

# Высокоскоростное аблирование сверхглубоких каналов фазово-сопряженным Nd : ИАГ-лазером с динамически регулируемой пассивной модуляцией добротности

Т.Т.Басиев, С.В.Гарнов, С.М.Климентов, П.А.Пивоваров,  
А.В.Гаврилов, С.Н.Сметанин, С.А.Солохин, А.В.Федин

*Исследованы параметры высокоскоростного аблирования сверхглубоких каналов при регулируемом импульсно-периодическом облучении цугами импульсов одномодового фазово-сопряженного Nd : ИАГ-лазера с динамическим резонатором с частотой повторения импульсов в цуге 40–250 кГц, их длительностью 20–200 нс и энергией 70–250 мДж. Найдены оптимальные параметры обработки, при которых в сверхглубоком канале поддерживается долгоживущая область горячего разреженного газа, уменьшающая экранирующее действие приповерхностной плазмы. Применение метода управления процессом лазерной генерации во время абляции оптимизирует процессы не только нагрева и плазмообразования, но и выноса обрабатываемого материала в паузе между лазерными импульсами. Использование адаптивного регулирования параметров генерации лазера в процессе аблирования позволило получить сверхглубокие каналы длиной 8–27 мм с диаметрами входных и выходных отверстий 80–300 мкм в металлах (алюминий, сталь, никелевый суперсплав Inconel 718) и сверхтвердой керамике ( $Al_2O_3$ , AlN, SiC).*

**Ключевые слова:** аблирование, сверхглубокий канал, приповерхностная плазма, многоимпульсное облучение, регулируемая модуляция добротности.

## 1. Введение

Высокоскоростное лазерное сверление глубоких каналов диаметром несколько десятков микрон представляет значительный интерес для использования во многих отраслях науки и техники [1, 2]. Геометрия таких каналов обычно характеризуется аспектным отношением, т. е. отношением их глубины к диаметру. Наибольшие аспектные отношения ( $\sim 300 - 600$ ) традиционно получают при лазерной обработке полимерных материалов [2], обладающих объемным поглощением и очень низким порогом разрушения, не превышающим порог возникновения приповерхностной плазмы, что позволяет избежать плазменной экранировки лазерного излучения в процессе сверления. Однако при лазерной обработке конструкционных материалов (металлов, керамики и др.) влияние плазменной экранировки при глубоком сверлении становится существенным, вызываемые ею потери и уширение каналов из-за бокового разлета плазмы приводят к снижению аспектного отношения получаемых каналов до 40 [3]. Эффективность лазерной абляции и скорость сверления при этом сильно зависят от параметров экранирующей плазмы и, как правило, значительно снижаются. При углублении канала плотность и экранирующее действие плазмы дополнительно повышаются из-за ограничения ее расширения [4].

Уменьшение экранирующего действия плазмы ранее достигалось при использовании фемтосекундных лазерных импульсов [5] или комбинации цугов пикосекундных и наносекундных лазерных импульсов, следующих с высокой частотой повторения [3]. В последнем случае увеличение скоростей сверления и уменьшение экранировки объяснялось созданием долгоживущей разреженной области газа в окрестности пятна облучения [6]. Однако формирование сверхглубоких каналов с аспектным отношением более 100 и глубиной более 2 мм даже при использовании последовательностей лазерных импульсов требует повышенной энергии этих импульсов, достигаемой обычно при генерации наносекундных гигантских импульсов. При этом для оптимизации процесса и устранения экранировки необходимо управлять генерацией мощного лазера в режиме модуляции добротности.

Как показано в работе [7], использование специального пассивного лазерного затвора (ПЛЗ) на кристалле  $LiF : F_2^-$  с переменным начальным пропусканием позволяет плавно и в широких пределах изменять энергетические и временные параметры выходного излучения (энергию импульсов, их длительность и частоту повторения) мощного одномодового Nd : ИАГ-лазера с динамическим петлевым ОВФ-резонатором. Благодаря самокомпенсации внутррезонаторных искажений при самообращении волнового фронта (само-ОВФ) лазер генерирует импульсно-периодическое излучение высокой мощности с малой расходимостью, близкой к дифракционному пределу. При этом управление параметрами лазерной генерации путем сканирования ПЛЗ с переменным начальным пропусканием в процессе лазерной обработки позволяет осуществлять высокоскоростное формирование каналов глубиной более 10 мм при диаметре отверстий около 100 мкм в различных конструкционных материалах [8].

Т.Т.Басиев, С.В.Гарнов, С.М.Климентов, П.А.Пивоваров. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: basiev@lst.gpi.ru

А.В.Гаврилов, С.Н.Сметанин, С.А.Солохин, А.В.Федин. Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, Россия, Владимирская обл., 601910 Ковров, ул. Маяковского, 19; e-mail: ssmetanin@bk.ru

Поступила в редакцию 14 мая 2007 г.

В связи с этим в настоящей работе исследуются параметры лазерного аблирования сверхглубоких каналов в металлах, сплавах и керамике под действием регулируемого многоимпульсного излучения Nd : ИАГ-лазера с само-ОВФ и динамическим резонатором. Исследования направлены на разработку и создание новой высокопродуктивной технологии лазерной перфорации глубоких и сверхглубоких (аспектное отношение более 100) отверстий микронного диаметра (20 – 300 мкм) в конструкционных материалах, в том числе твердых и тугоплавких. Данная лазерная технология перспективна для решения задач повышения газодинамических свойств газовых турбин и летательных аппаратов, для производства инжекторов топлива, перспективных керамических двигателей и др.

## 2. Лазерная система и метод обработки

Для сверления каналов в различных материалах использовался мощный одномодовый петлевой Nd : ИАГ-лазер с само-ОВФ, пассивной модуляцией добротности и специально оптимизированными для его технологического применения параметрами генерации [9]. Оптическая схема фазово-сопряженного лазера представлена на рис.1. Излучатель лазера состоит из двух квантронов К-301В с эллиптическими зеркальными отражателями, активными элементами размером  $\varnothing 6.3 \times 100$  мм и криптоновыми лампами накачки КДНП-6/90. Блок питания 13 ГДН позволял изменять частоту повторения импульсов накачки от 1 до 30 Гц. Длительность импульсов накачки составляла 200 мкс. Обработка каналов осуществлялась при частоте следования импульсов накачки 10 Гц.

Пассивная модуляция добротности Nd : ИАГ-лазера осуществлялась кристаллом  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  с переменным начальным пропусканием, которое линейно изменялось от 30 % до 76 %. Пропускание ПЛЗ изменялось путем перемещения кристалла  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  перпендикулярно оптической оси резонатора лазера. Это позволяло плавно управлять энергетическими и временными параметрами излучения.

На рис.2 представлены зависимости энергетических и временных параметров излучения от начального пропускания ПЛЗ  $T_0$  при суммарной энергии импульсов накачки лазера 127 Дж и частоте их повторения 10 Гц. Из приведенных зависимостей видно, что при начальном пропускании ПЛЗ 30 % энергия отдельного импульса в пуце достигает 251 мДж, а длительность импульса и частота повторения импульсов в пуце составляют 28 нс и 40 кГц соответственно. Увеличение начального пропускания ПЛЗ до 70 % приводит к увеличению частоты повторения импульсов в пуце до 100 кГц, возрастанию их длительности до 70 нс и числа импульсов в пуце с 7 до 18. При этом энергия каждого отдельного импульса снижается до 134 мДж, а полная энергия всего пуца импульсов увеличивается с 1.76 до 2.42 Дж. Перспективным для применения может быть также лазер без ПЛЗ, параметры ко-

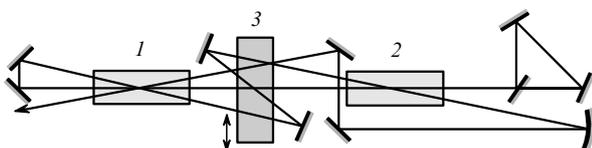


Рис.1. Оптическая схема лазерной системы для сверления отверстий: 1, 2 – активные элементы; 3 – ПЛЗ.

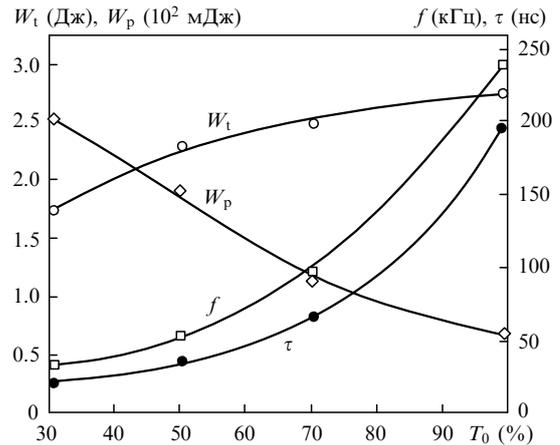


Рис.2. Зависимости параметров выходного лазерного излучения от начального пропускания ПЛЗ  $T_0$ : энергии  $W_t$  пуца импульсов лазерного излучения, энергии  $W_p$  отдельных импульсов в пуце, частоты повторения  $f$  импульсов в пуце и длительности  $\tau$  отдельных импульсов.

торого соответствуют  $T_0 = 100$  % (на рис.2). На рис.3 для сравнения показаны две осциллограммы импульсов лазерной генерации, полученные при использовании ПЛЗ с  $T_0 = 50$  % и без ПЛЗ. Видно, что даже без ПЛЗ петлевой лазер с само-ОВФ генерирует пуцы гигантских эквидистантных импульсов в режиме самомодуляции добротности динамического резонатора, вызванной процессом периодической записи и стирания ОВФ-зеркал непосредственно в лазерной среде [10], с максимальной частотой повторения выходных лазерных импульсов в пуце 250 кГц, их энергией около 40 мДж и длительностью 200 нс.

В настоящей работе основное внимание уделено методу лазерного сверления каналов [11], в котором в процессе формирования каналов осуществляется плавное увеличение энергии и пиковой мощности импульсов лазерного излучения путем перемещения ПЛЗ, обеспечивающего уменьшение  $T_0$  затвора в месте прохождения лазерного пучка. При этом уменьшается экранирующее действие приповерхностной плазмы, т. к. сверление канала начинается при малой пиковой мощности лазерного излучения. Увеличение пиковой мощности и энергии излучения лазера в процессе формирования канала компенсирует уменьшение плотности мощности и энергии на его дне, происходящее обычно по мере углубления аблируемого канала, а также приводит к увеличению давления паров отдачи для выноса обрабатываемого материала со дна глубокого канала, что обеспечивает сверхглубокое сверление. Заметим, что аблирование сверхглубоких ка-

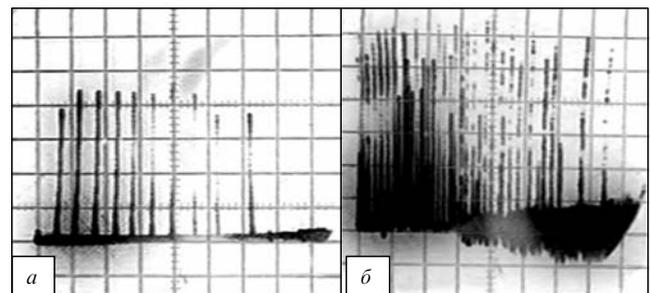


Рис.3. Осциллограммы импульсов лазерной генерации в режиме пассивной модуляции (а) и самомодуляции (б) добротности резонатора. Развертка 20 мкс/дел.

налов с аспектным отношением  $\sim 100$  при диаметре  $\sim 100$  мкм требует для каждого материала подстройки по специальному закону параметров лазерного излучения по мере продвижения зоны взаимодействия в глубь материала при неизменных параметрах фокусировки (диаметр пучка в фокусе составлял 60 мкм при использовании объектива с фокусным расстоянием 100 мм). При этом мы используем частоту многоимпульсного облучения, превышающую 40 кГц, чтобы температура и плотность газовой среды в аблируемом канале не успевали релаксировать до исходного состояния в интервалах между лазерными импульсами [6] и их изменение оказывало существенное влияние на процессы абляции последующими импульсами.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В качестве обрабатываемых материалов использовались сталь, алюминий, а также твердые тугоплавкие материалы – никелевый сплав Inconel 718 и керамика  $Al_2O_3$ , AlN и SiC.

На рис.4 для сравнения приведены фотографии шлифов полученных высокоаспектных каналов в алюминии и стальном образцах, а также шлифа наклонного канала в макете лопатки турбины из суперсплава Inconel 718 при одинаковых условиях фокусировки в пятно диаметром 60 мкм в фокусе. Фотографии даны в одинаковом масштабе. Видно, что форма каналов является иглообразной, т. е. данный метод сверления позволяет не только увеличивать глубину и скорость обработки, но и обеспечивать цилиндричность канала по всей его глубине за исключением концевой части – около 40 % длины канала в алюминии и около 10 % – в стали. Диаметр канала в стали ( $\sim 100$  мкм в цилиндрической части) в 1.6 раза меньше, а его глубина (12 мм) в 1.2 раза больше, чем в алюминии.

Диаграмма изменения  $T_0$  при обработке стальных образцов оптимизирована нами в работе [8]. При этом сверление в стальном образце осуществлялось при изменении начального пропускания ПЛЗ от 70 % до 50 % с линейно уменьшающейся до нуля скоростью изменения  $T_0$  в течение 1 мин (что соответствует 600 цугам лазерных импульсов). Время управляемой обработки стального образца ( $\sim 1$  мин) было в шесть раз меньше времени образования сквозного отверстия в алюминиевом образце толщиной 10 мм. Алюминий является труднообрабатываемым материалом с высокими отражающей способностью, теплоемкостью и теплопроводностью. При этом остывание плазмы за счет теплоотвода на стенки алюминиевого канала происходит на порядок быстрее, чем в канале из стали [6] (температуропроводность алюминия на порядок больше). Расчетная характеристическая частота для алюминия, при которой существенно уменьшается экранировка, также возрастает на порядок и достигает 40 кГц, т. е. попадает в рабочий диапазон частот повторения в цуге импульсов используемого лазера. Поэтому многоимпульсная обработка в режиме повышенной мощности разреженных импульсов излучения (при  $T_0 < 60$  %) приводила к сильной экранировке излучения плазмой, а оптимальная диаграмма изменения  $T_0$  при обработке образцов из алюминия была смещена в сторону больших значений  $T_0$ : от 60 % до 76 %.

Сквозные отверстия в лопатках турбины должны быть полностью цилиндрическими. Для этого по завер-

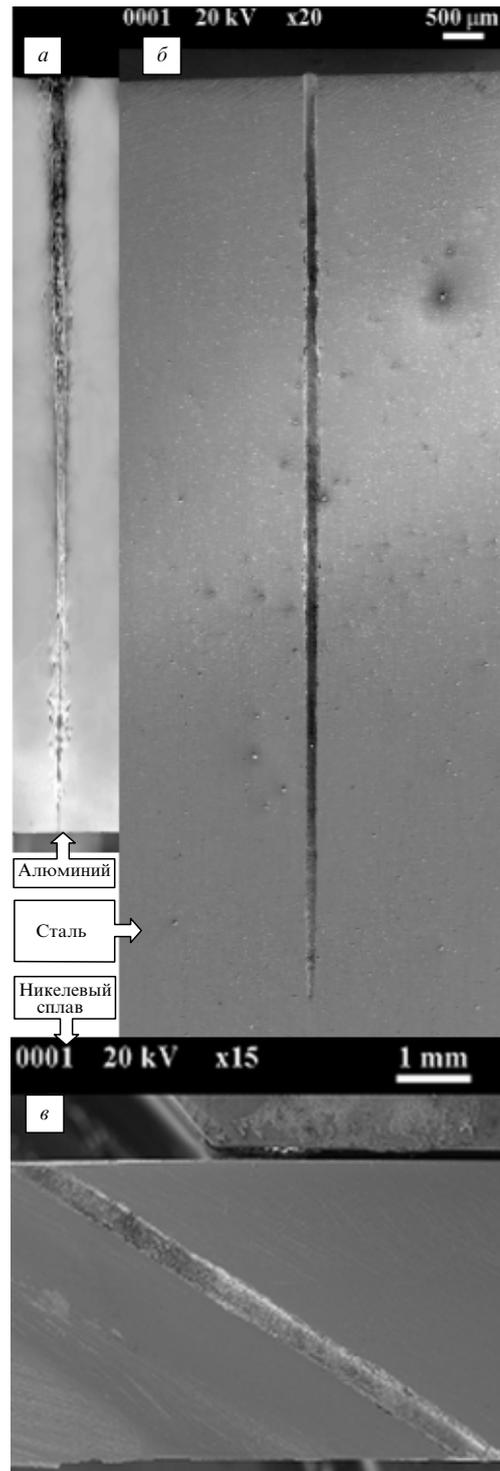


Рис.4. Фотографии шлифов каналов в алюминии (а), стали (б) и никелевом сплаве (в).

шении процесса управляемого сверления сквозного отверстия за 250 цугов импульсов мы применили оригинальный метод расчистки канала. Мы специально инициировали плазму внутри просверленного канала путем уменьшения  $T_0$  ниже 50 %. При этом изменение  $T_0$  от 50 % до 30 % вызывало смещение области локализации плазменного факела назад, а увеличение  $T_0$  от 30 % до 50 % – перемещение плазменного факела вперед по направлению распространения пучка. Такое периодическое сканирование ПЛЗ приводило к увеличению диаметра

канала в месте локализации плазмы, что обеспечивало управление его формой. После расчистки в течение 3 мин (1800 цугов импульсов) получены полностью цилиндрические каналы диаметром 300 мкм и глубиной 7 мм в никелевом сплаве Inconel 718 (рис.4,в). Усредненная скорость образования данных цилиндрических каналов превышает 3 мкм за цуг импульсов, а при повышении частоты импульсов накачки лазера до 30 Гц можно получать более 50 каналов в час (матрица отверстий в лопатке турбины).

Далее мы проводили лазерное аблирование глубоких каналов в твердых тугоплавких керамических материалах –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  и  $\text{SiC}$ . Образцы имели размеры  $8 \times 27 \times 27$  мм. Эксперименты показали, что для каждого образца существует оптимальный режим пассивной модуляции добротности лазера, при котором сверление происходит с максимальной скоростью. На рис.5 представлены фотографии входных и выходных отверстий сквозных каналов глубиной 8 мм в данных образцах. В образце из корундовой керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$  получены полностью цилиндрические сверхглубокие (с аспектным отношением 100) каналы с диаметрами входного и выходного отверстий 80 мкм (рис.5,а) при времени обработки около 1 мин и оптимальном начальном пропускании ПЛЗ  $T_0 = 70\%$ . Для керамики  $\text{AlN}$  (рис.5,б) время обработки возросло в 3.5 раза при меньшем оптимальном значении  $T_0$ , равном 65%. При этом диаметр отверстия на входе в канал составил 150 мкм, а выходное отверстие представляло

собой щель размером  $75 \times 150$  мкм, ориентированную перпендикулярно направлению преимущественной поляризации лазерного излучения. Поляризационная зависимость аблирования данного материала наблюдалась ранее при сквозном сверлении образцов даже малой толщины (около 1 мм) [3]. Третий исследованный керамический материал ( $\text{SiC}$ ) является наиболее труднообрабатываемым. Сквозные отверстия глубиной 8 мм получены в нем при более длительном аблировании (около 10 мин) в режиме «жесткой» модуляции добротности с оптически плотным ПЛЗ ( $T_0 = 50\%$ ). Каналы имели наибольшую конусность: диаметр отверстия на входе в канал составлял 200 мкм, на выходе из него – 20 мкм (рис.5,в).

Из приведенных выше результатов лазерного сверления глубоких каналов в различных керамических материалах можно заключить, что наиболее подходящим материалом для получения рекордно глубоких каналов малого диаметра является керамика  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для этого материала мы исследовали возможности оптимизации процесса обработки с помощью адаптивной подстройки параметров генерации лазера для реализации режима эффективного сверления материала. Это было возможным благодаря визуализации внутриканальных процессов сверления. Дело в том, что на расстоянии 1–2 мм от канала керамика  $\text{Al}_2\text{O}_3$  является прозрачной для свечения нагретой лазерным излучением зоны обработки и можно в прямом эксперименте визуально контролировать лазерное аблирование глубокого канала.

В результате было обнаружено, что светящаяся область, соответствующая наиболее высокой температуре обработки и месту наибольшего выделения энергии, скачкообразно перемещается вдоль канала с частотой  $\sim 1$  Гц в оптимальном режиме абляции. Это позволяет сделать вывод о периодическом характере выноса материала по глубине канала. Адаптивное динамическое регулирование пассивной модуляции добротности лазера в диапазоне  $T_0 = 55\% - 70\%$  позволило просверлить сквозные отверстия вдоль направления наибольшего размера образца (27 мм) из керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Полученные сквозные каналы глубиной 27 мм имели диаметр входного отверстия 250 мкм, диаметр выходного отверстия был значительно (на порядок) меньше. Описанный выше метод расчистки канала по завершении процесса сквозного сверления позволил увеличить диаметр выходного отверстия рекордно глубокого канала до 80 мкм.

#### 4. Заключение

Таким образом, в работе исследованы параметры лазерного аблирования сверхглубоких каналов в металлах, сплавах и керамике при регулируемом облучении пугами импульсов одномодового фазово-сопряженного Nd : ИАГ-лазера с динамическим резонатором с частотой повторения импульсов в цуге 40–250 кГц, длительностью отдельных импульсов 20–200 нс и их энергией 70–250 мДж.

Рост скорости сверления отверстий с большим аспектным отношением достигался за счет образования долгоживущей (десятки микросекунд) области горячего разреженного газа в канале, уменьшающей экранирующее действие приповерхностной плазмы при последующем облучении с высокой частотой повторения импульсов.

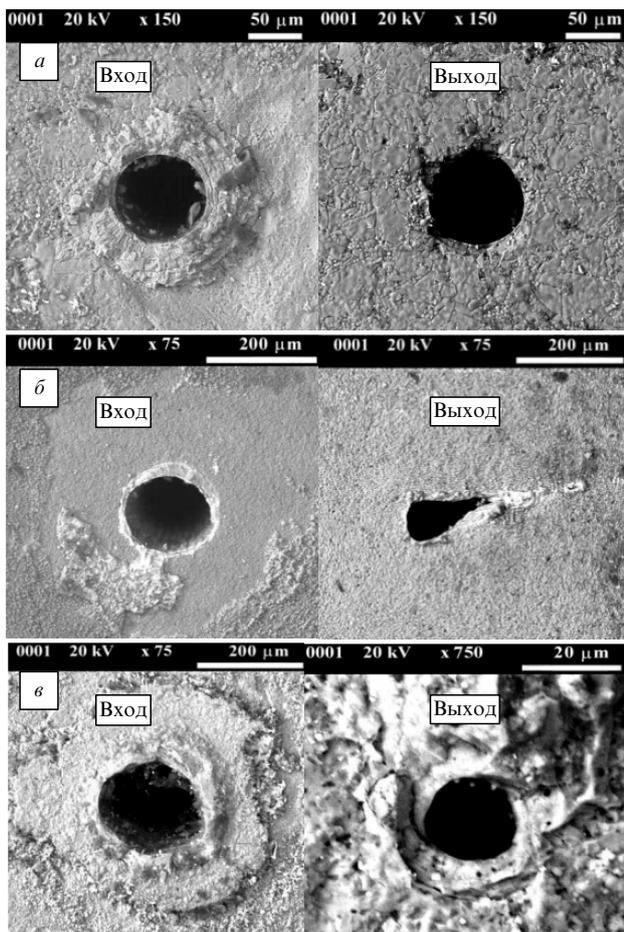


Рис.5. Фотографии входных и выходных отверстий каналов в керамике  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (а),  $\text{AlN}$  (б) и  $\text{SiC}$  (в).

Использование предложенного нами метода управления процессом лазерной генерации с уменьшающейся (с 250 до 40 кГц) частотой повторения импульсов во время абляции оптимизирует процессы не только нагрева и плазмообразования, но и выноса обрабатываемого материала в паузе между лазерными импульсами. Это приводит к увеличению скорости и глубины обработки различных материалов при глубине микрообработки более 7 мм.

Оригинальный метод расчистки канала по завершении процесса сквозного сверления при иницировании плазмы внутри просверленного канала путем использования регулируемой «жесткой» модуляции добротности позволяет уменьшать конусность аблируемых каналов и получать цилиндрические каналы глубиной ~ 10 мм и диаметром 80–300 мкм в различных конструкционных материалах – стали, алюминии, никелевом сплаве и керамике.

Использование визуального контроля при адаптивном регулировании параметров генерации лазера в процессе аблирования керамики  $Al_2O_3$  позволило получить рекордно глубокие каналы длиной 27 мм при диаметре входного отверстия 250 мкм.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05-08-33525, 06-08-96504 и 05-02-16950) и грантом Президента РФ (№ МК-5047.2006.8).

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов* (М.: Машиностроение, 1985).
2. Токарев В.Н. *Квантовая электроника*, **36**, 624 (2006).
3. Klimentov S.M., Garnov S.V., Kononenko T.V., et al. *Appl. Phys. A*, **69**, S633 (1999).
4. Климентов С.М., Кононенко Т.В., Пивоваров П.А., Гарнов С.В., Конов В.И., Прохоров А.М., Брайтлинг Д., Даусингер Ф. *Квантовая электроника*, **31**, 378 (2001).
5. Luft A., Franz U., Emsermann A., Kaspar J. *Appl. Phys. A*, **63**, 93 (1996).
6. Климентов С.М., Пивоваров П.А., Конов В.И. и др. *Квантовая электроника*, **34**, 537 (2004).
7. Басиев Т.Т., Федин А.В., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **9**, 1909 (1999).
8. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 99 (2007).
9. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Докл. РАН*, **408**, 614 (2006).
10. Fedin A.V., Kyalbieva S.A., Gavrilov A.V., Smetanin S.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4644**, 312 (2001).
11. Басиев Т.Т., Осико В.В., Прохоров А.М. и др. Патент РФ № 2192341 (2002).