

рода, основанная на использовании структуры, состоящей из магнитоотрицательного материала (металлическое стекло) и волоконного световода, помещенных в однородное магнитное поле. Данный чувствительный элемент может использоваться в структуре квазираспределенных волоконно-оптических измерительных систем рециркуляционного типа. Установлено, что изменяя размеры чувствительного элемента, может быть достигнута относительная погрешность измерений концентраций менее 0,1 % для воздуха.

Литература

1. Use of an optical oxygen sensor to measure dissolved oxygen in seawater / Hiroshi Hasumoto [et al.] // *Journal of Oceanography*. – 2006. – Vol. 62, № 2. – P. 99–103.
2. Preparation and properties of sensing membrane for fiber optic oxygen sensor / De-sheng Jiang [et al.] // *Journal of Wuhan University of Technology*. – 2002. – Vol. 17, № 2. – P. 51–53.

3. Basu, B. J. Studies on the oxygen sensitivity and microstructure of sol-gel based organic-inorganic hybrid coatings doped with platinum porphyrin dye / Bharathibai J. Basu, Jeevan Kamble // *J Sol-Gel Sci Technol*. – 2009. – Vol. 52, № 1. – P. 24–30.

4. Gewerh, P.M. Optical oxygen sensor based on phosphorescence lifetime quenching and employing a polymer immobilised metallophosphorin probe / P.M. Gewerh, T.D. Delphy // *Med.& Biol. Eng.&Comput.* – 1999. – Vol. 31. – P. 2–10.

5. Поляков, А.В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы / А.В. Поляков. – Минск : БГУ, 2014. – 208 с.

6. Ксенофонтов, М.А. Устройство измерения концентрации кислорода / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // *Фотоника*. – 2010. – № 4. – С. 44–48.

7. Липатов, Н.И. Волоконно-оптический магнитоотрицательный датчик концентрации свободного кислорода / Н.И. Липатов, В.В. Саханова // *Измерительная техника*. – 2004. – № 7. – С. 50–53.

УДК 681.785.554

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ МГНОВЕННОЙ ГИПЕРСПЕКТРОСКОПИИ

Гулис И.М., Купреев А.Г., Демидов И.Д.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Особый интерес для спектроскопии с пространственным разрешением представляют решения, пригодные для регистрации нестационарных процессов, в том числе, обеспечивающие получение полного куба данных $I(x, y, \lambda)$ в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy [1], или мгновенная гиперспектроскопия – МГС). Перспективный вариант прибора для МГС формирует проекцию куба данных в виде совокупности локальных спектров от отдельных фрагментов объекта, осуществляя пространственную фильтрацию маской регулярно расположенных микрощелей. Благодаря использованию дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента (вместо обычных для подобных решений призм) он обладает высокой и практически неизменной в рабочем спектральном диапазоне дисперсией [2]. Данный подход предусматривает размещение пропускающей дифракционной решетки вблизи от многощелевой маски в расходящихся пучках от микрощелей. Можно показать, что линейная дисперсия такого спектрометра:

$$\frac{dl}{d\lambda} = h \frac{m}{t \cos \beta} \Gamma,$$

где h – расстояние от маски до решетки, Γ – увеличение системы, m и β – порядок и угол дифракции, t – период решетки. Отсюда следует, что дисперсию системы можно варьировать

перемещением решетки вдоль оптической оси (изменением h).

Формирование изображения на детекторе после дифракционной решетки осуществляется телецентрической системой из двух изображающих объективов с небольшим рабочим отрезком, настроенных на бесконечность и расположенных так, что их передние фокусы совпадают. Диафрагма, размещенная в точке совпадения фокусов, пропускает лишь пучки нужного порядка, что в совокупности с полосовыми светофильтрами на входе системы решает типичную для систем с дифракционной решеткой проблему отсекаания всех порядков дифракции кроме рабочего: светофильтры отсекают порядки $|m| > 1$, а диафрагма исключает 0-й порядок и ненужный 1-й либо -1-й.

Предложенный подход реализован в двух разработанных схемных решениях спектрометров. В первом [2] телецентрическая система построена на основе двух короткофокусных изображающих объективов, настроенных на бесконечность (для моделирования использованы объективы Nikon Nikkor AF 50mm 1.4D). Для оценки изображающих характеристик системы проведено численное моделирование в программе ZEMAX® (рабочий спектральный диапазон 405–700 нм, пропускающая дифракционная решетка 300 штрих./мм, толщина подложки маски и дифракционной решетки 2 мм, материал – стекло BK7). Результаты

показали, что полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии $\Delta l \leq 15$ мкм (предел разрешения $\delta\lambda \leq 10$ нм), лишь в незначительных по площади областях на краю рабочего спектрального диапазона $\Delta l \leq 20$ мкм, что соответствует пределу спектрального разрешения $\delta\lambda \leq 14$ нм.

Обойти ограничение на спектральный рабочий диапазон из-за использования рефрактивных объективов позволяет второе разработанное схемное решение на основе рефлективных объективов – внеосевых парабол [3]. Такие объективы обеспечивают высокое качество изображения при работе в параллельных пучках при малом поле изображения относительно фокусного расстояния объектива. В нашем случае числовая апертура пучков на входе в многощелевую маску будет невелика ($NA = 0,042$, относительное отверстие 1:12). Это позволяет предположить, что aberrации зеркал и размеры кружков рассеяния также будут малы даже при относительно протяженном поле изображения. Схема включает два зеркальных объектива в симметричной телецентрической установке, в общей фокальной плоскости которых расположена диафрагма для блокирования порядков дифракции.

Численное моделирование системы проводилось в спектральном диапазоне 450–750 нм, подложки маски и решетки – кварц. Угол отклонения оптической оси 30° , диаметр рабочей области 50,8 мм, радиус кривизны 254 мм, эффективное фокусное расстояние 136,12 мм, фокусное расстояние образующей параболы 127 мм. Результаты показывают, что полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии преимущественно $\Delta l \leq 10$ мкм ($\delta\lambda < 10$ нм), лишь в отдельных точках поля $\Delta l \leq 15$ мкм ($\delta\lambda \leq 12$ нм). Δl в направлении, ортогональном направлению дисперсии, не превышает 25–30 мкм.

В данной оптической системе объектив микроскопа работает с наклонным полем объекта и изображения, что обусловлено желанием получить дифракцию под углом 0° для пучков центральной длины волны диапазона. Однако для объектива микроскопа, как правило, не рассчитанного на работу с наклонным полем, это приводит к увеличению размера кружков рассеяния в промежуточной плоскости (на маске). Более того, в ряде случаев (например, при использовании телескопа для наблюдения астрономических объектов) получить наклонное поле промежуточного изображения затруднительно. Поэтому был разработан и проанализирован вариант оптической системы с нормальным падением пучков на маску; соответственно, поля объекта и изображения в такой системе наклонные (в данном случае наклон последнего относительно перпендикулярного к оптической оси положения приблизительно 10°). Численное моделирование показало, что в такой системе полуши-

рина кружков рассеяния практически остается неизменной, длина спектра уменьшается (в пределах 5%), что, по-видимому, обусловлено неколлинеарностью (схождением) оптических осей диспергированных пучков с разными длинами волн.

Также моделирование показало, что другим фактором, ухудшающим характеристики изображения на детекторе, является неплоское поле изображения. Для корректировки предлагается использовать плоско-выпуклую линзу, расположенную непосредственно перед детектором. Согласно теоретическому расчету, при радиусе кривизны поля изображения ~ 100 мм достаточно использовать кварцевую линзу радиусом 30 мм. Численное моделирование подтвердило справедливость такой оценки и показало, что при этом размеры кружков рассеяния существенно уменьшаются – до 7–10 мкм (полуширина).

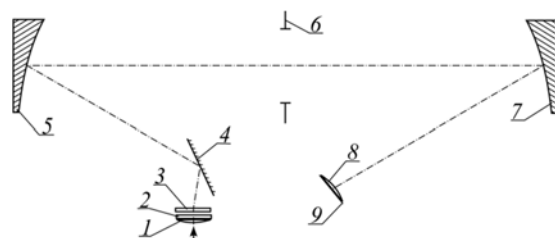


Рисунок 1 – Принципиальная схема многощелевого спектрометра с дифракционной решеткой:

- 1, 8 – плоско-выпуклая линза, 2 – маска на подложке,
- 3 – дифракционная решетка, 4 – плоское зеркало,
- 5, 7 – параболическое зеркало, 9 – детектор

Наконец, рассмотрено схемное решение, представляющее собой синтез обоих упомянутых выше подходов (рисунок 1). Для коррекции кривизны поля используется линза 8, но поле изображения расположено наклонно к оптической оси (формирующие изображение световые пучки наклонно падают на корректирующую линзу). Соответственно, достигается нормальное падение пучков на многощелевую маску 2. Наилучшие результаты коррекции были получены для параметров линзы, аналогичных использованному в рассмотренном выше схемном решении. Согласно результатам моделирования, полуширина кружков рассеяния в направлении дисперсии $\Delta l \leq 10$ мкм, лишь в отдельных точках поля $\Delta l \leq 15$ мкм. Вследствие того, что дисперсия в данной системе несколько выше, чем в исходной рефлективной [3] (максимальная величина по полю $\sim 1,5 \times 10^{-3}$ мм/нм), для точек поля $\delta\lambda \leq 10$ нм.

На основании результатов моделирования можно заключить, что как рефрактивное, так и рефлективное схемное решение пригодны для реализации на их основе МДС. Рефрактивное компактнее, но и более ограничено по спектральному рабочему диапазону. Рефлективное обеспечивает расширенный рабочий спектраль-

ный диапазон и имеет меньший предел разрешения. Рассмотренные варианты решений позволяют также обеспечить для входного поля перпендикулярность оптической оси системы, расширив область применения за счет снижения ограничений на выбор системы формирования входного изображения.

Данные решения технологически просты, приборы на их основе могут применяться, например, в биомедицинских приложениях, обеспечивая МГС с пространственным разрешением до 2×10^4 и спектральным разрешением на уровне 10 нм для спектрального диапазона 400–700 нм.

УДК 621.372.821.1

ПАССИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДОБОРНОСТИ МИКРОЧИП ЛАЗЕРА ИЗЛУЧАЮЩЕГО В ОБЛАСТИ 2 МКМ С ЗАТВОРОМ НА ОСНОВЕ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Гусакова Н.В.¹, Демеш М.П.¹, Кисель В.Э.¹, Ясюкевич А.С.¹, Choi S.Y.², Rotermund F.², Павлюк А.А.³, Кулешов Н.В.¹

¹НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ, Минск, Республика Беларусь

² Korea Advanced Institute of Science and Technology, Yuseong-gu, Daejeon 34141, South Korea

³ Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Импульсные лазерные источники спектральной области 2 мкм представляют интерес для ряда практических применений таких как: хирургические лазеры системы, системы прецизионной обработки, системы дистанционного зондирования атмосферы (LIDAR), системы оптической связи, а также системы измерения скорости ветра (Doppler-LIDAR) с целью повышения безопасности полетов. Излучение с длиной волны 2 мкм, позволяет проводить анализ концентраций ряда атмосферных газов (H₂O, CO₂, N₂O), что является необходимым при экологическом мониторинге окружающей среды. Кроме того, излучение с длиной волны более 2 мкм может быть эффективно преобразовано в средний ИК-диапазон (3-8 мкм) с помощью нелинейных кристаллов [1].

Для получения генерации в области 2 мкм используют кристаллы, активированные ионами тулия и гольмия. В последнее время возрастает интерес к созданию компактных систем, излучающих в области 2.1 мкм на основе кристаллов со-активированных ионами Tm и Ho. Ключевым достоинством таких систем является возможность их накачки в области 800 нм коммерчески доступными AlGaAs лазерными диодами.

Для реализации импульсного режима генерации часто используют режим пассивной модуляции добротности. В последнее время в качестве пассивных затворов для таких систем было предложено использовать насыщающиеся поглотители на основе наноматериалов [2-5]. Достоинством пассивных затворов на основе углеродных нанотрубок является широкая полоса поглощения E₁₁ в области 1.9-2.1 мкм, позволяющая

Литература

1. Hagen N., Kudenov M. W. Review of snapshot spectral imaging technologies // Opt. Engineering. – 2013. – Vol. 52, № 9. – P. 090901-1–090901-23.

2. Гулис И. М., и др. Многощелевой спектрометр с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным разрешением // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 3. – С. 4–11.

3. Гулис И. М., и др. Многощелевой спектрометр с дифракционной решеткой и зеркальными объективами для спектроскопии с пространственным разрешением // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2018. – № 2. – С. 4–10.

использовать их в качестве пассивных затворов для тулиевых и гольмиевых лазеров, сравнительно простая и дешевая технология синтеза и быстрое время релаксации просветленного состояния [3]. Режим пассивной модуляции добротности с использованием затвора на основе углеродных нанотрубок был реализован впервые с кристаллом Tm, Ho:YAP [6]. В настоящей работе впервые получен режим модулированной добротности Tm, Ho:KYW микрочип лазера с затвором на основе однослойных углеродных нанотрубок.

Схема лазера представлена на рисунке 1.

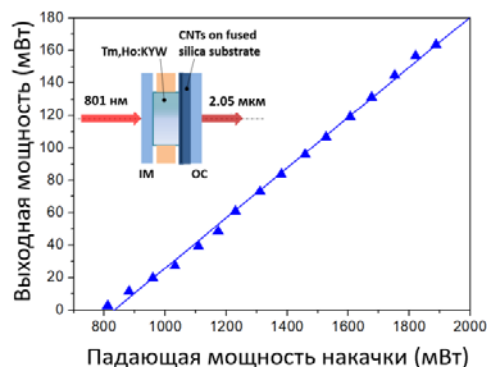


Рисунок 1 – Зависимость выходной мощности Tm, Ho:KYW микрочип лазера работающего в режиме пассивной модуляции добротности от падающей мощности накачки

Кристалл Tm (5 at.%), Ho (0.5 at.):KYW толщиной 2.5 мм вырезанный вдоль оси оптической Ng был обернут в индиевую фольгу и закреплен в медном теплоотводе. Температура кристалла поддерживалась на уровне 15°C и регулировалась