

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В РЕЗОНАТОРАХ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ В СВЧ МОДУЛЯТОРАХ

Н.М. Кондратьев¹, М.Л. Городецкий^{1,2}

¹Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,

²Российский Квантовый центр Сколково

nohobar@mail.ru, michael.gorodetskiy@gmail.com

Оптические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи (ММШГ), впервые продемонстрированные на кафедре физики колебаний физического факультета МГУ в 1989 году в группе член-корр. РАН В.Б. Брагинского [1], сочетают с большой добротностью (порядка 10^8) малые размеры и высокую концентрацию оптического поля [2]. Это позволяет ожидать сильное электрооптическое взаимодействие между правильно подобранными модами или внешним полем в резонаторах из нелинейных материалов.

В последнее время большое внимание уделяется устройствам оптической обработки и передачи информации. Такие устройства обещают множество преимуществ перед электронными аналогами. Оптические линии связи позволяют передавать больше информации, имеют меньшие потери и не восприимчивы к помехам и наводкам со стороны других приборов. Размеры и стоимость оптических устройств также меньше. Кроме того, некоторые элементы, например приёмные антенны, могут быть созданы без использования металлических рабочих частей, что делает их невосприимчивыми к подавляющим электронику мощным СВЧ импульсам.

В 2000 г. в ММШГ из нелинейного материала было продемонстрировано взаимодействие микроволнового и светового поля [3, 4]. Если ММШГ выполнен из электрооптического материала, то приложение внешнего поля приведёт к изменению показателя преломления и сдвигу резонансной частоты. Эффективное резонансное взаимодействие между многими оптическими МШГ и микроволновой модой достигалось за счет специальной формы СВЧ резонатора и давало выигрыш за счет двойного резонанса. На основе такого взаимодействия был предложен и реализован новый вид электрооптического модулятора, а также фотонного приемника микроволнового излучения [5, 6, 7, 8, 9]. Схема устройства, разработанная в ранних работах, и в целом повторяющаяся в дальнейшем представлена на Рис. 1. Резонатор помещен на металлическую подложку с радиочастотным полосковым элементом связи и призмой оптической связи. На резонатор нанесен металлический электрод в виде полукольца, являющийся полуволновым СВЧ полосковым резонатором с частотой резонанса равной ОСД оптического резонатора.

Схема на рисунке 1 не единственная. Можно предложить множество различных конфигураций СВЧ резонаторов, включая диэлектрические резонансные и линзовые антенны, для которых можно ожидать хорошее перекрытие мод и эффективное электрооптическое взаимодействие.

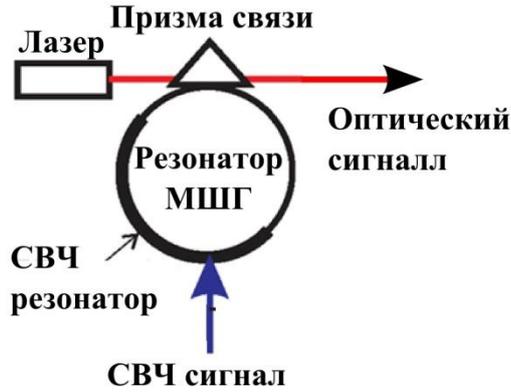


Рис. 1. Схема модулятора на резонаторе из ниобата лития (LiNbO3).

Для оценки эффективности взаимодействия проще всего использовать сдвиг частоты моды. Эта величина выражается через интегралы перекрытия оптической и радиочастотной мод:

$$\frac{\delta f_m}{f_m} = \frac{\int (E_p^{WGM})^* \varepsilon_{pi} r_{ijk} E_k^{RF} \varepsilon_{jq} E_q^{WGM} dV}{\int (E_j^{WGM})^* \varepsilon_{jk} E_k^{WGM} dV}, \quad (1)$$

где δf_m - сдвиг частоты оптической моды под номером m , f_m - её исходная частота, E_j^{WGM} - j -компонента её формы (распределения поля), ε_{jk} - тензор диэлектрической проницаемости, r_{ijk} - тензор электрооптического эффекта, E_j^{RF} - j -компонента формы радио моды. Интегрирование ведётся по области с электрооптическим материалом (ММШГ) и по всем индексам в правой части ведётся суммирование. Используя эту величину можно искать оптимальную конфигурацию резонаторов. Интеграл в числителе можно упростить до $\int \alpha_{ijk}^C E_k^{RF} E_i^{WGM*} E_j^{WGM} r dr dz$. Величина α_{ijk}^C постоянна в материале и зависит от $M_+ = n - m + l$ и $M_- = n - m - l$, где n - азимутальное число моды накачки, а l - радиочастотной моды. В ниобате лития, где $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$, $r_{42} = r_{51}$ и многие коэффициенты $r_{\lambda k}$ равны нулю, $\alpha_{\lambda k}^C$ не равно нулю только для M_+ и $M_- = 0, \pm 3$

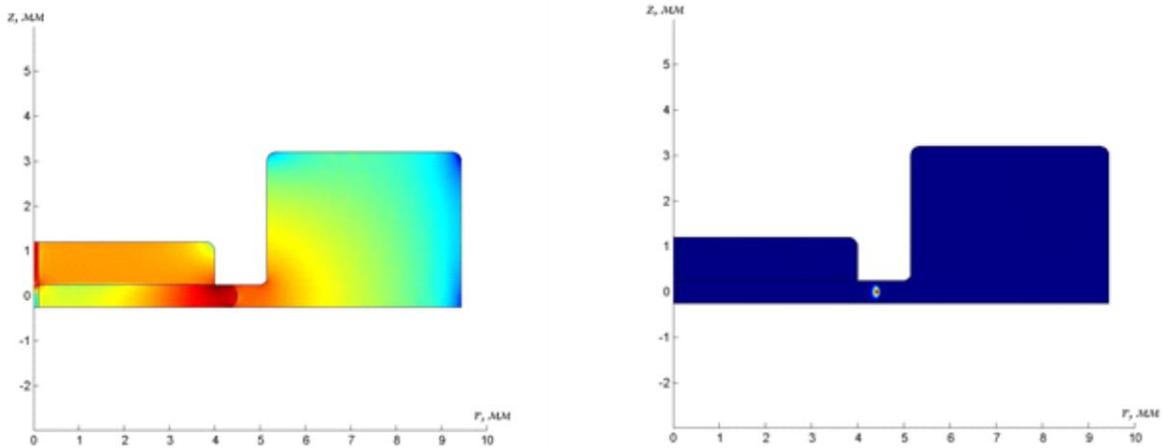


Рис. 2. Радиочастотная мода (слева) и МШГ (справа) в металлическом резонаторе с сосредоточенной ёмкостью, в которую вставлен ММШГ. Цилиндрические координаты.

На рисунке 2 приведены результаты численного моделирования для одной из конфигураций металлического резонатора с сосредоточенной ёмкостью, со встроенным ММШГ из ниобата лития. Рассчитанное значение относительного сдвига частоты (на единицу энергии внутри резонатора) составило $0.08 \text{ 1/Дж}^{1/2}$ при частоте 200 ТГц. Также моделирование показало, что моды ТЕ типа лучше взаимодействуют с радиочастотным полем. ТЕ модами мы называем моды, которые не имеют составляющих электрического поля по оси r (электрическое поле в основном вдоль z), хотя волна распространяется по азимуту.

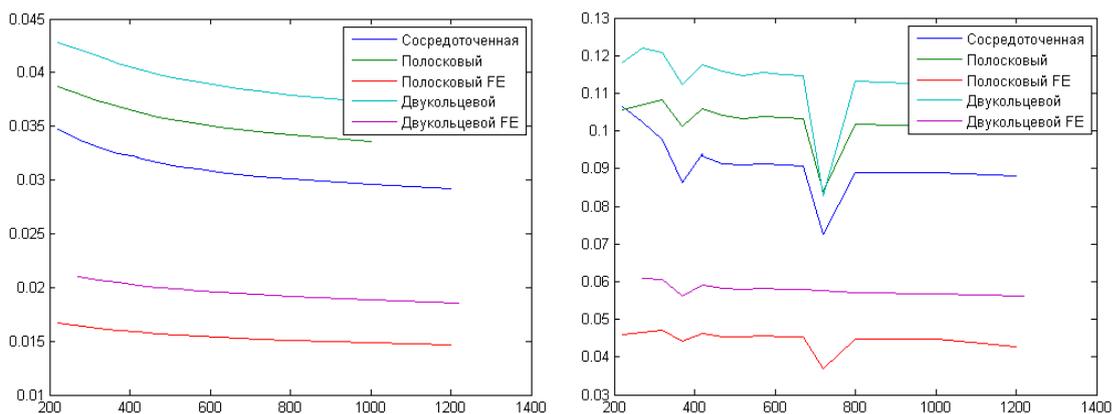


Рис. 3. Зависимости сдвига частоты от азимутального числа для фундаментальной ТМ (слева) и ТЕ (справа) мод. FE обозначает, что электроды принимались не бесконечно тонкими

Для разных конфигураций построены зависимости сдвига частот от азимутального числа (рис. 3). Азимутальное число слабо влияет на внутреннюю структуру моды, от него зависит площадь её поперечного сечения.

Так же при постоянных материальных параметрах диска оно пропорционально частоте моды. Таким образом, эти графики можно расценивать как зависимость сдвига частот от частоты моды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. Quality-factor and non-linear properties of optical whispering-gallery modes. V. 137, P. 393-397, 1989.
2. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: Физматлит, 2011.
3. Ilchenko V.S., Yao X.S., Maleki L. Microsphere integration in active and passive photonics devices, in Laser Resonators III: Proceedings of SPIE. SAN JOSE. CA. 2000.
4. Ilchenko V.S., Maleki L. Novel whispering-gallery resonators for lasers, modulators, and sensors, in Laser Resonators IV: Proceedings of SPIE. SAN JOSE. CA. 2001.
5. Ilchenko V.S. *et. al.* High efficiency microwave and millimeter-wave electro-optical modulation with whispering-gallery resonators, in Laser Resonators and Beam Control V. Proceedings of SPIE. San Jose. CA. 2002.
6. Cohen D.A., Hossein-Zadeh M., Levi A.F.J. // Electronics Letters. 2001.V. 37. P. 300.
7. Maleki L., Levi A.F.J., Yao S., Ilchenko V.S. // USA Patent US 6473218 B1, 29 Oct 2002.
8. Ilchenko V.S., A Savchenkov.A., Matsko A.B., Maleki L. // IEEE Photonics Technology Letters. 2002. V. 14. P. 1602.
9. Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Maleki L. // J. of the Optical Society of America B. 2003. V. 20. P. 333.