

УДК 531.21

ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НЕОДНОРОДНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ПРОЗРАЧНЫХ И НЕПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

© И.В. Ушаков

Ключевые слова: селективная обработка; лазерная обработка; эксплуатационные характеристики; дефекты.
Рассмотрена технология оптимизации эксплуатационных характеристик материала за счет селективной лазерной обработки дефектных областей. Показана возможность лазерного излучения селективно воздействовать на дефектные области. Обсуждены особенности улучшения интегральных эксплуатационных характеристик материала за счет воздействия на локальные дефектные области.

Основной задачей селективной лазерной обработки является инициирование на дефектных областях последовательности процессов, приводящих к переводу обрабатываемой области в «неопасное» для образца состояние, с одновременной минимизацией воздействия на бездефектный материал. Необходимым условием достижения поставленной цели является проведение нескольких (нескольких десятков) циклов обработки с одновременным контролем обрабатываемого образца и соответствующей коррекцией параметров воздействия для достижения оптимальной обработки и высокой локализации эффекта воздействия излучения. Применение селективной лазерной обработки обеспечивает оптимизацию эксплуатационных характеристик материалов, характеризующихся различными механическими, оптическими и другими свойствами, а также различным структурным состоянием, что свидетельствует о перспективах предложенного метода обработки твердых материалов [1–3].

К настоящему времени известно много твердых материалов, в которых существуют нано- и микромаштабные области, определяющие их оптические и механические свойства [1, 3–7]. К таким материалам относятся элементы лазерной оптики, оптическая прочность и механическая целостность которых лимитируется неоднородными областями с микро- и наноразмерами, а также аморфно-нанокристаллические материалы. Известно много различных методов обработки, позволяющих оптимизировать комплекс физических характеристик материала. Однако управлять свойствами материала, оптимизировать его характеристики нужно не столько путем воздействия на весь материал в целом, сколько воздействуя на локальные дефектные области. Лазерное излучение позволяет избирательно воздействовать на дефектные области, не затрагивая окружающий материал и не меняя его свойства [1, 8–10]. Особенностью избирательной лазерной обработки дефектных областей в непрозрачных материалах является инициирование последовательности процессов, зависящих от интенсивности и длительности воздействия лазерного излучения, результатом которых является преимущественная обработка неоднородных областей. Для непрозрачных материалов избирательная ла-

зерная обработка может быть эффективной в том случае, если размер образцов достаточно мал хотя бы в одном направлении, т. к. для тонких поверхностных слоев непрозрачного материала возможно подобрать режимы лазерной обработки, селективно воздействующие на неоднородные области. К настоящему времени известно много материалов, в которых дефектные области с нано- и микроразмерами оказывают существенное влияние на их эксплуатационные характеристики. В основе селективного управления состоянием дефектных нанообластей в различных материалах лежит возможность подбора параметров лазерной обработки. Таким образом, целью данной работы является уточнение закономерностей селективной лазерной обработки материалов и определение требований к режимам лазерной обработки, позволяющим оптимизировать комплекс эксплуатационных характеристик материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводили на монокристаллах NaCl и LiF, количество примесей в которых составляло от 10^{-2} вес.% (легированы легированные Cr^{3+}) до 10^{-6} вес.% (неконтролируемые примеси). Из крупных монокристаллов по плоскости спайности выкалывали кристаллы размером $15 \times 30 \times 8$ мм. Затем каждый образец раскалывали на две равные части $15 \times 15 \times 8$ мм. На одном образце (контрольный образец) определяли порог оптического пробоя, другой образец подвергали предварительной лазерной обработке, после чего также определяли порог оптического пробоя. Для образцов каждой серии экспериментально определяли порог оптического пробоя. В качестве величины плотности мощности излучения, соответствующей оптическому пробоя, принимали величину, при которой вероятность оптического пробоя равна 0,5 [10]. Для контроля дислокационной структуры образцы подвергали травлению по методике, указанной в [11].

Лазерную обработку материала проводили с использованием следующих оптических квантовых генераторов: 1) ОКГ ELS-01, $\nu_{\text{имп}}$ до 50 Гц, $\lambda = 1064$ нм, $E_{\text{имп}}$ 50–100 мДж, $\tau \approx 15$ –20 нс; 2) ОКГ ELS-03, $\nu_{\text{имп}}$ до

100 Гц, $\lambda = 532$ нм, $E_{\text{имп}} \approx 15$ до 20 мДж, $\tau \approx 15\text{--}20$ нс;
 3) ОКГ «Квант-15» $\lambda = 1,064$ мкм, $E_{\text{имп}} 8\text{--}15$ Дж, $\nu_{\text{имп}}$ до 10 Гц, $\tau \approx 1\text{--}5$ мс.

Был предложен следующий алгоритм проведения избирательной лазерной обработки материала: после мощного лазерного импульса (энергия первого импульса $E_1 = 0,1E_{\text{пор.}}$) образец подвергали воздействию импульсного лазерного излучения (частота следования импульсов от 1 до 100 Гц) при одновременной постоянной подсветке. Длительность лазерных импульсов от 1 до 4 мс. Энергию импульсов увеличивали от 0,01 до 0,5 E_1 . В следующем цикле увеличивали энергию импульса E_1 . Осуществляли от 10 до 30 полных циклов обработки. Основной целью селективной лазерной обработки является перевод оптически неоднородных областей в неопасное для используемого лазерного излучения состояние. Для достижения указанной цели инициируются процессы мягкого разрушения поглощающих включений, рассеяния поглощающих примесей, релаксации механических напряжений и заживления [1, 2].

Установлена возможность двух-четырёхкратного повышения оптической прочности материала за счет указанной обработки. В ходе обработки излучение воздействует только на дефектные нано- и микрообласти, не затрагивая окружающий материал. В оптически совершенных кристаллах предельная оптическая прочность лимитируется нелинейными явлениями, такими, как самофокусирование, поэтому увеличение оптической прочности при указанной обработке наиболее

существенно на материалах с содержанием примесей до $\approx 10^{-3}$ вес.%.

Экспериментально установлено, что эффективность селективной лазерной обработки можно повысить за счет улучшения качества контроля оптических и механических процессов в обрабатываемом образце. В работе [2] рассмотрена схема обработки образца (селективное лазерное воздействие), в которой основной контроль (и соответственно коррекция параметров обработки) проводился по наличию вспышек оптического пробоя, при повышении энергии лазерных импульсов, предназначенных для инициирования некритических разрушений. После облучения образца мощным импульсом лазерного излучения осуществляли его обработку излучением, стимулирующим заживление повреждений и релаксацию механических напряжений. Однако эффективность данной обработки оценивалась только косвенно, после проведения всего цикла обработки и повышения энергии «разрушающего импульса». В доработанной схеме наблюдали за состоянием областей повреждения и полями механических напряжений, формирующихся в образце в процессе обработки (рис. 1). Использование дополнительного контроля позволило сократить время обработки за счет сокращения избыточных циклов (когда обработка не приводила к изменению состояния дефектных областей и соответствующему повышению эксплуатационных характеристик), а также повысить количество тех циклов, при которых наблюдали заживление областей повреждений. Проведенная доработка технологической схемы позволила повысить воспроизводимость результатов.



Рис. 1. Технологическая схема лазерной обработки прозрачного кристалла с целью повышения оптической прочности, в зависимости от оптических характеристик материала коэффициент $k = 2\text{--}20$

Таким образом, эффективность метода селективной лазерной обработки прозрачных материалов может быть повышена за счет улучшения контроля за состоянием обрабатываемого материала и коррекцией параметров обработки. В работе [3] проводили оптимизацию свойств аморфно-нанокристаллического металлического сплава селективной лазерной обработкой. В основе селективной лазерной обработки разных материалов лежит возможность преимущественного воздействия лазерного излучения на неоднородные нано- и микрообласти, являющиеся концентраторами напряжения и зародышами разрушения. Можно предположить, что эффективность метода селективной лазерной обработки для случая тонких лент аморфно-нанокристаллического металлического сплава также может быть существенно повышена за счет оптимизации технологической схемы обработки и контроля за состоянием обрабатываемого материала.

ВЫВОДЫ

1. Использование метода селективной лазерной обработки обеспечивает оптимизацию эксплуатационных характеристик материалов, характеризующихся различными механическими, оптическими и другими свойствами, а также различными физическими механизмами деформирования. Полученные результаты демонстрируют эффективность метода селективной лазерной обработки. Совокупность экспериментальных результатов свидетельствует об универсальности и перспективности предложенного метода селективной обработки материалов, физические свойства которых определяются локальными дефектными областями нано- и микромасштабных размеров.

2. Основной задачей селективной лазерной обработки является инициирование на дефектных областях последовательности процессов, приводящих к переводу неоднородных областей в «неопасное» для образца состояние, с одновременной минимизацией воздействия на бездефектный материал. Необходимым условием оптимизации эксплуатационных характеристик образца является проведение достаточного количества циклов обработки, с одновременным контролем состояния как дефектных областей, так и всего обрабатываемого материала, для соответствующей корректировки параметров лазерной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков И.В. Особенности влияния макроскопической трещины на оптическую прочность монокристалла // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 2. С. 74-78.
2. Ушаков И.В. Повышение оптической прочности твердых прозрачных кристаллических материалов лазерной селективной обработкой дефектных нано- и микрообластей // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. 2008. Т. 13. Вып. 1. С. 48-51.
3. Ушаков И.В. Формирование механических характеристик тонкого аморфно-нанокристаллического металлического сплава импульсным лазерным излучением // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. 2007. Т. 12. Вып. 6. С. 715-718.
4. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покопило И.Л. Теоретический анализ эффекта накопления в лазерном разрушении прозрачных диэлектриков при многократном облучении // Квантовая Электроника. 1995. Т. 22. № 7. С. 701-705.
5. Гагарин А.П., Глебов Л.Б., Докучаев В.Г., Ефимов О.М., Попова Л.Б., Толстой М.Н. Влияние поглощающих примесей на оптический пробой прозрачных диэлектриков // Журнал технической физики. 1982. Т. 52. № 1. С. 101-103.
6. Genin F.Y., Michlitsch K., Furr J., Kozlowski M.R., Krulevitch P. Laser-induced damage of fused silica at 355 and 1064 nm initiated at aluminum contamination particles on the surface // Proc. SPIE. Proceedings of the international society for optical engineering. 1997. V. 2966. P. 126-138.
7. Данилейко Ю.К., Маненков А.А., Нечитайло В.С. О механизме лазерного разрушения прозрачных материалов, обусловленном тепловым взрывом поглощающих неоднородностей // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 7. С. 194-195.
8. Маненков А.А., Прохоров А.М. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел // УФН. 1986. Т. 148. № 1. С. 179-211.
9. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шеленин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // УФН. 1996. Т. 166. № 1. С. 3-32.
10. Бахарев М.С., Миркин Л.И., Шестериков С.А., Юмашева М.А. Структура и прочность материалов при лазерных воздействиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 224 с.
11. Пиенчииков Ю.П. Выявление тонкой структуры кристаллов. М.: Изд-во «Металлургия», 1974. 528 с.

Поступила в редакцию 18 ноября 2009 г.

Ushakov I.V. Technology of selective laser processing of non-homogenous areas in transparent and opaque materials.

Technology of optimization of operational characteristics of material by means of selective laser processing of non-homogenous areas is considered. Possibility of laser radiation, which influences selectively on the non-homogenous areas, is shown. Features of improvement of integrated operational characteristics of a material by means of influence on local non-homogenous areas are discussed.

Key words: selective processing; laser processing; exploitation characteristics; defects.