

Увеличение эффективности сбора излучения центров окраски кремний-вакансия из алмазных микроскопических полусфер с помощью стеклянной микросферы

© А.В. Медведев, С.А. Грудинкин, Н.А. Феоктистов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Medvedev@gvg.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 30.04.2025 г.

В окончательной редакции 27.06.2025 г.

Принята к публикации 24.10.2025 г.

Исследована угловая зависимость фотолюминесценции центров окраски кремний-вакансия в алмазных микроскопических полусферах. Экспериментально продемонстрировано, что использование в схеме регистрации сигнала фотолюминесценции стеклянной микросферы диаметром 200 μm и микрообъектива с числовой апертурой NA = 0.9 позволяет достичь десятикратного увеличения интенсивности сигнала фотолюминесценции бесфононной линии центра окраски кремний-вакансия. Благодаря эффективной коллимации излучения микросферой стало возможным многократно сузить угловую зависимость фотолюминесценции центра окраски.

Ключевые слова: алмазные микрочастицы, центры окраски, микросфера, коллимация излучения.

DOI: 10.61011/OS.2025.10.61943.7965-25

1. Введение

Люминесцентные изолированные алмазные микрочастицы с внедренными центрами окраски привлекают внимание в качестве твердотельных источников одиночных фотонов [1]. Биосовместимость, химическая инертность, низкая цитотоксичность делают их перспективными для биомедицинских применений [2]. Центр окраски кремний-вакансия (SiV) в алмазе является точечным дефектом, состоящим из междуузельного атома Si и двух ближайших вакансий в соседних узлах решетки [3]. При комнатной температуре спектр фотолюминесценции (ФЛ) центров окраски SiV состоит из сильной бесфононной линии на длине волны 738 nm и слабой вибронной полосы в области 760 nm. Полная ширина бесфононной линии (БФЛ) SiV на половине высоты (FWHM) при комнатной температуре составляет 1–5 nm [4].

Одним из существенных препятствий на пути практического применения центров SiV в квантовых информационных системах является низкая эффективность вывода излучения центров, что связано с полным внутренним отражением излучения центров из-за высокого значения показателя преломления алмаза ($n \sim 2.4$), которому соответствует угол полного внутреннего отражения 24.5°. В случае плоской границы алмаза значительная доля (до 91% [5]) сигнала ФЛ центров SiV испытывает полное внутренне отражение.

Предлагаемые в литературе способы увеличения эффективности вывода излучения с помощью волноводных мод являются сложными и дорогостоящими [5–7]. Другим способом увеличения эффективности сбора ФЛ является применение полусферических микролинз, на-

носимых поверх алмазов с излучающими центрами окраски. Однако методы их получения с помощью литографии с последующим травлением или формирование их электронным лучом также чрезвычайно трудоемки в реализации [8,9] и требуют точного расположения излучательного центра в фокусе этих микролинз.

Широко распространенный подход к повышению эффективности вывода излучения заключается в изменении формы поверхности алмазных кристаллов, а именно формировании алмазных полусфер [6,9]. Для таких полусфер коэффициент отражения на границе алмаз/внешняя среда и числовая апертура собирающей оптики определяют эффективность сбора излучения. В изолированных алмазных микроскопических полусферах сигнал ФЛ распространяется в широком телесном угле [9], что обуславливает использование микрообъективов с высокой числовой апертурой, которые являются дорогими и имеют малое рабочее расстояние для достижения необходимой эффективности сбора излучения [10]. В настоящей работе предложен и реализован более простой способ коллимации излучения из алмазных микроскопических полусфер с помощью стеклянной микросферы.

2. Методика эксперимента

Алмазные частицы полусферической формы были синтезированы на подложке из сапфира методом микроволнового плазмохимического газофазного осаждения (MWCVD) [11]. Формирование центров окраски SiV происходило в процессе роста алмазных частиц за счет их легирования атомами Si, источником ко-

торых служил силан. Параметры процесса MWCVD: микроволновая мощность 600 W (2.45 GHz), температура подложки — 700 °C, расход водорода — 500 sccm, концентрация метана в газовой смеси — 4%, рабочее давление в реакторе — 15 Torr, время роста алмазных частиц — 1 h. В процессах MWCVD силан добавлялся в реактор из силан-argonовой смеси ($\text{SiH}_4/(\text{Ar}+\text{SiH}_4) = 1\%$), относительная концентрация силана составляла $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{CH}_4) = 0.1\%$ [12]. В качестве центров зародышебразования алмаза методом аэрозольного распыления наносились наноалмазы детонационного синтеза с характерным размером $\sim 4\text{ nm}$. Плотность наноалмазов детонационного синтеза, нанесенных на поверхности подложек, составляла $\sim 10^7\text{ cm}^{-2}$. Размер алмазных микрочастиц составлял $2\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ (вставка на рис. 1).

Схема эксперимента измерения ФЛ центров окраски SiV в алмазных микроскопических полусферах приведена на вставке к рис. 2. Возбуждение ФЛ центров SiV через микрообъектив и микросферу осуществлялось с помощью полупроводникового лазерного диода с длиной волны излучения 660 nm и мощностью 8 mW. В качестве фотоприемника излучения использовался фотоумножитель ФЭУ-79. Вначале регистрировался спектр ФЛ только через микрообъектив, предварительно настроенный по максимуму сигнала ФЛ. Затем между поверхностью образца и микрообъективом в оптимальное для усиления сигнала ФЛ положение вносились стеклянная микросфера диаметром 200 μm , приобретенная в компании ИНОТЭК (Россия). Эти микросфера используются в основном для дорожной разметки из-за своих световозвращающих свойств. Микросфера не содержит воздушных включений, их показатель преломления ≥ 1.50 и сферичность не менее 80%. Микросфера была приклеена силиконовым герметиком к торцу кварцевого волокна тол-

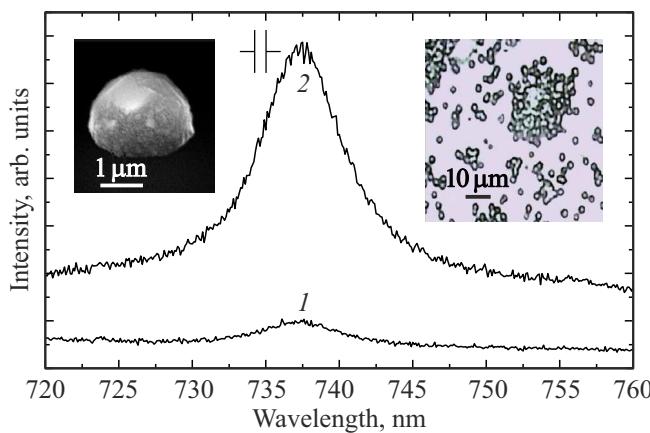


Рис. 1. Спектры ФЛ центра окраски SiV в алмазных микросферах, зарегистрированные: без стеклянной микросферы перед микрообъективом (1), с микросферой (2). На вставках — изображение отдельной полусферической алмазной частицы, полученное с помощью растрового электронного микроскопа; изображение поверхности подложки с алмазными частицами, полученное с помощью оптического микроскопа.

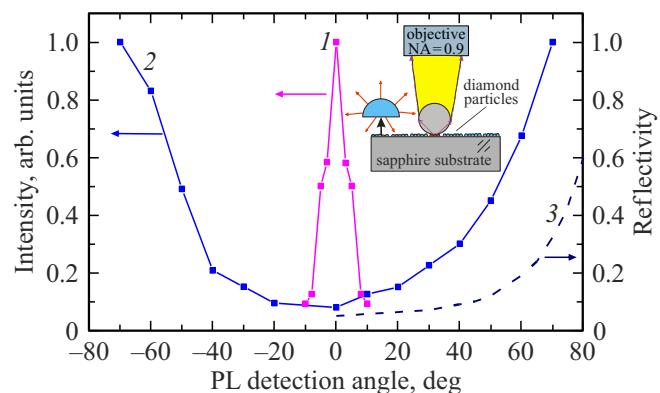


Рис. 2. Угловая зависимость интенсивности ФЛ БФЛ центра окраски SiV, полученная: с применением стеклянной микросферы в схеме измерения ФЛ (1), без микросферы (2). Угловая зависимость коэффициента отражения от подложки сапфира (3). На вставке — схема эксперимента с микросферой. Алмазная частица на вставке выделена отдельно стрелкой в увеличенном масштабе.

щиной 125 μm . Выбор высокотемпературного герметика на основе силикона и уксусной кислоты фирмы ABRO позволил предотвратить повреждение контакта между световодом и микросферой из-за нагрева сфокусированным излучением лазера. Выбор световода диаметром 125 μm обусловлен геометрией эксперимента. Диаметр микросферы должен превышать диаметр световода, чтобы предотвратить неконтролируемое растекание герметика по ее поверхности при приклейвании. Слишком большой диаметр стеклянной сферы и соответственно световода не позволит их разместить в узком промежутке ($< 0.5\text{ mm}$) между образцом и используемым в эксперименте микрообъективом. Настройка ее положения в двух плоскостях между образцом и микрообъективом с увеличением 30 \times и апертурой NA = 0.9 достигалась с помощью прецизионной микрометрической механической подвижки. При этом обеспечивался плотный контакт между микросферой и образцом. Отметим, что размер микросферы практически не влияет на эффективность коллимации ФЛ [13].

3. Обсуждение результатов

На рис. 2 показаны угловые зависимости интенсивности ФЛ БФЛ центра окраски SiV с микросферой и без нее. Из полученных зависимостей видно, что интенсивность ФЛ без микросферы резко возрастает с увеличением угла регистрации до 80°. Возможная причина такой зависимости, по-видимому, увеличение отражения излучения ФЛ от подложки при скользящем угле регистрации как это происходит при падении света на подложку сапфира (рис. 2, кривая 3). Применение микросферы позволило сузить угловую зависимость ФЛ примерно на порядок величины. Из рис. 1 видно, что

интенсивность ФЛ БФЛ центра SiV при использовании стеклянной микросферы выросла также примерно на порядок величины. Наблюдаемое возрастание сигнала ФЛ возникает, поскольку микросфера позволяет перенаправить волновые векторы излучения в виде узкого коллимированного пучка в сторону входного зрачка микрообъектива вследствие того, что близко расположенная к образцу микросфера действует в качестве толстой фокусирующей линзы с широким углом сбора излучения (вставка на рис. 2) [14,15]. Без микросферы волновые векторы излучения направлены радиально во все стороны от образца. Дополнительный вклад в колимацию излучения могут вносить эффекты, обусловленные резонансным рассеянием света сферической частицей диаметром порядка нескольких длин волн (фотонные наноструи и субволновая фокусировка света) [16].

4. Выводы

Использование в схеме регистрации ФЛ стеклянной микросферы в качестве линзы, находящейся в непосредственном контакте с алмазными микросферами, позволило сузить угловую зависимость интенсивности ФЛ БФЛ центра окраски SiV и достичь почти десятикратного увеличения интенсивности ФЛ БФЛ. Таким образом, благодаря эффективной колимации ФЛ диэлектрической микросферой можно достичь увеличения сбора излучения с помощью микрообъективов, имеющих малую апертуру и стоимость. Предложенный способ не только прост в реализации, но и существенно снижает общую стоимость экспериментальной установки, потенциально позволяя более широкое применение квантовых точек и центров окраски в алмазе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания № FFUG-2024-0017.

Список литературы

- [1] А.И. Зеленеев, С.В. Большеворский, В.В. Сошенко, О.Р. Рубинас, А.С. Гаранина, С.Г. Ляпин, В.Н. Агафонов, Р.Е. Узбеков, О.С. Кудрявцев, В.Н. Сорокин, А.Н. Смолянинов, В.А. Давыдов, А.В. Акимов. Квант. электрон., **50** (3), 299 (2020).
- [2] A. Krueger. Chem. Eur. J., **14**, 1382 (2008). DOI: 10.1002/chem.200700987
- [3] K.D. Jahnke, A. Sipahigil, J.M. Binder, M.W. Doherty, M. Metsch, L.J. Rogers, N.B. Manson, M.D. Lukin, F. Jelezko. New J. Phys., **17**, 043011 (2015). DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/043011
- [4] C. Bradac, W. Gao, J. Forneris, M.E. Trusheim, I. Aharonovich. Nat. Commun., **10**, 5625 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-13332-w
- [5] D. Le Sage, L.M. Pham, N. Bar-Gill, C. Belthangady, M.D. Lukin, A. Yacoby, R.L. Walsworth. Phys. Rev. B, **85**, 121202(R) (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.85.121202
- [6] P. Siyushev, F. Kaiser, V. Jacques, I. Gerhardt, S. Bischof, H. Fedder, J. Dodson, M. Markham, D. Twitchen, F. Jelezko, J. Wrachtrup. Appl. Phys. Lett., **97**, 241902 (2010). DOI: 10.1063/1.3519849
- [7] B.A. Кукушкин, Ю.В. Кукушкин. Опт. и спектр., **132** (6), 637 (2024). DOI: 10.61011/OS.2024.06.58640.6136-24
- [8] X. Cheng, N.K. Wessling, S. Ghosh, A.R. Kirkpatrick, M.J. Kappers, N.D. Lekhai, G.W. Morley, R.A. Oliver, J.M. Smith, M.D. Dawson, P.S. Salter, M.J. Strain. ACS Photonics, **10**, 3374 (2023). DOI: 10.1021/acsphotonics.3c00854
- [9] J. Christinck, F. Hirt, H. Hofer, Z. Liu, M. Etzkorn, T. Dunatov, M. Jakšić, J. Forneris, S. Kück. J. Appl. Phys., **133**, 193102 (2023). DOI: 10.1063/5.0150208
- [10] Y. Ebenstein, L.A. Bentolila. Nature Nanotechnol., **5**, 100 (2010).
- [11] S.A. Grudinkin, N.A. Feoktistov, A.V. Medvedev, K.V. Bogdanov, A.V. Baranov, A.Ya. Vul, V.G. Golubev. J. Phys. D, **45**, 062001 (2012). DOI: 10.1088/0022-3727/45/6/062001
- [12] С.А. Грудинкин, Н.А. Феоктистов, К.В. Богданов, М.А. Баранов, А.В. Баранов, А.В. Федоров, В.Г. Голубев. ФТП, **48** (2), 283 (2014).
- [13] L. Yang, L.Q. Wang, Ch. Xing, L. Ma, Y. Zeng, Y. Zhao, Y. Yan. Adv. Opt. Mater., **7** (24), 1901228 (2019). DOI: 10.1002/adom.201901228
- [14] Ф. Крауфорд. *Берклевский курс физики* (Наука, М., 1984). Т. 3. С. 458–459.
- [15] B.S. Luk'yanchuk, A.R. Bekirov, Z.B. Wangb, I.V. Mininc, O.V. Mininc, A.A. Fedyanin. Phys. Wave Phenom., **30** (4), 217 (2022). DOI: 10.3103/S1541308X22040045
- [16] A. Darafsheh. J. Physics: Photonics, **3** (2), 022001 (2021). DOI: 10.1088/2515-7647/abdb05