

06;12

Технология получения полупроводниковых микрорезонаторов и фотонных кристаллов

© Е.М. Аракчеева, А.В. Нащекин, В.А. Соловьев, Е.М. Танклевская, М.В. Максимов, С.Г. Конников, С.А. Гуревич, Н.Н. Леденцов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: kathy.quantum@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 23 июня 2004 г.)

Описана технология получения микрорезонаторов и фотонных кристаллов в структурах на основе GaAs с использованием электронной литографии и реактивного ионного травления. Было получено 2 типа структур: с микростолбиками и фотонными кристаллами, представляющими собой квадратную и гексагональную решетки отверстий в планарной волноводной структуре. Минимальный диаметр микростолбиков составил 100 nm, высота — 700 nm. Размер отверстия фотонных кристаллов контролируемым образом варьировался от 140 до 500 nm, период фотонного кристалла от 400 до 1000 nm. Глубина травления фотонных кристаллов составила более 350 nm.

Введение

В настоящее время полупроводниковые микрорезонаторы привлекают к себе большое внимание как с точки зрения исследования их фундаментальных свойств, так и с точки зрения их применения для создания перспективных оптоэлектронных приборов. Полупроводниковый микрорезонатор представляет собой структуру, в которой электромагнитное поле квантовано в одном, двух или трех направлениях. Ограничение электромагнитной волны в микрорезонаторе может быть реализовано за счет распределенных брегговских отражателей или за счет полного внутреннего отражения. Так, в трехмерном микрорезонаторе, называемом в литературе микростолбик (micropillar), ограничение света в вертикальном направлении осуществляется за счет использования верхнего и нижнего распределенного брегговского зеркала (РБЗ), а в горизонтальном направлении за счет полного внутреннего отражения на границе воздух–полупроводник. Использование микрорезонаторов позволяет управлять интенсивностью взаимодействия света с веществом путем увеличения или уменьшения перекрытия мод электромагнитного поля и волновых функций электронов. Как было теоретически показано [1], для излучателя, помещенного в микрорезонатор, может наблюдаться увеличение скорости спонтанной рекомбинации (эффект Пурселя). Микрорезонаторы в настоящее время широко используются в современных оптоэлектронных приборах, таких как поверхностно излучающие лазеры на основе вертикального микрорезонатора и резонансные светодиоды.

Квантовые точки (КТ), полученные методом самоорганизации в процессе роста, обладают рядом свойств, делающими их чрезвычайно привлекательными для использования в качестве активной среды полупроводниковых микрорезонаторов. Вследствие трехмерного пространственного ограничения носителей электронный

спектр идеальной квантовой точки представляет собой набор дискретных уровней, разделенных областями запрещенных состояний, и соответствует электронному спектру одиночного атома. Малая ширина линии излучения одиночной КТ позволила пронаблюдать эффект Пурселя в полупроводниковом микрорезонаторе [2]. Чрезвычайно перспективным представляется использование квантовых точек, помещенных в микрорезонатор для создания источников одиночных фотонов [3].

Другим важным направлением, перспективным для создания будущего поколения лазеров и светодиодов [4], является использование фотонных кристаллов. Фотонный кристалл представляет собой периодическую полупроводниковую или диэлектрическую структуру, период которой соизмерим с длиной волны света. В фотонных кристаллах происходит формирование зонной структуры для фотонов, аналогичной зонной структуре для электронов в твердом теле. Фотонные кристаллы могут служить очень эффективными одномерными или двумерными распределенными брегговскими зеркалами (РБЗ). В микрорезонаторе, окруженном таким двумерным распределенным зеркалом, все излучение активного вещества может быть направлено только в одну разрешенную моду. Ожидается, что это приведет к созданию светоизлучающего прибора, который будет обладать преимуществами как лазера (когерентность и малая расходимость излучения), так и светодиода (отсутствие порога) [5]. Фотонные кристаллы с квантовыми ямами или квантовыми точками могут быть использованы в качестве активных элементов — лазеров и светодиодов [6]. В настоящее время ведутся интенсивные исследования, направленные на создание оптических интегральных схем на основе микрорезонаторов и фотонных кристаллов, что, как ожидается, приведет к созданию квантового компьютера.

Технология получения микрорезонаторов

Для реализации источников излучения на основе эффекта Пурселя, а также источников одиночных фотонов необходимы микрорезонаторы малого размера, содержащие в наилучшем случае только одну КТ. Типичное среднее расстояние между InAs–GaAs квантовыми точками, полученными методом самоорганизации в процессе роста, составляет около 100 nm, что и определяет требуемый диаметр микростолбика.

Технология изготовления микростолбиков включает оптическую и электронную литографию, химическое и реактивное ионное травление. В начале с помощью оптической фотолитографии на поверхности структуры создавалась маска из органического резиста AZ 5214, через которую химически стравливалась вся структура до подложки, кроме квадратов размером $100 \times 100 \mu\text{m}$, расположенных на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга. В дальнейшем в данных квадратах будут формироваться массивы мез. Тот факт, что в областях между массивами мез активная область удалена, позволяет исключить фотолюминесценцию из данных областей при оптических исследованиях.

Для проведения электронно-лучевой литографии на образец наносился позитивный электронный резист — полиметилметакрилат (ПММА) толщиной $\sim 350 \text{ nm}$, (рис. 1, *a*) и осуществлялся электронно-литографический процесс (рис. 1, *b*) на сканирующем электронном микроскопе CamScan Series 4-88 DV 100. Для управления пучком использовалась высокоразрешающая восьмиканальная цифровая плата на основе 16-битного ЦАП (ADLINK PCI-6208V). Было разработано программное обеспечение на языке Delphi 5, позволяющее выдавать требуемое напряжение на отклоняющую систему электронной пушки с шагом порядка $150 \mu\text{V}$, а также управлять временем экспозиции одного элемента путем подачи импульса напряжения требуемой длительности на модулятор электронного пучка. Для подбора оптимального режима литографии были сформированы группы элементов с разным периодом (от 0.35 до $10 \mu\text{m}$) и различным временем экспозиции каждой группы (от 50 до $1000 \mu\text{s}$ в зависимости от степени близости соседнего элемента). Оптимальные токи пучка составили 10–30 pA при ускоряющем напряжении 15 kV.

Поскольку ПММА не является плазмостойким резистом, он не может использоваться как маска для реактивного ионного травления структуры. В связи с этим после проявления ПММА (рис. 1, *c*) нами осуществлялись напыление слоя никеля толщиной $\sim 30 \text{ nm}$ (рис. 1, *d*) и взрыв ПММА в диметилформамиде (рис. 1, *e*). Слой Ni, оставшийся после взрыва на поверхности структуры, в дальнейшем служил маской для реактивного ионного травления.

В настоящей работе использовалась установка диодного типа для реактивного ионного травления в радиочастотной плазме — RDE-300 производства французской фирмы „Alcatel“ с компьютерным управлением.

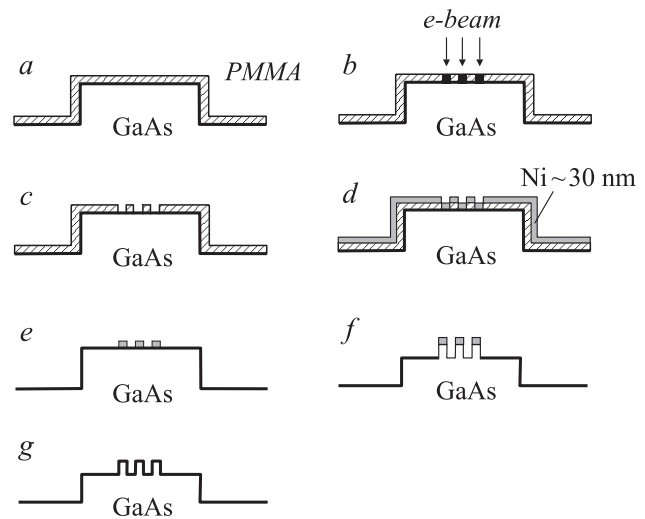


Рис. 1. Технология получения микрорезонаторов. *a* — нанесение ПММА толщиной $\sim 350 \text{ nm}$, *b* — электронно-литографический процесс, *c* — проявление ПММА, *d* — напыление слоя Ni толщиной $\sim 30 \text{ nm}$, *e* — взрыв ПММА, *f* — реактивное ионное травление полупроводника, *g* — удаление никелевой маски.

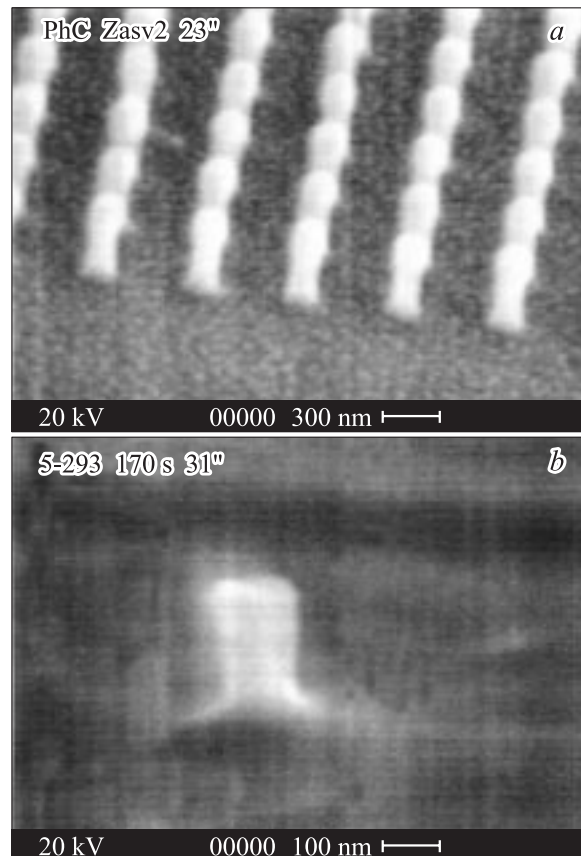


Рис. 2. Снимок массива мез с никелевой маской, диаметром 140 nm, а также одиночной мезы диаметром 140 nm.

Параметры травления полупроводника выбирались исходя из необходимости получения структуры, в которой боковые поверхности имеют вертикальный профиль и содержат малое количество внесенных травлением дефектов. Для травления структуры (рис. 1, *f*) был выбран следующий режим: соотношение газовых компонентов $\text{Cl}_2 : \text{BCl}_3 : \text{Ar} = 1 : 4 : 16$ sccm (стандартных единиц газовых потоков), давление газовой смеси в реакторе 1 Па (реактор предварительно откачивался до $5 \cdot 10^{-4}$ Па) и напряжение автосмещения, равное 200 В. Средняя скорость травления в таком режиме была ~ 90 nm/min. Глубина травления составляла 0.5–1.5 μm в зависимости от параметров структуры. Соотношение диаметра столбика к его высоте составляет 1:6, при этом сохраняется высокая анизотропия стенки. На последнем этапе проводилось удаление Ni маски, оставшейся на поверхности микростолбиков, при помощи химического травления (рис. 1, *g*). На рис. 2 представлены снимки массива мез диаметром 140 nm, а также одиночной мезы диаметром 140 nm, сделанные на сканирующем электронном микроскопе CamScan. Удаление никелевой маски при этом не проводилось.

Технология получения двумерных фотонных кристаллов

В связи с тем что технология получения трехмерных полупроводниковых фотонных кристаллов сложна, в настоящее время наибольшее распространение получили двумерные фотонные кристаллы. Такие кристаллы представляют собой двумерную квадратную или гексагональную решетку отверстий в полупроводниковой структуре. Наиболее перспективными с точки зрения применения в оптоэлектронике являются двумерные фотонные кристаллы, изготовленные из эпитаксиальной волноводной структуры. В таких кристаллах ограничение электромагнитной волны в направлении, параллельном отверстиям, осуществляется за счет волноводного эффекта. Было показано, что в случае гексагонального фотонного кристалла для *TE*-поляризованной моды существует запрещенная фотонная зона [7].

Технология получения двумерных полупроводниковых фотонных кристаллов во многом аналогична технологии изготовления микрорезонаторов, представленной на рис. 1. В то же время имеются и некоторые отличия. Перед нанесением ПММА на поверхность структуры напыляется слой Ni толщиной около 20 nm. Затем наносится позитивный ПММА и осуществляется процесс электронной литографии. После проявления ПММА проводится травление образца пучком Ag. Скорость травления Ni и ПММА пучком Ag различаются не очень сильно, что позволяет протравить Ni до поверхности структуры на тех ее участках, где ПММА отсутствует. Таким образом формируется маска для дальнейшего реактивного ионного травления. Параметры травления фотонных кристаллов подбирались так, чтобы обеспечить максимальную вертикальность и гладкость стенок, а также предотвратить формирование большого количества

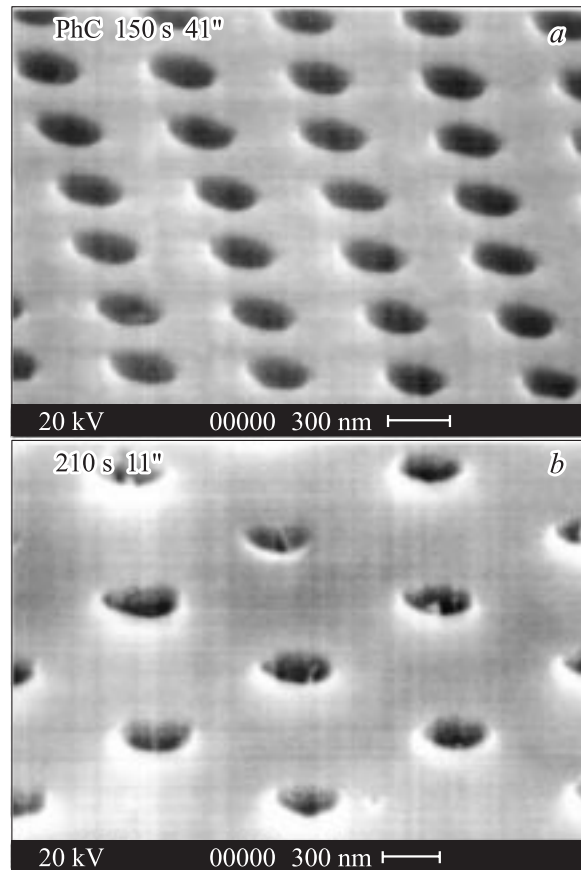


Рис. 3. *a* — снимок фотонного кристалла с квадратной решеткой, *b* — снимок фотонного кристалла с гексагональной решеткой.

центров безызлучательной рекомбинации на поверхности полупроводника. На рис. 3, *a, b* представлены снимки фотонных кристаллов с квадратной и гексагональной решетками. Период фотонного кристалла с квадратной решеткой составляет 660 nm, диаметр отверстий — 320 nm. Период и диаметр отверстий для фотонного кристалла с гексагональной решеткой соответственно равны 800 и 420 nm. Отверстия имеют круглую форму с ровными краями. Исследования скола фотонных кристаллов показали, что глубина травления составила 350 nm при сохранении вертикальности и гладкости стенок.

Заключение

Описана технология получения полупроводниковых микрорезонаторов и фотонных кристаллов методом электронной литографии и реактивного ионного травления в структурах на основе AlGaAs–GaAs. Минимальный размер мезы составляет около 100 nm, что позволяет реализовывать микрорезонаторы, содержащие одиночную квантовую точку. Типичные периоды (400–1000 nm) и размеры отверстий (140–500 nm) фотонных кристаллов соответствуют диапазону длин волн

800–1300 nm, в настоящее время наиболее активно используемому в линиях волоконно-оптической связи. Предварительные оптические исследования мез и фотонных кристаллов с активной областью на основе квантовых точек показали, что реактивное ионное травление не приводит к заметному ухудшению оптического качества материала.

Работа была поддержана программой Отделения физических наук РАН „Новые материалы и структуры“ и программой фундаментальных исследований президиума РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“.

Список литературы

- [1] *Purcell E.M.* // *Phys. Rev.* 1946. Vol. 69. P. 681.
- [2] *Gérard J.M., Sermage B., Gayral B. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81. N 5. P. 1110–1113.
- [3] *Zhiliang Yuan, Kardynal B.E., Stevenson R.M. et al.* // *Science.* 2002. Vol. 295. P. 102–105.
- [4] *Microcavities and Photonic Bandgaps: Physics and Application* / Ed. C. Weisbuch, J. Rarity. NATO ASI. Ser. E. Vol. 324 (Kluwer, Dordrecht, 1996).
- [5] *La Rue R.De, Smith Ch.* // *Nature.* 2000. Vol. 408. P. 653–656.
- [6] *Erchak A.A., Ripin D.J., Fan Sh. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2001. Vol. 78. P. 563–565.
- [7] *Benisty H., Weisbuch C., Labilloy D. et al.* // *J. Lightwave Techn.* 1999. Vol. 17. P. 2063–2077.