

УДК 681.518; 666.11/.28

С. П. Малюков, Ю. В. Клунникова, А. В. Саенко
Южный федеральный университет

Лазерное управляемое термораскалывание сапфира

Проведены экспериментальные исследования лазерного управляемого термораскалывания сапфира на установке LIMO 100-532/1064-U. Обработка осуществлялась с помощью твердотельного Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм. Проведен расчет распределения температур в процессе лазерного воздействия на структуру графит-сапфир-графит численным моделированием нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности. Результаты моделирования позволили исследовать обработку образца при различном нагреве лазерным излучением. Установлено, что при средней мощности лазерного излучения 80...90 Вт температура на поверхности составляет порядка 600...700 К, что достаточно для термораскалывания сапфира.

Лазерная обработка, термораскалывание, сапфир

В настоящее время в различных областях науки и техники широкое распространение получили лазерные технологические операции, в частности бурное развитие получил метод лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) широкого класса хрупких неметаллических материалов, впервые разработанный и запатентованный в СССР [1], а затем за рубежом [2].

Монокристаллы сапфира обладают комплексом определенных физических свойств (высокая температура плавления, химическая и радиационная стойкость, высокая твердость и прозрачность), благодаря чему они находят широкое применение в микроэлектронике, квантовой электронике, оптике высокого разрешения и нанотехнологиях [3]–[5]. Доля использования таких материалов резко возрастает практически во всех отраслях производства.

Существующие методы резки и обработки поверхности практически исчерпали свои возможности.

Целью данной статьи является исследование прецизионного и безотходного разделения (термораскалывания) сапфира лазерным излучением с длиной волны 1064 нм.

По сравнению с традиционными механическими способами обработки хрупких неметаллических материалов (резки) лазерное термораскалывание имеет ряд преимуществ, основными из которых являются:

- более экономичное использование материала и уменьшение количества отходов;
- отсутствие механического воздействия на материал;

- исключение операций шлифования и полирования края;
- повышение прочности краев в результате их получения без сколов и поперечных трещин;
- увеличение точности и воспроизводимости размеров вырезаемых изделий;
- высокая скорость резки;
- возможность выполнения резки по сложной траектории.

Методика исследования. Экспериментальные исследования лазерной обработки были выполнены на установке (модель LIMO 100-532/1064-U) [6], которая включает в себя инфракрасный (ИК) Nd:YAG-лазер с фиксированной длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 84 нс и мощностью лазерного излучения, которая может задаваться программно в диапазоне 0.1...100 Вт. Для контроля мощности лазерного излучения использовался измеритель мощности Coherent FieldMaxII-TOP.

К техническим характеристикам лазерного комплекса LIMO 100-532/1064-U можно отнести регулируемый диаметр лазерного пятна (0.2...2.5 мм) и высокую степень однородности лазерного пучка, погрешность которой составляет не более 1.5 % (при работе прибора в рекомендуемых условиях).

Сущность метода ЛУТ заключается в следующем: при нагреве поверхности материала лазерным пучком, фокусируемым линзой сканирующей системы, в зоне нагрева в поверхностных слоях возникают напряжения. Для управления параметрами процесса необходимо учитывать

основные факторы, оказывающие влияние на ЛУТ, а именно свойства материала, параметры лазерного излучения и др. [7].

В ходе выполнения экспериментальных работ проведены исследования по оптимизации технологического процесса лазерного термораскалывания сапфировых подложек. Резка сапфировой пластины осуществлялась следующим образом. На начальном этапе на пластину наносился слой графита, обозначающий направление реза. Слой графита поглощает значительную часть лазерного излучения (порядка 50 %), вызывая локальный нагрев поверхности сапфировой подложки, что обеспечивает зарождение и продвижение разделяющих трещин методом ЛУТ. Пластина с нанесенным слоем графита обрабатывалась излучением Nd:YAG-лазера со скоростью перемещения лазерного луча 1 мм/с по слою графита, средней мощностью лазера 90 Вт и временем воздействия порядка 300...350 с.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлена фотография линии реза пластины сапфира вдоль нанесенного графитового слоя ИК-лазером.



Рис. 1

Данный способ резки не требует нанесения предварительных надрезов, как было выполнено в работе [7], а также позволяет повысить эффективность способа резки за счет обеспечения возможности сквозной резки, не требующей дополнительной операции разламывания, расширить возможность эффективной резки кристаллов практически любых размеров, а также повысить производительность и качество резки.

С целью оптимизации режима ЛУТ была разработана математическая модель распределения температуры при нагреве лазерным излучением структуры графит–сапфир–графит. Приведенная математическая модель учитывает различные параметры процесса лазерного управляемого термораскалывания пластин.

Взаимодействие лазерного излучения с твердым телом в спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до ИК-области происходит на уровне электронной подсистемы [8]. Детально описать каждый из перечисленных процессов достаточно сложно. Также сложно получить строгое математическое описание процесса взаимодействия света с твердым материалом даже для частного случая. Однако для большинства практически важных случаев значение времени протекания процессов возбуждения, термализации и рекомбинации носителей заряда много меньше длительности светового импульса, что позволяет говорить о преимущественно тепловых процессах в материале [8].

Перенос тепловой энергии в материале определяется процессами теплопроводности. Процесс переноса теплоты теплопроводностью возможен лишь тогда, когда в различных точках тела температура неодинакова. Передача теплоты теплопроводностью в материале сопровождается изменением температуры как в пространстве, так и во времени. Поэтому при обработке материала лазерным излучением возникает нестационарное температурное поле. Связь между величинами, определяющими передачу теплоты, устанавливает уравнение теплопроводности [9], [10].

Рассмотрим случай лазерного облучения структуры графит–сапфир–графит (рис. 2).

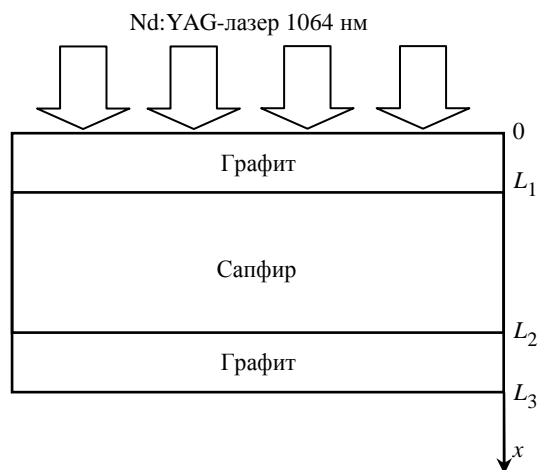


Рис. 2

Структура графит–сапфир–графит (толщина сапфира 2000...2400 мкм, толщина графита 5...10 мкм), облучаемая импульсным лазерным излучением, изотропна и гомогенна. Одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для каждого слоя будет иметь вид [11], [12]

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 T_i(x, t)}{\partial x^2} + F_i(x), \quad (1)$$

где ρ_i – плотность, г/см³; c_i – удельная теплоемкость, Дж/(г · К); T_i – температура, К; k_i – коэффициенты теплопроводности графита и сапфира, Вт/(см · К); $F_i(x)$ – тепловые источники (результат поглощения лазерного излучения) в каждом материале; x – координата, см; t – время лазерного воздействия, с.

При нагревании различных материалов лазерным излучением распределение плотности мощности светового потока $I(x)$ в поглощающей среде по глубине x описывается законом Бугера–Ламберта, в дифференциальном виде [13]:

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} = -\alpha I(x),$$

где α – коэффициент поглощения, см⁻¹.

В диапазоне длин волн от дальней инфракрасной до ближней ультрафиолетовой области для большинства материалов характерен большой коэффициент поглощения, который можно считать неизменным [9]. В этом случае изменение плотности светового потока по глубине описывается интегральным законом Бугера–Ламберта (тепловой источник). Таким образом, при нагревании структуры графит–сапфир–графит лазерным излучением распределение плотности мощности светового потока в поглощающей среде по глубине x определяется следующими выражениями [9]:

$$\begin{aligned} F_1 &= \alpha_1 (1 - R_1) I_0 e^{-\alpha_1 x}; \\ F_2 &= \alpha_2 (1 - R_2) (1 - R_1) I_0 e^{-\alpha_2 (x - L_1)}; \\ F_3 &= \alpha_1 (1 - R_1)^2 (1 - R_2) I_0 e^{-\alpha_1 (x - L_2 - L_1)}, \end{aligned}$$

где I_0 – плотность мощности падающего лазерного излучения на поверхность структуры графит–сапфир–графит, Вт/см²; R_i – показатель отражения графита и сапфира.

Предполагалось, что на границе первого слоя графита толщиной L_1 и сапфира толщиной L_2 , а также второго слоя графита толщиной L_3 и сапфира тепловой контакт идеальный, т. е. на границах пленок и подложки равны температуры:

$$\begin{aligned} T_1(x = L_1 - 0, t) &= T_2(x = L_1 + 0, t); \\ T_2(x = L_1 + L_2 - 0, t) &= T_3(x = L_1 + L_2 + 0, t) \end{aligned}$$

и равны тепловые потоки через границу:

$$\begin{aligned} k_1 \frac{\partial T_1(x = L_1 - 0, t)}{\partial x} &= k_2 \frac{\partial T_2(x = L_1 - 0, t)}{\partial x}, \\ k_2 \frac{\partial T_2(x = L_1 + L_2 - 0, t)}{\partial x} &= k_1 \frac{\partial T_3(x = L_1 + L_2 + 0, t)}{\partial x}. \end{aligned}$$

Вид решения уравнения (1) для каждого из слоев определяется функцией, зависящей от тепловых источников $F_i(x)$ и значений теплофизических постоянных ρ_i , c_i , k_i , а однозначность решения – граничными условиями для каждой конкретной задачи нагрева. Следовательно, для решения задачи нагрева структуры графит–сапфир–графит необходимы дополнительные условия, которые однозначно определяют данную задачу теплопроводности (условия однозначности) [9].

Запишем граничные и начальные условия для структуры графит–сапфир–графит. На облучаемой поверхности (первый слой графита при $x = 0$) действуют граничные условия третьего рода (поскольку заданы температура окружающей среды и закон теплообмена между окружающей средой и поверхностью обрабатываемого материала), определяющие конвекционный теплообмен (по закону Ньютона) между окружающей средой и поверхностью структуры [9]:

$$-k_1 \frac{\partial T_1(x = 0, t)}{\partial x} = \beta (T_1 - T_0), \quad (2)$$

где β – коэффициент конвекционной теплопередачи, характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью графита и окружающей средой, Вт/(см² · К); T_0 – температура окружающей среды.

На второй границе структуры графит–сапфир–графит ($x = L_1 + L_2 + L_3$) выполняется граничное условие первого рода (на границе тела не происходит никаких процессов с поглощением или выделением теплоты), задающее распределение температуры на поверхности для любого момента времени:

$$T_3(x = L_1 + L_2 + L_3, t) = T_0. \quad (3)$$

Начальное условие для уравнения теплопроводности состоит в задании температуры в начальный момент времени $t = 0$ во всех точках обрабатываемой лазерным излучением структуры:

$$T_1(x, 0) = T_0.$$

Для решения нестационарного уравнения теплопроводности (1) для каждого слоя при воздействии лазерного излучения на структуру графит–сапфир–графит с учетом граничных условий (2), (3) использовался численный метод [14], заключающийся в аппроксимации частных производных исходных дифференциальных уравнений соответствующими конечными разностями.

На рис. 3 представлено распределение температуры в структуре графит–сапфир–графит при средней мощности лазерного излучения 90 Вт. Результаты моделирования показывают, что процесс лазерного нагрева на границе графит–сапфир–графит характеризуется большими градиентами температур, при этом максимум температуры приходится на энергопоглощающее покрытие графита (рис. 3).

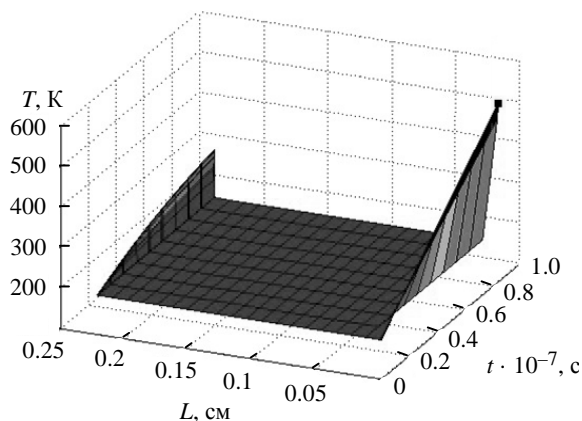


Рис. 3

В результате исследований показана перспективность процесса ЛУТ сапфира с использованием лазерного излучения с длиной волны 1064 нм. Термораскальвание пластин сапфира с нанесенным слоем графита позволяет повысить производительность и качество резки. Установлено, что на качество резки сапфира влияют скорость пе-

ремещения лазерного луча, плотность мощности излучения, форма и размеры лазерного пятна на поверхности материала, а также толщина сапфировой пластины.

Проведено численное моделирование распределения температуры в процессе лазерного термуправляемого раскальвания сапфира. В результате моделирования установлено, что при средней мощности лазерного излучения 80...90 Вт температура на поверхности структуры графит–сапфир–графит составляет порядка 600...700 К, что согласно экспериментальным исследованиям достаточно для термического раскальвания. При этом существенное влияние на процесс лазерной резки сапфира оказывают энергопоглощающие слои графита.

На способ лазерного управляемого термораскальвания сапфировых пластин подана заявка на патент (регистрационный № 2015104607 от 11.02.2015).

Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Лазерные технологии», Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии», Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. СССР № 708686. Способ резки стекла / В. С. Кондратенко. Приор. 17.08.1977.
2. Pat. № WO9320015. Splitting of nonmetallic materials / V. S. Kondratenko. 14.10.1993.
3. Cherednichenko D. I., Malyukov S. P., Klunnikova Yu. V. Heat-Physical Processes at the Sapphire Crystals Growth by Horizontal Directed Crystallization // Sapphire: Structure, Technology and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2013. P. 101–118.
4. Malyukov S. P., Klunnikova Yu. V. Physical and Technological Fundamentals of Sapphire Production for Electronics // Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices. New York: Nova Science Publishers, 2013. P. 133–150.
5. Malyukov S. P., Klunnikova Yu. V. Advanced Materials // Springer Proceedings in Physics. 2014. Vol. 152. P. 55–69.
6. Малуков С. П., Клуникова Ю. В., Саенко А. В. Исследование процессов лазерной обработки материалов для микроэлектроники // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 15–19.
7. Кондратенко В. С., Минаев В. В., Наумов А. С. Лазерное управляемое термораскальвание. Отечественная технология международного масштаба // Радиотехника. 2011. № 4. С. 111–115.
8. Gibbons I. F., Hess L. D., Sigmon T. W. Laser and Electron Beam Solid Interactions and Materials Processing. Elsevier Science Publishing, 1981. 547 p.
9. Яковлев Е. Б., Шандыбина Г. Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2011. 184 с.
10. Физико-технические основы термических методов исследования свойств материалов и определения толщины покрытий / С. А. Марцынюков, Д. К. Кострин, В. В. Черниговский, А. А. Лисенков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 2. С. 14–21.
11. Malyukov S. P., Sayenko A. V. Laser Sintering of a Porous TiO₂ Film in Dye-Sensitized Solar Cells // J. of Russian Laser Research. 2013. Vol. 34. P. 531–536.
12. Feng J., Yan J., Zhou S. Dynamic Behaviors of PbS Irradiated by Laser Pulse // Piers online. 2007. Vol. 3, № 6. P. 847–850.
13. Радиационное дефектообразование для изменения электрофизических характеристик в кремниевых фотопреобразователях / А. Н. Довбня, В. П. Ефимов, А. С. Абызов и др. // Вопр. атомной науки и техники. 2010. № 2. С. 164–167.
14. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.

S. P. Malyukov, Yu. V. Klunnikova, A. V. Sayenko
Southern Federal University

LASER OPERATED SAPPHIRE THERMOSPLITTING

The research of the sapphire laser operated thermosplitting on the LIMO 100-532/1064-U equipment is conducted. Processing was carried out with the use of solid-state Nd:YAG laser with the wavelength of 1064 nm. Calculation of temperatures distribution during laser impact on structure graphite-sapphire-graphite is carried out by numerical simulation of the non-stationary differential equations of heat conductivity. Results of simulation allowed to investigate samples processing at various heating by laser radiation. It is established that at the average power of the laser radiation 80...90 W temperature on a surface is about 600...700 K and it is enough for sapphire thermosplitting.

Laser processing, thermosplitting, sapphire
