

9. Каргапольцев В. С. и др. Излучательные характеристики инжекционного однока-
нального лазера на основе GaAs.— Квант. электроника, 1978, т. 5, № 1.
10. Быковский Ю. А., Елхов В. А., Ларкин А. И. Когерентность излучения инжекци-
онного лазера и его использование в голографии.— ФТП, 1970, т. 4, вып. 5.

Поступила в редакцию 23 июля 1981 г.

УДК 535.41 : 681.7.013.8

С. Т. БОБРОВ, Л. К. ИСАЕВА

(Ленинград)

СКАНИРУЮЩИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОСВЕТИТЕЛЬ

В последнее время в связи с развитием систем оптической обработки информации значительно расширилось использование лазеров в качестве источников освещения в проекционных оптических устройствах. Возможность получения освещения с очень узкой шириной спектра привлекает внимание и в других областях, где стоит задача формирования действительного изображения объекта. В частности, в микроэлектронике такое освещение позволяет устранить необходимость хроматической коррекции сложных высокоразрешающих объективов, а также применить в них новый вид оптических элементов — дифракционные оптические элементы.

Когерентность лазерного излучения, являясь необходимой во многих устройствах обработки, приводит одновременно к некоторым нежелательным явлениям. Так, рассеянный на поверхностях проекционного объектива свет, попадая в плоскость изображения, интерферирует с основным изображением, что приводит к появлению когерентного шума [1]. Контраст паразитной интерференционной картины оказывается достаточно велик даже при ничтожной доле рассеянного света. Кроме того, изменяются условия формирования изображения в проекционной системе по сравнению со случаем некогерентного освещения [2]. В частности, хорошо известно, что при когерентном освещении имеют место осцилляции интенсивности на границах светлых и темных участков изображения. При регистрации последних на фотоматериал, особенно пороговый, эти осцилляции могут привести к двоению фиксируемых границ участков изображения. Таким образом, при использовании лазерных источников света с точки зрения качества изображения возникает необходимость в искусственном разрушении когерентности источника.

Наиболее известный способ разрушения когерентности осуществляется с помощью матового рассеивателя, который помещается перед освещаемым объектом и вращается во время экспозиции или наблюдения [2]. Картина шума в изображении при этом непрерывно меняется и за время экспозиции усредняется, а при достаточно быстром вращении шум становится ненаблюдаемым и в реальном масштабе времени. Одновременно устраняются и другие нежелательные последствия когерентности, в частности осцилляции интенсивности. Однако применение матового рассеивателя приводит к такому существенному разрушению когерентности, что становится невозможной реализация некоторых методов обработки, например фурье-фильтрации. Кроме того, после матового рассеивателя лишь часть энергии источника попадает в апертурную диафрагму проекционного объектива и участвует в формировании изображения, что часто делает матовый рассеиватель неприемлемым и с энергетической точки зрения.

В определенной степени преодолеть указанные противоречия позволяет сканирующий лазерный осветитель. Суть его заключается в том, что объект освещается лазерным пучком, сформированным обычным образом, но положение этого пучка относительно оси объектива, формирующего изображение, все время меняется, так что объект в разные моменты вре-

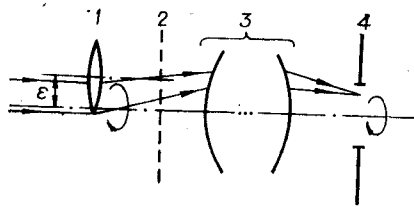


Рис. 1. Лазерный осветитель со сканированием по окружности:

1 — выходная линза осветителя, падающий на нее лазерный пучок показан коллимированным; 2 — предметная плоскость; 3 — часть проекционного объектива, расположенная между предметной плоскостью и апертурной диафрагмой; 4 — апертурная диафрагма; ε — эксцентриситет линзы осветителя относительно оси проекционного объектива.

мени освещается под разными углами, а освещающий пучок проходит через разные области проекционного объектива. В результате картина шума в изображении меняется и подавляется так же, как и при использовании матового рассеивателя.

Одна из простейших схем реализации сканирующего осветителя представлена на рис. 1. Освещающий лазерный пучок формируется так, что его фокусирование происходит в плоскости апертурной диафрагмы проекционного объектива (в противном случае система будет неизопланарной, т. е. ее нельзя охарактеризовать единой передаточной функцией [3]). Последняя линза осветителя располагается непосредственно перед объектом с эксцентриситетом относительно оси проекционного объектива и вращается вокруг нее. При этом точка фокусировки освещающего пучка также вращается в плоскости апертурной диафрагмы. Меняя эксцентриситет линзы осветителя, можно регулировать отношение радиуса окружности сканирования к радиусу апертурной диафрагмы.

Достигаемый эффект подавления когерентного шума при использовании сканирующего осветителя продемонстрирован на рис. 2. Необходимо иметь в виду, что применение сканирующего осветителя предполагает примерно одинаковое рассеяние на поверхностях объектива при всех положениях освещающего пучка. Попадание последнего в крупный дефект или в оправу объектива приводит к появлению нескомпенсированного шума, резко ухудшающего качество изображения. Что касается энергетики такого осветителя, то светопотери в нем не выше, чем в случае неподвижного пучка, если пределы сканирования не выходят за апертурную диафрагму.

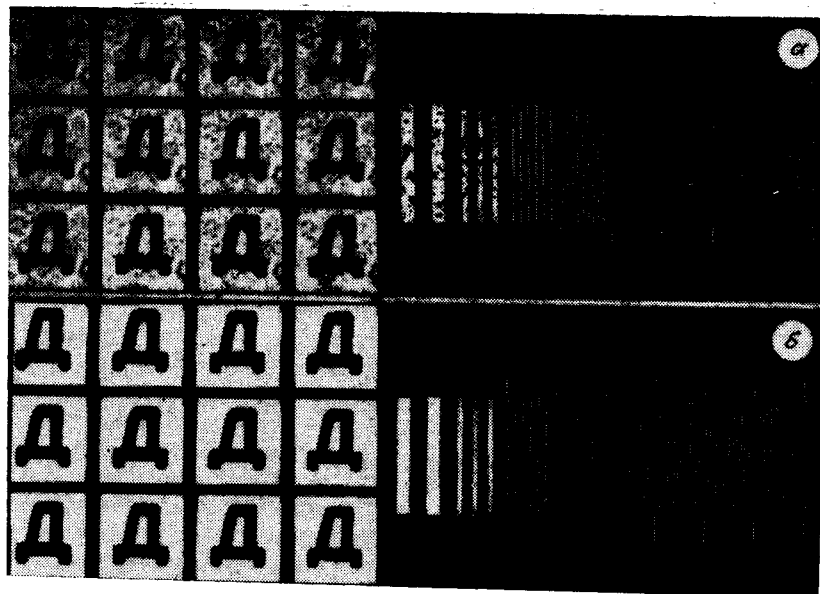


Рис. 2. Изображения, полученные в проекционной оптической системе с лазерным освещением при неподвижном освещающем пучке (а) и при наличии сканирования (б).

Рассмотрим теперь условия формирования изображения в системе со сканирующим осветителем. В каждый момент времени освещение в такой системе является когерентным, поэтому она характеризуется когерентной передаточной функцией вида [3]

$$H(f_x, f_y) = D(Af_x - \xi_0, Af_y - \eta_0), \quad (1)$$

где $D(\xi, \eta)$ — функция апертурной диафрагмы проекционного объектива; f_x, f_y — пространственные частоты; ξ_0, η_0 — координаты точки в плоскости апертурной диафрагмы, в которой фокусируется освещающий пучок; A — коэффициент размерности (в мм^2).

Импульсный отклик системы, являющийся фурье-образом передаточной функции, запишется тогда следующим образом:

$$h(x - x_0, y - y_0, \xi_0, \eta_0) = h_0(x - x_0, y - y_0) \exp\{-j(2\pi/A)[(x - x_0)\xi_0 + (y - y_0)\eta_0]\}. \quad (2)$$

Здесь h_0 — импульсный отклик при фокусировке освещающего пучка в центре апертурной диафрагмы (этот результат следует из теоремы сдвига [2]); x, y — координаты в плоскости изображения; x_0, y_0 — координаты гауссова изображения. С учетом (2) выражение для интенсивности в плоскости изображения будет иметь вид

$$I(x, y, \xi_0, \eta_0) = \iiint U(x_1, y_1) U^*(x_2, y_2) h_0(x - x_1, y - y_1) \times \\ \times h_0^*(x - x_2, y - y_2) \exp\{j(2\pi/A)[(x_2 - x_1)\xi_0 + (y_2 - y_1)\eta_0]\} \times \\ \times dx_1 dy_1 dx_2 dy_2, \quad (3)$$

$U(x, y)$ — распределение амплитуды поля в идеальном дифракционно неограниченном изображении объекта, * — знак сопряжения.

Теперь необходимо усреднить (3), так как ξ_0, η_0 являются функциями времени. Допустим, что за интересующий промежуток времени освещающий пучок создает в плоскости апертурной диафрагмы (при отсутствии объекта) некоторое распределение освещенности $G(\xi_0, \eta_0)$. Тогда усредненная интенсивность изображения в точке (x, y) запишется так:

$$\bar{I}(x, y) = \iint I(x, y, \xi_0, \eta_0) G(\xi_0, \eta_0) d\xi_0 d\eta_0. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4) и меняя порядок интегрирования, получим

$$\bar{I}(x, y) = \iiint U(x_1, y_1) U^*(x_2, y_2) h_0(x - x_1, y - y_1) h_0^*(x - x_2, y - y_2) \times \\ \times \gamma(x_2 - x_1, y_2 - y_1) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2, \quad (5)$$

где

$$\gamma(x_2 - x_1, y_2 - y_1) = \iint G(\xi_0, \eta_0) \exp\left\{j \frac{2\pi}{A} \times \right. \\ \left. \times [(x_2 - x_1)\xi_0 + (y_2 - y_1)\eta_0]\right\} d\xi_0 d\eta_0. \quad (6)$$

Таким образом, использование сканирующего осветителя приводит к тому, что условия формирования изображения становятся соответствующими частично-когерентному случаю [4], причем функция взаимной когерентности γ есть фурье-образ того распределения освещенности, кото-

рое создается осветителем в плоскости апертурной диафрагмы. Если сканирование отсутствует, то $G = \delta(\xi_0, \eta_0)$ и $\gamma = 1$ (когерентный случай). Для реализации некогерентного освещения ($\gamma = \delta(x_2 - x_1, y_2 - y_1)$) необходимо создать равномерную освещенность во всей плоскости апертурной диафрагмы ($G(\xi_0, \eta_0) = 1$). В случае сканирования по окружности радиусом r $G = \delta(\sqrt{\xi_0^2 + \eta_0^2} - r)$ и $\gamma \sim J_0(C\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2})$ и т. д.

Возможность реализации в сканирующем осветителе различных функций взаимной когерентности позволяет в каждом конкретном случае подбирать вид γ , наиболее адекватно отвечающий решаемой задаче. По-

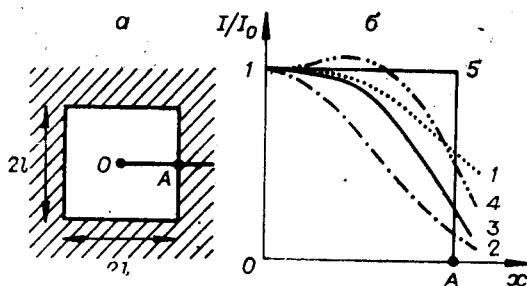


Рис. 3. Светлый квадратный объект (а) и распределение относительной интенсивности вдоль перпендикуляра к середине стороны в его изображении при различных способах освещения (б):

1 — некогерентное освещение; 2 — когерентное освещение; 3 — сканирование с заполнением области апертурной диафрагмы; 4 — сканирование по окружности (отношение радиуса окружности сканирования к радиусу апертурной диафрагмы равно 0,8); 5 — распределение интенсивности в идеальном дифракционно-неограниченном изображении.

кажем это на следующем примере. В микроэлектронике проекционные устройства применяются для формирования и регистрации изображений прямоугольных бинарных структур. Рассмотрим создаваемое проекционной системой изображение квадратного светлого объекта со стороной, равной $2l$ (рис. 3, а), где l — рэлеевский предел разрешения системы. (Считается, что это минимальный возможный размер квадратного объекта для данного разрешения в том случае, когда искажения его формы еще приемлемы [5].) На рис. 3, б представлены распределения относительной экспозиции при регистрации изображения такого объекта вдоль перпендикуляра к середине стороны для различных способов освещения. В микроэлектронике при регистрации используются пороговые среды (например, фоторезист с подслоем хрома), которые позволяют получить бинарное изображение, хотя проекционный объектив формирует некое плавное распределение. Размеры объекта при этом не будут искажены, если экспозиция в середине стороны (см. рис. 3, а, точка А) будет соответствовать критической экспозиции фотоматериала, а для стабильности процесса регистрации необходимо, чтобы относительная экспозиция в этой точке равнялась $1/2$, т. е. была бы равноудалена как от максимальной, так и от минимальной экспозиции в изображении. Этому требованию удовлетворяет случай некогерентного освещения (см. рис. 3, б, кривая 1) и не удовлетворяет случай когерентного освещения (кривая 2). С помощью сканирующего осветителя практически невозможно добиться строго некогерентных условий формирования изображения (это, прежде всего, очень невыгодно энергетически: нужно обеспечить равномерную освещенность на большом участке плоскости апертурной диафрагмы). Если же во избежание потерь света ограничиться засветкой только области самой апертурной диафрагмы, то относительная экспозиция в точке А все равно будет существенно меньше 0,5 (кривая 3). Оказывается, что нужный результат можно получить путем сканирования по окружности. При отношении радиуса окружности сканирования к радиусу апертурной диафрагмы 0,8 относительная экспозиция в середине стороны объекта очень близка к 0,5, а появляющиеся в изображении осцилляции незначительны (кривая 4).

Наконец следует отметить, что сканирующий осветитель, разрушая пространственную когерентность освещения, тем не менее дает возможность использовать некоторые методы когерентной обработки изображения. При сканировании фурье-образ объекта, формируемый в плоскости апертурной диафрагмы, оказывается размазанным, расфокусированным,

но во многих случаях эта расфокусировка не мешает проводить частотную обработку. Так, при сканировании по окружности, применяя стоп-фильтр в виде кольца, можно осуществлять фильтрацию низких частот столь же эффективно, как и при неподвижном освещающем пучке.

Резюмируя, можно сказать, что сканирующий осветитель является устройством, позволяющим эффективно влиять на степень когерентности освещения в проекционной системе и добиваться разумного компромисса между качеством изображения и возможностью применения методов когерентной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Oliver B. M. Sparkling Spots and Random Diffraction.— Proc. IEEE, 1963, vol. 51, p. 220—221.
2. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1973.
4. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения.— М.: Мир, 1964.
5. Федотов А. Я., Поль Г. Фотолитография и оптика.— М.: Сов. радио, 1975.

Поступила в редакцию 20 февраля 1981 г.
