

Планарные светоизлучающие микрорезонаторы на основе гидрогенизированного аморфного карбида кремния

© А.В. Медведев*[¶], Н.А. Феоктистов*⁺, С.А. Грудинкин*⁺, А.А. Дукин*, В.Г. Голубев*⁺

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

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

(Получена 27 февраля 2014 г. Принята к печати 11 марта 2014 г.)

Методом плазмохимического газофазного осаждения изготовлены планарные микрорезонаторы Фабри-Перо с излучающим на границе видимого и инфракрасного диапазонов спектра активным слоем. Микрорезонаторы состоят из активного слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ с повышенным содержанием углерода и распределенных брэгговских отражателей из чередующихся неизлучающих слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}/a\text{-SiO}_2$. Активный слой и распределенные брэгговские отражатели выращены в едином технологическом цикле. Благодаря высокому оптическому контрасту и малому поглощению слоев распределенных брэгговских отражателей достигнута большая добротность микрорезонаторов ($Q = 316$) и высокая степень направленности излучения из микрорезонаторов при трех парах слоев в распределенных брэгговских отражателях. Интенсивность фотолюминесценции при комнатной температуре оказывается на 2 порядка выше по сравнению с интенсивностью излучения идентичного слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ без распределенных брэгговских отражателей. Из сопоставления экспериментальных и рассчитанных методом матриц переноса с учетом дисперсии вещественной и мнимой частей показателя преломления $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ спектров пропускания сделана оценка степени систематического отклонения толщин слоев в распределенных брэгговских отражателях и определена верхняя граница коэффициента поглощения в слоях $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$.

1. Введение

Исследование и разработка планарных светоизлучающих устройств на основе кремния, получаемых методом газофазного осаждения, привлекают неослабевающее внимание благодаря их возможной применимости при создании кремниевых оптоэлектронных интегральных схем. Излучательные свойства в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра пленочных материалов на основе кремния, таких как аморфные нитрид кремния [1–3] и карбид кремния [2–10], детально изучены. Однако эти материалы обладают широким спектром фотолюминесценции (ФЛ) до 150 нм и недостаточной для практического применения яркостью излучения.

Планарный микрорезонатор (МР) Фабри-Перо позволяет значительно сузить спектральную полосу и увеличить интенсивность ФЛ. Он представляет собой структуру, состоящую из двух распределенных брэгговских отражателей (РБО) и активного слоя между ними. За счет квантования электромагнитного поля в МР возникает дискретный набор собственных мод, количество которых определяется линейным размером активного слоя. Методом плазмохимического газофазного осаждения (plasma-enhanced chemical vapor deposition — PECVD), совместимым с технологией изготовления кремниевых электронных интегральных схем, синтезированы МР на основе стехиометрических и нестехиометрических слоев аморфного нитрида кремния [11–16] и карбида кремния [17,18]. Легирование в процессе осаждения редкоземельными элементами, например ионами эрбия,

позволило методом PECVD создать МР из высококонтрастных слоев $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x\text{:H}$ с активным слоем $a\text{-SiO}_x\text{:H}$, легированным эрбием [19–22], эффективно излучающие на длине волны внутрицентрового перехода иона Er^{3+} в области 1.53 мкм — максимума пропускания оптических волокон связи стандарта TELECOM. Помимо резонансного увеличения интенсивности излучения, планарные МР интересны также проявлением других оптических эффектов. В частности, наблюдалось увеличение интенсивности излучения на краях стоп-зоны [12,13,17,18,24] и контролируемое поляризационное расщепление собственных мод МР [24,25].

В пленках $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ варьированием содержания углерода можно плавно изменять ширину запрещенной зоны в широком диапазоне от 1.8 до 3.6 эВ и, как следствие, спектральное положение пика ФЛ в интервале от 2 до 3 эВ [8,26], при этом показатель преломления изменяется в диапазоне от 2 до 3 [27]. Кроме того, пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, по сравнению с пленками $a\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$, характеризуются меньшими величинами коэффициента поглощения для составов с показателем преломления более 2.3 вследствие их близости к стехиометрии [28].

Объем исследований возможности применения пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в светоизлучающих устройствах на основе планарных МР Фабри-Перо, позволяющих существенно увеличить интенсивность, а также улучшить спектральную чистоту и направленность выводимого излучения, значительно уступает таковому для пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$.

В настоящей работе методом PECVD изготовлены МР Фабри-Перо с излучающим на границе видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра актив-

[¶] E-mail: Medvedev@gvg.ioffe.ru

ным слоем $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и РБО, состоящих из чередующихся высококонтрастных неизлучающих слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}/a\text{-SiO}_2$. Данный метод позволяет в едином технологическом цикле получать слои с контролируемой толщиной и изменять в широком диапазоне их оптические константы. Проведен анализ влияния поглощения в активном слое и в слоях РБО на добротность и амплитуду резонансного пика пропускания МР. Исследовано влияние дисперсии вещественной и мнимой частей показателя преломления $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ на спектральные характеристики МР.

2. Методика эксперимента

Изготовлены МР с различной толщиной слоев, что обеспечило варьирование спектрального положения резонансной моды излучения в пределах полосы излучения (620–850 нм) активного $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ слоя МР. РБО и активный слой выращены в установке PECVD в едином технологическом цикле без экспозиции на воздухе в промежутках между последовательными стадиями роста отдельных слоев структуры [29,30].

Каждый МР состоял из двух РБО и активного слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ между ними (рис. 1). Для достижения высокой добротности при небольшом количестве пар слоев в РБО использованы чередующиеся слои $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$, обладающие большой разницей в показателях преломления. Высококонтрастные РБО состояли из трех пар четвертьволновых ($\lambda/4n_{\text{SiC}}$ и $\lambda/4n_{\text{SiO}_2}$) слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$ соответственно. Состав материала $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в активном слое и слоях РБО варьировался изменением в процессе осаждения соотношения метана и силана в исходной газовой смеси.

Исходя из поставленной задачи были сформулированы требования к оптическим свойствам $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в активном слое МР и в слоях РБО. Для получения

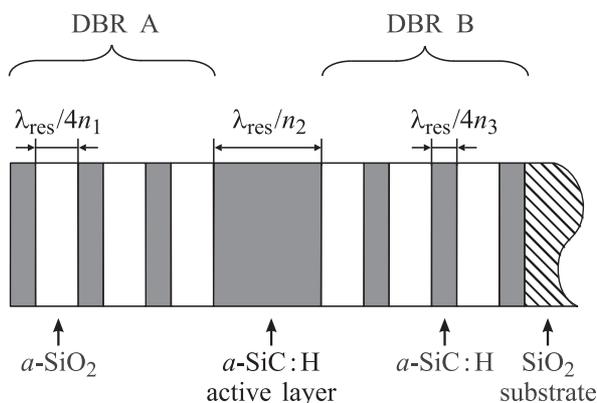


Рис. 1. Схематическое изображение микрорезонатора, состоящего из четвертьволновых РБО (А и В) с 3 парами чередующихся слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}/a\text{-SiO}_2$ в каждом и активного слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ толщиной λ_{res}/n_2 между ними. n_1, n_2, n_3 — показатели преломления $a\text{-SiO}_2$, $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в активном слое и в слоях РБО на длине волны λ_{res} .

высокой спектральной чистоты излучения и добротности МР необходимо достижение высокого диэлектрического контраста слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}/a\text{-SiO}_2$ за счет увеличения показателя преломления в $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ слоях РБО и отсутствие ФЛ данных слоев при комнатной температуре. Пленка $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в активном слое, наоборот, должна обладать ФЛ при комнатной температуре, что может быть достигнуто увеличением содержания углерода, приводящего к увеличению плотности локализованных состояний в запрещенной зоне [4]. Пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ с повышенным содержанием углерода имеют меньшее температурное гашение ФЛ по сравнению с $a\text{-Si:H}$, излучают в видимом и ближнем ИК диапазонах [6] и квантовый выход ФЛ может достигать ~ 0.1 при комнатной температуре.

Параметры технологического процесса были следующие: соотношение газовых потоков $\text{CH}_4/[\text{CH}_4 + \text{SiH}_4]$ при осаждении активного $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ слоя и слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в РБО составило соответственно 0.53 и 0.1, что, по данным работы [31], примерно соответствует составу пленки с $x = 0.35$ в активном слое и $x = 0.1$ в РБО. Рабочее давление составило 0.1–0.2 Торр, частота высокочастотного излучения 17 МГц, высокочастотная мощность 0.03–0.1 Вт/см², температура подложки 200–250 °С, суммарный поток газовой смеси 5–10 норм. см³/мин (sccm). При росте слоев $a\text{-SiO}_2$ соотношение потоков силана и кислорода составляло приблизительно 1 : 1. Толщина пленок контролировалась в процессе роста методом *in situ* интерферометрии. В качестве подложек использовались пластинки плавящего кварца.

Чередование слоев при росте структуры МР обеспечивалось переключением газовых потоков. При этом на границе между активным слоем и РБО возникают тонкие переходные области смешанного химического состава. Оптическая толщина активного слоя примерно равнялась длине волны излучения активного слоя вблизи максимума интенсивности его ФЛ. В этом случае максимум напряженности электрического поля собственной моды МР лежит в середине активного слоя [32], а не на границе между активным слоем и слоями $a\text{-SiO}_2$ в РБО, где имеется переходная область, тем самым исключая возможное дополнительное гашение ФЛ в этих областях.

Для определения оптических свойств слоев МР были изготовлены реперные пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ при тех же параметрах, что устанавливались при росте слоев в МР. Оптические параметры и толщина реперных пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ на кварцевой подложке определялись методом эллипсометрии. Измерения спектров эллипсометрических углов проводились с помощью прибора J.A. Woollam Co., Inc. M-2000 при трех углах падения: $\varphi = 59, 67, 75^\circ$. Для расчетов оптических параметров использовалась следующая модель: внешняя среда — однородная изотропная пленка — полубесконечная кварцевая подложка. Определение дисперсии вещественной (n) и мнимой (k) частей показателя преломления, а также толщины пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ проводилось на основе

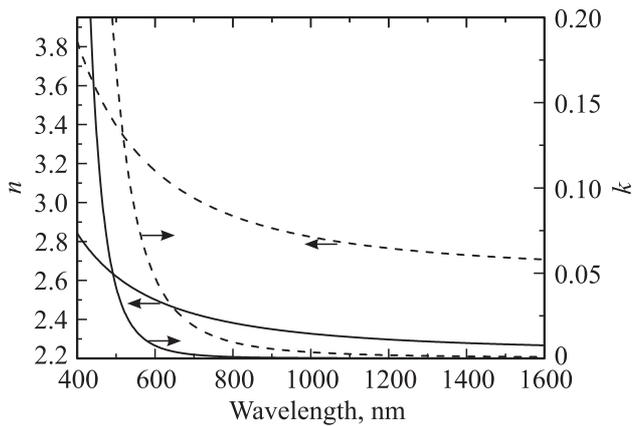


Рис. 2. Дисперсия вещественной (n) и мнимой (k) частей показателя преломления, измеренная эллипсометрическим методом. Сплошные линии — данные для $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в активном слое, штриховые линии — для $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в слоях РБО.

решения обратной задачи эллипсометрии путем подгонки рассчитанных эллипсометрических углов к экспериментальным зависимостям эллипсометрических углов от длины волны. При этом учитывалось, что оптические параметры n и k могут изменяться соответственно в диапазонах 1.5–3.5 и 0–1. Диапазоны изменения n и k соответствуют значениям для пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, синтезированных при различных концентрациях метана в газовой смеси. Исходные значения толщины пленки для расчета параметров, определяемых методом эллипсометрии, выбирались на основании данных, полученных из измерений толщины методом *in situ* интерферометрии в процессе осаждения пленки. Спектральные зависимости вещественной и мнимой частей показателя преломления пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, определенные методом эллипсометрии, представлены на рис. 2.

По данным эллипсометрии показатели преломления $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в РБО и в активном слое на длине волны 740 нм равны 3 и 2.4 соответственно. Величина запрещенной зоны $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, определяемая по величине поглощения на уровне $10\,000\text{ см}^{-1}$ [27], составляет $E_{04} \sim 1.9\text{ эВ}$ в РБО и $E_{04} \sim 2.4\text{ эВ}$ в активном слое. Это соответствовало содержанию углерода 10% в слоях $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ РБО и 35% в активном слое [33], что близко к величине, ранее оцененной из соотношения газовых потоков $\text{CH}_4/[\text{CH}_4 + \text{SiH}_4]$. Из анализа данных, приведенных в работах [5–7], следует, что при таких содержаниях углерода должны существовать интенсивная ФЛ из активного слоя при комнатной температуре и ее полное температурное гашение в слоях карбида кремния в РБО.

Для измерения спектров пропускания и ФЛ использован управляемый компьютером дифракционный решеточный монохроматор МДР-23. В качестве фотоприемников излучения использованы фотоумножитель ФЭУ-79, подключенный к дистанционно управляемому широкополосному предварительному усилителю тока, и

InGaAs-фотодиод. ФЛ возбуждалась Nd:YAG-лазером с длиной волны 532 нм и полупроводниковым лазером с длиной волны 660 нм, мощность которых не превышала 40 мВт. Диаметр пятна сфокусированного на образец лазерного излучения равнялся примерно 100 мкм, а угол сбора излучения составил 10° .

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Приведены результаты исследования для трех МР, настроенных на различные длины волн. МР отличаются толщинами активного слоя и слоев РБО. На рис. 3 показаны спектры пропускания МР при нормальном падении света. Видна широкая область очень малого пропускания в диапазоне длин волн примерно от 600 до 900 нм, которая соответствует фотонной стоп-зоне. В спектрах также присутствуют острые пики пропускания на длинах волн $\lambda_{\text{res}} = 690, 738$ и 758 нм, соответствующие резонансным модам МР. Длины волн этих мод приблизительно равны оптической толщине активного слоя. Все резонансные длины волн лежат в спектральной полосе ФЛ $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$. Величина максимального пропускания в резонансных пиках равна приблизительно 0.6–0.7, а ширина пиков составляет 2.5–2.7 нм, что соответствует добротности резонатора 250–300. Уменьшение пропускания в области коротковолнового края стоп-зоны обусловлено ростом поглощения в слоях $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ по мере уменьшения длины волны света.

На рис. 4 показаны спектр пропускания МР и его подгоночный спектр, рассчитанный методом матриц переноса [34]. Полоса очень малого пропускания 630–930 нм соответствует спектральной области стоп-зоны. Острый пик пропускания при $\lambda_{\text{res}} = 758$ нм в центре стоп-зоны соответствует резонансной моде МР. Два пика, расположенные близко к краям стоп-зоны, $\lambda = 998$ и 610 нм,

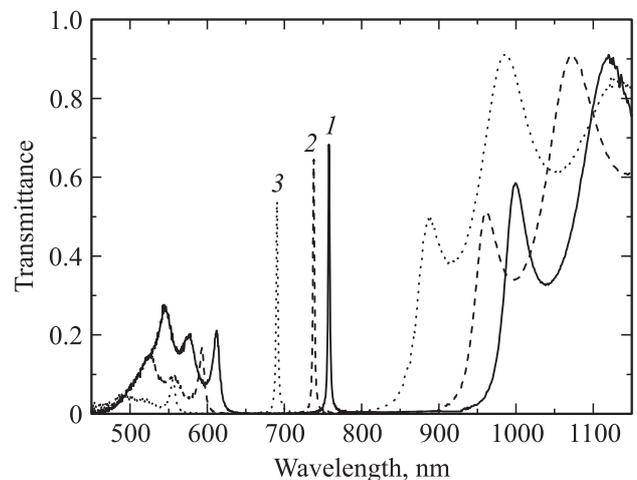


Рис. 3. Спектры пропускания трех микрорезонаторов $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}/a\text{-SiO}_2$, настроенных на разные длины волн: $\lambda = 758$ (1), 738 (2), 690 нм (3).

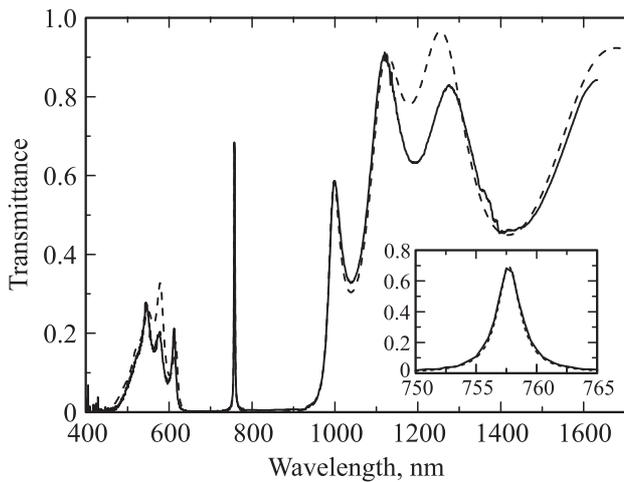


Рис. 4. Экспериментальный (сплошная линия) и расчетный (пунктирная линия) спектры пропускания микрорезонатора, настроенного на длину волны 758 нм. На вставке приведен участок спектра в области резонансной линии.

соответствуют двум другим резонансным модам МР, когда на толщине активного слоя укладывается приблизительно половина и полторы длины волны этих мод. За счет того что моды расположены близко к краям стоп-зоны, где коэффициент отражения РБО меньше, чем в центре стоп-зоны, ширина этих боковых пиков больше, чем ширина пика, находящегося в центре стоп-зоны. За коротковолновым ($\lambda < 595$ нм) и длинноволновым ($\lambda > 1045$ нм) краями стоп-зоны наблюдается сложная интерференционная картина. При расчете учитывалась дисперсия показателей преломления $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в активном слое и в слоях РБО (данные рис. 2).

В процессе выращивания слоев возникают отклонения их толщин от заданной величины. Как показывают расчеты, небольшие систематические отклонения толщин слоев РБО от заданных значений $\lambda_{\text{res}}/4n$ (несколько процентов по масштабу величины) практически не влияют на положение, амплитуду и ширину центрального резонансного пика, на форму и положение интерференционных полос за краями стоп-зоны, но приводят к сильному уменьшению амплитуды двух боковых резонансных пиков. Поскольку на длине волны длинноволнового резонансного пика (998 нм) поглощение в $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ слоях РБО и в активном слое пренебрежимо мало, то амплитуда данного пика определяется рассогласованием между двумя РБО. Подгонка амплитуды данного пика позволила оценить величину систематического отклонения толщин: +4% в верхнем РБО (А) и -4% в нижнем РБО (В) от заданных значений $\lambda_{\text{res}}/4n$. При этом получено удовлетворительное согласие рассчитанных и экспериментальных спектров, включая спектральное положение стоп-зоны и всех трех резонансных пиков, а также общий вид интерференционной картины за краями стоп-зоны.

Поглощение в $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ слоях РБО и в активном слое МР представляет собой серьезную проблему для получения высокодобротного МР. Поглощение приводит к тому, что амплитуда центрального резонансного пика в спектре пропускания падает, а его ширина увеличивается. Для создания высокодобротных МР необходим материал с малым поглощением на резонансной длине волны. В полученных нами МР есть 2 разных состава $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (активный слой и слой в РБО), каждый из которых обладает поглощением на длине волны центрального резонансного пика $\lambda_{\text{res}} = 758$ нм. Величину поглощения невозможно определить из эллипсометрических данных (рис. 2), поскольку на данной длине волны она меньше порога чувствительности применяемого эллипсометра ($k \sim 0.01$). Тем не менее, пользуясь тем, что форма спектра пропускания МР на резонансной длине волны сильно зависит от величины поглощения, можно попытаться оценить верхнюю границу поглощения для каждого состава материала $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, исходя из величины амплитуды центрального резонансного пика в спектре пропускания.

Если принять, что поглощение в одном из двух составов $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ пренебрежимо мало, то тогда амплитуда центрального резонансного пика в спектре пропускания определяется только поглощением в материале другого состава. Его можно оценить, варьируя коэффициент поглощения и подгоняя рассчитанное значение амплитуды под экспериментальное значение. В результате определена верхняя граница величины поглощения в слоях $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в РБО (924 см^{-1}) и в активном слое (143 см^{-1}). Как показывает расчет, при полном отсутствии поглощения в слоях $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в РБО и в активном слое, когда добротность МР определяется только коэффициентом и фазой отражения РБО, ширина центрального резонансного пика составляет 1.96 нм ($Q = 387$), что на 18% меньше, чем ширина резонансного пика в эксперименте — 2.4 нм ($Q = 316$).

На подогнанном с учетом поглощения расчетном спектре пропускания (см. вставку на рис. 4) ширина резонансного пика всего на 6% меньше экспериментального значения 2.4 нм. Такое хорошее совпадение амплитуды и ширины резонансного пика в расчете и в эксперименте свидетельствует о том, что возможные дополнительные механизмы уширения (неоднородное уширение [25] и рассеяние света на шероховатостях интерфейсов) не вносят заметного вклада в ширину линии.

На рис. 5, а показан спектр ФЛ микрорезонатора. Для сравнения приведен спектр ФЛ пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (штриховая линия) с тем же составом ($x = 0.35$) и толщиной, что и активный слой. Возбуждение ФЛ осуществлялось Nd:YAG-лазером с длиной волны 532 нм. Все спектры записаны при комнатной температуре, в геометрии, когда излучение распространяется вдоль нормали к поверхности образца. Спектр ФЛ пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ имеет широкий несимметричный контур (ширина 150 нм), с максимумом в районе 750 нм

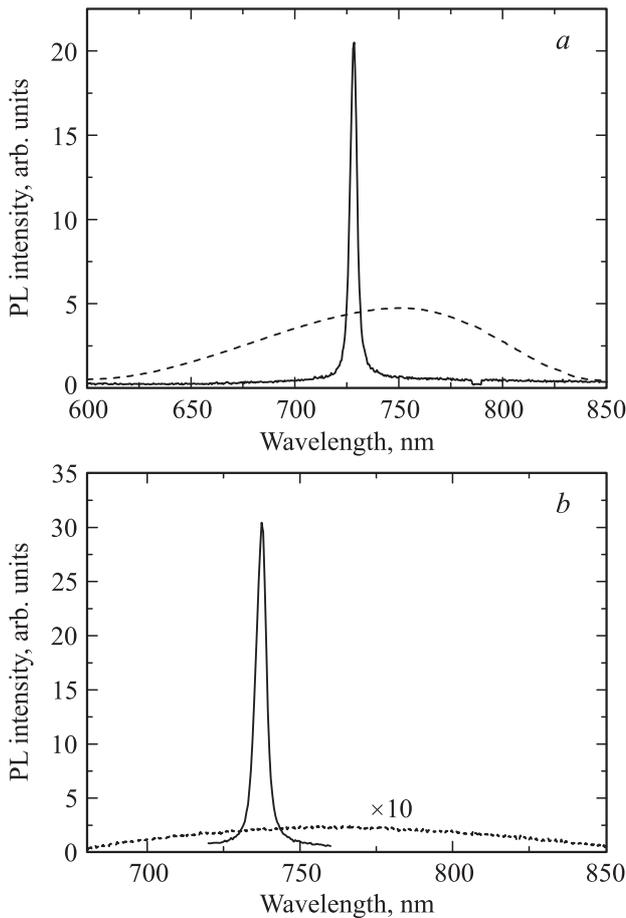


Рис. 5. *a* — спектр ФЛ из микрорезонатора (сплошная линия) и спектр ФЛ реперной пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (пунктирная линия). Возбуждение ФЛ осуществлялось лазером с длиной волны 532 нм. *b* — спектры ФЛ микрорезонатора (сплошная линия) и реперной пленки $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (пунктирная линия). Возбуждение ФЛ осуществлялось лазером с длиной волны 660 нм через собственную моду микрорезонатора.

(1.65 эВ). По литературным данным, такое положение максимума ФЛ соответствует содержанию углерода примерно 35% [2,10]. Спектр ФЛ из МР представляет собой узкий симметричный пик на длине волны 738 нм. Толщина слоев МР была подобрана такой, чтобы резонансная длина волны была близка к максимуму ФЛ исходного материала $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (750 нм). Амплитуда линии ФЛ из МР по сравнению с пленкой увеличилась в 4.6 раза, а ширина уменьшилась с 150 нм до 2.7 нм. Сужение и увеличение амплитуды линии ФЛ обусловлено влиянием МР на спектр спонтанной эмиссии из активного слоя.

Важно отметить отсутствие ФЛ из МР вне резонансного пика в спектральной области от 600 до 850 нм. Это обусловлено тем, что для изготовления РБО, как отмечалось ранее, специально был подобран более узкозонный $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (по сравнению с $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в активном слое), с меньшим значением содержания углерода ($x = 0.1$). За счет этого слои $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в РБО не имели заметной ФЛ при возбуждении лазером

ром 532 нм при комнатной температуре, и тем самым, достигалась лучшая спектральная чистота излучения МР по сравнению, например, с работой [17], где присутствует широкая полоса излучения в области стоп-зоны. Наблюдаемое небольшое увеличение интенсивности, по-видимому, связано с сильным поглощением в РБО возбуждающего излучения на длине волны 532 нм.

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 [35,36]. Возбуждение осуществлялось полупроводниковым лазером с длиной волны 660 нм, так как на этой длине волны поглощение в слоях $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в РБО незначительно (рис. 2). Поскольку длина волны возбуждения 660 нм лежит в области стоп-зоны, то возбуждение ФЛ через собственную моду МР осуществлялось при наклонном падении света [35,36]. При угле 80° от нормали длина волны резонансной моды в S -поляризации совпадала с длиной волны возбуждающего излучения (660 нм). Как видно из сравнения, при таком способе возбуждения увеличение амплитуды сигнала ФЛ на резонансной длине волны МР составило примерно 100 раз по сравнению с реперной пленкой (рис. 5, *b*), что по порядку величины близко к величине добротности.

На рис. 6 показана диаграмма направленности излучения из МР в полярных координатах. Возбуждение ФЛ осуществлялось Nd:YAG-лазером с длиной волны 532 нм. По мере увеличения угла детектирования пик

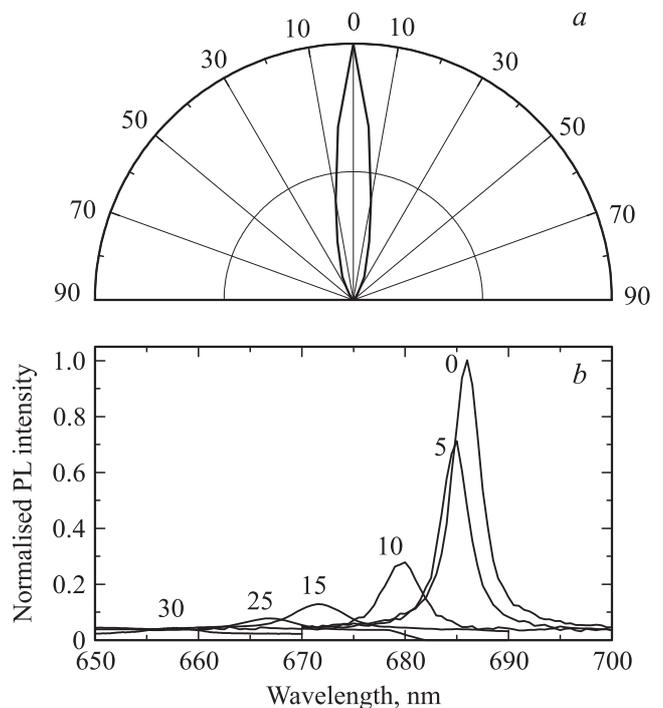


Рис. 6. *a* — диаграмма направленности излучения из микрорезонатора, построенная в полярных координатах. *b* — спектры ФЛ из микрорезонатора, полученные при разных углах детектирования.

ФЛ смещается в коротковолновую область, и его интенсивность резко уменьшается при углах регистрации свыше 10° от нормали к поверхности МР. Ширина диаграммы направленности излучения составляет $\sim 16^\circ$ по уровню половинной интенсивности излучения, что свидетельствует о высокой степени направленности излучения из полученного МР. Такая высокая направленность может быть использована для эффективного ввода излучения в оптические волноводы.

4. Заключение

Методом PECVD в едином технологическом цикле выращены планарные МР Фабри-Перо на основе слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$. Оптическая толщина излучающего на границе видимого и инфракрасного диапазонов спектра активного слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ равнялась резонансной длине волны МР. РБО состояли из неизлучающих чередующихся четвертьволновых слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}/a\text{-SiO}_2$. Симметричные МР с тремя периодами слоев в РБО настраивались на резонансную длину волны, лежащую в спектральной области вблизи максимума излучения $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ (750 нм). В полученных МР использовались два разных типа материала $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ — широкозонный, с большим содержанием углерода (в активном слое МР), и узкозонный, с меньшим содержанием углерода (в РБО). Благодаря большому оптическому контрасту между слоями $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-SiO}_2$ и малому поглощению слоев достигнута высокая добротность ($Q = 316$) и увеличение интенсивности ФЛ примерно в 100 раз по сравнению с интенсивностью излучения идентичного слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ без РБО, а также узкая диаграмма направленности ФЛ с шириной 16° . Теоретический расчет позволил полностью описать экспериментальные спектры пропускания, включая резонансный пик, стоп-зону и интерференционные пики за ее краем. Показано, что амплитуда длинноволнового пика на краю стоп-зоны определяется рассогласованием толщин слоев в РБО, и сделана оценка величины систематического отклонения толщин ($\pm 4\%$) от заданных значений $\lambda_{\text{res}}/4n$. Определена верхняя граница поглощения $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ на резонансной длине волны в активном слое и в РБО.

Работа выполнена при поддержке программы президента РАН № 24.

Список литературы

- [1] F. Giorgis, C. Vinegoni, L. Pavesi. *Phys. Rev. B*, **61** (7), 4693 (2000).
- [2] F. Giorgis, P. Mandracci, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, L. Pavesi. *J. Non-Cryst. Sol.*, **266–269**, 588 (2000).
- [3] J.-F. Lelièvre, J. De la Torre, A. Kaminski, G. Bremond, M. Lemiti, R. El Bouayadi, D. Araujo, T. Epicier, R. Monna, M. Pirot, P.-J. Ribeyron, C. Jaussaud. *Thin Sol. Films*, **511–512**, 103 (2006).
- [4] R.S. Sussmann, R. Ogden. *Phyl. Mag. B*, **44** (1), 137 (1981).
- [5] I. Watanabe, Y. Hata, A. Morimoto, T. Shimizu. *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, **21** (10), 613 (1982).
- [6] В.А. Васильев, А.С. Волков, Е. Мусабеков, Е.И. Териуков, В.Е. Челноков, С.В. Чернышев, Ю.М. Шерняев. *ФТП*, **24** (4), 710 (1990).
- [7] L.R. Tessler, I. Solomon. *Phys. Rev. E*, **52** (15), 10 962 (1995).
- [8] T. Ma, J. Xu, J. Du, W. Li, X. Huang, K. Chen. *J. Appl. Phys.*, **88** (11), 6408 (2000).
- [9] J. Xu, L. Yang, Y. Rui, J. Mei, X. Zhang, W. Li, Z. Ma, L. Xu, X. Huang, K. Chen. *Sol. St. Commun.*, **133** (9), 565 (2005).
- [10] K. Sel, I. Gunes. *Thin Sol. Films*, **520**, 7062 (2012).
- [11] F. Giorgis. *Appl. Phys. Lett.*, **77**(4), 522 (2000).
- [12] M. Bayindir, S. Tanriseven, A. Aydinli, E. Ozbay. *Appl. Phys. A*, **73** (1) 125 (2001).
- [13] A. Serpenguzel, S. Tanriseven. *Appl. Phys. Lett.*, **78** (10), 1388 (2001).
- [14] V. Ballarini, G. Barucca, E. Bennici, C.F. Pirri, C. Ricciardi, E. Tresso, F. Giorgis. *Physica E*, **16** (3–4), 591 (2003).
- [15] C. Ricciardi, V. Ballarini, M. Galli, M. Liscidini, L.C. Andreani, M. Losurdo, G. Bruno, S. Lettieri, F. Gesuele, P. Maddalena, F. Giorgis. *J. Non-Cryst. Sol.*, **352** (9–20), 1294 (2006).
- [16] B. Qian, S. Chen, D.Y. Chen, J.W. Wei, J. Xu, P.G. Han, W. Li, L. Xu, K.J. Chen. *Thin Sol. Films*, **516** (6), 1120 (2008).
- [17] J. Xu, J. Mei, D. Chen, S. Chen, W. Li, K. Chen. *Diamond Relat. Mater.*, **14** (11–12), 1999 (2005).
- [18] D. Chen, J. Xu, B. Qian, S. Chen, J. Mei, W. Li, L. Xu, K. Chen. *Mater. Chem. Phys.*, **111** (2–3), 279 (2008).
- [19] А.А. Дукин, Н.А. Феоктистов, В.Г. Голубев, А.В. Медведев, А.В. Певцов, А.В. Сел'кин. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (19), 3009 (2000).
- [20] В.Г. Голубев, А.А. Дукин, А.В. Медведев, А.В. Певцов, А.В. Селькин, Н.А. Феоктистов. *ФТП*, **35** (10), 1266 (2001).
- [21] А.А. Дукин, Н.А. Феоктистов, В.Г. Голубев, А.В. Медведев, А.В. Певцов, А.В. Сел'кин. *J. Non-Cryst. Sol.*, **299–302** (Pt 1), 694 (2002).
- [22] А.В. Медведев, А.В. Певцов, С.А. Грудинкин, Н.А. Феоктистов, И.Т. Серенков, В.Г. Голубев. *Nanotechnology*, **19** (31), 315 201 (2008).
- [23] А.В. Медведев, Н.А. Феоктистов, А.В. Певцов, В.Г. Голубев. *ФТП*, **39** (11), 1403 (2005).
- [24] В.Г. Голубев, А.А. Дукин, А.В. Медведев, А.В. Певцов, А.В. Селькин, Н.А. Феоктистов. *ФТП*, **37** (7), 860 (2003).
- [25] А.А. Дукин, Н.А. Феоктистов, В.Г. Голубев, А.В. Медведев, А.В. Певцов, А.В. Сел'кин. *Phys. Rev. E*, **67** (4), 046 602 (2003).
- [26] Y. Tawada, K. Tsuge, M. Kondo, H. Okamoto, Y. Hamakawa. *J. Appl. Phys.*, **53** (7), 5273 (1982).
- [27] C. Summonte, R. Rizzoli, M. Bianconi, A. Desalvo, D. Iencinella, F. Giorgis. *J. Appl. Phys.*, **96** (7), 3987 (2004).
- [28] A. Gorin, A. Jaouad, E. Grondin, V. Aimez, P. Charette. *Optics Express*, **16** (18), 13 509 (2008).
- [29] А.В. Певцов, А.В. Зерждев, Н.А. Феоктистов, Г. Juska, T. Muschik, R. Schwarz. *Int. J. Electron.*, **78** (2), 289 (1995).
- [30] Н.А. Феоктистов, Н.Л. Иванова, Л.Е. Морозова, Ю.А. Никulin, А.П. Онохов, А.В. Певцов, R. Schwarz. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **420**, 189 (1996).
- [31] Fu Guang-Sheng, Wang Xin-Zhan, Lu Wan-Bing, Dai Wan-Lei, Li Xing-Kuo, Yu Wei. *Chin. Phys. B*, **21** (10), 107 802 (2012).
- [32] K.D. Chokuette. *MRS Bulletin*, **27** (7), 507 (2002).

- [33] S. Li, Y. Rui, Y. Cao, J. Xu, K. Chen. *Front. Optoelectron.*, **5** (1), 107 (2012).
- [34] M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* (Oxford, Pergamon, 1975).
- [35] А.В. Медведев, А.А. Дукин, А.А. Певцов, С. Sibia, Н.А. Феоктистов, В.Г. Голубев. *Письма ЖТФ*, **33** (22), 73 (2007).
- [36] A.A. Dukin, N.A. Feoktistov, S.A. Grudinkin, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, V.G. Golubev, M. Centini, C. Sibia. *J. Appl. Phys.*, **103** (6), 063 101 (2008).

Редактор Т.А. Полянская

Planar light-emitting microcavities based on hydrogenated amorphous silicon carbide

A.V. Medvedev*, N.A. Feoktistov*+, S.A. Grudinkin*+, 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 Fabry-Perot microcavities (MC) with active layer emitting light at the boundary between visible and infrared spectral regions are fabricated by a plasma-enhanced chemical-vapor deposition technique. MC consist of an $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ active layer with increased carbon content and distributed Bragg reflectors (DBR) composed of non-emitting alternating layers of $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}/a\text{-SiO}_2$. The active layer and DBR are grown in a single technological cycle. Due to the high optical contrast and weak absorption of DBR layers the high cavity quality factor ($Q = 316$) and high directivity are achieved in MC with three periods in DBRs. Photoluminescence intensity at the room temperature turned out to be two order of magnitude higher than that from an identical $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ layer without DBR. Comparison of experimental transmittance spectra and transmittance spectra calculated by the transfer matrix method taking into account dispersion of the real and imaginary part of refraction index permits to estimate systematic deviation of thicknesses of the DBR layers and to determine upper limit of the absorption coefficient in the $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ layers.