

Моделирование кремниевого кольцевого микрорезонатора газового сенсора с помощью Comsol

С.А. Дегтярев^а, М.А. Бутт^а, В.В. Подлипнов^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия
^б Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

В работе проведено трехмерное векторное моделирование прохождения стационарного оптического сигнала в кремниевом кольцевом микрорезонаторе с помощью программного пакета Comsol. Численное моделирование проведено с различным типом поляризации, различными формами волноводов, различного радиуса кольца. Получены картины распределения электромагнитного поля внутри волноводной структуры и вблизи нее. Рассчитаны распределения интенсивности по сечению кольцевого резонатора в зависимости от параметров кольцевого резонатора. Установлены условия получения максимальной чувствительности кольцевого резонатора к условиям окружающей среды, что позволяет применить данную структуру в качестве оптического жидкостного или газового сенсора.

Ключевые слова: Кремниевый кольцевой микрорезонатор; Comsol; газовый сенсор

1. Введение

Кольцевые резонаторы широко распространены в оптике как устройства для оптической обработки сигналов, фильтрации и др. в интегральной оптике [1, 2]. Одним из применений кольцевых микрорезонаторов является использование их в качестве биосенсоров [3, 4]. В основе работы которых лежит существенная чувствительность добротности кольцевых резонаторов к условиям окружающей среды. В случае, когда рядом с волноводом возникает достаточное количество клеток, частиц, возникает сильное рассеяние энергии на этих частицах, эффективность работы кольцевого резонатора снижается и, таким образом можно оценить количество/концентрацию клеток с известными оптическими свойствами. Кольцевые резонаторы нередко используются также в качестве оптических газовых сенсоров [5, 6]. Основным параметром является минимально возможное значение концентрации газа, которое можно установить с помощью данного устройства. Однако, известно что наибольшей чувствительностью к изменению концентрации окружающих газов обладают кольцевые резонаторы выполненные в виде субволновых решетчатых структур имеющих значительный контакт с окружающим воздухом [7]. Однако, на практике такие структуры использовать не достаточно удобно ввиду сильной нелинейности характеристик и невозможностью производить измерения достаточно высоких концентраций газов. В связи с этим, в данной работе проводится моделирование кольцевых микрорезонаторов с различными геометрическими параметрами, с целью установления возможности их использования в качестве детекторов изменения параметров окружающей среды.

2. Моделирование работы кольцевого микрорезонатора в условиях изменения окружающей среды

Обычно для создания кольцевых микрорезонаторов, стремятся соблюсти условие когда потери на рассеяние в окружающее пространство, в кольцевом волноводе минимальное. При этом выполняется условие полного внутреннего отражения. Исходя из данного условия, моделированием можно получить, что данным условиям удовлетворяет следующий резонатор выполненный из кремния: расстояние между кольцом и волноводами $g=100$ нм, длина волны света $\lambda=1556.9$ нм, толщина кремниевого слоя $h = 220$ нм, ширина волновода $a = 560$ нм. В случае отсутствия посторонних и опасных газов будем считать что кольцо находится в среде с показателем преломления $n=1$, показатель преломления кремния из которого выполнены волноводы и кольцо $n = 3.48$.

Результат моделирования работы такого резонатора представлен на рис. 1. Распределение амплитуды поля внутри него (рис. 2) показывает, что волна распространяется преимущественно внутри резонатора а по краям амплитуда минимальна.

Методом подбора, было установлено, что для данных условий формирования, резонансным является радиус кольца $r=2119,4$ нм. Амплитуда поля при этом в выходном волноводе была равная $4,9535 \cdot 10^{-7}$.

Молированием аналогичным образом было установлено, что при уменьшении ширины волновода до $a=400$ нм, резонансным радиусом для данной длины волны является волновод с радиусом $r=1926,4$ нм. Амплитуда поля при этом в выходном волноводе была равная $6,7356 \cdot 10^{-7}$.

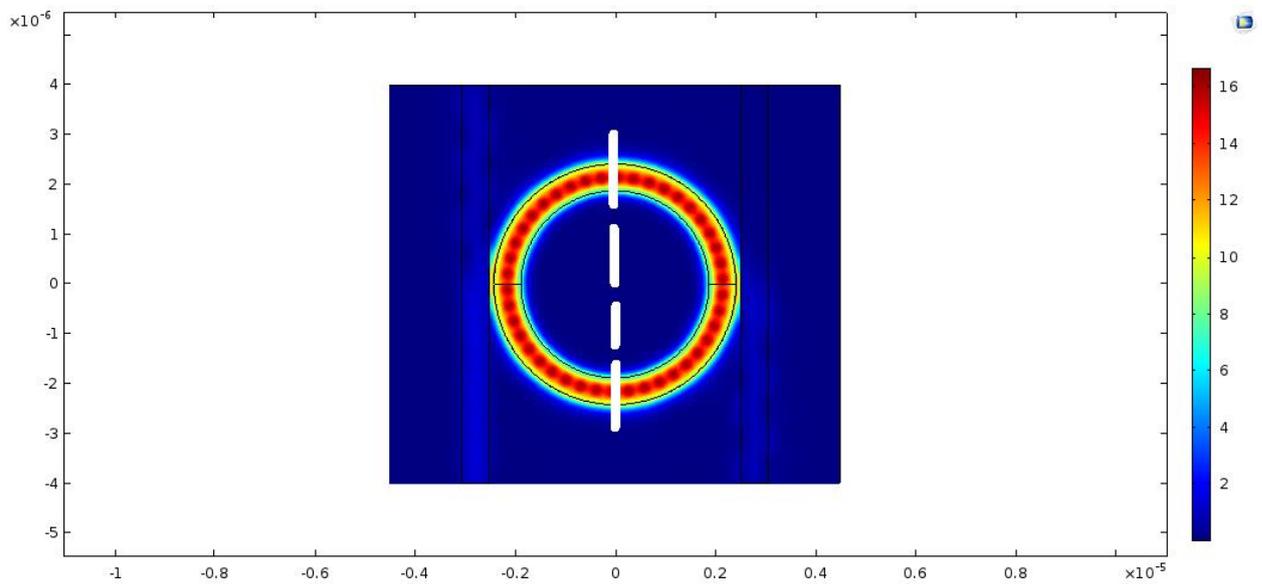


Рис. 1. Результат моделирования кольцевого резонатора $r = 2119.4$ nm, ширина волновода $a = 560$ nm.

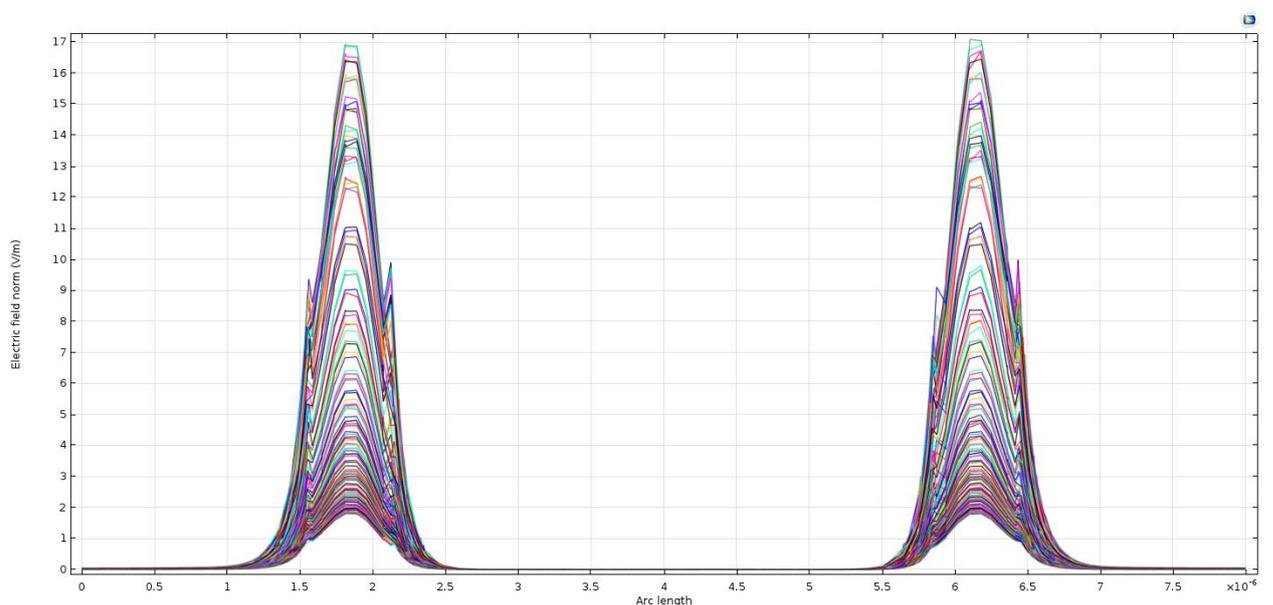


Рис. 2. Распределение амплитуды поля в сечении кольцевого резонатора, $a = 560$ nm.

В случае, когда в окружающей среде возникают пары веществ (газы), изменяется показатель преломления среды в которой находится кольцевой резонатор. Это сказывается на сдвиге резонансной длины волны, в итоге эффективность всей системы снижается, и приводит к тому, что условие резонанса не выполняется и в выходном волноводе амплитуда поля снижается. Рассмотрим данный процесс моделированием присутствия в воздухе паров этанола (показатель преломления жидкости $n=1,3613$). Из-за наличия паров этанола представим что показатель преломления среды увеличился до значения $n=1,0001$. В таком случае при моделировании волновода с шириной $a=560$ nm, $r=2119,4$ nm, значение амплитуды поля в выходном волноводе резонаторной структуры составит $4,726 \cdot 10^{-7}$, что на 4,6% меньше значения амплитуды в условиях резонанса. В случае, когда $a=400$ nm, $r=1926,4$ nm амплитуда поля на выходе из резонатора равна $6,7444 \cdot 10^{-7}$, что практически совпадает с значением амплитуды в условии резонансной работы резонатора. Данное явление можно объяснить если построить сечение резонатора по входному и выходному волноводу (рис. 3).

Аналогично приведенному было проведено моделирование, когда показатель преломления окружающей среды находился в пределах $n=1.01$. Результаты моделирования приведены в таблице 1. В данном случае резонатор с шириной волновода $a=560$ nm оказывается на порядок меньше первоначального значения, но в то же время возможна ситуация, когда данный сигнал невозможно будет зарегистрировать из-за достаточно высокой шумовой составляющей.

В данном случае по рис. 5, б видно, что уменьшение ширины волновода до $a=400$ nm привело к тому, что в волноводах значительная часть энергии стала распространяться в виде поверхностной волны. В рассматриваемом ранее случае, когда $a=560$ nm, доля поверхностной волны была незначительна. Увеличение доли поверхностной волны в рассматриваемом случае снизило чувствительность резонанса такого микрорезонатора к условиям окружающей среды.

Таблица 1. Результаты моделирования кольцевых резонаторов

	a=560нм	a=400нм
Резонансный радиус	$r=2119,4$ нм	$r=1926,4$ нм
Амплитуда поля в выходном волноводе резонатора при $n=1$	$4,9535 E^{-7}$.	$6,7356 E^{-7}$
Амплитуда поля в выходном волноводе резонатора при $n=1.0001$	$4,726 E^{-7}$	$6,7444 E^{-7}$
Амплитуда поля в выходном волноводе резонатора при $n=1.01$	$2,8991 E^{-8}$	$1,47 E^{-7}$

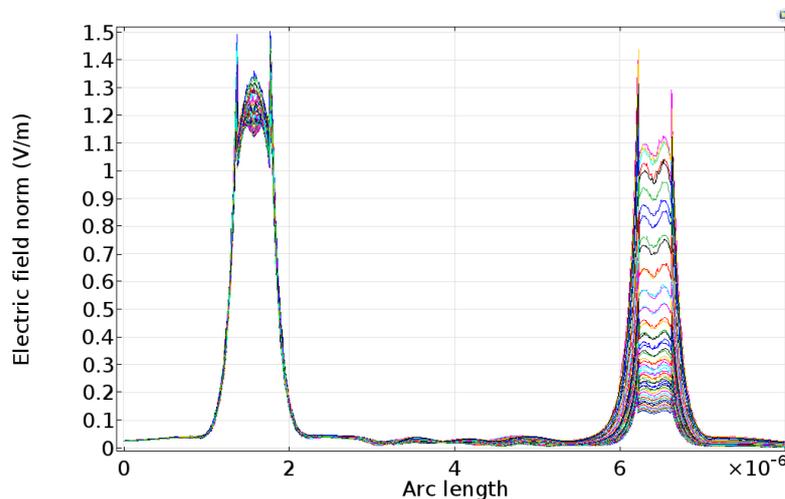


Рис. 3. Распределение амплитуды поля в сечении входного и выходного волновода резонатора, $a=400$ нм.

3. Заключение

В результате 3d в работе представлены картины распределения амплитуды поля в кольцевом микрорезонаторе с шириной волновода $a=560$ нм и $a=400$ нм. Анализ распределения амплитуды поля по сечению волнопроводов позволил выявить закономерности распространения света. Представленные результаты моделирования могут быть полезны для проектирования и создания интегральных оптических газовых или жидкостных сенсоров на основе кремниевых кольцевых резонаторных структур. В случае, когда необходимым требованием для сенсора является возможность регистрации минимально возможного изменения окружающей среды, то предпочтительнее использование более широкого волновода, в случае же когда необходим более широкий диапазон охвата изменения показателя преломления, предпочтительнее использование достаточно узкого волновода, в котором формируется, помимо основной, заметная доля поверхностной волны.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 16-07-00825 и 16-29-11698 оф_и_м) и Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

- [1] Wang, Z. Geometrical tuning art for entirely subwavelength grating waveguide based integrated photonics circuits. / Wang, Z., Xu, X., Fan, D., Wang, Y., Subbaraman, H., & Chen, R. T. // Scientific reports, 2016, vol 6.
- [2] Little, B. E. Microring resonator channel dropping filters. / Little, B. E., Chu, S. T., Haus, H. A., Foresi, J., & Laine, J. P. // Journal of lightwave technology, 1997, vol.15(6), 998-1005.
- [3] De Vos, K. Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing. / De Vos, K., Bartolozzi, I., Schacht, E., Bienstman, P., & Baets, R. // Optics express - 2007. Vol. 15(12), 7610-7615.
- [4] Yalcin, A. Optical sensing of biomolecules using microring resonators. / Yalcin, A., Popat, K. C., Aldridge, J. C., Desai, T. A., Hryniewicz, J., Chbouki, N., & Gill, D. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics - 2006. Vol. 12(1), 148-155.
- [5] Passaro, V. Ammonia optical sensing by microring resonators. / Passaro, V., Dell'Olio, F., & De Leonardis, F. // Sensors - 2007. Vol. 7(11), 2741-2749.
- [6] Robinson, J. T. On-chip gas detection in silicon optical microcavities. / Robinson, J. T., Chen, L., & Lipson, M. // Optics Express - 2008. Vol. 16(6), 4296-4301.
- [7] Yebo, N. A. On-chip arrayed waveguide grating interrogated silicon-on-insulator microring resonator-based gas sensor. / Yebo, N. A., Bogaerts, W., Hens, Z., & Baets, R. // IEEE Photonics Technology Letters - 2011. Vol. 23(20), 1505-1507.