

УДК 533.9:621.373.8+535-32

РЕГИСТРАЦИЯ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С СУБСЕКУНДНЫМ УГЛОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ В МР ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА ПРИ ПОМОЩИ ФОТОПЛЕНКИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Н. Н. Колачевский, М. М. Митропольский, Е. Н. Рагозин,
В. А. Слемзин, Н. В. Уварова¹

С помощью лазерно-плазменного источника излучения и фокусирующих многослойных зеркал получены квазимонохроматические изображения тест-объектов на длине волны $\lambda \approx 18$ нм с субсекундным угловым разрешением. Изображения регистрировались при помощи новой фотопленки высокого разрешения для МР-ВУФ области спектра.

Наш подход к созданию лабораторного источника (квази)монохроматических поляризованных пучков в диапазоне $\lambda < 350 \text{ \AA}$ основан на применении многослойных зеркал (МЗ), диспергирующих элементов и абсорбционных фильтров в совокупности с лазерно-плазменным источником излучения (ЛПИ) [1 - 4]. Предельно достижимые яркость и монохроматичность пучка определяются, в частности, качеством многослойной оптики. Так, в схеме стигматического спектрометра высокого разрешения [5], оснащенного двумя фокусирующими МЗ нормального падения и отражательной дифракционной решеткой скользящего падения, предельное спектральное разрешение равно $\delta\lambda \sim \left| \frac{d\lambda}{d\beta} \right| \delta\beta$, где $\frac{d\lambda}{d\beta} = \sin \beta / mp$ - обратная угловая дисперсия схемы, β - скользящий угол дифракции, m - спектральный порядок, p - плотность нанесения штрихов решетки, а $\delta\beta$ - угловое разрешение, обеспечиваемое фокусирующими МЗ. Факторами, ограничивающими качество пучка, могут быть малоугловое рассеяние на межслойных шероховатостях в

¹АО НИИХИМФОТОПРОЕКТ, г. Москва.

многослойной структуре и шероховатостях подложки, а также аберрации пучка из-за отклонений формы поверхности подложки. (Эти вопросы подробно рассмотрены в [6].) В частности, если угловое разрешение близко к дифракционному пределу ($\delta\beta \approx \lambda/D$), теоретическая разрешающая способность достигает своего предела, обусловленного общим числом штрихов дифракционной решетки: $\left(\frac{\lambda}{\delta\lambda}\right)_{теор} \simeq m\rho W$ (W – ширина решетки).

Оценка отображающих характеристик МЗ, равно как и реализация высокой спектральной разрешающей способности у дифракционных приборов, обусловлена способностью регистрировать малые изображения в МР диапазоне. Например, дифракционный размер изображения точечного источника, находящегося вблизи центра кривизны МЗ с радиусом $R = 1$ м и апертурой $D = 1$ см на $\lambda \simeq 100 \text{ \AA}$ составляет около 1 мкм. Среди всех известных детекторов МР излучения (исключая фоторезист, имеющий существенно более низкую чувствительность) фотопленка по-прежнему обладает наилучшим пространственным разрешением. Отечественная фотопленка УФ-4, как правило используемая в спектрометрии МР диапазона, обладает разрешением ~ 150 линий/мм. В настоящей работе была успешно применена новая фотопленка УФ-н, разработанная в АО НИИХИМФОТОПРОЕКТ. УФ-н отличается от УФ-4 примерно вдвое меньшим размером зерна и обладает разрешением не менее 350 линий/мм.

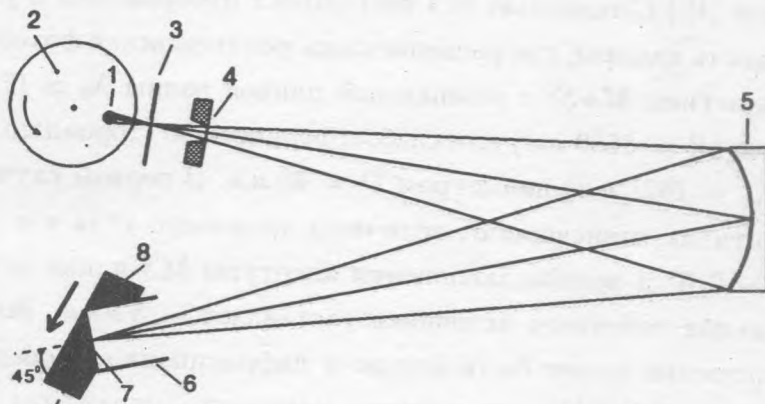


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – лазерная плазма; 2 – вращающаяся мишень; 3 – тест-объект; 4 – свободный Al фильтр толщиной 0,2 мкм; 5 – фокусирующее МЗ с $\lambda_0 \approx 17,5$ нм, $\Delta\lambda_{1/2} \approx 0,9$ нм; 6 – камера с рентгеновской фотопленкой; 7, 8 – столики, обладающий трансляцией под углом $\approx 45^\circ$ к оси падающего пучка.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Лазерная плазма возбуждалась второй гармоникой ($\lambda = 0,54 \text{ мкм}$) одномодового лазера на кристаллах $Nd:YALO_3$ с пассивной модуляцией добротности; энергия лазерного импульса на мишени – до $0,15 \text{ Дж}$, длительность – 5 нс . Пучок второй гармоники фокусировался линзой из тяжелого флинта с $f = 75 \text{ мм}$ на плоскую мишень из нержавеющей стали ($18\% Cr, 70\% Fe, 10\% Ni$) в пятно с эффективной площадью $\sim 10^{-5} \text{ см}^2$ и пиковой плотностью потока $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ Вт/см}^2$. Шаговый мотор вращал мишень вокруг вертикальной оси. Лазерная плазма подсвечивала тест-объект, расположенный неподалеку от центра кривизны МЗ. В качестве тест-объектов использовались либо спектральная щель с шириной раскрытия 5 мкм , либо мелкая двумерная никелевая сетка с периодом 10 мкм и окном 5 мкм , наложенная на более грубую сетку с периодом 100 мкм и окном 70 мкм . На пути пучка на расстоянии 60 мм после тест-объекта помещался абсорбционный фильтр (свободная алюминиевая пленка толщиной $0,2 \text{ мкм}$ диаметром 3 мм). Фильтр служил для отсеечения видимого и УФ излучения ЛПИ вне резонансного пика отражения МЗ, включая подавление нерезонансного "френелевского" отражения в многослойной структуре с длинноволновой стороны от резонансного максимума. Фильтр не обладал поддерживающей структурой, вносящей дифракцию и искажающей регистрируемое изображение. (Эффект дифракции на поддерживающей структуре тонкопленочного фильтра наблюдался нами в работе [4].) С помощью МЗ тест-объект отображался с увеличением 1:1 на выходную плоскость камеры, где располагалась рентгеновская фотопленка. Использовались МЗ с покрытием $Mo-Si$ с резонансной длиной волны $\lambda_0 \simeq 17,5 \text{ нм}$, нанесенные на сферическую ($R = 1600 \text{ мм}$) или слабоасферическую (тороидальную) подложку ($R_s = 1620 \text{ мм}, R_m = 1621 \text{ мм}$) диаметром $D = 30 \text{ мм}$. В первом случае преобладает aberrация астигматизма, зависящая от величины внеосевого угла γ и заполнения МЗ. Например, при $\gamma \sim 0,6^\circ$ и полном заполнении апертуры МЗ длина астигматического размытия изображений точечного источника составляет $\sim 5 \text{ мкм}$. Во втором случае при $\gamma \sim 1,7^\circ$ разрешение может быть близко к дифракционному пределу ($\sim 1 \text{ мкм}$). Спектральная ширина (FWHM) резонансного максимума отражения для указанного МЗ составляет около $0,9 \text{ нм}$ [7].

Ввиду того, что длина волны видимого света превосходит λ_0 примерно в 30 раз, предварительная наводка на резкость в видимом свете была совершенно недостаточной. Для более точного совмещения фотопленки с плоскостью изображения (в принципе, с точностью $\sim \lambda_0/\Omega^2$) камера располагалась на столике с направляющей под углом $\simeq 45^\circ$ к оси падающего пучка. В эксперименте осуществлялась пошаговая трансля-

ция столика в интервалах между лазерными вспышками на расстояния порядка ста микрон. На фотопленке регистрировалась последовательность из пятидесяти изображений тест-объекта на различном расстоянии от фокуса, смещенных друг относительно друга в поперечном направлении. В этой последовательности два-три соседних изображения тест-объекта обладали максимальной четкостью и использовались нами для оценки качества МЗ и фотопленки. Все элементы схемы располагались на оптическом столе с размерами $3,6 \times 0,6$ м, размещенном в вакуумной камере $3,8 \times 0,9$ м с безмасляной откачкой турбомолекулярным наносом. Оптический стол и корпус камеры механически развязаны друг от друга для подавления вибраций. Как правило, при каждом положении столика производилась лишь одна лазерная вспышка. В отдельных случаях делалось две лазерных вспышки, и тогда изображение представляло собой суперпозицию двух, вообще говоря, не совпадающих изображений из-за наличия остаточных механических вибраций. При регистрации изображения за одну лазерную вспышку пятинаносекундной длительности влияние вибраций ничтожно мало.

На рис. 2а показаны микроденситограммы изображения щели шириной 10 мкм в фокусе, а также двойного изображения щели (две лазерные вспышки) вдали от положения наилучшей фокусировки, выявляющего остаточные вибрации на уровне нескольких угловых секунд. Оба изображения на рис. 2а зарегистрированы на фотопленку УФ-4. На рис. 2б показаны микроденситограммы изображений щели $S = 5$ мкм в фокусе, зарегистрированные при помощи новой фотопленки УФ-н.

На рис. 3 представлена фотография двумерного тест-объекта, полученная с помощью тороидального МЗ. Отчетливо видны квадраты 5×5 мкм, разделенные неэкспонированными промежутками шириной 5 мкм. Для полного заполнения МЗ подсвечивающая плазма располагалась на расстоянии 1 см перед тест-объектом, из-за чего число подсвечиваемых ячеек грубой сетки невелико. Имевшийся в нашем распоряжении микроденситометр не позволял анализировать почернение пленки на участке с размерами 5×5 мкм². При ширине щели микроденситометра, соответствующей 1,2 мкм на пленке, минимальная высота щели соответствовала 70 мкм – семи периодам мелкой сетки. Поэтому приводимая на рис. 4 микроденситограмма дает почернение, усредненное по одной координате. Предполагая, что двумерное изображение идентично в обоих направлениях, по усредненной прописи можно восстановить пиковое почернение. С хорошей долей уверенности можно утверждать, что оно составляет 0,40; при этом контраст изображения (отношение экспозиций в максимуме и минимуме) составляет около 3,6.

Анализ изображений щели и двумерного тест-объекта позволяет утверждать, что

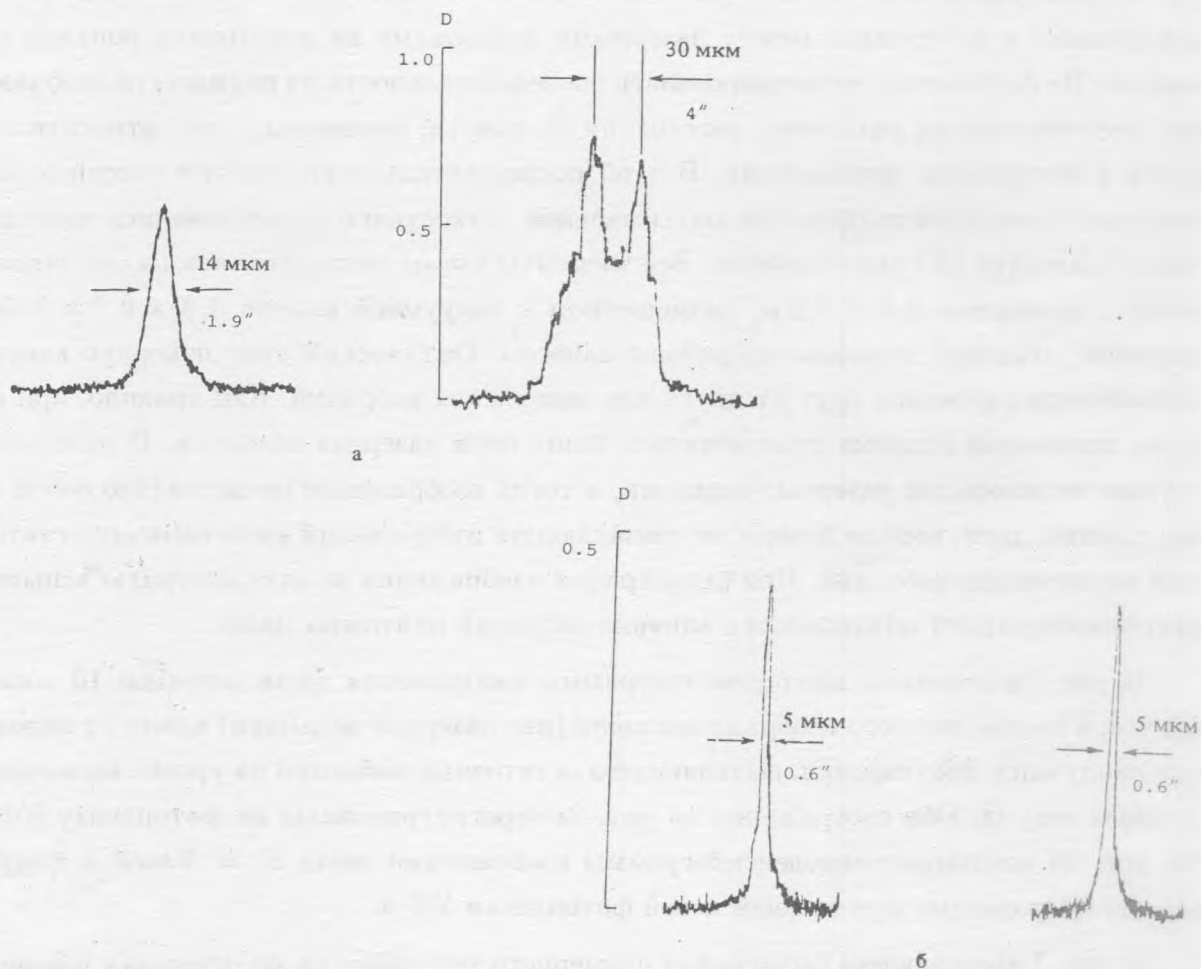
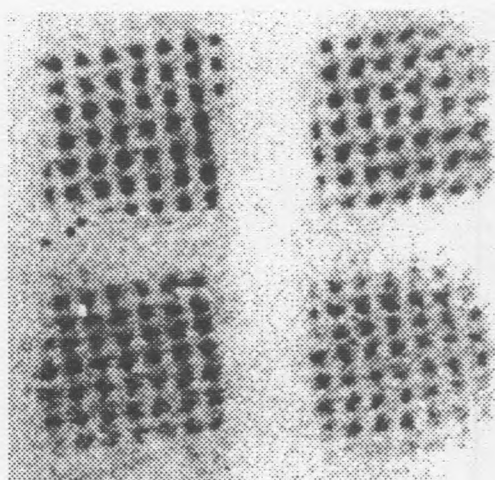


Рис. 2. а) Микроденситограммы изображения щели шириной 10 мкм в фокусе, а также двойного изображения щели (две лазерные вспышки) вне фокуса, зарегистрированные на фотопленку УФ-4. б) Микроденситограммы изображений щели $S = 5$ мкм в фокусе, зарегистрированные при помощи новой фотопленки УФ-н.

изображение точечного источника по ширине (FWHM) не превосходит 2,5 мкм ($\approx 0,32$ угловых секунды, что в данном случае составляет всего $2,4\lambda_0/D$). Средний размер зерен фотоэмульсии на участке пленки изображения оценивается нами в 1 – 1,5 мкм. Отсюда следует, что собственное разершение МЗ, вероятно, не хуже 2 мкм, или $1/4''$. Близость этих цифр к дифракционному пределу служит экспериментальным обоснованием нашего подхода к спектроскопии МР диапазона с использованием фокусирующих МЗ.

Наряду с перечисленными применениями в спектроскопии, многослойная оптика



0,6"

Рис. 3. Фотография двумерного тест-объекта, полученная с помощью МЗ с $\lambda_0 \approx 17,5$ нм. Изображение сформировано излучением в полосе шириной $\approx 0,9$ нм вокруг λ_0 . Отчетливо видны квадраты 5×5 мкм, разделенные неэкспонированными промежутками шириной 5 мкм. Угловой размер квадратов $0,6 \times 0,6$ угловых секунд.

успешно используется в рентгеновской астрономии, где ее качество также представляет несомненный интерес. В связи с этим отметим, что по опубликованным данным наилучшее угловое разрешение, полученное в американском ракетном эксперименте MSSTA по фотографиям изображений Солнца в МР диапазоне [8], составляет около $0,7''$. В другом ракетном пуске получены изображения солнечного диска и края диска Луны в ходе солнечного затмения 11 июля 1991 г. [6]. Отмечены очень высокое разрешение (на уровне угловой секунды) и отличный контраст рентгеновского изображения, созданного телескопом нормального падения на $\lambda = 6,35$ нм.

Авторы признательны А. В. Митрофанову, предоставившему в наше распоряжение Al фильтр.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта: 93-02-15382). Исследование, представленное в данной статье, стало частично возможным благодаря гранту N МКА000 Международного научного фонда.

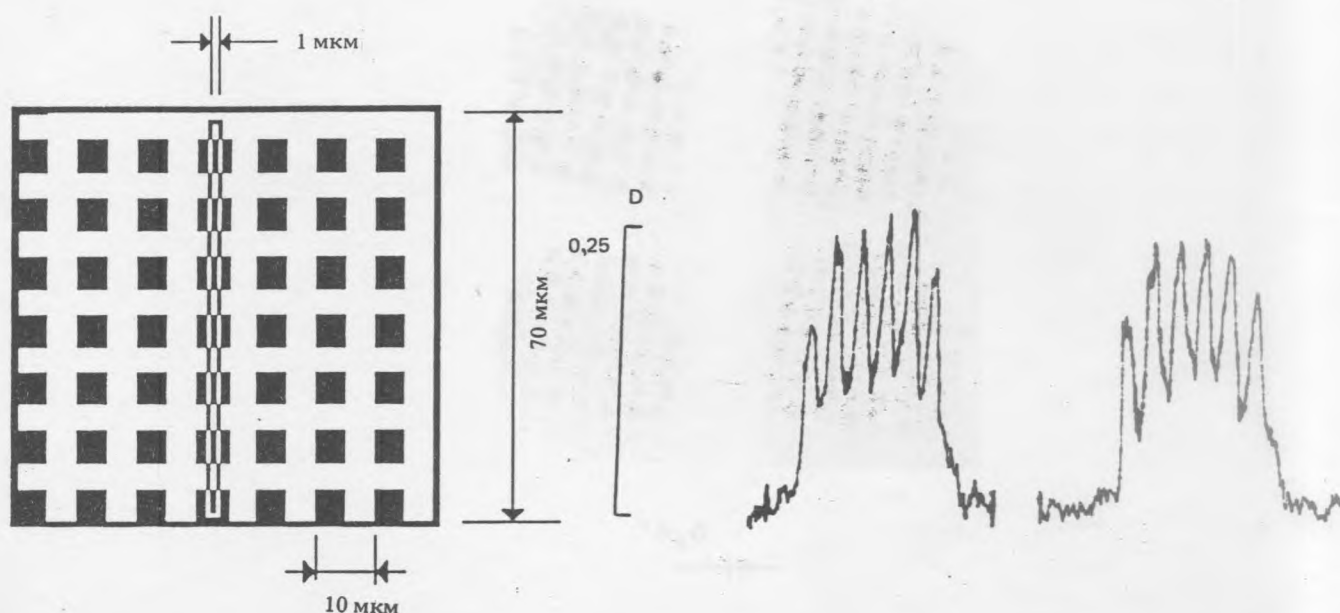


Рис. 4. Микроденситограмма изображения двумерного тест-объекта с усреднением по одной координате. Высота щели соответствует 70 мкм – семи периодам мелкой сетки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Арцимович В. Л., Гапонов С. В., Касьянов Ю. С. и др. Письма в ЖЭТФ, **46**, 311 (1987).
- [2] Рагозин Е. Н. Оптика и спектроскопия, **66**, 439 (1989); Труды ФИАН, **196**, 123 (1989).
- [3] Житник И. А., Кузин С. В., Митропольский М. М. и др. Квантовая электроника, **20**, 89 (1993).
- [4] Колачевский Н. Н., Кондратенко В. В., Митропольский М. М. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3-4, 12 (1993).
- [5] Ragozin E. N., Kolachevsky N. N., Mitropolsky M. M. et al., Physica Scripta, **47**, 495 (1993).
- [6] Spiller E., Stearns D., and Krumrey M., J. Appl. Phys., **74**(1), 107 (1993).

- [7] Ragozin E. N., Kolachevsky N. N., Mitropolsky M. M. et al., Proc. SPIE, **2012**, 209 (1993).
- [8] Walker A. B. C., Jr., Hoover R. B., and Barbee T. W., Jr., Proc. SPIE, **2011**, 489 (1993).

Поступила в редакцию 11 мая 1994 г.