

Планарный микрорезонатор с содержащими центры окраски кремний—вакансия люминесцентными алмазными частицами в активном слое

© С.А. Грудинкин^{†*}, Н.А. Феоктистов^{†*}, А.В. Медведев[†], А.А. Дукин[†], В.Г. Голубев^{†*}

[†] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 8 апреля 2014 г. Принята к печати 28 апреля 2014 г.)

Планарный гибридный микрорезонатор с содержащими центры окраски кремний—вакансия (Si—V) изолированными алмазными частицами в активном слое изготовлен методами плазмохимического газофазного осаждения. Распределенные брэгговские отражатели получены на основе чередующихся четвертьволновых слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$. Центры окраски контролируемо вводились из газовой фазы в процессе роста алмазных частиц. В микрорезонаторе достигнуто сужение до 5 нм бесфонной линии на длине волны 738 нм и подавление фонного крыла в спектре фотолюминесценции центров окраски Si—V.

1. Введение

Благодаря уникальным оптическим свойствам алмаза — широкой запрещенной зоне, большому показателю преломления и его дисперсии, сочетающимся с большой теплопроводностью, высокой химической и механической стойкостью [1,2], — данный материал давно применяется для создания различных оптических элементов. В последние годы всплеск внимания к алмазу и его оптическим свойствам обусловлен в значительной степени наличием в нем оптически активных центров — центров окраски (ЦО) [3–5]. К семейству ЦО относятся, например, точечные дефекты азот—вакансия [6] и кремний—вакансия [7,8]. Данные центры обладают яркой и стабильной фотолюминесценцией (ФЛ) с малым временем жизни и узкой бесфонной линией [5,6,9]. ЦО сохраняют люминесцентные свойства при уменьшении алмазных частиц до нанометровых размеров [10]. Уникальность люминесцентных свойств ЦО в алмазе открывает широкие перспективы применения данного материала в качестве твердотельных эмиттеров (в том числе однофотонных) в квантовой информатике, фотонике и биомедицине [4–6,11]. Создание эффективных эмиттеров на основе ЦО в алмазе требует решения ряда задач, таких как создание условий для эффективного возбуждения и увеличения интенсивности бесфонной линии ФЛ, обеспечение максимального внешнего квантового выхода излучения, подавление фонного крыла ФЛ, сужение спектральной полосы и диаграммы направленности излучения [4,12,13].

Перечисленные задачи разрешимы путем интегрирования ЦО в алмазе в микрорезонатор (МР), в котором созданы условия для эффективного взаимодействия ЦО с электромагнитным полем собственных мод МР [12,14–16]. Существующие люминесцентные МР на основе ЦО в алмазе можно разделить на два типа. К пер-

вому типу относятся МР, полностью изготовленные из алмаза. Такие МР получают, например, методом фокусированного ионного травления монокристаллического алмаза [12,17]. Второй тип МР представляет собой гибридные структуры, в которых ЦО в алмазе объединены с фотонным устройством, изготовленным из неалмазного материала [14–16,18]. В качестве фотонного устройства применяются, например, микродиски из GaP [14] и микросферы из плавленого кварца [15,16]. При проектировании и разработке способов изготовления МР необходимо учитывать различные факторы, влияющие на его добротность. Часто встречающимися причинами уменьшения добротности МР являются поглощение в алмазе из-за присутствия sp^2 -гибридизованного углерода и различных дефектов структуры, а также рассеяние на шероховатых интерфейсах изготовленного устройства. В некоторых конструкциях гибридных МР уменьшение добротности может быть связано с пространственным рассогласованием между положением эмиттера и максимума распределения электромагнитного поля в МР [12].

В данной работе предлагается подход к созданию планарных гибридных МР для управления ФЛ массива изолированных алмазных частиц с внедренными в них ЦО. Планарный МР представляет собой структуру, состоящую из двух распределенных брэгговских отражателей (РБО/DBR) и активного слоя между ними [19–21]. Для достижения высокой добротности МР при небольшом количестве слоев в РБО использованы чередующиеся пары четвертьволновых слоев аморфного гидрогенизированного карбида кремния ($a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$) и аморфного диоксида кремния ($a\text{-SiO}_2$) с большими значениями отношения показателей преломления. Активный слой, состоящий из отдельных люминесцентных алмазных частиц, внедренных в слой $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ с показателем преломления, равным показателю преломления алмаза, представляет собой оптически однородную среду. Излучателем является точечный дефект Si—V, состоящий из атома замещения Si и двух близлежащих

* E-mail: grudink@gvg.ioffe.ru

вакансий решетки в алмазе. Этот ЦО характеризуется малой шириной бесфононной линии ФЛ на длине волны 738 нм (ширина линии 4–10 нм при комнатной температуре) [7,8,22,23], слабой интенсивностью линий фононных повторений и малым временем жизни, ~ 1 нс [9]. Контролируемое легирование кремнием проводилось из газовой фазы в процессе роста алмазных частиц [23]. Оптическая толщина активного слоя МР выбрана равной длине волны бесфононной линии излучения центра окраски Si–V.

2. Методика эксперимента

Процесс изготовления планарного МР состоял из следующих основных этапов: осаждение нижнего РБО, синтез на нижнем РБО изолированных алмазных частиц с одновременным легированием их кремнием, осаждение слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и прецизионная механическая полировка его поверхности, осаждение верхнего РБО (рис. 1).

В качестве подложки использовались пластинки плавленого кварца. Слои $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$ были получены методом плазмохимического газофазного осаждения (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) в едином технологическом цикле. Параметры технологического процесса PECVD были следующие: рабочее давление 0.1–0.2 Торр, частота высокочастотного излуче-

ния 17 МГц, высокочастотная мощность 0.03–0.1 Вт/см², температура подложки 200–250 °С, суммарный поток газовой смеси 5–10 ст.см³/мин (scsm). Чередование слоев и их химический состав при росте МР методом PECVD обеспечивались вариацией соотношения газовых потоков метана и силана $K = Q(\text{CH}_4)/[Q(\text{CH}_4) + Q(\text{SiH}_4)]$ (Q — поток газа). Для осаждения нижнего РБО, активного слоя и верхнего РБО соотношения газовых потоков (K) при росте слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ составляли 0.75, 0.7, 0.5 соответственно. Толщина слоев контролировалась в процессе PECVD методом интерферометрии *in situ*.

Для роста алмазных частиц применялся метод микроволнового плазмохимического газофазного осаждения (MWPECVD). В качестве центров зародышеобразования алмаза использовались наноалмазы детонационного синтеза [24,25]. Частицы детонационных наноалмазов наносились на нижний РБО методом аэрозольного распыления [25]. Поверхностная плотность алмазных частиц в активном слое МР определялась плотностью центров зародышеобразования алмаза и составляла $N_s \sim 10^8$ см⁻². Размер алмазных частиц составлял (300 ± 20) нм. Параметры процесса MWPECVD были следующие: микроволновая мощность 600 Вт, частота микроволнового излучения 2.45 ГГц, температура подложки 700 °С, расход водорода 500 ст.см³/мин (scsm), концентрация метана 2.8%, рабочее давление в реакторе 15 Торр, время роста алмазных частиц ~ 30 мин. Контролируемое введение центров окраски Si–V в процессе роста алмазных частиц методом MWPECVD достигалось путем добавления силана в рабочую газовую смесь как источника примесных атомов Si. Силан добавлялся в реактор из аргон-силановой смеси (SiH₄/Ar). Варьированием концентрации силана в смеси контролируемо изменялась концентрация центров Si–V в алмазных частицах [23]. Устанавливались следующие параметры легирования: SiH₄/Ar = 0.1–1% и SiH₄/CH₄ = 0.08%. Прецизионная механическая полировка слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, осажденного на алмазные частицы, проводилась наноалмазным порошком детонационного синтеза [26] со средним размером зерна ~ 4 нм. Скорость полировки составляла ~ 1 нм/мин. Толщина активного слоя в процессе полировки контролировалась по изменению спектра пропускания структуры, состоящей из нижнего РБО и активного слоя. Регистрация спектра пропускания осуществлялась с помощью малогабаритного спектрометра USB4000 фирмы Ocean Optics. Излучение фокусировалось в пятно ~ 100 мкм и собиралось с помощью волоконно-оптического кабеля.

Для определения оптических свойств слоев МР были изготовлены реперные пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$ при тех же параметрах технологического процесса, что устанавливались при росте слоев в МР. Оптические параметры и толщина реперных пленок на кварцевой подложке определялись методом эллипсометрии с помощью прибора J.A. Woollam Co., Inc M-2000. Исследование морфологии активного слоя проводилось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) SMENA фирмы NT-MDT

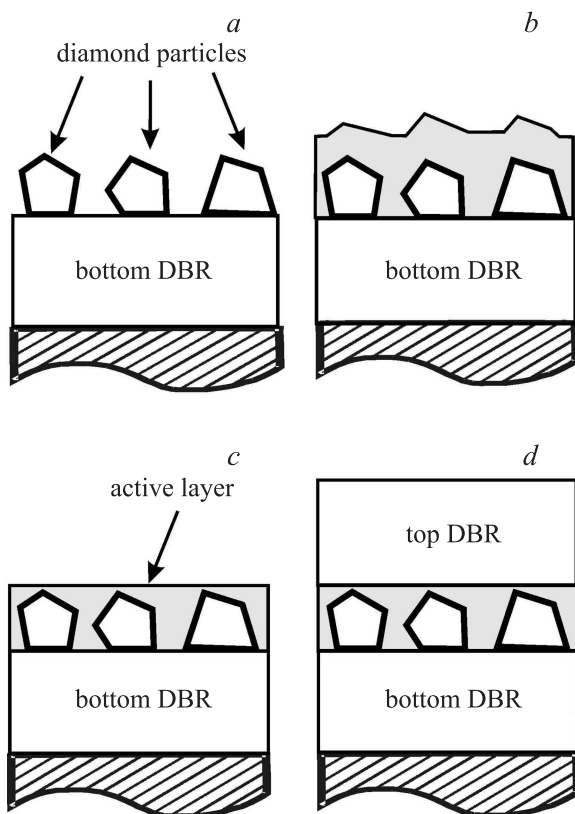


Рис. 1. Схематические изображения, поясняющие этапы (a, b, c, d) изготовления гибридного МР.

с использованием активного антивибрационного стола. Измерения спектров пропускания МР и ФЛ алмазных частиц проводились при комнатной температуре с использованием управляемого компьютером дифракционного решеточного монохроматора. Возбуждение ФЛ осуществлялось полупроводниковым лазером с длиной волны 660 нм, мощность которого не превышала 40 мВт. Диаметр пятна сфокусированного на образец лазерного излучения равнялся примерно 100 мкм, а угол сбора излучения составлял 10° .

3. Результаты и их обсуждение

Изготовленный гибридный МР состоит из двух РБО (нижнего и верхнего) и активного слоя между ними, содержащего люминесцентные алмазные частицы с центрами окраски Si–V (рис. 1). Спектральное положение резонансной моды МР настроено на длину волны $\lambda_e = 738$ нм, соответствующую положению максимума бесфоновой линии ФЛ центра Si–V. Высококонтрастные РБО состоят из трех пар четвертьволновых слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$ (толщина $\lambda_e/4n_l$, где n_l — показатель преломления материала соответствующего слоя РБО). Оптические параметры $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ определяются составом материала, который задается соотношением газовых потоков (K) в процессе PECVD. Состав слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ для РБО выбирается таким, чтобы на длине волны $\lambda_e = 738$ нм достигнуть максимального значения показателя преломления (~ 2.9) при величине коэффициента поглощения не более 0.01.

Процесс изготовления планарного гибридного МР включает рост алмазных частиц методом MWPECVD на нижнем РБО при температуре подложки 700°C (рис. 1, а). Это приводит к изменению оптических параметров слоев нижнего РБО за счет термического отжига в процессе роста алмазных частиц. Поэтому было исследовано влияние отжига при температурах $600\text{--}700^\circ\text{C}$ на оптические характеристики реперных пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$. Время отжига составляло 30 мин и примерно соответствовало времени роста алмазных частиц, а толщина пленок составляла ~ 100 нм, что примерно соответствовало толщинам слоев $\lambda_e/4n_l$ в РБО. Толщины слоев, показатели преломления и коэффициенты поглощения определялись методом спектральной эллипсометрии до и после отжига. Коэффициент преломления пленок $a\text{-SiO}_2$ практически не менялся после отжига и составлял 1.45–1.46, а толщина пленки уменьшалась примерно на 5%. Изменения коэффициента поглощения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра оценить не удалось в связи с его малым значением (< 0.01). Параметры пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ сильно изменялись после отжига, а именно наблюдалось увеличение показателя преломления и коэффициента поглощения. Исходя из этого для изготовления нижнего РБО были найдены такие соотношения потоков силана и метана, при которых осаждались слои, обладающие после отжига максимальным показателем

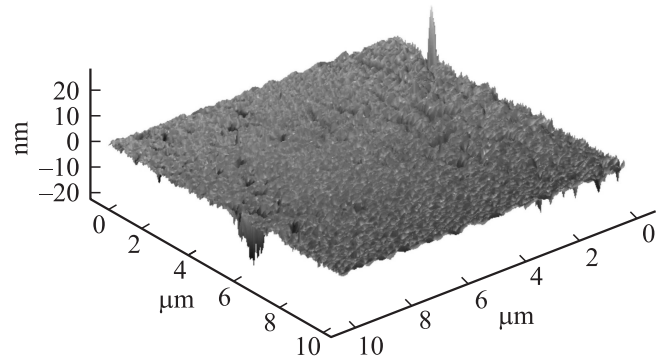


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности активного слоя после прецизионной механической полировки.

преломления и величиной коэффициента поглощения не более 0.01 на длине волны $\lambda_e = 738$ нм. Для данных слоев величина показателя преломления увеличивалась после отжига примерно на 20% (от 2.3 до 2.8), а толщина слоя уменьшалась примерно на 35%. Таким образом, для оптического согласования всех слоев в РБО было необходимо в процессе осаждения наносить более толстые по сравнению с величиной $\lambda_e/4n_l$ слои для нижнего РБО, а также изменить соотношение газовых потоков метана и силана. При этом длина волны, на которой *in situ* контролировалась интерференция, при нанесении нижнего РБО увеличивалась на $\sim 10\%$ (как среднее значение между 5% для слоя $a\text{-SiO}_2$ и 15% для слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$). В результате верхний РБО наносился при контроле на длине волны 738 нм, а нижний — на 810 нм.

Оптическая толщина одноволнового активного слоя в гибридном МР равнялась длине волны $\lambda_e = 738$ нм, соответствующей спектральному положению максимума бесфоновой линии ФЛ центра Si–V. Параметры процесса MWPECVD алмазных частиц оптимизировались таким образом, чтобы получить высокое содержание алмазной фазы (sp^3 -гибридизованного углерода) [27].

Перед нанесением верхнего РБО была реализована процедура создания плоскопараллельного, оптически однородного и гладкого активного слоя. С этой целью нижний РБО с синтезированными на нем алмазными частицами покрывался слоем $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ с показателем преломления, близким к алмазному (~ 2.3). Слой повторял рельеф поверхности, задаваемый алмазными частицами (рис. 1, б). Оптическая толщина осажденного слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ изначально выбиралась на $\sim 20\%$ больше толщины, необходимой для получения плоскопараллельного одноволнового (738 нм) активного слоя путем прецизионной механической полировки его поверхности наноалмазным порошком. Благодаря применению для полировки наноалмазного порошка среднее квадратичное отклонение шероховатости поверхности активного слоя составило ~ 2 нм (рис. 2).

В процессе полировки толщина активного слоя контролировалась по изменению спектра пропускания структуры, состоящей из нижнего РБО и активного слоя. На рис. 3 (кривые 2–4) представлены рассчитанные

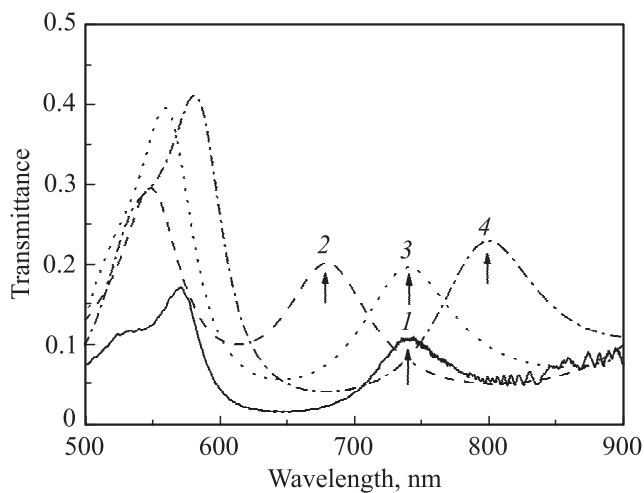


Рис. 3. Спектры пропускания структуры, состоящей из РБО и активного слоя: 1 — экспериментальный спектр, 2, 3, 4 — рассчитанные спектры с толщинами активного слоя $0.9\lambda_e/n_{ac}$, λ_e/n_{ac} , $1.1\lambda_e/n_{ac}$ соответственно. Стрелками отмечены положения максимумов резонансной моды.

спектры пропускания от такой структуры для трех значений оптической толщины активного слоя ($0.9\lambda_e/n_{ac}$, λ_e/n_{ac} и $1.1\lambda_e/n_{ac}$, где n_{ac} — эффективный показатель преломления активного слоя, состоящего из алмазных частиц и $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$). Спектры пропускания МР были рассчитаны методом матриц переноса [28]. В расчете параметры материалов слоев РБО были взяты из данных, полученных методом спектральной эллипсометрии для реперных пленок. Из расчета следует, что положение спектрального максимума резонансной моды (отмечены стрелками на кривых рис. 3) определяется оптической толщиной активного слоя. Этот факт обеспечивает возможность прецизионного контроля оптической толщины активного слоя и момента достижения совпадения спектрального положения резонансной моды МР с заданной длиной волны бесфононной линии ФЛ центров Si–V. На рис. 3 (кривая 1) показан экспериментальный спектр пропускания, зарегистрированный в момент, когда положение резонансной моды совпало с длиной волны 738 нм и шлифование было прекращено. Далее на активный слой наносился верхний РБО (рис. 1, *a*).

На рис. 4, *a* представлен спектр пропускания гибридного МР. Острый пик пропускания на длине волны 738 нм соответствует резонансной моде МР. Его ширина на уровне половины максимума интенсивности составляет $\Delta\lambda = 4.5$ нм. На вставке к рис. 4, *a* приведен спектр пропускания МР в широком спектральном диапазоне. В этом спектре полоса очень малого пропускания в диапазоне 630–900 нм соответствует стоп-зоне [19,20]. Резкое падение коэффициента пропускания МР с уменьшением длины волны в коротковолновой области спектра вне пределов стоп-зоны связано с поглощением в слоях $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$.

На рис. 4, *b* показаны спектры фотолюминесценции МР и выращенных на нижнем РБО алмазных частиц до

нанесения слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$. Все спектры записаны при комнатной температуре в геометрии, когда излучение распространяется вдоль нормали к поверхности образца. Для того чтобы избежать потерь на поглощение и создать более эффективные условия возбуждения ФЛ в активном слое МР, был применен способ ввода возбуждающего излучения через собственную моду МР [29,30]. Возбуждение осуществлялось излучением полупроводникового лазера с длиной волны 660 нм. Поскольку длина волны возбуждения 660 нм лежит в области стоп-зоны, то возбуждение ФЛ через собственную моду МР проводилось при наклонном падении света, что обеспечивало совпадение длины волны резонансной моды МР с длиной волны возбуждающего излучения [29,30].

Спектр ФЛ центров окраски Si–V в алмазных частицах представляет собой несимметричный контур, состоящий из бесфононной линии на длине волны 738 нм шириной $\Delta\lambda = 8$ нм и менее интенсивной широкой линии фононных повторений с максимумом в районе 760 нм (кривая 1 на рис. 4, *b*). В спектре фотолюминесценции из МР в спектральной области стоп-зоны присутствует только центрированная на длине волны 738 нм узкая симметричная линия шириной $\Delta\lambda = 5$ нм (кривая 2 на рис. 4, *b*), положение которой совпадает с резонансной

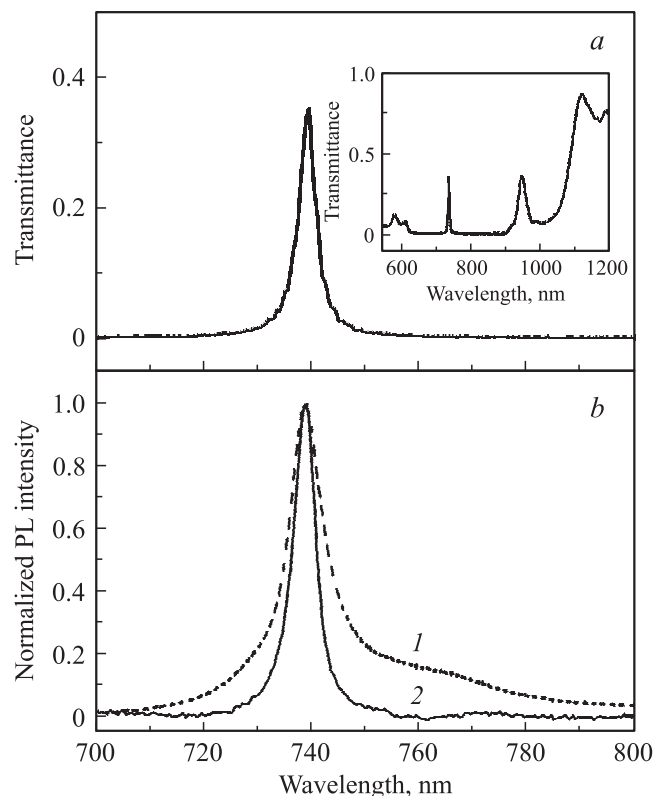


Рис. 4. Спектры пропускания МР (*a*) и спектры фотолюминесценции (PL) при комнатной температуре (*b*). *a*: на вставке — спектр пропускания МР в широком диапазоне длин волн. *b*: 1 — алмазные частицы, выращенные на нижнем РБО до нанесения слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$; 2 — МР при возбуждении через собственную моду.

модой МР. Таким образом, влияние МР на спектр спонтанной эмиссии из активного слоя привело к сужению бесфононной линии и подавлению фононного крыла ФЛ центров окраски Si–V. Отметим также практически полное отсутствие фонового сигнала ФЛ в спектральной области от 600 до 800 нм.

4. Заключение

В работе методами плазмохимического газофазного осаждения (PECVD и MWPECVD) изготовлен планарный гибридный МР, состоящий из РБО на основе чередующихся четвертьволновых слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}/a\text{-SiO}_2$ и оптически однородного одноволнового активного слоя, состоящего из массива отдельных люминесцентных алмазных частиц, внедренных в слой $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$. Контролируемое введение кремния в процессе роста алмазных частиц методом MWPECVD позволило создать в них оптически активные центры окраски Si–V. В МР достигнуто сужение до 5 нм бесфононной линии на длине волны 738 нм и подавление фононного крыла в спектре фотолюминесценции центров окраски Si–V. Предложенный в работе подход к созданию планарного гибридного МР может быть использован в системах квантовой информатики для эффективного управления спонтанной эмиссией оптически активных центров (в том числе однофотонных) в алмазе.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 24.

Авторы благодарны А.Е. Алексенскому и А.Я. Вулю за предоставление наноалмазных порошков детонационного синтеза.

Список литературы

- [1] A.M. Zaitsev. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook* (Springer, 2001).
- [2] J.E. Field. *The properties of natural and synthetic diamond* (Academic Press, 1992).
- [3] I. Aharonovich, S. Castelletto, D.A. Simpson, C.-H. Su, A.D. Greentree, S. Praver. *Rep. Progr. Phys.*, **74** (7), 076 501 (2011).
- [4] I. Aharonovich, A.D. Greentree, S. Praver. *Nature Photon.*, **5** (7), 397 (2011).
- [5] J.O. Orwa, A.D. Greentree, I. Aharonovich, A.D.C. Alver, J. van Donkelaar, A. Stacey, S. Praver. *J. Lumin.*, **130** (9), 1646 (2010).
- [6] M.W. Doherty, N.B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, L.C.L. Hollenberg. *Phys. Rep.*, **528** (1), 1 (2013).
- [7] T. Feng, B.D. Schwartz. *J. Appl. Phys.*, **73** (3), 1415 (1993).
- [8] E. Neu, C. Hepp, M. Hauschild, S. Gsell, M. Fischer, H. Sternschulte, D. Steinmuller-Nethl, M. Schreck, C. Becher. *New J. Phys.*, **15** (4), 043005 (2013).
- [9] A.V. Turukhin, C.H. Liu, A.A. Gorokhovskiy, R.R. Alfano, W. Phillips. *Phys. Rev. B*, **54** (23), 16 488 (1996).
- [10] I.I. Vlasov, A.A. Shiryaev, T. Rendler, S. Steinert, S.-Y. Lee, D. Antonov, M. Voros, F. Jelezko, A.V. Fisenko, L.F. Semjonova, J. Biskupek, U. Kaiser, O.I. Lebedev, I. Sildos, P.R. Hemmer, V.I. Konov, A. Gali, J. Wrachtrup. *Nature Nanotech.*, **9** (1), 54 (2014).
- [11] T.D. Merson, S. Castelletto, I. Aharonovich, A. Turbic, T.J. Kilpatrick, A.M. Turnley. *Optics Lett.*, **38** (20), 4170 (2013).
- [12] J. Riedrich-Moller, L. Kipfstuhl, C. Hepp, E. Neu, C. Pauly, F. Mucklich, A. Baur, M. Wandt, S. Wolff, M. Fischer, S. Gsell, M. Schreck, C. Becher. *Nature Nanotech.*, **7** (1), 69 (2012).
- [13] M. Loncar, A. Faraon. *MRS Bulletin*, **38** (2), 144 (2013).
- [14] P.E. Barclay, K.-M.C. Fu, C. Santori, R.G. Beausoleil. *Appl. Phys. Lett.*, **95** (19), 191 115 (2009).
- [15] M. Larsson, K.N. Dinyari, H. Wang. *Nano Lett.*, **9** (4), 1447 (2009).
- [16] S. Schietinger, T. Schroder, O. Benson. *Nano Lett.*, **8** (11), 3911 (2008).
- [17] I. Bayn, B. Meyler, J. Salzman, R. Kalish. *New J. Phys.*, **13** (2), 025 018 (2011).
- [18] Y. Dumeige1, R. Alléaume, P. Grangier, F. Treussart, J.-F. Roch. *New J. Phys.*, **13** (2), 025 015 (2011).
- [19] A.A. Dukin, N.A. Feoktistov, V.G. Golubev, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, A.V. Sel'kin. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (19), 3009 (2000).
- [20] В.Г. Голубев, А.А. Дукин, А.В. Медведев, А.Б. Певцов, А.В. Селькин, Н.А. Феокистов. *ФТП*, **35** (10), 1266 (2001).
- [21] A.A. Dukin, N.A. Feoktistov, V.G. Golubev, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, A.V. Sel'kin. *Phys. Rev. E*, **67** (4), 046 602 (2003).
- [22] A.A. Basov, M. Rahn, M. Pars, I.I. Vlasov, I. Sildos, A.P. Bolshakov, V.G. Golubev, V.G. Ralchenko. *Phys. Status Solidi A*, **206** (9), 2009 (2009).
- [23] S.A. Grudinkin, N.A. Feoktistov, A.V. Medvedev, K.V. Bogdanov, A.V. Baranov, A.Ya. Vul', V.G. Golubev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **45** (6), 062 001 (2012).
- [24] I.B. Yanchuk, M.Y. Valakh, A.Y. Vul', V.G. Golubev, S.A. Grudinkin, N.A. Feoktistov, A. Richter, B. Wolf. *Diamond Relat. Mater.*, **13** (2), 266 (2004).
- [25] Н.А. Феокистов, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, В.А. Толмачев, И.В. Коркин, А.Е. Алексенский, А.Я. Вуль, В.Г. Голубев. *ЖТФ*, **81** (5), 132 (2011).
- [26] А.Е. Алексенский, Е.Д. Ейдельман, А.Я. Вуль. *Nanosci. Nanotechnol. Lett.*, **3** (1), 68 (2011).
- [27] N.A. Feoktistov, V.G. Golubev, S.A. Grudinkin, T.S. Perova, R.A. Moore, A.Ya. Vul'. *Proc. SPIE Opto-Ireland 2005: Nanotechnol. and Nanophoton.* (Dublin, Ireland, 2005) v. 5824, p. 157.
- [28] M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* (Oxford, Pergamon, 1975).
- [29] А.В. Медведев, А.А. Дукин, А.Б. Певцов, С. Сибилia, Н.А. Феокистов, В.Г. Голубев. *Письма ЖТФ*, **33** (22), 73 (2007).
- [30] A.A. Dukin, N.A. Feoktistov, S.A. Grudinkin, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, V.G. Golubev, M. Centini, C. Sibilìa. *J. Appl. Phys.*, **103** (6), 063 101 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

Planar microcavity containing luminescent diamond particles with embedded silicon-vacancy color centers in active layer

S.A. Grudinkin^{+,*}, N.A. Feoktistov^{+,*}, A.V. Medvedev⁺,
A.A. Dukin⁺, V.G. Golubev^{+,*}

⁺ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

^{*} St. Petersburg National Research University
of Information Technologies, Mechanics, and Optics,
197101 St. Petersburg, Russia

Abstract Planar hybrid microcavity containing isolated diamond particles with embedded silicon–vacancy (Si–V) color centers in active layer is fabricated by chemical vapor deposition techniques. Distributed Bragg reflectors are based on alternating quarter-wave a -Si_{1-x}C_x:H and a -SiO₂ layers. Color centers are controllably embedded from gas phase during the growth process of diamond particles. In microcavity the narrowing of zero-phonon line at wavelength 738 nm down to 5 nm and the suppression of phonon sideband in the photoluminescence spectrum of Si–V color centers are achieved.