

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 681.785: 535.371/372: 577.323

## СПЕКТРОГРАФ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

© 2010 г. Н. К. Павлычева, доктор техн. наук; М. Хасан

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань  
E-mail: pavlych@oes.kstu-kai.ru

Показана перспективность использования для исследования наноматериалов спектральных приборов на основе вогнутых дифракционных решеток с коррекцией aberrаций. В качестве примера представлены результаты расчета малогабаритного спектрографа с плоским полем для исследования квантовых точек, обеспечивающего спектральное разрешение 0,25 нм при относительном отверстии 1:3.

**Ключевые слова:** наноматериалы, квантовые точки, спектры флуоресценции и рамановского рассеяния, голограммные дифракционные решетки, коррекция aberrаций, спектрограф с плоским полем.

Коды OCIS: 160.4236, 300.6280, 050.1950, 090.2890.

Поступила в редакцию 18.05.2010.

Аналитический обзор статей, посвященных исследованию наноматериалов методами спектроскопии и опубликованных в отечественных и зарубежных журналах (Science, Journal of American Chemical Society, Physical Review B, Physical Review Letters, Applied Physics A, Philosophical Transactions of the Royal Society A, Journal of Physical Chemistry (B, C), Annual Review of Materials Research, International journal of Molecular sciences, “Оптическом журнале” и журнале “Успехи оптических наук”), позволил сделать вывод, что в настоящее время наиболее исследованы квантовые точки (КТ), углеродные нанотрубки (УНТ) и фуллерены.

Для определения размера КТ используют метод флуоресценции в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области [1]. Спектр эмиссии КТ узок (10–25 нм на полувысоте при комнатной температуре), идеально симметричен, а положение максимума спектра излучения флуоресценции  $\lambda_{\max}^{\text{фл}}$  нанокристаллов определяется их размером. Например, частицы селенида кадмия CdSe (CdSe/ZnS) с размерами от 2 до 6 нм могут быть возбуждены источником света одной и той же длины волны, вызывая при этом флуоресценцию

в диапазоне от 480 до 660 нм; частицы InP размером от 3 до 5 нм флуоресцируют в спектральном диапазоне 650–750 нм, частицы InAs размером от 2,5 до 6 нм – в диапазоне 830–1450 нм. В таблице приведены значения  $\lambda_{\max}^{\text{фл}}$  различных КТ [1].

Исследование оптических свойств УНТ проводят используя поглощение, фотолюминесцен-

Значения  $\lambda_{\max}^{\text{фл}}$  различных КТ

Материал нанокристалла	Размер наночастицы, нм	$\lambda_{\max}^{\text{фл}}$ , нм
CdSe (CdSe/ZnS)	2,1	512
	2,4	538
	3,1	564
	3,6	590
	4,6	616
InP	3,0	650
	3,5	690
	4,6	730
InAs	2,8	875
	3,6	1058
	4,6	1288
	6,0	1447

цию и рамановскую спектроскопию. Спектральные методы позволяют делать быстрый и надежный анализ характеристик нанотрубок с точки зрения “нетрубчатого” содержания углерода, а также анализ структуры производства нанотрубок и структурных дефектов. Наиболее популярным методом исследования является рамановская спектроскопия. Для исследования УНТ используют резонансное рамановское рассеяние в видимой и ближней ИК областях спектра с различными лазерами (Ar на длине волны 514 нм, He-Ne на 633 нм, Ti-Saphir на 785 нм или Nd-Yag на 1064 нм) в зависимости от вида УНТ и ее диаметра.

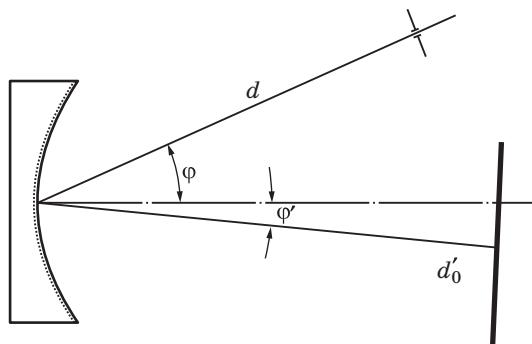
Наиболее известный фуллерен – молекула C<sub>60</sub>. Для исследования C<sub>60</sub>-фуллеренов используют резонансное рамановское рассеяние с перестраиваемым лазером и фурье-рамановскую спектроскопию.

Спектральные приборы для исследования спектров флуоресценции и рамановского рассеяния должны иметь большую светосилу и низкий уровень рассеянного света. Необходимость создания переносных приборов накладывает ограничения на габариты приборов.

Представляется перспективным при спектральном исследовании наноматериалов использовать спектральные приборы, основанные на вогнутых голограммных дифракционных решетках. Такие приборы обладают минимальным количеством оптических деталей и, следовательно, имеют низкий уровень рассеянного света и высокий коэффициент пропускания. Возможность коррекции aberrаций вогнутых голограммных дифракционных решеток соответствующим выбором параметров их записи позволяет создавать светосильные спектральные приборы.

Учитывая, что в современных приборах преимущественно используются многоканальные фотоэлектрические приемники (диодные линейки), в качестве оптической системы целесообразно применять спектрографы с плоским полем (см. рисунок).

В качестве примера рассмотрим оптическую схему спектрографа для анализа квантовых точек CdSe. Рабочий спектральный диапазон, в соответствии с данными работы [1], 480–660 нм. Конструктивные параметры схемы определены из соотношений для “спектрографа с расширенным спектральным диапазоном” [2–3], обеспечивающего плоский спектр с коррекцией астигматизма и меридиональной комы для длин волн 525 и 615 нм:



Принципиальная оптическая схема спектрографа с плоским полем.

$$d = r(1,01056 - 0,0393k\lambda_{\text{cp}}N),$$

$$d'_0 = r[1,0037 - 0,014k\lambda_{\text{cp}}N + 0,058(k\lambda_{\text{cp}}N)^2],$$

$$\varphi = -0,016 + 0,748k\lambda_{\text{cp}}N.$$

При радиусе кривизны решетки  $r = 100$  мм и длине светочувствительной площадки приемника излучения 29 мм для средней длины волны  $\lambda_{\text{cp}} = 570$  нм в первом порядке спектра ( $k = 1$ ) имеем следующие оптические характеристики: частота штрихов дифракционной решетки  $N = 1460$  штр/мм, расстояние от входной щели до вершины решетки  $d = 97,8$  мм, расстояние от вершины решетки до плоскости регистрации спектра  $d'_0 = 103$  мм, угол падения лучей на решетку  $\varphi = 34^\circ 45'$ , обратная линейная дисперсия 6,4 нм/мм; параметры записи решетки: длина волны записи 441,6 нм, расстояния от точечных источников до вершины решетки 98,38 и 97,48 мм, углы падения лучей от источников в вершину решетки  $34^\circ 01' 46''$  и  $-4^\circ 52' 58''$  соответственно. При работе с входной щелью шириной 0,25 мм и относительным отверстием 1:3 предел разрешения спектрографа, определяемый как ширина аппаратной функции на половине ее высоты, не превышает 0,25 мм по всему полю, что соответствует спектральному разрешению 1,6 нм. Астигматическое удлинение входной щели не превышает 0,14 мм, что делает спектрограф пригодным для использования в томографическом режиме. При необходимости более высокого разрешения перед приемником следует установить цилиндрическую вогнуто-плоскую линзу с радиусом кривизны 28 мм (для стекла K8). В этом случае предел разрешения спектрографа по всему полю не превышает 0,04 мм, что соответствует спектральному разрешению 0,25 нм. Наиболее распространенные в настоящее время диодные линейки, используемые в

спектральных приборах, имеют размер пикселя 0,014 мм и, следовательно, не ухудшат разрешение прибора.

Таким образом, использование вогнутой голографмной дифракционной решетки позволило разработать компактный спектрограф для исследования спектров флуоресценции с достаточно высокими оптическими характеристиками. По аналогичной методике может быть рассчитана схема спектрографа для исследования рамановского рассеяния, однако в этом случае необходимо использовать дифракционную решетку

с большим числом штрихов для получения большей дисперсии и более высокого разрешения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Maureen A. Walling, Jennifer A. Novak, Jason R.E. Shep. Quantum Dots for Live Cell and In Vivo Imaging // Intern. journ. of Molecular sciences. 2009. V. 10. P. 441.
  2. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 197 с.
  3. Nazmeev M., Pavlycheva N. New generation spectrographs // Opt. Eng. 1994. V. 33. P. 2777–2782.
-