

ОПТИЧЕСКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ НА ОСНОВЕ $\text{FbS}_{1-x}\text{Se}_x$ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ПРОФИЛЕМ КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

А. А. Снятынский, А. П. Шотов

УДК 621.373.8

Получена зависимость показателя преломления и коэффициента поглощения на свободных носителях от концентрации носителей для $T = 80 \text{ K}$ и 8 K в слоях $\text{FbS}_{1-x}\text{Se}_x$, выращенных методом "горячей стенки". Рассчитанная пороговая плотность тока J_n хорошо согласуется с измеренной величиной J_n .

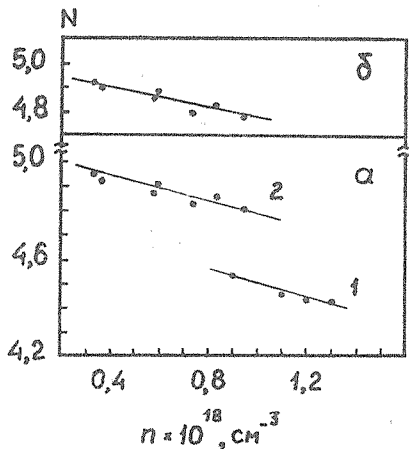
Для расширения практических применений полупроводниковых лазеров на основе $\text{FbS}_{1-x}\text{Se}_x$ требуется дальнейшее улучшение их рабочих характеристик и, прежде всего, уменьшение порогового тока и исключение деградации при температурных циклах. Деградация чаще всего наблюдается у лазеров на основе гетероструктур и является следствием рассогласования кристаллических решеток.

В ряде работ [1,2] было показано, что благодаря сильной зависимости показателя преломления от концентрации носителей в полупроводниках типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ можно обеспечить существенное оптическое и электронное ограничение, используя гомоструктуры с контролируемым профилем концентрации носителей. Это позволяет снять проблему согласования кристаллических решеток. Уменьшение концентрации носителей в активной области этих структур и, следовательно, уменьшение потерь на поглощение позволяет также снизить пороговые плотности тока.

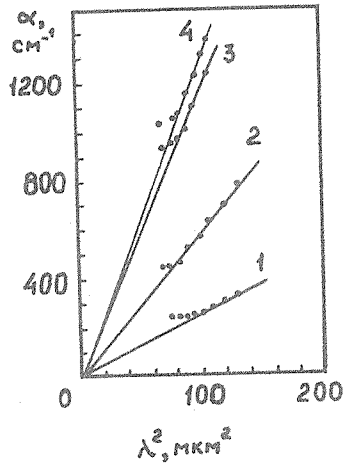
В настоящей работе исследовалось оптическое ограничение в гомоструктурах n^+-p-p^+ на основе $\text{FbS}_{0,65}\text{Se}_{0,35}$ с контролируемым профилем концентрации носителей. Показатель преломления и

поглощение на свободных носителях в слоях $\text{PbS}_{0,65}\text{Se}_{0,35}$ в зависимости от концентрации носителей определялись по спектру пропускания при температурах 80 К и 8 К /3/. Эпитаксиальные слои с различной концентрацией носителей выращивались методом "горячей стенки" на свежесколотых поверхностях КС1 по методике, описанной в работе /4/.

На рис. 1 показана зависимость показателя преломления тонких пленок $\text{PbS}_{0,65}\text{Se}_{0,35}$ и PbS от концентрации носителей n на длине волны, соответствующей краю фундаментального поглощения в $\text{PbS}_{0,65}\text{Se}_{0,35}$. Наблюдаемое уменьшение показателя преломления с ростом концентрации носителей позволяет реализовать оптическое ограничение в лазерных структурах с контролируемым профилем концентрации носителей. Скачок показателя преломления $\Delta N/N$ на границе двух слоев $\text{PbS}_{0,65}\text{Se}_{0,35}$ с концентрацией носителей $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ на длине волны 4,8 мкм при $T = 80 \text{ К}$ составляет 11%, что значительно выше $\Delta N/N = 0,02\%$ в диффузионных лазерах. Можно заметить, что в гетероструктурах $\text{PbS} - \text{PbS}_{0,65}\text{Se}_{0,35}$ $\Delta N/N$ получается такого же порядка ($\sim 18\%$).



Р и с. 1. Зависимость показателя преломления $\text{PbS}_{1-x}\text{Se}_x$ от концентрации носителей: а - $T = 80 \text{ К}$; $\lambda_0 = 4,8 \text{ мкм}$; 1 - $x = 0$; 2 - $x = 0,35$; б - $T = 8 \text{ К}$; $\lambda_0 = 5,3 \text{ мкм}$; $x = 0,35$



Р и с. 2. Зависимость коэффициента поглощения $\text{PbS}_{0,65}\text{Se}_{0,35}$ от квадрата длины волны при $T = 80$ К и концентрациях носителей: 1 - $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 2 - $1,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3 - $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 4 - $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Зависимость коэффициента поглощения α от длины волны приведена на рис. 2. При длинах волн более 8 мкм $\alpha = A\lambda^2$. Это выражение совпадает по виду с классическим выражением для поглощения на свободных носителях, в котором $A = e^3/4\pi\epsilon_0^2 m^2$. Рассчитанное для исследуемых образцов значение $A = 3 \cdot 10^{-10}$. Близкая величина ($4 \cdot 10^{-10}$) получается из экспериментальных данных (рис. 2). Таким образом, в указанной области длин волн поглощение на свободных носителях является преобладающим.

Пороговый ток инжекционных лазеров при низких температурах определяется выражением $J_{\text{п}} = [(\alpha/V) + (1/LV)\ln(1/R)]ad/T$, где $V = \rho d$, ρ - фактор усиления, L - длина резонатора, R - коэффициент отражения граней резонатора и d - толщина активной области структуры. Это выражение было использовано для аппроксимации экспериментальной зависимости $J_{\text{п}}$ от a для $T = 4,2$ К. Исследованные структуры были изготовлены по методике, описанной в работе /5/. Концентрация носителей заряда в активной области n_2 была $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а в прилегающих

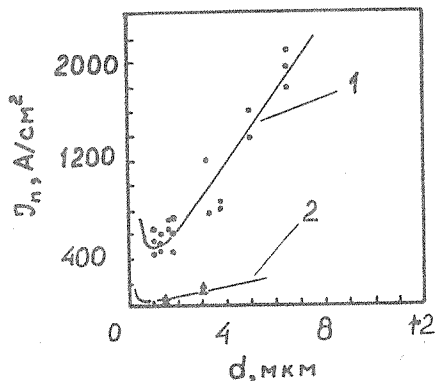
слой $n_1 = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Лазеры работали на ТЕ модах при $\lambda_0 = 5,3 \text{ мкм}$. Расчет коэффициента оптического ограничения Γ был сделан на основе модели симметричного диэлектрического плоского волновода. Решение волнового уравнения для четных ТЕ мод позволяет представить Γ в виде /6/

$$\Gamma = \left(1 + \frac{\cos^2(xd/2)}{y[d/2 + (1/x)\sin(xd/2)\cos(xd/2)]} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где x и y находятся из системы уравнений

$$\begin{aligned} (xd/2)\text{tg}(xd/2) &= yd/2, \\ (xd/2)^2 + (yd/2)^2 &= (N_2^2 - N_1^2)(\pi a/\lambda_0)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

а N_2 и N_1 являются действительными частями комплексных показателей преломления соответственно активной области и прилегающих слоев, которые можно найти из рис. 1. Вкладом мнимых частей комплексного показателя преломления K_1 и K_2 ($K = \alpha \lambda/4\pi$) при расчетах можно пренебречь вследствие их малости по сравнению с действительными частями. Уравнения (2) решались численно на



Р и с. 3. Зависимость пороговой плотности тока от толщины активной области: 1 - $L = 560 \text{ мкм}$; $n_2 = 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 2 - $L = 350 \text{ мкм}$; $n_2 = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Таблица I.

Значения коэффициента оптического ограничения Γ для трехслойного симметричного диэлектрического волновода.

d , мкм	0,5	1	2	3	4	5	6
$n_2 = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	0,41	0,74	0,93	0,97	0,99	-	-
$n_2 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	0,35	0,69	0,91	0,96	0,98	0,99	-
$n_2 = 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	0,28	0,61	0,87	0,95	0,97	0,98	0,99

ЭВМ методом последовательных приближений. Расчет проводился для основной моды TE_0 . Результаты вычислений представлены в таблице.

Экспериментальные и расчетные зависимости J_n от d изображены на рис. 3. Кривая 1 соответствует структурам с $n_2 = 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Она рассчитывалась из формул для J_n при подстановке значений $\alpha = 7,6 \text{ см}^{-1}$ и $\beta = 0,045 \text{ см/А}$, найденных из зависимости J_n от l/L для структур с $d = 1,8 \text{ мкм}$ при 4,2 К. Экспериментальные точки для минимальных порогов совпадают с оптимальным расчетным значением $d = 1 \text{ мкм}$ при этой концентрации. Расчетная зависимость J_n от d для $n_2 = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (кривая 2) получена при подстановке $\alpha = 4 \text{ см}^{-1}$ и $\beta = 0,5 \text{ см/А}$, найденных для структур с $d = 1,5 \text{ мкм}$. Необходимо отметить, что снижение концентрации в активной области структуры до $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ привело к существенному снижению J_n до 25 А/см^2 при $d = 1,5 \text{ мкм}$. Оптимальные значения d при этой концентрации смещаются в область $0,6 \pm 0,8 \text{ мкм}$. Это очевидно связано с увеличением Γ из-за увеличения показателя преломления N_2 при фиксированной длине волны излучения.

Таким образом, в настоящей работе проведен расчет зависимости пороговой плотности тока от толщины активной области для структур с контролируемым профилем концентрации носителей на основе $\text{PbS}_{0,65}\text{Se}_{0,35}$. Экспериментально измеренные плотности тока находятся в согласии с проведенным расчетом. Это позволяет выбрать оптимальный размер активной области лазера. Показано

также, что пороговые токи таких структур можно существенно снизить путем снижения концентрации носителей в активной области структуры.

Поступила в редакцию
6 июля 1983 г.

Л и т е р а т у р а

1. M. Oton, A. Zvezdan, *Appl. Phys. Lett.*, 37, 7 (1980).
2. К. В. Вяткин, А. П. Шотов, Краткие сообщения по физике ФИАН № 4, 42 (1982).
3. А. А. Синятынский, А. П. Шотов, *ФТП*, 16, 2187 (1982).
4. К. В. Вяткин, А. П. Шотов, В. В. Урсаки, *Изв. АН СССР, сер. Неорг. материалы*, 17, 24 (1981).
5. А. П. Шотов, А. А. Синятынский, *Письма в ЖТФ*, 9, 881 (1983).
6. Х. Кейси, М. Паниш, *Лазеры на гетероструктурах*, "Мир", М., 1981 г.