

УДК 655.28.022

ДОСЛІДЖЕННЯ КАУСТИЧНОЇ ПОВЕРХНІ ЛАЗЕРНОГО ПРОМЕНЯ У ФОКУСІ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

В. Е. Никируй, В. З. Маїк

Українська академія друкарства
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

Розглянуто можливість зменшення фокальної плями лазерного променя за допомогою встановлення телескопа в оптичну систему. Теоретично проаналізовано зміну параметрів лазерного променя у фокусі оптичної системи після застосування двократного телескопа. Проведено експериментальне дослідження каустичної поверхні лазерного променя у фокусі оптичної системи з телескопом та без нього.

Ключові слова: оптична система, фокусування лазерного променя, телескоп.

Постановка проблеми. Високий рівень вимог до якості вихідної флексографічної продукції потребує від виробників введення у технологічні процеси технології на базі мікроструктур, таких як: DigiCap NX від «Kodak», APS від компанії «Альфа», HD Flexo та Microcell від «Esko» тощо [1–4]. З огляду на розміри елементів у зазначених технологіях мінімальний діаметр записаної точки на масковому шарі має становити близько 5–7 мкм. Для реалізації цих технологій потрібно збільшувати роздільну здатність Computer-to-Plate (CtP) пристроїв, що неодмінно приводить до модернізації оптичної системи устаткування з метою зменшення діаметра фокусної плями лазерного променя. Крім того, для застосування вказаних технологій у виготовленні флексографічних друкарських форм прямим лазерним гравіюванням також необхідно зменшити мінімальний об'єм абляції, що досягається, зокрема, зменшенням діаметра фокальної плями [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Чимало праць присвячено вивченню властивостей лазерного випромінювання та його впливу на матеріали [6–9]. Мабуть, не менше уваги надано і способам та методам керування параметрами лазерного променя, які б давали змогу ефективно використовувати його в промисловості [8–10]. Одним із параметрів, які впливають на якість лазерної обробки, є форма каустичної поверхні променя у фокальній площині об'єктива, яка залежить як від параметрів променя, так і від оптичної системи, що здійснює фокусування на матеріалі.

Мета статті — провести порівняльний аналіз параметрів каустичної поверхні лазерного променя у фокусі оптичної системи CtP пристрою до і після модернізації, яка полягає у встановленні двократного телескопа в оптичний вузол.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якщо у фокусуєму оптичну систему спрямувати паралельний пучок променів, то в ідеальному випадку промені

зберуться в точку, що називається фокусом [6]. Під час проектування лазерної фокусувальної системи враховують модову структуру випромінювання, оскільки наявність мод високого порядку збільшує кутову розбіжність променя і впливає на якість його фокусування [7]. Отримання найменших фокальних точок і найбільших інтенсивностей опромінення можливе лише в пучках з відносно простою модовою конфігурацією. Розподіл інтенсивності в моді резонатора найнижчого порядку TEM_{00} має гаусівський вигляд $I_{00}(r) = \exp(-2r^2/w^2)$, де w — розмір поперечного січення пучка, що визначається як радіус, на якому інтенсивність TEM_{00} -моди в e^2 разів менша від величини інтенсивності на осі пучка [8]. Тому в технологічних процесах зазвичай використовують світловий «гаусівський» промінь з круглим січенням ($K_\phi = 1,22$). Якщо такий промінь сфокусувати на оптичній осі об'єктива, то діаметр сфокусованої плями у фокальній площині визначиться співвідношенням:

$$d_k = d_w + d_a \tag{1}$$

де d_w складова зумовлена розбіжністю променя, а d_a — аберациями.

$$d_w = F \times W, \tag{2}$$

$$d_a = \delta q' / 2, \tag{3}$$

де F — фокусна віддаль, W — розбіжність лазерного випромінювання, $\delta q'$ — поперечна сферична аберация.

$$W = 1,22 \varepsilon \lambda / D, \tag{4}$$

де ε — емпіричний коефіцієнт, який враховує збільшення розбіжності в резонаторі, λ — довжина хвилі випромінювання, D — ширина лазерного пучка, що входить у фокусувальний об'єктив.

Отже, діаметр сфокусованої плями, зумовлений розбіжністю променя, визначиться співвідношенням:

$$d_w = 1,22 \varepsilon \lambda F / D. \tag{5}$$

Очевидно, що для зменшення фокусної плями необхідне збільшення вхідної апертури променя. Збільшити вхідну апертуру лазерного променя можна за допомогою встановлення телескопа, який забезпечить отримання малого діаметра фокусної плями, а отже, й вищу роздільну здатність лазерної системи запису. Телескоп перетворює паралельний пучок променів з діаметром січення D_1 , що входить у систему, в такий самий паралельний пучок на виході з неї, але зі збільшеним діаметром січення D_2 (рис. 1).

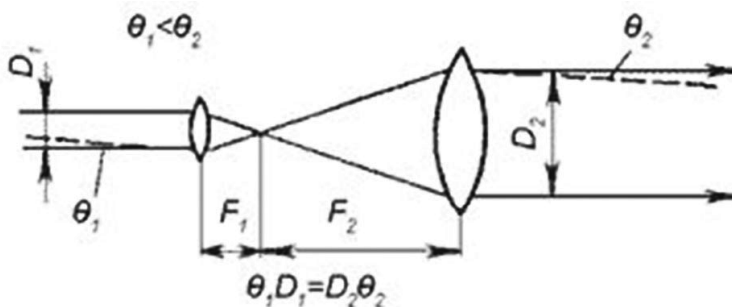


Рис. 1. Хід променя в дволінзевій телескопічній системі

Збільшенням системи називають величину V , яка дорівнює відношенню фокусних відстаней лінз, так само як і відношенню діаметрів січення променів:

$$V = \frac{F_1}{F_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (6)$$

Властивістю лазерного випромінювання є монохроматичність, що забезпечує відсутність хроматичних аберацій під час фокусування лазерного променя. Тому в розрахунках враховують лише монохроматичні аберації: астигматизм, кома, дисторсія, сферична аберація. З огляду на те, що під час лазерної обробки фокуруючі системи здебільшого розміщують так, щоб головна площина була перпендикулярна осі лазерного випромінювання, розрахунок зводиться лише до сферичної аберації (рис. 2). Через те, що кути падіння променів на другу поверхню різні, найвіддаленіші від оптичної осі промені заломлюються сильніше від інших і сходяться за лінзою в точці, розміщеній на найбільшій відстані від фокальної площини. Це призводить до того, що пучок після заломлення лінзою отримує форму не конуса, а гіперболоїда кручення, тобто точкове зображення в фокусі відсутнє. Зовнішня поверхня цієї фігури поблизу її вузького місця називається каустичною поверхнею.

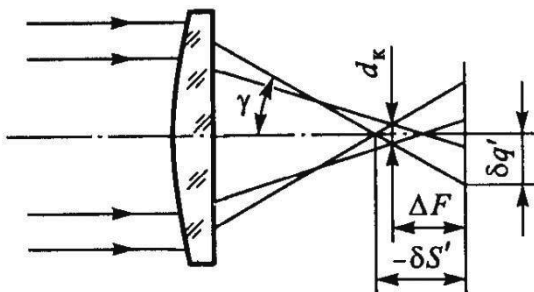


Рис. 2. Схема сферичної аберації

Відстань по оптичній осі між точками сходження параксіальних і крайніх променів $\delta S'$ називається повздовжньою сферичною аберацією, а радіус круга розсіяння в фокальній площині $\delta q'$ — поперечною сферичною аберацією. Найменший круг розсіяння утворюється на відстані ΔF від фокальної площини. Площина, що відповідає такому кругу розсіяння, називається площиною найкращого встановлення (ПНВ).

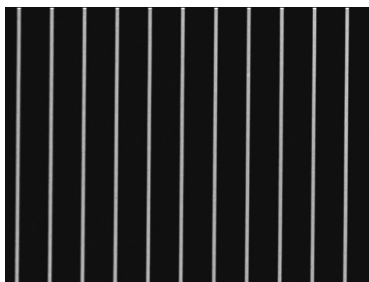
Отже, перетворений оптичною системою лазерний промінь має в ділянці фокусування вигляд гіперболоїда обертання з діаметром перетяжки (шийки) пучка d_k .

Для визначення каустичної форми перетяжки променя було виведено тестове зображення, що складається з лінії, завширшки 1 піксель, із роздільною здатністю 2540 dpi (рис. 3).



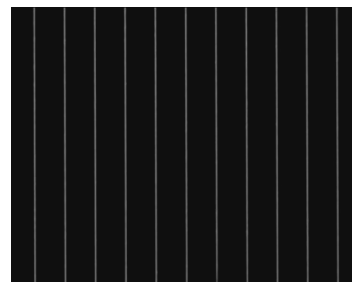
Рис. 3. Тест-шкала для визначення форми перетяжки

Для експериментального визначення параметрів перетяжки променя у фокусі об'єктива на ПЛЛ плівці виконано гравіювання тестового зображення (рис. 3) у формі ліній за різних значень положення фокусу об'єктива відносно поверхні матеріалу (z_F). За допомогою програмно-апаратного комплексу Flexometr виконано вимірювання ширини ліній (s) та побудовано залежність від положення об'єктива $s(z_F)$. Цей експеримент проведено з телескопом та без нього. Потужність лазерного випромінювання під час виведення тестового зображення становила ~ 15 Вт. За результатами експерименту визначено апаратні параметри, за яких поверхня матеріалу міститься у площині найкращого встановлення.



Кількість ліній 11
Сер. ширина ліній 12,57 мкм

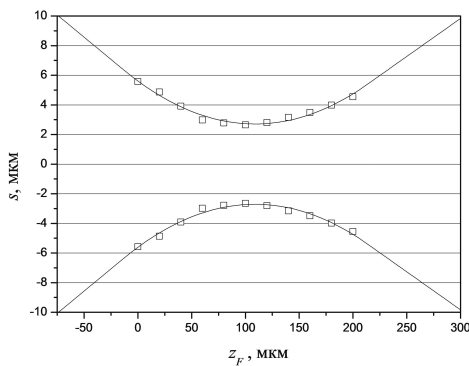
а)



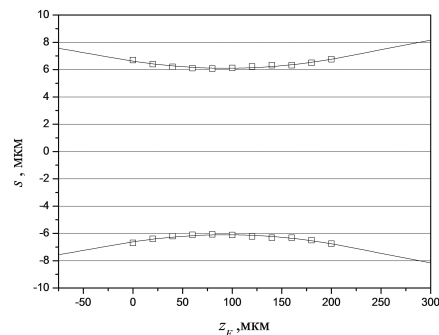
Кількість ліній 11
Сер. ширина ліній 6,32 мкм

б)

Рис. 4. Фотографії ліній, отриманих на плівці без телескопа (а) і з телескопом (б) та їх аналіз у програмі Flexometr



а)



б)

Рис. 5. Каустична поверхня лазерного променя, сфокусованого оптичною системою: а — з телескопом, б — без телескопа

На рис. 4 показано фотографії найтонших ліній, а також подано результати аналізу цих ліній програмою Flexometr. Мінімальна ширина ліній становить 12,57 мкм для базового оптичного вузла та 6,32 мкм — для модернізованого. На рис. 5 зображено каустичні поверхні променя у фокусі об'єктива, побудовані на основі кривих $s(z_p)$ для випадку з телескопом та без нього.

Висновки. Експериментально перевірено, що використання телескопічної системи з кратністю 2 дає змогу вдвічі зменшити розмір фокусної плями та, відповідно, вдвічі збільшити роздільну здатність СтР пристрою. Крім того, це дає можливість зменшити об'єм абляції одного пікселя у технології прямого лазерного гравіювання флексоформ. Зазначимо, що зі зменшенням діаметра фокальної плями збільшиться густина енергії випромінювання, тому для збереження експозиції необхідно збільшити швидкість проходження матеріалу відносно лазерного променя, при цьому виробнича здатність СтР пристрою чи апарата для прямого лазерного гравіювання залишиться незмінною. Водночас зауважимо, що процеси горіння при збільшенні концентрації енергії мають нелінійну природу, тому виробнича здатність у разі зменшення фокусної плями буде збільшуватися чи зменшуватися, що є предметом подальших досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kodak DigiCap NX Patterning [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://graphics.kodak.com/KodakGCG/uploadedFiles/DigiCapNX_WhitePaper.pdf.
2. Хоул Й. Четкое описание флексографии высокой четкости, или технологии High Definition Flexo /Й. Хоул // Флексо Плюс. — 2013. — № 4. — С. 22–28.
3. Fernandez J. HD Flexo-Screening and Dot shapes [Електронний ресурс] / J. Fernandez. — Режим доступу : <https://www.esko.com/en/~media/Esko/Files/Other-PDFs/eskoworld2013/AC/AC-28%20HD%20Flexo%20-%20Screening%20and%20Dotshapes-Screen%20Manager%20b.pdf>.
4. HD Flexo [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://www.esko.com/ru/products/overview/hd-flexo/overview/>.
5. Computer-to-Plate для флексографии: ключевые аспекты технологии / [Ласкин А. В., Минин П. В., Маик В. З., Сорокин Б. А.]. — М. : Курсив, 2001. — 80 с.
6. Ландсберг Г. С. Оптика : учеб. пособ. — М. : ФИЗМАТЛИТ. — 2003. — 848 с.
7. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособ. для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 664 с.
8. Реди Дж. Действие мощного лазерного излучения / Дж. Реди ; [пер. с англ. В. А. Батанова и И. К. Красюка, под ред. С. И. Анисимова]. — М. : Мир, 1974. — 468 с.
9. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В. Я. Панченко. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 664 с.
10. Байборodin Ю. В. Основы лазерной техники / Ю. В. Байборodin. — Киев : Вища школа, 1981. — 408 с.

REFERENCES

1. Kodak DigiCap NX Patterning. Retrieved from http://graphics.kodak.com/KodakGCG/uploadedFiles/DigiCapNX_WhitePaper.pdf (in English).
2. Houl, Y. (2013). Chetkoe opisanie fleksografii vyisokoy chetkosti, ili tehnologii High Definition. Flekso Plyus, 4, 22–28 (in Russian).
3. Fernandez, J. HD Flexo-Screening and Dot shapes. Retrieved from <https://www.esko.com/en/~media/Esko/Files/Other-PDFs/eskoworld2013/AC/AC-28%20HD%20Flexo%20-%20Screening%20and%20Dotshapes-Screen%20Manager%20b.pdf> (in English).
4. HD Flexo. Retrieved from <https://www.esko.com/ru/products/overview/hd-flexo/overview/> (in Russian).
5. Laskin, A. V., Minin, P. V., Maik, V. Z., & Sorokin, B. A. (2001). Computer-to-Plate dlya fleksografii: klyuchevyie aspekty tehnologii. Moskow: Kursiv (in Russian).
6. Landsberg, G. S. (2003). Optika. Moskow: FIZMATLIT (in Russian).
7. Grigoryants, A. G., Shiganov, I. N., & Misyurov, A. I. (2008). Tehnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki. Moskow : MGTU im. N. E. Baumana (in Russian).
8. Redi, Dzh. (1974). Deystvie moschnogo lazernogo izlucheniya. S. I. Anisimov (Ed.). (V. A. Batanova & I. K. Krasnyuka, Trans). Moskow: Mir (in Russian).
9. Panchenko, V. Ya. (Eds.). (2009). Lazernyie tehnologii obrabotki materialov: sovremennyye problemyi fundamentalnyih issledovaniy i prikladnyih razrabotok. Moskow: FIZMATLIT (in Russian).
10. Bayborodin, Yu. V. (1981). Osnovy lazernoy tehniki. Kiev: Vyshcha shkola (in Russian).

RESEARCH OF CAUSTIC SURFACE OF LASER BEAM IN FOCUS OF OPTICAL SYSTEM

V. E. Nykyruy, V. Z. Mayik

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine
nik_volod@ukr.net*

The article reviews the possibility of reducing the focal spot of the laser beam by setting the telescope in the optical system. The change in the parameters of the laser beam in focus of the optical system after applying the telescopic systems with coefficient $N = 2$ has been theoretically analyzed. The experimental research of caustic surface of the laser beam in focus of optical system with telescope and without it has been carried out.

Keywords: *optical system, laser beam, telescope.*

Стаття надійшла до редакції 02.08.2016.

Received 02.08.2016.