

06;07;12

Влияние селективного химического травления на диаграмму направленности излучения полупроводникового лазера

© В.П. Мишкин,¹ Д.О. Филатов,¹ С.М. Некоркин,² Ю.В. Кутергина²

¹ Научно-образовательный центр „Физика твердотельных наноструктур“
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: spm@phys.unn.ru

² Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 15 октября 2003 г.)

Исследовано влияние селективного жидкостного химического травления излучающей поверхности полупроводниковых лазеров на основе InGaP/GaAs с квантовыми ямами InGaAs на диаграмму направленности их излучения в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу. Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что за счет разной скорости травления материалов широкозонных слоев (InGaP) и активной области лазеров (GaAs, InGaAs) на излучающей поверхности происходит самоформирование цилиндрической линзы (собирающей или рассеивающей в зависимости от вида травителя). Показано, что, подбирая соответствующее время травления, возможно изменять ширину диаграммы направленности лазера в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, в пределах $57-82^\circ$ при исходной ширине диаграммы направленности на уровне $1/2$ максимума, равной 66° .

Введение

Полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) в настоящее время широко применяются в различных областях электроники и оптоэлектроники [1]. В связи с тем что размеры излучающей области ЛД в направлении, перпендикулярном $p-n$ -переходу, сравнимы с длиной волны излучения, расходимость излучения ЛД в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, достаточно велика. Ее уменьшение является важной задачей, поскольку она определяет эффективность ввода излучения в различные оптические схемы. В настоящее время существуют различные способы изменения ширины диаграммы направленности. Обычно для фокусировки излучения ЛД, а также для ввода его в оптические волокна применяют согласующие устройства на основе цилиндрических линз, что усложняет конструкцию оптоэлектронных устройств и затрудняет их юстировку.

В целом расходимость излучения ЛД в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, определяется дифракционным пределом, а следовательно толщиной оптического волновода лазерной структуры. В способах изменения диаграммы направленности, описанных в работах [2–6], уменьшение расходимости достигается увеличением общей толщины волноводного слоя. Существуют также способы изменения диаграммы направленности излучения в перпендикулярной $p-n$ -переходу плоскости без увеличения толщины лазерной структуры. Эти способы основаны на использовании излучения, туннелирующего в подложку через тонкий нижний ограничивающий слой в качестве выходного излучения лазера [7,8].

В настоящей работе предлагается простой и технологичный способ изменения диаграммы направленности ЛД с помощью селективного химического травления излучающей поверхности ЛД в травителе, имеющем разную скорость травления материалов ограничивающих волноводных слоев и активной области лазеров, вследствие чего на излучающей поверхности происходит самоформирование цилиндрической линзы (собирающей или рассеивающей в зависимости от вида травителя). Проведены экспериментальные исследования влияния селективного химического травления на морфологию излучающей поверхности ЛД на основе InGaP/GaAs с квантовыми ямами InGaAs и диаграмму направленности их излучения и показана возможность управления шириной диаграммы направленности ЛД в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, путем подбора соответствующего времени травления.

Методика эксперимента

В данной работе исследовались ЛД на основе GaAs с ограничивающими волноводными слоями $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ и двумя квантовыми ямами $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. Схема гетероструктуры показана на рис. 1. Структуры были выращены методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОС-гидридной) при атмосферном давлении [9]. На их основе были изготовлены многомодовые ЛД с шириной полоска $100\ \mu\text{m}$. Просветляющее покрытие на грани ЛД не наносилось, чтобы обеспечить возможность применения модификации излучающей области методом жидкостного химического травления. Лазерные диоды имели длину волны излучения $0.987\ \mu\text{m}$

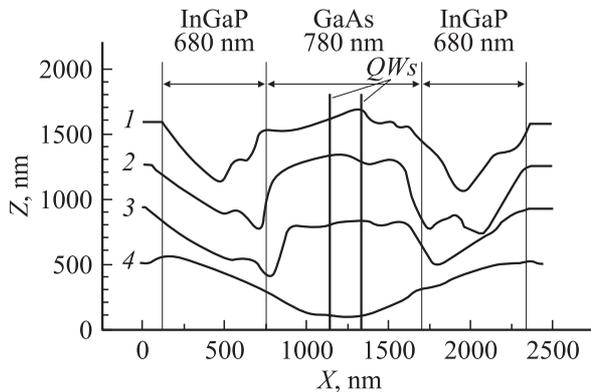


Рис. 1. Профили поверхности излучающей области лазерных диодов в направлении, перпендикулярном $p-n$ -переходу, после селективного травления, 1–3 — травитель (A), 4 — травитель (B). Время травления t_e , s: 1 — 7.5, 2 — 15, 3 — 30, 4 — 3.

при 300 К и ширину диаграммы направленности на уровне 1/2 максимума интенсивности 66° . Исследуемые ЛД имели следующие характеристики: мощность излучения 0.38 W при токе накачки 1 А, пороговый ток 0.24 А и квантовый выход 41%.

Для формирования на передней грани лазерного диода цилиндрической собирающей линзы применялся селективный травитель (A) $\text{HCl} + \text{KMnO}_4$ 1000 : 3.

Скорость травления InGaP в нем составляла $0.4 \mu/\text{min}$. Калибровка скорости травления проводилась стандартным методом вытравливания ступеньки в однородном эпитаксиальном слое InGaP/GaAs толщиной $0.6 \mu\text{m}$. Часть структуры закрывалась химически стойким лаком (ХСЛ), и образец погружался в травитель на некоторое заданное время, такое чтобы высота вытравленной ступеньки была по предварительной оценке $\sim 100 \text{ nm}$. После этого ХСЛ удалялся кипячением в ацетоне, высота вытравленной ступеньки измерялась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Установлено, что данный травитель практически не оказывает действия на GaAs: после выдержки в травителе в течение 0.25 минуты ступеньки на поверхности образца методом АСМ обнаружить не удалось.

ЛД полностью погружались в травитель на заданное время и затем ополаскивались в дистиллированной воде. Здесь следует отметить, что и после травления ЛД продолжали генерировать, причем их параметры, указанные выше, практически не изменялись, если время травления не превышало некоторого предела, после чего происходила деградация (генерация более не наблюдалась).

Для формирования рассеивающей цилиндрической линзы на передней грани лазера применяли селективный травитель (B) $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 1 : 8 : 1 со скоростью травления GaAs $4 \mu\text{m}/\text{min}$ для GaAs и на порядок меньшую — для InGaP.

Морфология травленной поверхности ЛД измерялась при помощи атомно-силового микроскопа TopoMetric

TMX-2100 Accurex в контактном режиме. Использовались V-образные Si_3N_4 кантилевиры с пирамидальными зондами с радиусом закругления острия $\approx 50 \text{ nm}$ и отношением высоты зонда к ширине основания (отношение аспекта) 1 : 1.

Измерения ширины диаграммы направленности излучения ЛД в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, проводились с помощью моторизованного гониометрического устройства. ЛД устанавливались на гониометрическую головку, поворот которой осуществлялся шаговым двигателем. Угловая апертура приемного устройства составляла 0.5° . Измерения интенсивности излучения ЛД проводились при помощи Si фотодиода по селективной методике с синхронным детектированием. Модуляция интенсивности излучения ЛД проводилась модуляцией тока накачки прямоугольными импульсами.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны профили поверхности излучающей апертуры ЛД после селективного травления. На них выделяются вытравленные волноводные слои и активная область ЛД. В [10] селективное химическое травление применялось для определения толщины слоев лазерной структуры методом АСМ. Из рис. 1 видно, что толщины ограничивающих волноводных слоев и активной области ЛД достаточно хорошо согласуются с величинами, заданными при выращивании гетероструктуры.

В зависимости от типа используемого травителя на излучающей поверхности формируется рельеф, имеющий форму собирающей или рассеивающей линзы. Наблюдаемые на профилях поверхности неровности связаны с неравномерностью и неоднородностью травления, поскольку используемые травители не обладали полирующим действием. Как следует из данных измерений скорости травления различных материалов, приведенных в предыдущем разделе, травитель (A) является более селективным, чем (B). Это подтверждается данными АСМ: приведенными на рис. 1: ступени на профилях 1–3, соответствующие гетеропереходам InGaP/GaAs, являются более резкими, чем на структуре, обработанной травителем (B) (кривая 4). В данном случае менее селективный травитель является предпочтительным, поскольку более плавный профиль 4 ближе к желаемому результату — формированию цилиндрической поверхности.

Как видно из рис. 1, после 7.5 s травления перепад высот на гетерогранице InGaP/GaAs составляет 600 nm. При дальнейшем травлении перепад высот практически не меняется, что связано с затруднением массопереноса в канавке на месте вытравленного слоя InGaP, вследствие чего скорости травления GaAs и InGaP выравниваются.

На рис. 2 приведены угловые зависимости интенсивности излучения ЛД при различных временах травления. После 7.5 s травления ширина диаграммы направленности на уровне 1/2 максимума уменьшилась на 7° (рис. 3).

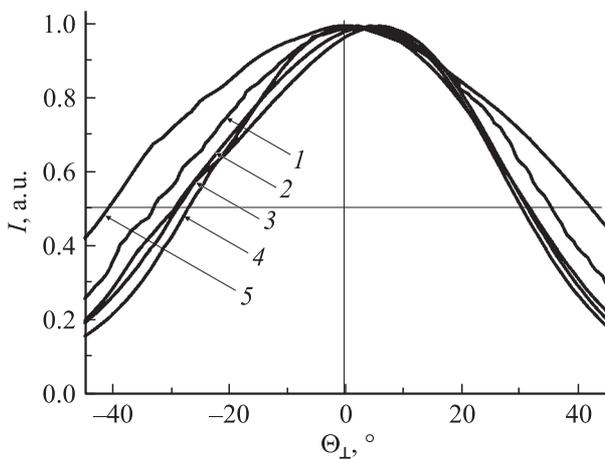


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу при различных временах травления лазерного диода: 1–4 — травитель (А), 5 — травитель (В). Время травления t_e , s: 1 — 0, 2 — 7.5, 3 — 15, 4 — 30, 5 — 3.

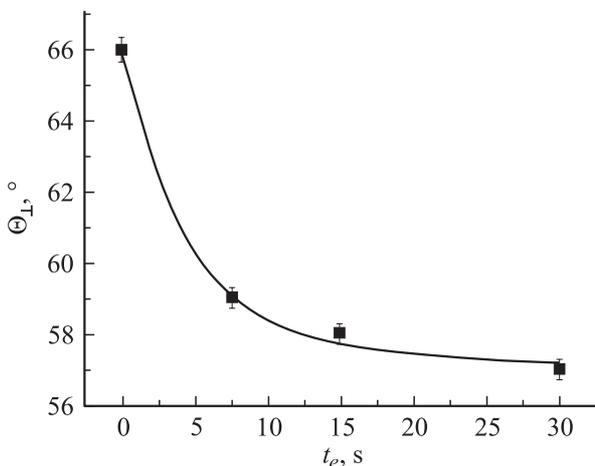


Рис. 3. Кривая зависимости ширины диаграммы направленности от времени травления.

При дальнейшем травлении ширина ДН изменялась незначительно. Как видно из рис. 1, наибольшее изменение геометрии излучающей области наблюдается при первом травлении, дальнейшее травление изменяет геометрию активной области незначительно, что обуславливает соответствующее незначительное изменение диаграммы направленности. После 30 s травления ширина диаграммы направленности уменьшилась на $\approx 10^\circ$. После 45 s травления генерация ЛД не наблюдалась, что, по видимому, связано с деградацией лазерной структуры.

После обработки ЛД в травителе (В) наблюдалось уширение диаграммы направленности до 82% (рис. 2). Таким образом, подбирая соответствующий травитель, можно изменять ширину диаграммы направленности ЛД как в сторону сужения, так и в сторону уширения. Наибольший практический интерес вызывает сужение

диаграммы направленности. В дальнейшем, вероятно, в результате оптимизации состава травителя и режима травления возможно достижение более сильного эффекта сужения диаграммы направленности ЛД в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу.

Особенностью приведенного в данной работе способа изменения диаграммы направленности ЛД является то, что требуемая форма излучающей поверхности получается в результате самоформирования. В случае, если для фокусировки излучения ЛД используется внешняя цилиндрическая линза, необходимо обеспечить совмещение оси линзы с излучающей областью ЛД, а также параллельность оси линзы и плоскости p - n -перехода, что требует точной юстировки. В случае применения метода селективного травления указанное согласование обеспечивается автоматически, что является несомненным его преимуществом.

Заключение

Таким образом, в данной работе показана возможность управления шириной диаграммы направленности полупроводниковых лазеров путем формирования на их излучающей поверхности цилиндрической линзы методом селективного травления.

Данная работа выполнена при поддержке совместной Российско-американской программы „Фундаментальные исследования и высшее образование“, Минобрнауки РФ и Американского фонда гражданских исследований и развития (Civilian Research and Development Foundation (CRDF)) (проект REC-NN-001-1).

Список литературы

- [1] Алфёров Ж.И. // ФТП. 1998. Т. 32. С. 3–18.
- [2] Asonen H., Ovtchinnikov A., Zhang G. et al. // IEEE Quantum Electron. 1994. Vol. 30. P. 415.
- [3] Ohcudo M., Ijichi T., Iketani A. et al. // IEEE Quantum Electron. 1994. Vol. 30. P. 408.
- [4] Wu M.C., Chen Y.K., Hong M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 59. P. 1046–1048.
- [5] Авруцкий И.А., Дианов Е.М., Звонков Б.Н. и др. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. С. 123.
- [6] Звонков Н.Б., Ахлестина С.А., Еришов А.В. и др. // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 3. С. 217–218.
- [7] Scifres D.R., Streifer W., Burnham D.R. // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 29. P. 23–25.
- [8] Звонков Н.Б., Звонков Б.Н., Еришов А.В. и др. // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 7. С. 622–624.
- [9] Авруцкий И.А., Батукова Л.М., Дианов Е.М. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 921–924.
- [10] Levicev V.V., Maximov G.A., Mishkin V.P. et al. // PLDS. 2003. N 3/4. P. 277–282.