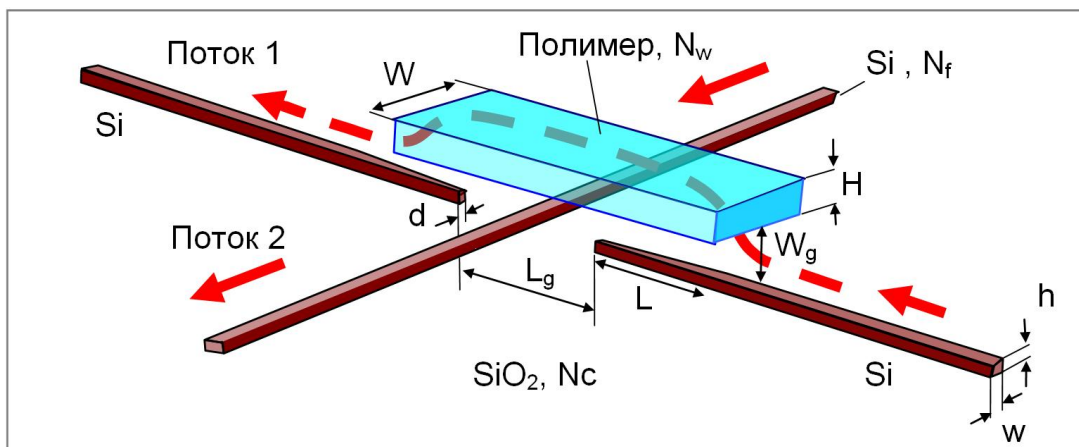


Иллюстрированный научный отчет 2012 года проекта РФФИ 12-07-00018-а (рук. А.Царев)  
**Эффективное прохождение оптической волны в пересекающихся кремниевых  
проводах за счет прямого и обратного туннелирования в прилегающий волновод**

Во многих устройствах интегральной оптики и оптических микрочипах имеется проблемное место - пересечение световых микропотоков. Принципиальная схема волноводной структуры, обеспечивающей разрешение данной проблемы при пересечении малоразмерных фотонных проволок, показана на Фиг.1. В данном случае фотонная проволока выполнена в виде кремниевой сердцевины в окружении окисла, поперечное сечение которой (ширина) уменьшается по мере приближения к области пересечения. Уменьшение ширины способствует 'выдавливанию' поля из фотонной проволоки. 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 перекрёстный Поток 2 мог без искажений пройти через область пересечения. С другой стороны, это расстояние должно быть достаточно малым, чтобы оптический Поток 1 успел туннелировать в толстый полимерный волновод до точки обрыва проволоки и вернуться обратно в проволоку за точкой пересечения. Процесс оптимизации прохождения света через пересечение кремниевых проволок заключается в нахождении таких параметров структуры ( $d, h, w, H, W, L, L_g, N_w, N_f, N_c$ ), которые бы обеспечили высокую эффективность прохождения потоков 1 и 2, что неочевидно, с низким уровнем обратного рассеяния и без перекрестного искажения сигналов между двумя потоками [1-3].



Фиг.1. Принципиальная схема эффективного пересечения двух кремниевых проволок.

Данная трёхмерная задача была сведена к двум двумерным, согласованным, для каждой из которых использовались разные методологические подходы [4, 5].

Первая задача соответствует случаю прямого прохождения света (Поток 1) через разрыв в фотонной проволоке. Излучение за счёт туннелирования энергии через окисный слой постепенно переходит в верхний широкий каналный волновод из полимера при одновременном «выдавливании» поля из суживающейся фотонной проволоки, а за точкой разрыва возвращается обратно в проволоку. Моделирование осуществлено с помощью метода распространяющихся пучков (BPM), использующего Pade аппроксимацию 4-го порядка. Полученные результаты хорошо согласуются с точными, но более затратными данными прямого моделирования, проведённого методом конечных разностей во временной области (FDTD). Найдены условия, обеспечивающие максимальную эффективность прохождения волны через область пересечения. В частности, впервые показано, что максимум прохождения достигается при выравнивании фаз между двумя первыми модами полимерного волновода над точкой пересечения проволок. Благодаря замеченному эффекту прохождение волны через разрыв в фотонной проволоке за счёт промежуточного преобразования полей при совместном участии пары мод (полимерного волновода) имеет

более высокую эффективность, чем с участием лишь одной основной моды (99% против 90%).

Вторая задача соответствует случаю перекрёстного прохождения (Поток 2), когда кремниевый канальный волновод пролегает под вставкой из полимера, являющейся двухмодовым световодом в первой задаче. Её главной особенностью является очень малая величина отражения от полимерной вставки из-за слабого, вызванного туннельным взаимодействием, возмущения светового потока. Однако это обстоятельство перекрывается второй особенностью, тем, что количество пересечений может быть очень велико (до тысячи и более). Нашей целью было добиться неискаженного прохождения света в обоих потоках одновременно, когда число пересечений для Потока 2 достигает нескольких сотен. В этом случае для анализа плохо подходят методы BPM и FDTD. Поэтому была выбрана разновидность метода линий (method of lines, MoL), который представляет собой специализированный численно-аналитический подход, используемый рядом исследователей для структур с высоким контрастом показателя преломления. Нами была создана оригинальная программная реализация данного метода с максимальным привлечением аналитической составляющей для обеспечения требуемой точности вычислений. Верность наших результатов была подтверждена прямым моделированием методом 3D FDTD с использованием коммерческого пакета RSoftInc. На основе численного моделирования с привлечением разных методов (BPM, MoL и FDTD), показано [1-5], что предлагаемый оптический элемент может обеспечить высокую эффективность пресечения (на уровне 98% и выше) одновременно для прямого прохождения света и для перекрестного направления при произвольном числе (от 1 до 1024) возможных пересечений. Пересечения высококонтрастных кремниевых проволок с полимерным волноводом могут быть изготовлены по КМОП совместимой современной технологии. Подобные структуры могут найти широкое применение в фотонике при проектировании новых оптических микрочипов, где требуется множественные пересечения световых микропотоков, и прочих устройствах, например, таких как оптические мультиплексоры на связанных волноводах [6].

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-07-00018а.*

### Список литературы

1. Andrei V. Tsarev, "Efficient silicon wire waveguide crossing with negligible loss and crosstalk," Opt. Express 19, 13732-13737 (2011).
2. A.Tsarev, "Silicon Wire Waveguide Crossing with Negligible Loss and Crosstalk", In Proceedings 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE-2012, Novosibirsk, October 2-4, 2012, Volume 1, pp. 151-153.
3. Andrey V. Tsarev, "Novel Silicon Wire Waveguide Crossing with Negligible Loss and Crosstalk," in Abstracts 19th International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling (OWTNM 2012), 20th – 21st April 2012, Barcelona, Spain, p. 26, 2012.
4. Eugeny Kolosovsky, Andrey Tsarev, "Almost lossless multiple crossing of silicon wires by means of vertical coupling with polymer strip waveguide", направлена на SPIE Optics and Optoelectronics International Symposium. Integrated Optics: Physics and Simulations, Conference EOO117, 15- 18 April 2013, Clarion Congress Hotel, Prague Czech Republic, EOO13-EOO117-12.
5. А.В.Царев, Е.А.Колосовский, "Анализ прохождения света при пересечении тонких кремниевых проволок на основе туннельной вертикальной связи с толстым оптическим канальным волноводом", Квантовая электроника, отослана в печать, 2013.
6. Andrey V. Tsarev, "Compact Multi-Splitting Widely Tunable Filter on SOI Technology," in Abstracts 19th International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling (OWTNM 2012), 20th – 21st April 2012, Barcelona, Spain, p.31, 2012.