

Иллюстрированный итоговый научный отчет 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**

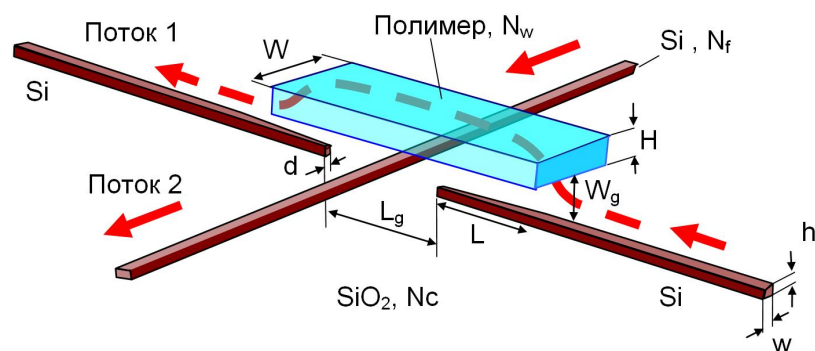
Рассмотрена [1-5] актуальная задача эффективного (без потерь) прохождения оптической волны в пересекающихся кремниевых проводах с высоким показателем преломления за счет промежуточного прямого и обратного туннелирования через буферный слой в прилегающий многомодовый оптический волновод с низким показателем преломления. Общая трёхмерная задача была сведена к двум двумерным, согласованным, для каждой из которых мы использовали разные методологические подходы.

Первая задача соответствует случаю прямого прохождения света (поток 1 на Фиг. 1)) через разрыв в фотонной проволоке. Излучение за счёт туннелирования энергии через окисный слой постепенно переходит в верхний толстый каналный волновод (из полимера SU-8 с показателем преломления 1.56) 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. Найдены условия, обеспечивающие максимальную эффективность прохождения волны через область пересечения. В частности, впервые показано, что максимум прохождения волны достигается при выравнивании фаз между двумя первыми модами полимерного волновода над точкой пересечения проводов. Благодаря эффекту их интерференции сквозное прохождение волны (через разрыв в фотонной проволоке) имеет более высокую эффективность, чем с участием лишь одной основной моды (99% против 90%).

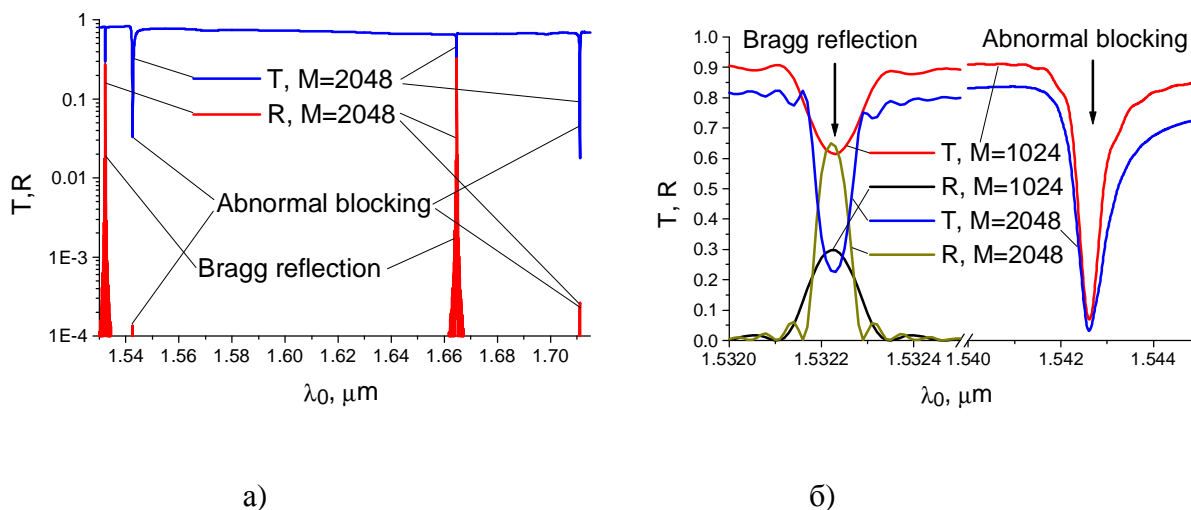
Вторая задача соответствует случаю перекрёстного прохождения (поток 2 на Фиг. 1), когда кремниевый каналный волновод расположен под вставкой из полимера, являющейся двухмодовым волноводом в первой задаче. Её главной особенностью является очень малая величина отражения от полимерной вставки из-за слабого, вызванного туннельным взаимодействием, возмущения светового потока. Однако, количество таких пересечений может быть очень велико. Нашей целью было добиться неискаженного прохождения света в обоих перекрёстных потоках одновременно, когда число пересечений для Потока 2 достигает нескольких сотен и тысяч. В этом случае для анализа плохо подходят методы BPM и FDTD. Поэтому нами была создана оригинальная программная реализация полуаналитического метода линий (method of lines, MoL) с максимальным привлечением аналитической составляющей для обеспечения требуемой точности вычислений. В итоге достигнуты и продемонстрированы высокая эффективность прохождения фундаментальной моды для прямого (>98%) и перекрёстного (>99.9%) направлений одновременно. Верность всех наших результатов была подтверждена прямым моделированием методом 3D FDTD с использованием коммерческого пакета RSoft [5].

Обнаружен эффект аномального загораживания (см. Фиг.2), когда на определенных длинах волн наблюдается сильное затухание прошедшей волноводной моды, причем в отличие от классического эффекта Брэгга, отсутствует отражение в волноводную моду обратного направления, а вся энергия излучается из волновода в узком спектральном интервале в окружающую среду. Учет этого эффекта позволяет оптимизировать параметры данного оптического элемента таким образом, чтобы в широком спектральном интервале обеспечить малые потери как для прямого прохождения волны, так и для множества пересечений (до 2000) в перекрёстном направлении, а также низкий уровень паразитного рассеяния в обратную волну и в волны пересекаемого оптического волновода. Подобные структуры могут найти широкое применение в фотонике при проектировании новых оптических микрочипов, где требуется множественные пересечения световых микропотоков.

Результаты проекта опубликованы в 4 научных статьях [1-4] и представлены в 9 докладах на 5 международных конференциях, а также на специально созданном веб-сайте проекта <http://www.isp.nsc.ru/lab6/index.php/2013-08-13-06-12-56/proekty/171-grant-rffi-12-07-00018-a-2012-2014>.



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



Фиг2. Эффективность туннельного отражения (R) и прохождения (T) фундаментальной TE_0 моды вдоль фотонной проволоки, содержащую протяженную область с большим числом (1024 и 2048) периодически расположенных полимерных вставок. а) В широком спектральном интервале для $M=2048$; б) в узком спектральном интервале для $M=1024$ и $M=2048$. Bragg reflection - случай брэгговского отражения в 9-м порядке дифракции в фундаментальную моду обратного направления; Abnormal blocking - случай аномального заграждения прошедшей волны во втором порядке дифракции на дифракционной решетке. Расчет 2D MoL. $L_g=3 \mu\text{m}$, $H=1.7 \mu\text{m}$, $N_w=1.56$, $N_h=2.95$, $N_c=1.4$, $h=220 \text{ nm}$, $W_g=100 \text{ nm}$. Для удобства представления выполнено масштабирование вдоль оси абсцисс (по горизонтали) с коэффициентом 10.

Литература

1. А.В.Царев, "Оптический мультиплексор на основе множества связанных волноводов в структурах кремний на изоляторе", в книге "Юбилейный сборник избранных трудов Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (1964-2014) / Отв. ред. А.В. Латышев, А.В. Двуреченский, А.Л. Асеев. – Новосибирск: Параллель, 2014, с.722-735.
2. A. Tsarev, "Numerical Modeling of the Optical Multiplexer on SOI Constructed by Multiple Coupled Waveguides," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol.20, no.4, pp.77-84, July-Aug. 2014 doi: 10.1109/JSTQE.2013.2295180.
3. A. Tsarev and E. Kolosovsky, "Almost lossless multiple crossing of silicon wires by means of vertical coupling with a polymer strip waveguide", Proc. SPIE 8781, Integrated Optics: Physics and Simulations, 878112-878112-12 (May 7, 2013); doi:10.1117/12.2017082.
4. 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, т.43, №8, с. 744-750 (2013).
5. www.rsoftdesign.com, Rsoft Photonic CAD Suite, ver. 8.0, single license (2007).