

Оптические свойства широких одномодовых канальных волноводов с наложенной полоской и дифракционной решеткой

А.В.Царев

Исследуются новые широкие одномодовые канальные оптические волноводы с наложенной полоской и решеткой (НПР) из нитрида кремния на буферном окисном слое планарного волновода кремний-на-изоляторе. Центральная полоска шириной 10 мкм формирует канальный многомодовый волновод, а дифракционные решетки с периодом 0.6 мкм, изготовленные на краях структуры, создают зависящие от номера моды дополнительные потери за счет излучения в окружающую среду. Оптические свойства предлагаемых волноводов обсуждаются с использованием результатов трехмерного численного моделирования методами FDTD и BPM. Показано, что широкий НПР-волновод является практически одномодовым, так как обладает малыми потерями на распространение (~ 0.3 дБ/см) для фундаментальной моды и высоким (до -20 дБ/см) уровнем потерь для мод высокого номера. Новые НПР-волноводы являются КМОП-совместимыми и могут стать базовыми для создания различных фотонных элементов, в том числе перестраиваемых оптических фильтров и мультиплексоров на основе многоотражательной технологии.

Ключевые слова: интегральная оптика, оптический волновод, оптические потери, кремний-на-изоляторе, численные методы FDTD и BPM, многоотражательная технология.

1. Введение

В последние годы ведутся интенсивные исследования в области кремниевой фотоники [1], которая имеет огромный потенциал для массового производства различных функциональных устройств по КМОП-совместимой технологии, а также для интеграции на единой подложке оптических и электронных компонентов. В большинстве фотонных устройств используются эффекты оптической интерференции, поэтому для снижения уровня межмодовых паразитных сигналов при их работе целесообразно использовать одномодовые оптические волноводы. В кремниевой фотонике, в основном, используются два типа одномодовых канальных волноводов, изготовленных в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ): гребенчатого типа [2], вытравленные в «толстых» (3–5 мкм) слоях кремния, и наноразмерные кремниевые проволоки [3–5] на «тонких» (200–300 нм) слоях кремния. Толстые волноводы удобны для эффективного согласования со стандартными волоконными световодами (с размером поля моды около 10 мкм). Кремниевые тонкие проволоки из-за несоответствия размеров сложнее согласуются с оптическим волокном, но имеют значительное преимущество, обусловленное их совместимостью с КМОП-технологией изготовления [3].

Для ввода оптического излучения по нормали из оптоволокна в тонкий кремниевый волновод можно использовать двумерные дифракционные решетки [6], которые не только упрощают процесс ввода, но и обеспечивают

поляризационную независимость устройств [7]. Для оптимального согласования с волокном двумерная решетка изготавливается в широкой (~ 10 мкм) многомодовой волноводной области, которая с помощью адиабатического суживающегося элемента соединяется с одномодовой кремниевой проволокой размером ~ 450 нм. Отметим, что широкие волноводные области также необходимо использовать для обеспечения низких потерь на рассеяние при пересечении канальных волноводов [8] различных оптических схем. Очень важны широкие одномодовые волноводы для разработки оптических фильтров и перестраиваемых мультиплексоров на основе многоотражательной фильтрующей технологии [9, 10].

Таким образом, существует множество актуальных физических и технологических задач, для которых необходимо использовать широкие одномодовые волноводы на тонких слоях КНИ. К сожалению, большое различие в показателях преломления кремния и окружающего окисла делает задачу их изготовления трудновыполнимой.

Недавно нами были предложены широкие канальные волноводы с наложенной полоской и решеткой (НПР) [11]. В ходе предварительных исследований было показано [11], что данные волноводы обладают малыми потерями и высоким уровнем селекции фундаментальной моды по отношению ко всем другим модам, что делает их квази-одномодовыми. Целью настоящей работы является более детальное исследование новых широких волноводов с наложенной полоской и решеткой на тонких слоях КНИ.

2. Одномодовые оптические канальные волноводы на основе полосок и дифракционных решеток над тонким слоем КНИ

Для удовлетворения взаимно противоречивых требований к одномодовому волноводу с широким поперечным размером поля моды в тонких слоях КНИ воспользу-

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

Поступила в редакцию 29 июля 2009 г., после доработки – 8 октября 2009 г.

емся подходом, успешно работающим в случае гетерогенных волноводов [12, 13]. А именно, на основе кремниевой сердцевины сформируем каналный волновод и расположим дополнительные области с высоким коэффициентом затухания оптических волн таким образом, чтобы за счет разного поперечного распределения полей фундаментальная мода имела малые потери, а все остальные моды – очень большие [11–15]. Для формирования базовой волноводной структуры воспользуемся идеей построения каналного волновода с помощью направляющей полоски, расположенной над планарным волноводом [16].

Следует учесть, что в реальных устройствах каналные волноводы часто разделяются глубокими канавками в кремнии [17], предназначенными для тепловой изоляции фазосдвигающих термооптических элементов. В таком случае данный тип волноводов с наложенной полоской [16] на КНИ становится многомодовым при любых параметрах направляющей полоски. Для обеспечения селекции фундаментальной моды по отношению к другим модам широкого волновода расположим по бокам основной полоски, формирующей волновод, еще две аналогичные полоски [11], в которых дополнительно изготовлены диф-

ракционные решетки для вывода излучения из волновода (рис. 1, а). Для упрощения технологии предполагается (но не является обязательным), что формирующая волновод полоска и дифракционные решетки изготавливаются в ходе единой технологической операции, т.е. имеют одинаковую толщину d и отделены от кремниевой сердцевины планарного основания окисным слоем толщиной h_c . При этом дифракционная решетка имеет штрихи, которые ориентированы перпендикулярно направлению распространения оптического излучения и протравлены на всю толщину полоски, а вся структура после изготовления дополнительно закрыта тем же окисным слоем. Данная технологическая процедура позволяет исключить влияние протравливания окисла под полоской на оптические характеристики волновода.

Отметим, что свойства данного оптического волновода сильно зависят от показателя преломления, толщин и пространственного положения всех формирующих структуру элементов. Для демонстрации высоких оптических свойств предлагаемых волноводных структур в качестве примера использованы полоски из нитрида кремния (Si_3N_4) на подслое из двуокиси кремния. Данная технология широко используется в фотонике [18]. Так же как и в случае применения двумерных решеточных элементов ввода-вывода, здесь рассматриваются волны только ТЕ-поляризации, вектор электрического поля которых лежит в плоскости волновода. При анализе использованы следующие значения показателей преломления: 1.447, 2.0 и 3.478 для окисла, нитрида кремния и кремния соответственно. Структура КНИ имела стандартные для кремниевой фотоники параметры: толщина сердцевины кремния 220 нм, толщина заглабления окисла 2 мкм. Это позволяет пренебречь эффектами оптической утечки через толстый буферный окисный слой из волновода в кремниевую подложку.

Предлагаемые волноводы с наложенной полоской и решеткой могут иметь очень малые потери (менее 0.5 дБ/см) [11], поэтому размеры подлежащих анализу трехмерных волноводных структур должны быть достаточно большими. Это создает определенные трудности при попытке использовать для их исследования известные численные методы. В то же время общая структура НПР-волновода (рис. 1, а) очень удобна для численного моделирования с помощью метода распространяющихся пучков (ВРМ) [19], за исключением областей с субмикронными дифракционными решетками, для корректного анализа которых возможностей метода недостаточно.

Физически очевидно, что при распространении оптической волны вдоль НПР-волновода наличие дифракционной решетки будет проявляться в виде возмущения показателя преломления в области решетки и возникновения дополнительных оптических потерь, обусловленных решеточной связью с модами излучения. Известно, что в рамках метода эффективной среды [20] субволновую трехмерную периодическую структуру можно заменить анизотропной пленкой, оптическая ось которой перпендикулярна плоскости штрихов, а обыкновенный и необыкновенный показатели преломления определяются из выражений [20, 21]:

$$n_o^2 = (1-f)n_1^2 + fn_2^2, \quad (1)$$

$$n_e^2 = (n_1n_2)^2 / [(1-f)n_2^2 + fn_1^2],$$

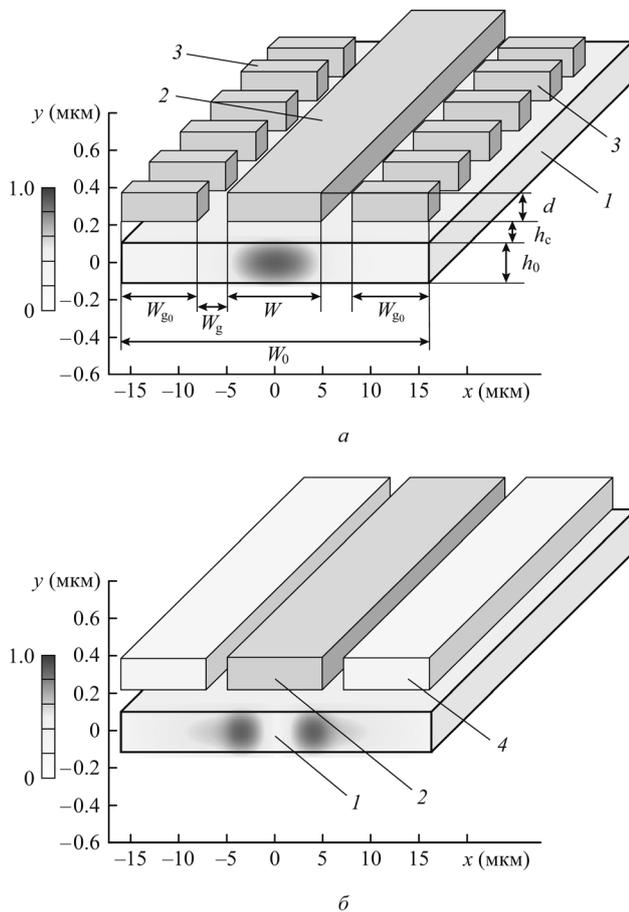


Рис. 1. Геометрические характеристики НПР-волновода. Общий вид волноводной структуры и распределение амплитуды электромагнитного поля фундаментальной моды (а) и общий вид эквивалентного волновода и распределение электромагнитного поля первой волноводной моды (б); 1 – планарное основание волновода из кремния; 2 – полоска нитрида кремния над буферным окисным слоем; 3 – дифракционная решетка из нитрида кремния; 4 – область с затуханием эквивалентного волновода; W и d – ширина и толщина полоски; W_{g0} – ширина дифракционной решетки; W_g – ширина области между полоской и решеткой; W_0 – общая ширина планарного основания волновода; h_c – толщина буферного слоя.

где n_1, n_2 – показатели преломления сред 1 и 2; f – коэффициент заполнения среды 2. Поэтому в отсутствие резонансов данную трехмерную периодическую волноводную структуру предлагается смоделировать с помощью эквивалентного волновода (рис.1,б), в котором дифракционная решетка заменяется полоской с комплексным показателем преломления. Ее действительная часть n_r определяется по методу эффективной среды ($n_r = n_o$ для ТЕ-поляризации), а мнимая часть n_i находится из условия, что затухание излучения в эквивалентной структуре совпадает с потерями L исходного волновода с дифракционной решеткой. Таким образом, мы полагаем, что если знать соответствие параметров эквивалентного и исходного (с решеткой) волновода, то с помощью трехмерного метода BPM можно достаточно достоверно описать оптические свойства произвольных НПР-волноводов.

3. Затухание оптических волн в волноводе КНИ с дифракционной решеткой

Анализ распространения оптической волны в полосковом волноводе КНИ под дифракционной решеткой может быть выполнен различными методами [22–24]. В данной работе мы воспользовались методом конечных разностей во временной области (FDTD) [25, 26], который позволяет численно решить задачу распространения оптического пучка в неоднородной среде в присутствии трехмерной дифракционной решетки с произвольными параметрами (не делая при этом дополнительных упрощающих предположений). Из соображений удобства и технологической целесообразности предполагается, что решетка имеет прямоугольную форму (рис.1,а) с шириной штрихов, равной половине периода решетки ($f = 0.5$). При использовании подхода эквивалентных волноводов важно, чтобы на рабочей длине волны $\lambda_0 \sim 1.55$ мкм в структуре не наблюдалось сильных интерференционных эффектов, которые могут привести к резким изменениям в коэффициенте затухания. Эффективный показатель преломления типичного волновода на тонком КНИ составляет 2.856, поэтому период решетки D выбран равным 0.6 мкм, что приводит к выводу излучения под углом, немного отличающимся от нормального к поверхности волновода. При этом спектральное пропускание волновода с решеткой является плавной функцией длины волны излучения в достаточно широкой (более 40 нм) области, что позволяет применить для его описания метод эквивалентных волноводов.

Для нахождения параметров эквивалентного волновода использовалась тестовая трехмерная структура, представляющая собой полосковый волновод шириной $W_0 = 10$ мкм, над которым на расстоянии $h_c \sim 0.12$ мкм располагается дифракционная решетка с длиной $l = 72$ мкм, шириной $W_{g_0} = 9$ мкм, толщиной $d \sim 0.16$ мкм и периодом $D = 0.6$ мкм. Данная структура содержит основные элементы исходного НПР-волновода, однако она намного удобнее для количественного анализа FDTD-методом, который очень критичен к размеру области численного моделирования. Для измерения оптического сигнала использовались девять FDTD-мониторов (для интегралов перекрытия и мощности), расположенных эквидистантно на расстоянии $l/8$ друг от друга. Сигналы с каждого из мониторов усреднялись по последним 5000 значений расчетных временных интервалов, строились их зависимости как функция соответствующей координаты

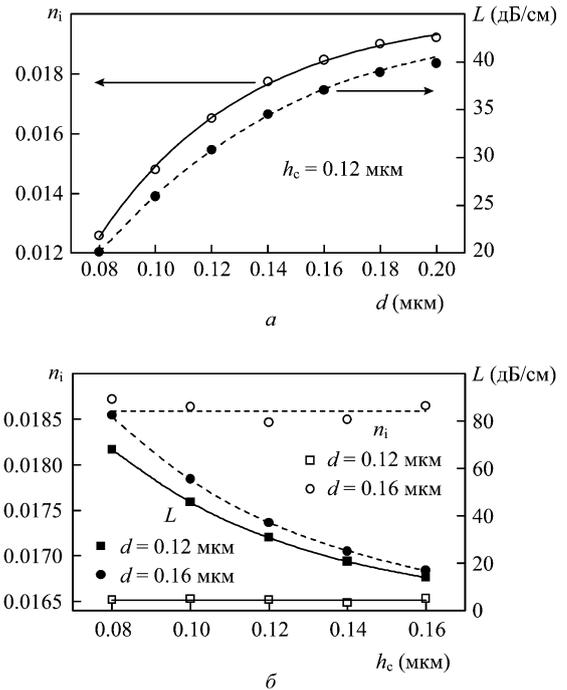


Рис.2. Оптические потери L и мнимая часть n_i показателя преломления покрытия тестовой трехмерной волноводной структуры как функция толщин пленки (а) и буферного слоя (б). Точки – расчет методом 3D FDTD тестового полоскового волновода с дифракционной решеткой, кривые – расчет методом 3D BPM эквивалентного тестового волновода.

наты и определялся коэффициент экспоненциального затухания.

На первом этапе были найдены коэффициенты затухания волн тестового волновода с дифракционной решеткой при различных значениях h_c и d (рис.2). Далее были определены такие значения n_i , которые обеспечивают для эквивалентного волновода с полоской одинаковое с тестовым волноводом затухание. При этом затухание эквивалентного волновода находилось из мнимой части комплексного эффективного показателя преломления N_{eff} , определенного с помощью метода 3D BPM [20, 26]:

$$L = \text{Im}(N_{eff}) \cdot 545750/\lambda_0. \quad (2)$$

Найденные значения n_i в зависимости от d и h_c показаны на рис.2. Они представляют собой плавные функции с сильной зависимостью от толщины покрытия и слабым ($\sim 0.5\%$) изменением при увеличении расстояния от полоски до кремниевой сердцевины.

4. Численный анализ оптических свойств канального волновода с покрытием в виде полоски и дифракционных решеток

Отметим, что точный количественный анализ оптических свойств трехмерных волноводных структур (рис. 1,а) с покрытием в виде полоски и дифракционных решеток является очень сложной и пока не решенной задачей. В настоящей работе предлагается достаточно корректный приближенный анализ на основе эквивалентного трехмерного волновода (рис.1,б), который нуждается, однако, в дополнительном научном обосновании. Для этой цели был выбран трехмерный численный эксперимент с использо-

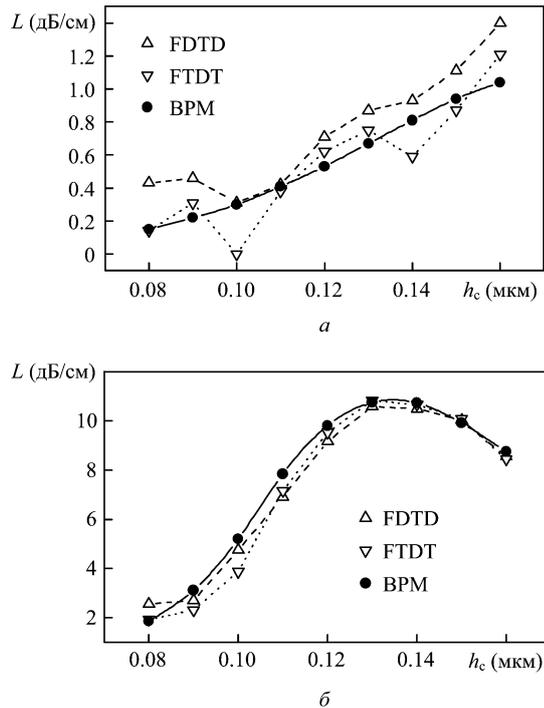


Рис.3. Оптические потери фундаментальной (а) и первой (б) мод НПП-волновода, рассчитанные разными способами: по данным измерения интеграла перекрытия (Δ), мощности (∇), а также эффективного показателя преломления по методу BPM (\bullet); $d = 0.16$ мкм, $W_0 = 32$ мкм, $W = 10$ мкм и $W_g = 2$ мкм.

ванием метода FDTD для серии волноводов с наложенной полоской и решеткой, содержащей 120 штрихов.

Типичный ход зависимостей коэффициента затухания, рассчитанных для разных толщин буферного слоя h_c , представлен на рис.3. Видно, что в пределах ошибки ~ 0.5 дБ/см результаты расчетов оптических потерь эквивалентного волновода и исходного волновода с наложенной полоской и решеткой хорошо согласуются между собой.

Таким образом, данные рис.3 по численному моделированию НПП-волноводов методом 3D FDTD позволяют достоверно подтвердить предположение о сильном различии в уровнях затухания фундаментальной и первой мод, что делает такие волноводы практически одномодовыми. Для количественного описания распространения света в волноводах с наложенной полоской и решеткой можно использовать подход эквивалентных волноводов.

5. Оптические свойства канального волновода с покрытием в виде полоски и дифракционной решеткой

Как уже отмечалось, оптические свойства НПП-волновода зависят от многих параметров, таких как показатели преломления, толщины и взаимное расположение всех элементов, формирующих его структуру. У реального волновода существенный вклад в оптические потери может вносить рассеяние на несовершенствах границ, а также другие механизмы потерь, для учета которых нами введен феноменологический параметр потерь на рассеяние планарного волновода (L_{sc}) [11]. Наша задача – найти такую комбинацию всех указанных параметров, при которой достигаются малые потери фундаментальной моды и большие потери для всех других волноводных мод.

Расчеты эквивалентных волноводов методом 3D BPM показали, что для всех практически значимых случаев минимальными потерями обладают только две первые моды ($m = 0$ и $m = 1$), поэтому только они будут рассматриваться при анализе волноводных структур. Мы предполагаем, что НПП-волноводы будут использоваться в дальнейшем для разработки перестраиваемых оптических фильтров на основе многоотражательной фильтрующей технологии [9, 10]. Выполненные ранее исследования показывают [15], что наибольший интерес представляют наклонные структуры фильтров и мультиплексоров с большим (свыше 33 мкм) шагом расположения линейки соединительных волноводов. При такой геометрии устройства легко достигается большая крутизна зависимости перестройки длины волны от температуры ($\delta\lambda/\delta T \sim 0.6 \text{ K}^{-1}$), которая может в 5–10 раз превышать аналогичные значения для всех других типов оптических фильтров на том же самом материале. Анализ показывает, что чем больше общая ширина $W_0 = W + 2(W_g + W_{g0})$ волноводной структуры, представленной на рис.1, тем меньше оптические потери и выше селекция фундаментальной моды. Поэтому в настоящей работе для анализа мы выбрали субоптимальную общую ширину структуры $W_0 = 32$ мкм и проследили, как изменяются оптические свойства НПП-волновода при варьировании его наиболее существенных параметров.

На рис.4 представлены расчеты оптических потерь методом 3D BPM для идеального НПП-волновода ($L_{sc} = 0$) в зависимости от толщин пленки d и буферного слоя окисла h_c при фиксированных значениях ширины области W_g , которая отделяет направляющую полоску от дифракционной решетки. Видно, что при изменении геометрических параметров структуры значительно меняются волноводные потери на распространение, причем для первой моды ($m = 1$) они всегда значительно выше, чем для

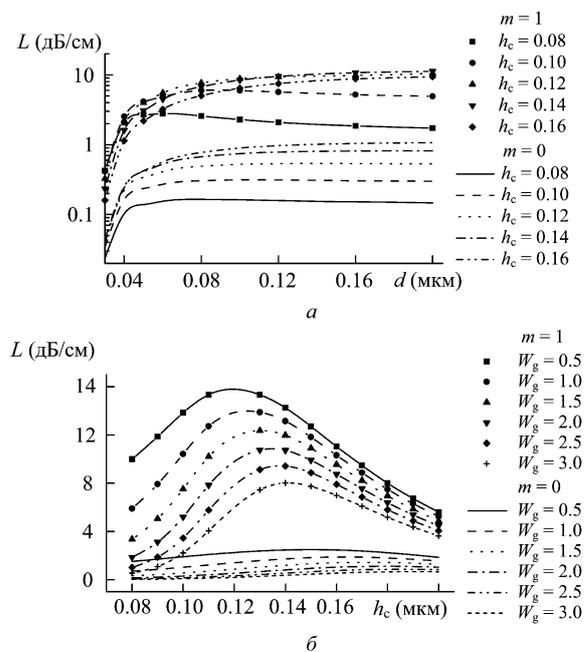


Рис.4. Оптические потери фундаментальной ($m = 0$) и первой ($m = 1$) мод НПП-волновода как функция толщины пленки при разных толщинах (в микрометрах) буферного слоя h_c окисла и $W_g = 2$ мкм (а) и как функция толщины буферного слоя при разных ширинах W_g (в микрометрах) области между полоской и решеткой и $d = 0.16$ мкм (б); $W_0 = 32$ мкм, $W = 10$ мкм, $L_{sc} = 0$.

фундаментальной ($m = 0$). Нас интересует поиск субоптимальных параметров, при которых минимальные потери фундаментальной моды сопровождаются высокими потерями других мод структуры. Для этой цели использован введенный нами ранее [12] параметр дополнительных потерь L_{add} :

$$L_{add} = l_0 L_1 - 3 \text{ дБ}, \quad (5)$$

где $l_0 = 3 \text{ дБ}/L_0$ – расстояние, на котором фундаментальная мода затухает в два раза; L_0 и L_1 – потери фундаментальной и первой мод. Физически параметр L_{add} служит мерой селекции фундаментальной моды, т.к. показывает степень дополнительного уменьшения сигнала первой моды относительно сигнала фундаментальной моды в волноводе с характеристической длиной l_0 .

Результаты расчета дополнительных потерь представлены на рис.5 для различных значений потерь на рассеяние и ширины области W_g . Видно, что при достаточно совершенных границах волновода ($L_{sc} \sim 0.1 \text{ дБ/см}$ [27]) субоптимальными являются волноводы с шириной области $W_g \sim 2-3 \text{ мкм}$, что обеспечивает селекцию фундаментальной моды на уровне $-40 \div -60 \text{ дБ}$ и очень малые ($0.3-0.6 \text{ дБ/см}$) потери на распространение. Эти значения оказались выше, чем можно добиться в случае гетерогенных волноводов [$L_{add} \sim 20-30 \text{ дБ}$]. Отметим, что в зависимости от выбора ширины области W_g можно получить различный уровень потерь фундаментальной моды при высокой степени ее селекции, что очень важно для создания многоотражательных фильтров и мультиплексоров [9, 10, 12–15] с различным числом перестраиваемых каналов, имеющих волноводы разной длины.

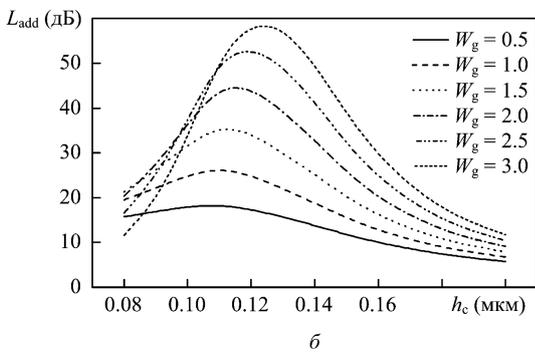
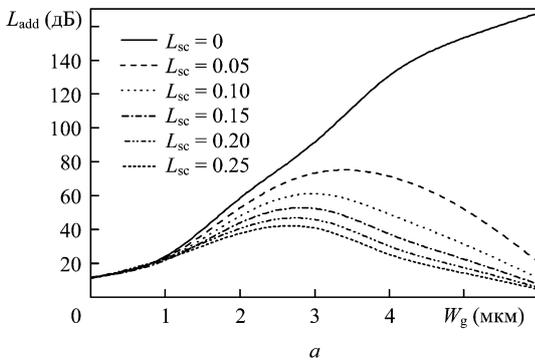


Рис.5. Дополнительные оптические потери НПР-волновода как функция толщины буферного слоя при разных оптических потерях L_{sc} (в дБ/см) планарного волновода (а) и как функция толщины буферного слоя при разных ширинах W_g (в микрометрах) области между полоской и решеткой и $L_{sc} = 0.1 \text{ дБ/см}$ (б); $d = 0.16 \text{ мкм}$, $W_0 = 32 \text{ мкм}$, $W = 10 \text{ мкм}$.

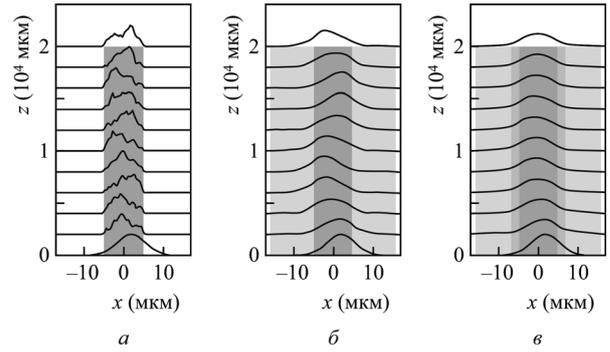


Рис.6. Распространение смещенного на 2 мкм гауссова пучка через различные широкие волноводы на тонких структурах КНИ – кремниевый полосковый волновод (а), кремниевый волновод с наложенной полоской из нитрида кремния (б) и кремниевый волновод с наложенной полоской и решеткой из нитрида кремния (в); $d = 0.16 \text{ мкм}$, $h_c = 0.12 \text{ мкм}$, $W_0 = 32 \text{ мкм}$, $W = 10 \text{ мкм}$, $W_g = 2 \text{ мкм}$.

Большее значение W_g ($\sim 3 \text{ мкм}$) обеспечивает наилучшее качество селекции при минимальных потерях. Его целесообразно использовать для очень длинных структур (больше 3 см). Например, при длине структуры 3.1 см можно иметь общие потери -1 дБ и получить подавление первой моды -20 дБ . Для более коротких структур лучше использовать меньшие значения W_g . Например, волновод с $W_g \sim 2 \text{ мкм}$ при общей длине 1.6 см будет иметь малые потери (-1 дБ) и относительно хороший уровень селекции первой моды (-14.5 дБ).

Одномодовое поведение широких волноводов с наложенной полоской и решеткой иллюстрирует рис.6, где показано распространение гауссова пучка, смещенного на 20% ширины относительно оси волновода, через волноводы на кремнии трех типов. Видно, что в стандартном канальном волноводе (рис.6,а) и в обычном волноводе с наложенной полоской (рис.6,б) наблюдаются сильные искажения поля волны вследствие межмодовой интерференции. НПР-волновод обеспечивает сильное подавление всех мод, кроме нулевой, что приводит к плавному распределению оптического поля на его выходе. Это делает очень перспективным использование НПР-волноводов в любых оптических элементах, где требуются широкие волноводы и где необходим высокий уровень подавления межмодовой интерференции, например в оптических фильтрах и мультиплексорах на основе многоотражательной технологии [9, 10, 12–15].

6. Заключение

Описаны оптические свойства нового широкого одномодового волновода с наложенной полоской и решеткой. Проведен численный анализ таких волноводов на примере структуры кремний-на-изоляторе, содержащей дополнительное покрытие в виде окисного слоя и трех тонких ($\sim 0.12 \text{ мкм}$) полосок из нитрида кремния. Центральная полоска служит для формирования канального многомодового волновода, а дифракционные решетки, выравленные в двух боковых полосках, – для селекции фундаментальной моды за счет решеточной связи с модами излучения. При оптимальном выборе параметров структуры наблюдаются малые ($\sim 0.3 \text{ дБ/см}$) потери для фундаментальной моды и высокие потери для всех остальных мод, что делает широкий волновод (с поперечным размером поля моды $\sim 10 \text{ мкм}$) практически одномодо-

вым. Дополнительные оптические потери первой и последующих мод могут достигать – 60 дБ в волноводе характеристической длины, обеспечивающей затухание фундаментальной моды – 3 дБ. Для описания оптических свойств таких трехмерных волноводных структур предложена концепция эквивалентного волновода, в котором дифракционная решетка заменена полоской с комплексным показателем преломления; параметры последнего выбраны из условия равенства потерь в волноводе с решеткой и волноводе с покрытием. Это позволило провести анализ различных НПП-волноводов методом 3D BPM. Правильность данного описания проверена путем прямого численного 3D-моделирования методом FDTD. Широкие квазиодномодовые НПП-волноводы перспективны для совместного использования с дифракционными элементами ввода излучения в тонкие волноводы, с элементами пересечения широких и тонких волноводов, а также для разработки новых типов перестраиваемых оптических фильтров и мультиплексоров на основе многоотражательной технологии.

Автор выражает благодарность компании RSoft Design Group Inc. за предоставление лицензии и осуществление поддержки к программному пакету RSoft Photonic CAD Suite 8.0 [26], с помощью которого проводилось численное моделирование методами FDTD и BPM. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-02-01164-а).

1. Reed G. T. *Silicon Photonics. State of the Art* (Chichester, England: John Wiley & Sons, 2008).
2. Soref R.A., Schmidtchen J., Petermann K.J. *Quantum Electron.*, **27**, 1971 (1991).
3. Bogaerts W. et al. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 401 (2005).
4. Pafchek R. et al. *Appl. Opt.*, **48**, 958 (2009).
5. Cardenas J. et al. *Opt. Express*, **17**, 4752 (2009).
6. Taillaert D. et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 1249 (2003).
7. Bogaerts W. et al. *Opt. Express*, **15**, 1567 (2007).
8. Bogaerts W. et al. *Opt. Lett.*, **32**, 2801 (2007).
9. Царев А.В. *Нано- и микросистемная техника*, **4**, 51 (2007).
10. Tsarev A.V. *Tunable Optical Filters*, US Patent No 6.999.639, February 14, 2006, Foreign Application Priority Data Sep. 06, 2001.
11. Tsarev A.V. *Opt. Express*, **17**, 13095 (2009).
12. Царев А.В. *Квантовая электроника*, **37**, 775 (2007).
13. Царев А.В. *Квантовая электроника*, **38**, 445 (2008).
14. Tsarev A.V., De Leonardis F., Passaro V.M.N. *Opt. Express*, **16**, 3101 (2008).
15. De Leonardis F., Tsarev A.V., Passaro V.M.N. *Opt. Express*, **16**, 21333 (2008).
16. Ramaswamy R.V. *Bell Syst. Techn. J.*, **53**, 697 (1974).
17. He Y. et al. *Opt. Eng.*, **44**, 040504 (2005).
18. Daldosso N. et al. *J. Lightwave Technol.*, **22**, 1734 (2004).
19. Frank M., Herrmann D., Huang Z. *Lightwave*, **19**, 108 (2002).
20. Рытов С.М. *ЖЭТФ*, **29**, 605 (1955).
21. Kikuta H., Toyota H., Yu W. *Opt. Review*, **10**, 63 (2003).
22. Харрис Дж. В кн. *Введение в интегральную оптику*. Под ред. М.Барноски (М.: Мир, 1977, с.227).
23. Suhara T., Nishihara H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **22**, 845 (1986).
24. Čtyroky J. et al. *Opt. Quantum Electron.*, **34**, 455 (2002).
25. Tavlove A. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* (Norwood, MA: Artech House, 1995).
26. www.rsoftdesign.com.
27. Borselli M., Johnson Th., Painter O. *Opt. Express*, **13**, 1515 (2005).