

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.9.082

**СВЕТОСИЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР-ПОЛИХРОМАТОР ВЫСОКОГО
РАЗРЕШЕНИЯ, ОСНАЩЕННЫЙ НАУЧНЫМИ КМОП-КАМЕРАМИ,
ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКОВ**

© 2023 г. Н. В. Кузьмин^{a,*}, С. Н. Тугаринов^a, В. В. Серов^a,
С. В. Серов^a, Г. С. Павлова^a, Н. Н. Науменко^b

^aЧастное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом” “Проектный центр ИТЭР”
Россия, 123060, Москва, ул. Расплетина, 11, корп. 2

^bЗАО “Солар”

Беларусь, 220034, Минск, ул. Платонова, 1Б

*e-mail: n.kuzmin@iterrf.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 09.03.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Описан усовершенствованный прототип спектрометра-полихроматора высокого разрешения (СПВР), разработанного для спектроскопической диагностики плазмы, в частности, для активной спектроскопической диагностики на установке ИТЭР. Активная спектроскопия позволяет измерять такие параметры плазмы, как профили ионной температуры, скорости тороидального и полоидального вращения, концентрации легких примесей. Спектрометр оборудован несерийными высокопроизводительными компактными научными КМОП-камерами с низким уровнем шумов, широким динамическим диапазоном, высокой квантовой эффективностью и практически 100-процентным рабочим циклом. В основе спектрометра лежат три пропускающие голограммные дифракционные решетки, обеспечивающие работу одновременно в трех спектральных диапазонах: 468 ± 5 нм, 529 ± 5 нм и 656 ± 6 нм. Представлены результаты измерения основных технических параметров камер, пропускающих дифракционных решеток и спектрометра в целом. Было установлено соответствие характеристик разработанного спектрометра требованиям, предъявляемым к спектроскопическому оборудованию, необходимому для измерений методом активной спектроскопии на установке ИТЭР.

DOI: 10.31857/S0032816223060046, EDN: WXEOIE

1. ВВЕДЕНИЕ

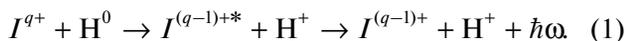
Наиболее перспективным источником “чистой” энергии является термоядерный синтез легких ядер в установке типа токамак. Уже более шестидесяти лет по всему миру ведутся активные исследования процессов удержания плазмы в токамаке, повышается коэффициент термоядерного усиления Q , разрабатываются технологии создания конструкционных материалов токамаков с термоядерной плазмой. В настоящее время в Российской Федерации ведется проектирование токамака с реакторными технологиями TRT [1, 2].

Системы диагностики термоядерной плазмы играют важнейшую роль в управлении работой реактора и сборе экспериментальных данных для исследования процессов, протекающих в термоядерной плазме. Практически на всех современных и строящихся токамаках используется и играет ключевую роль корпускулярно-спектроскопиче-

ская диагностика, также называемая активной спектроскопией (АС) или CXRS в англоязычной литературе (CXRS – Charge eXchange Recombination Spectroscopy) [3–5]. Активная спектроскопия позволяет измерять ионную температуру плазмы, скорость ее тороидального и полоидального вращения, концентрацию легких примесей (в том числе гелиевой золы) по всему сечению плазменного шнура с высокими пространственным и временным разрешениями.

В активной спектроскопии для локального возбуждения свечения плазмы используются высокоэнергетические пучки нейтральных атомов, обычно водорода. При инъекции пучка атомов водорода в плазму внутри объема пучка идет интенсивная реакция перезарядки – захват голым ядром примеси I^{q+} электрона у атома пучка H^0 , в результате чего возникает водородоподобный ион в возбужденном состоянии $I^{(q-1)+,*}$, распад которого сопровождается излучением характери-

стических линий ($\hbar\omega$). Эта реакция описывается формулой [6]



В этом процессе наиболее вероятны излучательные переходы с $\Delta n = 1$ [7]. Такие переходы между высоко расположенными уровнями дают излучение в видимом спектральном диапазоне. В активной спектроскопии наиболее часто используются следующие спектральные линии: H I ($n = 3-2$) 656.3 нм; He II ($n = 4-3$) 468.6 нм; Be IV ($n = 6-5$) 465.8 нм; C VI ($n = 8-7$) 529.1 нм; O VIII ($n = 10-9$) 606.9 нм; Ne X ($n = 11-10$) 524.9 нм. По доплеровскому уширению и сдвигу спектральных линий определяются ионная температура и скорость вращения плазмы, а по абсолютной интенсивности излучения линии определяется концентрация легких примесей.

Таким образом, реализация активной спектроскопической диагностики плазмы токамаков требует применения нескольких спектральных каналов для измерения излучения как различных примесей, так и рабочего газа. Для проведения измерений требуется высокое спектральное разрешение, а также высокая светосила, характеризующаяся геометрическим фактором Ω . Высокая светосила требуется для получения необходимого значения сигнал/шум в условиях низкого уровня полезного сигнала (из-за сильного ослабления диагностического пучка) и высокого уровня тормозного континуума, флуктуации которого определяют уровень шума.

В соответствии с требованиями к диагностической системе АС на установке ИТЭР [8] необходимо проведение одновременных измерений спектральных линий гелия, бериллия, аргона, неона, углерода и водорода в соответствующих спектральных диапазонах (468 ± 5 , 529 ± 5 и 656 ± 6 нм). Для этого ранее нашим коллективом была предложена схема многоканального спектрометра-полихроматора высокого разрешения (СПВР) на основе пропускающих голограммных дифракционных решеток [9, 10]. В данной статье описан доработанный вариант этого прибора, оснащенный специально разработанными научными КМОП-камерами (КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник, в англоязычной литературе sCMOS – scientific complementary metal-oxide-semiconductor) фирмы Ximea с линейными размерами матрицы 13.3×13.3 мм². На выходе спектрометра используются более короткофокусные камерные объективы с фокусным расстоянием $f = 260$ мм. Их использование совместно с коллиматорным объективом ($f = 390$ мм) позволяет получить коэффициент оптического уменьшения изображения около 1.5. Оптическое уменьшение позволяет регистрировать необходимый спектральный интервал на каме-

ру меньшего размера (с высотой матрицы 13.3 мм) при использовании всей высоты входной щели (20 мм).

Описанный в работе прототип СПВР позволяет регистрировать спектры в вышеуказанных диапазонах (468 ± 5 нм, 529 ± 5 нм и 656 ± 6 нм). При этом ширины реально регистрируемых спектральных диапазонов зависят от ширины используемого детектора. В данной работе использовался детектор шириной 13.3 мм, позволивший зарегистрировать в каждом канале участки спектра шириной 7–9 нм: 465.6–472.2 нм, 529.1–536.0 нм, 651.6–660.5 нм.

Положение спектральных диапазонов СПВР может быть изменено в пределах ± 5 нм за счет смещения детекторов вдоль спектра и за счет изменения углов дифракционных решеток ($\pm 1^\circ$). В частности, в зеленом канале спектрометра измерения проводились в диапазоне 529–536 нм ввиду наличия в нем ярких линий неона, использованных как для юстировки спектрометра, так и для проведения измерений характеристик спектрометра.

Далее по ходу статьи описаны испытания полномасштабного прототипа спектрометра-полихроматора, оптическая схема и фотография которого представлены на рис. 1.

2. ОПИСАНИЕ СПЕКТРОМЕТРА-ПОЛИХРОМАТОРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Основу СПВР составляют пропускающие объемно-фазовые голограммные дифракционные решетки с уникальными линейными размерами (260 мм по горизонтали и 130 мм по вертикали), последовательно располагающиеся в параллельном пучке света, формируемом коллиматорным объективом, в фокусе которого находится входная щель высотой 20 мм варьируемой ширины. Такая последовательная схема позволяет создавать требуемое количество спектральных каналов для одновременной регистрации спектров.

Углы падения ψ и дифракции ϕ для всех трех решеток составляют примерно 60° . Первая решетка имеет высокую дифракционную эффективность для диапазона длин волн 468 ± 5 нм, а волны с другими длинами проходят сквозь пропускающую решетку. Вторая решетка имеет высокую дифракционную эффективность для диапазона длин волн 529 ± 5 нм, а остальное излучение также проходит сквозь пропускающую решетку. Третья решетка имеет высокую дифракционную эффективность для диапазона длин волн 656 ± 6 нм, а остальное излучение также проходит сквозь пропускающую решетку. Излучение, прошедшее сквозь все три дифракционные решетки, попадает в световую ловушку, не-

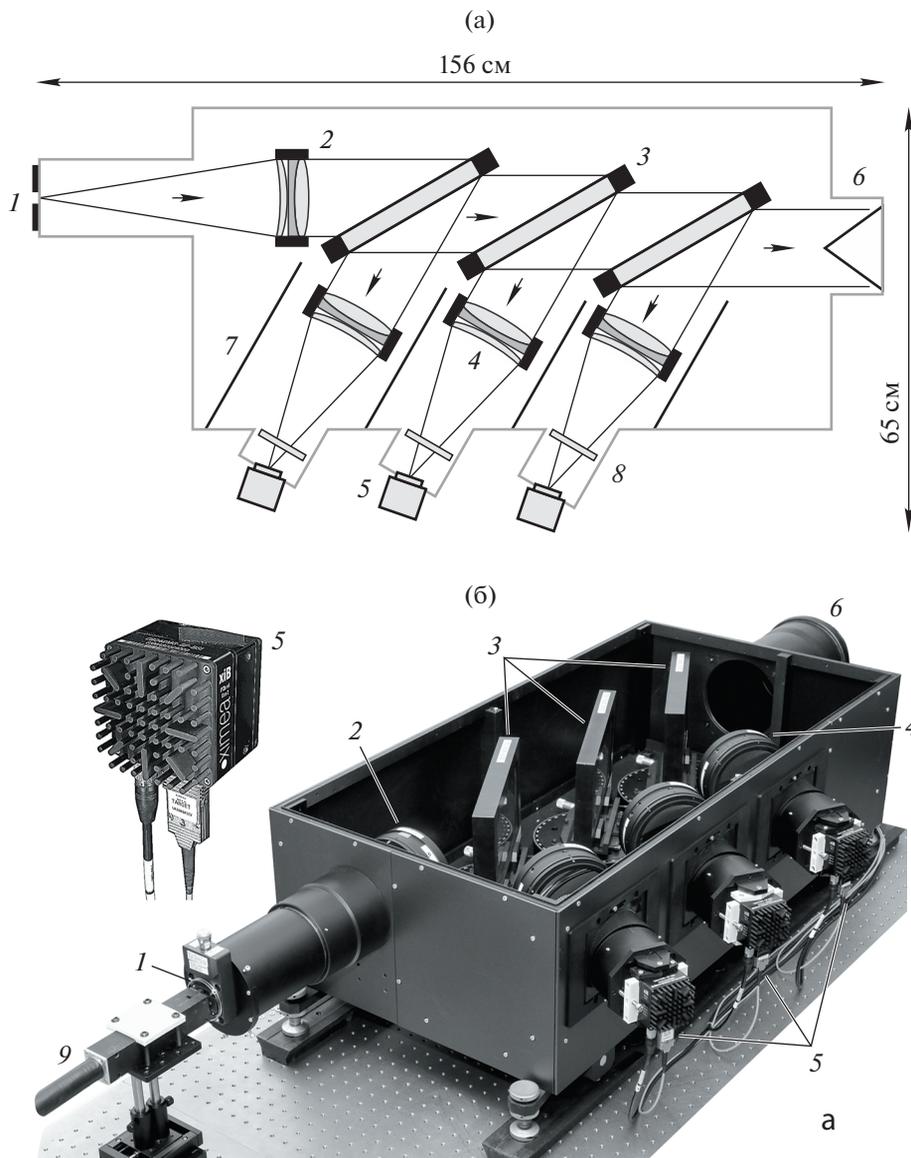


Рис. 1. а) – оптическая схема трехканального спектрометра: 1 – входная щель, 2 – входной объектив, 3 – дифракционные решетки, 4 – выходные объективы, 5 – камеры Ximea, 6 – световая ловушка, 7 – светоизолирующие экраны, 8 – узкополосные светофильтры, 9 – оптоволоконная сборка; б) – фотография прототипа спектрометра.

обходимую для подавления рассеянного излучения в приборе. Простота оптической схемы СПВР обеспечивает легкость сборки и первичной юстировки прибора, а отсутствие подвижных элементов гарантирует ее долговременную механическую стабильность, что важно с учетом ограниченного доступа к аппаратуре в условиях ИТЭР.

При использовании описанной схемы появляются следующие требования к дифракционным решеткам: решетки должны иметь высокую дифракционную эффективность в своем рабочем спектральном диапазоне и высокое пропускание в остальном видимом диапазоне, также изображение должно сохраняться как в дифрагирован-

ных лучах, так и в лучах, прошедших сквозь решетки. С начала работ [9] продолжается отработка технологии изготовления объемно-фазовых голографических пропускающих дифракционных решеток в НПО ГИПО, г. Казань [11] с целью повышения уровня дифракционной эффективности для неполяризованного света. Для описываемого прибора был создан комплект решеток с размерами заштрихованной части $240 \times 120 \text{ мм}^2$ и плотностью штрихов 2650, 3300 и 3700 штр/мм с синусоидальной модуляцией показателя преломления в слое бихромированного желатина, зажатого между двумя стеклянными пластинами с суммарной толщиной порядка 20 мм.

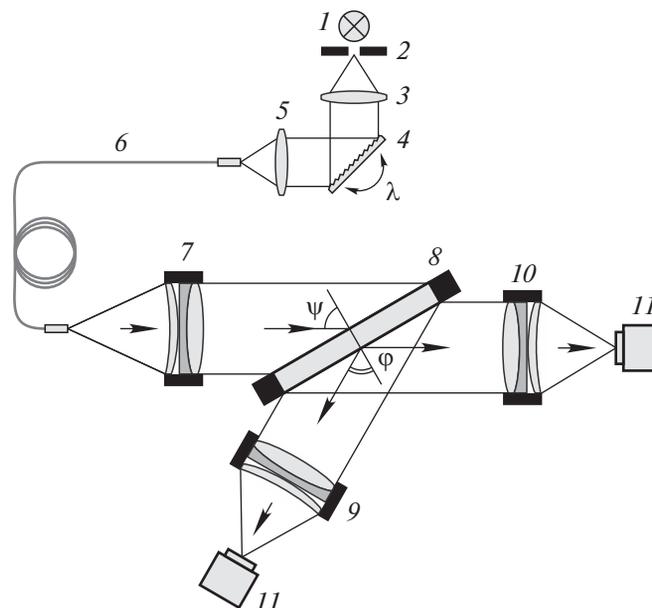


Рис. 2. Схема измерения дифракционной эффективности и эффективности пропускания ГДР в широком пучке: 1 – лампа накаливания, 2 – диафрагма, 3 – линза-конденсор, 4 – плоская отражательная дифракционная решетка на поворотном столике, обеспечивающем сканирование спектра на входе волокна 6, 5 – объектив, 6 – оптоволокно, 7 – входной объектив, 8 – измеряемая ГДР на поворотном столике, 9 – объектив в канале дифракции, 10 – объектив в канале пропускания, 11 – камеры Ximea.

Основным нововведением СПВР явилось его оснащение тремя научными камерами фирмы Ximea, модель СВ042MG-GP-BSI [12], которые были модернизированы в ООО “МР Текнолоджи”, обладающими следующими характеристиками: сенсор sCMOS GPixel GSENSE2020BSI, интерфейс PCI Express, разрешение 2048×2048 пикселей, размер пикселя 6.5×6.5 мкм², емкость потенциальной ямы 54000 e⁻. Проведенная модернизация камеры включала в себя увеличение максимальной частоты регистрации до 92 кадров в секунду, а также наличие режима непрерывной регистрации кадров, который означает, что период следования кадров отличается от времени экспозиции не более чем на 1 мкс для любого времени экспозиции. Динамический диапазон измерения составляет 16 бит (после сшивки двух кадров по 11 бит), квантовая эффективность равняется примерно 90% в рабочих спектральных диапазонах, отсутствует эффект перетекания заряда между пикселями (т.н. “антиблуминг”).

Для спектрометра-полихроматора в ЗАО “Солар” были разработаны и изготовлены светосильные камерные объективы с высоким разрешением – трехкомпонентные апохроматы со световым диаметром 120 мм и фокусным расстоянием 260 мм, имеющие просветляющее покрытие для видимого диапазона. Расчет и оптимизация параметров объективов выполнялись с использованием программного обеспечения ZEMAX [13]. Как показали расчеты, кружок рассеяния оста-

точной аберрации на длине волны 530 нм составляет примерно 10 мкм. Измерение разрешения пар объективов с использованием стандартной миры № 1 (ГОСТ-15114-78) показало, что система “коллиматорный-камерный” объектив позволяет разрешать штрихи с периодом 5 мкм во всех рабочих спектральных диапазонах. Пропускание объективов, измеренное на рабочих длинах волн с использованием излучения полупроводниковых лазеров и усредненное по нескольким точкам на объективе, составило от 91% до 94%.

Далее приводится исследование как отдельных элементов СПВР, так и прибора в сборе с целью подтверждения технических характеристик СПВР и его соответствия нуждам активной спектроскопической диагностики на ИТЭР. Описанный спектрометр создавался для целей ИТЭР, однако, используя описанный принцип и схему работы СПВР, можно создавать спектральные приборы для различных прикладных задач с широким кругом применений.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

Для всех голограммных дифракционных решеток (ГДР) были проведены измерения интегральных (усредненных по всей рабочей поверхности) значений эффективности дифракции D_E и пропускания T_E (нулевой порядок дифракции) на рабочих длинах волн в неполяризованном свете.

Схема измерений приведена на рис. 2. Квазимонохроматический неполяризованный свет с шириной линии на полувысоте $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \approx 2$ нм на рабочих длинах волн (468, 530, 656 нм) выделялся в монохроматоре (1–5), состоявшем из лампы накаливания 1 (12 В, 8 А), круглой диафрагмы 2 ($\varnothing 2$ мм), плоско-выпуклой линзы-конденсора 3 ($f = 120$ мм, $\varnothing 45$ мм), плоской отражательной дифракционной решетки 4 (МДР-6, 2400 штр/мм) на поворотном столике, обеспечивающем сканирование по спектру, объектива 5 (Гелиос 40-2, 85/1.5) и оптоволоконна с сердцевинной $\varnothing 0.4$ мм длиной 10 м, с помощью которого свет заводился в измерительную систему, повторяющую схему спектрометра.

Свет из волокна 6 заполнял объектив 7 ($f = 390$ мм, $\varnothing 120$ мм), который формировал параллельный пучок света, освещавший измеряемую ГДР 8, установленную на поворотном столике. Дифрагировавший на ГДР 8 пучок света фокусировался объективом 9 ($f = 260$ мм, $\varnothing 120$ мм) на sCMOS-камеру 11 для измерения интенсивности. Прошедший через ГДР 8 пучок света также фокусировался объективом 10 ($f = 260$ мм, $\varnothing 120$ мм) на sCMOS-камеру 11.

На объектив 7 дополнительно устанавливалась диафрагма $\varnothing 100$ мм для предотвращения виньетирования светового пучка на краях ГДР.

Перед испытаниями ГДР проводились измерения величин оптического пропускания “пустой” системы, состоящей из пар объективов 7–9 и 7–10 (без ГДР 8), на всех рабочих длинах волн. Результаты этих измерений далее использовались для нормировки основных измерений с ГДР. Далее на монохроматоре устанавливалась рабочая длина волны измеряемой ГДР, проводилась подстройка угла ψ падения излучения на ГДР с целью максимизации сигнала с камеры 11 в канале дифракции, после чего измерялись сигналы в каналах дифракции и пропускания, а также входной сигнал (камера 11 устанавливалась на вход волокна 6), угол ψ_{max} и фоновые значения сигналов (лампа 1 выключена). Измерения пропускания ГДР проводились на всех рабочих длинах волн.

Были получены следующие результаты. Для решетки 3700 штр/мм: $D_E(468 \text{ нм}) = 37\%$, $T_E(530 \text{ нм}) = 90\%$, $T_E(656 \text{ нм}) = 82\%$. Для решетки 3300 штр/мм: $D_E(530 \text{ нм}) = 41\%$, $T_E(656 \text{ нм}) = 85\%$. Для решетки 2650 штр/мм: $D_E(656 \text{ нм}) = 43\%$. Величины измеренных значений ψ_{max} составили $60 \pm 1^\circ$. Видно, что измеренные интегральные значения D_E на несколько процентов ниже точечных значений, полученных в работе [9]. Картографирование значений D_E и T_E на рабочих длинах волн по схеме точечного измерения из работы [9] показало, что величина D_E максимальна в центре ГДР, а также, что она убывает к краям в

1.5–2 раза, что объясняется процессом изготовления ГДР в скрещенных пучках с гауссовым профилем. При этом распределение величин пропускания T_E по рабочей поверхности ГДР заметно более однородно ($\pm 2\%$). С целью повышения максимальной величины и однородности значений D_E по рабочей поверхности проводится постоянное совершенствование процесса изготовления ГДР, в частности, при изготовлении новых ГДР планируется использование пучков излучения больших диаметра и мощности.

С целью проверки возможности расширения рабочих диапазонов спектрометра для исследования излучения прочих примесей (например, линия N VII на 566.9 нм) за счет перестройки углов падения ψ и дифракции ϕ было также проведено измерение величин D_E в расширенных диапазонах: 430–510 нм для “синей” ГДР, 490–570 нм для “зелёной” и 600–700 нм для “красной” ГДР. Измерение показало, что приведенные выше значения величин D_E , измеренных для номинального случая $\phi = \psi = 60^\circ$, уменьшаются в среднем на 5% на краях указанных диапазонов, что обеспечивает перестройку спектрометра во всем видимом оптическом диапазоне без заметного снижения дифракционной эффективности и необходимости изготовления ГДР с другими периодами штрихов.

Для ГДР предыдущих годов изготовления (2013–2020 гг.) были также проведены ресурсные испытания, показавшие, что интегральные величины D_E и T_E не меняются со временем (9 лет) в пределах погрешности измерений ($\pm 2\%$), что демонстрирует высокую долговечность материалов и качество изготовления ГДР, что является важной характеристикой с учетом высокой стоимости изготовления ГДР и ограниченного доступа к спектрометрам при эксплуатации в условиях ИТЭР.

4. ПРОГРАММНОЕ ВЫПРЯМЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Дифракционные решетки спектрометра вносят заметную кривизну в регистрируемые камерами спектральные линии при использовании прямой входной щели [14]. На рис. 3а приведена фотография спектра дейтериевой лампы в случае использования прямой входной щели шириной 25 мкм, засвеченной по всей высоте (20 мм) сборной из плотно уложенных оптоволокон с сердцевинной $\varnothing 0.4$ мм и длиной 70 м, вход которой освещается дейтериевой лампой ДДС-30. Такая волоконная сборка является прототипом световодного коллектора, планируемого для использования на ИТЭР для диагностики АС.

На рис. 3б приведен исходный двумерный спектр дейтериевой лампы в красном канале с изогнутыми линиями. Поскольку в состав газа дейтериевой лампы входят также примеси водо-

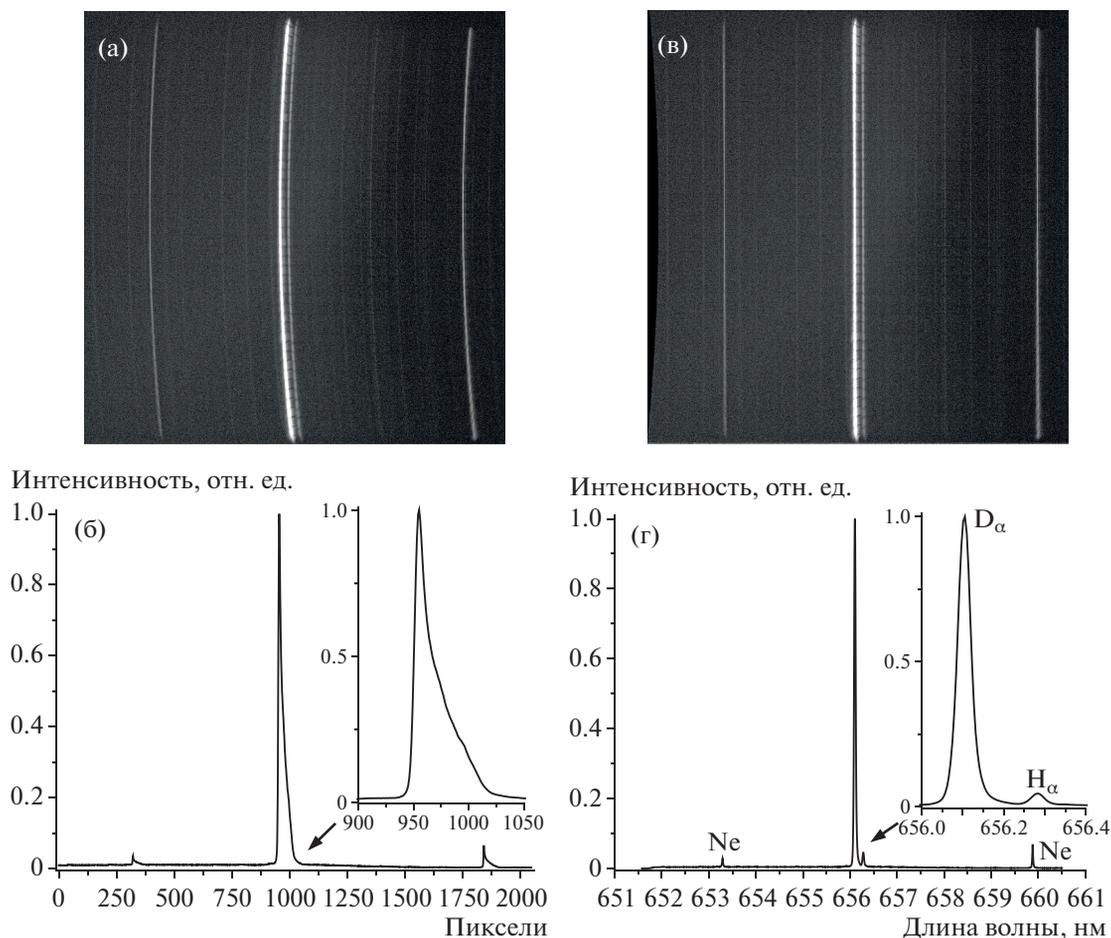


Рис. 3. а) – исходное изображение спектра дейтериевой лампы с искривленными спектральными линиями; б) – спектр, полученный в результате суммирования всех строк изображения а по вертикали (так называемый биннинг), – линии D_α и H_α сливаются (см. вставку); в) – изображение спектра дейтериевой лампы с линиями, выпрямленными программным способом; г) – спектр, полученный в результате суммирования всех строк изображения в по вертикали, – линии D_α и H_α хорошо разрешены (см. вставку).

рода и неона, на изображении спектра рядом с яркой линией D_α в центре наблюдается слабая линия H_α , а на краях спектра – слабые линии Ne. Пример “биннинга” сигнала по всей высоте изображения искривленного спектра приведен на рис. 3б. Видно, что при этом линии D_α и H_α сливаются, а форма отдельных спектральных линий ассиметричная.

Для выпрямления спектральных линий обычно используется изогнутая входная щель с рассчитанным радиусом кривизны [9]. В таком случае для заполнения щели светом необходимо изготовление как изогнутой щели, так и изогнуто волоконной сборки, что является достаточно сложной инженерной задачей. При больших радиусах кривизны (в нашем случае – около 80 мм) более простой альтернативой является программное выпрямление спектральных линий в полученном в выходной плоскости спектрометра двумерном изображении. Это позволяет использовать

прямую входную щель и прямую волоконную сборку. Выпрямление спектральных линий проводится за счет сдвига каждой строки на величину $\Delta(h)$, вычисляемую по формуле $\Delta(h) = Ah^2 + Bh$, где h – высота горизонтальной строки пикселей, отсчитываемая от центра матрицы (в нашем случае $h = -1024: 1024$), A и B – коэффициенты квадратичного и линейного выпрямления изображения, подбираемые для каждого канала спектрометра отдельно, $\Delta(h)$ – округленная до целых величина сдвига строки пикселей на высоте h . В среднем значения коэффициентов выпрямления составили $A = 5 \cdot 10^{-5}$, $B = 10^{-2}$. Алгоритм выпрямления был интегрирован в программный пакет IterSpectro, разработанный для получения 2D-изображений и вертикально-суммированных спектров для камер Ximea, работающих под операционной системой Linux.

Результаты программного выпрямления и вертикального биннинга по всей высоте входной ще-

ли приведены на рис. 3в, г. Спектральные линии D_α и H_α симметричны и хорошо разрешаются, форма линий близка к гауссовой. Для выпрямленного спектра по табличным значениям длин волн линий Ne, D и H [15] проведена спектральная калибровка СПВР в красном канале (рис. 3г).

5. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОЧЕЙ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ И ДИСПЕРСИИ

С целью получения необходимого значения соотношения сигнал/шум на установке ИТЭР необходимо будет использовать широкие входные щели для спектрометра, а именно, щели шириной 0.4 и 1 мм. С целью измерения инструментальных профилей СПВР для различных ширин входной щели, заполненной рядами световодов, а также для спектральной калибровки по длинам волн и измерения величин обратной линейной дисперсии, в каждом канале были зарегистрированы спектры Ne-трубки Гейслера и квазимонохроматического света с $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \approx 2$ нм, полученного в монохроматоре (рис. 2), что примерно соответствует ширине линии Ne при температуре 10 кэВ. Полученные спектры приведены на рис. 4. Видно, что инструментальный профиль для одного ряда волокон (рис. 4а) все еще имеет квази-гауссов профиль, состоящий из одного пика, а для трех рядов волокон он имеет форму трех пиков (рис. 4б). Для случая квазимонохроматического света форма и ширина регистрируемого профиля (рис. 4в) практически не зависят от ширины щели, так как ширина исходного спектра $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ в несколько раз превышает ширину инструментального профиля (см. табл. 1), и при его свертке с широким профилем входящего квази-монохроматического света происходит сглаживание структуры профиля. Это является важным результатом для последующего анализа ширины и положения центров широких спектральных линий, излучаемых плазмой, при котором не требуется использования слишком сложной формы инструментального профиля.

Результаты измерения ширин отдельно расположенных спектральных линий Ne в трех спектральных каналах, а также величины обратной линейной дисперсии СПВР, измеренные аналогично работе [9], приведены в табл. 1. Как и следовало ожидать, величина обратной линейной дисперсии увеличилась примерно в 1.5 раза из-за уменьшения фокусных расстояний камерных объективов с 390 до 260 мм.

6. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ОТКЛИКА КАМЕР

Было проведено измерение отклика научных КМОП-камер в зависимости от величины поступающего на камеру светового потока (I) и в зависимо-

Таблица 1. Ширина инструментального профиля $\delta\lambda$ для различных ширин входной щели s и дисперсия D_x^{-1} в трех каналах спектрометра

Центральная длина волны, нм	468	530	656
$\delta\lambda$, нм ($s = 25$ мкм)	0.010	0.011	0.013
$\delta\lambda$, нм ($s = 0.4$ мм)	0.13	0.14	0.18
$\delta\lambda$, нм ($s = 1.0$ мм)	0.33	0.36	0.46
D_x^{-1} , нм/мм	0.48	0.52	0.67

сти от периода следования кадров (2) с целью проверки линейности работы камеры как детектора излучения. Для этих измерений использовалась неоновая лампа со стабильной во времени интенсивностью излучения.

В первом эксперименте величина светового потока регулировалась нейтральными светофильтрами с заранее измеренными коэффициентами оптического пропускания на рабочих длинах волн, устанавливаемыми между трубкой и входом волоконной сборки, передающей излучения на входную щель спектрометра. Период следования кадров при этом устанавливался равным 20 мс. Во втором эксперименте при постоянном световом потоке программно варьировался период следования кадров (который с высокой точностью равен времени экспозиции) в пределах от десятков миллисекунд до секунд. Проводилось измерение амплитуд выбранных линий в каждом спектральном канале СПВР в зависимости от величины пропускания светофильтра или от периода следования кадров. Полученные зависимости аппроксимировались линейной функцией.

Результаты измерений для синего и красного каналов СПВР приведены на рис. 5. При постоянной экспозиции в 20 мс (рис. 5а) амплитуды обоих пиков растут в зависимости от величины пропускания светофильтра с высокой линейностью. При увеличении периода следования кадров (рис. 5б) амплитуда слабого пика на 660.3 нм линейно растет во всем диапазоне, в то время как амплитуда интенсивного пика на 653.3 нм линейно растет до уровня емкости потенциальной ямы (54000 отсчетов), а при дальнейшем увеличении периода следования кадров наблюдается область насыщения. Измерения показывают прямо пропорциональную зависимость отклика камер от величины падающего светового потока во всем динамическом диапазоне.

7. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОГО ПРОПУСКАНИЯ И АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА СПВР

Полное пропускание СПВР было измерено в новой схеме (см. рис. 2) с использованием квази-

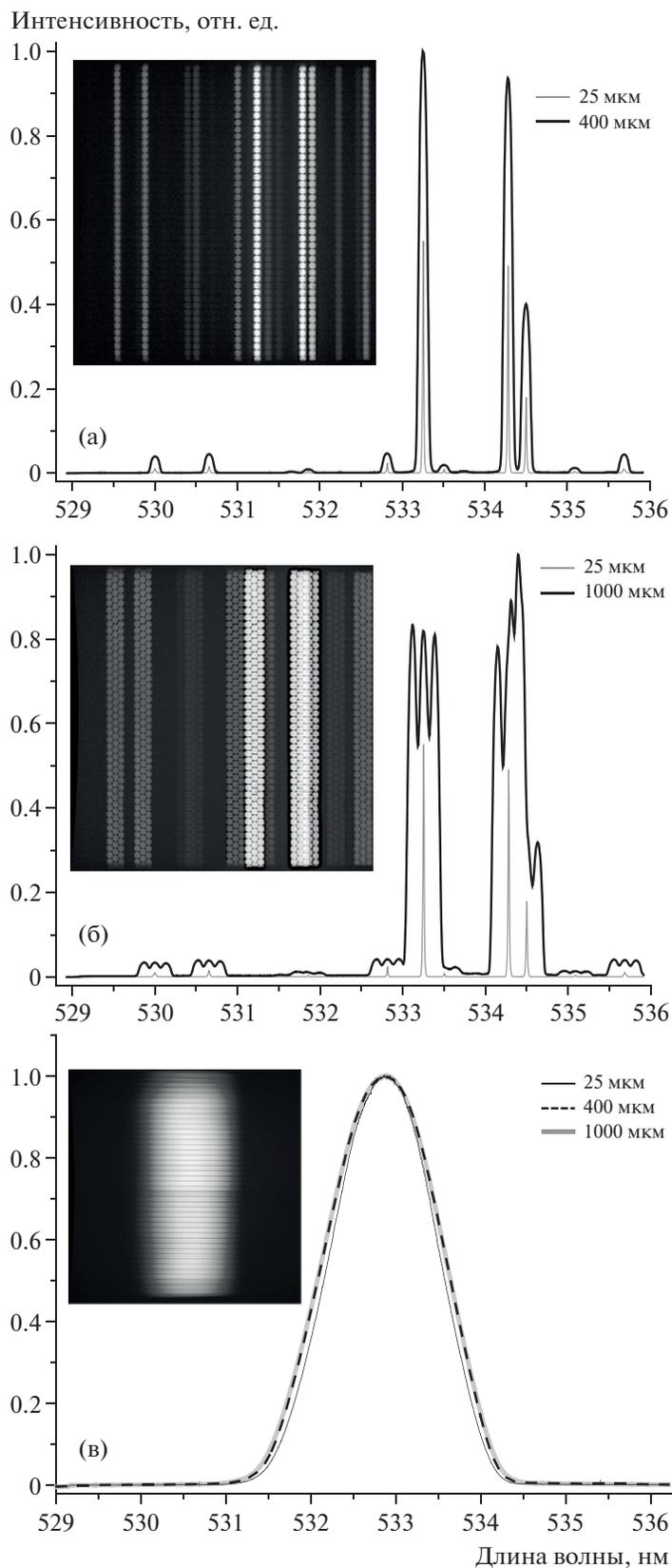


Рис. 4. Аппаратная функция спектрометра для рабочих ширин входной щели s ; **а, б**) – изображения спектров Ne-лампы в зеленом канале спектрометра (вставки) и спектры, полученные в результате вертикального усреднения изображений по всей высоте для различных s : **а** – $s = 0.4$ мм, в щель помещается один ряд волокон, **б** – $s = 1.0$ мм, в щель помещаются три ряда волокон; на спектры **а** и **б** для сравнения наложен спектр для входной щели 25 мкм; **в**) – спектр квазимонохроматической линии с $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \approx 2$ нм.

монохроматического неполяризованного света из монохроматора ($I-b$) на рабочих длинах волн 468, 530 и 656 нм. Выход волокна b устанавливался на входную щель СПВР, с использованием одной и той же камеры Ximea проводилось измерение среднего количества отсчетов для пятна дифракции (T_D) и для светового пятна на выходе из волокна b (T_0) и фонового сигнала T_{BG} (лампа I выключена). По измеренным значениям проводился расчет пропускания в каждом канале, $T = 100\% (T_D - T_{BG}) / (T_0 - T_{BG})$. Результаты измерений приведены в табл. 2. Величина пропускания в красном канале меньше, чем в синем и зеленом каналах, за счет потерь на пропускание через “синюю” и “зеленую” дифракционные решетки.

Активная спектроскопия позволяет определять концентрацию легких примесей в плазме по интенсивности спектральных линий. Для нахождения связи между величиной сигнала, переданного с приемника излучения спектрометра, и яркостью излучения, поступающего в спектрометр, была проведена калибровка спектрометра по абсолютной интенсивности. Проведение калибровки заключалось в нахождении коэффициента пропорциональности (калибровочного коэффициента K) между числом фотонов n , попавших на область матрицы приемника излучения высотой k пикселей и шириной $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, и суммарным числом отсчетов I , зарегистрированных приемником в данной области: $K = n / I$.

При проведении калибровки входная щель спектрометра освещалась через диафрагму, ограничивающую высоту щели до $h = 3$ мм, излучением фотометрической сферы ФС-120, прошедшей предварительную калибровку спектральной плотности энергетической яркости $B(\lambda)$ (СПЭЯ, Вт/(ср · м³)) во всем видимом диапазоне. На входном объективе 2 (рис. 1а) была установлена диафрагма диаметром $d = 100$ мм с целью предотвращения виньетирования пучка света на краях решеток. В каждом канале спектрометра проводилась регистрация непрерывного спектра фотометрической сферы для нескольких шириин входной щели $s = 50, 200, 500, 1000$ мкм и нескольких значений экспозиции $\Delta t = 20, 50, 100, 200$ мс. Для зеленого канала СПВР на рис. 6 приведено изображение зарегистрированного спектра излучения сферы – сплошной полосы высотой 2 мм (изображение входной щели

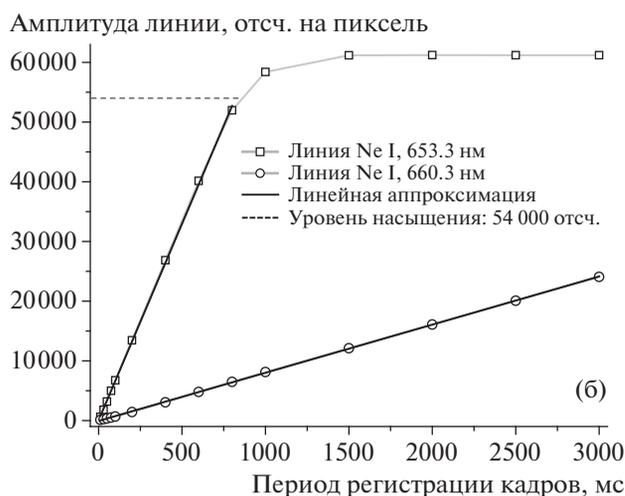
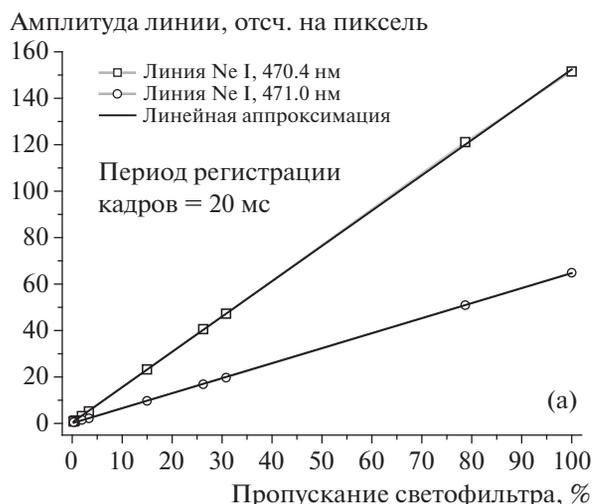


Рис. 5. Зависимость амплитуд спектральных линий в синем и красном каналах от количества падающего света при постоянном периоде следования кадров 20 мс (а) и от периода следования кадров (б), отклик камеры показывает высокую линейность во всем динамическом диапазоне, от слабых сигналов (а) вплоть до уровня насыщения 54000 отсчетов (б).

ли уменьшается в 1.5 раза) с областью измерения общего числа отсчетов I высотой k пикселей в диапазоне $\Delta\lambda$, а также спектральный профиль и спектр СПЭЯ для ФС-120. Можно видеть, что СПВР практически не искажает исходный спектр ФС-120, так как угловые наклоны измеренного

Таблица 2. Величины пропускания T и калибровочных коэффициентов для спектрометра в целом ($K_{СПВР}$) и отдельно для камер ($K_{КАМ}$)

Центральная длина волны, нм	468	530	656
T	0.30 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.26 ± 0.01
$K_{СПВР}$, фот./отсч.	2.7 ± 0.3	2.7 ± 0.3	3.2 ± 0.4
$K_{КАМ}$, фот./отсч.	0.82 ± 0.10	0.81 ± 0.09	0.81 ± 0.10

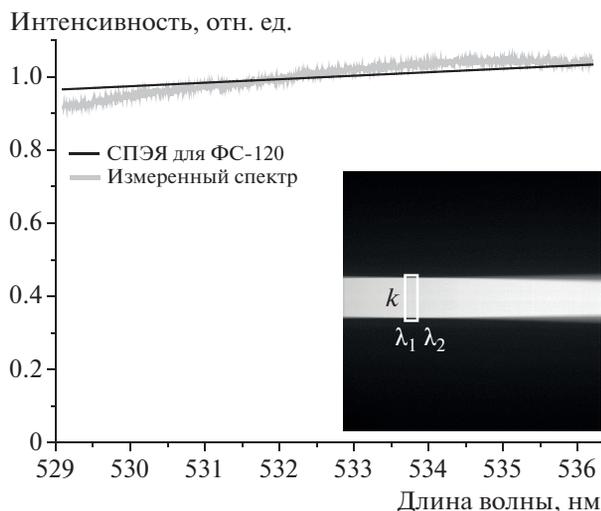


Рис. 6. Абсолютная калибровка спектрометра-полихроматора. Измеренный спектр повторяет по форме спектр фотометрической сферы. На вставке показаны двумерный спектр, регистрируемый камерой в зеленом канале, и область считывания сигнала для абсолютной калибровки.

спектра и кривой СПЭЯ совпадают. Также проводились регистрация и вычитание фоновых отсчетов при выключенной лампе ФС-120.

Поток энергии Φ из фотометрической сферы, приходящий на входной объектив, рассчитывался по формуле $\Phi = \Omega shB(\langle\lambda\rangle) \cdot \Delta\lambda$, где $\Omega = S/r^2 \approx 0.06$ ср – телесный угол, $S = \pi d^2/4$ – площадь диафрагмы на входном объективе, $r = 370$ мм – расстояние от входной щели до диафрагмы, $B(\langle\lambda\rangle)$ – значение СПЭЯ в середине спектрального диапазона $[\lambda_1; \lambda_2]$, $\langle\lambda\rangle = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$. В частности, для зеленого канала $B(530 \text{ нм}) = 11\,330\,000 \text{ Вт/(ср} \cdot \text{м}^3)$. Число фотонов, пришедших на матрицу, рассчитывалось по формуле $n = (\Phi \cdot \Delta t \cdot T)/(\hbar\omega)$, где T – величина ранее измеренного пропускания в данном канале СПВР, $\omega = 2\pi c/\langle\lambda\rangle$, c – скорость света в вакууме. Для всех значений ширины входной щели и времен экспозиции измерялись величины суммарного числа отсчетов $I(s, \Delta t)$, которые далее усреднялись и использовались при расчете калибровочных коэффициентов K для каждого канала.

В табл. 2 приведены результаты расчетов K : $K_{\text{СПВР}}$ – калибровочные коэффициенты для СПВР в целом (отношение количества фотонов, падающих на входную щель спектрометра, к количеству отсчетов на камере) и $K_{\text{КАМ}}$ – калибровочный коэффициент для самих камер Ximea (отношение количества фотонов, пришедших на камеру, к количеству отсчетов на камере).

Видно, что измеренное значение $K_{\text{КАМ}}$ составляет порядка 0.8 фотонов/отсчет. Разумеется,

данная камера не может зарегистрировать 0.8 фотона, так как она не работает в однофотонном режиме. Для работы камеры нужна определенная статистика фотонов, а калибровочный коэффициент камеры, равный 0.8 фотонов/отсчет, означает, что 8 фотонов, попавших в единственный пиксель камеры, вызовут сигнал в 10 отсчетов АЦП. Калибровочный коэффициент $K_{\text{КАМ}}$, измеренный нами для камер Ximea, совпал с данными, полученными от производителя камер.

Используемая производителями камер размерность коэффициентов K [фотонов/отсчет] задает их связь через величину пропускания спектрометра T : $K_{\text{КАМ}} = K_{\text{СПВР}} \times T$. При использовании обратной размерности для K [отсчетов/фотон], выражение связи величин K приобретет следующий вид: $K_{\text{СПВР}} = K_{\text{КАМ}} \times T$.

8. ИЗМЕРЕНИЕ МЕЖКАНАЛЬНОГО КОНТРАСТА СПЕКТРОМЕТРА

Величина межканального контраста для СПВР характеризует возможность одновременного измерения прибором наиболее интенсивных и наиболее слабых спектральных линий в разных каналах и характеризует уровень рассеянного света в приборе, а также уровень темнового сигнала камер, нарастающего с увеличением времени экспозиции.

Для измерения межканального контраста использовалась неоновая лампа (трубка Гейслера с неоновым наполнением), в спектре излучения которой (см. рис. 7) присутствуют как очень интенсивные линии в красном диапазоне (1, 2), так и очень слабые линии (3, 4) в зеленой области спектра. Обзорный спектр неоновой лампы (рис. 7а) был зарегистрирован с использованием компактного спектрометра Brolight ВІМ-6001 (ширина входной щели 25 мкм, разрешение 0.5 нм, экспозиция 4 мс). Спектры на рис. 7б–г были зарегистрированы с использованием одной и той же камеры Ximea, квантовая эффективность которой в красном и зеленом каналах различалась на несколько процентов. Питание трубки Гейслера осуществлялось через стабилизированный источник питания постоянного тока, в связи с чем интенсивность спектральных линий была постоянной во времени (с точностью не хуже 1%).

На рис. 7б–г приведены спектры излучения Ne-трубки, полученные на СПВР в красном (б) и зеленом (в, г) диапазонах. Как и ранее, засветка входной щели шириной 100 мкм излучением Ne-трубки проводилась через волоконный тракт. Время экспозиции камеры для красного и зеленого каналов составляло соответственно 10 мс и 10 с. 2D-спектр и фон регистрировались, проводилось вычитание фона, спектральные линии

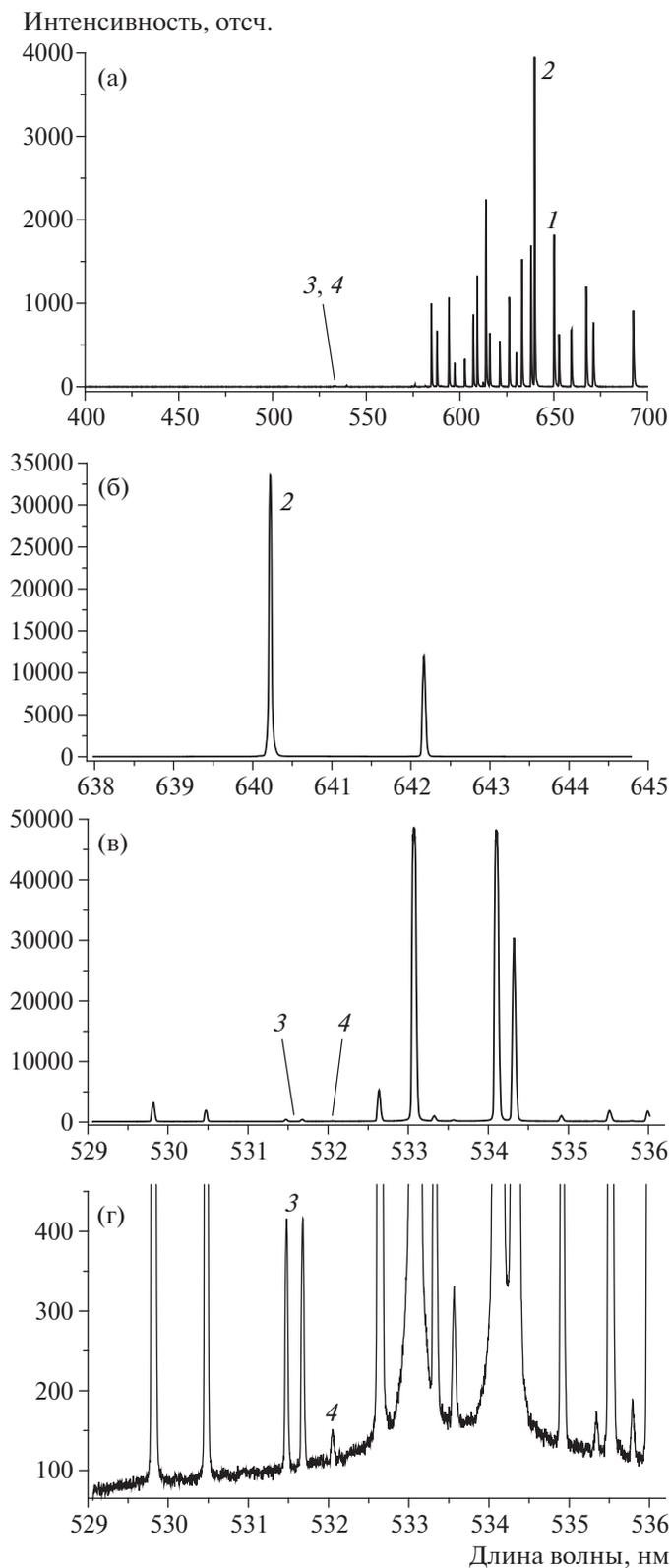


Рис. 7. Измерение межканального контраста спектрометра; **а)** – обзорный спектр Ne-лампы с указанием измеряемых линий; **б)** – наиболее сильная линия 2 (Ne, 640.2246 нм) в красном канале, экспозиция 10 мс; **в, г)** – слабые линии 3, 4 в зеленом канале (531.4781 нм, 531.6806 нм, 532.055 нм), экспозиция 10 с. Линии 1 и 3 использовались в работе [9], линии 2 и 4 используются в данной работе.

программно выпрямлялись, и проводился биннинг отсчетов по всей высоте кадра.

На рис. 7а, в, г указаны линии 1 и 3, которые использовались для определения контраста в нашей предыдущей работе [9], когда использовалась ПЗС-камера на базе матрицы HS101H фирмы Hamamatsu. При этом в работе [9] слабая линия 4 не наблюдалась из-за увеличения фона матрицы при экспозициях более нескольких сотен мс. Применение новых специальных камер Ximea с низким уровнем фонового сигнала при выдержках вплоть до 10 с позволило зарегистрировать не только линии 3, но и еще более слабую линию 4. По соотношению амплитуд линий 2 и 4 проводился расчет контраста СПВР с учетом нормировки на времена экспозиции t :

$$K_{\text{СПВР}} = (I_2/t_2)/(I_4/t_4) = \\ = (33\,300/10 \text{ мс})/(43/10\,000 \text{ мс}) \approx 774\,000.$$

С учетом того, что минимальная экспозиция камеры Ximea составляет 5 мкс, предельная величина межканального контраста СПВР, оборудованного камерами Ximea, составляет более 10^6 .

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы описали усовершенствованный прототип спектрометра-полихроматора высокого разрешения и высокой светосилы, разработанный для спектроскопической диагностики плазмы токамаков, в частности, на установке ИТЭР. Спектрометр построен на основе трех пропускающих голограммных дифракционных решеток, он оборудован новыми несерийными высокопроизводительными компактными научными КМОП-камерами с низким уровнем шумов, широким динамическим диапазоном, высокой квантовой эффективностью и практически 100-процентным рабочим циклом. Разработанный алгоритм обработки регистрируемых 2D-спектров позволяет программно выпрямлять возникающую кривизну спектральных линий, что позволяет осуществлять их последующий вертикальный биннинг для улучшения соотношения сигнал/шум, а также позволяет использовать прямые волоконные сборки для заполнения светом входной щели.

В результате лабораторного тестирования созданного СПВР были измерены его следующие основные технические параметры:

- рабочие спектральные диапазоны — 468 ± 5 нм, 529 ± 5 нм и 656 ± 6 нм;
- относительное отверстие — $F/3$;
- прямая входная щель высотой 20 мм;
- оптическое уменьшение в обеих плоскостях — 1.5 раза;

- размер плоскости изображения — до 13.3×13.3 мм²;
- обратная линейная дисперсия — 0.48, 0.52, 0.67 нм/мм (для 468, 530, 656 нм соответственно);
- предельное спектральное разрешение — 0.01 нм;
- полное пропускание спектрометра — 0.26–0.3;
- период следования кадров — от 11 мс до 10 с;
- линейность отклика камер во всем динамическом диапазоне;
- режим непрерывной регистрации кадров — период следования кадров не превышает время экспозиции более чем на 1 мкс;
- глубина потенциальной ямы камер — $54\,000 e^-$;
- калибровочный коэффициент для камер — около 0.8 фотонов/отсчет;
- межканальный контраст спектрометра — 774000.

В результате лабораторного тестирования трехдиапазонного спектрометра установлено соответствие характеристик разработанного спектрометра требованиям, предъявляемым к спектроскопическому оборудованию, необходимому для реализации активной спектроскопической диагностики на установке ИТЭР [8], а также потенциально и на других токамаках.

Описанный трехдиапазонный спектрометр-полихроматор был создан для определенной прикладной задачи. Однако, используя описанный принцип и схему работы спектрометра-полихроматора, можно создавать спектральные приборы для различных прикладных задач на основе пропускающих голограммных дифракционных решеток.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность И.Н. Дворецкому за плодотворное обсуждение различных аспектов статьи и участие в данной работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках программы “Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году” от 14.02.2022 (госконтракт № Н.4а.241.19.22.1123).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серов С.В., Тугаринов С.Н., Серов В.В., Крупин В.А., Земцов И.А., Красильников А.В., Кузьмин Н.В., Павлова Г.С., Науменко Н.Н. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 700. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>

2. *Serov S.V., Tugarinov S.N., Serov V.V., Krupin V.A., Zemtsov I.A., Krasilnikov A.V., Kuz'min N.V., Pavlova G.S., Naumenko N.N.* // *Plasma Phys. Rep.* 2022. V. 48. P. 844. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22600542>
3. *Jiang D., Li Y.Y., Wu X.Q., Zhang T., Lyu B., Gao X., Xu G.S.* // *Fusion Sci. Technol.* 2020. V. 76. P. 723. <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1777670>
4. *Lee H.H., Lee J.K., Ko W.H.* // *Fusion Sci. Technol.* 2020. V. 76. P. 787. <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1790712>
5. *Ford O.P., Vanó L., Alonso J.A., Baldzuhn J., Beurskens M.N.A., Biedermann C., Bozhenkov S.A., Fuchert G., Geiger B., Hartmann D., Jaspers R.J.E., Kappatou A., Langenberg A., Lazerson S.A., McDermott R.M., McNeely P., Neelis T.W.C., Pablant N.A., Pasch E., Rust N., Schroeder R., Scott E.R., Smith H.M., Wegner Th., Kunkel F., Wolf R.C.* // *Rev. Sci. Instrum.* V. 91. P. 023507. 2020. <https://doi.org/10.1063/1.5132936>
6. Диагностика плазмы / Под ред. М.И. Пергамента. М.: Энергоатомиздат, 1990. Вып. 7. С. 56.
7. *Fonck R.J., Darrow D.S., Jaehnic K.P.* // *Phys. Rev. A.* 1984. V. 29. P. 6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.29.3288>
8. *Serov S.V., De Bock M., von Hellermann M.G., Tugarinov S.N.* // *Rev. Sci. Instrum.* V. 92. P. 053517. 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0042029>
9. *Тугаринов С.Н., Белокопытов А.А., Кулаков Д.М., Лукин А.В., Науменко Н.Н., Саттаров Ф.А., Серов В.В., Усольцева М.А., Хабанов Ф.О., Шигапова Н.М., Ярцев В.П.* // ПТЭ. 2016. № 1. С. 102. <https://doi.org/10.7868/S0032816216010158>
10. *Tugarinov S.N., Belokopytov A.A., Kulakov D.M., Lukin A.V., Naumenko N.N., Sattarov F.A., Serov V.V., Usoltseva M.A., Khabanov F.O., Shigapova N.M., and Yartsev V.P.* // *Instr. Exp. Tech.* 2016. V. 59. № 1. P. 104. <https://doi.org/10.1134/S0020441216010152>
11. *Лукин А.В.* // *Оптический журнал.* 2007. Т. 74. С. 80.
12. <https://www.ximea.com>
13. <https://www.zemax.com>
14. *Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И.* *Техника и практика спектроскопии.* М.: Физматлит, 1972. С. 163.
15. *Стриганов А.Р., Одицова Г.А.* *Таблицы спектральных линий атомов и ионов.* М.: Энергоиздат, 1982.