Явления усиления сигнала фотолюминесценции наноструктур Ge(Si) в фотонных кристаллах

М.В. Степихова¹⁾, А.Н. Яблонский¹⁾, С.А. Дьяков²⁾, Е.В. Скороходов¹⁾, С.М. Сергеев¹⁾, М.В. Шалеев¹⁾,
Д.В. Шенгуров¹⁾, **А.В. Новиков^{1,3)}**, З.Ф. Красильник^{1,3)}

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105

² Сколковский институт науки и технологий, Москва, 143005, ул. Нобеля, 3

³ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, 23

тел: +7 (831) 417-9482, факс: +7 (831) 417-9464, эл. почта: mst@ipm.sci-nnov.ru

DOI 10.34077/RCSP2019-76

В работе исследованы люминесцентные свойства фотонных кристаллов (ФК) и фотонно-кристаллических резонаторов, сформированных на кремниевых структурах с самоформирующимися наноструктурами Ge(Si). Интерес к таким структурам вызван с одной стороны - их излучательной способностью в диапазоне длин волн 1.2 – 1.6 мкм, с другой – совместимостью со стандартными КМОП технологиями, что делает их перспективными для схем кремниевой оптоэлектроники. В данной работе рассмотрены возможности управления излучательными свойствами таких структур в фотонных кристаллах и ФК резонаторах за счет эффектов взаимодействия активной среды с резонансными и радиационными модами фотонного кристалла.

Фотонные кристаллы и ФК резонаторы с линейной ($L3$) геометрией дефекта формировались на многослойной структуре, содержащей 5 слоев наноструктур Ge(Si), выращенных на подложках SOI. Выращенная многослойная структура представляла собой планарный одномодовый волновод толщиной 250 нм. Методами электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления в структуре формировались фотонные кристаллы с периодом решетки (a), варьируемым в интервале от 350 до 800 нм. Радиус отверстий ФК (r) определялся соотношением $r/a = 0.2 \div 0.4$. Резонаторы формировались пропуском 3-х ближайших отверстий фотонного кристалла.

Результаты исследований, полученные методом микро-ФЛ с высоким пространственным (до 2 мкм) и спектральным ($> 0.05 \text{ см}^{-1}$) разрешением, показывают наличие в таких структурах значительного (более чем на порядок величины) усиления сигнала ФЛ наноструктур Ge(Si) при комнатной температуре. В зависимости от параметров ФК в структурах наблюдаются как явления усиления на резонансных модах ФК резонатора, так и на радиационных модах ФК. Усиление сигнала ФЛ на оптически активных модах фотонно-кристаллического резонатора наблюдается в резонаторах с периодом решетки ФК, не превышающим 500 нм, и имеет место при условии прецизионной фокусировки лазерного луча в области резонатора. В ФК и ФК резонаторах с периодом решетки более 500 нм наблюдаемое усиление сигнала ФЛ не зависит от области возбуждения и обусловлено явлениями взаимодействия оптически активной среды с радиационными модами ФК. В условиях усиления на радиационных модах наблюдается как значительное увеличение сигнала ФЛ в максимуме интенсивности, так и значительный (вплоть до порядка величины) рост интегральной интенсивности сигнала ФЛ.

Полученные экспериментальные результаты хорошо описываются в рамках теоретических моделей, позволяющих проанализировать зонную структуру исследованных ФК и особенности модового состава ФК резонаторов. Моделирование проводилось методом матрицы рассеяния и методом конечных элементов (FEM) с использованием программного пакета **COMSOL Multiphysics**.

Работа поддержана РФФИ (проект #18-42-520047-р_а) и частично финансируется программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий».