

УДК 538.958

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
АЗОТНО-ВАКАНСИОННЫХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ
В КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА

© 2014 г. А. К. Вершовский, А. К. Дмитриев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 21.08.2013 г.

Исследованы спектры фотолюминесценции азотно-вакансионных (NV) центров при их накачке коротковолновым видимым и ближним УФ излучением. Показано, что NV^0 -центр в отличие от NV^- -центра имеет линию поглощения в УФ диапазоне. Продемонстрирована и интерпретирована инверсия бесфоновой линии NV^- -центра.

DOI: 10.7868/S0030403414030246

ВВЕДЕНИЕ

NV -центры, т.е. азотно-вакансионные центры окраски в кристаллах алмаза, представляют огромный интерес для современной квантовой оптики, информатики, криптографии и магнетрии. В первую очередь это относится к отрицательно заряженным NV^- -центрам в силу возможности возбуждения и наблюдения в них оптически детектируемого магнитного резонанса [1]. В связи с этим интерес представляют и новые схемы оптической накачки и среди них такие, которые позволяют осуществлять селективную накачку близких по своим оптическим свойствам NV^0 - и NV^- -центров.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЭКСПЕРИМЕНТ

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 [2]. Работа выполнялась в Лазерном центре ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Спектры ФЛ снимались для двух образцов алмаза, предоставленных Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН. Образцы были приготовлены в ФИАН следующим образом: синтетические алмазы марки SDB1085 60/70 (объем кристалла ~ 0.01 мм³) производства компании Element Six подвергались облучению электронным пучком интенсивностью 5×10^{18} эл/см² (образец 1) и $\sim 10^{19}$ эл/см² (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), сге-

нерированная удвоителем оптической частоты. Спектральная ширина последовательности генерируемых лазером импульсов составляла 8 нм; мощность излучения на образце поддерживалась на уровне ~ 5 мВт во всем диапазоне длин волн накачки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры ФЛ образцов 1 и 2 обнаружили качественное сходство: во-первых, интегральная интенсивность ФЛ не стремится к нулю при уменьшении длины волны накачки λ_p (как можно было ожидать в предположении о наличии у каждого из NV -центров одной полосы поглощения, расположенной в видимой области спектра), а, напротив, при $\lambda_p < 390$ нм начинает расти. При $\lambda_p > 490$ нм наблюдается “классическая” картина (рис. 1): на широкой полосе ФЛ выделяются узкие пики бесфоновых линий (БФЛ), свидетельствующие о наличии в образцах электрически нейтральных NV^0 и отрицательно заряженных NV^- -центров (длина волны БФЛ составляет 637 нм для NV^- -центра и 575 нм для NV^0 -центра [3]). При уменьшении λ_p , однако, амплитуда БФЛ NV^- уменьшается, а затем пик БФЛ сменяется провалом, амплитуда которого растет по мере дальнейшего уменьшения λ_p .

Обработка спектров производилась посредством аппроксимации участков в окрестности пиков БФЛ суммой лоренцевых контуров и нелинейной подложки. Исследование зависимостей полученных таким образом амплитуд БФЛ от длины волны накачки позволило заключить, что NV^0 -центр имеет дополнительную линию поглощения в УФ диапазоне, о чем свидетельствует рост как амплитуды БФЛ NV^0 (рис. 2а), так и ин-

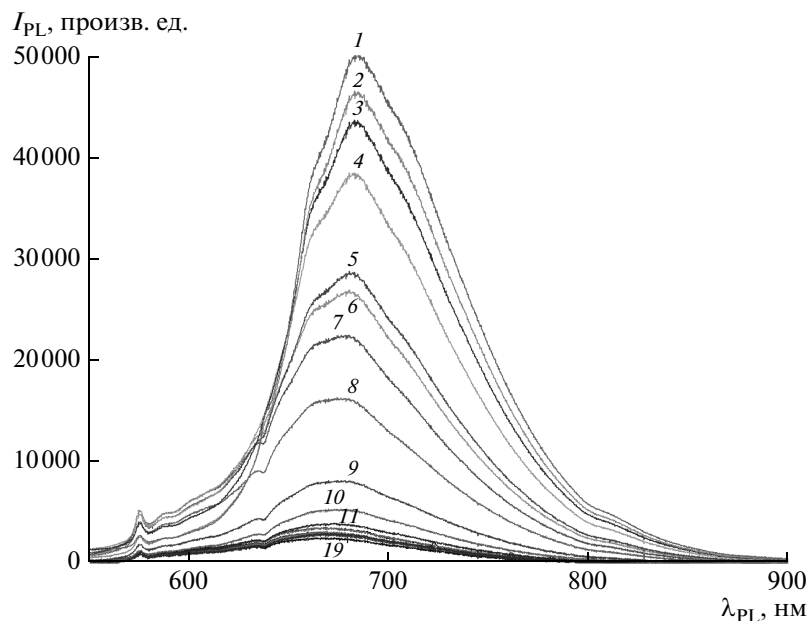


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции кристалла алмаза с высоким содержанием NV-центров (образец 1). Длина волны БФЛ составляет 637 нм для NV^- -центра и 575 нм – для NV^0 -центра. $\lambda_p = 520$ (1), 510 (2), 500 (3), 490 (4), 480 (5), 470 (6), 460 (7), 450 (8), 440 (9), 430 (10), 420 (11), 410 (12), 400 (13), 390 (14), 380 (15), 370 (16), 360 (17), 350 (18), 345 нм (19). Кривые 12–18 на рисунке не пронумерованы.

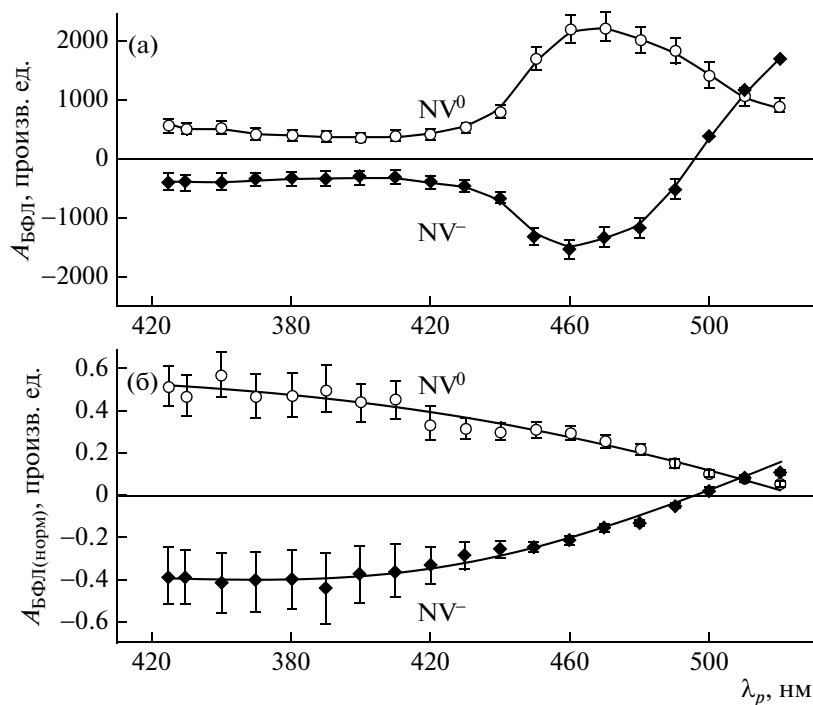


Рис. 2. Зависимость амплитуд БФЛ NV^0 - и NV^- -центров (образец 1) от длины волны накачки: а – без нормировки, б – нормировка на среднюю амплитуду спектра ФЛ образца в спектральном интервале 550–900 нм.

тегральной интенсивности ФЛ (рис. 1) при уменьшении длины волны накачки от 390 до 345 нм. Зависимость амплитуды БФЛ NV^0 , приведенную на

рис. 2а, можно интерпретировать, как зависимость интенсивности поглощения излучения накачки NV^0 -центром (такая интерпретация непри-

менима к спектрам NV^- -центра, так как NV^- -центр помимо излучения накачки способен поглощать свет, переизлученный NV^0 -центрами).

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. Зависимость амплитуд БФЛ от λ_p представляет собой сложную функцию (рис. 2а). Однако, если исключить из нее (методом нормировки на полную интенсивность спектра ФЛ) зависимость поглощения от λ_p , она приобретает вид, представленный на рис. 2б, причем зависимость от длины волны накачки амплитуды БФЛ NV^- практически повторяет с обратным знаком зависимость амплитуды БФЛ NV^0 .

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 100–120 нм. Узкий пик БФЛ, видимый и в спектрах поглощения, и в спектрах люминесценции, расположен между этими полосами [4]. Поскольку характерные спектры NV^- -центра смещены на 62 нм в красную область относительно спектров NV^0 -центра, полоса люминесценции NV^0 -центра перекрывает как БФЛ NV^- -центра, так и (частично) широкую фоновую 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 БФЛ NV^- (637 нм) в спектре суммарной ФЛ обоих центров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в УФ спектрах поглощения NV^0 -центров наличествуют особенности (дополнительные полосы поглощения), которые не обнаруживаются в спектрах поглощения NV^- -центров. Вследствие этого различия 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. Представляет интерес дальнейшее изучение УФ спектров поглощения NV^0 -центров на длинах волн, меньших 345 нм.

Авторы благодарят В.Л. Величанского и С.А. Зиброва (ФИАН) за предоставленные образцы и полезные дискуссии. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 13-02-00589).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor J.M., Cappellaro P., Childress L., Jiang L., Budker D., Hemmer P.R., Yacoby A., Walsworth R., Lukin M.D. // Nat. Phys. 2008. V. 4. P. 810–816.
2. Астапенко В.А., Батулин А.С., Величанский В.Л., Зибров С.А., Коростылев Е.В., Суханов Л.П. // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. 2013. Т. 8. № 1. С. 17–30.
3. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond: Berlin: Springer-Verlag, 2001. 486 p.
4. Acosta V.M., Budker D., Hemmer P.R., Maze J.R., Walsworth R.L. // Optical Magnetometry. Ed. by Budker D., Kimball D.F. Cambridge University Press, 2013. 429 p.