

3. П.М. Валов, В.И. Лейман, В.М. Максимов, О.Ю. Деркачева. ФТТ **53**, 446 (2011).
4. П.М. Валов, В.И. Лейман. ФТТ **51**, 1607 (2009).
5. П.М. Валов, В.И. Лейман. ФТТ **49**, 1249 (2007)
6. Никоноров Н.В., Цехомский В.А., Ширшнев П.С., Патент, заявка 210150803 от 10.12.2010, решение о выдаче патента от 04.05.2012

## **ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АЗОТНО-ВАКАНСИОННЫХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА**

**Дмитриев А.К., Вершовский А.К.**

Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской Академии Наук, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы спектры фотолюминесценции NV центров при их накачке коротковолновым видимым и ближним УФ излучением. Показано, что NV<sup>0</sup> центр, в отличие от NV<sup>-</sup> центра, имеет линию поглощения в УФ диапазоне. Продемонстрирована инверсия бесфононной линии NV<sup>-</sup> центра.

NV центры, т.е. азотно-вакансионные центры окраски в кристаллах алмаза, представляют огромный интерес для современной квантовой оптики, информатики, криптографии и магнитометрии. В первую очередь это относится к отрицательно заряженным NV<sup>-</sup> центрам в силу возможности возбуждения и наблюдения в них оптически детектируемого магнитного резонанса<sup>1</sup>.

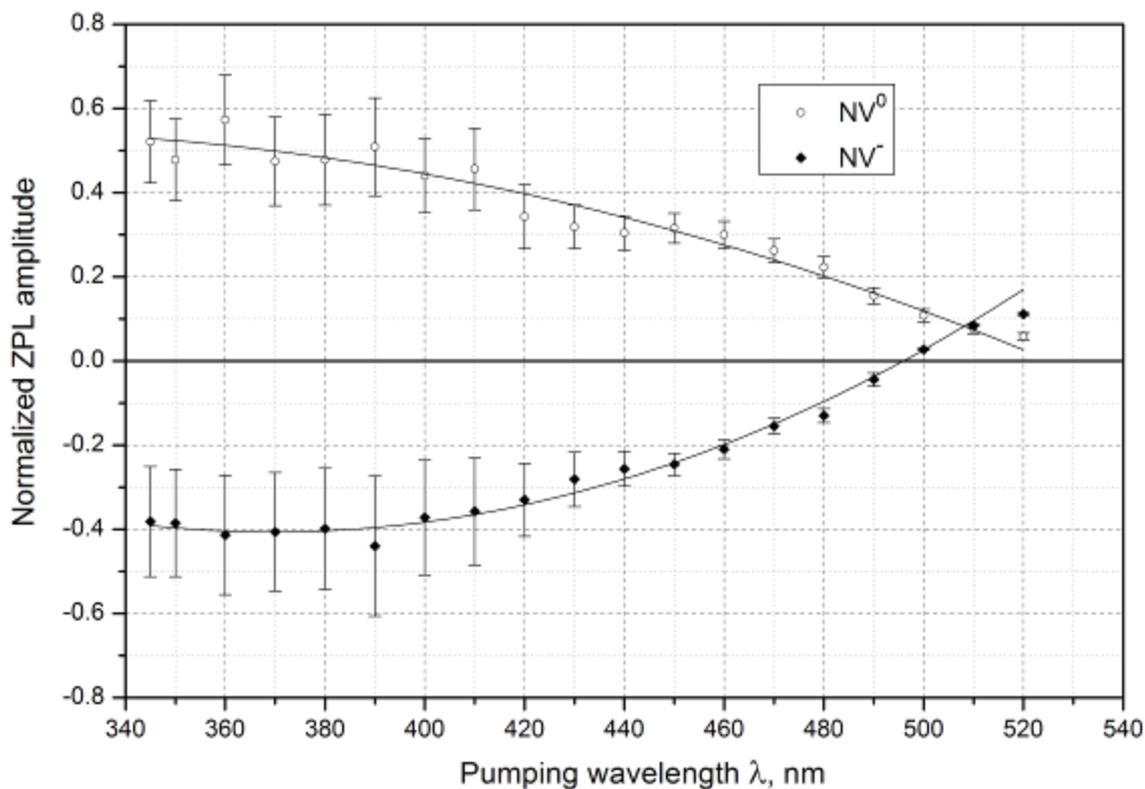
Спектры фотолюминесценции (ФЛ) NV центров при их накачке коротковолновым видимым и ближним УФ излучением исследовались с целью проверки предположений о наличии у них линий (полос) поглощения в УФ области<sup>2</sup>. Работа выполнялась в Лазерном центре ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Спектры ФЛ снимались для двух образцов алмаза, предоставленных Физическим институтом имени П.Н. Лебедева РАН. Образцы были приготовлены в ФИАН следующим образом: синтетические алмазы марки SDB1085 60/70 (объем кристалла ~0.01 мм<sup>3</sup>) производства компании Element Six подвергались облучению электронным пучком интенсивностью 5·10<sup>18</sup> эл/см<sup>2</sup> (образец 1) и ~10<sup>19</sup> эл/см<sup>2</sup> (образец 2), после чего отжигались в течение двух часов в атмосфере аргона при температуре 800°C.

В качестве источника накачки использовалась вторая гармоника перестраиваемого фемтосекундного Ti-Sa лазера MaiTai (345 ÷ 520 нм), сгенерированная удвоителем оптической частоты InspireBlue. Первая гармоника накачки дополнительно отсекалась оптическим фильтром. Луч юстировался системой зеркал, и фокусировался на образце с помощью линзы F=100 мм. Спектр регистрировался посредством спектрометра Ocean Optics. Мощность излучения на образце измерялась ваттметром, и с помощью аттенюатора поддерживалась на уровне ~5 мВт во всем диапазоне длин волн накачки.

Спектры ФЛ образцов 1 и 2 обнаруживают качественное сходство. На широкой полосе ФЛ выделяются узкие пики бесфононных линий (БФЛ), свидетельствующие о наличии в образцах электрически нейтральных NV<sup>0</sup> и отрицательно заряженных NV<sup>-</sup> центров (длина волны БФЛ составляет 637 нм для NV<sup>-</sup> центра и 575 нм – для NV<sup>0</sup> центра<sup>3</sup>).

Обработка спектров производилась посредством аппроксимации участков в окрестности пиков БФЛ суммой лоренцевских контуров и нелинейной подложки. Исследование зависимостей полученных таким образом амплитуд БФЛ от длины волны накачки позволило заключить, что NV<sup>0</sup> центр имеет дополнительную линию поглощения в УФ диапазоне, о чем свидетельствует рост как амплитуды БФЛ NV<sup>0</sup>, так и интегральной интенсивности ФЛ при уменьшении длины волны накачки от 390 до 345 нм.

В отличие от  $NV^0$  центра,  $NV^-$  центр не обнаруживает линий поглощения в ближней УФ области. Более того, при уменьшении длины волны накачки до 495 нм и далее наблюдается инверсия БФЛ в люминесценции на длине волны 637 нм, причем зависимость от длины волны накачки амплитуды БФЛ  $NV^-$  практически повторяет зависимость амплитуды БФЛ  $NV^0$ , но с обратным знаком (Рис. 1).



**Рис. 1.** Зависимость относительных амплитуд БФЛ  $NV^0$  и  $NV^-$  центров от длины волны накачки (образец 1). Амплитуды нормализованы на среднюю амплитуду спектра ФЛ образца в спектральном интервале 550-900 нм.

Данный эффект может быть объяснен следующим образом: полоса спектра люминесценции каждого из  $NV$  центров окраски в алмазе при комнатной температуре смещена относительно полосы его спектра поглощения в красную область на  $100 \div 120$  нм; узкий пик БФЛ, видимый и в спектрах поглощения, и в спектрах люминесценции, расположен между этими полосами<sup>4</sup>. Поскольку характерные спектры  $NV^-$  центра смещены на 62 нм в красную область относительно спектров  $NV^0$  центра, полоса излучения  $NV^0$  центра перекрывает как БФЛ  $NV^-$  центра, так и (частично) широкую фонную полосу поглощения  $NV^-$  центра. Поэтому в условиях, когда  $NV^0$  центры, поглощая УФ излучение накачки, переизлучают его в широкой полосе в области  $\lambda \geq 575$  нм,  $NV^-$  центры эффективно поглощают переизлученный  $NV^0$  центрами свет. Это поглощение, в частности, приводит к образованию узкого провала на длине волны 637 нм (БФЛ  $NV^-$ ) в спектре суммарной ФЛ обоих центров.

Следовательно, при снижении длины волны накачки до 390 нм и далее, люминесценция  $NV^0$  центров начинает играть роль источника эффективной широкополосной накачки для  $NV^-$  центров. Таким способом может быть осуществлена изотропная косвенная оптическая УФ накачка  $NV^-$  центров в актуальных задачах квантовой информатики и магнитометрии.

Авторы благодарят В.Л. Величанского и С.А. Зиброва (ФИАН) за предоставленные образцы и полезные дискуссии.

1. J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Childress, L. Jiang, D. Budker, P. R. Hemmer, A. Yacoby, R. Walsworth, M. D. Lukin, Nat. Phys. **4**, pp.810-816, (2008).
2. В.А. Астапенко, А.С. Батулин, В.Л. Величанский, С.А. Зибров, Е.В. Коростылёв, Л.П. Суханов, Наноструктуры. Математическая физика и моделирование, **8**, № 1, с.17-30, (2013).
3. A. M. Zaitsev, Optical Properties of Diamond, Springer-Verlag, Berlin, (2001).
4. Acosta V.M., Doctoral Theses, University of California, Berkeley, (2011).

## **РЕНТГЕНОВСКАЯ ПРЕЛОМЛЯЮЩАЯ ОПТИКА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Петров П.В., Мудрецов И.Л., Яскевич Ю.Р., Кольчевский Н.Н.**

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Рассматривается история появления и развития рентгеновской преломляющей оптики. Анализируются предельные возможности существующих преломляющих линз и перспективные направления развития преломляющей рентгеновской оптики.

Для рентгеновского диапазона длин волн традиционная оптика видимого света практически не применима, поскольку как в однородной, так и в неоднородной среде рентгеновские лучи распространяются со скоростью, исключительно близкой к скорости света в вакууме. При этом показатель преломления среды в рентгеновской области спектра имеет комплексный вид и рассчитывается по формуле (1).

$$n = 1 - \delta - i\beta, \quad (1)$$

где  $\delta$  – единичный декремент показателя преломления  $n$ ,  $1 \gg \delta > 0$ ;  $\beta$  – величина характеризующая поглощение излучения средой, как правило,  $\beta \ll 1$ ,  $\beta < \delta$ .

В спектре электромагнитных длин волн диапазон рентгеновского излучения расположен в границах от 300 до 0,1 ангстрем. Традиционно данный диапазон длин волн разделяется на мягкий рентген (300 – 2 ангстрема) и жесткий (2 – 0,1 ангстрем).

Малая длина волны излучения приводит к преобладанию дифракционных методов расчета взаимодействия излучения с веществом. Традиционно рентгеновские методы ассоциируются с дифракционным анализом кристаллов и спектроскопией. Основными рентгенооптическими элементами являются кристаллы-монокроматоры, зеркала скользящего падения и зонные пластинки. Применение преломляющей оптики до настоящего времени считалось не эффективным в связи со значительным поглощением рентгеновского излучения веществом и близостью действительной части показателя преломления к единице. До 1996 года не существовало экспериментальных доказательств возможности создания преломляющей линзы для рентгеновского излучения.

Развитие источников рентгеновского излучения идет по пути уменьшения длины волны. Уменьшение длины волны ужесточает требования к качеству изготовления дифракционных оптических элементов (зонных пластинок) и делает практически невозможным создание эффективной оптики скользящего отражения.

С 1948 года рассматривалась идея создания преломляющих рентгеновских линз<sup>1</sup>. Для рентгеновского излучения с длиной волны порядка единиц ангстрем показатель преломления  $n$  характеризуется величиной не превышающей  $10^{-5} - 10^{-4}$ . Поскольку показатель преломления меньше единицы преломляющая линза для рентгеновского излучения представляет собой микролинзу с двояковогнутой формой. Такая линза должна иметь радиус менее 1 мм и фокусное расстояние десятки метров. Пропускание линзы менее 1% и эффективный радиус линзы менее 0,1 апертуры линзы.