

ОПТИЧЕСКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ В СИММЕТРИЧНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ PbS/PbSSe/PbSnSe

Ю.Г. Селиванов, А.П. Шотов

Проведен сравнительный анализ волноводных свойств ДГС-РО PbS/PbSSe/PbSnSe и ДГС PbSSe/PbSnSe структур. Показано, что снижение порога генерации в ДГС-РО лазерах обусловлено более эффективным, чем в ДГС, оптическим ограничением.

Полупроводниковые лазеры среднего ИК диапазона ($6 \div 40$ мкм) на основе PbSnSe применяются в спектроскопии высокого разрешения, газоанализе и контроле загрязнения атмосферы. Вместе с тем актуальной задачей является снижение пороговых токов и повышение рабочих температур данных лазеров. Применение двойных гетероструктур с отдельным электронным и оптическим ограничением (ДГС-РО) PbS/PbSSe/PbSnSe позволило получить импульсно-периодическую генерацию при температурах до 218 К ($\lambda = 6,5$ мкм) /1/.

В настоящей работе проведено сравнительное исследование оптического ограничения в лазерных гетероструктурах двух типов: пятислойной ДГС-РО PbS/PbS_{0,4}Se_{0,6}/Pb_{0,95}Sn_{0,05}Se и обычной трехслойной ДГС PbS_{0,4}Se_{0,6}/Pb_{0,95}Sn_{0,05}Se, изготовленных методом молекулярной эпитаксии с горячей стенкой /1,2/. Концентрация носителей в активной области этих лазеров составляла $(2 \div 3) \cdot 10^{17}$ см⁻³, а в прилегающих слоях PbSSe и PbS — $(1 \div 2) \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Для получения оптических характеристик слоев, составляющих гетероструктуру (показателя преломления n и эффективного показателя преломления $n^* = n - (dn/d\lambda)\lambda$), были изготовлены тонкие эпитаксиальные пленки того же состава на изолирующих подложках BaF₂ и KCl методом молекулярной эпитаксии с горячей стенкой /2/. Метод определения n и n^* из спектров пропускания описан в /3/.

На рис. 1 для этих слоев приведена зависимость показателя преломления n и эффективного показателя преломления n^* от концентрации носителей при 77 К на длине волны, соответствующей ширине запрещенной зоны в Pb_{0,95}Sn_{0,05}Se. Здесь же схематически изображен профиль n для ДГС-РО лазера. Скачок показателя преломления $\Delta n/n$ на гетерограницах PbS/PbSSe и PbSSe/PbSnSe составляет $\sim 15\%$, что должно приводить к эффективному оптическому ограничению как в ДГС-РО так и в ДГС лазерах.

Параметр оптического ограничения Γ для ДГС и ДГС-РО с $w = 2$ мкм (рис. 1) рассчитывался на основе моделей трехслойного и, соответственно, пятислойного симметричного диэлектрического планарного волновода /4/. Значения показателей преломления брали из рис. 1. Результаты расчета представлены на рис. 2. Видно, что в ДГС-РО структуре зависимость $\Gamma(d)$ приближается к линейной, тогда как в обычной ДГС ($w = d$) она квадратична при $d < 0,5$ мкм. Наличие отдельного широкого волновода и больший суммарный скачок показателя преломления в ДГС-РО лазере уменьшает дифракцию в активном слое и замедляет убывание Γ с уменьшением d . Такое увеличение параметра оптического ограничения (особенно в области $d < 0,5$ мкм) при переходе от ДГС к ДГС-РО позволяет снизить пороговую плотность тока.

Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей пороговой плотности тока от толщины активной области для ДГС и ДГС-РО лазеров ($w = 2$ мкм) при 77 К проводится на рис. 3. Измерения J_{II} выполнялись при импульсной накачке (1 мкс, 400 Гц). Расчет зависимостей $J_{II}(d)$ проводился на основании соотношения /4/

$$J_{II} = Cd + B[\Gamma a_3 + (1 - \Gamma) a_{1,2} + (1/L) \ln(1/R)] d/\Gamma, \quad (1)$$

где L — длина резонатора; R — коэффициент отражения граней резонатора; a_3 и $a_1 \approx a_2$ — коэффициенты поглощения в активной области и в слоях PbS и PbSSe соответственно; C и B — не зависящие от d и Γ множители. Заметим, что для всех лазерных структур была экспериментально получена линейная зависимость $J_{II}(1/L)$, что подтверждает предполагаемую в (1) линейную зависимость усиления от концентрации инжек-

тированных носителей. Коэффициенты поглощения a_3 и $a_{1,2}$ вычисляли на основании классического выражения для поглощения на свободных носителях [3,5]; $R = [(n-1)/(n+1)]^2$; n определяли из рис. 1; значения Γ брали из рис. 2. Коэффициенты C и B определяли на основании зависимости $J_{\Pi}(1/L)$ для ДГС с $d = 3$ мкм, используя тот факт, что $\Gamma(d = 3) \approx 1$. Были получены значения $C \approx 2 \cdot 10^6$ А/см³ и $B \approx 7 \cdot 10^4$ А/см².

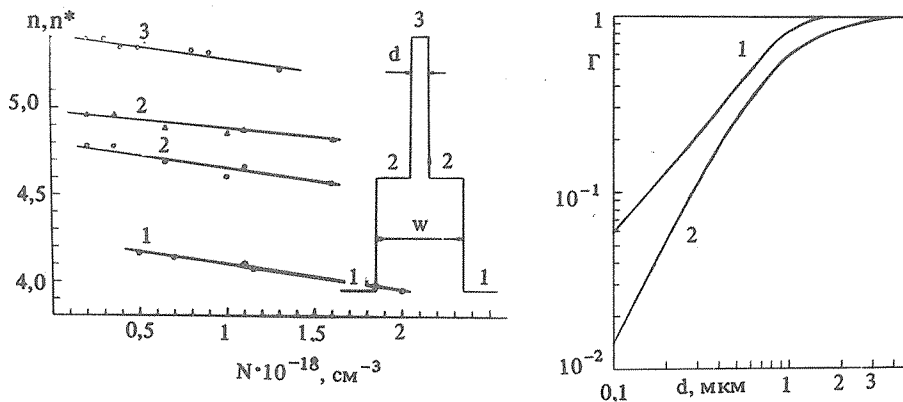


Рис. 1. Зависимость показателя преломления n (о) и эффективного показателя преломления n^* (Δ) от концентрации носителей N на длине волны 10,6 мкм и профиль показателя преломления для ДГС-РО лазера PbS/PbSSe/PbSnSe при 77 К: 1 – PbS; 2 – PbS_{0.4}Se_{0.6}; 3 – Pb_{0.95}Sn_{0.05}Se; d – толщина активного слоя; w – толщина оптического волновода.

Рис. 2. Зависимость параметра оптического ограничения Γ в ДГС-РО с $w = 2$ мкм (1) и ДГС (2) от толщины активного слоя d для основной TE₀ моды при 77 К.

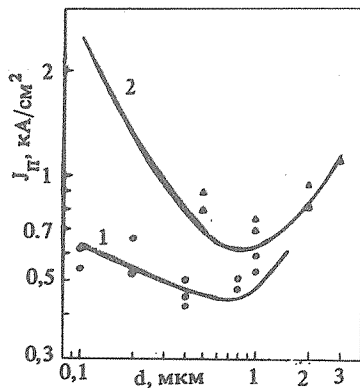


Рис. 3. Зависимость плотности порогового тока J_{Π} от толщины активного слоя d при 77 К для ДГС-РО с $w = 2$ мкм (о, 1) и ДГС (Δ, 2) лазеров с $L = 500$ мкм. Точки – эксперимент, кривые – расчет.

Из рис. 3 видно, что в соответствии с расчетом во всей области изменения d экспериментальные значения J_{Π} для ДГС-РО ниже J_{Π} для ДГС. Такой характер зависимости $J_{\Pi}(d)$ в ДГС-РО лазерах указывает на осуществление раздельного электронного и оптического ограничений в этих структурах. Сравнительно слабый рост J_{Π} с уменьшением d при $d < 0,5$ мкм в ДГС-РО делает эту структуру более предпочтительной для создания лазеров с ультратонкой активной областью. Отметим, что J_{Π} для ДГС-РО при $d = 0,4$ мкм составляет 430 А/см², что является наименьшим из достигнутых для лазеров на PbSnSe значением пороговой плотности тока.

Еще одним указанием на осуществление оптического ограничения в ДГС-РО лазере служит сравнение экспериментального и расчетного значений угла расходимости Θ_1 в перпендикулярном плоскости активного слоя направлении. Угол Θ_1 , измеренный на уровне половины максимальной интенсивности для двух ДГС-РО лазеров с одинаковыми $w = 3$ мкм, но разными $d = 0,2$ и $0,4$ мкм, практически одинаков и состав-

ляет 115° . Расчет на основе модели пятислойного волновода /4/ дает $\Theta_1 \approx 104^\circ$. Эти факты указывают на то, что излучение в ДГС-РО лазере распространяется в волноводе шириной w .

Перестройка частоты излучения в ДГС-РО лазерах изучалась при параллельной накачке импульсным (1 мкс, 400 Гц) и постоянным током при 77 К. Скорости плавной $d\nu_{II}/dJ$ (отдельной моды) и грубой $d\nu_{I}/dJ$ (переход на другие моды) токовой перестройки составили $2 \div 4$ и $35 \text{ см}^{-1} \text{ А}^{-1}$ соответственно. Диапазон перестройки отдельных мод составил $1 \div 3 \text{ см}^{-1}$, а полный диапазон квазинепрерывной токовой перестройки частоты — 68 см^{-1} . Скорости плавной токовой и температурной перестройки связаны соотношением

$$d\nu_{II}/dJ = (d\nu_{II}/dT) (dT/dJ). \quad (2)$$

Величину $d\nu_{II}/dT = -(\nu/n^*) (dn/dT)$ можно оценить на основании оптических измерений. Из рис. 1 $n^* = 4,8 \div 4,9$, а если принять линейную зависимость n от T в области $77 \div 300 \text{ К}$, то получим $-dn/dT \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. С другой стороны, $dT/dJ = (d\nu_{I}/dJ) (d\nu_{I}/dT)^{-1}$, где скорость грубой перестройки частоты лазера с температурой $d\nu_{I}/dT = 10^4 (dE_g/dT)/1,24$ для исследуемых структур составляет $3,9 \text{ см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Подставляя найденные величины в (2), получим $d\nu_{II}/dJ \approx 2 \text{ см}^{-1} \text{ А}^{-1}$, что согласуется с измеренной плавной скоростью перестройки.

Таким образом, в настоящей работе показано, что осуществление раздельного электронного и оптического ограничения в ДГС-РО лазерах PbS/PbSSe/PbSnSe позволило получить при 77 К рекордно низкие для лазеров на PbSnSe значения плотности порогового тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шотов А. П., Селиванов Ю. Г. Письма в ЖТФ, 12, № 22, 1352 (1986).
2. Вяткин К. В., Шотов А. П., Урсаки В. В. Изв. АН СССР, неорг. матер., 17, 24 (1981).
3. Вяткин К. В., Шотов А. П. ФТП, 14, 1331 (1980).
4. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. М., Мир, 1981.
5. Синятынский А. А., Шотов А. П. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 2, 30 (1984).

Поступила в редакцию 25 декабря 1986 г.