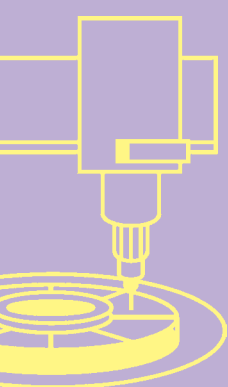


ЛАЗЕРНАЯ ВЫРЕЗКА СКВОЗНЫХ МИКРООТВЕРСТИЙ

В ПРОЗРАЧНЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛАХ



Материалы типа пьезокварца, ниобата и танталата лития широко используются в радиоэлектронике. Однако их физические свойства затрудняют непосредственную механическую обработку, за исключением шлифовки. Такая стандартная операция, как вырезка сквозных отверстий, вызывает серьезные проблемы из-за твердости и хрупкости материалов. В статье обсуждаются результаты лазерной вырезки отверстий.

Существует ряд известных технологий создания отверстий в твердых и хрупких материалах [1]:

- сверление алмазным сверлом или коронкой;
- сверление ультразвуком с абразивом;
- электроэрозионный метод;
- прошивка излучением CO_2 - или рубинового лазера.

Каждый из перечисленных методов имеет определенные преимущества и может оказаться оптимальным при обработке ряда известных материалов типа стекол и некоторых кристаллов. Тем не менее, их применение для сверления прозрачных пьезоматериалов затруднено. Так, прямое механическое сверление может вызвать растрескивание материала и требует значительного расхода дорогостоящего инструмента. Трудно сверлить и малые (диаметром менее 100 мкм) отверстия.

Косвенная механическая обработка ультразвуком требует использования вспомогательной жидкой компоненты, что не всегда желательно при обработке уже готовых изделий с нанесенными структурами. Возникают также сложности при сверлении отверстий диаметром менее 100 мкм.

Электроэрозионный метод позволяет получать отверстия малого диаметра, но требует применения специальных растворов, что не всегда допустимо при обработке пластин с готовыми структурами.

Прошивка отверстия в фиксированной точке излучением CO_2 -лазера создает оплавленный край и изменение доменной структуры, а высокие термические нагрузки могут вызывать растрескивание материала. Кроме того, установка с CO_2 -лазером стоит дорого, имеет высокую мощность и используется преимущественно для раскроя или маркировки металлов.

В данной работе исследована возможность сверления прозрачных пьезоматериалов излучением современных твердотельных лазеров, в частности создания отверстий диаметром от 50 до 500 мкм.

Большинство современных твердотельных лазеров малой и средней мощности составляют Nd:YAG-лазеры с ламповой или диодной накачкой. Этот тип лазеров позволяет получить:

энергию в импульсе	10^{-6} –100 Дж
частоту следования импульсов	1– 10^5 Гц (10^8 Гц)
длительность импульса	10^{-12} – 10^{-2} с
длину волны излучения	252–1060 нм.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Особенностью рассматриваемых пьезоматериалов является их прозрачность в видимой и близкой ИК-области спектра. Пьезокварц, кроме того, обладает хорошим пропусканием в УФ-области спектра вплоть до 200 нм. Это значит, что пря-

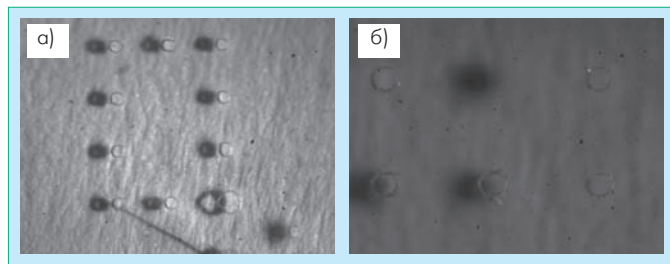


Рис. 1 Создание сквозных отверстий в пьезокварце: а) фото со стороны задней поверхности (вход); б) фото передней поверхности (выход). Расстояние между отверстиями 1,0 мм, толщина пластины 200 мкм, диаметр отверстий 100–300 мкм

мые методы лазерной обработки твердотельными Nd:YAG-лазерами, основанные на поглощении излучения, неприменимы. Скрайбирование, резка и сверление таких материалов осуществляются методом лазерного пробоя [2, 3].

Сущность пробоя вещества излучением лазера состоит в создании высокой плотности мощности излучения на поверхности или в объеме материала, приводящей к лавинной ионизации. Она, в свою очередь, формирует (при критической плотности электронной лавины) микрообъем плазмы, хорошо поглощающей остаток импульса. В результате этого формируется микродефект в материале. Применение данного физического эффекта для изготовления отверстий в различных материалах зависит от оптических, химических и механических свойств обрабатываемого материала.

Рассматриваемые здесь прозрачные пьезоматериалы делятся по способам обработки на две принципиально различные группы. К одной относится пьезокварц, а также любые другие оксиды кремния (стекла). Ко второй группе – ряд иных минеральных кристаллических соединений – ниобат лития, нитриды и оксиды алюминия и т.п.

Пьезокварц

Так как у кварца практически отсутствует поглощение излучения в диапазоне от 220 нм до десятка микрометров, то для создания лавинного пробоя на основной гармонике Nd:YAG-лазера (1060 нм) требуется колоссальная пиковая плотность мощности излучения. По данным исследователей [4] и нашим

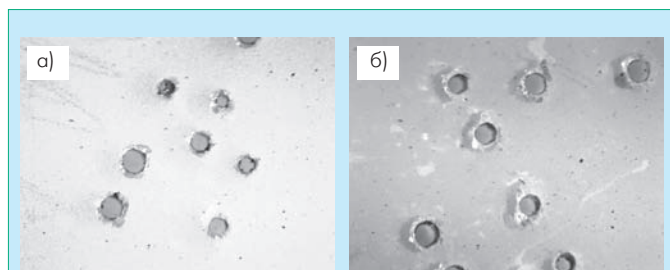


Рис. 2 Ниобат лития. Начало реза со шлифованной стороны. Толщина пластины 0,5 мм, диаметр отверстий 100–300 мкм (а – входные отверстия; б – выходные отверстия)

измерениям, эта величина составляет 10^{10} – 10^{11} Дж/см². Такие плотности мощности достижимы только для лазеров со сверхкоротким импульсом (пикосекундного и наносекундного диапазона).

Основной параметр, имеющий отношение к обработке материала, – размер области разрушений, вызванных лазерным пробоем (микродефект). Опыт показал, что пороговая плотность энергии пробоя уменьшается пропорционально корню квадратному от длительности импульса вплоть до значения порядка 5–10 пс. Возникающие далее нелинейные эффекты приводят к росту порога. С ростом вкладываемой в пробой энергии растет и область разрушений. Измерения показали, что при длительности импульса порядка десятков пикосекунд микродефект представляет собой конус (кern) с диаметром порядка 5–15 мкм и длиной 30–40 мкм. Максимальная длительность, при которой еще наблюдался лавинный пробой (с учетом возможностей оборудования), составляла 6–10 нс. При этом поперечный размер микродефекта составлял около 200 мкм. Для формирования отверстий малых размеров (диаметром менее 100 мкм) размер единичного дефекта не должен превышать в поперечном сечении величину порядка 20–30 мкм. Такой размер можно получить при длительности импульса порядка 0,5–1 нс [2], что соответствует параметрам применяемого нами лазера, используемого для серийной обработки сапфира, кварца и различных стекол толщиной до 5 мм.

Применяемый нами метод создания сквозных отверстий (метод контурного высверливания, или вырезки) предполагает пошаговое смещение луча по заданному замкнутому контуру с формированием сплошной линии выноса материала. Обработка производится послойно, начиная с задней поверхности пластины. После прохождения всей толщины пластины оконтуренная линией выноса внутренняя часть контура легко удаляется.

Эксперименты показали, что наибольшую проблему при лазерной обработке пьезоматериалов представляет их высокая хрупкость, приводящая к растрескиванию даже при кратковременном импульсном воздействии. Связано это, скорее

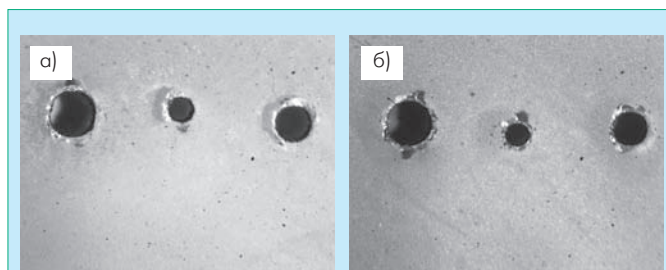


Рис. 3 Ниобат лития. Начало реза с полированной стороны. Толщина пластины 0,5 мм, диаметр отверстий 100–300 мкм (а – входные отверстия; б – выходные отверстия)

Результаты вырезки отверстий в прозрачных пьезокристаллах

Материал	Диаметр отверстий, мкм	Время обработки, сек.	Размер сколов, мкм	Толщина материала, мм
Пьезокварц	100–2000	20–400	20–40	50–150
Ниобат и танталат лития	100–1000	10–100	40–70	100–500

всего, с высоким значением пьезоконстант, а также с особенностями строения кристаллической решетки. Метод контурного высверливания неплохо работает до толщин порядка 200 мкм, позволяя создавать сквозные отверстия и контуры произвольной формы размером от 50 мкм (рис.1). Стенки отверстий получаются практически вертикальными. Дефекты краев в виде сколов и микротрещин не превышают 20 мкм на задней стороне пластины (начало обработки) и могут увеличиваться до 30–50 мкм при выходе луча на переднюю поверхность (рис.1б). Это связано с резким ухудшением теплоотвода через материал при остаточной толщине реза порядка 40–60 мкм.

Максимально достигнутая нами скорость линейного перемещения луча – около 200 мкм/с, ее дальнейшее увеличение ограничивается проявлением термических эффектов, приводящих к растрескиванию. При толщине пластины 200 мкм, выносе материала 40 мкм/слой и диаметре отверстия 100 мкм время обработки составляет около 10 с.

Ниобат лития и танталат лития

Эти материалы имеют сходные свойства по отношению к лазерному воздействию. Все они не стойки даже к короткому импульсному воздействию, которое приводит к раскалыванию и растрескиванию пластин. Видимо, особую роль здесь играют термомеханические динамические эффекты (связанные с высокими значениями упругих констант), которые возникают при ударном воздействии сверхкоротких импульсов лазера (следует отметить, что эти свойства зависят также от производителя материала).

Исходя из этого, были предприняты попытки обработки кристаллических пластин длинными (мягкими) импульсами.

Испытания проводились на длине волны первой гармоники (1060 нм) твердотельного Nd:YAG-лазера в двух режимах: свободной генерации (300–600 мкс, 10–100 мДж) и мягко модулированной добротности, приводящей к пиковому режиму (200–400 нс, 1–5 мДж, 5–50 импульсов в пакете).

Учитывая, что для исследуемых материалов поглощение в близкой ИК-области мало, энергия лазера выбиралась достаточной для зарождения пробоя передней поверхности пластины или на неровностях шлифовки, или на микродефектах, всегда присутствующих на поверхности. После возникновения первой фазы пробоя, приводящей к образованию плазмы и резкому возрастанию поглощения лазерного излучения, процесс резания становился практически устойчивым благодаря появлению некоторого количества расплава, имеющего, по-видимому, достаточно высокое поглощение излучения 1,06 мкм. Поскольку явление пробоя прямо связано с величиной плотности мощности излучения, для облегчения условий его возникновения применялся комбинированный способ: сверление начиналось в пиковом режиме с высокой плотностью мощности, а затем в режиме свободной генерации (имеющем гораздо более высокий порог пробоя).

Исследуемые пластины имели шлифованную и матовую сторону. Изучение режимов "сверления" отверстий осуществлялось методом циркулярной вырезки за несколько циклов, который позволяет получить сквозные отверстия.

Были изучены особенности, связанные со стороной начала реза. Так, при начале реза с матовой стороны качество края на входе отверстия гораздо выше, чем на выходе. Размер дефектов на входе обычно не превышает 30–40 мкм, а на выходе отдельные сколы достигают 100 мкм. На переднем крае могут также оставаться следы расплава. Они легко удаляются и практически не ухудшают качества края. При начале реза со шлифованной стороны размеры дефектов не превышают 50–70 мкм как на входе, так и на выходе отверстий диаметром 400, 300 и 200 мкм (рис.2,3).

Аналогичные результаты дают эксперименты по вырезке отверстий в пластинах танталата лития.

Эксперименты по контурной вырезке отверстий в прозрачных пьезокристаллах проводились на технологических установках двух типов, предоставленных ООО "Муллитех". Для резки пьезокварца использовался твердотельный лазер с диодной накачкой с энергией в импульсе до 200 мкДж, частотой повторения до 1000 Гц и длительностью импульса от 100 пс до 2 нс. Резка ниобата и танталата лития осуществлялась твердотельным лазером с ламповой накачкой с энергией в импульсе до 200 мДж, частотой повторения до 100 Гц и длительностью импульса 200–1200 мкс. В лазере была предусмотрена возможность управляемой смены профиля импульса с режима свободной генерации на пиковый режим модулированной добротности. Полученные результаты представлены в таблице.

На всех образцах были также нанесены периодические структуры из отверстий диаметром до 200 мкм. Стабильность созданных структур наблюдалась в течение трех недель. За это время не было замечено растрескивания материала между изготовленными отверстиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная обработка неметаллических материалов. – М.: Высшая школа, 1988.
2. Алексеев А.М. и др. Способ резки прозрачных неметаллических материалов. – Патент компании "Мулти-тех", РФ: №2226183, 27 марта 2004.
3. Алексеев А.М. и др. Способ разделения твердых прозрачных пластин со светоизлучающими или микроэлектронными структурами. – Патент компании "Мултитех", РФ: №2254299, 20 июня 2005.
4. An-Chun Tien et al. Short-pulse laser damage in transparent materials as a function of pulse duration. – Phys. Rev. Lett., 1999, Vol.82, p.3883.
5. J.Park, P.Sercel. High-speed UV Laser scribing boosts blue LED Industry. – Compound Semiconductor, 2002, Vol.8, No.11.

НОВЫЕ КНИГИ

**Волоконно-оптические датчики.
Вводный курс для инженеров
и научных работников**
Под редакцией Э. Удда

Книга, написанная всемирно признанными специалистами, представляет собой вводный курс в быстро развивающуюся и охватывающую новые сферы приложений область волоконно-оптических датчиков. В каждом из трех разделов – Основные компоненты, Технология и Приложения – приводятся отдельные примеры основных достижений в этой области. Вместе они предоставляют инженерам, научным работникам, студентам старших курсов и аспирантам возможность составить цельное впечатление о волоконно-оптических датчиках.

Книга может использоваться в качестве пособия при чтении учебных курсов, а также на промышленных семинарах по волоконно-оптическим датчикам.

Переводное издание
2008. – 504 с. ISBN 978-5-94836-191-8



О приобретении книги можно узнать:
по телефону (495) 234-01-10,
по e-mail: sales@technosphera.ru, pochta@technosphera.ru
или на сайте www.technosphera.ru.