

05:07:12

Люминесцентные волокна с квантовыми точками CdS(Se) для волоконно-оптического датчика искры

© Д.С. Агафонова, Е.В. Колобкова, А.И. Сидоров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

E-mail: aisidorov@qip.ru

Поступило в Редакцию 24 мая 2012 г.

Представлены результаты исследования люминесцентных характеристик оптических волокон с квантовыми точками CdS и CdSSe, предназначенных для волоконно-оптического датчика искры со спектральным преобразованием излучения искры в длинноволновую область спектра. Показано, что подбор материала квантовых точек и их размера позволяет сместить полосу люминесценции в спектральную область максимальной чувствительности кремниевого фотоприемника.

Своевременная и надежная регистрация электрического искрения и электрической дуги является необходимым условием безопасной эксплуатации энергетических и крупных механических установок, нефте- и газопроводов и предприятий химической промышленности. Существует ряд волоконно-оптических датчиков электрической дуги, в которых используется преобразование излучения, падающего на боковую поверхность полимерного волокна или оптоволоконного жгута в волноводные моды [1–6]. Такие датчики обладают низкой чувствительностью при регистрации искрения, что связано с низкой эффективностью захвата излучения, высокими потерями в полимерах волокнах и низкой чувствительностью фотоприемников в спектральном интервале излучения искры. Кроме того, коротковолновое излучение искры не может быть передано по волокну на большое расстояние, так как потери на светорассеяние пропорциональны $1/\lambda^4$ [7]. В работе [8] показано, что использование в качестве чувствительного элемента датчика стеклян-

ного волокна с полимерным покрытием, содержащим люминесцентный органический краситель, позволяет значительно повысить чувствительность датчика за счет увеличения эффективности захвата излучения и спектрального преобразования коротковолнового излучения искры в длинноволновое излучение люминесценции красителя. Однако органические красители недолговечны и нестойки к воздействию УФ-излучения и температуры. Целью данной работы было исследование возможности использования стеклянных волокон с квантовыми точками CdS и CdSSe в качестве чувствительного элемента в волоконном датчике искры со спектральным преобразованием излучения.

Исследовались волокна из оксифторидных и силикатного (КС10) стекол с квантовыми точками CdS и CdSSe. Оксифторидные стекла были изготовлены в СПб НИУ ИТМО. Квантовые точки формировались при термообработке стекол, исходно содержащих ионы Cd, S и Se. Варьирование температуры ($T = 430\text{--}450^\circ$) и времени ($t = 0.5\text{--}1\text{ h}$) термообработки позволяет управлять размером квантовых точек и за счет этого сдвигать полосу их люминесценции по спектру. Волокна диаметром $150\text{--}300\ \mu\text{m}$ изготавливались путем вытягивания из расплава стекла, уже содержащего квантовые точки. Использовались волокна длиной $4\text{--}6\text{ cm}$ без стеклянной и полимерной оболочек. Измерение спектров люминесценции производилось с помощью волоконного спектрометра EPP2000-UVN-SR (StellarNet) с возбуждением люминесценции полупроводниковым лазером ($\lambda = 405\text{ nm}$). Оптическая схема измерений показана на рис. 1, *a*. Возбуждающее излучение полупроводникового лазера равномерно распределялось вдоль волокна с квантовыми точками с помощью цилиндрической линзы.

На рис. 1, *b* показаны спектры люминесценции исходного оксифторидного стекла с квантовыми точками CdS и изготовленного из него волокна. Для сравнения на рисунке показана кривая спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника. Из рисунка видно, что максимум полосы люминесценции исходного стекла приходится на длину волны 600 nm . После изготовления волокна максимум смещается в спектральный интервал $670\text{--}700\text{ nm}$. Это вызвано тем, что в процессе вытягивания волокна из расплава стекла нагрев приводит к увеличению размера квантовых точек. Полосы люминесценции имеют структуру. Причиной этого является разброс квантовых точек по размерам. Ширина интегральной полосы люминесценции по поперечному сечению составляет 210 nm . Таким образом, в люминесцентном волокне с квантовыми

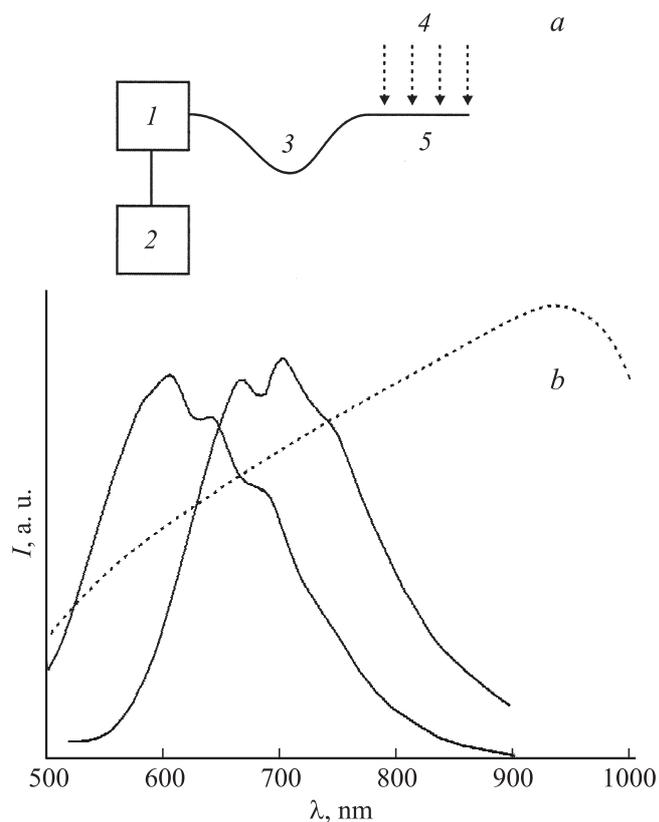


Рис. 1. *a* — оптическая схема измерений: 1 — волоконный спектрометр, 2 — компьютер, 3 — многомодовое передающее волокно из кварцевого стекла, 4 — возбуждающее излучение, 5 — волокно с квантовыми точками; *b* — спектры люминесценции исходного оксифторидного стекла с квантовыми точками CdS(1) и изготовленного из него волокна 2. Пунктир — кривая спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника.

точками CdS возможно спектральное преобразование излучения с $\lambda = 405 \text{ nm}$ в спектральный интервал 650–750 nm. Однако при этом не достигается оптимальное совмещение полосы люминесценции с максимумом чувствительности фотоприемника ($\lambda = 950 \text{ nm}$).

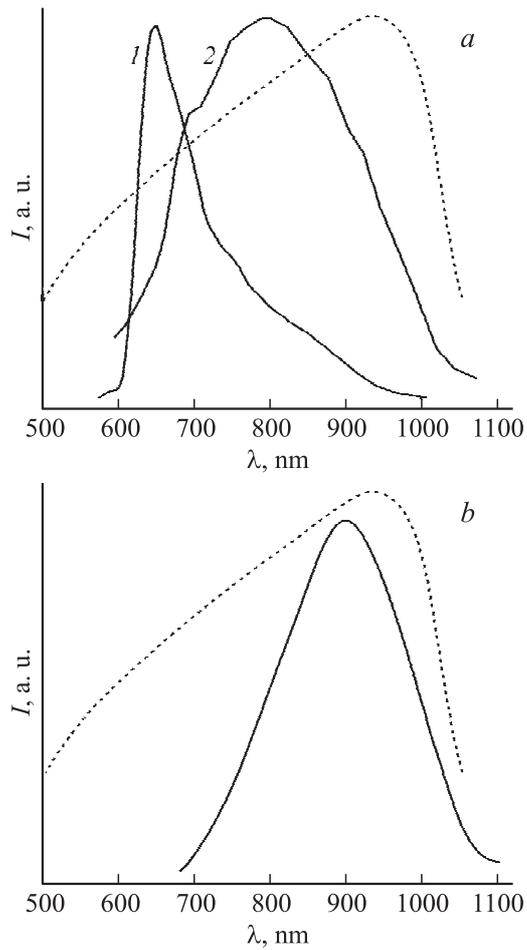


Рис. 2. *a* — спектры люминесценции исходного силикатного стекла (KC10) с квантовыми точками CdSSe (1) и изготовленного из него волокна (2). *b* — спектр люминесценции волокна из оксифторидного стекла с квантовыми точками CdSSe. Пунктир — кривые спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника.

При изготовлении волокна из силикатного стекла с квантовыми точками CdSSe происходит значительное уширение полосы люминесценции до 320 nm, а максимум люминесценции смещается с $\lambda = 650$ nm на $\lambda = 800$ nm (рис. 2, *a*). В волокне из оксифторидного стекла с квантовыми точками CdSSe было получено совмещение максимума полосы люминесценции с максимумом спектральной чувствительности фотоприемника, близкое к оптимальному (рис. 2, *b*). Максимум люминесценции в этом случае приходится на $\lambda = 900$ nm, а ширина полосы люминесценции по полувысоте составляет 200 nm. Дальнейший сдвиг полосы люминесценции в длинноволновую область спектра вряд ли имеет смысл, так как при этом длинноволновый край полосы люминесценции выходит за красную границу чувствительности фотоприемника.

Измерения эффективности спектрального преобразования проводились для объемного образца из оксифторидного стекла с квантовыми точками CdSSe со спектром люминесценции, аналогичным приведенному на рис. 2, *b*. Измерения проводились в калиброванной интегрирующей сфере IC2 (StellarNet) с возбуждением люминесценции излучением с $\lambda = 405$ nm. Измерения показали, что эффективность спектрального преобразования излучения с длиной волны 405 nm в спектральный интервал 750–1050 nm составляет 48%. Расчет эффективности захвата излучения люминесценции волокном проводился в приближении излучающего диполя, расположенного в многомодовом слабонаправляющем волноводе [9]. Расчет проводился для длины волны 900 nm и показателя преломления волновода $n = 1.55$, характерного для оксифторидного стекла. Расчет показал, что эффективность захвата излучения люминесценции волноводом для указанных условий, с учетом распространения волноводных мод в двух противоположных направлениях, составляет 18%.

Таким образом, при использовании в волоконном датчике искры со спектральным преобразованием излучения в качестве чувствительного элемента волокна из оксифторидного стекла с квантовыми точками CdSSe появляется возможность достичь оптимальных характеристик спектра преобразованного оптического сигнала. Кроме того, преобразование коротковолнового излучения искры в длинноволновое позволяет уменьшить потери на светорассеяние в передающем кварцевом волокне. Так, при преобразовании излучения с $\lambda = 405$ nm в оптический сигнал с $\lambda = 900$ nm потери на светорассеяние в кварцевом волокне уменьшаются в 25 раз.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг. (контракт П412 12.05.2010, Минобрнауки РФ) и РФФИ (грант 11-08 01 226-а).

Список литературы

- [1] *Никитаев О.В., Селиванов А.У.* Применение дуговых защит в комплексных распределительных устройствах сельскохозяйственных подстанций. Эксплуатация устройств сельскохозяйственного электроснабжения. Сборник научных трудов. М., 1989. 44 с.
- [2] Патент РФ RU № 2096887.
- [3] Патент РФ RU № 2237332 С2.
- [4] *Казачков Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 20. С. 73.
- [5] *Казачков Ю.П.* // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 145.
- [6] *Казачков Ю.П.* // Оптич. журн. 1999. Т. 66. № 3. С. 107.
- [7] *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
- [8] *Агафонова Д.С., Сидоров А.И.* // Оптич. журн. 2011. Т. 78. № 11. С. 50.
- [9] *Snyder A.W., Love J.D.* Optical waveguide theory. London, N.Y.: Chapman and Hall, 1983. 665 p.