

Лазерная размерная обработка материалов подложек МЭМС

В статье приведен сравнительный анализ и определены оптимальные режимы процессов лазерной обработки материалов микроэлектромеханических систем (МЭМС) на установке лазерной обработки ЭМ-290 (ГНПО «Планар», Беларусь) с пикосекундным лазером (Lumera Laser GmbH, Германия).

Георгий Ретюхин

ptsLtd@bk.ru

**Владимир Ланин
Святослав Школык**

Развитие МЭМС-технологий обусловило появление нового направления в акустоэлектронике — пьезоэлектрической элементной базы СВЧ-диапазона на объемных и поверхностных акустических волнах, которое обладает рядом потенциальных преимуществ. К их числу относятся уникальные массо-габаритные характеристики устройств, их совместимость с кремниевой и арсенид-галлиевой технологией, высокая электрическая прочность СВЧ-резонаторов и фильтров, что позволяет использовать их в выходных каскадах и согласующих антенных элементах передающих телекоммуникационных устройств. При использовании акустоэлектронных СВЧ-элементов на объемных акустических волнах (ОАВ) в датчиках физических величин величина отклика на внешнее воздействие оказывается большей, чем у соответствующих устройств на поверхностных акустических волнах. Высокие частоты и малые размеры открывают возможности использования СВЧ-резонаторов на объемных акустических волнах в малогабаритных пассивных устройствах регистрации сигнала, что важно для задач экологии и промышленности.

Разработка и освоение новых типов СВЧ-приборов требуют применения соответствующих материалов для базовых элементов — плат (подложек) СВЧ-модулей. К таким материалам относятся: пьезокварц, ниобат лития, танталат лития, лангасит, лангитат, алюмооксидная керамика и другие. Эти материалы, как правило, принадлежат к классу твердых и сверхтвердых материалов, очень хрупки, что вызывает трудности при их обработке.

Одной из основных технологических операций создания МЭМС является лазерная размерная обработка подложек, в частности формирование сквозных отверстий в кристаллических подложках без изменения физических свойств кристаллов.

Выбор типа лазера

Выбор источника лазерного излучения для микрообработки твердых и сверхтвердых материалов — сложная задача, для решения которой зачастую

Введение

приходится принимать компромиссные решения. На одной чаше весов находятся критерии, определяющие качество обработки, а на другой — производительность и стоимость.

Для обеспечения минимальной зоны термического влияния (HAZ) необходимы короткие импульсы излучения τ_n , а для минимальной зоны облучения d , соответственно, нужны короткая длина волны и низкая расходимость излучения. Для высокой производительности процесса обработки требуются высокоэнергетичные импульсы излучения E_n и высокая частота повторения импульсов F . Точная геометрия и низкая шероховатость поверхности R_z достигаются путем оптимального сочетания E_n , τ_n , F и скорости процесса V .

Процессы, протекающие при взаимодействии лазерного излучения с материалами, зависят от поглощения материала на длине волны лазерного источника, пиковой мощности лазера и длительности воздействия излучения. При воздействии лазерного излучения на поверхность материала сначала происходит испарение и ионизация поверхностных примесей и загрязнений. Далее излучение поглощается основным материалом, и, если интенсивность достаточно высока, материал плавится, испаряется, а пары ионизируются. При этом давление паров способствует выплескиванию расплава и образованию отверстия.

Материалы подложек МЭМС представляют собой диэлектрики с очень малым коэффициентом поглощения лазерного излучения в спектре длин волн 0,4–2 мкм. Поэтому наряду с возможностями микрообработки короткими импульсами слабо поглощаемого излучения видимого, близкого к нему инфракрасного (1,06 мкм) и ультрафиолетового (0,355 мкм) диапазона просматривается перспектива применения хорошо поглощаемого излучения CO₂-лазеров данными материалами при относительно высокой производительности процесса.

Микрообработка материалов предъявляет требования к таким параметрам источника излучения, как длина волны λ , угловая расходимость θ и длительность импульса t_n . Эффективность взаимодействия излучения с материалом зависит от длины волны. В общем случае для металлов чем короче длина волны, тем сильнее воздействие. Кроме того, зона воздей-

ствия, определяемая минимальными размерами лазерного пучка d в фокусе объектива, связана с длиной волны излучения соотношением:

$$d = 1,22\lambda(f/D)M^2, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние объектива; D — диаметр несфокусированного лазерного пучка; M^2 — коэффициент, характеризующий отличие реального лазерного пучка от идеального гауссова пучка, имеющего минимальную дифракционную расходимость:

$$M^2 \sim D \times \theta, \quad (2)$$

где θ — реальная угловая расходимость лазерного пучка (для гауссова пучка $M^2 = 1$).

Таким образом, чем короче длина волны и меньше реальная угловая расходимость, тем больше возможностей сфокусировать излучение и обеспечить минимально возможный размер зоны воздействия. Практически достижимы зоны воздействия в единицы микрометров для излучения видимого диапазона и доли микрометров для ультрафиолетового излучения. Для более длинных импульсов величина зоны термического влияния равна:

$$\delta = 2(a\tau_{\text{и}})^{1/2}, \quad (3)$$

где a — коэффициент температуропроводности, зависящий от теплофизических свойств материала.

Следует отметить, что эффективность процесса испарения материала существенно зависит от плотности энергии в лазерном импульсе и носит пороговый характер. Пороговое значение плотности энергии составляет для алюминия около 0,2 Дж/см² для импульсов длительностью <10 пс и более 1 Дж/см² для импульса длительностью 100 нс. Объем испаренного материала логарифмически зависит от плотности энергии, причем для импульсов большей длительности данная зависимость более крутая.

Анализируя физические процессы взаимодействия лазерного излучения с твердыми и сверхтвердыми материалами, можно сделать вывод о применении следующих типов лазеров для оборудования:

- лазеры ультрафиолетовой и видимой области спектра длин волны наносекундного, пикосекундного и фемтосекундного диапазона длительности импульса;
- CO₂-лазеры с длиной волны 10,6 мкм наносекундного и микросекундного диапазона длительности импульса.

Импульсные лазеры микросекундной и наносекундной длительности уже используются, обеспечивая адекватную скорость обработки и удовлетворительное качество финишной поверхности. Однако повышенные требования к миниатюризации делают эти лазеры неподходящими для высококачественной обработки главным образом из-за тепловой природы взаимодействия с материалами, которое способствует плохой морфологии поверхности.

Ультрафиолетовое лазерное излучение длиной волны 355 нм использовано для микро-

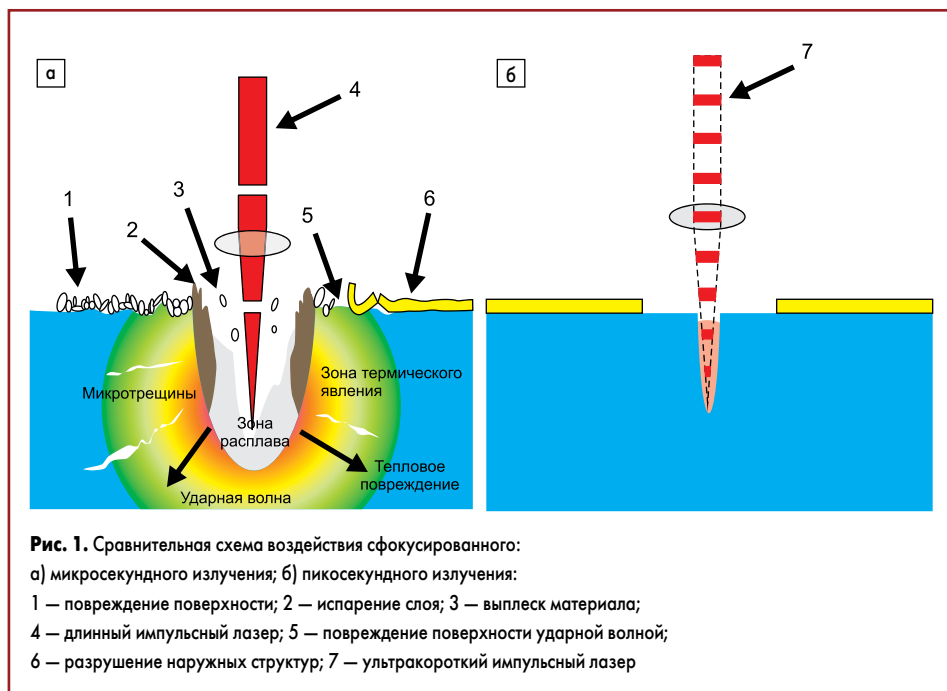


Рис. 1. Сравнительная схема воздействия сфокусированного:

а) микросекундного излучения; б) пикосекундного излучения:

- 1 — повреждение поверхности; 2 — испарение слоя; 3 — выплеск материала;
- 4 — длинный импульсный лазер; 5 — повреждение поверхности ударной волной;
- 6 — разрушение наружных структур; 7 — ультракороткий импульсный лазер

обработки пьезоэлектрической керамики [1] сериями импульсов. Тепловое влияние приводило к изменениям пьезоэлектрических свойств материала, которые восстанавливались после отжига при температуре +1050 °С. Основным недостатком лазеров наносекундного диапазона длительности импульса является значительная дефектная зона, образующаяся за счет слабого поглощения излучения материалами подложек.

Новые пикосекундные лазеры, пригодные для промышленных целей (серия RAPID, Lumera Laser Ltd.; DUETTO TIME-BANDWIDTH PRODUCTS, Швейцария; PL10100TH, EXPLA, Литва, и серия Talisker, Coherent Inc.), пока имеют ограниченное применение вследствие высокой стоимости, превышающей 200 тыс. евро, что в 2–3 раза выше стоимости наносекундных лазеров с диодной накачкой и волоконных лазеров и почти в 10 раз дороже лазеров на парах меди. Поэтому наносекундные лазеры занимают достаточно прочные позиции в системах микрообработки материалов.

Основной проблемой применения пикосекундных и фемтосекундных лазеров для микрообработки остается образование экранирующей лазерное излучение плазмы при воздействии на обрабатываемую поверхность. Это обусловлено высокой пиковой мощностью лазерного импульса и, как следствие, высокой плотностью мощности в зоне воздействия излучения. Одним из способов противодействия этому может быть применение высоких частот следования лазерных импульсов. Обнаружено [2], что при $f \geq 4$ кГц результаты абляционного воздействия в воздухе подобны тем, которые достигаются под действием единичных лазерных импульсов в вакууме. На основании данных эксперимента, а также оценок параметров лазерной плазмы и газовой среды сделан вывод о существовании долгоживущей области горячего разреженного газа. Возникающее разрежение уменьшает экранирующее влияние приповерхностной

плазмы, образующейся под действием последующих импульсов. Это позволяет использовать лазеры с высокой частотой повторения импульсов для достижения условий абляции, близких к вакуумным, не осложняя процесс микрообработки применением вакуумных камер и устройств откачки.

Более сложный способ борьбы с плазменной экранировкой — дополнительное применение наносекундного лазерного излучения [3]. Столь сложный и дорогой способ может быть рационален для сверления глубоких (более 2 мм) отверстий. Использование режима BURST позволяет минимизировать экранирующее влияние плазмы, повысить производительность лазерной обработки и чистоту поверхности получаемого реза. Принцип такого режима заключается в разбиении пикосекундного импульса на несколько последовательных импульсов с возможностью регулировки интенсивности каждого из них.

Ультрабыстрые лазеры имеют большое практическое значение в том смысле, что минимизируют или полностью устраняют формирование нежелательных особенностей лазерной обработки (наплывы, неровности) [4] при фрезеровании таких материалов, как металлы, керамика и стекло. Порог абляции этих материалов обычно находится в диапазоне 0,2–2 Дж/см² [5]. Он достигается фокусировкой излучения в пятно диаметром не более 10 мкм. Энергия импульса находится в диапазоне 1–50 мкДж.

Для лазерной микрообработки материалов Lumera Laser GmbH предлагает пикосекундные лазеры серии RAPID (RAPID, SUPER RAPID, HYPER RAPID 25, HYPER RAPID 50). Пикосекундные лазеры с их короткими тепловыми глубинами проникновения и высокими частотами следования импульсов обеспечивают хороший компромисс, поскольку могут достигнуть высокой производительности и значительно ограничивают пагубные влияния от высокой тепловой нагрузки и больших температурных градиентов в материале.


Рис. 2. Пикосекундный лазер Lumera

На рис. 1 представлена сравнительная схема воздействия сфокусированного излучения пикосекундного и наносекундного излучения [5].

Приведенная схема отражает преимущества обработки материала ультракороткими импульсами лазерного излучения. К таким преимуществам относятся отсутствие зоны термического влияния (HAZ, heat affected zone), ударной волны, микротрещин, оплавленных зон и вышлеков, теплового повреждения поверхностных слоев материала.

Использование Burst mode (режим пачек) позволяет уменьшить шероховатость поверхности и увеличить съем материала до 8 раз. Пикосекундный лазер производства Lumera Laser GmbH (Германия) представлен на рис. 2.

Установка лазерной обработки материалов ЭМ-290

Установка лазерной обработки ЭМ-290 (рис. 3) предназначена для формирования сквозных отверстий в кристаллах без изменения физических свойств кристалла и лазерной резки подложек. Установка оснащена

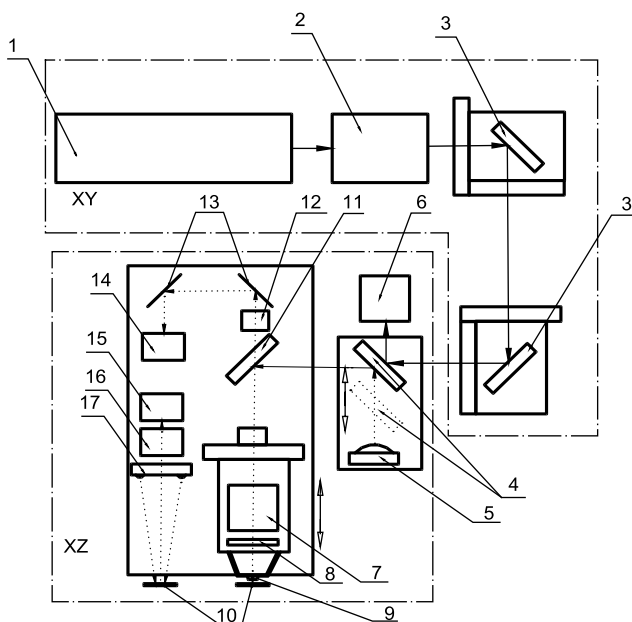

Рис. 3. Установка лазерной обработки ЭМ-290

пикосекундным лазером SUPER RAPID HE (LUMERA Laser GmbH, Германия) с программно задаваемыми параметрами лазерного излучения, генерирующим излучение $\lambda = 355$ нм средней мощности 1 Вт (при $f_{\text{мод}} = 50$ кГц) с частотой следования лазерных импульсов 0–1000 кГц и ультракороткой длительностью импульса ~ 10 пс, что позволяет проводить размерную лазерную обработку материалов в режиме «холодной абляции» без изменения их физических свойств.

Управление установкой осуществляется при помощи персонального компьютера. Рабочая программа загружает файл системы AutoCAD, содержащий топологию лазерной обработки. Для получения более высоких точностей лазерной обработки в установке применена

схема лазерно-оптических каналов, приведенная на рис. 4. Лазерная обработка представляет собой цикл перемещений обрабатываемой заготовки относительно неподвижного лазерного луча. Повышение точности лазерной обработки достигнуто за счет использования для перемещения обрабатываемой пластины точных приводов с обратной связью по положению. Применение объектива ($F \sim 100$ мм) и телескопического устройства (увеличение от $3\times$ до $8\times$) позволяет работать с лазерным лучом диаметром в несколько микрон. Техническая характеристика установки приведена в таблице 1.

Наиболее распространенным способом формирования реза можно считать метод одно- или многократного обхода сфокусиро-


Рис. 4. Схема лазерно-оптических каналов установки:

- 1 — лазерный излучатель;
- 2 — система телескопическая;
- 3 — поворотное зеркало лазерного излучения;
- 4 — зеркало блока шторки;
- 5 — осветитель совмещенного канала;
- 6 — устройство контроля мощности с преобразователем лазерного излучения;
- 7 — объектив совмещенного канала;
- 8 — защитное стекло;
- 9 — воздушное сопло;
- 10 — поверхность обрабатываемой пластины;
- 11 — юстировочное зеркало;
- 12 — согласующая линза устройства формирования изображения совмещенного канала;
- 13 — поворотные зеркала устройства формирования изображения совмещенного канала;
- 14 — видеокамера совмещенного канала;
- 15 — видеокамера разнесенного канала;
- 16 — объектив разнесенного канала (объектив TV);
- 17 — осветитель разнесенного канала

ванном лучом выбранного контура. Однако такой способ имеет ограничения по толщине обрабатываемого материала, когда из-за экранирования излучения стенками реза по мере его углубления происходит уменьшение и полное прекращение съема материала.

На рис. 5 приведена схема формирования лазерного реза, которая может быть использована для прецизионной лазерной резки и фрезерования материалов [6]. Данная схема работает по принципу «вложенных контуров» с разбивкой реза. Разбивка реза применяется для устранения экранировки излучения стенками формируемого реза, что позволяет выполнять резку материала требуемой толщины. Каждый «вложенный контур» представляет собой единичный рез. Ширина реза D определяется количеством единичных резов n , расположенных на расстоянии QY друг от друга, и зависит от толщины обрабатываемой пластины (глубины реза) и величины критического угла ($\alpha_{кр} \sim \beta/2$).

Съем материала происходит послойно при перемещении обрабатываемой пластины относительно лазерного луча по направлениям X, Y с последующей перефокусировкой луча QZ до требуемой глубины T . Перекрывание отпечатков лазерного луча O_d в единичном резе определяется по формуле:

$$O_d = (1 - V/(2w_0f)), \quad (4)$$

где V — скорость перемещения стола с пластиной относительно луча; w_0 — диаметр пятна в фокусе; f — частота следования лазерных импульсов.

При малых скоростях привода перемещения обрабатываемой пластины перекрытие может приближаться к 100%. Угол наклона стенки $\beta/2$ может достигать 2–10°. Точность лазерной обработки и высокая чистота поверхности при формировании реза достигаются благодаря тому, что доводка поверхности реза происходит при воздействии излучения под критическим углом к данной поверхности ($\alpha_{кр} \sim \beta/2$) [6].

За счет увеличения площади пятна на стенке реза при увеличении наклона стенки снижается плотность мощности излучения. В результате воздействия излучения на стенку вблизи критического угла достигается минимальный съем материала за цикл. Перегрева материала, прилегающего к зоне обработки, не происходит благодаря малой длительности импульсов (около 10 пс).

Под критическим углом обработки понимается предельная величина наклона оси лазерного луча к поверхности стенки реза, при которой еще возможен съем материала лазерным излучением. Величина критического угла $\alpha_{кр}$ зависит от теплофизических параметров обрабатываемого материала, коэффициентов отражения и поглощения, а также от величины плотности потока лазерного излучения в зоне обработки. Величина плотности потока излучения, в свою очередь, зависит от энергии, длительности лазерного импульса и величины площади пятна на наклонной стенке реза обрабатываемого материала.

Таблица 1. Техническая характеристика установки лазерной обработки ЭМ-290

Наименование параметра	Значение
Толщина обрабатываемых пластин	0,15–1 мм
Минимальный диаметр обрабатываемого отверстия	0,1 мм
Воспроизводимость положений границ вырезаемых отверстий, не более	0,005 мм
Отклонение диаметра входного отверстия от диаметра выходного отверстия в пьезоматериале, не более	0,005 мм (5%)
Максимальная величина скола, не более	0,04 мм
Скорость резки алюмооксидной керамики толщиной 0,25 мм, не менее	2 мм/с
Время сверления отверстия диаметром 100 мкм в пластине пьезокварца толщиной 0,5 мм, не более	30 с
Поле обработки	150×150 мм
Погрешность перемещения координатного стола XY на длине 150 мм, не более	±0,004 мм
Минимальная дискретность перемещений X, Y, не более	0,001 мм
Воспроизводимость перемещений координатного стола по X, Y, не более	0,004 мм
Максимальная скорость перемещения координатного стола по X, Y, не менее	300 мм/с
Загрузка-выгрузка обрабатываемой пластины	ручная
Ориентация обрабатываемой пластины	полуавтоматическая
Лазерная обработка с заданными параметрами	автоматическая
Габаритные размеры установки (Д×Ш×В), не более	2500×1300×1500 мм
Масса установки, не более	2000 кг

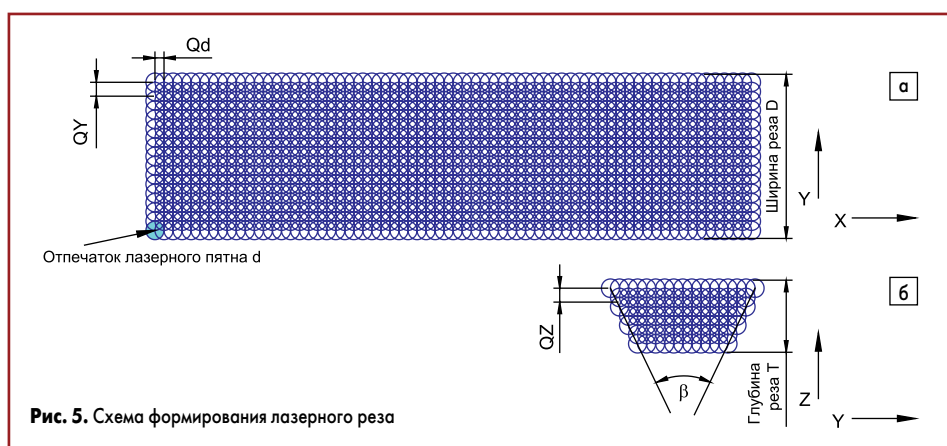


Рис. 5. Схема формирования лазерного реза

Лазерная микрообработка материалов

Для сравнения и анализа качества лазерной микрообработки материалов использованы установки MACROMAC (Lumera Laser GmbH, Германия) и ЭМ-290 (ГНПО «Планар», Беларусь). Для экспериментальных работ в установке MACROMAC с лазером SUPER RAPID (355 нм) средняя мощность излучения составляла 4 Вт, длительность импульса 15 пс. Обрабатываемые материалы — пьезокварц, танталат, лангасит, ниобат лития, алюмооксидная керамика (Al_2O_3), кремний. В таблице 2 приведены параметры лазерной обработки. Образцы после лазерной обработки протирались салфеткой, смоченной

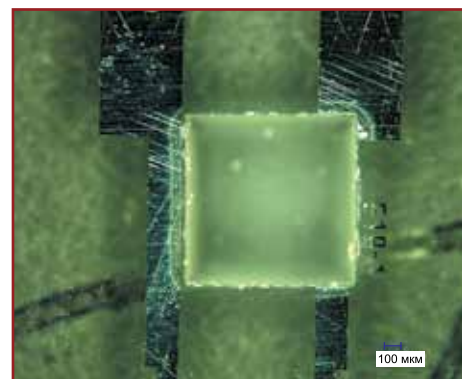


Рис. 6. Фрезеровка пьезокварца толщиной 0,35 мм (1×1 мм), глубина 0,278 мм

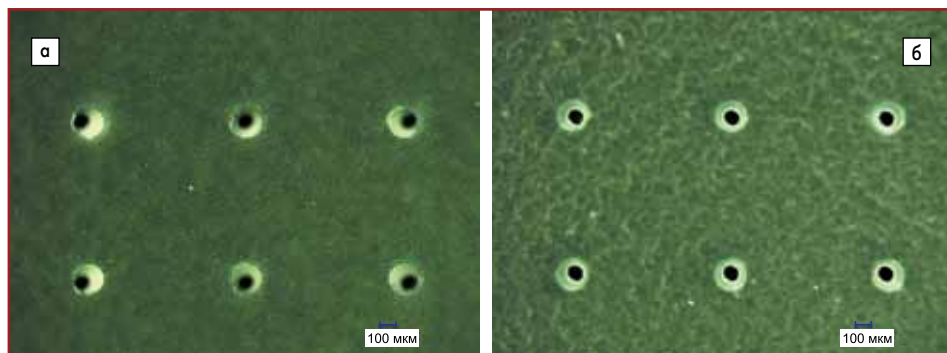


Рис. 7. Сверление отверстий в пьезокварце толщиной 0,35 мм: а) вид со стороны входа луча; б) вид со стороны выхода луча

Таблица 2. Тестовые обработки материалов

Материал (толщина, мм)	Операция	Частота, кГц	Средняя мощность, мВт	Энергия в импульсе, мкДж	Скорость, мм/с	Количество проходов	Время, с	Качество
Пьезокарц (0,35)	Фрезеровка (1×1 мм), глубина 0,278 мм	20	400	20	10	5	180	хорошее
Пьезокарц (0,35)	Фрезеровка (1×1 мм), глубина 0,35 мм	100	2000	20	200	20	60	отличное
Пьезокарц (0,35)	Фрезеровка (1×1 мм), глубина 0,3 мм	100	2000	20	300	30	60	отличное
Пьезокарц (0,35)	Фрезеровка (1×1 мм), глубина 0,3 мм	100	2000	20	400	40	60	отличное
Пьезокарц (0,35)	Фрезеровка (1×1 мм), глубина 0,3 мм	100	2000	20	500	50	60	отличное
Пьезокарц (0,35)	Сверление (5×6 мм), отверстие Ø0,1 мм	50	1000	20	80, 100, 120, 140, 160	5 (6, 7, 8, 9, 10)	8	отличное
Пьезокарц (0,35)	Сверление (5×5 мм) отверстие Ø0,1 мм	50	1000	20	80, 100	6, 7, 8, 9, 10	6	отличное
Пьезокарц (0,35)	Сквозной рез длиной 4 мм, ширина 0,1 мм (20 линий, шаг 5 мкм)	20	400	20	10	6, 9, 12, 15, 18	260	очень хорошее
Пьезокарц (0,35)	Скрайбирование, 2 реза длиной по 10 мм, ширина около 0,1 мм (20 линий, шаг 5 мкм)	200	4000	20	100	10	9	очень хорошее
Танталат (0,35)	Сверление (4×5 мм), отверстие Ø0,1 мм	4, 10, 20, 50	1 Вт при 50 кГц	20	5, 10, 15, 20	5, 10, 15, 20	15	хорошее
Ниобат лития (0,5)	Сверление (7×4 мм), отверстие Ø0,1 мм	4, 10, 20, 50	1 Вт при 50 кГц	20	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	15	отличное
Лангасит (0,5)	Сверление отверстий Ø0,1 мм	10	200	20	5	16	110	хорошее
Поликор (1)	Сверление отверстий Ø0,1 мм	80	4000	50	40	25	230	хорошее
Кремний (0,35)	Рез длиной 5 мм, ширина 0,1 мм (20 линий, шаг 5 мкм)	200	4700	23,5	200	50	22	хорошее
Кремний (0,35)	Скрайбирование, 5 резов длиной по 10 мм, ширина 0,02 мм, глубина 0,02 мм	200	4700	23,5	200	5, 10, 15, 20, 25	1,3	хорошее

изопропиловым спиртом, так как вблизи реза имелся налет мелкодисперсных шлаков (без пригаров). Материалы обработаны при помощи лазерного луча, перемещающегося гальванометрическими приводами (сканирование луча по координатам X, Y). Фокусное расстояние линзы примерно 100 мм. Диаметр луча на выходе из лазера 1,2 мм. Лазерный канал содержал телескоп 3× и λ/4-пластину для компенсации влияния линейной поля-

ризации излучения. λ/4-пластина находилась в оправе-держателе и имела возможность регулировки угла поворота (перпендикулярно лучу). На рис. 6 и 7 представлены фотографии обработанных материалов.

Для проведения экспериментальных работ использовалась установка лазерной обработки ЭМ-290 с лазером SUPER RAPID HE (355 нм), средняя мощность излучения до 4 Вт, длительность импульса 15 пс. Виды эксперимен-

тальных работ — сверление отверстий, фрезерование, скрайбирование. Обрабатываемые материалы — пьезокарц, алюмооксидная керамика (Al₂O₃), кремний.

При обработке материалы перемещались приводом X, Y относительно неподвижного лазерного луча с линейной скоростью 1 мм/с. Фокусное расстояние линзы 100 мм. Диаметр луча на выходе из лазера 1,2 мм. Лазерный канал содержал телескоп и λ/4-пластину для компенсации влияния линейной поляризации излучения (λ/4-пластина находилась в оправе-держателе и имела возможность регулировки угла поворота перпендикулярно лучу). На рис. 8 приведены фотографии лазерной обработки пьезокарца.

Заключение

Анализ методов и технологий лазерной размерной обработки материалов в производстве МЭМС показал, что наиболее перспективным способом лазерного формирования отверстий в кристаллических подложках и резов без изменения физических свойств кристалла является лазерная микрообработка при помощи пикосекундного лазера. Преимущества обработки материала ультракороткими импульсами лазерного излучения заключаются в отсутствии зоны термического влияния, ударной волны, микротрещин, оплавленных зон и выделений, теплового повреждения поверхностных слоев материала.

Поскольку лазерная обработка по схеме формирования реза неподвижным лучом имеет ограничения по производительности, возможен комбинированный вариант с использованием лазерной обработки неподвижной пластины путем формирования реза перемещением луча гальванометрическими сканерами с небольшим полем сканирования (обработки) и перемещениями пластины без лазерной обработки относительно точек поля сканирования.

Качество лазерной обработки (сверление, фрезеровка, резка, скрайбирование) может быть высоким с шероховатостью $Ra < 1\mu$ при тщательном подборе следующих технологических параметров: частоты следования лазерных импульсов f , средней мощности излучения P (зависит от f), диаметра пятна в фокусе d , скорости перемещения луча V , коэффициента перекрытия лазерных импульсов % *overlap* (зависит от f и V), энергии в импульсе E , количества проходов N , шага заполнения контура S .

Производительность лазерной обработки существенно зависит от скорости перемещения луча относительно заготовки. В некоторых случаях на больших (оптимальных) скоростях она может увеличиваться до 10 раз. Оптимальные скорости сверления отверстий диаметра 100μ для материалов находятся в диапазоне 80–100 мм/с.

Литература

1. UV LASER MICROMACHINING OF PIEZOELECTRIC CERAMIC USING A PULSED ND: YAG LASER/Zeng D. W.,

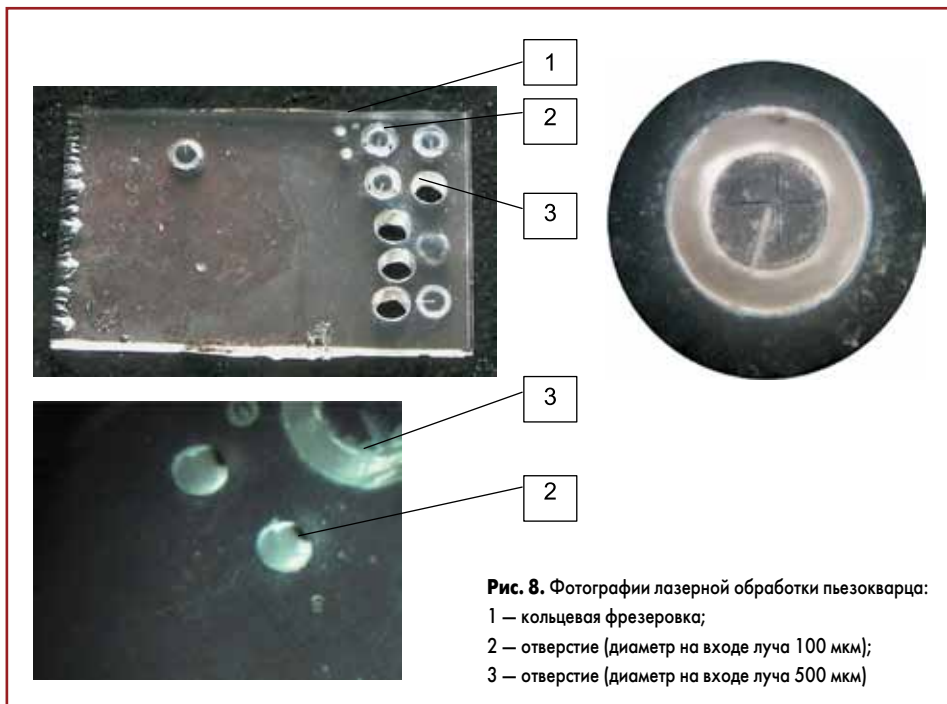


Рис. 8. Фотографии лазерной обработки пьезокарца:
1 — кольцевая фрезеровка;
2 — отверстие (диаметр на входе луча 100 мкм);
3 — отверстие (диаметр на входе луча 500 мкм)

- LiK. C. K. Yung, Chan H. L. W., Choy C. L., Xie C. S. // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2004. V. 78. № 3.
2. Климентов С. М., Пивоваров П. А., Конов В. И., Брайтинг Д., Даусингер Ф. Лазерная микрообработка в газовой среде при высокой частоте повторения аблирующих импульсов // Квантовая электроника. 2004. Том 34. № 6.
3. Smetanin S., Fedin A., Gavrilov A., Solokhin S., Basiev T., Garnov S., Klimentov S., Pivovarov P. High rate ablative formation of ultra-deep channels by self-adaptive Nd: YAG laser with dynamically adjustable passive Q-switch // Proc. SPIE 6985, Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies, 69850B, January 15. 2008.
4. Karnakis D. M., Knowles M. R. H., Petkov P. V., Dobrev T. and Dimov S. S. Surface integrity optimisation in ps-laser milling of advanced engineering materials // Proceedings of the 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2007. Munich, June 2007.
5. www.LUMERA-LASER.com
6. Ретюхин Г. Е., Кощев А. Г., Файн И. В., Шершнева Е. Б. Размерная обработка ювелирных алмазов излучением YAG: Nd-лазера с модулированной добротностью // Весті НАН Беларусі. Сер. физ.-техн. навук. 2001. № 1.