

06;07

## Оптическое усиление в планарном микроканальном интерферометре Маха–Цендера на основе структур металл–полупроводник–металл

© Н.М. Ушаков, К.Ю. Кравцов

Институт радиотехники и электроники РАН (Саратовский филиал)

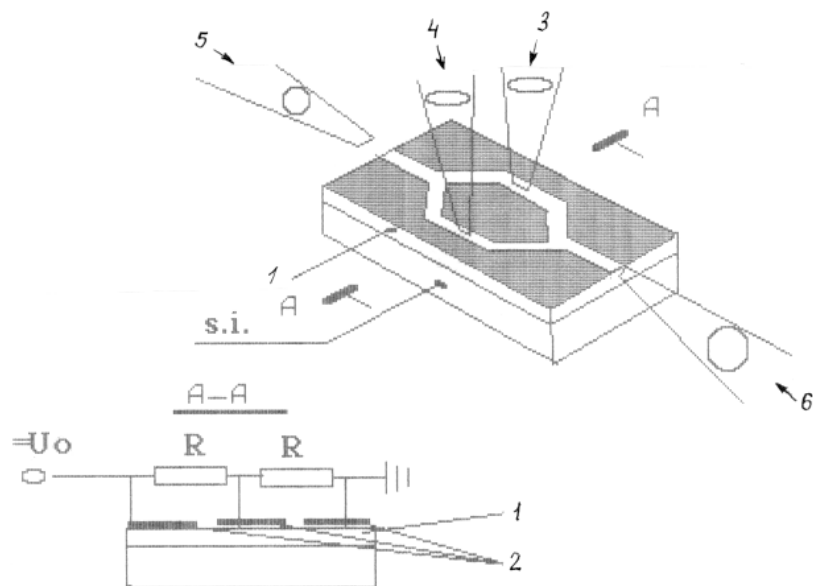
Поступило в Редакцию 25 июня 1997 г.

Приводится описание нового оптоэлектронного устройства — оптического транзистора, обеспечивающего усиление по мощности выходного оптического излучения. Конструктивно оптический транзистор выполнен на полупроводниковой металлизированной пластине с микроканальным зазором в виде планарного интерферометра Маха–Цендера. Управление устройством типа "свет–свет" осуществляется за счет модуляции показателя преломления в одном из плеч интерферометра.

Изменение показателя преломления в оптической области с помощью фотоиндуцированных свободных носителей, достаточное для практических применений, получено сравнительно недавно (см., например, в [1]). Получены также модуляция и переключение типа "свет–свет" за счет фотоиндуцированного возмущения показателя преломления в фотопроводящих канальных и планарных волноводах на основе кремния [2], арсенида галлия [3] и в сосредоточенных структурах на  $p-n$ -переходе [4].

В настоящей работе предложено новое оптоэлектронное светуправляемое устройство для модуляции и усиления световых сигналов на основе структур металл–полупроводник–металл, которое может найти широкое применение в системах оптической обработки информации и волоконно-оптических линиях связи [5].

Оптический транзистор представляет собой планарный интерферометр Маха–Цендера на основе металлизированной полупроводниковой пластины с зазором в виде микроканальной структуры параллельных волноводов. Структура волноводов имеет  $Y$ -образные разветвители на входе и выходе, компенсатор фазы оптической волны и управляющий



**Рис. 1.** Общий вид оптического транзистора: 1 — активный слой, 2 — металлические электроды, 3 — сигнал управления (вход), 4 — сигнал компенсации, 5 — сигнал опорный, 6 — сигнал выходной.

элемент, в качестве которых используются открытые зазоры микроканальных волноводов. Такие структуры могут найти широкое применение из-за простой и сравнительно недорогой технологии изготовления.

Общий вид оптического транзистора изображен на рис. 1. В интерферометр через вход (торец) полупроводниковой подложки в микроканал волновода вводится опорное излучение. С помощью непрерывного компенсирующего оптического излучения, падающего на одно из плеч интерферометра, изменяется концентрация носителей в волноводе и тем самым меняется показатель преломления в этом плече волновода. При этом создается необходимый фазовый сдвиг для обеспечения минимального значения выходной оптической мощности (транзистор закрыт). Через другое плечо интерферометра вводится управляющий (модулирующий) оптический пучок. За счет этого появляется сдвиг фаз

между параллельными плечами интерферометра, отличный от  $\pi$ , и растет интенсивность излучения на выходе оптического транзистора. Вся структура металлических электродов связана с внешним источником электрического поля, обеспечивающего напряженность поля в зазоре  $E \simeq 10^4$  В/см. При этом ширина зазора сравнима с шириной обедненной области полупроводника.

Зависимость показателя преломления  $n$  от концентрации носителей  $N$  имеет вид [6]

$$n = n_0 - (Nq^2/2\varepsilon_0m^*\omega^2),$$

где  $n_0$  — показатель преломления в отсутствие неравновесной концентрации свободных носителей,  $q$  — заряд электрона,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $m^*$  — эффективная масса и  $m_0$  — масса свободного электрона в вакууме,  $\omega$  — круговая частота света,  $N$  — концентрация неравновесных носителей в полупроводнике.

Для поддержания моды низшего порядка необходимо, чтобы  $\Delta n \simeq 10^{-4}$ . Используя значения параметров, например, для  $n$ -GaAs:  $m^* = 0.067m_0$ ,  $\omega^2 = 3.6 \cdot 10^{30}$  Hz<sup>2</sup>,  $n_0 = 3.16$  получаем, что  $\Delta n = 2.5 \cdot 10^{-27} N$  (в единицах СИ). Для величины  $\Delta n = 10^{-4}$  получаем значение  $N = 10^{23}$  м<sup>-3</sup> (или  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>).

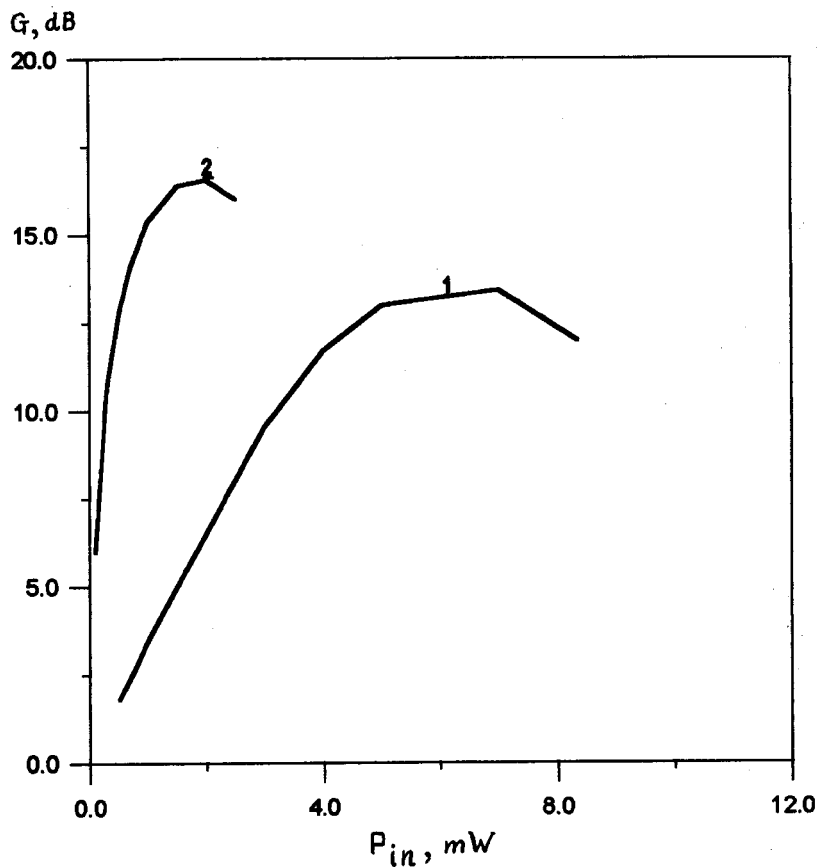
В интерферометре Маха–Цендера модуляция оптического сигнала осуществляется через любое из плеч интерферометра.

Поскольку модуляция света осуществляется с помощью  $P_{\text{вх}}$ , то коэффициент усиления оптического транзистора  $G$  будет определяться как

$$G = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = G_0 \sin^2(\Delta\Phi/2),$$

где  $G_0 = P_0 (\eta \tau / h \nu V \Delta N)$  — максимальное значение коэффициента усиления оптического транзистора;  $P_0$  — мощность опорного сигнала, W;  $\eta$  — квантовая эффективность фотоэлектрического преобразования;  $\tau$  — время жизни неравновесных носителей тока в полупроводнике, s;  $h$  — постоянная Планка, J · s;  $\nu$  — частота света, s<sup>-1</sup>;  $V$  — поглощающий объем, м<sup>3</sup>;  $\Delta N$  — изменение концентрации носителей, м<sup>-3</sup>;  $\Delta\Phi = 2\pi L \Delta n / \lambda$  — изменение фазового сдвига световой волны в управляющем плече интерферометра;  $L$  — длина плеча, м;  $\Delta n$  — изменение показателя преломления;  $\lambda$  — длина волны света, м.

На рис. 2 приведены данные расчета коэффициента усиления оптического транзистора на  $n$ -GaAs/s.i. при условии, что мощность опорного сигнала  $P_0 = 0.1$  W, длина плеча  $L = 0.3$  mm (1) и 1 mm (2), длина



**Рис. 2.** Зависимость оптического усиления от входной оптической мощности при  $l = 0.3$  mm (1) и  $l = 1$  mm (2).

волны света  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ . При использовании управляющего сигнала мощностью в пределах 1–10 mW коэффициент усиления для случая (1) составляет 13–14 dB и имеет динамический диапазон 2–12 mW по управляющему сигналу. При этом под динамическим диапазоном следует понимать пределы входной управляющей оптической мощности, при которой коэффициент усиления изменяется не больше, чем на

3 дВ. Увеличение длины плеча до 1 мм при прочих равных условиях приводит к уменьшению мощности управляющего сигнала в 4–10 раз, расширению динамического диапазона в 2.5 раза и росту коэффициента усиления на 5–6 дВ.

## Список литературы

- [1] *Bennett B.R., Soref R.A., Alomo J.D.* // IEEE J. Quantum Electron. 1990. V. 19. P. 1525.
- [2] *Colbourne P.D., Jessop P.E.* // Electron. Lett. 1988. V. 24. P. 303.
- [3] *Cheng Z.Y., Tsai C.S.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. P. 2222.
- [4] *Каширинов П.Г., Кичаев А.В., Перепелицын Ю.Н.* и др. Препринт физико-технического института им. Иоффе. No 1569. 1570. Спб. 1991. Ч. 1, 2. 59 с.
- [5] *Ушаков Н.М., Кравцов К.Ю.* Пат. РФ № 202899. // Оптический транзистор. 1994. Бюл. 23. Кл. G 02 F 3/00.
- [6] *Свечников Г.С.* Элементы интегральной оптики. М.: Радио и связь, 1987. 104 с.