

ДИСПЕРСИОННЫЕ МОНОХРОМАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ: СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ

Предложен ряд принципиальных подходов и схемных решений монохроматоров изображения со спектральными селекторами на основе дифракционных решеток. Проведено численное моделирование, проанализированы преимущества в сравнении с существующими системами аналогичного назначения.

Во многих практически приложениях необходимо получение спектральной информации о большом количестве точек протяженных объектов, т.е. реализация спектроскопии с пространственным разрешением (СПР). Поскольку традиционные спектроскопические системы не могут непосредственно быть использованы для СПР, актуальна разработка специализированных приборов – гиперспектрометров, сочетающих высокое пространственное и спектральное разрешение. Наряду с традиционным для гиперспектроскопии способом последовательного сканирования изображения исследуемой области входной щелью дисперсионного полихроматора часто применяется регистрация изображения всей исследуемой области в требуемом наборе относительно узких спектральных интервалов (типично шириной от 10 до 40 нм на диапазоне 400÷1000 нм). Разработка принципиальных подходов и приборных решений для мультizonальной спектроскопии (мультиспектральной съемки) может рассматриваться как две подзадачи: реализация узкополосной спектральной фильтрации и построение изображающей системы с малыми оптическими искажениями.

Основные современные подходы к узкополосной спектральной фильтрации (использование переключаемых полосовых светофильтров, перестраиваемых узкополосных фильтров – акусто-, электрооптических, интерференционно-поляризационных) имеют ограничения по совокупности эксплуатационных характеристик (спектральное разрешение, подавление фона, чувствительность, требование малой расходимости, сложность аппаратной реализации). Существенный выигрыш по ряду указанных характеристик может быть достигнут с использованием дисперсионного принципа спектральной фильтрации. В то же время использование дисперсионных систем предъявляет жесткие и достаточно трудно реализуемые требования к изображающим характеристикам оптической схемы, требует минимизации пятна рассеяния для всего поля изображения, что может быть достигнуто уменьшением аберраций, прежде всего, внеосевых, которые сильно проявляются при возрастании светосилы.

Предложен принцип реализации мультizonального спектрометра на основе двойного монохроматора с вычитанием дисперсии [1]. Изображение участка исследуемой поверхности проецируется на входную апертуру первого монохроматора, который формирует совокупность наложенных и смещенных друг относительно друга хроматических изображений объекта. При помощи щелевой маски выделяется участок, отвечающий набору изображений апертуры для длин волн выделяемого монохроматором спектрального диапазона, который подается на вход второго монохроматора с вычитанием дисперсии. Вычитание дисперсии устраняет спектральное «размытие» изображения, на выходе второго монохроматора формируется изображение входной апертуры, в котором квазимохроматические изображения в пределах выделяемого спектрального интервала пространственно совмещены. Получение мультizonального снимка осуществляется простым сканированием двойного монохроматора (поворотом дисперсионных элементов). Достоинствами подхода являются светосила, существенное подавление «белого» фона, простота реализации спектральной перестройки.

На основе предложенного принципа разработана оптическая схема двойного монохроматора изображения с обратным прохождением. Существенной ее особенностью является реализация вычитания дисперсии обратным прохождением выделенного маской пучка через оптическую систему, что автоматически обеспечивает требуемую

идентичность двух монохроматоров. Сопряжение выходной щели первого монохроматора и входной щели второго достигается использованием углового отражателя, в биссекторной плоскости которого расположена маска со щелевым отверстием. Разработка отличается высокой светосилой, по сравнению с традиционными подходами на основе сканирования входного поля имеет абберационно-лимитированное (а не определяемое шириной входной щели) пространственное разрешение (размер пятна около 20×40 мкм при фокусном расстоянии 500 мм) и меньшие размеры. Преимуществами перед перестраиваемыми фильтрами является сочетание широкого рабочего спектрального диапазона ($400 \div 800$ нм), достаточно спектрального разрешения порядка 10 нм и относительного отверстия 1:7.

Предложен также принципиально иной подход к получению изображения в узком спектральном интервале с использованием дисперсионного монохроматора. Он заключается в формировании изображения объекта коллиматорным объективом монохроматора вблизи диспергирующего элемента (картина углового распределения интенсивности входного поля наблюдается через узкую входную щель монохроматора). Спектрально отфильтрованное изображение затем передается камерным и дополнительным изображающим объективами на двумерный фотоприемник. Пространственное разрешение лимитировано абберациями оптических узлов системы, а светопропускание и спектральное разрешение определяются ширинами щелей монохроматора.

На основе предложенного принципа разработана схема дисперсионного монохроматора изображения с использованием рефрактивных объективов. Излучение от бесконечно удаленного объекта, пройдя узкую входную щель монохроматора, падает на коллиматорный объектив, который формирует изображение объекта вблизи поверхности отражательной дифракционной решетки. Дифрагированные лучи в фокальной плоскости камерного объектива (плоскости выходной щели монохроматора) образуют набор «монокроматических» изображений входной щели монохроматора (спектр). Каждое такое изображение соответствует узкому спектральному интервалу $\Delta\lambda$, определяемому шириной входной щели, а угловое распределение интенсивности выходящего из щели пучка отвечает изображению объекта, которое восстанавливается с помощью изображающего объектива. На матрице фотоприемника регистрируется двумерное изображение исследуемых объектов в узком спектральном диапазоне.

Для экспериментального апробирования принципа построен макет монохроматора изображения. На тестовых объектах отработана методика регистрации квазимонокроматических изображений для произвольного выбора длин волн в спектральном диапазоне $400 \div 800$ нм при ширине выделяемой спектральной полосы порядка 10 нм. Использование сферической зеркальной оптики в схемах изображающих монохроматоров благодаря простоте, ахроматичности и возможности работы в УФ-диапазоне представляется более предпочтительным, чем рефрактивных объективов. К сожалению, они отличаются значительной величиной внеосевых аббераций, резким их ростом при повышении числовой апертуры и работе с протяженным полем.

Предложен ряд схем изображающих полихроматоров с прохождением светового пучка, приближенным к осесимметричному, чем достигается уменьшение внеосевых аббераций. В первой схеме решение проблемы ввода и вывода света при осесимметричном его прохождении осуществляется при помощи апертурных отверстий в дополнительных плоских зеркалах, которые выводят световой пучок на дифракционную решетку и направляют дифрагированный свет на камерный объектив после нее. Полностью устранить внеосевые абберации таким образом не удастся, однако они минимальны и симметричны по полю. Численное моделирование схемы (фокусное расстояние 105 мм, числовая апертура 0,11, обеспечивающая компенсацию потерь на апертурном отверстии, линейный детектор 28 мм) показало, что она хоть и немного проигрывает в спектральном разрешении аналогичной по параметрам схеме Черни (0,27 нм против

0,22 нм), но значительно выигрывает по высоте астигматических фокалей (23–180 мкм против 700–2000 мкм).

Во второй, вертикально-симметричной схеме, входная апертура и детектор расположены выше плоскости дисперсии, для дополнительного пространственного разделения пучков используются плоские зеркала. Данная схема более проста, однако из-за наклонного прохождения света через зеркала внеосевые aberrации в ней больше, также присутствует наклон астигматических фокалей. Численное моделирование показало, что при фокусном расстоянии 105 мм и числовой апертуре 0,1 схема лишь незначительно уступает вышеприведенной по спектральному разрешению (0,29 нм) и не уступает по высоте астигматической фокали (порядка 60 мкм).

Еще одним возможным решением изображающего полихроматора со сферическими зеркальными объективами является оптическая схема спектрального канала разработанного гиперспектрометра [2]. Благодаря близкому к осевому прохождению световых пучков удалось в ней достичь абберационного уширения пятен рассеяния в направлении развертки спектра 55 мкм, в «пространственном» 70 мкм при числовой апертуре 0,1, фокусном расстоянии 250 мм и входной апертуре 11×8,3 мм.

Перспективным представляется использование в дисперсионных монохроматорах изображения призмённых дисперсионных элементов. Они обладают существенными достоинствами: высоким светопропусканием, отсутствием наложения порядков (что позволяет сократить габариты схем и резко уменьшить рассеянный свет), независимостью от поляризации. В то же время, неравномерность дисперсии по длинам волн может быть скорректирована пост-обработкой данных, ограничение же по спектральному диапазону вполне приемлемо для значительной части задач СПР.

Список литературы

1. Гулис, И. М. Двойной монохроматор изображения с вычитанием дисперсии / И.М. Гулис, А.Г. Купреев, А.Г. Костюкевич // Весн. Беларус. дзярж. ун-та. Сер. 1, Фізика. Матэматыка. Інфарматыка. – 2011. – №2. – С. 19 – 23.
2. Мультиобъектный спектрометр с микрозеркальной матрицей / Е. С. Воропай [и др.] // ЖПС. – 2010. – Т. 77, № 2. – С. 305 – 312.

A number of principal approaches and optical designs of image monochromators with diffraction grating spectral selectors was proposed. The computer simulation was performed; the advantages over existing systems of the same purpose were analyzed.

Воропай Е.С., зав. кафедрой лазерной физики и спектроскопии БГУ, д.ф.-м.н., профессор, Минск, Беларусь, e-mail: voropay@bsu.by.

Гулис И.М., профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии БГУ, д.ф.-м.н., профессор, Минск, Беларусь, e-mail: gulis@bsu.by.

Костюкевич А.Г., аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии БГУ, Минск, Беларусь.

Купреев А.Г., н.с. кафедры лазерной физики и спектроскопии БГУ, Минск, Беларусь, e-mail: kupreev@bsu.by.