

06; 07

© 1990 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛОСКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И КОММУТАТОРОВ

А. В. Шмалько

Проведена оптимизация параметров направленных ответвителей на основе полосковых оптических волноводов, сформированных на базовой многослойной эпитаксиальной волноводной структуре на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, таких как GaAs и твердые растворы $GaAs_{1-x}P_x$, для интегрально-оптических переключателей и коммутаторов для световодных систем связи. Определены оптимальные параметры (толщина и ширина) полоскового волновода, расстояние между полосковыми волноводами и состав и толщина слоев базовой волноводной структуры, обеспечивающие заданный уровень перекрестной помехи, минимальное управляющее напряжение переключателя и эффективную торцевую стыковку полоскового волновода с одномодовыми волоконными световодами. Показано, что на основе рассматриваемых полосковых оптических волноводов могут быть созданы переключатели 2×2 канала с уровнем перекрестных помех ниже -30 дБ на длине волны 1.3 мкм и поляризационно нечувствительные направленные ответвители.

Полосковые оптические волноводы (ОВ) на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, таких как GaAs и твердые растворы на его основе, представляют значительный практический интерес для разработки оптических интегральных схем для световодных систем передачи и обработки информации [1-3]. По сравнению с другими типами трехмерных волноводов полосковые ОВ обладают рядом преимуществ [1, 3]. Это открывает возможность разработки на их основе интегрально-оптических устройств с увеличенными допусками на точность задания поперечных размеров волноводных элементов и позволяет осуществлять эффективную стыковку таких ОВ с одномодовыми волоконными световодами (ОВС) [2, 4].

Основным элементом интегрально-оптических переключателей и коммутаторов является электрооптически управляемый направленный ответвитель (НО) на связанных ОВ [4]. Общие закономерности работы и расчета таких НО хорошо известны [1, 3]. Однако требования к параметрам трехмерных ОВ для электрооптически управляемых волноводных устройств и условиям их торцевой стыковки с ОВС являются, как правило, противоречивыми [1, 2], что требует соответствующей оптимизации параметров трехмерных ОВ. В полосковых ОВ в отличие от канальных гребенчатых и диффузионных волноводов имеется дополнительная возможность управления волноводными характеристиками за счет выбора параметров исходного планарного волновода, на основе которого формируется полосковый ОВ [5].

В настоящей работе изучено влияние различных параметров полосковых ОВ, сформированных на базовых многослойных эпитаксиальных волноводных структурах (МЭВС) на основе GaAs и твердых растворов $GaAs_{1-x}P_x$, на их волноводные характеристики (ограничение оптического излучения, эффективную ширину и формат волновода) и проведена оптимизация НО на основе полосковых ОВ для создания интегрально-оптических переключателей и коммутаторов для световодных систем передачи и обработки информации.

Полосковый ОВ представляет собой планарный волновод толщиной h_1 с показателем преломления волноводного слоя n_1 и подложки n_0 , на поверхность которого нанесена тонкая пленка диэлектрика толщиной h_2 , большей глубины проникновения поля моды, выполненная в виде полоски шириной W , имеющая показатель преломления $n_2 \leq n_0 < n_1$ (рис. 1, а) [1, 3]. В качестве базовой структуры для формирования полосковых ОВ применялась МЭВС на основе GaAs и GaAs_{1-x}P_x на подложке n^+ -GaAs, в которой на длине волны $\lambda=1.3$ мкм потери не превышают 1 дБ/см [6]. Волноводный слой GaAs толщиной h_1 ($2 \leq h_1 \leq 5$ мкм) имеет практически однородный профиль показателя преломления по сечению волноводной структуры. Он ограничен сверху и со стороны подложки буферными слоями GaAs_{1-x}P_x ($0.01 \leq x \leq 0.03$) толщиной h_2 и h_0 с показателями преломления $n_2=n_0$. Таким образом, полосковый ОВ на основе базовой МЭВС представляет собой симметричный волновод по обеим поперечным координатам.

Оптимизация НО на основе полосковых ОВ (рис. 1) заключается в выборе толщины h_1 , ширины W полоскового ОВ, зазора d между связанными волноводами и состава x твердого раствора буферных слоев GaAs_{1-x}P_x, при которых обеспечиваются оптимальные условия для торцевой стыковки полоскового ОВ с ОВС, минимальный уровень перекрестных помех, максимальные допуски на точность задания длины связи L_2 и L_3 ОВ в НО различного типа при заданном уровне перекрестных помех и минимальное значение управляющего напряжения на единичную длину электродов переключателя.

Необходимое условие для эффективной торцевой стыковки полоскового ОВ с ОВС заключается в том, что эффективная ширина W^* и толщина h_1^* одномодового полоскового ОВ должны быть связаны с радиусом (полушириной) распределения по уровню интенсивности $1/e$ поля w_0 моды ОВС соотношением [4]

$$w_0 = (W^* h_1^* / 4)^{1/2}. \quad (1)$$

При этом максимальная эффективность торцевой стыковки полоскового ОВ и ОВС при условии (1) связана с эффективным форматом полоскового ОВ $F^* = W^* / h_1^*$ [4]

$$\eta_{\max} = \frac{4F^*}{(1 + F^*)^2}. \quad (2)$$

Она достигает 100 % при соосной установке стыкуемых волноводных структур и наличии соответствующей иммерсии в зазоре между ними и $F^*=1$.

В полосковом ОВ эффективная ширина W^* зависит не только от ширины полоски W , но также и от толщины h_1 исходного планарного волновода [6]. Следовательно, оптимизация параметров полоскового ОВ по условию (1) и (2) связана с оптимизацией исходной базовой МЭВС и самого полоскового ОВ по минимальному эффективному формату F^* полоскового ОВ для его основной моды. Для задания необходимого эффективного формата F^* полоскового ОВ в общем случае необходимо установить взаимосвязь F^* с нормированной частотой исходного планарного волновода V_1 , нормированной частотой V и геометрическим форматом $F = W/h_1$ полоскового ОВ. Используя результаты работы [5], можно показать, что для полоскового ОВ с произвольным профилем показателя

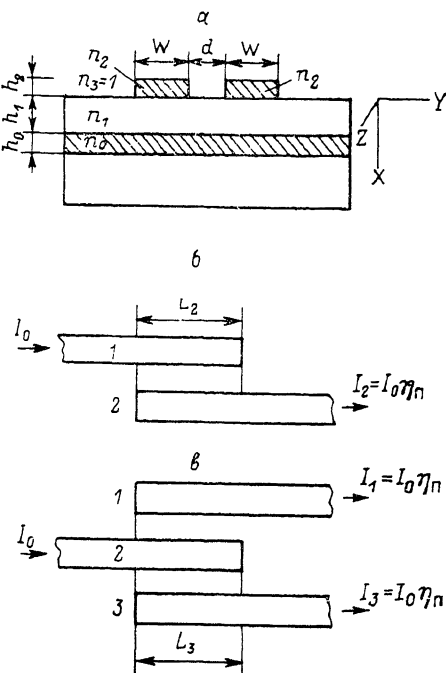


Рис. 1. Поперечное сечение связанных полосковых ОВ (а) и схема НО на двух (б) и трех (в) связанных волноводах.

преломления n_1 по координате X эффективный формат для основной $E_{11}^{X(Y)}$ -моды равен

$$F^* = \frac{(V^* - V)(\Delta b)^{-1/2} + V_1 F}{V_1^*}, \quad (3)$$

где $V = kW(n_1^{*2} - n_{11}^{*2})^{1/2}$; $V_1 = kh_1(n_1^2 - n_0^2)^{1/2}$ для однородного профиля показателя преломления n_1 волноводного слоя; V^* и V_1^* — эффективные величины для V и V_1 соответственно; $k = 2\pi/\lambda$; n_1^* и n_{11}^* — эффективные показатели преломления планарного (В) под полоской и вне ее соответственно; $\Delta b = b_1 - b_{11}$, b_1 и b_{11} — нормированные эффективные показатели преломления планарного ОБ под полоской и вне ее соответственно. При этом $V = V_1 F (\Delta b)^{1/2}$ [5].

На рис. 2 приведены зависимости F^* от V и F для различных значений V_1 для полоскового ОБ с однородным показателем преломления n_1 волноводного

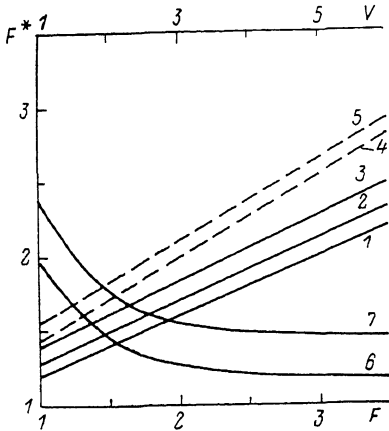


Рис. 2. Зависимость эффективного формата F^* для основной $E_{11}^{X(Y)}$ -моды полоскового ОБ от геометрического формата F (1—5) и нормированной ширины V (6, 7) полоскового волновода для $V_1 = 2$ (1—3), 3 (4, 5) при $V = 2$ (3), 3 (2, 5), 4 (1), 6 (4) и для $F = 1$ (6, 7) при $V_1 = 2$ (6), 3 (7).

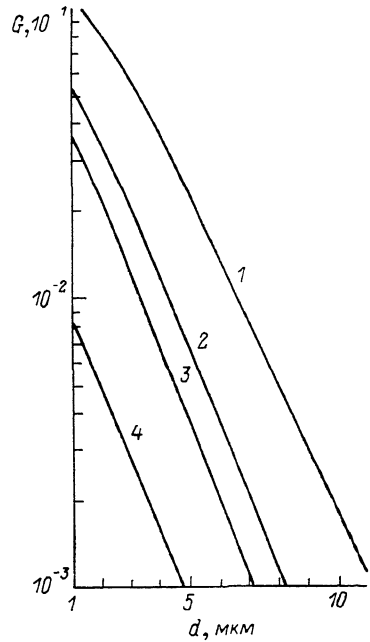


Рис. 3. Зависимость уровня перекрестной помехи $G = J_2^2$ в НО от d для основной $E_{11}^{X(Y)}$ -моды полоскового ОБ при $W = 5$ мкм (1, 3), 7 (2, 4) и $h_1 = 2.5$ мкм (1, 2, 4), 2.0 (3) для базовой МЭВС с $x = 0.011$ (1—3) и 0.02 (4) на $\lambda = 1.3$ мкм.

слоя, полученные с помощью (3) на основе соответствующих расчетных зависимостей $\Delta b = \Delta b(V_1)$ [5], $V^* = V^*(V)$ и $V_1^* = V_1^*(V_1)$ [7] в приближении метода эффективного показателя преломления [3, 7]. Видно, что значение F^* определяется в основном геометрическим форматом F полоскового ОБ и нормированной частотой V_1 исходного планарного ОБ и достаточно слабо зависит от нормированной частоты V (и, следовательно, ширины W) полоскового ОБ вдали от отсечки. При $V_1 = V_{10} \approx 2$, соответствующем минимальному значению V_1^* , и $F = 1$ обеспечивается возможность достижения значений F^* , близких к 1 ($F^* \approx 1.2$), при которых эффективность торцевой стыковки полоскового ОБ с ОБС кругового поперечного сечения близка к 100%. При этом, так как в полосковом ОБ на основе базовых МЭВС $n_1 \approx n_2 = n_0$, эффективные размеры W^* и h_1^* и, следовательно, эффективный формат F^* для E_{11}^{X-} и E_{11}^{Y-} мод ортогональных поляризаций практически совпадают с точностью до 1—2%.

Для обеспечения в НО на двух идентичных связанных ОБ (рис. 1, б) полного переключения входного оптического сигнала интенсивностью I_0 в перекрестное состояние с интенсивностью $I_2 = \eta_{\text{н}} I_0$ требуется, чтобы эффективность ответвления (переключения) оптической мощности $\eta_{\text{н}}$ из волновода 1 в волновод 2 рав-

ялась 100 %. В общем случае для двух идентичных ОВ в приближении улучшенной теории связанных волн для случая слабой связи волноводов [3, 8]

$$\eta_{11} = J_{12}^2 + \frac{1 - J_{12}^2}{1 + (\delta/K)^2} \sin^2 KL_2 [1 + \delta/K]^2]^{1/2}, \quad (4)$$

где J_{12} — интеграл перекрытия полей связанных мод полосковых ОВ (1 и 2 соответственно), $2\delta = \beta_1 - \beta_2$ — фазовое рассогласование постоянных распространения β_1 и β_2 мод полосковых ОВ (1 и 2 соответственно), K — коэффициент связи, L_2 — длина связи ОВ.

Для достижения $\eta_{11} = 1$ необходимо обеспечить фазовое согласование мод ($\delta = 0$) в ОВ на длине связи L_2 , удовлетворяющей соотношению [1]

$$KL_{2q} = \frac{\pi}{2} (1 + 2q), \quad q = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

При этом для полного пропускания оптического излучения в НО без переключения в ОВ должно быть индуцировано, например, за счет электрооптического эффекта фазовое рассогласование мод волноводов 1 и 2 на величину $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$, которая при $L_2/L_{20} = 1$ определяется из условия $\Delta\beta L_{20} = \sqrt{3}\pi$. Для уменьшения уровня перекрестных помех в НО до уровня -20 дБ погрешность в задании L_2 , а точнее KL_2 , в соответствии с (5) не должна превышать $\pm 6\%$ [1].

В НО на трех связанных ОВ (рис. 1, е) для получения равного деления мощности в выходных волноводах 1 и 3 при возбуждении центрального волновода 2 длина связи L_3 должна удовлетворять условию [1, 3]

$$\sqrt{2} KL_{3q} = \frac{\pi}{2} (1 + 2q), \quad q = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Из выражения (4) следует, что уровень перекрестной помехи в НО на двух связанных ОВ с длиной связи $L_2 = L_{2q}$ определяется квадратом интеграла перекрытия полей мод J_{12} полосковых ОВ 1 и 2. На рис. 3 приведены расчетные зависимости уровня перекрестной помехи $G = J_{12}^2$ от зазора d между связанными полосковыми ОВ для различных параметров базовой МЭВС и полосковых ОВ, полученные в приближении метода эффективного показателя преломления (ЭПП). Видно, что при заданном значении d с увеличением ширины W и уменьшением толщины h_1 полоскового ОВ уровень перекрестной помехи в НО уменьшается. При этом G наиболее сильно зависит от состава буферных слоев (разности показателей преломления n_1 и n_0) базовой МЭВС.

Физически такая зависимость G от параметров полоскового ОВ обусловлена улучшением фактора оптического ограничения излучения в полосковом волноводе при увеличении ширины W и уменьшении его толщины h_1 , а также при увеличении $\Delta n = n_1 - n_0$. Последние два фактора, как следует из [5], определяют $\Delta n^* = n_1^* - n_0^* = \Delta b \Delta n$. Отсюда очевидно, что максимум Δb , которому соответствует значение V_{1m} ($V_{1m} \approx V_{10}$), определяет в зависимости $G = G(V_1)$ минимальное значение уровня перекрестной помехи в НО на основе полосковых ОВ. Таким образом, ясно, что параметры полосковых ОВ, при которых его эффективный формат $F^* = 1$, одновременно обеспечивают и минимальный уровень перекрестной помехи в НО для заданного зазора между связанными ОВ. Аналогичный вывод остается справедливым и для НО на основе трех связанных ОВ, так как уровень перекрестных помех в этом случае имеет тот же порядок величины и пропорционален J_{12}^2 , как и в случае двух связанных волноводов [9].

Дальнейшая оптимизация НО на основе полосковых ОВ заключается в расширении допусков на длину связи волноводов L_2 (или L_3) в НО в зависимости от толщины h_1 , ширины W полоскового ОВ и параметров базовой МЭВС. Для расчета и оптимизации параметров полосковых ОВ в НО коэффициент связи $E_{nm}^{X(Y)}$ -мод двух идентичных полосковых ОВ в приближении метода ЭПП может быть представлен в виде [3]

$$K_{nm} = \frac{2(1 - b_{nm})(2b_{nm}\Delta n^*)^{1/2}}{(n_1^*)^{1/2} W_{nm}^*} \exp[-kd(2n_1^*\Delta n^*b_{nm})^{1/2}], \quad (7)$$

где b_{nm} — нормированный эффективный показатель преломления; $n, m = 1, 2, 3, \dots$; $\Delta n^* = n_1^* - n_{11}^*$; W_{nm} — эффективная ширина полоскового ОВ.

На рис. 4, 5 приведены расчетные зависимости длины связи L_{20} и L_{30} для НО от толщины h_1 полоскового ОВ для E_{11}^X - и E_{11}^Y -мод при различных параметрах полосковых ОВ и базовой МЭВС для рабочей длины волны $\lambda = 1.3$ мкм, полученные с помощью выражений (5) — (7). Анализ этих зависимостей и результатов расчета показывает, что в НО на основе полосковых ОВ длина связи L_2 и L_3 в достаточно широком диапазоне очень слабо зависит от толщины исходного планарного ОВ h_1 . С уменьшением W допуски на точность задания h_1 расширяются. Диапазон значений h_1 , соответствующий слабой зависимости L_2 и L_3 от h_1 , можно также расширить за счет выбора состава твердого раствора GaAs_{1-x}P, буферных слоев базовой МЭВС. При этом для заданной ширины W полоскового ОВ и зазора d существует оптимальный состав буферных слоев,

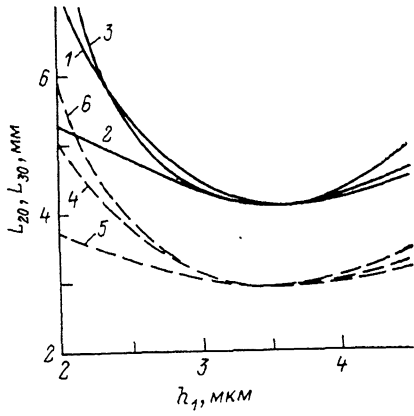
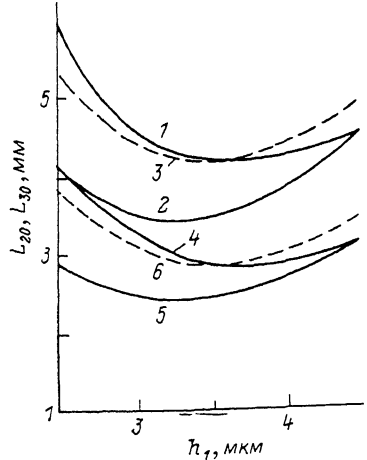


Рис. 4. Зависимость длины связи в НО L_{20} (1—3) и L_{30} (4—6) от h_1 для E_{11}^X - (3, 6) и E_{11}^Y -мод (1, 2, 4, 5) полоскового ОВ при $d=5$ мкм, $W=4$ мкм (2, 5), 5 (1, 3, 4, 6) для базовой МЭВС с $x=0.03$ на $\lambda=1.3$ мкм.

Рис. 5. Зависимость длины связи в НО L_{20} (1—3) и L_{30} (4—6) от h_1 для E_{11}^Y -моды полоскового ОВ при $d=5$ мкм и $W=5$ мкм для базовой МЭВС с $x=0.011$ (1, 4), 0.02 (2, 5) и 0.03 (3, 6) на $\lambda=1.3$ мкм.

при котором L_2 и L_3 практически не зависят от h_1 в наибольшем диапазоне ее изменения. При $W=5-7$ мкм и $d=5$ мкм для базовой МЭВС оптимальным является $x \approx 0.02$. При этом для E_{11}^Y -моды уровнем перекрестной помехи -20 дБ при $W=5$ мкм соответствует диапазон допустимых значений $h_1 = 2.8-4.2$ мкм по отношению к $h_{1\text{опт}} = 3.5$ мкм, а при $W=7$ мкм $h_1 = 3.7-5.3$ мкм, $h_{1\text{опт}} = 4.5$ мкм. С увеличением W значение $h_{1\text{опт}}$ возрастает.

Из рис. 4 видно, что для НО на основе полосковых ОВ всегда можно выбрать параметры базовой МЭВС и полоскового ОВ, чтобы для ортогонально поляризованных мод E_{11}^X и E_{11}^Y полоскового ОВ длина связи L_2 (или L_3) была одинакова. Это открывает возможность разработки на основе полосковых ОВ поляризационно нечувствительных НО, а также других волноводных элементов поляризационного типа (фильтров, поляризационных расщепителей и т. п.).

Для применения НО на основе полосковых ОВ, сформированных на основе базовой МЭВС, в качестве электрооптически управляемых переключателей необходимо знать влияние параметров полоскового волновода на достижимое напряжение переключения. Для рассматриваемых полосковых ОВ на основе базовой МЭВС, ориентированной по плоскости (100), управляющее электрическое поле прикладывается с помощью обратно смещенного барьера Шоттки вдоль оси X , что соответствует фазовой модуляции E_{nm}^Y -мод полоскового волновода [2, 10]. Нетрудно показать, используя [1, 10, 11], что для переключателя на двух связанных полосковых ОВ в этом случае напряжение переключения равно

$$U_{\parallel} = - \frac{\sqrt{3} \lambda h}{n_1 r_{41} \Gamma L}, \quad (8)$$

где $h = h_1 + h_2$, r_{41} — электрооптический коэффициент материала ОВ (для GaAs $r_{41} = 2 \cdot 10^{-10}$ см/В на $\lambda = 1.15$ мкм [11]), Γ — интеграл перекрытия управляющего электрического и оптического поля моды [12]; L — длина электродов.

При концентрации свободных носителей заряда в волноводном и верхнем буферном слоях $N_1 = N_2 < 10^{14}$ см $^{-3}$ значение Γ для реальных параметров плосковых ОВ определяется долей мощности, направляемой полосковым волноводом в волноводном слое под направляющей полоской. При больших значениях N_1 и N_2 требуется точный расчет величины Γ . Результаты расчета интегралов перекрытия полей Γ [12], выполненные в приближении метода ЭПП для рассматриваемых полосковых ОВ, показывают, что значение Γ и, следовательно, U_{\parallel} слабо зависит от ширины W полоскового волновода и более сильно от его толщины h_1 . При этом для $N_1 = N_2 = 10^{14}$ см $^{-3}$ на $\lambda = 1.3$ мкм оптимальные параметры полоскового ОВ, обеспечивающие максимальное значение $\Gamma \approx 0.8$ и минимальное значение U_{\parallel} на единицу длины управляющих электродов, находятся в диапазоне значений $W = 5-9$ мкм, $h_1 = 1.5-2.5$ мкм ($h_2 = 1.5$ мкм).

На основе рассмотренной методики оптимизации параметров полосковых ОВ для НО и переключателей на связанных волноводах по максимуму эффективности торцевой стыковки с ОВС, заданному уровню перекрестных помех и напряжению переключения разработан программный модуль для расчета и проектирования НО и переключателей на основе базовой МЭВС. Такой программный модуль реализован на алгоритмическом языке Фортран-4 для ЕС-ЭВМ.

В заключение несколько замечаний о точности расчетов по данной методике оптимизации в приближении метода ЭПП. Сравнение результатов расчета с более точными численными методами показывает, что вдали от отсечки при $v_{11} \gg \gg 0.5$ погрешность в определении нормированных эффективных показателей преломления полосковых ОВ по методу ЭПП составляет $\sim 10^{-3}$, что вполне достаточно для практических целей [2, 3]. Расчет интегральных характеристик полосковых ОВ в приближении метода ЭПП, таких как распределения электрических полей E_{11}^X - и E_{11}^Y -мод, эффективный формат F^* полоскового волновода и их сравнение с результатами предварительных экспериментов, показывает, что расчетные и экспериментальные результаты в пределах погрешности измерений ($\leq 5-6$ %) совпадают. Аналогичные расчеты интегральных характеристик электрооптических переключателей на связанных канальных гребенчатых ОВ на основе GaAs (напряжения переключения и т. п.), проведенные в приближении метода ЭПП, хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными результатами в пределах погрешности эксперимента ($\leq 5-10$ %) [10]. Это позволяет сделать вывод, что метод ЭПП обеспечивает необходимую для практики точность расчетов основных параметров и характеристик интегрально-оптических устройств на основе связанных полосковых и канальных ОВ.

Таким образом, проведенная в настоящей работе оптимизация НО и переключателей на основе полосковых ОВ, сформированных на базовых МЭВС на GaAs и GaAs $_{1-x}$ P $_x$, позволяет дать практические рекомендации по выбору их параметров для разработки и создания интегрально-оптических переключателей и коммутаторов для световодных систем связи. На основе полученных результатов разработаны интегрально-оптические переключатели 2×2 и 1×3 канала на основе полосковых ОВ, сформированных на базовых МЭВС. Результаты предварительного экспериментального исследования НО на полосковых ОВ, сформированных на базовой МЭВС ($x = 0.02$, $h_1 \approx 3$ мкм, $h_2 \approx 1.5$ мкм, $W \approx 6$ мкм, $d \approx 5.5$ мкм, $L_2 \approx 8.5$ мкм), полученные на длине волны $\lambda = 1.06$ и 1.15 мкм, достаточно хорошо согласуются с расчетными значениями эффективности ответвления (переключения) оптической мощности, полученными для идеальной модели полоскового ОВ с учетом конечной толщины его направляющей полоски.

В заключение автор выражает благодарность В. В. Фролову и Ю. К. Шведовой за помощь при проведении некоторых расчетов на ЭВМ.

Список литературы

- [1] Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 7. С. 1319—1360.
- [2] Ламекин В. Ф., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по вычислительной оптоэлектронике. «Проблемы оптической памяти». Ереван, 1987. Ч. 2. С. 218—219.
- [3] Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. // Квантовая электрон. 1988. Т. 15. № 7. С. 1227—1257.
- [4] Дедушенко К. Б., Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. // Квантовая электрон. 1983. Т. 10. № 9. С. 1733—1763.
- [5] Шмалько А. В. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 6. С. 1135—1139.
- [6] Ваганов А. В., Коровин С. Б., Смирнов В. Л. и др. // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по вычислительной оптоэлектронике «Проблемы оптической памяти». Ереван, 1987. Ч. 2. С. 220—221.
- [7] Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978. 344 с.
- [8] Marcanti E. A. J. // IEEE J. Quantum Electron. 1986. Vol. QE-22. N 6. P. 988—993.
- [9] Chen K.-L., Wang S. // IEEE J. Quantum Electron. 1986. Vol. QE-22. N 7. P. 1039—1041.
- [10] Inoue H., Hiruma K., Ishida K. et al. // Appl. Opt. 1986. Vol. 25. N 9. P. 1484—1490.
- [11] Walker R. G. // J. Lightwave Technology. 1987. Vol. LT-5. N 10. P. 1444—1453.
- [12] Alferness R. C. // IEEE Trans. Microwave Theor. and Techn. 1982. Vol. MTT-30. N 8. P. 1121—1137.

Поступило в Редакцию
22 июля 1988 г.