором величина внутренних напряжений достигает критической величины, нагревается в печи до температуры 600–650 °С, выдерживается при этой температуре в течение 5–6 ч и затем охлаждается. Скорость нагрева и охлаждения не должна превышать 30–50 К·ч⁻¹. Полный цикл термической обработки достигает 90–150 ч. Лазерное облучение ЦГК с последующей термообработкой приводит к протекающему процессу полигонизации и получению мелкозернистой структуры с повышенными механическими характеристиками. Высокотемпературный отжиг оптических элементов из ЦГК позволяет продлить срок их службы в 4–5 раз, а также повысить их лазерную стойкость.

Развитием этого метода стала разработка способа обработки ЦГК излучением непрерывного СО₂-лазера. За счет ступенчатого увеличения выходной мощности лазера до номинальной и постепенного прогрева оптического элемента лазерным излучением на каждом этапе, исключался риск раскаливания в момент подачи лазерного излучения, а в результате нагрева элемента лазерным излучением до 80–120 °С в кристалле легче достигалось полигонизованное состояние с повышенными механическими характеристиками. Рабочий ресурс оптических элементов удалось увеличить с 2 до 48 ч.

Для повышения стойкости оптических элементов к лазерному воздействию за счет повышения механических характеристик материала был разработан метод термомеханической обработки монокристаллов KCl и NaCl, позволяющий проводить деформационное упрочнение монокристаллических заготовок на деформационной машине жесткого типа путем одноосного однократного сжатия монокристаллических пластин вдоль направления <001> при температурах $T = 20 \div 400$ °С до степени деформации $\epsilon = 3 \div 80$ %, а также двух- и трехкратного сжатия по направлениям <100>, <010> и <001> при $T = 300 \div 400$ °С до $\epsilon = 10 \div 40$ %. Скорость деформации составляла 0,07–0,2 мм/мин.

Наиболее предпочтительным и технологичным режимом обработки является одноосная однократная деформация вдоль направления типа <100> до $\epsilon = 15 \div 20$ % при $T = 200 \div 300$ °С. При этом в кристаллах формируется мелкозернистая структура полигонизации с характерным размером зерен ~ 2–10 мкм [17–19]. Оптические элементы, изготовленные из упрочненных кристаллов, имеют в 1,5–5 раз более высокую лазерную стойкость, в 2–10 раз более продолжительный рабочий ресурс и могут эксплуатироваться в лазерных оптических трактах при различных режимах облучения (импульсном, импульсно-периодическом и непрерывном) без замены их при смене режима облучения.

Повысить лазерную стойкость оптических элементов можно путем обработки их импульсами широкоапертурного лазерного излучения допороговой интенсивности, позволяющей провести «лазерную очистку» поверхности. Этот метод имеет ряд важных преимуществ. Экспериментально установлено, что многократное воздействие одиночных импульсов CO_2 -лазера длительностью 1 мкс с плотностью энергии $W \leq 2+3 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ приводит к увеличению порога повреждения поверхности оптических элементов и снижению вероятности повреждения при допороговых интенсивностях лазерного излучения. Этот эффект сохраняется в течение 1–3 ч после облучения и наиболее выражен при интервале между импульсами не более 15–20 мин. Лазерная обработка оптических элементов по специально подобранному режиму позволяет повысить порог оптического повреждения поверхности при импульсном облучении до 6–8 Дж · см⁻², а срок службы при непрерывном облучении – в 3–5 раз.

Список литературы

1. Карась В. Р. Перспективные материалы для окон CO_2 -лазеров. Обзорная информация. - М.: НИИГЭХИМ и ВНИИМонокристаллов, 1978. - 54 с. (Сер. Монокристаллы).
2. Карлов Н. В., Сисакян Е. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44. № 8. С. 1631—1638.
3. Лапинер Х. З. Моделирование условий разрушения кристаллических окон CO_2 -лазеров и разработка методов повышения их оптической стойкости. канд. физ.-мат. н. - М.: МИСиС, 1987. - 236 с.
4. Блистанов А. А., Волошинская Н. М., Глотов Е. П. и др. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 12. С. 2389—2396.
5. Глотов Е. П., Головин М. И., Губайдуллина Х. З. и др. // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. «Оптика лазеров». - Л.: ГОИ, 1984. - С. 282.
6. Бломберген Н. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 4. С. 786—805.
7. Роголин В. Е., Самойлова Т. И., Тищенко Н. А., Шаскольская М. П. // ФТТ. 1980. Т. 22. № 12. С. 3549—3554.
8. Роголин В. Е., Самойлова Т. И., Шаскольская М. П. // Кристаллография. 1980. Т. 25. № 5. С. 1097—1098.
9. Блистанов А. А., Васильева Л. А., Горн И. А. и др. Лазерное старение кристаллов хлористого калия / МИСиС. - М, 1987. - 19 с. - Деп. в ВИНТИ 28.05.87, № 6474 - В87.
10. Блистанов А. А., Кугаенко О. М., Васильева Л. А. // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. 1998. № 2. С. 39—43.
11. Блистанов А. А., Кугаенко О. М., Васильева Л. А. и др. // Тез. док. VI Всесоюз. конф. по физике диэлектриков. - Томск, 1988.
12. Блистанов А. А., Кугаенко О. М., Ульянов В. А. и др. // Тез. докл. VI Всесоюзной конференции по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом. - Вильнюс: ГОИ, 1984. - С. 237.
13. Блистанов А. А., Казанцев С. Г., Кугаенко О. М. и др. Способ обработки оптических элементов на основе щелочно-галогенных кристаллов. А. с. 285889 СССР, МКИ² С 30 В 33/00, 29112. - № 3192798; Заявлено 22.02.88 - 14 с.
14. Блистанов А. А., Кугаенко О. М., Петраков В. С., Казанцев С. Г. // Тез. докл. научно-технич. конф. «Технология производства и обработки оптического стекла и материалов». - М.: ВНИЦ ГОИ, 2000.
15. Казанцев С. Г. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 3. С. 269—270.
16. Блистанов А. А., Казанцев С. Г., Кугаенко О. М. // Квантовая электроника. Приложение. 1992. № 43. С. 26—30.
17. Казанцев С. Г., Блистанов А. А., Кугаенко О. М., Петраков В. С. // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 4. С. 689—693.
18. Блистанов А. А., Кугаенко О. М., Сагалова Т. Б. и др. // Тез. докл. IX Междунар. конф. «Физика диэлектриков-2000». - СПб.: РГПУ, 2000. - Т. П. С. 107—108.
19. Блистанов А. А., Кугаенко О. М., Петраков В. С., Казанцев С. Г. // Тез. докл. научно-технич. конф. «Технология производства и обработки оптического стекла и материалов». - М.: ГОИ, 2000.