

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2004 г. В. К. Сысоев*, канд. физ.-мат. наук; Б. П. Папченко**, А. В. Захарченко*, П. А. Вятлев*

* ФГУП "Научно-исследовательский центр им. Г.Н. Бабакина",
г. Химки, Московская область
E-mail: asd@mouse.bere.rssi.ru

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

Рассмотрены различные методы увеличения эффективности управляемого термораскалывания диэлектрических материалов (оксидных стекол, кварца, сапфира и т. д.) с помощью излучения CO_2 -лазеров: бесконтактное получение микродефектов для организации микротрещины в обрабатываемом материале; управление движением лазерной микротрещины, позволяющее увеличить как скорость, так и толщину высокоточного раскроя диэлектрического материала лазерным термораскалыванием; термораскалывание во взаимно пересекающихся направлениях для получения миниатюрных изделий.

Коды OCIS: 140.3470, 160.4670, 350.3390.

Поступила в редакцию 14.05.2003.

Введение

Применение излучения CO_2 -лазеров для управляемого термораскалывания показало высокую эффективность высокоточной размерной обработки диэлектрических материалов [1–4], таких как стекла для жидкокристаллических экранов и сапфировые чипы для светодиодов. Однако имеющаяся технология имеет ряд ограничений, затрудняющих ее широкое применение в промышленности. Это следующие две проблемы. Первая – высокое качество кромки материала, получаемой в результате его разделения рассматриваемым методом, затрудняет раскрой материала во взаимно пересекающихся направлениях, что особенно необходимо для изготовления миниатюрных изделий. Вторая –

ограничения по толщине обрабатываемого материала. Данная работа посвящена некоторым решениям этих проблем.

Технологии бесконтактного создания микродефекта

Как известно [1–3], основой технологии управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов является зарождение микротрещины и управление ее движением лазерным лучом и хладагентом, как показано на рис. 1а. Микротрещина зарождается на первоначальном дефекте, который в имеющихся установках создается искусственно с помощью механического устройства (алмазной

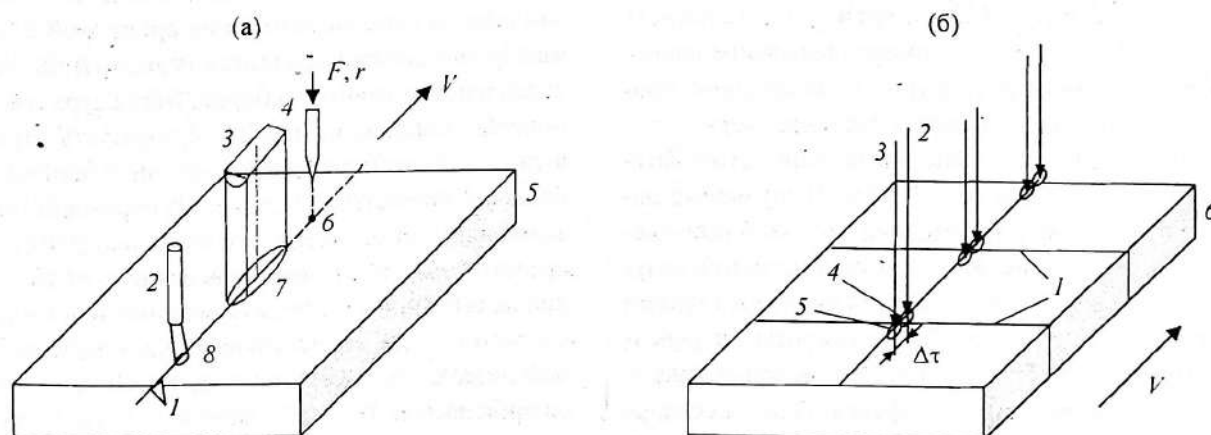


Рис. 1. Схема бесконтактного дефектообразования микротрещин для управляемого лазерного термораскалывания. а – схема термораскалывания (1 – микротрещина, 2 – форсунка для хладагента, 3 – линза для фокусирования эллиптического пятна лазерного излучения, 4 – алмазная пирамида для дефектообразования, 5 – материал, 6 – дефект, 7 – фокальное пятно, 8 – пятно охлаждения), б – схема бесконтактного дефектообразования (1 – поперечный скол материала, полученный лазерным термораскалыванием, 2 – пучок импульсного лазера, 3 – пучок непрерывного лазера, 4 – точечное пятно импульсного лазера, 5 – эллиптическое пятно непрерывного лазера, 6 – материал).

Таблица 1. Бесконтактное образование микротрещин – дефектов для управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов

Тип лазера	$\lambda_{\text{изл.}}$ мкм	$\tau_{\text{имп.}}$ с	Результат	Примечание
Nd	1,06	10^{-9}	10–20%	Трудно осуществить микротрещину на поверхности
Er	2,94	10^{-6}	80–100%	При больших мощностях и длинных импульсах идет плавление дефекта
CO ₂ с модуляцией добротности	10,6	10^{-3}	60–70%	Необходимость чистой поверхности материала. при больших мощностях идет испарение
TEA CO ₂	10,6	10^{-6}	80–100%	Необходимость чистой поверхности материала, при больших мощностях – плазмообразование

пирамиды) путем вдавливания ее в материал, где в последующем эту точку освещают лазерным лучом, сечению которого придается специальная форма (чаще всего эллиптическая). Хладагент из форсунки падает на горячий след луча, усиливая термонапряжение для создания микротрещины.

При пересечении лучом линии уже произведенного термораскалыванием высококачественного скола материала процесс управления микротрещиной обрывается, и поэтому необходимо создать новый микродефект на следующем сколе материала. Создание его механическим путем трудно, особенно при создании микроминиатюрных изделий, получаемых с большой скоростью, где требуются частоты нанесения дефектов более 100 Гц (с точно регулируемым усилием), что для электромеханических устройств затруднено. К тому же механический дефект имеет размеры, недопустимые при изготовлении миниатюрных изделий [5]. Инструмент для создания дефекта с регулируемыми характеристиками должен быть бесконтактным, что предполагает использование импульсного лазера. Выбор такого лазера будет определяться спектральными и теплофизическими характеристиками обрабатываемого материала, а также импульсными характеристиками лазерного излучения (энергия и длительность импульса). Управляемое термораскалывание наиболее перспективно для следующих материалов: кристаллический кварц, сапфир (включая керамику), оксидные стекла. Край ИК поглощения этих материалов лежат в области 2–3 мкм. Импульсные лазерные излучатели для создания дефектов приведены в табл. 1. Конечно, важно, чтобы источник излучения для дефектообразования был достаточно прост, надежен и дешев. Эксперименты по управляемому дефектообразованию обычно проводились без исследования самого дефекта. Наше исследование показало, что для используемых материалов (оксидные стекла, сапфир, кристаллический кварц) возможно образование микродефекта от воздействия излучений нескольких импульсных лазеров: неодимового (1,06 мкм, $\sim 10^{-9}$ с), эрбиевого (2,94 мкм, $\sim 10^{-6}$ с), CO₂-лазера с модуляцией доб-

ротности (10,6 мкм, $\sim 10^{-3}$ с) и ТЕА CO₂-лазера (10,6 мкм, $\sim 10^{-6}$ с). Измерения показали, что наиболее приемлемым инструментом для дефектообразования является эрбиевый и ТЕА CO₂-лазеры [6]. Испытания проводились по следующей методике. На установке управляемого лазерного термораскалывания делали параллельные микротрещины (или сквозной скол), затем в один технологический цикл совершалась следующая операция: край скола облучался импульсным излучением одного из выбранных лазеров, одновременно излучение непрерывного лазера проходило через эту зону, “ведя” создающуюся микротрещину до следующего скола. Трудности получения микродефекта лазерным излучением заключались в том, что при очень большой мощности излучения возникал плазменный пробой на поверхности, а при очень малых мощностях процесс дефектообразования был неустойчив. Подбором мощности (энергии) импульсного лазера достигалось наиболее устойчивое образование микротрещин (при этом добивались образования микротрещин при как можно меньших энергетических затратах). Очень важно, что при такой методике не требовалось исследование самой микротрещины, что является весьма не простой инструментальной задачей. Целью такой работы была оптимизация временной задержки между моментами воздействия излучений импульсного и непрерывного лазеров. Процедура такой технологии показана на рис. 1б, а результаты отражены в табл. 1. Результаты испытаний показаны как итог большой статистики. Каждый из перечисленных лазеров в принципе всегда создает микродефекты. Но качество этих микродефектов зависит от типа материала, его толщины, вида поверхности, и набранная статистика показывает, что наиболее приемлемым типом лазера, как инструмента для этой цели, являются эрбиевый и ТЕА CO₂-лазеры. Одним из важных результатов этих испытаний является то, что наиболее оптимальный дефект – микротрещина образуется без видимого внешнего поверхностного дефектообразования. Данная методология получения микродефектов позволила реализовать термораскалывание образцов стекла с размерами 0,3×0,3 мм.

Управляемый докол в термораскалываемых лазерным излучением материалах

Создание и управляемое развитие микротрещины под воздействием излучения CO_2 -лазеров встречаются с двумя основными проблемами: ограничением скорости развития трещины вслед за лазерным лучом и, главное, ограничением развития трещины по толщине стекла, что затрудняет получение готовых изделий.

Физический механизм, позволяющий управляемо развивать микротрещины по всей толщине материала, известен достаточно давно. Это – создание дополнительных термонапряжений, например подогрев или охлаждение нижней части объекта. Имеющийся уже рисунок термомикротрещин, возникших под воздействием лазерного излучения, разовьется сквозным образом из-за перепада температур. Однако скорость данного процесса ограничена и определяется теплопроводностью материала. В ряде случаев (например, при наличии легкоиспаряемого покрытия на материале) температурный нагрев образцов не допустим. Другим механизмом управляемого докола является ударное звуковое развитие трещины. Это явление известно на бытовом уровне, когда стекольщик, создав микротрещину алмазом, постукивает с небольшим усилием по обратной стороне стекла, развивая полученную микротрещину до полного раскола материала. Теория и экспериментальные исследования управления развитием микротрещины ударными волнами развиты в работе [7]. Развитие ударных волн в твердом теле (стекло и керамика) происходит со звуковыми скоростями, что позволяет надеяться на ускорение процесса докалывания материала по заданному контуру термораскалывания.

Не вдаваясь в расчетные механизмы данной технологии, рассмотрим полученные экспериментальные методы. Прежде всего рассмотрим основные требования к источнику акустических ударных волн. Схема методики показана на рис. 2а и состоит из трех компонентов: луча лазера, создающего эллиптическую зону нагрева для создания микротрещин; зоны реализации микротрещины, зоны воздействия акустических ударных волн.

Распределение этих зон по пространству и времени является предметом отладки технологии. При этом данную технологию можно реализовать, направляя акустическую ударную волну навстречу микротрещине, т. е. "снизу", так используется отражение ударной волны от поверхности материала, т. е. "сверху", как показано на рис. 2б. Реализация механизма для возбуждения точечных акустических волн в движущемся материале является нес-

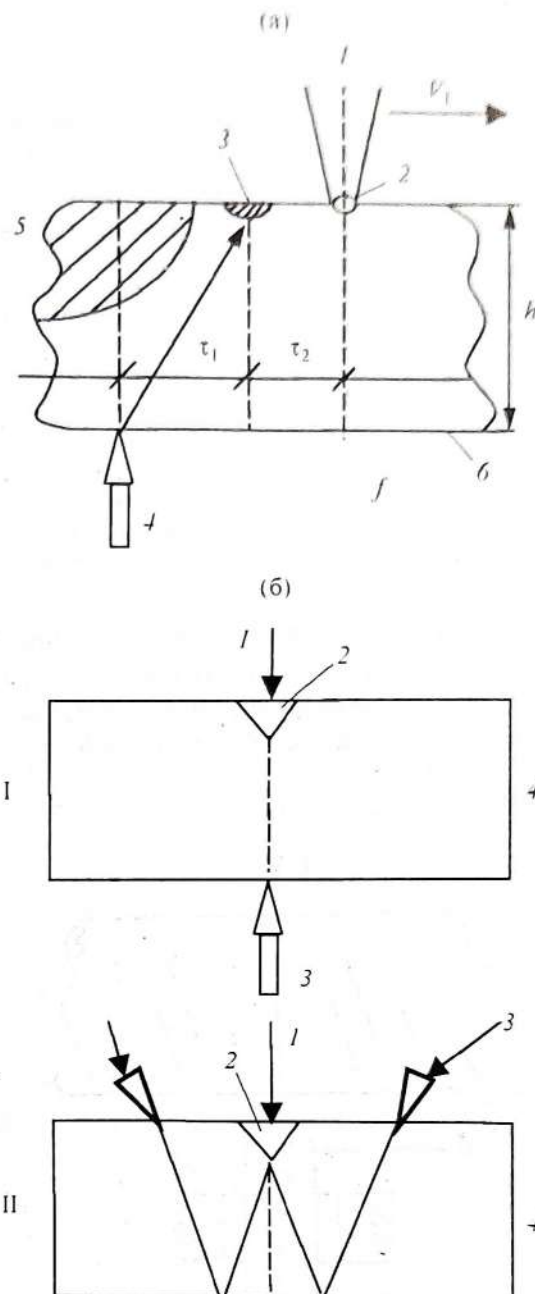


Рис. 2. а – схема акустического докалывания микротрещин, получаемых лазерным термораскалыванием (1 – пучок CO_2 -лазера, 2 – эллиптическое пятно, 3 – микротрещина, 4 – акустический ударник, 5 – развитие трещины; 6 – материал); б – варианты его воздействия: I – удар снизу, II – удар сверху (1 – пучок CO_2 -лазера, 2 – микротрещина, 3 – ударник, 4 – материал).

ма не тривиальной задачей. Наши исследования показали, что имеется ряд методов, позволяющих реализовать несколько устройств с различным принципом возбуждения акустических волн, соответствующих данной технологии. Сводные данные этих устройств (методов) приведены в табл. 2. Рассмотрим данные методы возбуждения докола акустическими методами. Первый самый простой метод заключается в возбуждении ударных акустических волн в коническом стержне электромеханическим устройством, прижатым к материалу (в самом простом слу-

Таблица 2. Методы докалывания материалов после создания лазерным излучением термотрешин

Метод	Устройство	Примечание
Температурное воздействие	Поверхностный нагрев (или охлаждение)	Простота устройства. Малые скорости и ограничения по толщине
Механический	Механический звукопровод с механическим бойком	Простота устройства. Акустическая волна вызывает механическое перемещение звукопровода, крошится материал
	Магнитожидкостной механизм	Сложность устройства, обеспечивающего контакт с материалом
Пневматическое устройство	Ударная волна от разряда в капиллярном канале	Бесконтактное простое устройство с возможностью регулировки удара в широком диапазоне
Генерация звуковых волн в жидкости Nd-лазером	Возбуждение Nd-лазером звуковых волн в водном растворе CuCl_2	Эффективное устройство. Разрушающее воздействие растворов на материал

чае – к стеклу), что показано на рис. 3а. Данное устройство позволяет регулировать как силу удара (амплитуду акустических волн), так и частоту ударов и уверенно раскалывает стекло толщиной до 20 мм,

в то время как для этой марки стекла термораскалывание (без акустического воздействия при тех же скоростях) происходило максимально до толщины 2 мм. Несмотря на относительную простоту этого

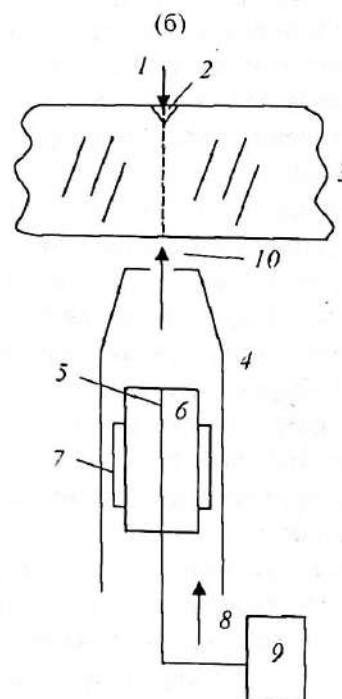
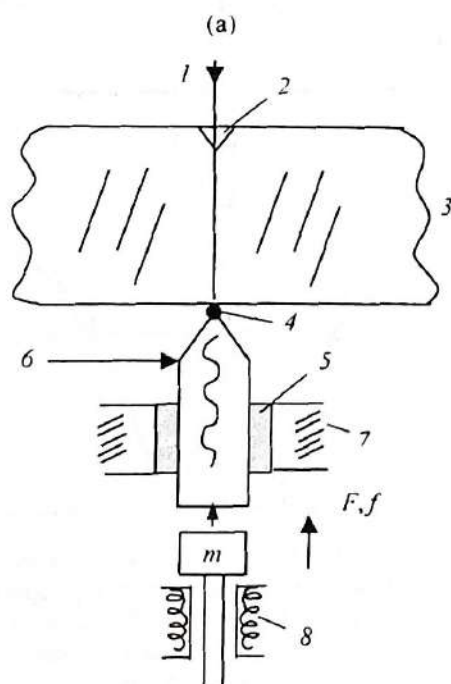
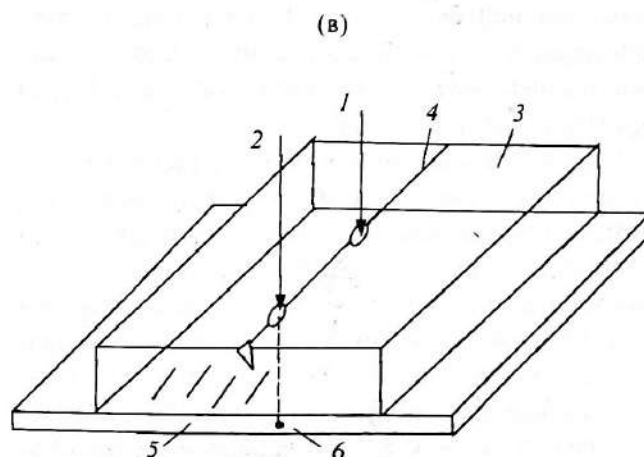


Рис. 3. Устройство для реализации акустического докалывания термораскалываемых материалов. а – механическое устройство (1 – пучок CO_2 -лазера, 2 – микротрещина, 3 – материал, 4 – стальной шарик, 5 – звукоизолятор, 6 – звукопровод, 7 – зажим, 8 – соленоид). б – пневматическое устройство (1 – пучок CO_2 -лазера, 2 – микротрещина, 3 – материал, 4 – сапфировый капилляр, 5 – вольфрамовый электрод, 6 – кварцевая изоляция, 7 – электрод, 8 – газ, 9 – импульсный блок питания, 10 – ударная волна). в – оптико-жидкостно-ударное устройство (1 – пучок CO_2 -лазера, 2 – пучок Nd-лазера, 3 – материал, 4 – микротрещина, 5 – кювета с раствором, 6 – точка генерации ударных звуковых волн).



устройства, оно обладает существенным недостатком – в месте контакта стального шарика со стеклом материал периодически крошится, что для ряда применений недопустимо, и весьма трудно выдерживать регулируемый контакт с движущимся стеклом. Во втором устройстве, реализованном в данной работе, используются ударные акустические волны, создаваемые импульсным газовым разрядом в капиллярном канале, как показано на рис. 3б. При этом не требуется механического контакта с обрабатываемым материалом, т.е. наличие зазора в 0,5 мм уверенно обеспечивает докалывание образцов, особенно эффективное в случае толстых стекол. Данное устройство с помощью регулировки высоковольтного импульсного напряжения (не более 1 кВ и с длительностью 0,1–1 мкс) позволяет управлять энергией удара и его частотой (до 300 Гц). Кроме того, оно может быть использовано для работы с различными газами и как одиночное устройство (для удара снизу), и как двойное (для удара сверху).

В следующем устройстве, реализованном в рамках данной работы, осуществлялась генерация акустических ударных волн в жидкости под воздействием излучения неодимового лазера на длине волны 1,06 мкм. Схема этого устройства показана на рис. 3в. Даже небольшая мощность пучка неодимового лазера, сфокусированного в оптимально подобранной жидкости (раствор CuCl_2 в воде), позволяет, используя гидрооптоакустический эффект, уверенно раскалывать толстые стекла.

В заключение отметим, что использование как импульсного CO_2 -лазера с модуляцией добротности,

так и ТЕА CO_2 -лазера с целью непосредственного возбуждения ударных акустических волн для управления движением микротрещины не дали положительных результатов.

Конечно, представленные нами устройства не исчерпывают все возможности увеличения эффективности управляемого термораскалывания.

Авторы благодарны В.С. Кондратенко за идею этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
2. Григорянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная обработка неметаллических материалов. М.: Высшая школа, 1988. 191 с.
3. Белоусов Е.М., Кондратенко В.С., Мачулка Г.Н., Чуйко В.В. Управляемое термораскалывание стекла лазерным излучением диапазона 10,6 микрон // Электронная промышленность. 1979. № 9. С. 40–45.
4. Стригин М.Б., Чудинов А.Н. Лазерная обработка стекла пикосекундными импульсами // Квант. электрон. 1994. Т. 21. № 8. С. 787–790.
5. Иванов А.В. Прочность оптических материалов. Л.: Машиностроение, 1989. 144 с.
6. Алейников В.С., Бондаренко Ю.Ф., Бойков В.Н., Зубов В.В., Старикова Г.С., Сысов В.К. Импульсный лазер на CO_2 с поперечным разрезом (отпаянный режим) // Квант. электрон. 1981. Т. 8. № 2. С. 381–383.
7. Физика быстропротекающих процессов. М., 1971. Т. 2. 252 с.