

# Технологии перфорации близкорасположенных микронных отверстий с использованием неодимовых $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ -лазеров

Т.Т.Басиев, А.Я.Карасик, В.В.Осико, А.Г.Папашвили, Д.С.Чунаев,  
А.В.Гаврилов, М.Н.Ершков, С.Н.Сметанин, С.А.Солохин, А.В.Федин,  
В.Н.Колокольцев, В.М.Лазоренко, В.И.Товтин

*Исследованы пикосекундная (на основе кристаллов  $\text{YLF} : \text{Nd} - \text{LiF} : \text{F}_2^-$ ) и наносекундная ( $\text{YAG} : \text{Nd} - \text{LiF} : \text{F}_2^-$ ) лазерные технологии перфорации близкорасположенных микронных отверстий в алюминиевой фольге для микроэлектроники, медицины и биологии. Получены двумерные матрицы отверстий с диаметрами 2–20 мкм, находящихся на расстоянии 8–30 мкм друг от друга, в алюминиевой фольге толщиной 20 мкм. Показаны возможности увеличения плотности расположения отверстий и уменьшения их диаметра при управлении режимом лазерного воздействия. Получен образец перфорированной алюминиевой фольги, в котором суммарная площадь микронных отверстий составляет более 30 % площади поверхности.*

**Ключевые слова:** лазеры на  $\text{YLF} : \text{Nd} - \text{LiF} : \text{F}_2^-$  и  $\text{YAG} : \text{Nd} - \text{LiF} : \text{F}_2^-$ , лазерная перфорация, близкорасположенные микронные отверстия.

## 1. Введение

В последнее время кристаллы  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  и лазеры на их основе находят все более широкое применение в лазерной физике и технологии. Это обусловлено следующими причинами. Во-первых, широкая полоса поглощения  $\text{F}_2^-$ -центров окраски данных кристаллов перекрывает линии люминесценции большинства неодимовых лазеров, поэтому кристаллы  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  часто используются в качестве пассивных затворов для неодимовых лазеров, причем применение градиентно окрашенных кристаллов  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  позволяет управлять не только режимом лазерной генерации (энергией, мощностью, частотой и длительностью импульсов), но и (опосредованно) режимом воздействия наносекундного лазерного излучения на материалы [1, 2]. Во-вторых, широкая полоса люминесценции  $\text{F}_2^-$ -центров окраски данных кристаллов, большой коэффициент усиления и высокий квантовый выход люминесценции при накачке излучением широко распространенных неодимовых лазеров обусловили применение кристаллов  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  в качестве лазерной среды для генерации и усиления сверхкоротких (пико- и субпикосекундных) лазерных импульсов [3, 4].

Применение таких импульсов в микро- и нанотехнологиях обработки материалов является одним из важнейших направлений использования твердотельных лазеров [1, 2, 5, 6]. Перспективными здесь оказываются основанные на применении неодимовых  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ -лазеров

технологии, которые отличаются надежностью, простотой и эффективностью использования. В настоящей работе исследованы пикосекундная (на основе  $\text{YLF} : \text{Nd} - \text{LiF} : \text{F}_2^-$ ) и наносекундная ( $\text{YAG} : \text{Nd} - \text{LiF} : \text{F}_2^-$ ) лазерные технологии перфорации близкорасположенных микронных отверстий в алюминиевой фольге для задач микроэлектроники, изготовления микромасок в медицине и химических микродатчиков.

## 2. Оптические схемы лазерных систем

Оптическая схема пикосекундной лазерной системы представлена на рис.1,а. Здесь кристаллы  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  использовались в качестве лазерных усилителей пикосекундных импульсов с длиной волны 1.138 мкм при лазерной накачке излучением с длиной волны 1.047 мкм [4]. При этом задающий лазерный генератор формирует как пикосекундный пробный лазерный сигнал, так и излучение накачки лазерных кристаллов  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$ . В качестве лазерного генератора использовался одномодовый лазер на кристалле  $\text{YLF} : \text{Nd}$ , работающий на длине волны 1.047 мкм в режиме пассивной синхронизации мод с внутрирезонаторным вынужденным комбинационным рассеянием в кристалле  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  ( $\lambda = 1.138$  мкм). Для увеличения мощности накачки оконечного усилителя на кристалле  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  перед ним может быть установлен дополнительный усилитель мощности на кристалле  $\text{YLF} : \text{Nd}$ . Выходное одномодовое излучение пикосекундного ла-

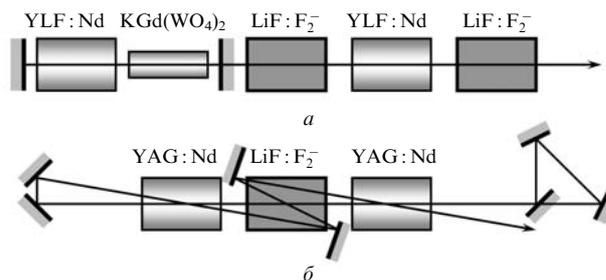


Рис.1. Оптические схемы пикосекундного (а) и наносекундного (б) лазеров.

Т.Т.Басиев, А.Я.Карасик, В.В.Осико, А.Г.Папашвили, Д.С.Чунаев. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 117999 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: basiev@lst.gpi.ru  
А.В.Гаврилов, М.Н.Ершков, 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  
В.Н.Колокольцев, В.М.Лазоренко, В.И.Товтин. Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 49

Поступила в редакцию 2 июня 2008 г., после доработки – 25 ноября 2008 г.

ра представляет собой пучок из трех сверхкоротких лазерных импульсов длительностью  $\sim 1$  пс и периодом следования  $\sim 8$  нс на длине волны 1.138 мкм с энергией пучка более 1 мДж и пиковой мощностью свыше 300 МВт.

Оптическая схема наносекундной лазерной системы приведена на рис.1,б. Здесь кристалл  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  служит пассивным затвором YAG:Nd-лазера. Лазер представляет собой петлевой генератор с самонакачивающимся обращением волнового фронта в каждом активном YAG:Nd-элементе и в пассивном  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  затворе, что обеспечивает самокомпенсацию искажений генерируемого излучения; для выделения основной поперечной моды генерации в качестве концевой отражателя используется интерферометр Саньяка [7]. Выходное одномодовое излучение наносекундного лазера представляет собой моноимпульс длительностью  $\sim 20$  нс на длине волны 1.064 мкм с энергией  $\sim 100$  мДж.

В обеих схемах выходное излучение с помощью телескопа расширялось до диаметра двухлинзового объектива (1.3 см) с фокусным расстоянием 1 см, а энергия воздействующего излучения изменялась с помощью сменных калиброванных фильтров. В фокусе объектива на трехкоординатном микрометрическом столе устанавливался обрабатываемый образец из алюминиевой фольги толщиной 20 мкм. Диаметр пятна облучения на поверхности образца составлял 3–4 мкм, частота следования импульсов накачки была равна 10 Гц.

### 3. Результаты обработки и их обсуждение

Задача лазерной обработки состояла в изготовлении двумерных матриц микронных отверстий с минимальным расстоянием  $h_{\min}$  между ними, при котором стенки между отверстиями остаются неповрежденными. Проводилось сравнительное исследование параметров обработки наносекундным и пикосекундным лазерами в зависимости от числа лазерных импульсов, необходимых для прошивки отдельного сквозного отверстия. При этом для увеличения числа лазерных импульсов, требуемого для прошивки одного сквозного отверстия, энергию лазера уменьшали с помощью сменных фильтров.

При расстоянии между отверстиями менее  $h_{\min}$  наблюдались деформации и разрушения стенок между ними, приводящие к ухудшению формы (некруглости) отверстий. На рис.2 представлена фотография обработанной матрицы отверстий с поврежденными стенками, где расстояние между отверстиями  $h = 15$  мкм  $< h_{\min}$ . Матрица изготовлена с помощью наносекундного лазера с энергией импульсов излучения на поверхности образца 80 мкДж (плотность энергии  $\sim 700$  Дж/см<sup>2</sup>). При этом на прошивку отдельного сквозного отверстия затрачивалось около 20 лазерных импульсов. Отверстия прошивались рядами, вдоль которых (по вертикали) повреждения стенок между отверстиями были наибольшими. Это можно объяснить тем, что тонкие (несколько микрон) стенки между отверстиями не успевают остывать, и наблюдается взаимное влияние лазерных импульсов.

На рис.3 представлены экспериментальные зависимости параметров лазерной перфорации микронных отверстий, расположенных на расстоянии  $h_{\min}$  друг от друга, от числа  $N$  вспышек ламп накачки лазера, приходящихся на прошивку одного сквозного отверстия, при использовании пикосекундного и наносекундного лазеров. В слу-

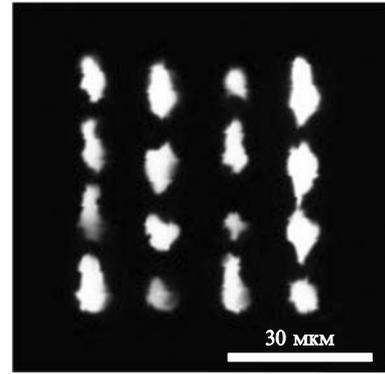


Рис.2. Фотография матрицы микронных отверстий с поврежденными стенками между отверстиями в алюминиевой фольге толщиной 20 мкм.

чае пикосекундного лазера, генерирующего три лазерных импульса за импульс накачки, число прошивающих сквозное отверстие импульсов лазерного излучения равно  $3N$ .

Из рис.3,а видно, что при обработке наносекундным лазером энергия  $W$ , затраченная на прошивку одного отверстия, сохраняется равной 1.6 мДж при изменении числа импульсов  $N$ , а при обработке пикосекундным лазером уменьшение числа  $N$  ( $N \leq 7$ ) приводит к возрастанию затраченной энергии  $W$  с 0.5 до 0.75 мДж. Это мож-

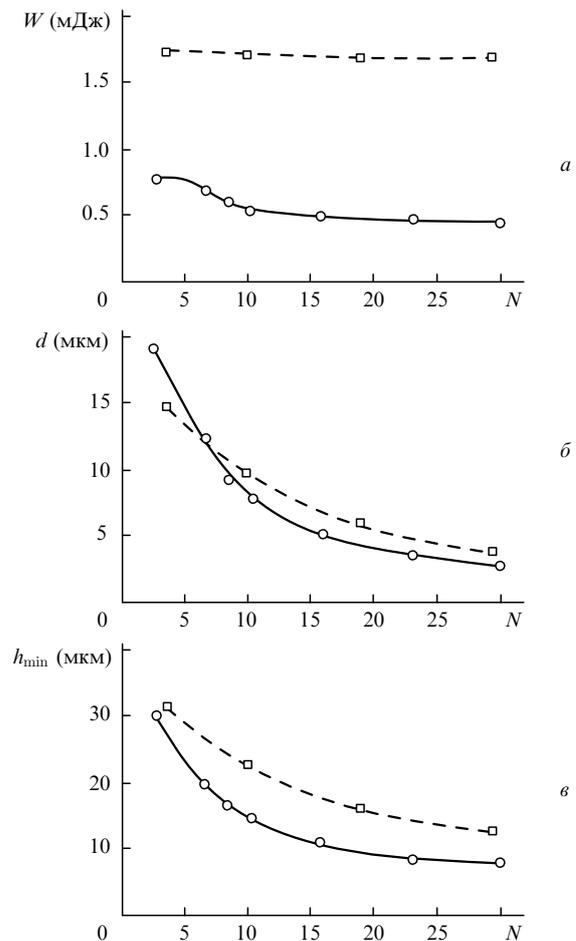


Рис.3. Экспериментальные зависимости параметров лазерной перфорации от числа  $N$  вспышек ламп накачки лазера, необходимых для прошивки одного сквозного отверстия, при использовании наносекундного (□) и пикосекундного (○) лазеров.

но объяснить тем, что из-за существенно большей интенсивности излучения пикосекундного лазера возникающая приповерхностная плазма, наблюдаемая визуально, при малом числе импульсов  $N$  существенно экранирует лазерное излучение. Это согласуется с результатами работы [6], где заметная экранировка приповерхностной плазмой наблюдалась при плотности энергии субпикосекундных импульсов более  $120 \text{ Дж/см}^2$ .

Из рис.3,б следует, что уменьшение  $N$  приводит к более быстрому увеличению диаметра  $d$  отверстия в случае обработки пикосекундным лазером, чем при использовании наносекундного лазера. Данный результат также объясняется образованием приповерхностной плазмы, расширяющей отверстие [2, 6] при имеющей место в наших экспериментах плотности энергии пикосекундных импульсов более  $30 \text{ Дж/см}^2$ . Так, при уменьшении  $N$  с 30 до 3 в случае обработки пикосекундным лазером диаметр  $d$  отверстия возрастает с 2.5 до 19 мкм, а при обработке наносекундным лазером – с 3.5 до 15 мкм, поэтому в данном режиме (при малых  $N$ ) для получения отверстий малого диаметра целесообразнее использовать наносекундный лазер. С увеличением  $N$  ( $N > 30$ ), когда плазменная экранировка практически отсутствует, при обработке пикосекундным лазером минимальный диаметр отверстий составляет 2.5 мкм, тогда как при обработке наносекундным лазером – 3.5 мкм. Это можно объяснить тем, что в последнем случае воздействие лазерного импульса является чрезмерно длительным, и при малом различии энерговкладов излучения пикосекундного и наносекундного лазеров в прошивку сквозного отверстия при наносекундном воздействии происходит большее расширение отверстия из-за плавления его стенок. Таким образом, для получения отверстий наименьшего диаметра целесообразнее использовать пикосекундный лазер.

Из рис.3,в следует, что с уменьшением  $N$  увеличивается также минимально возможное расстояние  $h_{\min}$  между обрабатываемыми отверстиями в матрице отверстий. Здесь применение пикосекундного лазера для повышения плотности расположения отверстий выгодно даже при малых значениях  $N$ . Необходимо отметить, что отношение  $h_{\min}/d$ , определяющее плотность расположения отверстий в матрице, увеличивается с ростом  $N$ , в то время как сами  $h_{\min}$  и  $d$  при этом уменьшаются: в случае пикосекундной обработки  $h_{\min}/d$  увеличивается с 1.6 до 3, а при наносекундной обработке – с 2 до 4. Это указывает на то, что разрушение стенок происходит при их нагревании серией импульсов, когда при большом числе  $N$  стенки не успевают остывать в паузах между импульсами, что наглядно демонстрирует рис.2. При наносекундном облучении этот перегрев сильнее, поэтому отверстия приходится располагать реже, чем при пикосекундной обработке.

На рис.4 показаны фотографии изготовленных матриц. Отверстия первой матрицы (рис.4,а) получены с помощью малого числа импульсов ( $N = 3$ ) наносекундного лазера и имеют поэтому большой диаметр ( $d = 15 \text{ мкм}$ ). Шаг между отверстиями  $h = 30 \text{ мкм}$ , т. е. суммарная площадь микронных отверстий составляет 13 % площади поверхности фольги. Вторая матрица (рис.4,б) получена с использованием пикосекундного лазера при  $N = 10$ , поэтому здесь  $d = 6 \text{ мкм}$  и  $h = 15 \text{ мкм}$ , т. е. суммарная площадь микронных отверстий составляет 20 % площади поверхности. Максимальная суммарная площадь отверстий (31.5 % площади поверхности) была получена с

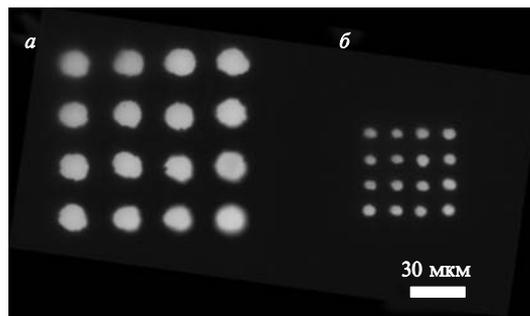


Рис.4. Фотографии изготовленных матриц близкорасположенных микронных отверстий в алюминиевой фольге толщиной 20 мкм.

использованием пикосекундного лазера при  $N = 3$ , при этом  $d = 19 \text{ мкм}$  и  $h = 30 \text{ мкм}$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, в работе исследованы возможности перфорации близкорасположенных микронных отверстий излучением пикосекундного и наносекундного лазеров на неодимовых кристаллах и кристаллах  $\text{LiF:F}_2^-$ . Получены матрицы отверстий диаметром 2–20 мкм, расположенных на расстоянии 8–30 мкм друг от друга, в алюминиевой фольге толщиной 20 мкм. Показаны возможности увеличения плотности расположения отверстий и уменьшения их диаметра при изменении режимов лазерного облучения. Получен образец перфорированной алюминиевой фольги, в котором суммарная площадь микронных отверстий занимает более 30 % площади поверхности, что актуально для задач микроэлектроники, медицины и биологии. Можно также отметить, что при генерации второй и четвертой гармоник данных лазеров возможно получение наноматриц субмикронных отверстий в тонкопленочных материалах. Ожидается, что использование более сложной схемы сканирования (при покрытии всей обрабатываемой площади не близкорасположенными рядами, а так, чтобы каждое последующее отверстие располагалось на большем расстоянии от предыдущего) позволит существенно уменьшить минимальное расстояние между отверстиями и увеличить скорость обработки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05-08-33525 и 08-02-99019), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» (Госконтракт № 02.518.11.7018) и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект РНП.2.1.1.9211).

1. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **37**, 99 (2007).
2. Басиев Т.Т., Гарнов С.В., Климентов С.М. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 956 (2007).
3. Басиев Т.Т., Карасик А.Я., Дергачев А.Ю., Федоров В.В., Шубочкин Р.Л. *Квантовая электроника*, **23**, 1072 (1996).
4. Басиев Т.Т., Карасик А.Я., Коношкин В.А., Осико В.В., Папашвили А.Г., Чунаев Д.С. *Квантовая электроника*, **35**, 344 (2005).
5. Гарнов С.В., Климентов С.М., Конов В.И., Кононенко Т.В., Даусингер Ф. *Квантовая электроника*, **25**, 45 (1998).
6. 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).
7. Басиев Т.Т., Осико В.В., Прохоров А.М., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Патент РФ 2192341*, 2002.