

УДК 621.372

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ В КАЧЕСТВЕ УЗКОПОЛОСНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ 1,5 мкм

В.В. ШУШУНОВА¹, В.Е. БОРИСЕНКО¹, М. СВИЛЛО², Б. ЯСКОРЖИНСКА², М. КИУ²,
Л. ТЕЛЕН²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь;

²Королевский технологический институт, Стокгольм, Швеция

Поступила в редакцию 9 января 2003

Разработан интегральный узкополосный фильтр для длины волны 1,5 мкм, состоящий из канального волновода на одномерной решетке Брэгга, связанного со стандартным оптическим волноводом. Профиль распределения показателя преломления в волноводе на одномерной решетке Брэгга, а также его параметры выбраны таким образом, чтобы достичь равенства эффективного показателя преломления $n_{eff}=1,48-1,5$ на длине волны $\sim 1,5-1,55$ мкм. Значение величины n_{eff} соответствует дисперсионным свойствам стандартного оптического волновода. Ширина канала составляет 1,5 мкм, что обеспечивает существование мод только низшего порядка. В качестве второго канала направленного ответвителя выбран стандартный волновод с параметрами: $n_{cw}=1,86$ — показатель преломления и $b=0,42$ мкм — толщина волноводного слоя, что позволяет иметь одномодовый режим в области длины волны 1,5 мкм. Проведено моделирование дисперсионных свойств фильтра на основе канального волновода на одномерной решетке Брэгга при использовании векторного формализма метода шивания. Для расчета его рабочих характеристик применена теория "супермод". Показано, что вследствие существенного различия в ходе дисперсионных характеристик двух каналов направленного ответвителя согласование фазовых скоростей мод обеспечивается только в области $\lambda \sim 1,5$ мкм. Это позволяет иметь высоко селективные свойства для мод ТЕ поляризации в предлагаемом фильтре. Рассчитаны спектры пропускания направленного ответвителя с различными параметрами. Показана возможность достижения значения ширины полосы пропускания порядка субнанометров при общей длине структуры ~ 1 мм, что подтверждено экспериментально.

Ключевые слова: кремний, оксид кремния, одномерный фотонный "кристалл", узкополосный фильтр

Введение

Известно, что принцип работы направленного ответвителя основан на явлении полного обмена оптической мощностью при равенстве фазовых скоростей мод его каналов [1]. В этом случае диапазон длин волн, в котором достигается согласование, тем меньше, чем больше конструктивное различие между волноводами. Ширина полосы пропускания на полувысоте $\Delta\lambda$ обратно пропорциональна длине ответвителя L_C и дифференциальной дисперсии на длине волны, при которой имеет место согласование фазовых скоростей, и описывается выражением [2]

$$\Delta\lambda \propto L_C^{-1} \left\{ \Delta \frac{dn_{eff}}{dk_0} \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где L_C — длина связи, определяющаяся согласно $kL_C = (m + 1/2)\pi$, $m=0, 1, 2 \dots$ [2, с.291], $n_{eff} = \beta/k_0$ — эффективный показатель преломления, k_0 — волновой вектор в вакууме.

Направленный ответвитель, состоящий из каналов с существенно различающимися дисперсионными характеристиками, исследовался ранее [3] и был использован в лазере, перестраиваемом в широком диапазоне длин волн [4]. Однако полоса пропускания ограничивалась 5—10 нм при длине структуры ~ 1 мм, что обусловлено небольшой величиной дисперсии в стандартных оптических волноводах.

За последние 10 лет были предложены различные типы направленных ответвителей в качестве добавляющего или отнимающего сигналы оптического канала связи. Так, известен фильтр, использующий антирезонансные отражающие волноводы и имеющий следующие характеристики: $\Delta\lambda = 20$ ГГц ($\sim 0,16$ нм) при длине связи 28 см на длине волны 1,55 мкм [5, 6]. Другим примером является структура, состоящая из вертикально связанных различных полупроводниковых волноводов InGaAs/InP материалов. Так, при длине фильтра 5 мм измеренная ширина полосы пропускания составила величину порядка 0,8 нм на длине волны $\sim 1,265$ мкм [7, 8]. Перестраиваемый оптический фильтр на основе InGaAsP/InP планарного направленного ответвителя с решеточным элементом связи был изучен экспериментально, его характеристики составили: $\Delta\lambda = 1,5$ нм при $L_C = 5$ мм на длине волны 1,3 мкм [9]. Представленные выше фильтры характеризуются шириной полосы пропускания в нанометровом диапазоне, однако имеют большую длину.

В данной статье предложен интегральный узкополосный фильтр для длины волны 1,5 мкм, использующий волновод на одномерной решетке Брэгга, связанный со стандартным оптическим волноводом, что позволило достичь существенного улучшения соотношения ширины полосы пропускания (порядка субнанометров) и длины связи (до 1 мм).

Теоретический анализ

Моделирование дисперсионных свойств канального волновода на одномерной решетке Брэгга, а также фильтра на его основе проводилось с использованием векторного формализма метода сшивания (или метода частичных областей) [10, с.41]. В [13] представлена усовершенствованная нелинейная задача на собственные значения метода сшивания, используемая в работе, позволяющая получать эффективный индекс мод различных порядков n_{eff} , а также профили их распределения.

Для расчета рабочих характеристик направленного ответвителя применена теория "супермод" [14, с.524], в основе которой лежит нахождение постоянных распространения собственных мод β и их профилей распределения для исследуемой структуры целиком. Это дает возможность моделировать процесс распространения излучения в фильтре. Используя формализм теории "супермод",

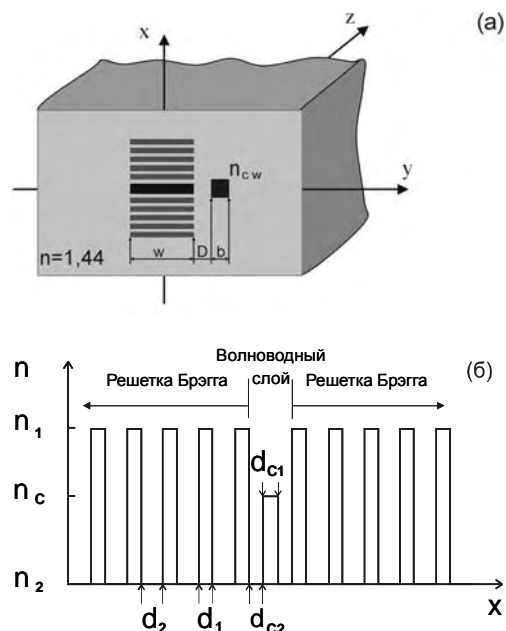


Рис. 1. Геометрия направленного ответвителя $n_{cw}=1,86$; $b=0,42$ мкм, $w=1,5$ мкм, D — расстояние между каналами; структура помещена в среду с показателем преломления $n=1,44$; ось z — направление распространения света (а) и профиль распределения показателя преломления канального волновода на основе одномерной решетки Брэгга на плоскости x - z , $n_c=2,6$, $d_{c1}=0,16$ мкм, $n_{c2}=n_2=1,44$, $d_{c2}=0,15$ мкм; $n_1=3,48$, $d_1=0,13$ мкм, $n_2=1,44$, $d_2=0,32$ мкм (б)

профилей распределения для исследуемой структуры целиком. Это дает возможность моделировать процесс распространения излучения в фильтре. Используя формализм теории "супермод",

был рассчитан спектр пропускания направленного ответвителя. Для проведения анализа создан программный комплекс, позволяющий определять амплитуды мод, задавать входной сигнал и, моделируя распространение, определять выходной сигнал после прохождения излучения расстояния, равного длине связи, что в результате дает возможность получать спектр пропускания фильтра.

Методика проектирования

При проектировании направленного ответвителя (рис. 1,а), функционирующего в качестве фильтра в диапазоне длин волн 1,5–1,55 мкм с шириной полосы пропускания порядка долей нанометров, использован каналный волновод на основе одномерной решетки Брэгга на Si/SiO₂ периодических структурах [15]. Профиль распределения показателя преломления в волноводе, представленный на рис. 1, б, а также параметры выбраны таким образом, чтобы обеспечить равенство эффективного показателя преломления $n_{eff} = 1,48 - 1,5$ на длине волны ~1,5-1,55 мкм. Значение величины n_{eff} выбрано согласно дисперсионным свойствам стандартного оптического волновода. Ширина канала составляет $w=1,5$ мкм, что обеспечивает существование мод только низшего порядка. Основные принципы разработки волновода на основе одномерной решетки Брэгга представлены в работе [15].

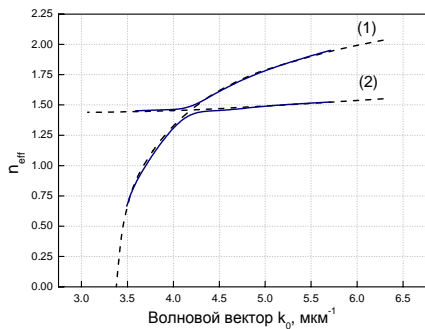


Рис. 2. Дисперсионные характеристики ТЕ мод изолированного каналного волновода на основе одномерной решетки Брэгга (1) и стандартного оптического каналного волновода (2) (пунктирные линии), точка пересечения соответствует длине волны ~1,5 мкм, а также направленного ответвителя (сплошные линии), состоящего из волнопроводов, представленных выше ($D=0,4$ мкм)

В качестве второго канала направленного ответвителя выбран стандартный оптический волновод со следующими параметрами: $n_{cw}=1,86$ — показатель преломления и $b=0,42$ мкм — толщина волноводного слоя, что обеспечивает одномодовый режим в области длины волны равной 1,5 мкм, что было определено, используя соотношение [16, с.2082]

$$\frac{b}{A} = \frac{2b}{\lambda} (n_i^2 - n^2)^{1/2}. \quad (2)$$

Задавая одномодовый режим путем выбора величины отношения $b/A=1,2$, согласно дисперсионной диаграмме в [16, с.2082], посчитано максимальное значение толщины волноводного слоя $b_{max}=0,623$ мкм. Далее путем перебора значений b в диапазоне от 0,65 мкм до 0,4 мкм были определены параметры волновода, обладающего $n_{eff}=1,48$ при $\lambda=1,5$ мкм, что обеспечило пересечение дисперсионных характеристик обоих каналов на выбранной длине волны (рис. 2, пунктирные линии).

Результаты и их обсуждение

Дисперсионные характеристики ТЕ мод направленного ответвителя представлены на рис. 2 (сплошные линии). Видно, что вследствие существенного различия в ходе дисперсионных характеристик двух каналов согласование фазовых скоростей мод обеспечивается только в области $\lambda \sim 1,5$ мкм, что позволяет иметь высоко селективные свойства в предлагаемом фильтре.

В результате моделирования пропускания света направленным ответвителем и расчета спектра пропускания фильтра показано, что с ростом расстояния между каналами ответвителя спектр пропускания становится уже, а длина самого ответвителя, определяемая длиной связи, увеличивается (рис. 3). Это находится в согласии с теорией связанных мод [14, с.520], так, с увеличением межканального расстояния D коэффициент связи k уменьшается, и "супермоды" ответвителя имеют профили распределения, как моды изолированных волнопроводов. И только в узком диапазоне длин волн моды связаны и имеет место их фазовое согласование. Также из-за обратной зависимости длины связи L_C от коэффициента связи k с уменьшением k длина связи растет. Пу-

тем аппроксимации представленной на рис. 3 зависимости ширины полосы пропускания на полувысоте $\Delta\lambda$ от длины связи ответвителя L_c при различных значениях D показано, что для достижения диапазона значений ширины полосы пропускания порядка субнанометров необходимо увеличить межканальное расстояние направленного ответвителя более 2,4 мкм, что приведет также к возрастанию длины структуры до 1 мм.

Принципиальная возможность создания узкополосного фильтра, использующего волновод на основе одномерного фотонного "кристалла", подтверждена экспериментально [17]. Параметры одномерной решетки Брэгга составили $d_1=0,15$ мкм и $d_2=0,25$ мкм. Толщина волноводного слоя составила $d_c=0,28$ мкм. Структура сформирована путем осаждения слоев SiO_2 и $a\text{-Si}$ на $\langle 100 \rangle$ ориентированной кремниевой подложке методом плазмохимического осаждения (ПХО) из газовой фазы в атмосфере силана при температуре 250°C . Для создания сердцевин стандартного волновода концентрация примеси германия в SiO_2 составила приблизительно 4 ат.%. Это обеспечило относительное различие в величине показателя преломления по сравнению с SiO_2 оболочкой, сформированной также методом ПХО. Канальная геометрия фильтра шириной 6 мкм была получена при помощи реактивного травления.

Для получения нормированного спектра пропускания образца использовался перестраиваемый лазер в диапазоне 1480–1590 нм длин волн. Входной и выходной сигналы снимались со стандартного волновода, спектр пропускания направленного ответвителя представлен на рис. 4. Провал в спектре пропускания расположен на длине волны $\sim 1,58$ мкм и является единственным в диапазоне порядка 110 нм. Расчетная ширина полосы пропускания $\Delta\lambda$ составила 0,3 нм при длине связи 2,2 мм, в то время как измеренная ширина полосы пропускания равна 0,8 нм при той же длине связи. Расхождение в величинах рассчитанной и измеренной ширины полосы пропускания может быть объяснено неточностью воспроизведения толщин слоев и их неоднородностью вдоль структуры.

Заключение

Представленные теоретические расчеты направленного ответвителя демонстрируют принципиальную возможность создания интегрального узкополосного фильтра при использовании канального волновода на основе одномерной решетки Брэгга. Проведено векторное моделирование дисперсионных свойств и расчет рабочих характеристик фильтра, представлены его дисперсионные характеристики и профили распределения "супермод". Показана возможность достижения ширины полосы пропускания на полувысоте спектра менее 1 нм при общей длине структуры ~ 1 мм, что подтверждено также экспериментально. Представленные результаты демонстриру-

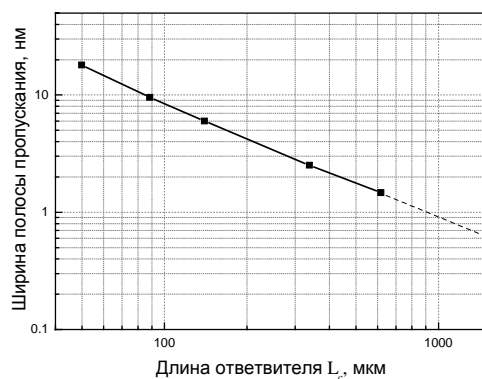


Рис. 3. Зависимость ширины полосы пропускания направленного ответвителя $\Delta\lambda$ от длины связи ответвителя при различных значениях D : 0,4; 0,8; 1,4; 2,0; 2,4 мкм (точки слева направо). Пунктирный участок представляет аппроксимированную зависимость

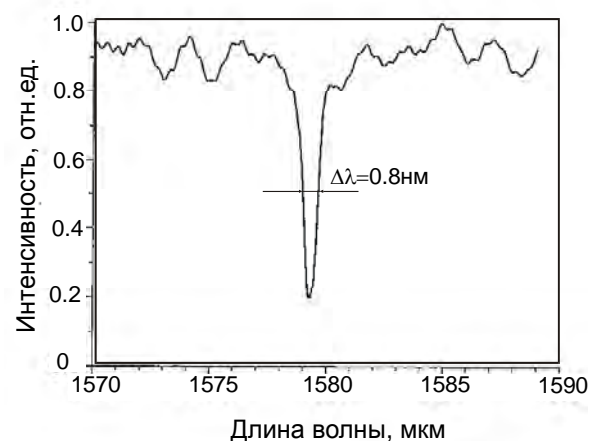


Рис. 4. Нормированный спектр пропускания, полученный с экспериментального образца канального направленного ответвителя на одномерной решетке Брэгга

ют пригодность канального волновода на основе одномерной решетки Брэгга для использования в таком оптическом элементе как узкополосный фильтр, что позволяет улучшить его характеристики по меньшей мере в четыре раза по сравнению с известными фильтрами, что вносит существенный вклад в развитие техники и технологии изготовления интегральных оптических элементов на фотонных кристаллах.

Работа была проведена при частичной поддержке "Photonic Program of the Foundation for strategic Research" и CISCO UPR гранта, а также Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта T02M-127.

INTEGRATED DIRECTIONAL COUPLER WAVELENGTH FILTER FOR 1.5 μm

V.V. SHUSHUNOVA, V.E. BORISENKO, M. SWILLO, B. JASKORZYNSKA,
M. QIU AND L. THYLÉN

Abstract

The narrow band wavelength filter for 1.5 μm based on the coupling between a channel Bragg reflection waveguide (BRW) and a conventional low loss, weakly guiding channel waveguide has been designed. The Bragg reflection waveguide refractive index profile and its parameters were chosen to have the effective refractive index about $n_{eff}=1,48-1,5$ at the wavelength $\sim 1.5-1.55 \mu\text{m}$. The effective refractive index value corresponds to conventional optical waveguide dispersion. The channel width is 1.5 μm to provide only low order mode existing. As a second channel of the directional coupler conventional waveguide is taken with the following parameters: $n_{cw}=1.86$ — refractive index and $b=0.42 \mu\text{m}$ — thickness of core that allowed having a single mode regime in the 1.5 μm wavelength range. The dispersion properties of the narrow band wavelength filter have been vectorially investigated by means the mode matching method. Filter transmission spectra were calculated using the "supermode" theory formalism. The TE and TM mode dispersion of the separated directional coupler channels and the narrow band filter were presented. It was shown that due to significant difference in dispersion of the channels the mode phase velocity agreement could be reached only in the narrow range around 1.5 μm . This fact is allowed having a highly wavelength selective properties for TE mode of the proposed filter. The directional coupler transmission spectra were calculated for different parameters, the channel distance increasing causes decreasing the full width at half maximum (FWHM) and growing coupler length defined by beating length. It is shown that wavelength bandwidth gives the subnanometers range at the filter length about 1 mm that was also proved experimentally.

Литература

1. Marcuse D. Theory of dielectric optical waveguides. Academic Press, 1991.
2. Интегральная оптика / Под общ. ред. Т. Тамира М, 1978.
3. Thylén L. // IEEE J. Quantum Electron. 1987. Vol. QE-23. P 1956.
4. Rigole P.-J., Nilsson S., Berglind E., et al. // SPIE international symposium Optoelectronics. 1997. P. 382.
5. Delisle V., Trutschel U., Tremblay H., et al. // IEEE Photonics Technology Lett. 1996. Vol. 8. P. 791.
6. Gehler J., Bräuer A., Karthe W., et al. // Electron. Lett. 1995. Vol. 31. P. 547.
7. Wu Ch., Rolland C., Puetz N., et al. // IEEE Photonic Technol. Lett. 1991. Vol. 3. P. 519.
8. Wu Ch., Rolland C., Shepherd F., et al. // IEEE Photonic Technol. Lett. 1993. Vol. 4. P. 457.
9. Wu Ch., Wu C.M., Knight D.G., et al. // Electron. Lett. 1995. Vol. 31. P. 231.
10. Mumtaz P., Лу С. Аналитические методы теории волноводов. М, 1974.
11. Mittra R., Hou Yu.L., Jamnejad V. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1980. Vol. MTT-28. P. 36.
12. Tomita M. // IEICE Trans. Electron. 1997. Vol. E80-C. P. 1482.
13. Sudbo A.S. // Pure Appl. Opt. 1994. Vol. 2. P. 211.
14. Yariv A. Optical Electronics. Sanders College Publishing, 1991.
15. Шушунова В.В., Свилло М., Яскоржинска Б., и др. // Изв. Белорус. инж. акад. 2002. № 2(14)/2. С. 8.
16. Marcatili E.A.J. // The Bell System Technical Journal. 1969. N 7. P. 2071.
17. Dainese M., Swillo M., Thylen L., et al. // The Optical Fiber Communication conference. 2003.