

06

Создание дискового резонатора с вертикальной боковой поверхностью для WGM-лазера ($\lambda \approx 3 \mu\text{m}$)

© Е.А. Гребенщикова, В.В. Шерстнев, С.С. Кижаяев,
Т.Б. Попова, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: eagr@iropt7.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 апреля 2008 г.

Впервые для WGM-лазеров созданы дисковые резонаторы на основе гетероструктур InAs/InAsSb_{0.11}P_{0.24} в форме цилиндров диаметром 200, 100 и 50 μm , высотой до 30 μm , при этом вертикальная часть боковой поверхности достигала 10 μm .

Для формирования дисковых резонаторов был разработан травитель на основе HBr/H₂Cr₂O₇/H₃PO₄. В результате была увеличена протяженность вертикального участка боковой поверхности резонатора и уменьшена ее шероховатость, что позволило повысить устойчивость оптической моды в дисковом резонаторе WGM-лазера и получить лазерную генерацию на длине волны $\lambda \approx 3 \mu\text{m}$ в непрерывном режиме при 77 К.

PACS: 85.30.z, 42.79.e

Научный и практический интерес к созданию лазеров обусловлен их востребованностью в медицине, в системах связи, экологического мониторинга и контроля различных технологических процессов [1]. Важное место занимают полупроводниковые лазеры, работающие в средней инфракрасной (ИК) области спектра (2–5 μm), поскольку в этом диапазоне длин волн происходит поглощение подавляющего большинства экологически вредных газов. Известны различные конструкции полупроводниковых лазеров для этого диапазона, которые обладают как определенными достоинствами, так и недостатками [2–5].

Новым направлением в развитии полупроводниковых лазеров для ИК-диапазона являются WGM-лазеры, отличительная особенность конструкции которых — резонатор в виде диска. Рабочей модой таких лазеров является так называемая „мода шепчущей галереи“ (WGM — whispering gallery mode) [6].

Для WGM-лазеров существенным фактором, влияющим на добротность резонатора, является его форма в окрестности активной области. В работе [7] было сделано предположение, что в дисковом резонаторе, имеющем форму усеченного конуса, происходит смещение (вытекание) мод в направлении подложки, а это приводит к значительному уменьшению добротности такого резонатора и, как следствие, к увеличению порогового тока лазера. Там же сообщается о создании WGM-лазера на основе GaSb с дисковым резонатором, боковая поверхность которого выпуклая.

В [8] исследовались WGM-лазеры с резонаторами диаметром 200 и 400 μm , полученными методом ионно-плазменного травления в газовой среде $\text{CH}_4 : \text{H}_2$. Однако влияние высоты дискового резонатора и формы его боковой поверхности на характеристики лазера в этой работе не исследовано. Кроме того, эффективность таких лазеров была недостаточна для практического применения.

Мы полагаем, что как выпуклая, так и вертикальная форма боковой поверхности дискового резонатора WGM-лазера способствуют стабилизации моды в вертикальном направлении. Это приводит к большей эффективности и лучшим оптическим характеристикам по сравнению с WGM-лазерами, в которых резонатор имеет форму усеченного конуса.

В [9] сообщалось о создании дисковых резонаторов на основе двойной гетероструктуры InAs(Sb)/InAsSbP, с вертикальным участком боковой поверхности резонатора 5 μm при общей высоте 15 μm . Для достижения изотропного травления многослойных гетероструктур на основе InAs был применен электрохимический метод травления с использованием травителя состава $\text{HClO}_4/\text{CH}_3\text{COOH}$. Однако для эффективной работы лазера как высота, так и гладкость боковой поверхности резонатора были недостаточны.

Цель данной работы — создание дискового резонатора с вертикальными стенками и гладкой боковой поверхностью на основе двойной гетероструктуры InAs(Sb)/InAsSbP.

Двойная гетероструктура InAs(Sb)/InAsSbP была выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений МОГФЭ (MOCVD). Преимущество метода МОГФЭ перед другими заключается в том, что он позволяет выращивать более широкозонные слои InAsSbP (например, в области несмешиваемости) и создавать гетероструктуры с лучшим электронным и оптическим ограничением, а также гетероструктуры с более совершенной морфологией.

Структура, использованная нами для создания дисковых резонаторов, состояла из подложки InAs (100) с проводимостью n -типа ($n \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), на которой последовательно выращивались нелегированный барьерный слой $\text{InAs}_{0.65}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.24}$ толщиной $2.3 \mu\text{м}$, активная часть структуры — нелегированный слой InAs толщиной $0.45 \mu\text{м}$ и легированный Zn барьерный слой $\text{InAs}_{0.65}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.24}$ толщиной $2.85 \mu\text{м}$ ($n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Измерения элементного состава эпитаксиальных слоев проводились с использованием рентгеновского микроанализатора CAMEBAX фирмы CAMECA.

Для создания дисковых резонаторов на выращенной структуре со стороны эпитаксиального слоя методом фотолитографии и последующего химического травления были созданы мезы диаметром 200, 100 и $50 \mu\text{м}$. Омические контакты в форме колец шириной $30 \mu\text{м}$ располагались на верхней плоскости мез, а со стороны подложки был напылен сплошной металлический слой.

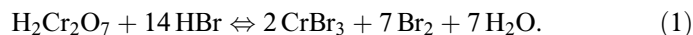
Поскольку при „мокром“ химическом травлении вертикальный участок боковой поверхности мезы составляет примерно одну треть от общей высоты мезы, то для увеличения длины вертикального участка боковой поверхности резонатора необходимо увеличить общую глубину травления. Для этой цели мы разработали травитель на основе компонентов, предложенных в [10].

Были проведены исследования процесса травления в зависимости от температуры, перемешивания, а также от концентрации компонентов травителя. Эксперименты показали, что наилучший результат достигается при комнатной температуре в травителе состава $\text{HBr}/\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}_3\text{PO}_4$ (4/1/0.5) без перемешивания раствора, так как перемешивание приводит к ухудшению качества поверхности. По-видимому, это происходит из-за нарушения вязкости слоя травителя, прилегаемого к полупроводниковому кристаллу.

При формировании оптоэлектронных приборов необходимо создание мез с ровной, полированной верхней поверхностью и отсутствием выступов, раковин и прочих неровностей на боковой поверхности во избежание механических напряжений на поверхности мезы. Ровная поверхность мезаструктуры важна и для качественного проведения последующих стадий фотолитографии.

В состав предлагаемого травителя помимо сильного окислителя $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ входит бромистоводородная кислота. В ходе реакции (1) образуется сильный окислитель ($2\text{Br} \rightarrow \text{Br}_2$), что позволяет добиться высокой скорости окислительно-восстановительных реакций на

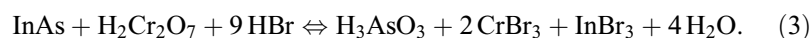
поверхности полупроводника. Это приводит к тому, что скорость травления лимитируется уже не окислительно-восстановительными, а диффузионными процессами, и тем самым обеспечивается равенство скоростей травления слоев, содержащих InAs и многокомпонентные твердые растворы на его основе $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$, где $x \leq 0.45$, $y \leq 0.20$.



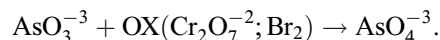
Итак, в растворе присутствуют два сильных окислителя: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ и Br_2 . Можно предположить следующую схему взаимодействия компонентов и на примере InAs проследить за окислением компонентов твердого раствора:



(As^{-3}) окисляется до степени окисления +3: (As^{+3}),



Возможен также дополнительный процесс — более глубокое окисление до (As^{+5}):



Таким образом, примененный травитель позволяет проводить травление разных по составу слоев с одинаковой скоростью и получать полированную поверхность и гладкий профиль мезы.

На рис. 1, *a* приведена фотография поверхности кристалла, на которой сформированы мезы разного диаметра — от 200 до 50 μm (вид сверху). Как видно из рисунка, мезы, полученные в результате применения травителя $\text{HBr}/\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}_3\text{PO}_4$, были с гладкой полированной поверхностью и имели форму круга в отличие от мез в форме эллипса, получающихся при травлении в других травителях, которые обсуждались в [9].

На рис. 1, *b* представлена фотография скола мезы в продольном сечении (вид сбоку). При общей высоте $30 \pm 1 \mu\text{m}$ протяженность вертикального участка боковой поверхности мезы составила $10 \pm 1 \mu\text{m}$. Причем гладкость вертикального участка была лучше, чем в других работах.

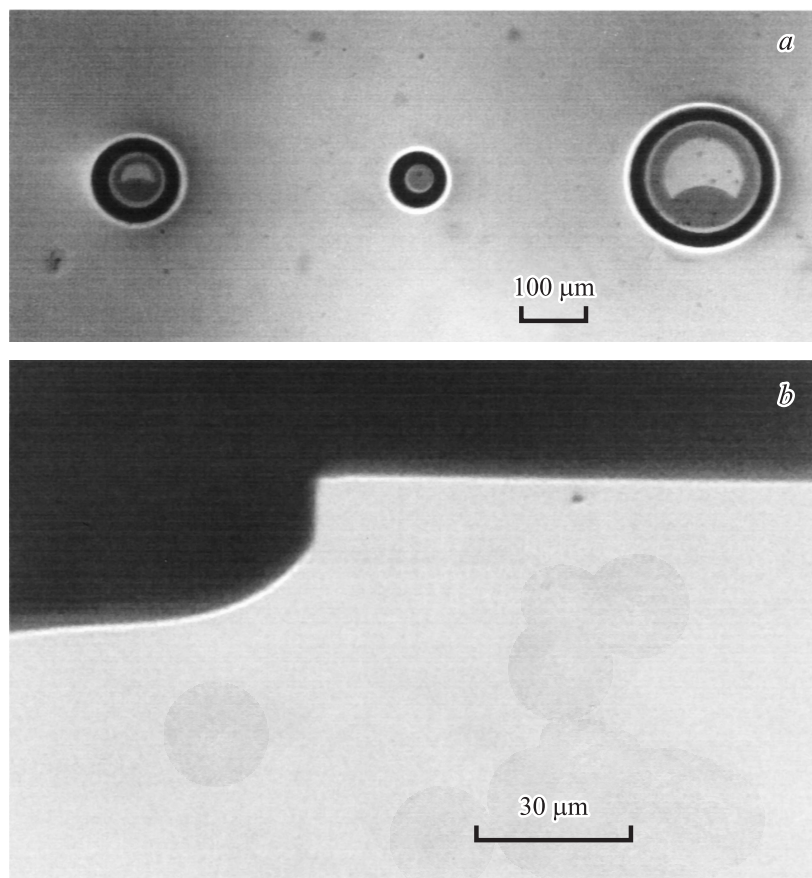


Рис. 1. Фотография поверхности кристалла, на которой сформированы мезы разного диаметра — от 200 до 50 μm (вид сверху) (a). Фотография скола мезы в продольном сечении (вид сбоку) (b).

На рис. 2 показан спектр излучения дискового лазера с диаметром мезы 200 μm при различных токах в интервале 100–140 mA. Измерения проводились при температуре 77 K в непрерывном режиме. Видно, что на фоне спонтанного излучения появляется лазерная генерация на длине волны вблизи 3 μm.

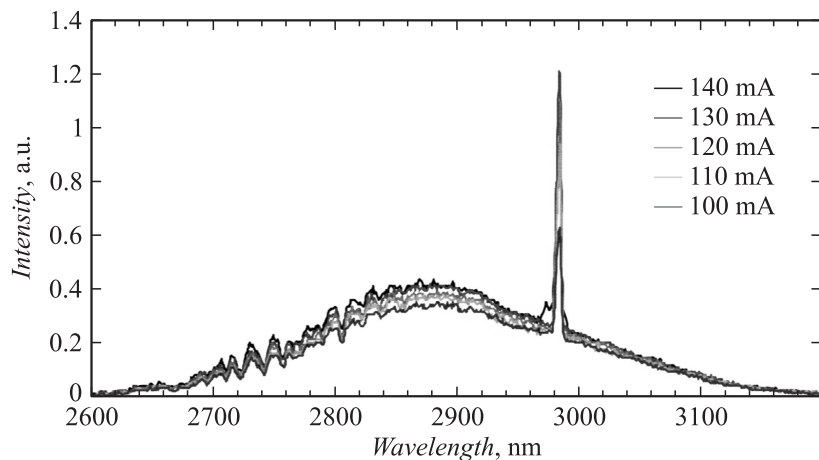


Рис. 2. Спектр излучения дискового лазера с диаметром мезы $200\ \mu\text{m}$ при различных токах накачки ($T = 77\ \text{K}$).

Таким образом, травление с использованием травителя $\text{HBr}/\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}_3\text{PO}_4$ для обработки гетероструктуры состава $\text{InAs}(\text{Sb})/\text{InAsSb}_{0.11}\text{P}_{0.24}$ позволяет получить дисковые резонаторы диаметром от 200 до $50\ \mu\text{m}$ с гладкой боковой поверхностью. При общей высоте мез $30 \pm 1\ \mu\text{m}$ участок вертикальной и гладкой боковой поверхности резонатора составил $10 \pm 1\ \mu\text{m}$.

На основе сформированных дисковых резонаторов были созданы WGM-лазеры, излучающие на длине волны $\lambda \approx 3\ \mu\text{m}$ в непрерывном режиме при $77\ \text{K}$.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 07-02-13616-офи_ц, 07-02-92170-НЦНИ_а и 08-02-12118-офи.

Список литературы

- [1] *Astakhova A.P., Imenkov A.N., Danilova T.N., Sherstnev V.V., Yakovlev Yu.P.* Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. V. 66. Issues 4–5, April 2007. P. 824–831.
- [2] *Allerman A.A., Biefeld R.M., Kurtz S.R.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. N. 4. P. 465–467.

- [3] *Devenson J., Cathabard O., Teissier R., Baranov A.N.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 141106.
- [4] *Suchalkin S., Westerfeld D., Donetski D., Luryi S., Belenky G., Martinelli R., Vurgaftman I., Meyer J.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 2833.
- [5] *Yang R.Q.* // Microelectron. J. 1999. V. 30. P. 1043–1056.
- [6] *Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Hill G.* // Electron. Lett. 2003. V. 39. P. 916.
- [7] *Гребеницкова Е.А., Ильинская Н.Д., Шерстнев В.В., Монахов А.М., Астахова А.П., Яковлев Ю.П., Boissier G., Teissier R., Баранов А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2009 (в печати).
- [8] *Шерстнев В.В., Монахов А.М., Астахова А.П., Кислякова А.Ю., Яковлев Ю.П., Аверкиев Н.С., Krier A., Hill G.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 9. С. 1122.
- [9] *Гребеницкова Е.А., Шерстнев В.В., Кижяев С.С., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 8. С. 54–58.
- [10] *Corbett V., Lambkin P., Wu G.H., Houlihan J., Huyet G.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. N 5. P. 808–810.