

## НЕОДНОРОДНЫЕ ВОЛНОВОДЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$

Ю. А. Быковский, А. И. Ермаков, В. Л. Смирнов, В. Н. Сороковников, А. Ю. Терезов

При разработке различных функциональных элементов интегральной оптики наряду с другими полупроводниковыми материалами широко используются соединения  $\text{CdS}$  и  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$  [1, 2].

В работе [3] исследуется электрооптическая модуляция излучения в канальном микроволноводе, полученном диффузией селена (Se) через маску в подложку из  $\text{CdS}$ . В некоторых

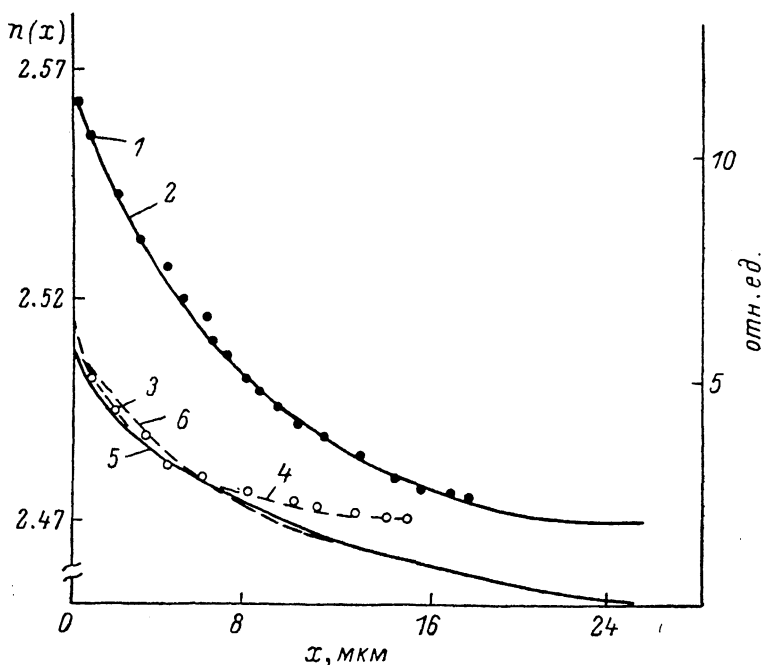


Рис. 1. Различные виды распределений ПП и концентраций по толщине волноводов.

1 —  $n(x)$  в 19-модовом волноводе; 2, 4 — экспоненциальные профили ПП; 3 —  $n(x)$  в 10-модовом волноводе; 5 — сигнал SMI-300, характеризующий концентрационный профиль распределения Se по глубине; 6 — экспоненциальный профиль концентрации (левая шкала относится к кривым 1—4, правая (в отн. ед.) — к кривым 5, 6).

конкретных устройствах, например в направленном ответвителе, предпочтительней использовать полоскового волновода гребенчатого типа, так как, варьируя высоту гребня, можно легко менять связь между волноводами. При изготовлении полоскового волновода возникает вопрос о распределении показателя преломления (ПП) по толщине волноводного слоя, которое, по-видимому, должно хорошо согласоваться с распределением концентрации Se по глубине [4, 5].

Целью настоящей работы явилось исследование концентрационного профиля Se по толщине диффузионного волновода на основе  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ , определение профиля ПП, исследование электрооптической модуляции излучения в полосковом волноводе гребенчатого типа на основе соединения  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ .

Для исследований профиля распределения ПП и концентрационного профиля Se необходимы толстые волноводные слои, в которых могут возбуждаться порядка 10—20 волноводных мод. Эти волноводные структуры получались следующим образом.

В высокоомные подложки из  $\text{CdS}$  (удельное темновое сопротивление  $\rho = 2.18 \cdot 10^{10}$  Ом·см, ориентация (0001)) проводилась диффузия Se в атмосфере селена и серы при температуре 700 °C в течение 46 ч. Ввод излучения ( $\lambda = 0.633$  мкм) в планарный диффузионный волновод осуществлялся с помощью призм из рутила ( $\text{TiO}_2$ ), что позволяло селективно возбудить 19 волноводных мод TE-типа. Оптические потери составили 2—3 дБ/см.

По измеренным значениям эффективных показателей преломления (ЭПП) волноводных мод с помощью ступенчатой аппроксимации функции  $n(z)$  [6, 7] был восстановлен профиль показателя преломления (ПП) волновода (рис. 1, 1), который достаточно хорошо описывается экспоненциальной зависимостью (кривая 2) вида

$$n(x) = n_{\infty} + \Delta n \exp(-x/h),$$

где  $\Delta n = 0.1$  — максимальное изменение ПП волновода,  $h = 8$  мкм — глубина диффузии,  $x$  — расстояние от поверхности волновода,  $z = x/\lambda$ . На рис. 1, 3 показан для примера восстановленный профиль ПП для случая 10-модового волновода, он также описывается экспоненциальной зависимостью (кривая 4).

Измерение концентрационного профиля селена (кривая 5) проводилось на ионном микроскопе-микрoанализаторе SMI-300 фирмы Самеса. Одновременное катодное распыление исследуемого материала первичным ионным пучком и масс-спектральный анализ вторичных ионов

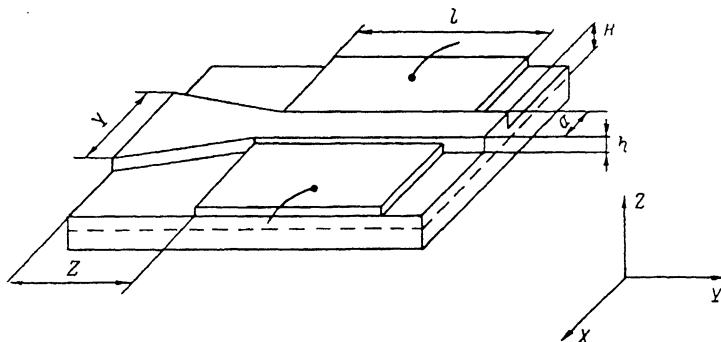


Рис. 2. Схематическое изображение структуры, используемой в качестве волноводного электрооптического модулятора.

позволили регистрировать сигнал, характеризующий концентрационный профиль распределения селена по глубине с локальностью не хуже  $\sim 50$  Å. Диаметр пучка первичных ионов был порядка  $\sim 30 \div 50$  мкм, зона отбора информации при сканировании первичного пучка по поверхности составляла  $1 \times 1$  мм, давление в камере образца ионного микроанализатора  $\sim 10^{-7}$  Тор. Глубина и форма кратера контролировались с помощью профилографа модели 201. Для 19-модового волновода на глубине  $x = 25$  мкм концентрация селена уменьшалась в 18.2 раза по сравнению с его концентрацией на поверхности. Как видно из рис. 1, изменение сигнала, характеризующего концентрацию селена, можно описать с помощью экспоненциальной зависимости  $C(x) \sim \exp[-x/h]$ , где  $h = 8.5$  мкм (кривая 6).

Для создания электрооптического модулятора излучения необходимы волноводные слои малой толщины. Для этих целей указанные выше образцы подвергали механической полировке. В результате был получен волновод, в котором селективно возбуждались две моды обеих поляризаций.

Гребенчатые волноводы формировались методами фотолитографии и ионного травления [8] с последующим замещением масок. По обе стороны от гребня напылялись электроды из алюминия. Полученный полосковый волновод гребенчатого типа имел следующие размеры (рис. 2):  $h = 0.47$  мкм,  $a = 4$  мкм,  $Y = 30$  мкм,  $Z = 3$  мм. Электроды имели размер  $5 \times 0.3$  мм, расстояние между ними составляло 6 мкм. Эффективность призмного ввода излучения в полосковый волновод составляла 8—10 %. На рис. 2 схематически показана структура, используемая в качестве волноводного электрооптического модулятора. Модулирующее электрическое поле прикладывалось в направлении X, а излучение распространялось по волноводу вдоль оси Y.

В гребенчатом волноводе возбуждалась мода низшего порядка и экспериментально наблюдалась только фазовая модуляция излучения ввиду невозможности одновременно возбудить моды  $E_{00}^x$  и  $E_{00}^y$  (разница углов ввода для них составляла  $13^\circ$ ).

Сдвиг фазы, происходящий в результате прохождения излучения через модулятор, можно оценить из формулы

$$\Delta \Gamma_{ij} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) n^3 r_{ij} \left( \frac{l}{d} \right) U_{3\phi} [3],$$

где

$$U_{\text{эф}} = E_{\text{эф}} d \text{ [}^\circ\text{]},$$

$E_{\text{эф}}$  — усредненная по сечению волновода напряженность электрического поля,  $d$  — расстояние между электродами ( $d=6$  мкм),  $r_{\text{Б1}}=3.7 \cdot 10^{-12}$ .

На рис. 3 показана измеренная зависимость изменения фазы световой волны, прошедшей через модулятор, от величины приложенного напряжения. Излучение на выходе из модулятора показано на рис. 4.

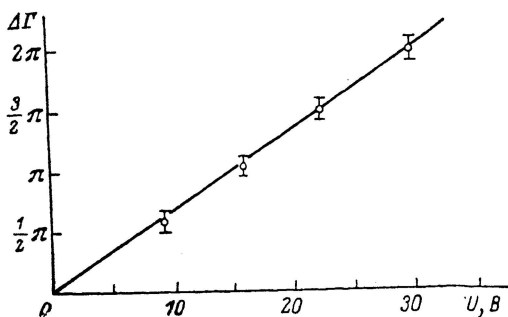


Рис. 3.

Рис. 4. Микрофотография ближнего поля излучения одномодового полоскового волновода гребенчатого типа.

Величина экспериментально найденного полуволнового напряжения  $U_{\lambda/2}$  составляла 15.5 В. При этом максимальная наблюдаемая глубина модуляции достигала 80 %.

Очевидно, что параметры устройства могут быть улучшены путем оптимизации формы и размеров электродов.

#### Литература

- [1] Taylor H. E., Martin W. E., Hall D. B. Appl. Phys. Lett., 1972, v. 21, N 2, p. 95—98.
- [2] Martin W. E. Appl. Phys. Lett., 1972, N 7, v. 21, p. 325—327.
- [3] Martin W. E. J. Appl. Phys., 1973, v. 44, N 8, p. 3703—3707.
- [4] Lisitsa M. P., Gudymenko L. F., Malinko V. N. Phys. Stat Solidi, 1969, 31, 389.
- [5] Совха М. С., Гзатак А. К. Неоднородные оптические волноводы. М.: Связь, 1980.
- [6] Аксенов Е. Т., Липовский А. А. К вопросу о расчете профиля показателя преломления градиентных оптических волноводов. — ЖТФ, 1980, т. 50, № 4, с. 842—844.
- [7] Дикаев Ю. М., Копылов Ю. Л., Котельянский И. М. Метод определения профиля диффузионных волноводов. — Квант. электр., 1981, т. 8, № 2, с. 378—381.
- [8] Быковский Ю. А., Смирнов В. Л. и др. Электрооптические модуляторы излучения на основе полупроводниковых волноводов гребенчатого типа. — Квант. электр., 1980, т. 7, № 1, с. 110—115.
- [9] Kaminov I. P. Appl. Phys. Lett., 1975, v. 27, p. 555—557.

Московский инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию  
3 августа 1984 г.  
В окончательной редакции  
27 мая 1986 г.