

УДК 533.9:621.373.8 + 535.32

СОЗДАНИЕ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ $\lambda \leq 14$ нм

Н. Н. Колачевский, В. В. Кондратенко,¹ М. М. Митропольский,
А. В. Митрофанов, Е. Н. Рагозин, А. И. Федоренко¹, С. А. Юлин¹

Получены квазимонохроматические изображения лазерно-плазменного микроисточника излучения с помощью сферического многослойного Mo-Si зеркала на $\lambda_0 \simeq 13,6$ нм и абсорбционного радиевого фильтра с окном прозрачности 4 – 14 нм, который отсекает излучение вне резонансного максимума отражения зеркала. Продемонстрирована двумерная дифракция МР излучения на поддерживающей структуре фильтра.

Лазерная плазма (ЛП) в сочетании с фокусирующими многослойными зеркалами (МЗ) нормального падения представляет собой эффективный источник квазимонохроматического излучения с высокой импульсной яркостью [1], применяемый, в частности, для оценки компонентов рентгеновской оптики [2–4]. Поскольку ЛП является широкополосным источником, переход к иному спектральному участку осуществляется подбором МЗ с соответствующей резонансной длиной волны λ_0 . В настоящее время многослойной оптикой освоен диапазон $\lambda_0 \simeq 23 - 350 \text{ \AA}$; степень монохроматизации определяется шириной резонансной кривой отражения и изменяется в пределах $\lambda_0/\Delta\lambda_{1/2} \sim 100 - 10$. Для отсекающего излучения, не относящегося к резонансному максимуму отражения МЗ (в

¹Харьковский политехнический институт

том числе, видимого излучения), можно использовать тонкопленочные абсорбционные фильтры.

Свободные субмикронные металлические слои используются для отсеечения видимого и УФ излучения в спектральных приборах для астрофизических исследований [5, 6]. Для придания необходимой механической прочности по отношению к ударам, вибрациям, акустическим нагрузкам и градиентам давления такие фильтры изготавливаются на двумерных поддерживающих структурах (ПС). Помимо того, что ПС перекрывает часть падающего потока, она вносит дифракцию, способную существенно исказить регистрируемое изображение. В то же время, если ПС является регулярной, мы получаем оптический компонент с умеренной дисперсией, совмещающий свойства абсорбционного фильтра и дифракционной решетки на пропускание (ДР) [7]. В настоящей работе сообщается об изготовлении родиевого фильтра толщиной 0,1 мкм на регулярной ПС. Фильтр был испытан с помощью лазерно-плазменного источника (ЛПИ) излучения [2-4] в комбинации со сферическим $Mo - Si$ МЗ ($R = 1$ м, $\lambda_0 = 2nd \simeq 13,6$ нм), и были зарегистрированы квазимонохроматические изображения ЛП на фотопленке.

Тонкие пленки некоторых тугоплавких металлов (Mo, Ru, Rh) обладают достаточно высоким пропусканием в диапазоне 4 - 14 нм и оказываются дополнительными к алюминию - превосходному материалу для $\lambda > 17$ нм. В литературе имеются лишь единичные сообщения об использовании фильтров этой группы металлов [6, 8].

Фильтр представляет собой пленку Rh толщиной около 0,1 мкм, полученную магнетронным распылением мишени в атмосфере аргона. Эта пленка вместе со слоем формвара толщиной около 500 \AA закреплялась на регулярной никелевой опорной сетке с периодом $d_1 = 10,0$ мкм, шириной просвета $a_1 = 7,3$ мкм и прозрачностью (по потоку) $T_1 = (a_1/d_1)^2 \simeq 0,53$. Мелкая сетка крепилась к жесткой поддерживающей молибденовой сетке с крупными ячейками ($d_2 = 0,68$ мм, $a_2 = 0,58$ мм, $T_2 = 0,72$). Грубая сетка фиксировалась в оправке. Суммарное пропускание обеих сеток $T_{ss} \simeq T_1 T_2$ составляло около 0,4, апертура фильтра - 36 мм. Пропускание сплошной Rh пленки толщиной 0,1 мкм без учета пропускания слоя формвара по данным [9] равно $\sim 25\%$ на $\lambda \sim 13,5$ нм.

ЛП возбуждалась второй гармоникой лазера с модулированной добротностью на алюминате $Nd : YAlO_3$ с частотой вспышек ~ 1 Гц и параметрами импульса $E_2 \simeq 0,2$ Дж, $\tau_2 \simeq 5$ нс на $\lambda_2 \simeq 0,54$ мкм [2-4]. Учитывая, что эффективная коротковолновая граница ЛПИ λ_{min} обусловлена фоторекомбинацией на ионах максимальной кратности и что заведомо присутствуют ионы с потенциалом ионизации $\simeq 300$ эВ [4],

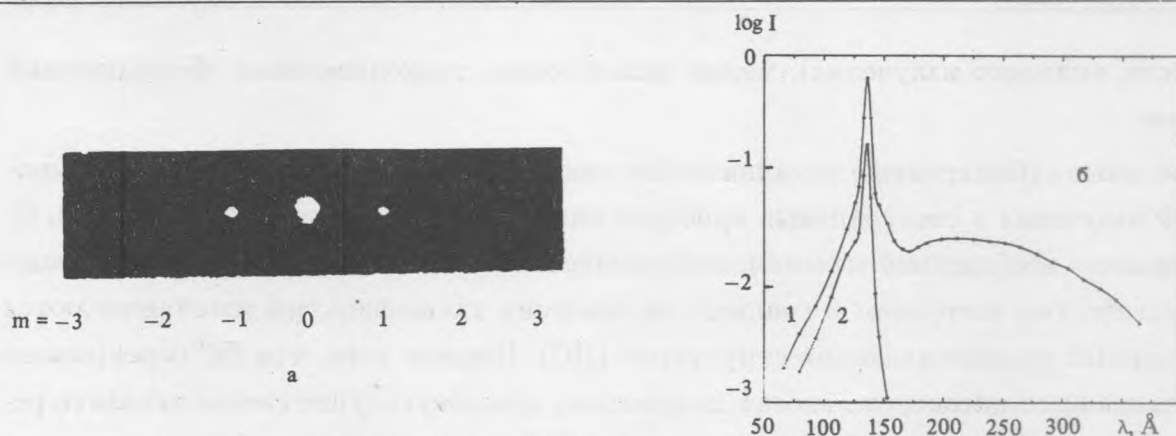


Рис. 1. Диспергированное изображение ЛП (а) и форма спектра (б) после отражения от МЗ (1) и после прохождения *Rh* фильтра (2).

находим что $\lambda_{min} \leq 4$ нм. Этот вывод подтверждается успешным испытанием МЗ на $\lambda_0 = 4,5$ нм [10]. При использовании нержавеющей стали в качестве материала мишени и регистрации излучения на фотопленку УФ-4 эффективная длинноволновая граница $\lambda_{max} \sim 60$ нм, что связано с падением чувствительности пленки в длинноволновой области. При использовании другого приемника излучения и подборе материала мишени λ_{max} может существенно возрасти. Диспергированное изображение ЛП (рис. 1а) было зарегистрировано с помощью МЗ ($\lambda_0 \simeq 13,6$ нм) и ДР ($p \simeq 500$ штрих/мм), образующих бесщелевой спектрограф с обратной дисперсией $d\lambda/dl \simeq 6,7$ нм/мм, в котором спектральное разрешение определяется размерами источника (в данном случае – 0,15 мм, что соответствует разрешению 1 нм). Наряду с изображениями ЛП, образованными излучением в пределах резонансного максимума отражения в различных спектральных порядках, с длинноволновой стороны хорошо видно протяженное крыло, простирающееся на несколько десятков нм. Этот относительно слабый непрерывный фон возникает, по всей видимости, из-за нерезонансного "френелевского" отражения в многослойной структуре; заключенная в нем энергия сопоставима с энергией излучения источника. Для более точного определения спектральных характеристик излучения, отраженного от МЗ, на расстоянии 35 мм от ЛП на пути пучка устанавливалась щель шириной 37 мкм, а на фотопленку фокусировалось ее изображение (рис. 1 из [3]). Щель, МЗ и ДР образуют стигматический спектрограф с разрешением 0,25 нм. Эта схема используется нами для измерения однородности спектральных характеристик у различных МЗ по апертуре [3, 4]. Ширина локальной кривой отражения для данного МЗ составляет 0,37 нм, однако из-за небольшого уменьшения λ_0 к краю апертуры ширина интегральной кривой отражения $\Delta\lambda_{1/2} \simeq 0,5$ нм. На рис. 1б представлена форма

отраженного спектра (кривая 1), восстановленная из микроденситограммы спектра с учетом характеристической кривой фотопленки. Используя данные [9], можно рассчитать форму спектра после прохождения фильтра: слой Rh толщиной 0,1 мкм полностью отсекает "френелевское" крыло (кривая 2). Фильтр отсекает также УФ и видимое излучение, которое на спектрограмме не присутствует. Таким образом, комбинация МЗ с $\lambda_0 \simeq 13,6$ нм и Rh фильтра обеспечивает выделение квазимонохроматического пучка с $\lambda_0/\Delta\lambda_{1/2} \simeq 30$, вся энергия которого заключена в пределах резонансной кривой отражения МЗ.

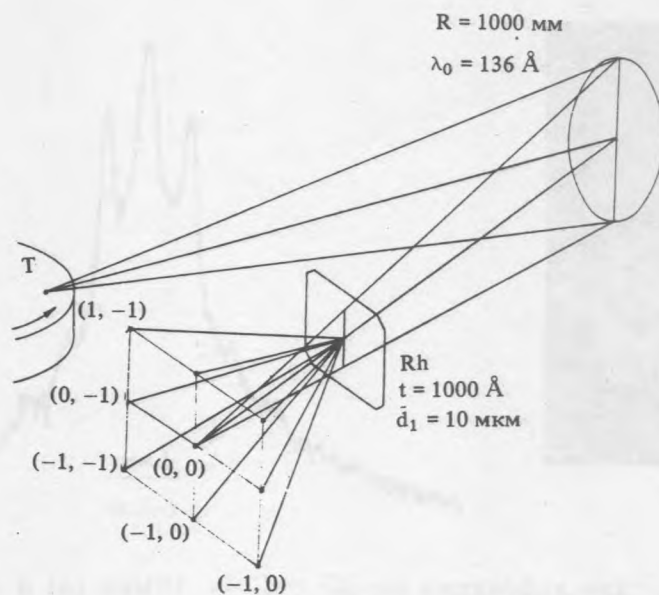


Рис. 2. Схема эксперимента, демонстрирующего дифракцию МР излучения на ПС-фильтре.

Если фильтр помещен вблизи от плоскости изображения ($L < d/\Theta$, где Θ – угловой размер пучка, формирующего изображение, а L – расстояние изображение – фильтр), то ПС накладывает на изображение периодическую тень. Увеличение L приводит к ухудшению разрешения из-за дифракции (по сравнению с дифракционным пределом). Схема для демонстрации двумерной дифракции МР излучения на ПС показана на рис. 2 ($L = 430$ мм). Фотография и микроденситограмма изображения приведены на рис. 3. Помимо первых порядков дифракции, видны более слабые порядки вплоть до пятых. Длина волны прошедшего излучения, определенная по расстоянию между максимумами дифракционной картины, совпадает с $\lambda_0 \simeq 13,6$ нм. Пропускание фильтра, оцененное из сравнения почернений пленки в экспериментах с фильтром и с ДР, составило

$(9 \pm 2)\%$, что близко к ожидаемому $T(\lambda_0) = T_{Rh}(\lambda_0)T_{ss} \simeq 11\%$. Если расстояние между дифракционными максимумами превосходит размер изображения микроисточника, более уместно определить пропускание фильтра как отношение интенсивности какого-либо порядка спектра (m, n) к интенсивности падающего потока. В одномерном случае отношение интенсивности n -го порядка к суммарной интенсивности прошедшего света дается выражением $I^{(n)}/I_{tr} = d \sin^2(n\pi a/d)/\pi^2 n^2$. В двумерном случае для нулевого порядка, отвечающего дифракции на мелкой сетке, имеем $T^{(0,0)}(\lambda) = (a_1/d_1)^2 T(\lambda) = (a_1/d_1)^4 (a_2/d_2)^2 T_{Rh}(\lambda)$, что в данном случае дает $T^{(0,0)}(\lambda_0) \simeq 0,05$.

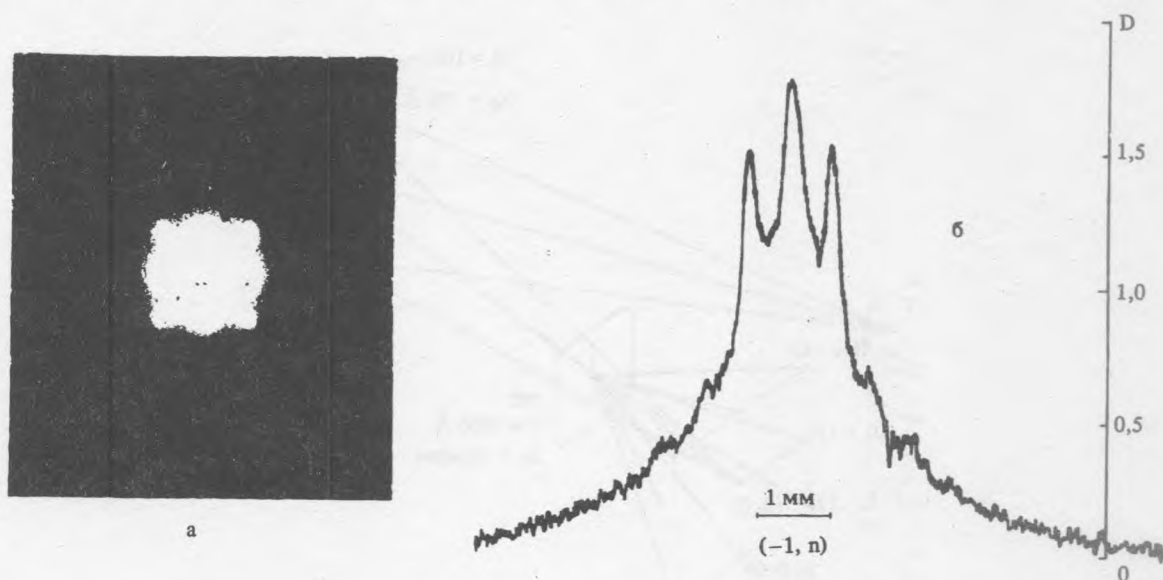


Рис. 3. Двумерная картина дифракции на ПС с $d_1 = 10$ мкм (а) и микроденситограммы изображений ЛП после фильтра ($\lambda_0 \simeq 13,6$ нм).

В квазимонохроматическом пучке содержится $\sim 10^7$ фотонов (за вспышку) после фильтра, что достаточно для проведения разнообразных измерений, включая рефлектометрию.

Авторы благодарят В. В. Корнеева, Ф. А. Пудонина и В. А. Слемзину за содействие.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Арцимович В. Л. и др. Письма в ЖЭТФ, **46**, 311 (1987).
- [2] Житник И. А. и др. Квантовая электроника, **20**, 89 (1933).
- [3] Колачевский Н. Н. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 51 (1992).

- [4] R a g o z i n E. N. et al. Physica Scripta, **47** (1993).
- [5] Ж и т н и к И. А. и др. Труды ФИАН, **195**, 19 (1989).
- [6] W a l k e r, Jr. A. B. C. et al. Opt. Engng., **29**, 581 (1990).
- [7] G u r s k y Н., Z e h n p f e n n i n g Т. Appl. Opt., **5**, 875 (1966).
- [8] P o w e l l F. R. et al. Opt. Engng., **29**, 614 (1990).
- [9] H e n k e B. L. et al. Atom. Data Nucl. Data Tabl., **27**, 1 (1982).
- [10] A k h s a c h a l y a n A. D. et al. (в печати).

Поступила в редакцию 11 января 1993 г.