

Прямая лазерная печать вязкими красками

А.С.Насибов, В.Г.Баграмов, К.В.Бережной

Приведены результаты экспериментов по прямой лазерной печати вязкими типографскими красками с помощью устройства на основе лазера на парах меди (ЛПМ). На месте глухого зеркала резонатора ЛПМ устанавливался пространственный зеркальный модулятор (ПЗМ). В качестве вещества использовались вязкие типографские краски. Перенос осуществлялся импульсом давления, возникающим на границе между краской и прозрачным носителем, на которую проецировалось усиленное по яркости и уменьшенное по размеру изображение ПЗМ. Показано, что максимальная скорость печати с применением ЛПМ может достигать ~ 80 см²/с, разрешающая способность – 625 dpi, полное число градаций – 15. Исследована зависимость интенсивности излучения проецируемого элемента (пиксела) от его диаметра. Установлено, что увеличение яркости этого элемента с уменьшением его размера связано с суммированием лазерного и усиленного излучения.

Ключевые слова: лазерная печать, медный лазер, применение лазеров.

1. Введение

Взаимодействие лазерного излучения с веществом широко используется в различных технологических процессах. Применение лазера позволяет концентрировать энергию ($10^2 - 10^3$ Дж/см³) в микрообъеме ($\sim 10^{-9}$ см³) у поверхности вещества ($10^{-4} - 10^{-5}$ см) за короткое время (не более 10^{-8} с), в течение которого практически не происходит диффузии тепла в окружающую среду. Абляция материала, обычно сопровождающая этот процесс, применяется в различных технологических операциях (получение микроотверстий, гравировка, осаждение на ростовую подложку различных материалов и т. п.).

Значительный интерес представляет возможность использования импульса давления, возникающего в микрообъеме, для прямого управляемого переноса вещества на заданный объект. В этом случае лазерное излучение фокусируют через прозрачную подложку на границу подложка – вещество. Такая технология переноса вещества получила название «прямое лазерное письмо». Эффект прямого лазерного письма (ПЛП) использовался в [1] для изготовления экранов дисплея высокого разрешения. В [2] было показано, что техника ПЛП значительно удешевляет процесс изготовления электронных компонентов средних размеров. С помощью ПЛП также получены миниатюрные источники питания [3]. В ранних наших работах [4, 5] исследована возможность применения ПЛП для печати вязкими типографскими красками без промежуточных операций. Использование во всех упомянутых случаях лазеров УФ диапазона имеет следующие достоинства: низкая пороговая энергия переноса вещества; малая глубина проникновения ($\sim 10^{-5}$ см), позволяющая

использовать тонкие слои вещества ($10^{-4} - 10^{-3}$ см); возможность увеличения разрешения до нескольких тысяч dpi. К недостаткам применения УФ лазеров можно отнести их низкую эффективность, высокую стоимость при выходной мощности не менее 10 Вт и необходимость использования специальной УФ оптики и стойких к УФ излучению материалов. Следует отметить также, что ранее разработанные способы ПЛП не позволяют переносить за импульс массив из большого числа элементов. Эти трудности определили необходимость поиска других возможностей реализации ПЛП [6].

В данной работе исследуется возможность применения для переноса вещества лазера на парах меди (ЛПМ), работающего в режиме усилителя яркости изображения. В качестве вещества использовались вязкие краски, изготовленные на основе полимерных соединений и хорошо моделирующие широкий класс веществ, которые в настоящее время применяются для различных целей, например для изготовления органических светодиодов. Исследования оптических характеристик вязких типографских красок показали, что наиболее низкий энергетический порог переноса красок в видимом диапазоне спектра можно получить, используя зеленое ($\lambda = 510$ нм) и желтое ($\lambda = 578$ нм) излучение ЛПМ.

2. Экспериментальная установка и результаты экспериментов

Схема экспериментальной установки дана на рис.1. Пространственный зеркальный модулятор (ПЗМ) 1 выполнен в виде транспаранта, установленного перед глухим зеркалом ЛПМ. В большинстве экспериментов в качестве транспаранта использовалась зачерненная металлическая пластина с отверстиями, число и размеры которых менялись. Активной средой 2 служила трубка с парами меди модернизированного ЛПМ [7] с увеличенной до 10 Вт средней мощностью. Выходное зеркало лазера выполнено в виде плоскопараллельной стеклян-

А.С.Насибов, В.Г.Баграмов, К.В.Бережной. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: nasibov@mail1.lebedev.ru

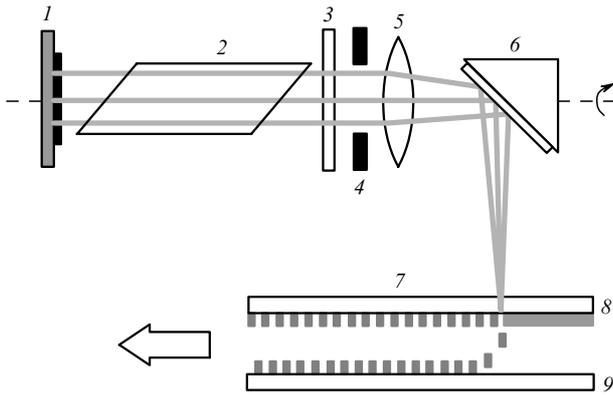


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
1 – ПЗМ; 2 – активная среда ЛПМ; 3 – выходное зеркало; 4 – диафрагма; 5 – линза; 6 – вращающееся зеркало; 7 – стеклянная подложка; 8 – переносимое вещество; 9 – пластиковая карта.

ной пластины 3. Прозрачный носитель – донор 7 – представляет собой стеклянную пластину или прозрачную полимерную пленку с нанесенным на нее веществом. С помощью длиннофокусной линзы 5 уменьшенное изображение ПЗМ проецируется на границу между носителем 7 и веществом 8. Коэффициент уменьшения изображения определяется расстоянием от линзы до ПЗМ и в нашем случае был равен ~ 13.5 . Носитель 7 установлен на движущейся платформе над подложкой 9. Уменьшенное изображение ПЗМ перемещается поперек носителя 7 с помощью вращающегося зеркала 6. В качестве переносимого вещества использовались краски, применяемые в офсетной печати, в основном черная. Подложками, на которые переносилось изображение, служили чистые пластиковые карты. Для демонстрации возможности цветной печати применялись красная, зеленая, синяя и желтая краски.

Был получен перенос красок всех цветов. Минимальная пороговая плотность энергии (~ 0.1 Дж/см²) требовалась для переноса черной краски, а максимальная (~ 1 Дж/см²) – для переноса желтой краски. Измерены зависимости мощности излучения от диаметра d одного центрального отверстия в ПЗМ в двух случаях: при по-

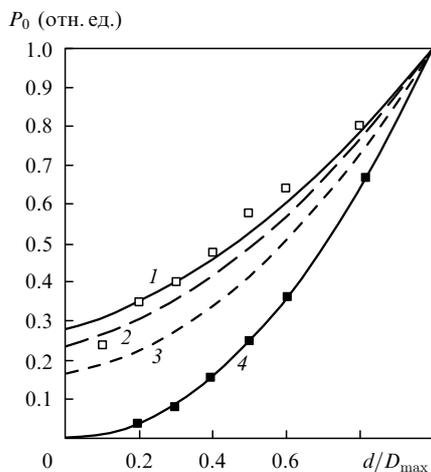


Рис.2. Экспериментальные (точки) и расчетные (кривые) зависимости относительной мощности излучения P_0 от отношения d/D_{\max} при коэффициентах усиления $k = 1.2$ (1), 1.3 (2) и 1.8 (3), а также в случае отсечки диафрагмой 4 (рис.1) усиленной (не лазерной) составляющей излучения (4).

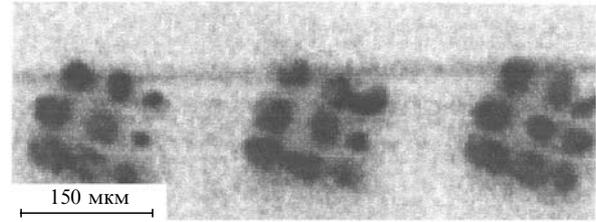


Рис.3. Фотография увеличенного фрагмента пластиковой карты с пикселями (150×150 мкм). Каждый пиксел содержит девять субпикселей.

стоянном диаметре D_{\max} выходной диафрагмы 4 и последовательном увеличении диаметра отверстия d до D_{\max} (рис.2, кривые 1–3); при последовательном увеличении диаметра отверстия d и отсечке диафрагмой 4 усиленной (не лазерной) составляющей излучения, что достигалось уменьшением диаметра диафрагмы D до $D = d$ (рис.2, кривая 4). Мощность измерялась калориметром ИМО-4, установленным после линзы 5. Полученные экспериментальные и расчетные данные приведены на рис.2. На рис.3 дана фотография увеличенного фрагмента пластиковой карты с напечатанными на ней методом прямой печати пикселями (150×150 мкм), каждый из которых содержит девять субпикселей диаметром 30–15 мкм. ПЗМ в этом случае представлял собой транспарант размером 2×2 мм с девятью симметрично расположенными отверстиями диаметром от 500 до 250 мкм. При использовании только одного центрального отверстия в ПЗМ максимальный диаметр пиксела (~ 700 мкм) достигался при $d = 9$ мм, а минимальный (~ 15 мкм) – при $d = 200$ мкм.

Для демонстрации возможности цветной печати были выполнены негативные снимки суперобложки книги «Поль Элюар. Письма к Гала», которые затем использовались как транспаранты. В этом случае применялись краски четырех цветов: черная, красная, зеленая и синяя. На рис.4 приведена фотография суперобложки книги с портретом Поля Элюара работы художника Фернана Леже и пластиковых карт с перенесенным методом ПЛП цветным изображением.



Рис.4. Фотография суперобложки книги «Письма к Гала» с портретом Поля Элюара работы художника Фернана Леже и пластиковых карт с перенесенным цветным изображением.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Упрощенная эквивалентная оптическая схема экспериментов по измерению выходной мощности излучения

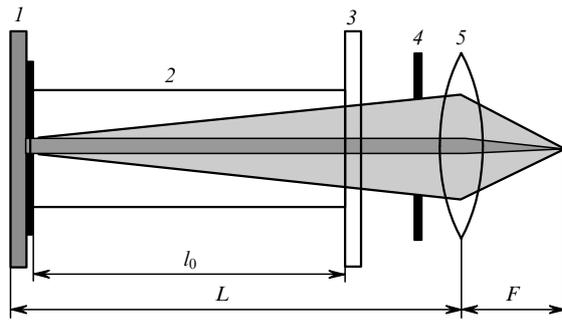


Рис.5. Эквивалентная схема оптической системы установки для экспериментов по измерению выходной мощности излучения в зависимости от отношения d/D_{\max} :

1 – ПЗМ; 2 – активная среда; 3 – выходное зеркало; 4 – диафрагма; 5 – объектив.

после фокусирующей линзы дана на рис.5. Диаметр диафрагмы D может меняться от $D_{\max} \gg d$ до $D = d$. Видно, что входная апертура линзы собирает как пучок направленного лазерного излучения в форме цилиндра, так и усиленное излучение, ограниченное усеченным конусом, вершиной которого является глухое зеркало. Суммарная мощность излучения, которое попадает в апертуру линзы, в приближении геометрической оптики может быть оценена по формуле

$$P = V_1 n_0 + V_2 n_0 (k - 1), \quad (1)$$

где V_1 – объем, ограниченный усеченным конусом; V_2 – объем, ограниченный цилиндром; n_0 – удельная мощность излучения активной среды в режиме усиления; $k = n/n_0$ – коэффициент усиления мощности излучения в режиме генерации; n – удельная мощность излучения активной среды в режиме генерации.

Подставляя в (1) объемы усеченного конуса и цилиндра, имеем

$$P = \frac{1}{3} \pi \frac{D^2}{4} l_0 n_0 \left[1 + \frac{d}{D} + \left(\frac{d}{D} \right)^2 (3k - 2) \right], \quad (2)$$

где l_0 – расстояние между зеркалами резонатора; $D \geq d$; d – диаметр глухого зеркала, который совпадает здесь с диаметром центрального отверстия в ПЗМ. При $D = d$ в апертуру линзы попадает только направленное лазерное излучение. В этом случае максимальная мощность

$$P_{\max} = \frac{\pi D^2}{4} l_0 n, \quad (3)$$

а относительное изменение мощности можно определить как

$$P_0 = \frac{P}{P_{\max}} = \frac{1}{3} k \left[1 + \frac{d}{D} + \left(\frac{d}{D} \right)^2 (3k - 2) \right]. \quad (4)$$

Из рис.2 видно, что расчетное изменение относительной мощности P_0 на выходе после диафрагмы при различных значениях коэффициента k и отношения d/D_{\max} достаточно хорошо соответствует эксперименту. Когда диафрагмой при изменении d отсекается усиленное излучение (рис.2, кривая 4), остается только собственно лазерная составляющая и относительное изменение мощности $P_0 = (d/D_{\max})^2$. Экспериментальные точки полу-

чены при $D_{\max} = 0.5$ см и изменении отношения d/D_{\max} от 0.1 до 1. С уменьшением d интенсивность излучения в фокусе линзы возрастает примерно как $\sim 1/d^2$, что было отмечено и в работе [8]. Изменение относительной интенсивности можно определить по формуле

$$I_0 = \frac{I}{I_{\max}} = \frac{1}{3} k \left[1 + \frac{d}{D} + \left(\frac{d}{D} \right)^2 (3k - 2) \right] \left(\frac{d}{D} \right)^{-2}. \quad (5)$$

Для того чтобы обеспечить перенос красок основных цветов, используемых при цветной печати, необходимо увеличить максимальную пороговую плотность энергии E_{th} до ~ 1 Дж/см². При заданной площади пиксела S , пороговой плотности энергии E_{th} и тактовой частоте следования импульсов F средняя мощность излучения лазера P_{av} должна быть больше или равна $E_{th} S F$. Заметим, что средняя мощность может быть значительно уменьшена путем применения менее вязких красок с большим коэффициентом поглощения. Кроме того, можно предположить, что рассмотренный выше эффект увеличения интенсивности за счет суммирования лазерного и усиленного излучения также может привести к значительному уменьшению мощности, необходимой для одновременного переноса четырех пикселей, составляющих ячейку размером 300×300 мкм, с субпикселями диаметром 40 мкм, заполняющими $\sim 50\%$ площади ячейки. Пороговая мощность излучения в этом случае должна быть примерно в два раза меньше, чем при 100% -ном заполнении площади ячейки.

4. Основные характеристики устройства для прямой лазерной печати

К основным характеристикам устройства можно отнести скорость печати, скорость переноса пикселей, пространственную частоту печати, разрешение и число градаций цвета. Скорость печати

$$W = F S_0, \quad (6)$$

где S_0 – площадь массива информации, переносимой за импульс излучения. Величина S_0 определяется пороговой плотностью энергии E_{th} и энергией $E_p = P_{av} \gamma / F$, излучаемой за импульс, где γ – коэффициент, характеризующий суммарные потери излучения. Легко видеть, что

$$S_0 = \frac{E_p}{E_{th}} = \frac{P_{av} \gamma}{F E_{th}}. \quad (7)$$

В нашем случае $F = 10^4$ Гц, $P_{av} = 10$ Вт, $\gamma \sim 0.8$, а пороговая плотность энергии E_{th} меняется от 0.1 до 1 Дж/см² в зависимости от цвета и характеристик краски. Подставляя эти значения в (7), получаем, что при средней мощности излучения 10 Вт максимальная площадь переносимого за импульс массива $S_0 \approx 8 \times 10^{-3}$ см². Тогда максимальная скорость печати $W_{\max} = F S_0 = 80$ см²/с, а максимальная скорость переноса пикселей (при $S = 150 \times 150$ мкм = 2.25×10^{-4} см²) $W_{p\max} = W_{\max} / S = 10^5$ пикселей в секунду.

В рассматриваемом случае пространственная частота (число пикселей на дюйм) $A^{-1} = 167$, разрешение (число субпикселей на дюйм) $B^{-1} = 625$, а полное число градаций $G = (A/B)^2 (g - 1) + 1 = 15$, где g – число полутонов субпикселей (в нашем случае $g = 2$).

5. Заключение

Проведенные исследования показали перспективность применения усилителей яркости изображения для прямой лазерной печати. В нашем случае использовались вязкие краски, широко применяемые в офсетной печати. С равным успехом такая лазерная технология управляемого переноса вещества может быть использована в электронной промышленности для изготовления пассивных элементов микросхем (емкостей, резисторов, индуктивностей и др.), дисплеев высокого разрешения и органических светодиодов.

Авторы благодарны Г.Г.Петрашу и К.И.Земскову за

полезные консультации и И.В.Пономареву за помощь в работе.

1. Fitz-Gerald J.M. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (11), 1386 (2000).
2. Chrisey D. et al. *Laser Focus World*, September, 113 (2000).
3. Arnold C.B. et al. *Laser Focus World*, May, S9 (2004).
4. Nasibov A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4300**, 452 (2001).
5. Насибов А.С. Патент РФ № 2176600 от 01.02.00; *БИ*, № 34, 240 (2001).
6. Насибов А.С., Баграмов В.Г., Пономарев И.В. Патент РФ № 2236948 от 15.04.03; *БИ*, № 27, 310 (2003).
7. Насибов А.С. и др. *Наука производству*, № 12, 12 (2000).
8. Земсков К.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Труды ФИАН*, **212**, 168 (1991).