

# ЛАЗЕРНАЯ ПРОБИВКА ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В САПФИРЕ

В РАБОТЕ ПРИВЕДЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБИВКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНОМ КРИСТАЛЛЕ САПФИРА. ОПИСАН КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ДИАМЕТРОМ  $0,2 \div 0,3$  ММ, ГЛУБИНОЙ БОЛЕЕ 10 ММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОГО И МИЛЛИСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ.

Задача пробивки глубоких отверстий в оптически прозрачных материалах (стекло, кремний, кварц, сапфир и др.) для микроэлектроники и приборостроения является актуальной и трудновыполнимой [1]. Тем не менее в работе [2] утверждается, что «сверхкороткие лазерные импульсы способны обрабатывать различные материалы, практически не затрагивая областей, окружающих зону воздействия, в том числе и материалов, прозрачных для излучения умеренной интенсивности». За нижнюю границу абляции фемтосекундными лазерными импульсами принимается плотность мощности  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> при длительности импульса 100 фс [3]. Использование для пробивки отверстий излучения более низкой интенсивности требует создания на поверхности оптически прозрачного материала микродефектов, приводящие к образованию плазмы и резкому возрастанию поглощению лазерным излучением [4]. В настоящей работе описаны результаты экспериментальных исследований пробивки импульсным лазерным излучением отверстий диаметром  $0,2 \div 0,3$  мм и глубиной более 10 мм в пластине оптически прозрачного монокристалла сапфира.

Пластина оптически прозрачного сапфира размером  $100 \times 100 \times 12$  мм со следами пробивки отверстий фемтосекундным импульсным лазерным излучением представлена на **рис. 1**. Параметры импульса: длительность импульса ( $\tau$ ) 100 фс, энергия в импульсе (E) 100 мДж, частота импульсов (f) 100 Гц, время обработки одного отверстия (t) 10 сек. Параметры отверстия: диаметр отверстия — 2 мм, глубина отверстия — 2 мм.

Попытки получить отверстия большей глубины с использованием фемтосекундного облучения привели к образованию трещин и разрушению кристалла в зоне обработки (**рис. 1а**). Трещины стали результатом перегрева сапфира из-за образования высокотемпературной плазмы продуктов абляции. При малой глубине отверстий образующаяся плазма успевает остыть из-за большого угла рассеивания. При достижении глубины отверстия 2 мм проявляется туннельный эффект, существенно

уменьшающий угол рассеивания плазмы. Это приводит к снижению эффективного охлаждения плазмы, повышению температуры в зоне обработки, перегреву кристалла и образованию термических трещин.

Поверхность сапфира в зоне абляции (**рис. 1б, в**) представляет собой пемзообразную пористую структуру с дефектами субмикронного и микронного диапазона типа «скопление пингвинов» [5]. Такая поверхность имеет коэффициент поглощения близкий к 100%. Это позволяет использовать для пробивки отверстий в сапфире лазерное излучение в режиме свободной генерации. На **рис. 2** представлены фото отверстия в сапфире со средним диаметром 0,2 мм и глубиной более 10 мм. Внешний вид отверстий исследовался на микроскопах НЕОРНОТ-30 и СЭМ LED 1450.

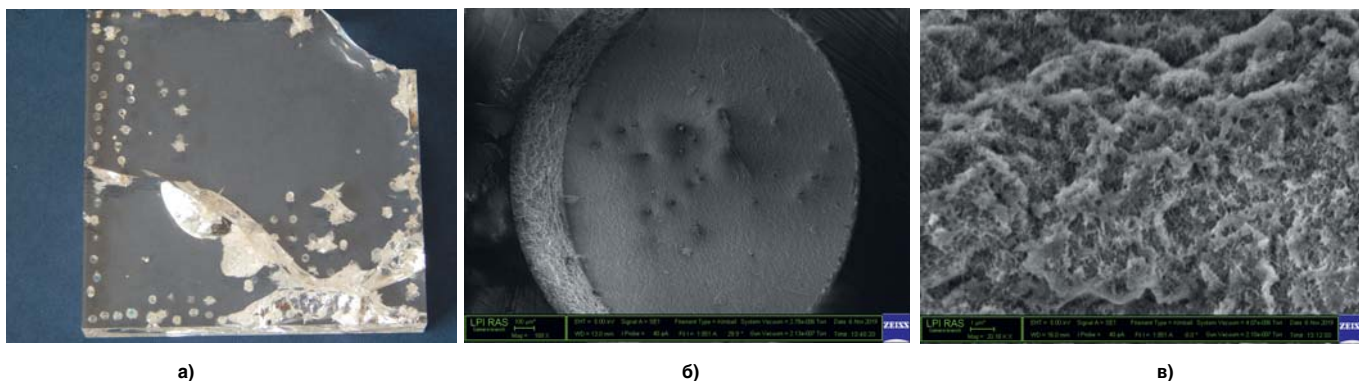
Эскиз глубокого отверстия, полученного комбинированным методом последовательного облучения фемтосекундными и миллисекундным импульсами лазерного излучения, представлен на **рис. 3**.

Форма импульса излучения миллисекундного диапазона для пробивки глубокого отверстия представлена на **рис. 4**. Параметры импульса: E = 15 Дж;  $\tau$  = 15 мс;  $\lambda$  = 1,06 мкм.

Отверстие в сапфире представляет собой прямолинейный канал глубиной более 10 мм с диаметром 0,5 мм на поверхности. Основная протяженность канала представляется в виде цилиндра с диаметром 0,2 мм и высотой 7 мм (**рис. 2б, рис. 3**). В конце канала образуется конус (кern) с диаметром  $10 \div 20$  мкм и длиной до 100 мкм. Размер острия керна  $1 \div 2$  мкм (**рис. 1в, рис. 3**).

Пробивка глубоких отверстий в оптически прозрачных материалах представляет собой комбинированный самосогласованный процесс, состоящий из пяти этапов.

**1 этап.** Облучение поверхности оптически прозрачного сапфира импульсным излучением фемтосекундной длительности для абляции материала с целью образования на глубине  $1 \div 2$  мм дефектов структуры типа «скопление пингвинов» субмикронного и микронного ди-



**Рис. 1.** Пластина сапфира после фемтосекундного воздействия: а) фото внешнего вида пластины сапфира; б) фото отверстия, полученного фемтосекундными импульсами; в) фото структуры дна отверстия.



а) б)

Рис. 2. Глубокое отверстие в сапфире, полученное миллисекундным лазерным импульсом: а) фото внешнего вида поверхности отверстия; б) фото профиля отверстия.

апазона. В эксперименте использовалась лазерная установка с параметрами:  $\tau = 100$  фс;  $E = 100$  мДж;  $f = 100$  Гц;  $t = 10$  сек.

**2 этап.** Облучение структурированной поверхности сапфира после фемтосекундной абляции лазерным излучением миллисекундной длительности с оптимизированной формой импульса и параметрами:  $E = 15$  Дж;  $\tau = 15$  мс;  $\lambda = 1,06$  мкм; диаметр фокусировки 0,3 мм. Нарастающий передний фронт энергии импульса излучения от 0 до 5 Дж, длительностью 13 мс (рис. 4) при условии полного поглощения энергии в плоскости фокусировки, позволяет создать на поверхности излучения локальные плотности мощности структурированной поверхности  $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Это необходимое условие для образования первичного капилляра в виде зерна диаметром 10 мкм и длиной 100 мкм.

**3 этап.** Концентрация пика мощности излучения ( $E = 10$  Дж;  $\tau = 2$  мс) в первичном капилляре многократно усиливается за счет эффекта самофокусировки (диаметр острого зерна  $1 \div 2$  мкм) и достигает плотности мощности порядка  $10^{11} \div 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Это приводит к «лавиной» ионизации материала и формирует микрообъем плазмы» [4].

**4 этап.** Хорошо поглощающая остаток импульса плазма, спонтанно развивается в направлении излучения, образуя глубокий пустотный канал за счет выноса материала.

**5 этап.** Высокотемпературная плазма оплавляет прилегающую к ней поверхность канала. Быстрое остывание жидкой фазы формирует структуру затвердевшего расплава на стенках канала и способствует появлению в радиальном направлении зоны растрескивания шириной  $50 \div 60$  мкм по всей глубине канала (рис. 2б, рис. 3).

**Заключение**

Эксперимент доказывает, что достижение плотности мощности порядка  $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>, необходимое для начала пробоя в оптически прозрачных материалах, возможно не только для лазеров со сверхкороткими длительностями импульсов, но и для лазеров миллисекундного диапазона при соответствующем предварительном структурировании поверхности фемтосекундным излучением. Комбинированный метод (фемтосекундное плюс миллисекундное излучение) позволяет более эффективно получать глубокие отверстия (более 10 мм) в оптически

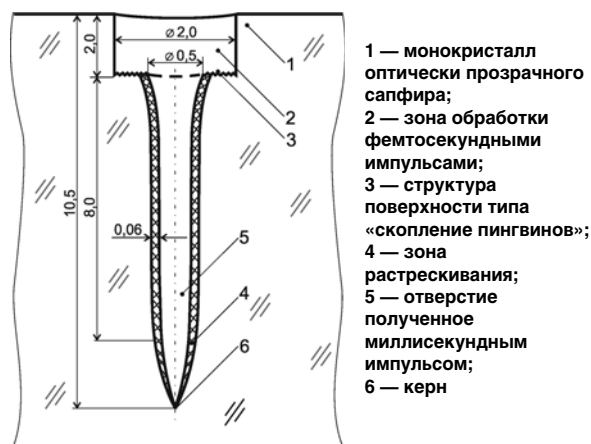


Рис. 3. Эскиз поперечного осевого сечения отверстия в монокристалле сапфира, полученного методом комбинированного лазерного облучения.

прозрачных материалах с отношением глубины отверстия к диаметру отверстия — 50 и более. Это открывает новые возможности использования мощных импульсных YAG-лазеров миллисекундного диапазона длительности для размерной обработки оптически прозрачных материалов.

А. А. Гусев, к. т. н., Г. В. Гусева,  
Самарский филиал Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Физический институт имени  
П. Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН),  
г. Самара, Россия (gusev\_aa@fian.smr.ru)  
С. И. Жученко, П. А. Огин,  
Тольяттинский Государственный Университет (ТГУ),  
г. Тольятти, Россия.

**Литература**

1. В. Л. Ланин, А. И. Ланин, А. П. Первенецкий. Исследование лазерной прошивки отверстий в кремнии при формировании 3D структур // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения «INTERMATIC-2018». Материалы научно-технической конференции, Москва. 19–23 июня 2018/ МИРЭЛ — Российское техническое издательство. М. 2018. С. 392–393.
2. В. А. Исаков. Обработка материалов сверхкороткими лазерными импульсами // Лазер-Информ. 2003. № 16 (271). С. 8–12.
3. Е. Д. Вакс, М. Н. Милнький, А. П. Сапрыкин // Практика прецизионной лазерной обработки // М. Техносфера. 2013. С. 606.
4. И. Н. Завестовская // Лазерное наноструктурирование поверхности материалов. Квантовая электроника. 2010. № 11 (40). С. 942–954.
5. Е. Артамонова, О. Хаит, А. Алексеев, Д. Русов // Лазерная вырезка сквозных микроотверстий в прозрачных пьезоматериалах // Фотоника. 2008. № 4. С. 34–37.

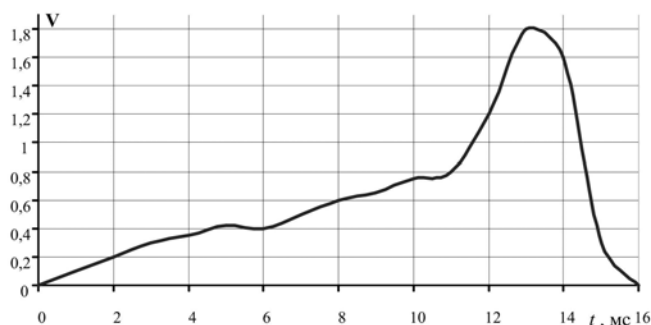


Рис. 4. Форма импульса излучения для пробивки глубокого отверстия