

ремещение), а в двух направлениях, перпендикулярных лучу – с помощью линейных моторизованных позиционируемых площадок, что обеспечивает возможность компьютерно-управляемого сканирования поверхности образца.

Для регистрации спектров плазмы используются спектрометры с регистрацией на ПЗС-линейке: 18 – на основе полихроматора SDH-1 (ЗАО «СОЛАР Лазерные Системы», спектральный диапазон 190–800 нм, разрешение 0,1 нм при ширине одновременно регистрируемого спектрального интервала 130 нм) и 19 – решеточный спектрометр оригинальной конструкции, описанный в [2]. Спектральный диапазон регистрации 400–1060 нм; для базового диапазона 400–590 нм спектральное разрешение составляет 0,5 нм. Особенностью спектрометра является возможность регистрации спектров испускания с временным разрешением, что позволяет получать информацию о динамике процессов в лазерно-индуци-

рованной плазме. Рабочие диапазоны временных измерений – 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 мкс; минимальное временное разрешение 20 нс.

Управление режимами работы лазерных источников, системами сканирования образца и системами регистрации спектров осуществляется с использованием оригинального программного обеспечения.

Литература

1. Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Fundamentals and Applications / Eds. A.W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – Cambridge University Press, 2006. – 620 p.

2. Многоканальный регистратор кинетики свечения в диапазоне 0,05–1000 мкс для атомно-эмиссионной спектроскопии / Е.С. Воропай, И.М. Гулис, К.Ф. Ермалицкая, Ф.А. Ермалицкий, К.Н. Каплевский, А.Е. Радько, К.А. Шевченко // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 4. – С. 154–155.

УДК 681.785.57

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ В СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Гулис И.М., Купреев А.Г.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Единовременная мультиспектральная съемка (ЕМСС, snapshot multispectral imaging [1]) интенсивно развивается благодаря наличию элементной базы (компактные оптические устройства и элементы для спектральной селекции, матричные фотодетекторы большого размера и разрешения) и обширности областей приложения (оперативное получение информации о протяженных пространственных областях, регистрация информации о нестационарных процессах). Существующие решения ЕМСС для спектральной селекции используют, как правило, дисперсионные системы и устройства на основе перестраиваемых полосовых фильтров [2]. Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) обладает уникальными качествами – высокой спектральной селективностью, простотой и компактностью, – которые делают его перспективным спектральным селектором для ЕМСС.

В существующих подходах ИФП используется скорее как вариант перестраиваемого фильтра [3]. Для единовременного получения на детекторе набора сечений пространственно-спектрального куба данных $I(x, y, \lambda)$ предлагается использовать ИФП, работающий в коллимированных пучках существенно наклонно к оптической оси системы (к примеру, установка перед изображающим объективом для работы с удаленным объектом, либо между коллиматорным и камерным объективами). На входе системы

необходим фильтр для устранения сигнала из других спектральных полос. На детекторе формируется изображение, пересеченное интерференционными полосами (кольцами) – периферийной частью интерференционной картины. Таким образом, каждый разрешаемый пространственный элемент отображается на детекторе, если попадает в полосу пропускания ИФП. Иными словами, на детекторе отображается вариант наклонного сечения куба данных (рисунок 1, а). Для сравнения приведено единовременное сечение куба данных для дисперсионного pushbroom-спектрометра, а также разработанных авторами многощелевого изображающего спектрометра [4] и полихроматора изображения [5] (рисунки 1, б, в и г соответственно).

При любом подходе ЕМСС регистрируемая на детекторе информация представляет собой неполную проекцию куба данных, степень неполноты определяется, главным образом, используемым вариантом построения проекции и характеристиками пространственно-спектрального селектора. В предлагаемом подходе регистрируемая проекция задается отображением аппаратной функции ИФП (функция Эйри) на плоскость изображения (изочастотные кольца). Такой подход особенно эффективен для регистрации нешироких спектральных интервалов, приблизительно соответствующих области свободной дисперсии ИФП. Существенное преимущество перед другими

подходами может достигаться за счет технической простоты системы, а также высокой дисперсии (спектрального разрешения). Небольшое расстояние между полосами, а также относительно малое и монотонное его изменение в пределах детектора упрощают процедуру интерполяции для оценки всего куба данных.

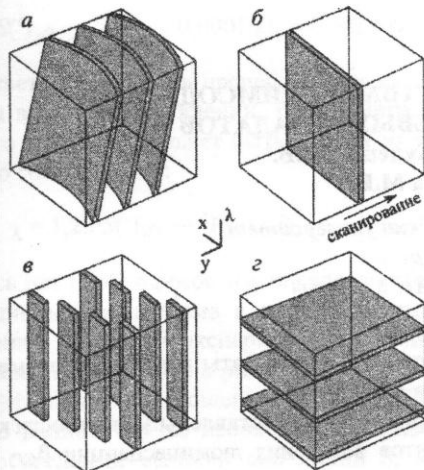


Рисунок 1 – Схематическое сечение куба данных для предлагаемой системы на основе ИФП (а), дисперсионного pushbroom-спектрометра (б), многощелевого изображающего спектрометра (в), полихроматора изображения (г)

Получение аналитического вида функции для описания расстояния между кольцами при произвольном наклоне ИФП представляет собой сложную задачу (в частном случае малых наклонов расстояние обратно пропорционально тангенсу угла). В то же время, можно численно рассчитать вид этой функции для конкретного набора параметров ИФП и выявить общую тенденцию.

Для этого было проведено моделирование изображающей системы с ИФП в виде плоскопараллельного резонатора с воздушной прослойкой. На рисунке 2а показано расчетное число полос N_{det} на детекторе длиной 24 мм при расстоянии между зеркалами 20 мкм, коэффициенте отражения зеркал 0.95 (область свободной дисперсии 15.1 нм, спектральное разрешение 0.24 нм), фокусном расстоянии изображающего объектива 75 мм и длине волны излучения $\lambda = 550$ нм. Видно, что при увеличении наклона N_{det} монотонно возрастает, к примеру, при наклоне 20° помещается всего 8 полос, 40° – 15 полос, 60° – 20 полос. Одновременно уменьшается расстояние между полосами ΔD (рисунок 2, б), так при 60° оно нелинейно монотонно изменяется приблизительно от 1.1 до 1.4 мм.

На основании полученных данных можно сделать заключение о том, что с точки зрения увеличения объема регистрируемых данных целесообразно увеличивать наклон ИФП. В то же время,

необходимо учитывать ограничивающие факторы, среди которых френелевское отражение на элементах ИФП, уширение спектральных линий вследствие эффекта сбега пучков и другие.

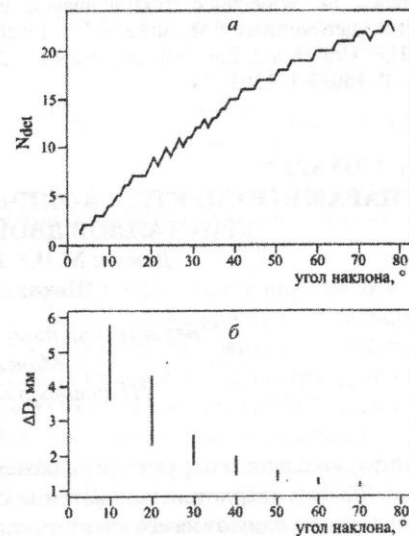


Рисунок 2 – Зависимость числа интерференционных полос на детекторе N_{det} (а) и расстояния между полосами ΔD (б) от угла наклона ИФП относительно оси системы при заданных параметрах (см. текст). ΔD представляет собой диапазон значений

При увеличении наклона расширяется область свободной дисперсии, чем можно воспользоваться для изменения спектрального рабочего диапазона системы (т.е. диапазон варьируется поворотом ИФП). Поскольку подобным образом изменяется и предел разрешения, то количество регистрируемых спектральных каналов (разрешающая способность R) остается постоянным. Для повышения R необходимо увеличивать коэффициент отражения зеркал эталона. Из-за особенностей аппаратной функции при малой R пропускание во всем рабочем диапазоне ИФП подавляется слабее, поэтому в предлагаемом подходе желательно работать с большими R (использовать зеркала с высоким – не менее 0.9 – коэффициентом отражения).

Предлагаемый подход технически прост и позволяет конструировать малогабаритные системы для ЕМСС как в виде отдельных приборов, так и в виде приставок к изображающим системам (например, к фотокамере смартфона). Среди потенциальных областей применения – регистрация спектрально-пространственного распределения излучения лазеров, плазмы и других источников с узкополосными спектрами.

Литература

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

2. Ortega, S. Use of Hyperspectral/Multispectral Imaging in Gastroenterology. Shedding Some-Different-Light into the Dark / S. Ortega, H. Fabelo, D.K. Iakovidis, A. Koulaouzidis, G.M. Callico // J. Clin. Med. – 2019. – Vol. 8, no. 1. – P. 36–56.

3. Strauch, M. Wide-angle spectral imaging using a Fabry-Pérot interferometer / M. Strauch, I.L. Livshits, F. Bociort, H.P. Urbach // J. Eur. Opt. Soc.-Rapid. – 2015. – Vol. 10. – P. 15037-1–15037-7.

4. Гулис, И.М. Многоцелевой спектрометр с дифракционной решеткой и зеркальными объективами для спектроскопии с пространственным разрешением / И.М. Гулис, А.Г. Купреев, И.Д. Демидов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2018. – № 2. – С. 4–10.

5. Гулис, И.М. Оптическая схема полихроматора изображения для спектроскопии с пространственным разрешением / И.М. Гулис, А.Г. Купреев // Журн. прикл. спектр. – 2019. – Т. 86, № 5. – С. 813–816.

УДК 621.3.038.825.2

ПАРАМЕТР СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА НЕОДИМСОДЕРЖАЩИХ КРИСТАЛЛОВ ДВОЙНЫХ КАЛЬЦИЕВЫХ ВАНАДАТОВ

Демеш М.П.¹, Ясюкевич А.С.¹, Кулешов Н.В.¹

Шеховцов А.Н.², Космына М.Б.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Институт монокристаллов НАН Украины
Харьков, Украина

Свойства локального окружения редкоземельного иона (РЗИ) в твердотельной матрице существенно влияют на его спектроскопические характеристики. Параметры Джадда-Оффельта (Д-О), Ω_2 , Ω_4 и Ω_6 , могут дать информацию о симметрии ближайшего окружения РЗИ и ковалентности связей РЗИ – лиганды [1]. В некоторых случаях, например, для неодимсодержащих сред, параметры Д-О позволяют предложить спектроскопические критерии качества исследуемых материалов как активных лазерных сред [2].

Спектроскопические и структурные характеристики группы кристаллов двойных кальциевых ортованадатов $\text{RE}:\text{Ca}_9\text{Ln}(\text{VO}_4)_7$ и $\text{RE}:\text{Ca}_{10}\text{A}(\text{VO}_4)_7$ ($\text{Ln} = \text{Y}, \text{La-Lu}$, A – катион щелочного металла, RE – РЗИ) исследовались в работах [3–6]. Разупорядоченность структуры этих материалов приводит к уширению линий в спектрах поглощения и люминесценции, что представляет интерес для определенных лазерных применений этих кристаллов.

В данной работе был рассмотрен спектроскопический критерий лазерного качества иона неодима в ряду кристаллов $\text{Nd}:\text{Ca}_9\text{Ln}(\text{VO}_4)_7$ (CLaV), $\text{Nd}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ (NLaV), $\text{Ca}_9\text{Nd}(\text{VO}_4)_7$ (CNdV), $\text{Nd}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$ (CLV) и $\text{Nd}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$ (CKV) на основе параметров Ω_4 и Ω_6 .

Ввиду того, что вероятность излучательных переходов с уровня $^4\text{F}_{3/2}$ определяется преимущественно величинами Ω_4 и Ω_6 , вводится параметр спектроскопического качества χ [2], численно равный их отношению. Из теории Д-О можно получить аналитическое выражение для коэффициентов ветвления люминесценции $\beta(JJ')$:

$$\beta(JJ') = \frac{(a_J \chi + b_J) \lambda_{JJ'}^{-3}}{\sum_{J''} (a_{J''} \chi + b_{J''}) \lambda_{JJ''}^{-3}} \quad (1)$$

где $a_J = |\langle ^4\text{F}_{3/2} || U^{(4)} || ^4\text{I}_{3/2} \rangle|^2$; $b_J = |\langle ^4\text{F}_{3/2} || U^{(6)} || ^4\text{I}_{3/2} \rangle|^2$.

Здесь a_J и b_J – квадраты матричных элементов тензора $U^{(k)}$ [7].

На рисунке 1 представлены зависимости коэффициентов ветвления люминесценции $\beta(JJ')$ кристаллов кальциевых ванадатов от параметра χ для излучательных переходов с уровня $^4\text{F}_{3/2}$. Для сравнения также приведены данные для наиболее популярных неодимсодержащих кристаллов: иттрий-алюминиевого граната (YAG) и иттриевого ортованадата (YVO₄). Мощность люминесценции на переходе $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ монотонно возрастает с увеличением параметра χ , в то время как для переходов на уровни $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ и $^4\text{I}_{15/2}$ – монотонно уменьшается. При этом коэффициенты ветвления люминесценции $\beta(JJ')$ на уровнях $^4\text{I}_{9/2}$ и $^4\text{I}_{11/2}$ имеют одинаковые значения при величине параметра χ около 1,16 (см. рисунок 1).

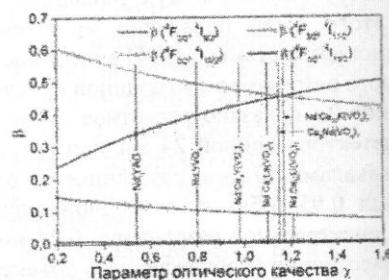


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента ветвления люминесценции $\beta(JJ')$ иона неодима от параметра спектроскопического качества χ

Также из рисунка 1 следует, что согласно спектроскопическому критерию, кристаллы типа $\text{Ca}_{10}\text{A}(\text{VO}_4)_7$ наиболее предпочтительны для получения генерации в области 900 нм.

Примечательно, что параметры Ω_4 и Ω_6 для ионов неодима могут быть определены без выполнения полного расчёта Д-О [2], и, соответственно, получен параметр χ . Для этого