

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ НА КРИСТАЛЛЕ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

П.Г. Серафимович^{1,2}

¹Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национально исследовательский университет),
²Институт систем обработки изображений РАН

Работа посвящена разработке методов проектирования компактных, интегрированных на кристалле резонаторов на основе расчета дифракции когерентного электромагнитного излучения, а также исследованию новых способов сверхбыстрой обработки оптических сигналов с использованием интегрированных на кристалле фотонных устройств.

Совершенствование в последние годы наноэлектроники и высокопроизводительных методов моделирования наноустройств привело к созданию элементов нанофотоники, которые являются результатом естественного развития идей предложенных при конструировании ДОЭ.

Важным элементом ряда современных дифракционных нанофотонных устройств является оптический нанорезонатор [1]. Высокодобротные нанорезонаторы с малым модовым объёмом на основе фотонных кристаллов позволяют создавать, например, оптические переключатели, фильтры, источники света с низкой пороговой мощностью и интегрировать эти элементы в микросхемы. Оптические резонаторы усиливают различные виды взаимодействия света со средой распространения. Поэтому их используют также для экспериментальных исследований в квантовой электродинамике [2].

Нанофотонные структуры привлекают повышенный интерес к реализации будущих оптических интегральных схем. Особое внимание уделяется искусственным периодическим диэлектрическим структурам, именуемым фотонными кристаллами (ФК). ФК могут иметь фотонные запрещенные энергетические зоны, т.е. диапазон частот, в котором не существует возбуждаемых мод. После введения дефектов в структуру ФК, в нем могут появляться волноводы и резонаторы, в которых свет локализован. Волноводы ФК предоставляют эффективные средства для направления света, позволяя реализовывать изгибы под большими углами. Аналогично оптоволокну, в ФК волноводе может быть реализована нелинейная обработка сигнала. Массив связанных резонаторов может считаться новым типом волновода, в котором свет распространяется посредством быстро затухающих связанных волн от резонатора к резонатору. Этот новый тип волновода, названный оптическим волноводом на основе связанных резонаторов (CROW), имеет множество интересных свойств. Посредством точного размещения резонаторов, возможна реализация изгибов волновода под большими углами без потерь и отражений на протяжении всего CROW. Другой важной особенностью CROW является его способность значительно замедлять оптическую волну (принцип медленного света), что может найти важное применение в реализации компактных оптических линий задержки. Низкая групповая скорость и большие амплитуды светового поля в локализованных модах ведут к усилению нелинейных эффектов, что может быть потенциально полезным для большинства задач обработки оптического сигнала.

Достоинства ФК резонаторов (высокая добротность, компактность, малый модовый объем, естественность интеграции с другими электронными и оптическими элементами на кристалле) привлекают к себе ученых многих стран. В частности, значительный вклад внесли Дж. Д. Джоаннополис, П. Лалан, М. Лонкар, Е. Вукович [3-6]. ФК резонаторы продемонстрировали превосходство перед резонаторами, имеющими другую геометрию. Прежде всего, благодаря малому значению эффективного модового объема, который

составляет величину порядка длины волны, а также благодаря высоким (более миллиона) значениям добротности. В то время как небольших значений эффективного объёма мод фотонных кристаллических резонаторов можно достигнуть простым образом, работы, в которых реализованы высокодобротные резонаторы, являются многообещающими. Для создания высокодобротного ФК резонатора требуются большие вычислительные затраты. Поэтому необходимым является использование высокопроизводительной вычислительной техники и параллельных методов расчета.

Одномерный ФК резонатор на основе гребенчатого волновода в последнее время появился в качестве эффективной альтернативы двумерного ФК резонатора, основанного на ФК пластинах. Одномерный ФК резонатор может достичь столь же высокой добротности, как и двумерный ФК резонатор. При этом обеспечивается существенная компактность и естественность в геометрическом смысле интеграции с волноводами на кристалле.

Рост объёма информации в мире и необходимость обрабатывать эту информацию в реальном времени порождают новые требования к вычислительной технике. Значение максимальной рабочей частоты современных электронных вычислительных компонентов достигло естественного предела. Переход на оптоэлектронные интегрированные на кристалле вычислительные компоненты позволит увеличить скорость обработки информации на несколько порядков и обрабатывать не только действительные, но и комплексные величины. В связи с этим актуальна оптическая реализация базовых вычислительных операций. Например, в последнее время были предложены оптические интеграторы на основе интегрированных на кристалле решений. Такие интеграторы могут использоваться как в цифровой, так и в аналоговой обработке сигналов.

Среди приложений цифровой обработки сигналов можно выделить использование оптических интеграторов в качестве счётчиков импульсов и элементов сверхбыстрой памяти. Приложения аналоговой оптической обработки сигналов включают решение дифференциальных уравнений различных порядков. Эти приложения особенно актуальны при создании блоков управления автономными мобильными роботами и беспилотными летательными аппаратами. Полностью оптическая реализация такого блока управления на кристалле обеспечит быстродействие, компактность и энергоэффективность устройства.

Актуальна оптическая реализация базовых вычислительных операций [7]. В последнее время были также предложены интегрированные на кристалле решения для оптической обработки сигналов. Например, для оптического дифференцирования и интегрирования были предложены оптические интеграторы на основе решёток Брэгга (Х. Азана) [8] и кольцевого резонатора (Д. Ли) [9]. Размеры этих устройств составляют десятки микрометров. Для практического использования нанофотонных устройств данные размеры должны быть значительно уменьшены [10-12].

Целью работы является рассмотрение методов расчета и моделирования новых компактных высокоэффективных интегрированных на кристалле оптических резонаторов и разработка на их основе элементов нанофотоники для сверхбыстрой обработки оптических сигналов. Данные методы расчета иллюстрируются решением конкретных задач расчета элементов фотоники:

1. Разработка компактного интегрированного на кристалле элемента нанофотоники для дифференцирования оптических сигналов;
2. Разработка компактного интегрированного на кристалле элемента нанофотоники для интегрирования оптических сигналов;
3. Разработка высокоэффективного фотонно-кристаллического резонатора с возможностью вертикальной электронной накачки;
4. Разработка пересекающихся фотонно-кристаллических резонаторов с повышенным коэффициентом модового перекрытия;
5. Разработка оптического модулятора на основе массива фотонно-кристаллических резонаторов.

6. Разработка оптического датчика на основе массива фотонно-кристаллических резонаторов.

7. Разработка метода расчета сложных нанофотонных элементов на основе высокопроизводительного распределенного масштабируемого отказоустойчивого вычислительного комплекса.

Литература

1. Velha, P. Ultra-high-reflectivity photonic-bandgap mirrors in a ridge SOI waveguide / P. Velha, J.C. Rodier, P. Lalanne, J.P. Hugonin, D. Peyrade, E. Picard, T. Charvolin, E. Hadji // *New Journal of Physics*. – 2006. – Vol. 8. – P. 1-13.

2. Ota, Y. Vacuum Rabi splitting with a single quantum dot embedded in a H1 photonic crystal nanocavity / Y. Ota, M. Shirane, M. Nomura, N. Kumagai, S. Ishida, S. Iwamoto, S. Yorozu, Y. Arakawa // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94, – 033102 (3p).

3. Fan, S. Guided and defect modes in periodic dielectric waveguides / S. Fan, J.N. Winn, A. Devenyi, J.C. Chen, R.D. Meade and J.D. Joannopoulos // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 1995. – Vol. 12(7). – P. 1267-1272.

4. Lalanne, P. Photon confinement in photonic crystal nanocavities / P. Lalanne, C. Sauvan, J.P. Hugonin // *Laser & Photon*. – 2008. – Rev. 2, N 6. – P. 514–526.

5. Quan, Q. Deterministic design of high Q, small mode volume photonic crystal nanobeam cavities / Q. Quan and M. Loncar // *Opt. Express* – 2011. – Vol. 19, N 5, P. 18529–18542.

6. Vuckovic, J. Optimization of the Q Factor in Photonic Crystal Microcavities / J. Vuckovic, M. Loncar, H. Ma-buchi, A. Scherer // *IEEE JQE*. – 2002. – Vol. 38, N 7. – P. 850-856.

7. Гаврилов, А.В. Перспективы создания оптических аналого-вых вычислительных машин / А.В. Гаврилов, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. - 2012. – Т. 36, № 2. – С. 140-150.

8. Park, Y. Ultrafast all-optical first- and higher-order differentiators based on interferometers / Y. Park, J. Azaña, and R. Slavík // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32, N 6, - P. 710–712.

9. Liu, F. Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator / F. Liu, T. Wang, L. Qiang, T. Ye, Z. Zhang, M. Qiu, and Y. Su // *Opt. Express* – 2008. – Vol. 16, N 20, - P. 15880–15886.

10. Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals, N. L. Kazanskiy, P. G. Serafimovich. (2014), *Optics Express*, Vol. 22, Issue 11, pp. 14004-14013.

11. Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G., Khonina S.N. Use of photonic crystal cavities for temporal differentiation of optical signals // *Optics Letters*, Vol. 38, Issue 7, pp. 1149-1151 (2013).

12. Serafimovich P.G., Kazanskiy N.L., Khonina S.N. Two-component cavity based on a regular photonic crystal nanobeam // *Applied Optics*, Vol. 52, Issue 23, pp. 5830-5834 (2013).