

Тонкие гетерогенные оптические волноводы на основе структур кремний-на-изоляторе и их использование в перестраиваемых оптических мультиплексорах

А.В.Царев

Предлагается и исследуется новый вид оптических волноводов в наноразмерных структурах кремний-на-изоляторе (КНИ). Их оптические свойства, а также возможность использования в перестраиваемых оптических фильтрах и мультиплексорах обсуждаются на основе результатов численного моделирования методами ВРМ и FDTD. Предложен новый дизайн гетерогенных волноводных структур, содержащих дополнительные области с высокой концентрацией свободных носителей заряда в виде p–n-перехода, расположенные по краям многомодового полоскового волновода (сечение кремниевой сердцевины $\sim 0.22 \times 35$ мкм). Такое легирование обеспечивает одномодовое поведение гетерогенного волновода благодаря низким оптическим потерям фундаментальной моды и увеличенным потерям высших мод. Гетерогенные волноводы могут служить базовыми для создания различных фотонных элементов, в том числе новых типов перестраиваемых оптических фильтров и мультиплексоров на основе мультиотражательной технологии.

Ключевые слова: интегральная оптика, оптический волновод, оптические потери, кремний-на-изоляторе, перестраиваемый оптический мультиплексор ввода/вывода, мультиотражательная технология, численные методы FDTD и ВРМ.

1. Введение

Перестраиваемые оптические фильтры и мультиплексоры ввода/вывода (reconfigurable optical add/drop multiplexer (ROADM)) относятся к числу наиболее востребованных фотонных устройств, работающих на основе частотного (спектрального) уплотнения (WDM), от которых зависит дальнейшая возможность повышения гибкости и пропускной способности волоконно-оптических линий связи. Хотя в мире разработано и запатентовано множество различных типов фильтров и мультиплексоров для WDM [1], однако ни один из них не обладает достаточным потенциалом для того, чтобы заменить собой другие во всех возможных применениях.

С целью снижения стоимости одного спектрального канала, что необходимо для более широкого использования технологии WDM, нами предложены новые типы перестраиваемых фильтров и мультиплексоров, основанные на планарной технологии интегральной оптики и новой мультиотражательной фильтрующей технологии [2–6]. Последняя по-новому использует явления волнового распространения света, многократных отражений и конструктивной интерференции. Она обеспечивает узкополосную фильтрацию оптического излучения за счет пространственного расширения узкого входящего оптического пучка с помощью запатентованного мультиотражательного расширителя пучка [2, 3] с очень высо-

кой дисперсией. Управление заданной оптической длиной волны и ее фильтрация осуществляются с помощью набора перестраиваемых полосковых волноводов [4, 7–9] или за счет брэгговской дифракции на поверхностной акустической волне [5, 6, 10–12] для множества световых микропотоков, объединяемых в выходных полосковых волноводах других расширителей пучка. Мультиотражательная технология позволяет разрабатывать перестраиваемые оптические элементы (не только мультиплексоры, но и фильтры, лазеры и т. д.) с использованием различных материалов (кремний, полимеры, ниобат лития, халькогенидные стекла и т. д.) [7–11], на основе которых можно создавать частично пропускающие отражатели и одномодовые волноводы с малыми потерями (менее 1 дБ/см) для управления фазой или направлением оптической волны.

Целью данной работы является поиск новых подходов к построению перестраиваемых оптических мультиплексоров на основе тонких структур кремний-на-изоляторе (КНИ). В качестве базовых для исследования выбраны новые гетерогенные полосковые оптические волноводы [12] на основе наноразмерных структур КНИ, в которых дополнительно сформированы области с высокой концентрацией двух типов свободных носителей заряда (электронов и дырок), обеспечивающие малые оптические потери и нехарактерное одномодовое поведение очень широких (свыше 10 мкм) высококонтрастных волноводов КНИ с кремниевой сердцевиной толщиной ~ 220 нм. В данной работе рассматривается также возможность применения гетерогенных волноводов для создания перестраиваемых фильтров и ROADM с использованием мультиотражательной технологии в тонких структурах КНИ [13, 14], совместимой со стандартной КМОП-технологией [13]. Преимущества нового дизайна оптических

А.В.Царев. Институт физики полупроводников СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева 13; e-mail: tsarev@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 27 февраля 2007 г., после доработки – 16 октября 2007 г.

элементов на основе гетерогенных волноводов иллюстрируются модельными расчетами. Расчеты проводились методом распространяющихся пучков (BPM) и методом конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием коммерческих программных пакетов BeamPROP и FullWAVE, разработанных компанией RSoft Design Group Inc. [15] для нужд интегральной оптики. Для ускорения расчетов мы использовали метод эффективного показателя преломления [16], который заменяет трехмерный волновод на его двумерный планарный аналог. При этом квази-ТЕ-мода 3D-волновода соответствует квази-ТМ-моду эквивалентного 2D-волновода.

2. Квазиодномодовые оптические полосковые волноводы на тонких слоях КНИ

Сравнительно недавно было предложено использовать дифракционные 2D-решетки [17], изготовленные в структурах КНИ, для ввода излучения по нормали из оптоволокна в тонкий кремниевый волновод. Обычно такие решетки представляют собой круглые канавки диаметром 300 нм, вытравленные на глубину 90 нм с шагом 580 нм в полосковом кремниевом волноводе толщиной 220 нм на заглубленном слое оксида толщиной 1 мкм. Двумерные нанорешетки очень перспективны для совместного использования с мультиотражательной фильтрующей технологией, т.к. они упрощают ввод света в оптический волновод и обеспечивают дополнительную возможность поляризационной независимости устройств [18]. Как было показано [17], оптические моды двух ортогональных поляризаций вводятся в волновод 2D-решеткой с одинаковой эффективностью и распространяются по разным (перпендикулярным) направлениям в виде волн квази-ТЕ-поляризации. Пространственно разделенные оптические сигналы затем параллельно обрабатываются двумя одинаковыми (даже поляризационно-зависимыми) элементами; на выходе устройства эти сигналы могут снова объединяться на выходной 2D-решетке [18]. Все это позволяет отказаться от дополнительных элементов вращения поляризации, которые часто используют для того, чтобы сделать устройства поляризационно-независимыми [8].

Серьезным недостатком такого элемента ввода является необходимость использования волноводных структур с высоким контрастом показателей преломления (у кремния $n = 3.478$, у оксида $n = 1.447$), что делает невозможным одновременное выполнение взаимоисключающих требований к оптимальным геометрическим размерам кремниевой сердцевинки в структуре КНИ. Действительно, для снижения уровня паразитных сигналов волновод должен быть одномодовым, т.е. должен иметь субмикронные размеры. В поперечном направлении это условие выполняется за счет оптимальной толщины (~ 220 нм) высококачественного слоя кремния. В то же время ширина таких полосковых волноводов должны быть достаточно велика (~ 10 мкм), чтобы обеспечить его приемлемое согласование с оптоволокном, поэтому волноводы обязательно будут многомодовыми. При их возбуждении может наблюдаться сильная межмодовая интерференция, приводящая к искажениям формы оптического пучка, что особенно наглядно проявляется в случае рассогласования пространственного распределения и положения возбуждающего оптического пучка с фундаментальной модой волновода (рис.1,а). Поэтому для до-

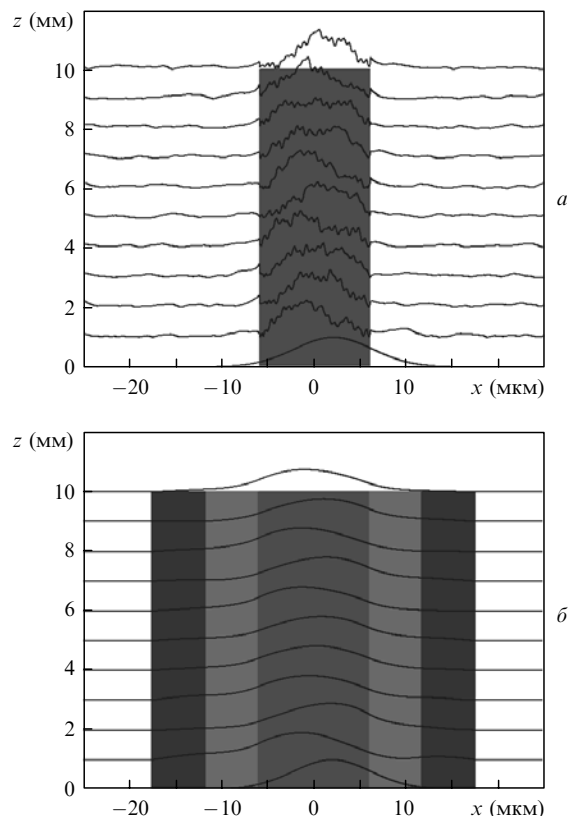


Рис.1. Распространение гауссова оптического пучка, смещенного на 2 мкм по отношению к оси широкого волновода на КНИ. Пространственное распределение магнитного поля ТМ-моды для стандартного многомодового волновода ($W = 12$ мкм) (а) и то же для гетерогенного квазиодномодового волновода ($W = 12$ мкм, $W_0 = 35$ мкм) (б).

стижения одномодового режима обычно предлагается использовать адиабатическое сужение сердцевинки волновода (примерно в 25 раз), что приводит к дополнительным потерям и не всегда приемлемо. Заметим, что широкие оптические волноводы целесообразно использовать для обеспечения малых потерь и низкого паразитного рассеяния при их взаимном пересечении.

Следовательно, необходим поиск такой конструкции волноводов на КНИ, чтобы они одновременно были большими и одномодовыми. Для толстых (3–8 мкм) гребенчатых волноводов это достигается за счет использования гребня с оптимальными шириной и высотой над планарным основанием [19, 20]. При этом только основная мода может распространяться с малыми потерями, а все остальные моды излучаются по мере их распространения. Для 2D-решеток на тонких слоях КНИ эта технология неприменима, поэтому недавно было предложено [12] использовать гетерогенные квазиодномодовые полосковые волноводы, на краях которых расположены высоколегированные p^+ -области. Принцип их работы основан на использовании дисперсии свободных носителей заряда для селекции фундаментальной моды (за счет создания высоких потерь для всех высших мод).

В настоящей работе впервые рассматриваются гетерогенные оптические волноводы с высоколегированными областями в виде $p-n$ -переходов, в которых принципиальную роль играют оба типа свободных носителей заряда – электроны и дырки. Такая конструкция гетерогенных волноводов обеспечивает не только общую элек-

тронеитральность в области легирования, но и более высокий уровень модовой селекции по сравнению со случаем использования только одного типа носителей заряда.

Как было показано ранее [12] на основе анализа классических работ Сорфа и Беннета [21, 22], свободные электроны в кремнии обеспечивают относительно более высокий уровень оптических потерь, чем дырки. Поэтому в настоящей работе предлагается в непосредственной близости от сердцевины волновода использовать легирование донорами, а ближе к краям – акцепторами (рис.2). Ширины всех областей легирования выбраны одинаковыми (W_g), и для обеспечения электронейтральности концентрации свободных электронов и дырок также предполагаются одинаковыми. Для нас важно исследовать оптические свойства гетерогенных волноводных структур, поэтому из соображения удобства, но без потери общности в работе рассматривается однородное распределение свободных носителей заряда по структуре КНИ. Кроме того, из [21, 22] можно получить удобное для использования эмпирическое соотношение между достигаемым изменением реальной части показателя преломления (Δn) и возникающим при этом дополнительным поглощением ($\Delta \alpha$) на свободных носителях заряда. Для длины волны $\lambda_0 = 1.55$ мкм в кремнии это соотношение имеет вид [12]

$$\Delta \alpha_e = 0.12 |\Delta n_e|, \quad \Delta N_e = 1.14 \times 10^{21} |\Delta n_e|, \quad (1)$$

$$\Delta \alpha_h = 0.16 |\Delta n_h|^{5/4}, \quad \Delta N_h = 2.18 \times 10^{21} |\Delta n_h|^{5/4}.$$

Здесь ΔN_h и ΔN_e – объемные (в см^{-3}) концентрации дырок и электронов; потери $\Delta \alpha_e$ и $\Delta \alpha_h$ измеряются в см^{-1} . При этом полагается, что общее изменение комплексного показателя преломления за счет дисперсии света на свободных носителях заряда описывается выражением [21]:

$$\Delta n = \Delta n_h + \Delta n_e + i \Delta \alpha \lambda_0 / 4\pi, \quad (2)$$

где $\Delta \alpha = \Delta \alpha_h + \Delta \alpha_e$; $\Delta n_e = -8.8 \times 10^{-22} N_e$; $\Delta n_h = -8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{4/5}$.

Эти уравнения позволяют полностью охарактеризовать оптические свойства гетерогенных волноводов при произвольных приращениях Δn_h действительной части показателя преломления вследствие присутствия свободных дырок, осуществить поиск оптимальных параметров волноводных структур (в нашем случае $\Delta N_h = \Delta N_e$, поэтому $\Delta n_e = 1.91 |\Delta n_h|^{5/4}$), а затем из выражения (1) определить необходимую для этого концентрацию свободных носителей заряда.

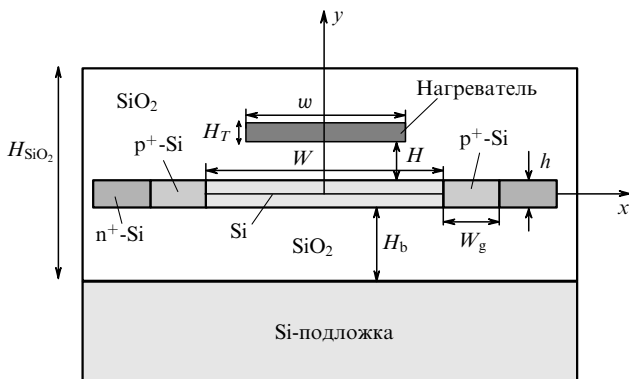


Рис.2. Принципиальная схема гетерогенного оптического волновода в структурах КНИ с локальным нагревателем.

Рассмотрим полосковый волновод (см. рис.2) на основе КНИ шириной $W_0 = W + 4W_g$, на краях которого имеются сильнолегированные p^+ - и n^+ -области шириной W_g , в которых вследствие дисперсии на свободных носителях заряда показатель преломления меньше, чем в сердцевине волновода шириной W . Таким образом, за счет сильнолегированных областей формируется гетерогенный оптический волновод (рис.3,а), в котором на основании многомодового сильноконтрастного волновода (кремний–окисел) сформировано три дополнительных сильносвязанных слабоконтрастных оптических волновода. Выбрав $|\Delta n_h| \approx 0.002$ (при $\Delta N_h \sim 9.2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) легко обеспечить концентрацию основной доли энергии фундаментальной моды в центральной части волновода шириной W . Свойства этой фундаментальной моды, за исключением меньших оптических потерь, в целом аналогичны свойствам нулевой моды стандартного полупроводникового волновода, сформированного за счет градиента свободных носителей заряда [23].

Принципиальные отличия возникают для всех других мод гетерогенного волновода, эффективные показатели преломления которых близки или меньше показателя преломления легированной области. Их оптические поля занимают всю область волновода W_0 , поэтому доля энергии, приходящаяся на диссипативную область, во много раз больше, чем у фундаментальной моды (рис. 3,а). Следовательно, у этих мод неизбежно возникает значительное дополнительное затухание на свободных

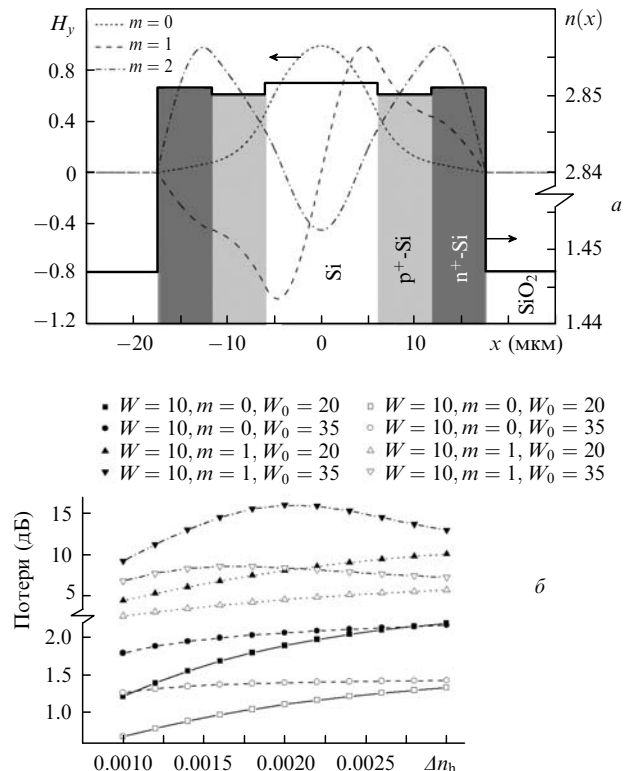


Рис.3. Оптические свойства гетерогенных полосковых волноводов на тонких слоях КНИ. Распределение действительной части показателя преломления и оптических полей первых трех мод ($W = 10$ мкм, $W_0 = 35$ мкм) (а) и дополнительные оптические потери на свободных носителях заряда в полосковом оптическом волноводе для различных волноводных мод как функция приращения действительной части показателя преломления в p^+ -области для $W = 10$ и 12 мкм, $m = 0$ и 1 , а также $W_0 = 20$ и 35 мкм (б). Расчет проведен методом 2D-ВРМ.

носителях, которое растет с номером моды. Эти утверждения были подтверждены прямыми расчетами методом ВРМ [15]. В качестве иллюстрации на рис. 3,б приведены зависимости оптических потерь двух первых волноводных мод как функция Δn_h для ширин W_0 и W . Хорошо видно, что высокая селекция фундаментальной моды достигается при довольно широких оптических волноводах ($W_0 \sim 35$ мкм), причем ее оптические потери могут быть очень низкими (-2.1 дБ и -1.4 дБ при $W = 10$ и 12 мкм соответственно). Можно показать, что применение р-п-перехода приводит к значительно лучшей селекции фундаментальной моды относительно мод более высоких номеров. В частности для оптического волновода ($W_0 \sim 35$ мкм) характеристической длины, обеспечивающей оптические потери фундаментальной моды -3 дБ, дополнительное затухание для первой моды на свободных носителях заряда относительно уровня затухания фундаментальной моды в случае р-п-перехода составляет -20.4 и -15.8 дБ при $W = 10$ и 12 мкм соответственно против -10.5 и -11.8 дБ в случае только р⁺-легирования.

Таким образом, широкий гетерогенный волновод на КНИ приобретает свойства одномодового волновода. В частности это наглядно проявляется при его внеосевом возбуждении гауссовым оптическим пучком (см. рис. 1,б). Хорошо видно его принципиальное отличие от случая возбуждения многомодового волновода, при котором наблюдаются большие осцилляции амплитуды поперечного распределения поля (см. рис. 1,а). На выходе гетерогенного волновода вне зависимости от характера возбуждения формируется только фундаментальная мода, имеющая значительно меньшие потери, чем все другие моды, которые могут присутствовать в волноводе в момент его возбуждения.

Полученные результаты наглядно показывают, что гетерогенный волновод с кремниевой сердцевиной $\sim 0.22 \times 35$ мкм можно сделать квазиодномодовым с оптическими потерями менее 1.5 дБ/см. Дополнительным преимуществом гетерогенных волноводов является слабая зависимость оптических потерь от шероховатости его боковых границ из-за большой ширины гетерогенного волновода и изолированности поля фундаментальной моды от источников рассеяния с помощью р-п-областей. Поэтому ожидается, что его оптические потери будут ниже потерь (~ 2.4 дБ/см) для одномодового полоскового волновода на КНИ меньшего сечения (0.22×0.50 мкм), изготовленного по той же технологии КМОП [13].

3. Оптические мультиплексоры на гетерогенных оптических волноводах

Уникальные свойства гетерогенных оптических волноводов делают их очень перспективными для многочисленных приложений в фотонике и интегральной оптике. В частности их целесообразно использовать при разработке перестраиваемых оптических фильтров и мультиплексоров на основе мультиотражательной технологии (рис. 4). Ее основу составляют мультиотражательные расширители пучка [2, 3], для создания которых необходимо вдоль полоскового оптического волновода сформировать набор частично отражающих элементарных отражателей с переменными значениями коэффициента отражения (обычно 0.1% – 1% [7–9]).

Известно [8, 9], что наклонное расположение волноводов в мультиплексоре (рис. 4,а) увеличивает крутизну

$(\delta\lambda/\delta T)$ температурной перестройки длины волны, которая для угла $\theta = 60^\circ$ может достигать рекордных (~ 0.6 нм/°C) значений без применения принципа нониуса [24]. Геометрические факторы, характеризующие мультиплексор, определяются двумя параметрами [8]:

$$\sigma_r = (1 - \sin \theta)^{-1}, \quad (3)$$

$$\sigma_x = \cos \theta (1 - \sin \theta)^{-1},$$

где θ – угол ориентации расширителя пучка относительно оси y (рис. 4,а). Параметр σ_r определяет относительное увеличение периода расположения d_r отражателей вдоль расширителя пучка, а также задает фактор увеличения крутизны температурной перестройки длины волны по отношению к случаю мультиплексора ортогональной ориентации ($\theta = 0$). Аналогично параметр σ_x определяет относительное увеличение периода расположения соединительных волноводов d_x вдоль оси x (рис. 4,а):

$$d_r = \sigma_r d_0, \quad d_x = \sigma_x d_0, \quad d_0 = \text{Integer}(\lambda_0/\Delta\lambda)\lambda_0/(2N_m), \quad (4)$$

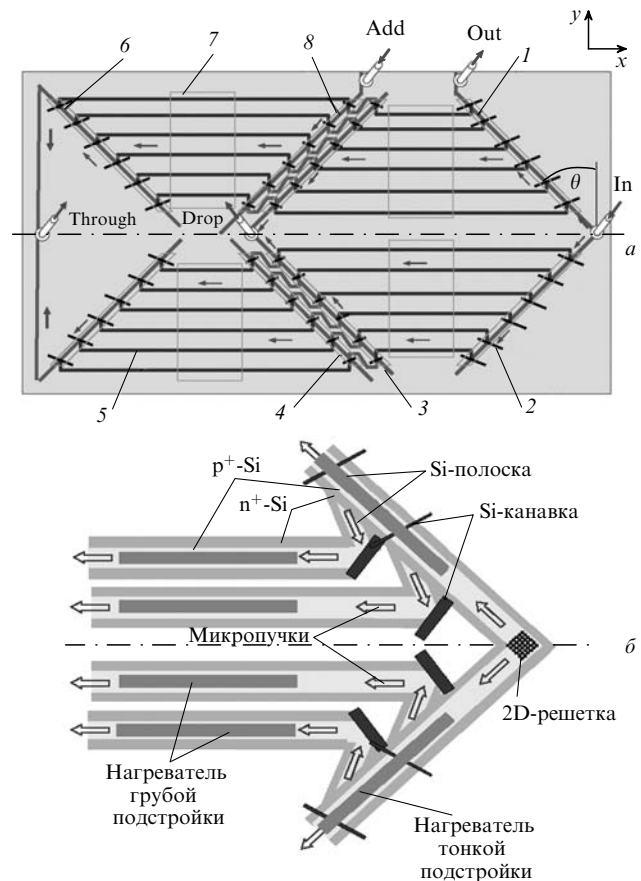


Рис. 4. Принципиальная схема мультиотражательного мультиплексора на КНИ. Общий вид мультиплексора (а) и схема области мультиплексора около элемента ввода из оптоволокна в волновод с помощью 2D-решетки (б):

1 – входной расширитель пучка (In) с контрольным выводом (Out); 2 – элементарный отражатель; 3 – полосковый волновод расширителя пучка канала фильтрации (Drop); 4 – фазосдвигающие элементы тонкой подстройки; 5 – массив поперечных соединительных волноводов; 6 – полосковый волновод расширителя пучка канала прохождения (Through); 7 – фазосдвигающие элементы грубой подстройки; 8 – полосковый волновод расширителя пучка для добавления сигнала (Add).
Нагреватель грубой подстройки
Нагреватель тонкой подстройки

где Integer – целая часть; $\lambda_0 \sim 1.54$ мкм – центральная длина волны мультиплексора; $\Delta\lambda \sim 40$ нм – полоса перестройки мультиплексора; $N_m \sim 2.85$ – эффективный показатель преломления фундаментальной моды КНИ волновода. Основные геометрические параметры мультиплексора приведены в табл.1. Можно показать, что из-за малого показателя преломления и низкой теплопроводности окиси кремния тонкие волноводы КНИ оптически и термически не связаны при зазоре между ними больше 3 мкм. Следовательно, при $\theta \sim 60^\circ$ геометрические размеры широких гетерогенных оптических волноводов удовлетворяют требованиям к параметрам мультиотражательных мультиплексоров. При этом обеспечивается более чем семикратное увеличение крутизны перестройки длины волны по сравнению с крутизной при использовании всех других схем перестраиваемых мультиплексоров, например на основе кольцевых резонаторов.

Табл.1.

Параметр	θ (град)				
	0	50	55	60	65
σ_x	1.000	2.747	3.172	3.732	4.511
σ_r	1.000	4.274	5.530	7.464	10.673
d_x (мкм)	10.61	29.14	33.64	39.58	47.84
d_r (мкм)	10.61	45.33	58.65	79.16	113.20

Данному случаю ($\theta = 60^\circ$) соответствует угол падения света на отражатель, равный 75° . При таком угле падения необходимые для оптимальной работы мультиплексора коэффициенты отражения легко достигаются за счет незначительных изменений показателя преломления отражающих полосок, выполняющих функцию элементарных отражателей. Зависимости коэффициентов отражения и пропускания по мощности для отражающих полосок шириной 0.7 мкм, полученных при наличии легированных p^+ -областей в кремнии, приведены на рис.5,а. Это позволяет конструировать мультиотражательные элементы с использованием управления концентрацией носителей заряда (дырок) в полупроводнике.

Альтернативный подход к формированию мультиотражательных элементов показан на рис.4,б. Здесь мультиплексор структурирован таким образом, что оптические микропотoki попадают на элементарные отражатели под углом, близким к углу Брюстера. Тогда для случая квази-ТЕ-мод трехмерного волновода коэффициент отражения может быть достаточно малым даже при высоком контрасте показателей преломления в материале волновода и отражателя. Это позволяет конструировать элементарные отражатели в виде глубоких наноразмерных канавок, пересекающих сердцевину волновода КНИ. На рис.5,б приведены результаты расчета методом 2D-FDTD коэффициента отражения ТМ₀-моды (соответствует квази-ТЕ-поляризации 3D-волновода) от угла падения света на отражатель в виде глубокой канавки различной ширины. Видно, что за счет изменения угла падения (а также ширины канавки) можно в широком диапазоне варьировать коэффициент отражения от элементарного отражателя. Следовательно, технологию изготовления наноканавок можно использовать при конструировании мультиотражательных мультиплексоров. Достоинство данной технологии состоит в возможности исключить заполнение канавки материалом с другими оптическими

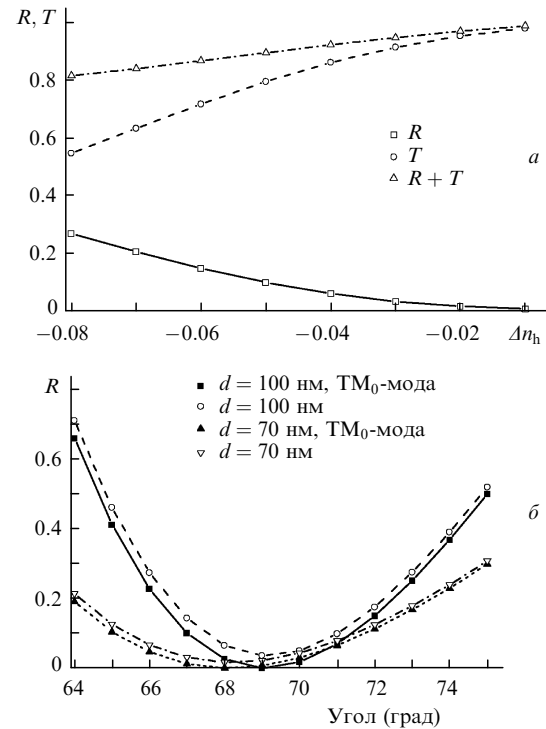


Рис.5. Зависимости коэффициентов отражения и прохождения как функция приращения действительной части показателя преломления, вызванного присутствием свободных носителей заряда (дырок) в полоске отражателя шириной 0.7 мкм (а) и коэффициента отражения как функция угла падения света на отражатель в виде глубокой канавки толщиной 70 и 100 нм, $W = 10$ мкм (б). Расчет проведен методом 2D-FDTD.

свойствами, что часто необходимо для обеспечения малого коэффициента отражения [8].

Важно отметить, что при углах падения, очень близких к углу Брюстера, происходит трансформация формы отраженного пучка. В результате в отраженном пучке присутствует много мод высокого номера. На рис.5,б это иллюстрируется светлыми точками, отвечающими полной энергии всех мод в отраженной волне. Хотя данный эффект и вызывает некоторый рост общих потерь в мультиплексоре, он не приводит к появлению паразитных мультимодовых осцилляций, т.к. все высшие моды быстро затухают при дальнейшем распространении вдоль гетерогенного оптического волновода.

Чтобы подтвердить это, мы провели прямое численное моделирование мультиотражательного мультиплексора методом 2D-FDTD (рис.6). Известно, что FDTD-метод очень критичен к размерам области вычислений. Поэтому из соображений целесообразности и с учетом наших вычислительных возможностей для анализа был выбран мультиплексор с прямоугольной ориентацией волноводов ($\theta = 0$) и тремя мультиотражательными расширителями пучка, каждый из которых содержит по 32 одинаковых эквидистантно расположенных отражателя в виде глубоких канавок шириной 50 нм с шагом 7 мкм. Наличие свободных носителей (дырок) моделировалось введением комплексного показателя преломления материала, окружающего полосковые волноводы.

Общая схема устройства и распределение амплитуд поля ТМ-моды (H_y) в ходе распространения оптического пучка по устройству показаны на рис.6,а. Длина волны 1.526 мкм соответствует максимальной эффективности фильтрации оптического излучения из входного расши-

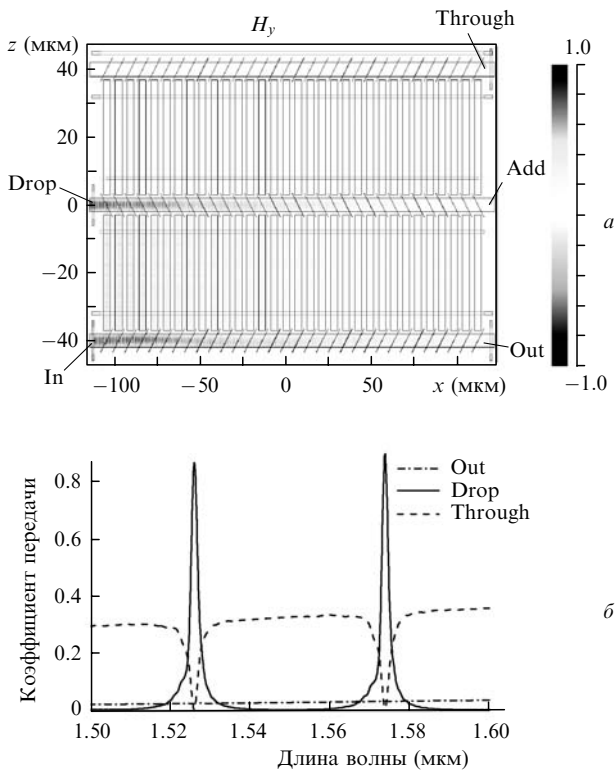


Рис.6. Численное моделирование методом 2D-FDTD мультиотражательного мультиплексора с прямоугольной ориентацией и тремя расширителями пучка с 32 отражателями в виде глубокой канавки толщиной 50 нм и шагом 7 мкм: распределение амплитуды поля H_y в ходе распространения оптического пучка на длине волны максимальной фильтрации (1.526 мкм) по мультиплексору (а) и расчетная зависимость коэффициента передачи по мощности (б) (ширина волноводов 4 мкм).

рителя пучка (In) в средний расширитель (Drop). Видно, что фильтруется большая часть энергии, и поэтому до выхода первого расширителя пучка (Out) и последнего расширителя пучка канала прохождения (Through) доходит незначительная доля энергии. Зависимости спектрального пропускания для различных каналов мультиплексора, приведенные на рис.6,б, показывают, что устройство действительно выполняет функцию оптического мультиплексора и осуществляет фильтрацию заданной длины волны на канал Drop. Все остальные неотфильтрованные длины волн проходят на выход устройства до канала Through. Исходя из симметрии устройства легко показать, что сигнал на длине волны фильтрации 1.526 мкм может быть введен в устройство через правый конец (Add) среднего расширителя пучка и соответственно будет перенаправлен (с минимальными потерями) на выход устройства Through.

Более высокие параметры мультиплексора по спектральному разрешению и подавлению паразитных сигналов могут быть достигнуты за счет увеличения числа отражателей и оптимального выбора их коэффициента отражения, а также за счет использования отдельного расширителя пучка для канала Add (см. рис.4,а). Спектральные свойства таких мультиплексоров, предназначенных для работы с сеткой частот высокой плотности, описаны нами ранее [7, 8]. Принципиально важно отметить, что хотя эти результаты были получены для гребенчатых оптических волноводов на КНИ, они могут быть применены и для мультиплексоров с гетерогенными оптическими волноводами.

Для работы мультиплексора необходимо также обеспечить возможность мелкомасштабного изгиба с малыми потерями оптических волноводов (см. рис.4,б). Одно из преимуществ волноводов с высоким контрастом показателей преломления заключается в том, что они легко позволяют реализовывать такой изгиб [14]. Предлагаемые гетерогенные волноводные структуры сохранили это важное свойство. В частности, методом 2D-FDTD нами исследована возможность изменения направления гетерогенных полосковых волноводов за счет полного внутреннего отражения на глубоких канавках шириной 1 мкм. Для углов падения 30° , 45° и 60° дополнительные потери на поворот составили 0.2, 0.13 и 0.04 дБ, соответственно. Это позволяет с малыми потерями изменять направление полосковых волноводов в пределах $60^\circ - 120^\circ$, что удовлетворяет всем задачам конструирования мультиплексоров с наклонной ориентацией.

Как было показано ранее [7, 8], управление длиной волны предлагаемых мультиплексоров можно осуществлять с помощью термооптического эффекта. Термооптические фазосдвигающие элементы, расположенные вдоль расширителей пучка, могут осуществлять тонкую настройку длины волны, крутизна перестройки которой для наклонных структур возрастает в несколько раз (см. табл.1). Фазосдвигающие элементы для грубой настройки располагаются вдоль соединительных полосковых волноводов. Они позволяют осуществлять дискретную перестройку длины волны в широком спектральном диапазоне при малых изменениях управляющих температур. Согласованное использование элементов тонкой и грубой настройки обеспечивает перестройку длины волны в пределах телекоммуникационного C- или L-диапазона при рекордно низком уровне управляющих температур [7, 8].

Проведенные исследования позволяют предложить новый дизайн перестраиваемых оптических мультиплексоров, принципиальные элементы которых схематично показаны на рис.4. Основу оптической схемы составляют гетерогенные оптические волноводы на тонких КНИ-структурах. Области с высокой концентрацией свободных носителей заряда (в виде p-n-перехода на краях волноводов) обеспечивают малые оптические потери и квазиодномодовое поведение широких гетерогенных кремниевых волноводов. Эти же области служат для изоляции оптических мод пересекающихся волноводов при одновременном обеспечении малых потерь на пересечение.

Для ввода и вывода оптического излучения используются двумерные нанорешетки, которые вводят оптическое излучение двух ортогональных поляризаций и направляют их в виде квази-ТЕ-волн по двум перпендикулярным направлениям вдоль расширителей пучка двух параллельных каналов обработки. Расширители пучка формируются с помощью наноканавок, изменение ширины и угловой ориентации которых может обеспечивать требуемые значения коэффициентов отражения. Изменение направления соединительных волноводов осуществляется также с помощью глубоких канавок, но большей (порядка микрона) ширины. Управление рабочей длиной волны мультиплексора осуществляется термооптическими фазосдвигающими элементами [7, 8] с локальными нагревателями на вершине (см. рис.2). Малая энергия и высокая скорость переключения обусловлены наноразмерной толщиной кремниевой сердцевины

Табл.2.

G (ГГц)	X (см)	Y (см)	ILt (дБ)		ILd (дБ)	
			$\alpha_{\text{loss}} = 1.5$ дБ/см	$\alpha_{\text{loss}} = 1.0$ дБ/см	$\alpha_{\text{loss}} = 1.5$ дБ/см	$\alpha_{\text{loss}} = 1.0$ дБ/см
25	8.45	1.73	18.6	14.2	13.9	10.7
50	4.53	0.92	12.1	9.7	9.6	7.9
100	2.60	0.62	9.4	8.1	7.6	6.5

КНИ-волноводов и низкой теплопроводностью окиси кремния.

Оценки характерных параметров предлагаемых мультиплексоров для угла ориентации $\theta = 60^\circ$ приведены в табл.2 для различных используемых сеток частот G международного союза радиосвязи ITU. Видно, что предлагаемая технология обеспечивает конкурентные технические параметры при разумных размерах мультиплексора (X и Y), особенно для сетки частот 50 и 100 ГГц. При расчете вносимых потерь для канала фильтрации ILd и канала прохождения ILt использованы следующие характерные параметры: потери на ввод/вывод ~ 1.5 дБ на элемент ввода, внутренние потери мультиплексора ~ 1.5 дБ, потери на пересечение волноводов ~ 0.1 дБ, потери на управление ~ 0.1 дБ; волноводные потери α_{loss} использовались в табл.2 в качестве параметра.

4. Заключение

Предложен и исследован новый тип нанофотонных оптических волноводных структур на основе технологии кремний-на-изоляторе. Они представляют собой гетерогенные оптические волноводы, имеющие сильно легированные $p^+ - n^+$ -области по краям кремниевой сердцевины (в виде полосы высотой 220 нм и шириной 35 мкм в окружении окиси кремния). Дополнительное легирование обеспечивает квазиодномодовость гетерогенного волновода благодаря низким оптическим потерям фундаментальной моды и увеличению потерь мод более высокого номера (вследствие разного затухания на свободных носителях заряда). Предлагаемые волноводы позволяют по-новому конструировать оптические фильтры и мультиплексоры на основе перспективной мультиотражательной фильтрующей технологии. Кроме гетерогенных волноводов такие устройства могут включать в себя двумерные нанофотонные дифракционные решетки для ввода/вывода света из оптоволокна и обеспечения поляризационной независимости устройств, наноканавки или полосы из p^+ -областей для создания мультиотражательных расширителей пучка, а также локальные нагреватели для создания термооптических управляющих элементов широкодиапазонной перестройки фильтруемой длины волны в пределах телекоммуникационного С- или L- диапазона. Оптические свойства гетерогенных оптических волноводов, а также возможность их использования в перестраиваемых оптических фильтрах и мультиплексорах ввода/вывода исследованы на основе численного моделирования методами FDTD и

ВРМ с помощью коммерческого программного обеспечения от компании RSoft Design Group Inc.

Автор выражает благодарность компании RSoft Design Group Inc. за предоставление лицензии и осуществление поддержки к программному пакету Rsoft Photonic CAD Suite 8.0 [15] по численному моделированию интегрально-оптических элементов.

Работа выполнена при поддержке инновационных грантов РФФИ № 05-02-08118-офи_а и 08-02-12145-офи_а.

1. Наний О.Е. *Lightwave Rus. Ed.*, **2**, 47 (2004).
2. Царев А.В. *Расширитель пучка*. Патент РФ № 2183337 от 10 июня 2002 г. Приоритет от 19 июля 2000 г.
3. Tsarev A.V. *Beam-expanding device*. US Patent No. 6.836.601, December 28, 2004. Foreign Application Priority Data Jul., 19, 2000.
4. Tsarev A.V. *Tunable optical filters*. US Patent No. 6.999.639, February 14, 2006. Foreign Application Priority Data Sep., 06, 2001.
5. Царев А.В. *Акустооптический перестраиваемый фильтр*. Патент РФ 2182347 от 10 мая 2002 г. Приоритет от 4 августа 2000 г.
6. Tsarev A.V. *Acousto-optical variable filter*. US Patent No.7.092.139, August 15, 2006. Foreign Application Priority Data Aug., 04, 2000.
7. Passaro V.M.N., Magno F., Tsarev A.V. *Opt. Express*, **13**, 3429 (2005).
8. Tsarev A.V., Passaro V.M.N., Magno F., in *Silicon Photonics*. Ed. by V.M.N.Passaro (Trivandrum, Kerala, India: Research Signpost, 2006, Ch. 3, p. 47).
9. Tsarev A.V., Passaro V.M.N. *Proc. 12th Europ. Conf. on Integr. Opt.* (Grenoble, France, 2005, p. 394).
10. Tsarev A.V. *Appl. Phys. B*, **73**, 495 (2001).
11. Царев А.В., Колосовский Е.А. *Автометрия*, **42**, 93 (2006).
12. Царев А.В. *Квантовая электроника*, **37**, 775 (2007).
13. Bogaerts W., Baets R., Dumon P., Wiaux V., Beckx S., Taillaert D., Luyssaert B., Campenhout J.V., Bienstman P., Thourhout D.V. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **23**, 401 (2005).
14. Aalto T., Harjanne M., Kapulainen M., Heimala P., Leppihalme M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5333**, 81 (2004).
15. www.rsoftdesign.com.
16. Chiang K.S. *Appl. Opt.*, **25**, 2169 (1986).
17. Taillaert D., Chong H., Borel P., Frandsen L., De La Rue R., Baets R. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 1249 (2003).
18. Bogaerts W., Taillaert D., Dumon P., Van Thourhout D., Baets R. *Opt. Express*, **15**, 1567 (2007).
19. Soref R.A., Schmidtchen J., Petermann K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 1971 (1991).
20. Pogossian S.P., Vescan L., Vonsovici A. J. *Lightwave Technol.*, **16**, 1851 (1998).
21. Soref R.A., Bennett B.R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **704**, 32 (1986).
22. Soref R.A., Bennett B.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 123 (1987).
23. Хансперджер Р. *Интегральная оптика: Теория и технология* (М.: Мир, 1985, с. 72).
24. Floriot J., Lemarchand F., Lequime M. *Opt. Express*, **12**, 6289 (2004).