

07;12

Компактный спектрометр на область спектра 5–30 нм

© В.П. Белик, М.В. Петренко, А.В. Савушкин

Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: v.belik@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 июня 2011 г.

Разработана оптическая схема, создан и испытан опытный образец компактного спектрометра на область спектра 5–30 нм. Малые размеры спектрометра и близкое расположение его по отношению к источнику излучения (34 мм) позволяют использовать прибор внутри небольших вакуумных камер, содержащих „точечные“ источники излучения (лазерная плазма и т.п.) для исследования их спектрального состава и интенсивности.

Описываемый в данной статье спектрометр создавался для конкретной задачи — измерения интенсивности и спектрального состава излучения лазерно-плазменного источника (ЛПИ) в дальней вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра $\lambda \approx 8–25$ нм в рамках выполнения исследовательской программы по разработке источника излучения с длиной волны 13.4 нм для нанолитографии [1].

При разработке схемы прибора учитывались следующие условия: первое — источник излучения практически точечный, размером 100–200 мкм; второе — источник размещался в вакуумной камере экспериментального стенда (ЭС), имеющей форму цилиндра диаметром 500 мм. При этом спектрометр необходимо было разместить внутри вакуумной камеры, поскольку из-за конструктивных особенностей стенда ВУФ-излучение источника невозможно было вывести за пределы камеры. Но если бы даже излучение источника можно было вывести за пределы камеры, использование любого обычного ВУФ-спектрометра с входной щелью, расположенного снаружи вакуумной камеры (соединенного с ней вакуумным переходником), привело бы к катастрофическому снижению светосилы спектрометра из-за крайне неэффективной геометрии расположения спектрального прибора относительно источника. Поэтому был выбран единственный рациональный подход в данных условиях — разработать компактный спектрометр без входной щели,

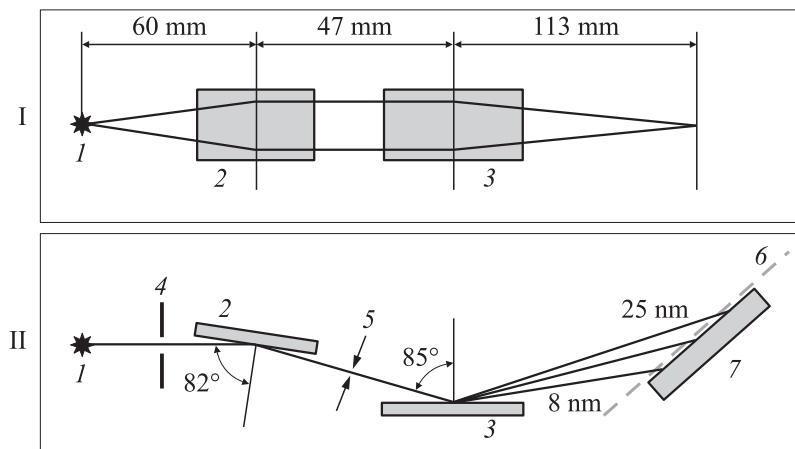


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра: I — сагиттальный план, II — меридиональный план, 1 — точечный источник излучения (лазерная плазма), 2 — тороидальное зеркало, 3 — тороидальная дифракционная решетка, 4 — входная диафрагма, 5 — промежуточная щель, 6 — плоское фокальное поле (фокальная плоскость), 7 — ПЧД.

который можно было бы разместить внутри вакуумной камеры ЭС. Это накладывало существенные ограничения на размеры оптической схемы и параметры ее элементов.

Была поставлена задача разработать схему спектрометра на основе отражательной дифракционной решетки с плоским фокальным полем, чтобы иметь возможность регистрировать излучение позиционно-чувствительным детектором (ПЧД).

Проведен анализ и расчет нескольких оптических схем спектрометра и выбрана оптимальная схема, удовлетворяющая необходимым требованиям по спектральной силе, спектральному разрешению и габаритам (рис. 1). Для рассматриваемого спектрального диапазона возможны только схемы с дифракционной решеткой, установленной под скользящим углом (несколько градусов) к падающему излучению. В таких схемах всегда имеется сильный астигматизм изображения источника, не устранимый даже при использовании тороидальной дифракционной решетки с реально осуществимыми параметрами. Поэтому, для сбора излучения

„точечного“ источника в пределах угловой апертуры дифракционной решетки и устранения астигматизма, в оптической схеме перед решеткой предусмотрена установка зеркала под скользящим углом падения. Зеркало и решетка имеют тороидальные поверхности, сагиттальные радиусы которых подобраны так, чтобы в значительной степени компенсировать астигматизм изображения. При этом остальные aberrации остаются заметными, что приводит в конечном счете к снижению разрешающей силы спектрометра. В то же время зеркало выполняет другую полезную функцию — предохраняет решетку от загрязнений (ионов, атомов, кластеров и т.п.) веществом мишени ЛПИ излучения.

Решетка (изготовлена в НПК „ГОИ им. С.И. Вавилова“) нарезная, с переменным шагом, что позволило создать в пределах рабочего спектрального диапазона достаточно плоское фокальное поле (фокальную плоскость) [2]. Это дало возможность расположить в фокальной плоскости ПЧД с плоским входным окном без существенной расфокусировки изображения во всем спектральном диапазоне. Поскольку спектрометр предназначен для „точечного“ источника излучения размером не более $200 \mu\text{m}$, он не имеет входной щели. Перед зеркалом расположена входная диафрагма, ограничивающая пучок излучения в пределах поверхности зеркала, а между зеркалом и решеткой, в фокусе зеркала, расположена промежуточная щель (входная для дифракционной решетки).

Основные параметры спектрометра: спектральный диапазон $5\text{--}30 \text{ nm}$; фокусное расстояние коллиматора (зеркала) 60 mm ; относительная апертура (светосила) $1 : 12$; обратная линейная дисперсия $0.51\text{--}0.92 \text{ nm/mm}$; угол падения излучения на зеркало 82° ; угол падения излучения на дифракционную решетку 85° ; размеры спектрометра $245 \times 90 \times 60 \text{ mm}$.

Отражательная оптика прибора имеет следующие параметры: тороидальное зеркало — меридиональный радиус 288 mm ; сагиттальный радиус 15.6 mm ; тороидальная дифракционная решетка — меридиональный радиус 500 mm ; сагиттальный радиус 50 mm ; размер заштрихованной поверхности 30×18 (высота) mm ; период решетки переменный, задаваемый по формуле

$$d(y) = d_0(1 + \mu y), \quad (1)$$

где $d_0 = 1/1200 \text{ mm}^{-1}$, μ — числовой коэффициент, y — координата в направлении нарезки решетки. Размеры решетки и зеркала (одинако-

вые) составляют 32×20 (высота) мм. На решетку и зеркало нанесено золотое покрытие. В этом случае коэффициент отражения излучения с длиной волны $\lambda = 13.4$ нм от поверхности решетки составляет примерно 70%, от зеркала $\sim 60\%$.

Предел разрешения спектрометра (с учетом аберраций) при ширине промежуточной щели 0.2 мм составляет на практике $\Delta\lambda \approx 0.25$ нм.

В качестве ПЧД использован приемник видимого излучения — линейный „прибор с зарядовой связью“ (ПЗС-линейка) ILX511 фирмы SONY с предварительной конверсией ВУФ-излучения в видимое с помощью люминофора *p*-герфенила. Для этого с входного окна ПЗС-линейки было удалено защитное стекло, вместо которого установлена специально изготовленная волоконная пластина, на которую методом термического напыления был нанесен слой *p*-герфенила толщиной $2.7\text{--}2.8$ мг/см² [3]. ПЗС-линейка имеет следующие параметры: число эффективных пикселей 2048; размер пикселя 14×200 мкм (высота); длина чувствительной области 28.67 мм.

Приемник излучения (своим входным окном) установлен в фокальной плоскости дифракционной решетки — соответственно под углом 24° к лучу с длиной волны 12.14 нм, отвечающему углу дифракции 79° . Приемник установлен так, чтобы указанный луч попадал в середину его чувствительной области. В этом положении длина чувствительной области фотоприемника (28.67 мм) соответствует спектральному интервалу ~ 17 нм (от 5.5 до 22.5 нм). Положение детектора можно перенастраивать, смещая в фокальной плоскости в направлении дисперсии так, что полный спектральный диапазон, возможный для регистрации, составляет 5–30 нм (в частности, при установке детектора на длинноволновом крае фокальной плоскости в чувствительную область детектора попадает участок спектра в 20 нм (от 10 до 30 нм)).

Продвинуться в коротковолновую область спектра (с длиной волны менее 5 нм) не позволяет излучение в нулевом порядке, забивающее полезный сигнал, которое в данной области невозможно устранить. Для перехода в длинноволновую область спектра ($\lambda > 30$ нм) резкого ограничения нет, но начинает сказываться кривизна фокальной поверхности, приводящая к расфокусировке изображения и соответственно ухудшению разрешающей способности спектрометра.

Фотоприемник управляется электронным блоком, служащим для усиления сигнала и для обработки и передачи данных в персональный компьютер (ПК). Блок смонтирован внутри корпуса спектрометра и

соединен с ПК через вакуумный резъем по интерфейсу USB. Электронный блок сопровождается программным обеспечением, которое позволяет: устанавливать режим суммирования по элементам линейки; производить начальную обработку полученных данных и выводить результат в виде графика либо в файл для последующей обработки; работать в режиме осциллографа.

В спектрометре приняты меры по подавлению рассеянного света, основу которого составляет излучение нулевого порядка дифракционной решетки, включающего весь спектр источника — от инфракрасного до ВУФ-диапазона. В частности, изготовлена и установлена в приборе ловушка нулевого порядка. В результате рассеянный свет удалось практически полностью подавить в области $\lambda > 5 \text{ nm}$.

Анализируя научные публикации, авторы не нашли описаний спектральных приборов, отвечающих всем перечисленным выше требованиям. Наиболее близким по параметрам, включая размеры, представляется разработанный А.П. Шевелько и др. (ФИАН им. П.Н. Лебедева) спектрограф [4], широко использующийся для исследования лазерной плазмы и других источников излучения. Прибор построен по схеме с постоянным углом отклонения, с входной щелью, с решеткой 600 nm^{-1} , перекрывает спектральный диапазон $8.8\text{--}21.3 \text{ nm}$ при обратной линейной дисперсии $\sim 1.4\text{--}1.8 \text{ nm/mm}$, может работать в режиме спектрографа (кассета с фотопленкой) или в режиме монохроматора (выходная щель, сканирование спектра — поворотом решетки). Длина прибора $\sim 250 \text{ mm}$.

При всех достоинствах прибор уступает нашей разработке по ширине рабочего спектрального диапазона, величине обратной линейной дисперсии, в случае спектрографа ожидаемое спектральное разрешение реализуется в узкой области спектра вблизи положения выходной щели с заметной расфокусировкой изображения (ухудшением разрешения) при уходе в обе стороны от этого положения из-за кривизны фокальной поверхности. Наличие входной щели вынуждает располагать прибор, в случае „точечного“ источника, вплотную к источнику, чтобы заполнить угловую апертуру прибора, — при удалении от источника светосила прибора быстро уменьшается.

Почти все перечисленные недостатки при значительно больших размерах прибора можно отнести и к оригинальному спектрографу [5], созданному на базе аперидического многослойного зеркала

и пропускающей дифракционной решетки, который использовался для исследования Хе-лазерной плазмы [6].

Проведены испытания работы нашего спектрометра на экспериментальной установке, включающей в себя твердотельный лазер на неодимовом стекле (длина волны 1.06 мкм, энергия в импульсе 0.1–1 J, длительность импульса 50 ns) и вакуумную камеру, откачиваемую до давления 10^{-2} Торр. Излучение фокусировалось на мишень линзой $f = 111$ mm, что давало плотность потока энергии лазерного излучения в фокусе $S \sim 2.5 \cdot 10^{10} - 2.5 \cdot 10^{11}$ W/cm². В частности, был получен спектр ЛПИ на кремниевой мишени с четко выделенными спектральными линиями, демонстрирующий как разрешающую способность спектрометра, так и эффективность конвертера (*p*-терфенила) (рис. 2).

Градуировка спектрометра по длинам волн осуществлялась по наиболее ярким (реперным) линиям, а также по краю поглощения оптического Nb–Si-фильтра. На рис. 3 представлен спектр излучения ЛПИ на вольфрамовой мишени, выделяемый Nb–Si-фильтром. На спектре виден L_{LPI} -край поглощения Si на длине волны 12.3 nm. Градуировка производилась с учетом формулы (2), связывающей длину волны λ с координатой y , определяющей положение дифрагированного луча с этой длиной волны на фокальной плоскости в направлении дисперсии (начальная точка: $y = 0$ при $\lambda = 0$):

$$y = \left(r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\alpha - \arcsin(\sin \alpha - \lambda d_0^{-1})) \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где α — угол падения излучения на решетку, d_0 — период решетки, r_1 — фокусное расстояние для луча нулевого порядка (угол дифракции β равен α), r_2 — фокусное расстояние для луча с длиной волны λ , отраженного под углом дифракции $\beta = \arcsin(\sin \alpha - \lambda d_0^{-1})$. Фокусное расстояние r_i для дифрагированного (под углом β_i) излучения с длиной волны λ_i определяется соотношением

$$r_i = \cos^2 \beta_i / ((\cos \alpha + \cos \beta_i) / R - \cos^2 \alpha / r_{ent} - \lambda_i d_0^{-1} \mu), \quad (3)$$

где R — меридиональный радиус решетки, r_{ent} — расстояние от промежуточной щели до вершины решетки.

Результатом данной работы стал опытный образец компактного спектрометра на область спектра 5–30 nm с плоским фокальным

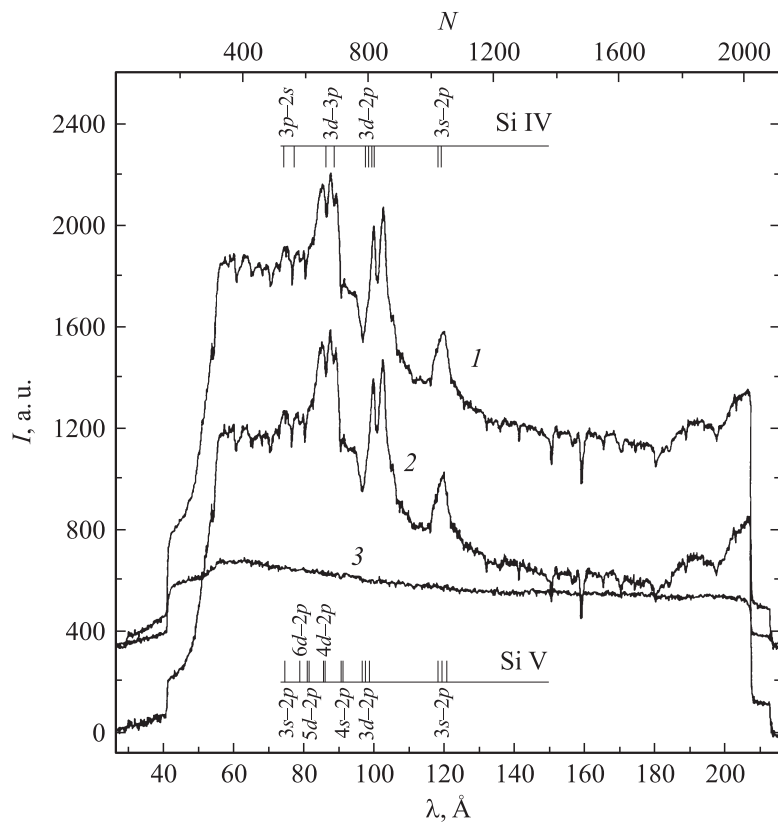


Рис. 2. Спектр излучения лазерно-плазменного источника на кремниевой мишени в зависимости от длины волны и номера пиксела ПЧД: 1 — полный сигнал от излучения источника, регистрируемый детектором, 2 — фоновый сигнал для инфракрасного, видимого и ближнего УФ спектрального диапазона, выделенного при помощи MgF_2 фильтра, 3 — результирующий (полезный) сигнал от ВУФ-излучения, выделяемого решеткой спектрометра, как результат вычета кривой 2 из кривой 1.

полем. Позиционно-чувствительным детектором в спектрометре служит фотодиодная линейка с люминесцентным конвертором ВУФ-излучения в видимое. Малые размеры спектрометра ($245 \times 90 \times 60 \text{ mm}$) и близкое

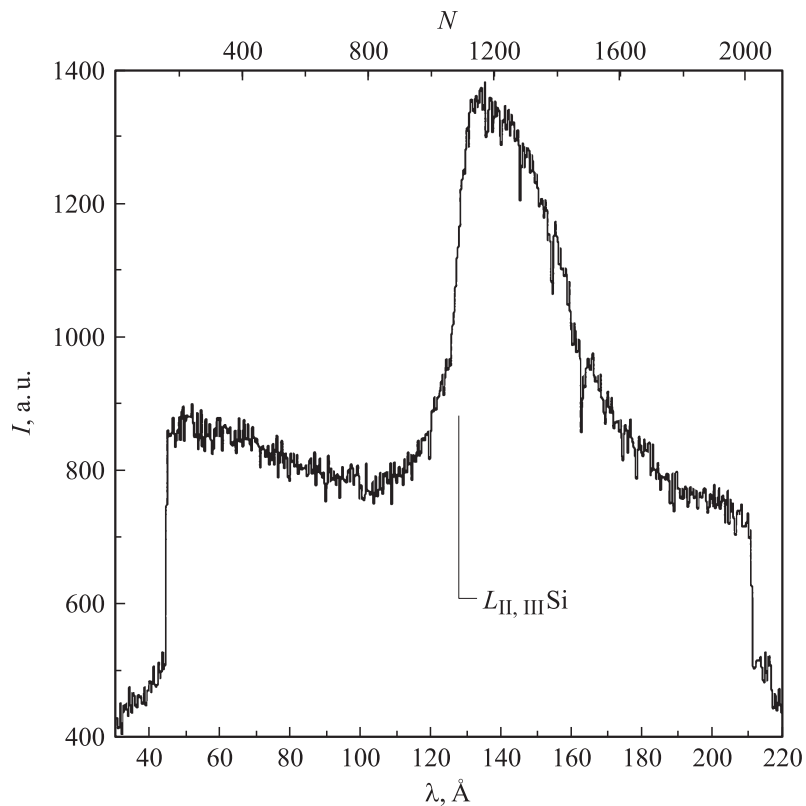


Рис. 3. Спектр излучения лазерно-плазменного источника на вольфрамовой мишени, выделенный при помощи Nb–Si-фильтра, в зависимости от длины волны и номера пиксела.

расположение по отношению к источнику излучения (34 mm) позволяют использовать прибор внутри вакуумной камеры экспериментального нанолитографа, как и в других вакуумных камерах с „точечным“ (лазерная плазма и т. п.) источником ВУФ-излучения.

Авторы выражают благодарность Р.П. Сейсяну и С.В. Бобашеву за консультации и постоянное внимание к работе.

Работа поддержана грантами МНТЦ № 3857, РФФИ 10-02-009350-а, а также программой президиума РАН П-02.

Список литературы

- [1] *Бобашев С.В., Жевлаков А.П., Калмыков С.Г.* и др. // Материалы Международного форума по нанотехнологиям. 2008.
([http://rusnanotech08.rusnanoforum.ru/sadm_files/disk/Docs/2/3/3%20\(17\).pdf](http://rusnanotech08.rusnanoforum.ru/sadm_files/disk/Docs/2/3/3%20(17).pdf))
- [2] *Пейсахсон И.В.* // Современные тенденции в технике спектроскопии / Под ред. С.Г. Раутиан. Новосибирск: Наука, 1982. С. 94–125.
- [3] *Зайдель А.Н., Шрейдер Е.Я.* // Вакуумная спектроскопия и ее применение. М.: Наука, 1976. 252 с.
- [4] *Shevelko A.P.* et al. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2001. V. 4504. P. 143.
- [5] *Ragozina E.N.* et al. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2002. V. 4782. P. 176.
- [6] *Капралов В.Г.* и др. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 2. С. 149.