

Анализ прохождения света при пересечении тонких кремниевых проволок на основе туннельной вертикальной связи с толстым оптическим канальным волноводом

А.В.Царев, Е.А.Колосовский

На примере кремниевых фотонных проволок в структуре кремний-на-изоляторе рассмотрена задача пересечения тонких высококонтрастных канальных волноводов. Для обеспечения высокой эффективности прохождения оптической волны при минимальном уровне паразитного рассеяния предлагается использовать структуру на основе вертикальной связи тонкого суживающегося кремниевого волновода и толстого оптического волновода из полимера, разделённых тонким буферным слоем окисла. Методами численного моделирования найдены условия, при которых такая структура (размером 3×90 мкм) обеспечивает на длине волны ~ 1.55 мкм эффективность прохождения света на уровне 98% и 99% в телекоммуникационном спектральном интервале шириной 35 и 26 нм соответственно для прямого направления и на уровне 99.99% – для перекрестного направления. Данный оптический элемент предложено использовать в оптических микрочипах с множественными пересечениями канальных световодов.

Ключевые слова: интегральная оптика, оптический волновод, метод линий, метод конечных разностей во временной области (FDTD), метод распространяющихся пучков (BPM), нанофотоника.

1. Введение

Пересечение канальных оптических волноводов используется во множестве оптических элементов [1, 2]. В связи с этим различные варианты пересечений стали предметом большого числа исследований (см., напр., [1–16]). Наиболее сложно реализовать пересечение оптических волноводов с высоким контрастом показателя преломления, к которым относятся кремниевые фотонные проволоки в структурах кремний-на-изоляторе, широко используемые в кремниевой фотонике [3, 4]. Для улучшения качества пересечения (уменьшения потерь на пересечение и уровня перекрестных помех) могут применяться различные технические решения. В частности, потери на рассеяние могут быть минимизированы путем изменения угла пересечения [5] при использовании дискретных субволновых структур [6], а также относительным смещением положения пересекаемых волноводов [7] и увеличением ширины волноводов в области пересечения [8–12].

К сожалению, большинство известных технологий имеет принципиальное ограничение – умеренный уровень отраженных сигналов, а также нежелательный уровень рассеянного излучения в сопряженные среды. Это может привести к деградации параметров устройств при наличии большого количества волноводных пересечений. Хорошим решением задачи минимизации перекрестного просачивания оптической волны является организация пере-

сечения волноводов в различных пространственных слоях. Перенос энергии между канальными волноводами (основным и дополнительным), расположенными в разных слоях, обычно осуществляется в их суживающихся частях (адиабатическом клине) за счёт вертикальной связи через буферный слой. Для случая двух полимерных волноводов с низкими контрастами показателя преломления (2.5% и 0.3%) такая технология обеспечивает потери на прохождение всего -0.2 дБ для 30 пересечений [1]. Аналогичные потери, но для одного пересечения, были продемонстрированы также в высококонтрастных кремниевых фотонных проволоках на основе туннельной связи двух клиновидных волноводов, инверсно расположенных друг под другом [13]. Для практического использования данного решения требуется технология выращивания поликремния и прецизионного изготовления двух противоположно направленных клиновидных волноводов, расположенных в строго заданном положении относительно друг друга.

Недавно нами было предложено альтернативное и более технологичное решение. Оно заключается в использовании дополнительного толстого двухмодового канального волновода с низким показателем преломления (на основе полимера SU-8) [14–16]. При этом эффективный перенос энергии между основным волноводом (тонкой фотонной проволокой с высоким показателем преломления) и верхним дополнительным (толстым волноводом с низким показателем преломления, например из полимера) осуществляется на суживающихся краях тонких кремниевых волноводов. В частности было показано, что эффективность прохождения оптической волны по пути «тонкий кремниевый волновод – толстый полимерный волновод – тонкий кремниевый волновод» может достигать 98% [14]. Целью настоящей работы является более детальное исследование такого решения и выяснение условий, обеспечивающих его максимальную эффективность.

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

Поступила в редакцию 15 января 2013 г., после доработки – 14 мая 2013 г.

2. Пересечение фотонных проволок на основе туннельной вертикальной связи с толстым канальным оптическим волноводом

Принципиальная схема волноводной структуры, обеспечивающей эффективное пересечение малоразмерных фотонных проволок, показана на рис.1. В данном случае фотонная проволока представляет собой кремниевую сердцевину в окружении оксида, поперечное сечение которой (ширина) уменьшается по мере приближения к области пересечения. Показатели преломления кремния (3.478) и полимера (1.56) сильно различаются, поэтому вдали от области пересечения моды тонкого и толстого волноводов практически не взаимодействуют, т.к. их оптические поля перекрываются слабо, а сами моды имеют сильное фазовое рассогласование. По ходу распространения потока 1 происходит уменьшение ширины кремниевого волновода, чему сопутствует «выдавливание» поля волны из фотонной проволоки. При этом значение эффективного показателя фундаментальной моды, постепенно уменьшаясь, «пересекает» значение эффективного показателя преломления полимерного волновода. Трансформация энергии между нижним и верхним волноводами значительно возрастает, поскольку становится возможным одновременное выполнение условия фазового синхронизма и достижение существенного перекрытия полей взаимодействующих мод. В результате оптическая волна может постепенно туннелировать через буферный слой из тонкого кремниевого волновода в толстый полимерный волновод, обходя тем самым сверху область пересечения с кремниевой проволокой, а затем обратным образом вернуться в тонкий кремниевый волновод.

Расстояние W_g от широкого и толстого двухмодового верхнего волновода (в нашем случае на основе полимера SU-8) до тонкой кремниевой проволоки выбирается достаточно большим, чтобы оптический поток 2 (с перпендикулярного направления) мог свободно пройти через область пересечения. С другой стороны, это расстояние должно быть достаточно малым, чтобы оптический пучок потока 1 по мере распространения в проволоке успел полностью туннелировать до точки обрыва в толстый полимерный волновод и вернуться обратно в проволоку за точкой пересечения. Процесс оптимизации параметров пересечения кремниевых проволок заключается в том, чтобы найти такие параметры структуры ($d, h, w, H, W, L, L_g, N_w, N_f, N_c$), которые обеспечат высокую эффективность прохождения потоков 1 и 2, а также низкий уровень обратного рассеяния и перекрестного просачивания сигнала между двумя потоками.

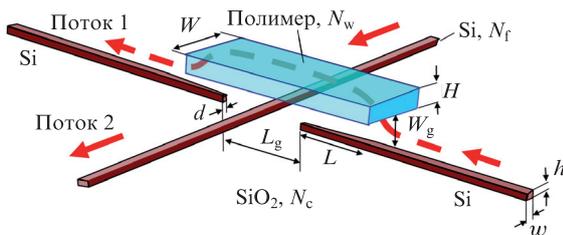


Рис.1. Принципиальная схема эффективного пересечения двух кремниевых проволок; N_f, N_w и N_c – показатели преломления сердцевины фотонной проволоки, полимерного волновода и оксидного слоя соответственно, L – длина клиновидной части кремниевого волновода.

Задача распространения оптической волны через трёхмерную неоднородную структуру, представленную на рис.1, в настоящее время может быть решена только численно. Нами она решалась [14–16] для волн ТЕ поляризации методом конечных разностей во временной области (FDTD) [17]. К сожалению, для 3D случая данное решение довольно трудоёмко (время расчёта на персональном компьютере обычно составляет несколько часов). Кроме того, сама задача оптимизации осложняется обилием независимых параметров, каждый из которых может вносить существенный вклад в эффективность прохождения волны через такую структуру. Поэтому везде, где это было допустимо, мы старались в полной мере использовать двумерные модели. Затем, на окончательном этапе, применялось 3D моделирование.

2.1. Двумерное моделирование

Для выяснения основных механизмов, влияющих на обмен энергиями между различными оптическими потоками, удобно воспользоваться 2D приближением поставленной задачи на основе метода эффективного показателя преломления [18]. Интерес представляют два сечения 3D структуры, соответствующие потокам 1 и 2, полученные с учетом специфики 2D приближения (рис.2).

Показатели преломления $N_{h_1}(z)$ и $N_{h_2}(z)$ кремниевого 2D волновода первой структуры (рис.2,а) изменяются в продольном направлении (по параболическому закону), что в оптическом смысле эквивалентно ослаблению волноводных свойств из-за уменьшения ширины исходной фотонной проволоки в 3D случае. Соответствие между параметрами 2D и 3D волноводов можно установить, сопоставив зависимости их эффективных показателей преломления N_{eff} от ширины 3D волновода и минимального значения показателя преломления (N_{h_0}) сердцевины 2D волновода (рис.3). Например, кремниевая проволока шириной 330 нм и высотой 0.22 мкм может быть представлена в расчётах 2D волноводом высотой 0.22 мкм и показателем преломления $N_{h_0} = 2.19$ (на рис.3 пунктиром пока-

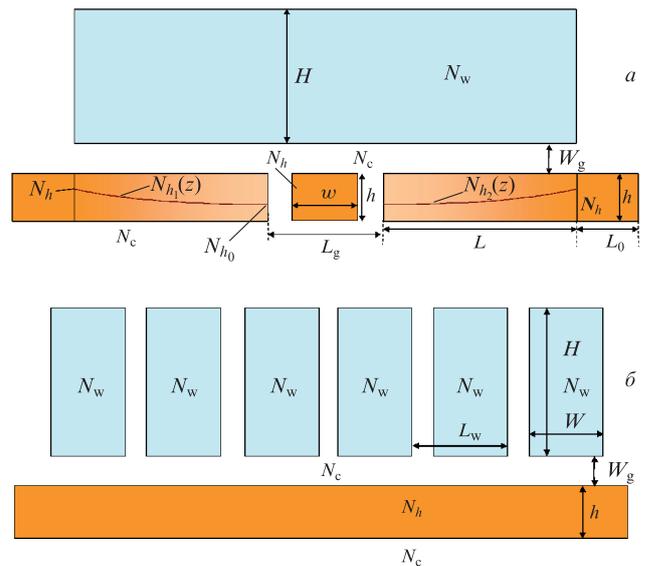


Рис.2. Двумерное представление пересечения кремниевых проволок для описания процесса туннелирования оптической волны из тонкого волновода в толстый волновод и обратно (а) и для описания прохождения оптической волны под толстым верхним волноводом (случай множества пересечений) (б).

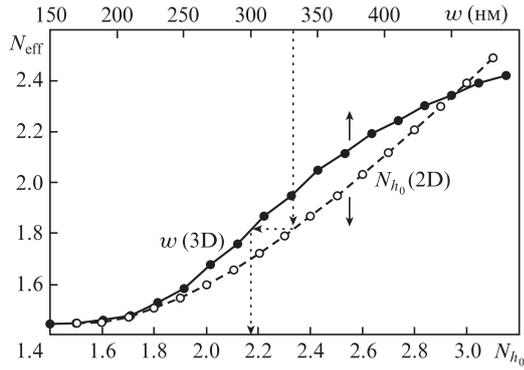


Рис.3. Зависимости эффективного показателя преломления N_{eff} для кремниевой проволоки высотой $h = 0.22$ мкм от ее ширины w и от показателя преломления N_{h_0} в её 3D и 2D представлениях; $W = 1.5$ мкм, $H = 1.7$ мкм, $N_f = 3.447$, $N_c = 1.4$.

зан алгоритм соответствия, исходя из требования одинакового значения N_{eff} для 2D и 3D волноводов).

С использованием второй структуры (рис.2,б) моделируются множественные пересечения светового потока 2 и рассматривается туннельное влияние полимерных вставок на распространение оптического пучка в кремниевом 2D волноводе высотой 0.22 мкм. Каждая из двух указанных структур требует специфического математического аппарата, который позволял бы решать оптическую 2D задачу наиболее достоверным способом. В качестве начальных параметров указанных выше структур были взяты параметры, соответствующие оптимальной трёхмерной структуре, исследованной нами ранее [14–16].

2.2. Применение метода распространяющихся пучков для анализа обмена энергией между кремниевым и полимерным волноводами

Прохождение фундаментальной моды тонкого кремниевое волновода через структуру, представленную на рис.2,а, рассмотрено с помощью метода распространяющихся пучков (BPM), использующего Паде-аппроксимацию 4-го порядка [19]. На рис.4 показано распространение фундаментальной моды канального кремниевого волновода через эту структуру. Видно, что по мере приближения к области пересечения (середины структуры) оптическая волна постепенно переходит из исходного тонкого одномодового волновода с высоким показателем преломления в дополнительный толстый двухмодовый волновод с низким показателем преломления. При этом поле в толстом волноводе оказывается асимметричным и представляет собой, главным образом, сумму полей его нулевой (TE_0) и первой (TE_1) мод (рис.4,б). По мере дальнейшего распространения по толстому волноводу оптическая волна проходит над областью пересечения и туннелирует обратно в кремниевую проволоку в виде ее фундаментальной моды. В центре структуры поле волны на оси тонкого волновода имеет минимальную интенсивность ($T = 0$), поэтому здесь находится дополнительная область с высоким показателем преломления, соответствующая пересекающему ее второму волноводу. В таких условиях пересекаемый волновод практически не взаимодействует с падающей волной, что и обеспечивает низкий уровень перекрестного паразитного рассеяния.

Проведенный анализ показал, что энергия прошедшей волны (поток 1) определяется не только амплитудами

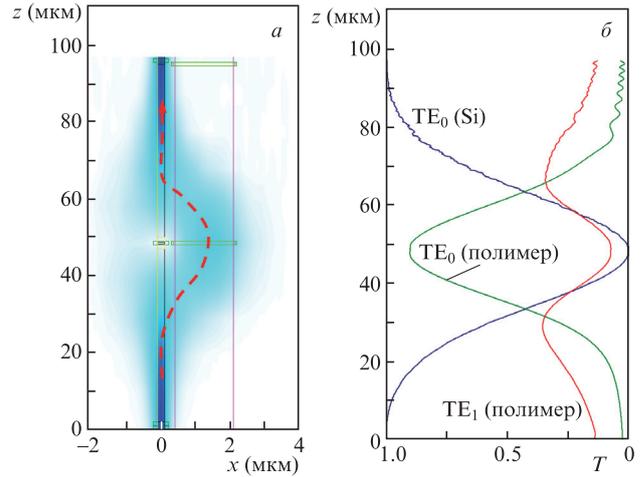


Рис.4. Туннелирование из кремниевой проволоки в полимерный слой и обратно через область разрыва, расчёт методом 2D BPM: а – поперечное распределение электромагнитного поля; б – распределение доли мощности между модами вдоль оси потока 1. Параметры: $L_g = 3$ мкм, $H = 1.7$ мкм, $W_g = 80$ нм, $L = 45$ мкм, $N_w = 1.56$, $N_h = 2.95$, $N_{h_0} = 1.76$, $N_c = 1.4$, $h = 220$ нм.

мод TE_0 и TE_1 , которые возбуждаются в верхнем волноводе за счёт туннельной связи, но и фазовыми соотношениями между ними (рис.5). С учётом симметрии задачи, для оптимизации параметров пересечения кремниевых проволок достаточно отслеживать амплитуды и разность фаз $\delta\varphi$ между двумя первыми модами толстого полимерного канального волновода в центре структуры (точно над областью пересечения). Максимум прохождения потока 1 достигается при $\delta\varphi \approx 0$, когда обе моды полимерного волновода в дальнейшем трансформируются в одинаковой фазе в фундаментальную моду кремниевой проволоки. Нами найдены параметры структуры, обеспечивающие эффективное пересечение кремниевых проволок для волн TE поляризации в случае верхнего полимерного слоя SU-8 $N_w = 1.56$.

Достоверность применяемой модели хорошо иллюстрирует рис.6, на котором показана эффективность прохождения фундаментальной моды TE_0 через область пересечения двух кремниевых проволок, рассчитанная разными методами. Можно видеть, что результаты, полученные методом 2D BPM, хорошо согласуются с данными прямого численного моделирования, проведённого методом FDTD во временной области для 2D волновода.

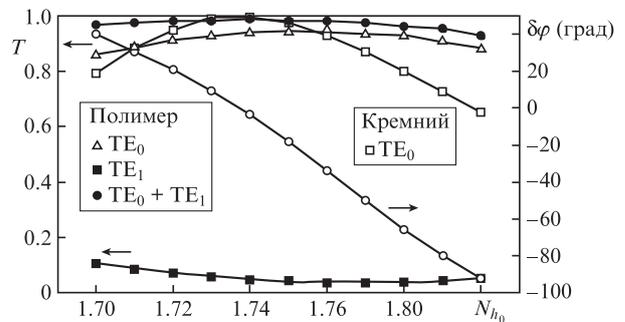


Рис.5. Доля мощности T , переносимой разными модами обоих волноводов, а также разность фаз $\delta\varphi$ между двумя первыми модами толстого полимерного волновода как функция показателя преломления N_{h_0} в области пересечения, расчёт методом 2D BPM; $L_g = 3$ мкм, $H = 1.7$ мкм, $W_g = 180$ нм, $L = 45$ мкм, $N_f = 3.447$, $N_w = 1.56$, $N_h = 2.95$, $N_c = 1.4$, $h = 220$ нм.

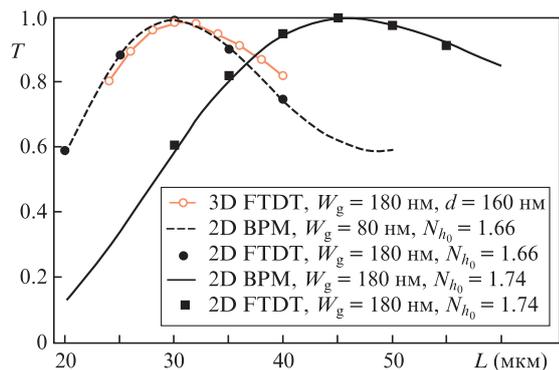


Рис.6. Зависимости эффективности прохождения фундаментальной моды кремниевого волновода через структуру из двух связанных канальных волноводов (рис.2,а) от длины связи L , рассчитанные методами BPM и FDTD; $W = 1.5$ мкм, $H = 1.7$ мкм, $L_g = 3$ мкм, $N_f = 3.447$, $N_w = 1.56$, $N_h = 2.95$, $N_c = 1.4$, $h = 220$ нм, $w = 450$ нм.

Причем максимум эффективности для больших толщин буферного слоя W_g наблюдается при большей длине клиновидной области L . Сравнение двумерной и трёхмерной моделей корректно проводить с учётом специфики двумерного приближения. Если соответствие между параметрами 2D и 3D волноводов можно установить по данным рис.3, то сопоставление их зависимостей от толщин буферного слоя дает не столь очевидные результаты. Здесь следует учесть тот фактор, что поперечные распределения оптических мод 2D и 3D волноводов сильно различаются, поэтому максимум перекачки энергии между различными модами также будет наблюдаться для разных толщин W_g . Для нас важно, что в оптимальных условиях эффективности прохождения волны через область пересечения близки, а их различие для 2D и 3D случаев сводится к монотонному смещению оптимальных значений W_g (рис.6).

Таким образом, алгоритм поиска оптимальных параметров пересечения трёхмерных кремниевых проволок можно свести к следующей процедуре. На основе использования быстрого алгоритма 2D BPM находятся параметры оптимальной 2D структуры, причём поиск удобно завершить следующей последовательностью действий. Для заданных значений L и W_g ищется оптимальное значение показателя преломления N_{h0} сердцевины 2D волновода (см. рис.5). Затем поиск уточняется вариацией величины W_g (рис.7). При этом разным размерам области L будут

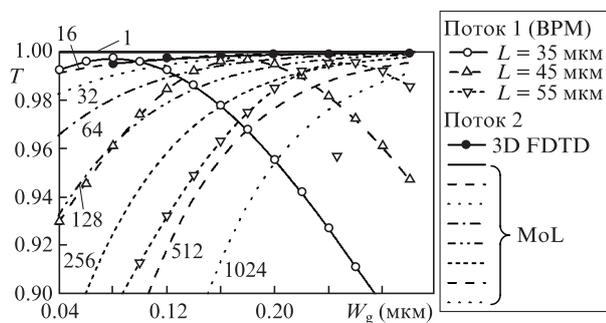


Рис.7. Эффективность прохождения фундаментальной моды через структуру, представленную на рис.2,б, определяемая методами 3D FDTD, 2D BPM и 2D MoL, число пересечений для потока 2 указано у кривых; $L_g = 3$ мкм, $W = 1.5$ мкм, $H = 1.7$ мкм, $L = 30$ мкм, $N_f = 3.447$, $N_w = 1.56$, $N_h = 3.0$, $N_{h0} = 1.56$, $N_c = 1.4$, $h = 220$ нм, $w = 450$ нм, $d = 160$ нм.

соответствовать различные комбинации оптимальных значений N_{h0} и W_g . Если найденные параметры структуры удовлетворяют заданным для поиска критериям (например, по эффективности), то далее находится ее трёхмерный аналог. Для этого для заданного значения L выполняется анализ прохождения волны через область пересечения кремниевых проволок более затратным методом 3D FDTD, сначала при изменении d , а затем при изменении W_g (для предварительно найденного оптимального значения d).

2.3. Применение метода линий для анализа пересечения кремниевого волновода с множеством полимерных волноводов

Как отмечалось выше, паразитное рассеяние волны при прохождении потока 2 желательно сделать достаточно малым, чтобы оно было несущественным даже в случае большого числа подобных пересечений, необходимых, например, для создания оптических мультиплексоров на связанных канальных волноводах [20–22]. Метод, выбранный для количественного анализа структуры, представленной на рис.2,б, должен обеспечивать высокую точность определения рассеянного поля при произвольно малых возмущениях фундаментальной моды тонкого кремниевого волновода. В полной мере такому требованию могут удовлетворять лишь аналитические методы.

Поставленная задача соответствует распространению света в неразрывной кремниевой проволоке (поток 2 на рис.1), и для неё наличие полимерного волновода является возмущающим фактором. В общем случае здесь плохо подходят методы BPM и FDTD [23], которые не могут обеспечить необходимую точность. Поэтому для решения этой задачи мы выбрали разновидность метода линий (MoL) – специализированный численно-аналитический подход, используемый рядом исследователей [23–27] для структур с высоким контрастом показателя преломления. Нами была создана оригинальная программная реализация данного метода с максимальным привлечением его аналитической составляющей для обеспечения высокой точности вычислений.

Возможности метода линий хорошо иллюстрирует рис.8, на котором представлено рассеянное поле при прохождении оптической волны для случая двух расположенных сверху толстых полимерных вставок (см. рис.2,б). Поскольку рассеянные поля слишком малы, чтобы их увидеть, из результирующего общего поля было убрано поле падающей волны. В результате в структуре волнового поля можно выделить три световых потока, направленных вниз, два отражённых назад потока и т.д. Видно, что результаты моделирования с помощью MoL хорошо соответствуют данным численного эксперимента методом FDTD, но, в отличие от последнего, в MoL используются численно-аналитические алгоритмы, что позволяет получать достоверные результаты даже для малых возмущений, свойственных постановке задачи для потока 2. Отметим, что приведенные на рис.8 результаты находятся на пределе точности FDTD, поэтому специально для увеличения уровня рассеяния TE_0 моды туннельный промежуток между волноводами в случае FDTD был выбран достаточно малым ($W_g = 100$ нм).

Для дополнительной проверки используемого алгоритма MoL мы сравнили его с методом прямого моделирования 3D FDTD, анализируя прохождение потока 2

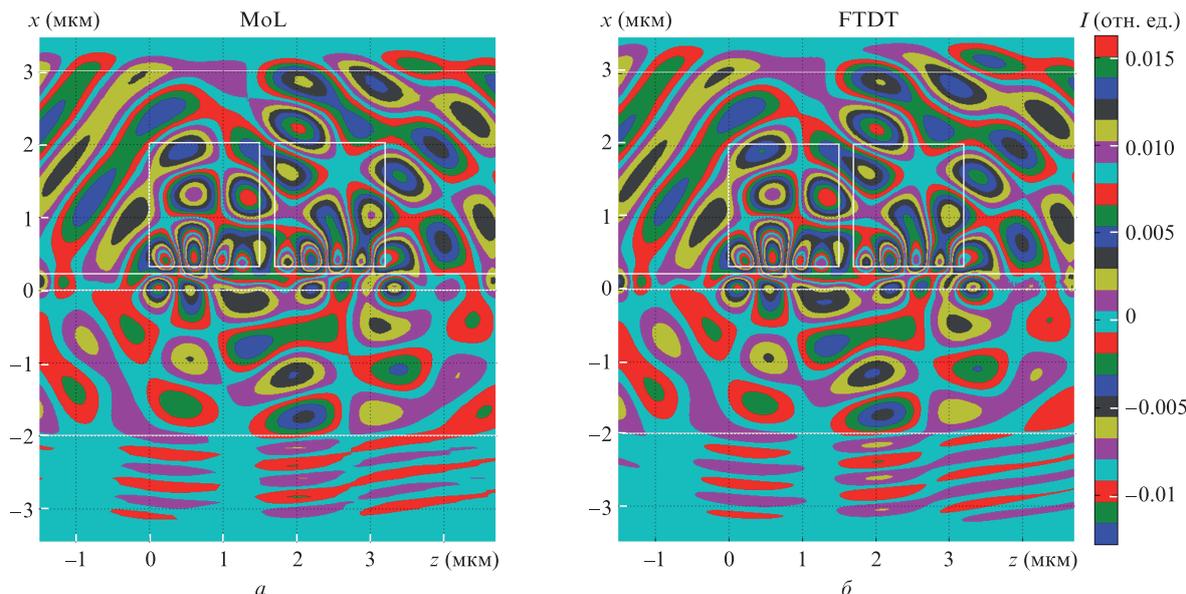


Рис.8. Распределение рассеянного поля при распространении фундаментальной моды через структуру с двумя пересекаемыми канальными волноводами, расчет методами 2D MoL (а) и 2D FDTD (б); $L_g = 3$ мкм, $W = 1.5$ мкм, $H = 1.7$ мкм, $W_g = 80$ нм, $L = 30$ мкм, $N_f = 3.447$, $N_w = 1.56$, $N_h = 3.0$, $N_{h0} = 1.56$, $N_c = 1.4$, $h = 220$ нм, $w = 450$ нм, $d = 160$ нм (цветной вариант рисунка помещён на обложке и на сайте КЭ).

при 16 пересечениях. Результаты прямого моделирования оказались в полном количественном соответствии с полученными методом MoL (см. рис.7). В данных расчётах период расположения полимерных вставок ($L_w = 2.2$ мкм) был выбран таким, чтобы рабочая длина волны (1.55 мкм) далеко отстояла от характерных брэгговских длин волн, возникающих при периодическом расположении пересекаемых волноводов. В этом случае когерентными эффектами можно пренебречь, и коэффициент прохождения структуры, состоящей из множества пар одинаковых отражателей, представляет собой коэффициент прохождения одной парной структуры, возведенной в соответствующую степень: $T_n = T_2^{n/2}$, где T_2 и T_n – коэффициенты прохождения структуры из двух и n отражателей (см. рис.2,б). Использование парного, а не одиночного отражателя позволяет более корректно учесть дополнительные отражения от торцов полимерных волноводов.

Результаты, приведенные на рис.7, показывают, что выбором оптимальных параметров структуры можно добиться высокой эффективности прохождения (более 98%) одновременно как для потока 1, так и для потока 2. Причём поток 2 может проходить через произвольное число аналогичных пересечений кремниевых проволок (от 1 до 1024). Добавим также, что разному числу пересечений могут соответствовать различающиеся значения параметров структуры L и W_g .

Важно отметить, что субоптимальные условия эффективного пересечения могут достигаться при различных комбинациях параметров структуры, что обеспечивает достаточную свободу и возможность учета дополнительных факторов, влияющих на работу данного оптического элемента. В частности эффективность прохождения сильно зависит от толщины W_g разделяющего структуру буферного слоя (см. рис.7). Если при этом необходимо реализовать минимальный размер устройства (зависящий от длины связи L), то максимум прохождения достигается при достаточно тонком слое ($W_g = 80$ нм). Как видно из рис.7, такой толщины буферного слоя достаточно для достижения высокой эффективности (99.99%) прохождения

потока 2. Если число пересечений не слишком велико (меньше 16), то эффективность прохождения потока 1 составит около 98%. При большем числе пересечений (свыше 32) возникает необходимость в уменьшении паразитного рассеяния для потока 2 за счёт увеличения толщины буферного слоя. Тогда для одновременного сохранения общей высокой эффективности прохождения потока 1 целесообразно использовать структуры большей длины ($L = 45$ или 55 мкм), для которых условие оптимального прохождения достигается при большей толщине ($W_g = 120$ или 230 нм соответственно). В этом случае, как показывает анализ, эффективность прохождения потока 2 сохраняется на допустимом уровне (98%) при значительно большем числе пересечений (от 64 до 1024).

2.4. Трёхмерное моделирование

Поиск структуры завершает исследование методом 3D FDTD трёхмерного элемента, обеспечивающего эффективное пересечение кремниевых проволок. Согласно описанной выше процедуре, заданным критериям по эффективности и минимальным размерам (меньше 100 мкм) удовлетворяет структура с $L = 45$ мкм, $W_g = 340$ нм и $d = 180$ нм. Спектральные свойства основных оптических потоков такой структуры, нормированных на мощность падающей волны, приведены на рис.9. Данный оптический элемент обладает исключительно высокой эффективностью, поэтому для лучшей иллюстрации полученных результатов мы ввели параметры потерь $Loss$ и $Loss_{16}$, которые измеряются как общая доля энергии, потерянной при прохождении фундаментальной моды кремниевой проволоки через область пересечения: $Loss = 1 - T_1$, $Loss_{16} = 1 - T_{16}$, где T_1 – относительная мощность на выходе устройства для потока 1; T_{16} – относительная мощность на выходе устройства для потока 2, имеющего 16 пересечений с потоком 1. Хорошо видно, что оптимальное устройство обеспечивает эффективность прохождения потока 1 на уровне 99% ($Loss = 0.01$) в спектральной полосе около 26 нм и 98% в более широком (35 нм) теле-

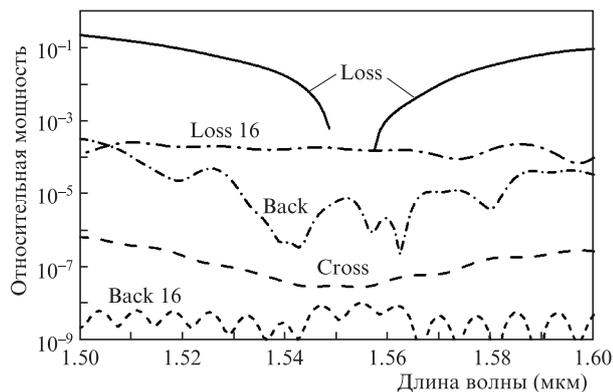


Рис.9. Зависимости относительной мощности, переносимой TE_0 модой для различных потоков, от рабочей длины волны, расчёт методом 3D FDTD; $Loss = 1 - T_1$, $Loss16 = 1 - T_{16}$; $L_g = 3$ мкм, $W = 1.5$ мкм, $H = 1.7$ мкм, $W_g = 340$ нм, $L = 45$ мкм, $N_f = 3.447$, $N_w = 1.56$, $N_{h_1} = 3.0$, $N_{h_0} = 1.56$, $N_c = 1.4$, $h = 220$ нм, $w = 450$ нм, $d = 180$ нм.

коммуникационном спектральном интервале. При этом оно имеет очень низкий уровень обратного рассеяния (Back) и перекрестных помех (Cross) – меньше -50 и -70 дБ соответственно. Рассеяние света для потока 2 оказалось очень малым, практически на пределе возможностей метода 3D FDTD, поэтому мы анализировали прохождение сигнала сразу через 16 одинаковых пересечений с шагом $L_w = 2.2$ мкм, обеспечивающим расположение брэгговских отражений вдали от рабочего спектрального интервала. Видно, что потери (Loss16) чрезвычайно малы, что может обеспечить до 1700 аналогичных пересечений при общем уровне прохождения сигнала не менее 98%. Таким образом, предлагаемый оптический элемент способен обеспечить эффективность прохождения на уровне 98% одновременно для потока 1 и больше 1000 пересечений для потока 2.

Высокая эффективность прохождения достигается при оптимальном сочетании всех параметров структуры. Очевидно, что отклонение любого из них от оптимального значения ведёт к общему снижению эффективности. Для ее количественной оценки удобно воспользоваться тем фактом, что зависимости эффективности от структурных параметров имеют вблизи оптимума квадратичный характер. Это позволяет оценить точность, с которой необходимо выдерживать параметры структуры, для обеспечения заданной эффективности прохождения. Для определённости мы рассчитали методом 3D FDTD диапазон изменения базовых параметров, которые обеспечивают уменьшение на 1% эффективности прохождения потока 1 для фиксированного значения показателя преломления толстого волновода ($N_w = 1.556 \pm 0.004$) при $L = 32$ мкм. Как и ожидалось, наиболее чувствительным параметром является минимальная ширина фотонной проволоки $d = 165$ нм, которую необходимо контролировать с очень высокой точностью – около 2% (± 4 нм). Параметры L и H должны быть изготовлены с точностью около 6% (± 2 и ± 0.1 мкм соответственно), а W – 7% (± 0.1 мкм). Наименее чувствительной (17%, или ± 0.03 мкм) к технологическим погрешностям является толщина буферного слоя W_g , ответственная за величину туннельной связи. Видно, что параметры структуры должны удовлетворять достаточно жестким требованиям к допускам при её изготовлении, однако вполне достижимым для современной нанопотонной технологии, в которой используется глубокая УФ литография (193 нм) [30]. Отметим, что

с учетом параболической аппроксимации, которая использовалась при данном анализе, увеличение технологического допуска в два раза снижает эффективность прохождения на 4%.

Отметим также, что поиск всех параметров структуры, обеспечивающей эффективное пересечение оптических кремниевых проволок, является компромиссом между взаимоисключающими требованиями, для учёта которых необходимо уметь быстро и корректно рассчитывать прохождение оптической волны по обоим перпендикулярным направлениям (потоки 1 и 2). Поэтому привлечение 2D моделирования как быстродействующей методики для решения трёхмерной задачи нам кажется оправданным и, по-видимому, единственно возможным при множественных вариациях параметров структуры.

3. Заключение

Анализ пересечения тонких одномодовых кремниевых проволок (с высоким показателем преломления) на основе туннельной связи с толстым двухмодовым оптическим волноводом из полимера (с низким показателем преломления) выполнен по частям, и при решении каждой части задачи пришлось использовать разные методологические подходы.

Первая часть соответствует случаю прямого прохождения фундаментальной моды (поток 1), при котором происходит поперечное перетекание энергии поля волны с помощью вертикальной связи (через окисный слой) из суживающейся части кремниевого волновода в верхний толстый каналный полимерный волновод, а затем обратно. Моделирование осуществлено с помощью метода BPM, и полученные результаты хорошо согласуются с данными прямого моделирования методом FDTD.

Вторая часть задачи соответствует случаю перекрёстного прохождения (поток 2), когда кремниевый каналный волновод пролегает под вставкой из полимера, являющейся в первой части задачи двухмодовым световодом. Главная особенность второй части – очень малая величина отражения от полимерной вставки из-за слабого, вызванного туннельным взаимодействием возмущения светового потока. Это обстоятельство определяет вторую особенность, состоящую в том, что количество пересечений может быть очень велико (до тысячи и более). В этом случае для анализа плохо подходят методы BPM и FDTD, поэтому нами был выбран полуаналитический подход, известный как метод линий MoL, который оказался очень эффективным для структур с высоким контрастом показателя преломления.

Из-за обилия независимых параметров ($d, h, w, H, W, L, L_g, N_w, N_f, N_c$), каждый из которых может вносить существенный вклад в эффективность прохождения света через зону пересечения, мы старались в полной мере использовать свойства 2D моделей. Трёхмерное моделирование, во всех отношениях затратное по ресурсам, применялось нами для промежуточной проверки и на стадии окончательного тестирования. Совместный анализ поставленной задачи разными методами (BPM, FDTD, MoL, а также собственная оригинальная программная реализация MoL) позволил найти такие комбинации параметров структуры, которые одновременно обеспечивают (в спектральном интервале до 35 нм в телекоммуникационной области 1.55 мкм) высокую эффективность пересечения (на уровне 98% и выше) для прямого прохождения (поток

1) и перекрестного направления (поток 2), имеющего произвольное число (от 1 до 1024) аналогичных пересечений.

Описываемые в настоящей работе оптические элементы вполне технологичны. Пересечения высококонтрастных кремниевых проволок с полимерным волноводом могут быть изготовлены по КМОП совместимой нанофотонной технологии [4, 28]. Подобные структуры могут найти широкое применение в фотонике, при проектировании новых оптических микрочипов, работа которых невозможна без множественных пересечений световых микропотоков, и в прочих устройствах, таких, например, как оптические мультиплексоры на связанных волноводах [20–22].

Авторы выражают благодарность компании RSoft Design Group Inc. за предоставление лицензионного программного пакета Rsoft Photonic CAD Suite 8.0 [29] по численному моделированию интегрально-оптических элементов методами BPM и FDTD. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-07-00018а).

1. Watanabe K., Hashizume Y., Nasu Y., Sakamaki Y., Kohtoku M., Itoh M., Inoue Y. *Electron. Lett.*, **44**, 1356 (2008).
2. Shi W., Vafaei R., Torres M.Á.G., Jaeger N.A.F., Chrostowski L. *Opt. Lett.*, **35**, 2901 (2010).
3. Reed G.T. *Silicon Photonics. The State of the Art* (Chichester: John Wiley & Sons, 2008).
4. Bogaerts W. et al. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 401 (2005).
5. Sanchis P., Galan J.V., Griol A., Marti J., Piqueras M.A., Perdigues J.M. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **19**, 1583 (2007).
6. Bock P.J., Cheben P., Schmid J. H., Lapointe J., Delage A., Xu D.-X., Janz S., Densmore A., Hall T.J. *Opt. Express*, **18**, 16146 (2010).
7. Tanaka D., Ikuma Y., Tsuda H. *IEICE Electron. Express*, **6**, 407 (2009).
8. Bogaerts W., Dumon P., Van Thourhout D., Baets R. *Opt. Lett.*, **32**, 2801 (2007).
9. Chen H., Poon A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18**, 2260 (2006).
10. Chen C.-H., Chiu C.-H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46**, 1656 (2010).
11. Sanchis P., Villalba P., Cuesta F., Håkansson A., Griol A., Galán J.V., Brimont A., Martí J. *Opt. Lett.*, **34**, 2760 (2009).
12. Fukazawa T., Hirano T., Ohno F., Baba T. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 646 (2004).
13. Sun R., Beals M., Pomerene A., Cheng J., Hong Ch.-Y., Kimerling L., Michel J. *Opt. Express*, **16**, 11682 (2008).
14. Tsarev A.V. *Opt. Express*, **19**, 13732 (2011).
15. Tsarev A.V. *Abs. 19th Intern. Workshop Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling (OWTNM 2012)* (Barcelona, Spain, 2012, SaC2, p. 26).
16. Tsarev A. *Proc. 11th Intern. Conf. Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2012)* (Novosibirsk, 2012, Vol. 1, p. 151).
17. Yee K.S. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **AP-14**, 302 (1966).
18. Chiang K.S. *Appl. Opt.*, **25**, 2169 (1986).
19. Lu Y.Y., Ho P.L. *Opt. Lett.*, **27**, 683 (2002).
20. Tsarev A.V. *Abs. 19th Intern. Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling (OWTNM 2012)* (Barcelona, Spain, 2012, SaC2, p. 31).
21. Tsarev A. *Proc. 11th Intern. Conf. Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2012)* (Novosibirsk, 2012, Vol. 1, p. 147).
22. Tsarev A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8781**, 878106 (2013); <http://dx.doi.org/10.1117/12.2017179>.
23. Scarmozzino R., Gopinath A., Pregla R., Helfert S. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 150 (2000).
24. Pregla R., Pascher W. *The Method of Lines. Numerical Techniques for Microwave and Millimeter Wave Passive Structure* (New York: Wiley, 1989, c. 381).
25. Pregla R. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, **5**, 53 (1995).
26. Dreher A. *IEEE Africon*, **2**, 1049 (1999).
27. Hashish E.A., Saker H.A. *Proc. 21th Nat. Radio Science Conf.* (Cairo, 2004, sec.B14, p. 1).
28. Selvaraja S., Bogaerts W., Dumon P., Van Thourhout D., Baets R. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **16**, 316 (2010).
29. www.rsoftdesign.com, Rsoft Photonic CAD Suite, ver. 8.0, single license (2007).