

06.3;07

©1995

О СЕЛЕКЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ МОД В InGaAsP ЛАЗЕРАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ ЗЕРКАЛ

*Ж.И.Алферов, М.А.Иванов, Ю.В.Ильин,
А.В.Лютецкий, Н.А.Пихтин, И.С.Тарасов*

Вопрос селекции поперечных мод в лазерных диодах тесно связан с историей развития конструкций полосковых лазеров, поскольку основным требованием к ним является генерация одномодового излучения [1]. Чаще всего эта задача решалась с применением ряда технологических приемов, обеспечивающих уменьшение поперечных размеров или эффективного показателя преломления волновода лазерного диода, позволяющих удерживать только основную поперечную моду [1-4,7]. В последнее время появились конструктивные решения, направленные на увеличение мощности излучения одномодовых лазеров за счет расширения волновода (W) [5,6], что проявилось в ослаблении селективных волноводных свойств [7]. Это стимулировало поиск дополнительных методов селекции поперечных мод в лазерных диодах. Ряд авторов предприняли попытки произвести селекцию поперечных мод посредством нанесения маски из просветляющих покрытий на зеркала резонатора Фабри-Перо [8-10]. В этом случае селекция мод достигалась за счет уменьшения коэффициента отражения в областях резонатора лазерного диода с просветляющим покрытием. Однако изготовление таких конструкций связано с проведением фотолитографических операций на зеркалах Фабри-Перо, что всегда сопряжено с большими трудностями.

Основным результатом настоящей работы является обнаружение эффекта селекции поперечных мод в полосковых лазерах за счет угловой зависимости коэффициента отражения диэлектрических покрытий зеркал лазерного диода.

Как известно, коэффициент отражения зависит от угла падения излучения на отражающую поверхность [11] и для всех углов, отличных от нормального, имеет преобладающее значение для излучения с ТЕ поляризацией [11,12]. Мы рассматривали излучение с ТЕ поляризацией, распространяющееся внутри волновода лазерного диода. На рис. 1 приведены расчетные зависимости коэффициента отражения от угла падения излучения на торцевую грань, полу-

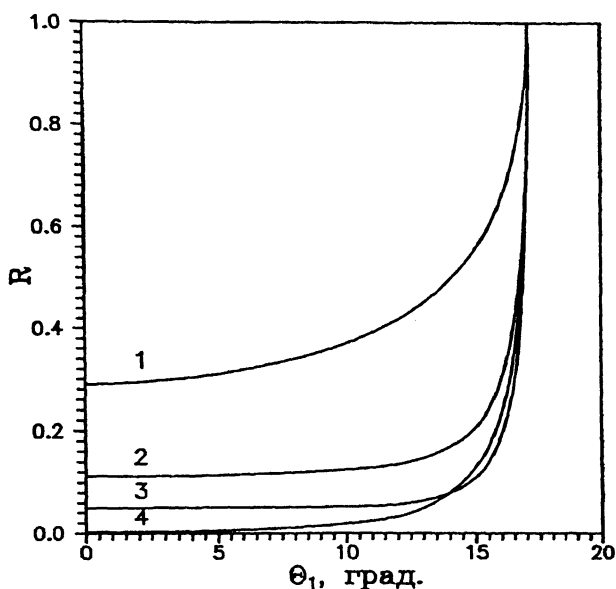


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения от угла падения излучения с ТЕ поляризацией на торцевую грань лазерного диода, полученную скалыванием (1), и с просветляющими покрытиями толщиной $h = \frac{\lambda}{4n_2}$: LiF (2), SiO₂ (3) и Si₃N₄ (4).

ченную скалыванием (кривая 1) и с различным типом диэлектрических покрытий. Видно, что крутизна зависимостей коэффициента отражения минимальна для зеркал, полученных скалыванием, и увеличивается с возрастанием показателя преломления диэлектрического покрытия (n_2). Используя угловые зависимости коэффициента отражения, были рассчитаны зависимости изменения внешних оптических потерь ($\Delta\alpha = \alpha_{AR+HR}^{\text{внеш}} - \alpha_0^{\text{внеш}}$) для лазерного диода без диэлектрических покрытий ($\alpha_0^{\text{внеш}}$) и после нанесения просветляющих (AR) и высокоотражающих (HR) покрытий ($\alpha_{AR+HR}^{\text{внеш}}$), см. рис. 2. Величина коэффициента отражения высокоотражающего покрытия была больше 96%, поэтому в расчетах мы пренебрегли его зависимостью от угла падения излучения и принимали равным единице.

Из полученных зависимостей (рис. 2) следует, что нанесение просветляющего покрытия на зеркала лазерного диода селективно изменяет внешние оптические потери. Величина показателя преломления диэлектрической пленки определяет ее селективные отражательные свойства. Если $n_2 < \sqrt{n_1 n_3}$ (где $n_1 = 3.4$ — эффективный показатель пре-

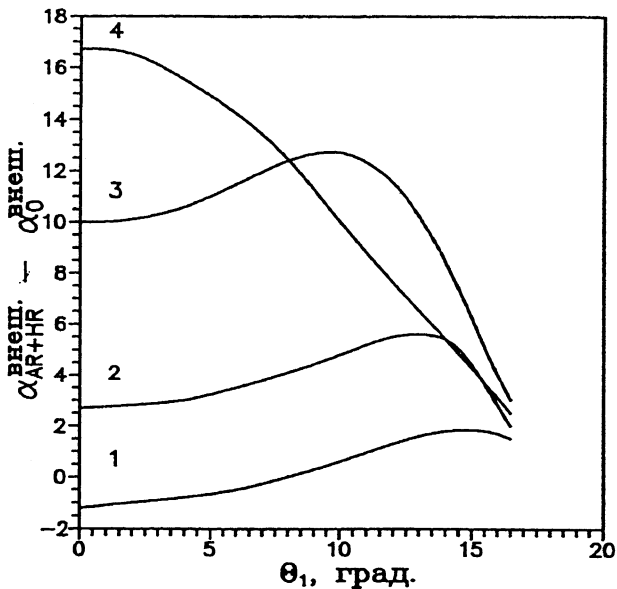


Рис. 2. Зависимость изменения внешних оптических потерь ($\alpha_{\text{AR+HR}}^{\text{внеш.}} - \alpha_0^{\text{внеш.}}$) от угла падения излучения на торцевую грань лазерного диода после нанесения просветляющих покрытий. 1 — $n_2 = 1.38$, 2 — $n_2 = 1.46$, 3 — $n_2 = 1.65$ и 4 — $n_2 = 1.95$. На вторую грань лазерного диода с длиной резонатора $L = 1$ мм нанесено высокоотражающее покрытие с $R > 0.96$.

ломления волновода, $n_3 = 1$), то излучение, распространяющееся под большими углами к нормали (моды высших порядков), претерпевает большие потери, чем излучение, падающее на зеркало резонатора под углами, близкими к нормали (рис. 2, кривые 1, 2). В случае, когда $n_2 > \sqrt{n_1 n_3}$, наблюдался обратный эффект (рис. 2, кривая 4). Поэтому для селекции мод высших порядков в лазерном диоде наилучшим образом подходят материалы LiF ($n_2 = 1.38$), SiO₂ ($n_2 = 1.46$) и другие с малым значением n_2 , а не широко используемые в практике Si₃N₄ ($n_2 = 1.95$) и Al₂O₃ ($n_2 = 1.69$). Из-за гигроскопичности и сложности технологического процесса нанесения LiF в эксперименте использовался SiO₂.

Для прямого наблюдения эффекта на серию полосковых лазеров, имеющих различные картины дальнего поля на пороге генерации, поэтапно наносилось диэлектрическое покрытие SiO₂ толщиной $h = \frac{\lambda}{12n_2}$. Были использованы полосковые InGaAsP/InP лазеры ($\lambda = 1.3-1.55$ мкм) типа "мел-

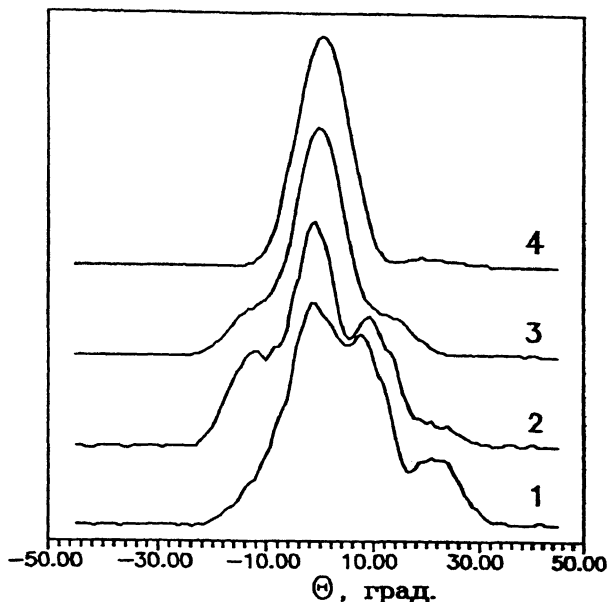


Рис. 3. Изменение картины дальнего поля в плоскости p - n перехода лазерного диода при непрерывной мощности излучения 50 мВт от толщины диэлектрического покрытия SiO_2 . 1 — $h = 0$, 2 — $h = \frac{\lambda}{12n_2}$, 3 — $h = \frac{\lambda}{6n_2}$ и 4 — $h = \frac{\lambda}{4n_2}$.

кая меза". Лазерные диоды имели высокоотражающее шестислойное покрытие Si/SiO_2 с коэффициентом отражения $R > 0.96$ и были смонтированы на медном теплоотводе. Просветляющее покрытие SiO_2 наносилось на установке магнетронного напыления. После каждого нанесения диэлектрического покрытия измерялась картина дальнего поля исследуемых лазерных диодов.

На рис. 3 приведены зависимости распределения интенсивности дальнего поля для различных толщин диэлектрического покрытия SiO_2 на зеркале резонатора Фабри-Перо при мощности излучения 50 мВт в непрерывном режиме генерации. Во всех лазерных диодах с лепестком основной поперечной моды (рис. 3, кривая 1) нанесение диэлектрического покрытия приводило к коррекции картины дальнего поля. Причем максимальный селективный эффект наблюдался для пленок толщиной $h_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4n_2}$. Одновременно с коррекцией наблюдалось некоторое возрастание пороговой плотности тока (рис. 4, кривая 1). В лазерных диодах, имеющих на пороге генерацию на первой поперечной моде, селекцию мод произвести не удавалось, в то время как

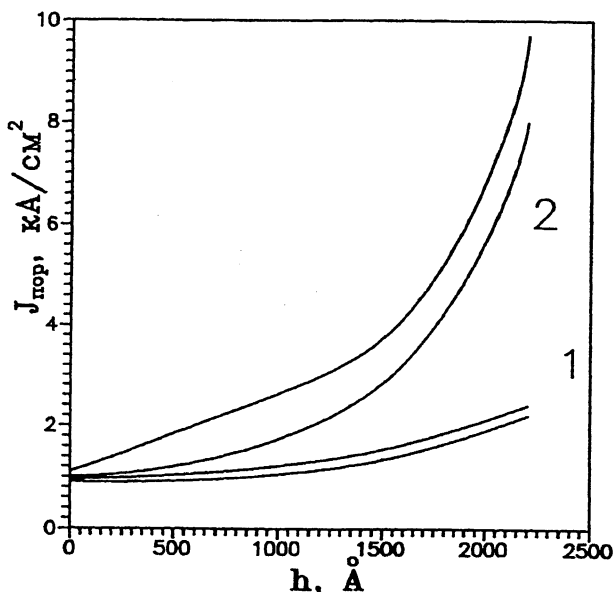


Рис. 4. Зависимость пороговой плотности тока от толщины просветляющего покрытия SiO_2 для $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ ($\lambda = 1.3 \text{ мкм}$) лазеров, излучающих на пороге генерации основную поперечную моду (1) и моды высших порядков (2).

пороговая плотность тока в них резко возрастала (рис. 4, кривая 2). Увеличение толщины диэлектрического покрытия больше h_{max} приводило к уменьшению эффекта и при $h = \frac{\lambda}{2n_2}$ селекция мод высших порядков отсутствовала, а картина дальнего поля соответствовала картине дальнего поля лазера со сколотыми гранями.

Проводился аналогичный эксперимент по нанесению просветляющего покрытия Si_3N_4 ($n_2 = 1.95$). Как и следовало ожидать (рис. 2, кривая 4), эффекта коррекции картины дальнего поля в исследуемых лазерах не наблюдалось.

Практическая ценность обнаруженного эффекта заключается в возможности улучшения картины дальнего поля в плоскости p - n перехода в лазерах повышенной оптической мощности с увеличенной W и ослабленными селективными свойствами.

Таким образом, в результате проведенной работы был обнаружен и продемонстрирован эффект селекции поперечных мод высших порядков в полосковых лазерных диодах. Показано, что для этих целей в качестве просветляющих покрытий целесообразно использовать материалы с низким значением показателя преломления LiF , SiO_2 и др.

В заключение авторы выражают благодарность П. Студенкову за помощь в проведении расчетов, А.Ю. Лешко и А.В. Мурашовой за предоставленные лазерные структуры, Т.Н. Дрокиной, Н.Д. Ильинской, Н.Ф. Кадошук, Е.И. Кухаревой, Т.А. Налет и Г.Б. Прокопенковой за помощь в подготовке образцов.

Список литературы

- [1] Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981. Т. 2. С. 238.
- [2] Aiki K., Nakamura M., Umeda T. // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 30. N 3. P. 649-652.
- [3] Tsukada T. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 4. P. 4899-4902.
- [4] Kirkby P.A., Thompson G.H.B. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 4. P. 4578-4581.
- [5] Бершнев И.Э., Бородинский М.Л., Горбачев А.Ю., Ильин Ю.В., Ильинская Н.Д., Лившиц Д.А., Станкевич А.Л., Рафаилов Э.У., Тарасов И.С. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 7. С. 41-46.
- [6] Бородинский М.Л., Гарбузов Д.З., Горбачев А.Ю., Ильинская Н.Д., Лившиц Д.А., Марьянский Д.М., Станкевич А.Л., Рафаилов Э.У., Тарасов И.С. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 11. С. 78-84.
- [7] Botez D. // IEEE J. Quantum Electronics. 1982. QE-18. N 5. P. 865-870.
- [8] Ninagawa O., Miyazaki Y., Akae Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1979. V. 18. P. 967-974.
- [9] Wittke J.P., Ladany I. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. P. 3122-3124.
- [10] Shigihara K., Nagai Y., Kokimoto S., Ikeda K. // IEEE J. Quant. Electr. 1994. V. 30. N 8. P. 1683-1686.
- [11] Борн М., Вольф Э. Основы Оптики. М., 1973.
- [12] Ikegami T. // IEEE J. Quant. Electric. QE-8. 1977. V. 8. N 2. P. 479-483.

Физико-технический
институт им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
29 декабря 1994 г.