

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В РЕЗОНАТОРАХ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ И СВЧ МОДУЛЯТОРЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

Н. М. Кондратьев, М. Л. Городецкий

МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра физики колебаний
ОАО «НПК «НИИДАР»

Получена 16 октября 2012 г.

Аннотация. В работе рассматривается применение резонаторов с модами шепчущей галереи из ниобата лития для создания электрооптических модуляторов и приемников в СВЧ диапазоне. Рассматриваются различные конфигурации резонаторов и проводится их численное моделирование с целью оптимизации взаимодействия.

Ключевые слова: электрооптика, резонаторы, моды шепчущей галереи, модуляторы, СВЧ.

Abstract. The usage of lithium niobate whispering gallery mode resonators in electrooptical radio frequency modulators is studied. Different configurations of optical and radio cavities are numerically modelled in order to perform interaction optimisation.

Key words: electrooptics, cavities, whispering gallery modes, modulators, radio frequencies.

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. Это позволяет ожидать сильное электрооптическое взаимодействие между правильно подобранными модами или внешним полем, и создавать таким образом эффективные модуляторы.

В последнее время большое внимание уделяется устройствам оптической обработки и передачи информации. Такие устройства обещают множество пре-

имущества 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 не восприимчивыми к подавляющим электронику мощным СВЧ импульсам.

Моду шепчущей галереи в лучевом представлении можно представить как оптическую волну, распространяющуюся вблизи внутренней поверхности аксиально диэлектрического тела так, что угол падения на границу раздела превышает угол полного внутреннего отражения. Резонанс в таком представлении соответствует тому, что на одном обороте ($\sim 2\pi Rn$, где R – радиус резонатора, n – показатель преломления) укладывается целое число длин волн $m\lambda$. В реальных оптических микрорезонаторах величина m обычно довольно велика. Моды шепчущей галереи, имеющие наиболее простое распределение поля с одним максимумом в радиальном и меридиональном направлении, и, тем самым, самую большую концентрацию электромагнитного поля называют фундаментальными. Частотное расстояние между фундаментальными модами, называемое областью свободной дисперсии (ОСД), определяется выражением $\Delta f_{FSR} = \frac{c}{2\pi Rn}$. Обзор основных свойств оптических микрорезонаторов и их ранних экспериментальных исследований представлен в монографии [2].

В 2000 году было показано, что в ММШГ из нелинейного материала микроволновое и световое поле могут взаимодействовать [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, связанного с оптическим тороидальным микрорезонатором, 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, 10, 11]. Схема и фотография устройства, разработанная в ранних работах, и в целом повторяющаяся в дальнейшем, представлена на Рис. 1. Резонатор помещен на общую 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. На основе таких модуляторов может быть реализован приемник СВЧ и радиочастотного излучения, трансформирующий сигнал в оптический диапазон для дальнейшей передачи и обработки.

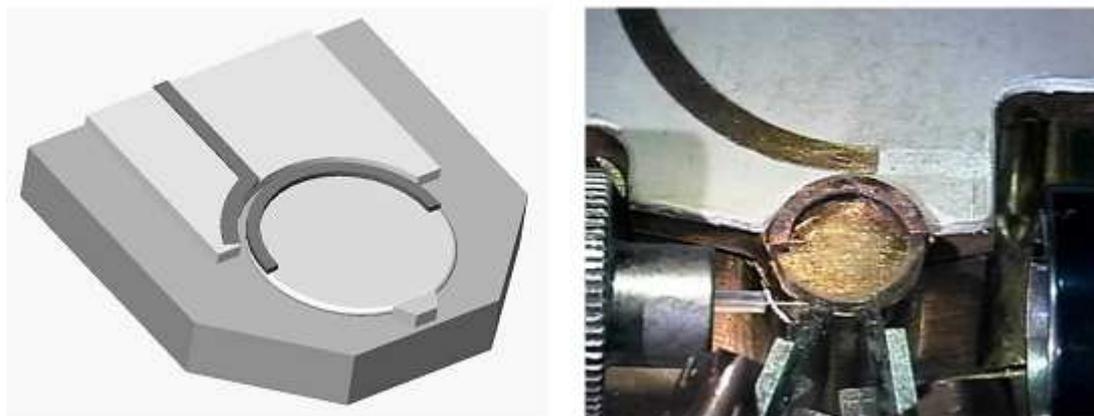


Рис. 1. Схема модулятора на тороидальном резонаторе из ниобата лития (LiNbO_3) и фотография устройства. [5, 13].

Чувствительность дисковых ММШГ приемников в ранних экспериментах составила 160 мкВт (по напряжению 69 мВ) на частоте 7.56 МГц [7]. В 2008 году был достигнута чувствительность 100 пВт [12] на частоте 35 ГГц, правда, ценой уменьшения полосы до 5 МГц, наконец, в 2011 г. была продемонстрирована рекордная на сегодняшний день чувствительность 3 пВт (-85 дБм) в полосе 60 МГц на частоте 14.6 ГГц.

Недостатком модуляторов на одновременном резонансе является то, что спектр сигнала и спектральные компоненты модулированного сигнала должны

находиться внутри полос резонансов. В сочетании с высокой добротностью ММШГ это приводит не только к ограниченности полосы модуляции, но и к тому, что частота модуляции должна совпадать с частотным расстоянием между модами либо быть меньше полосы оптического резонанса: если модуляция происходит на частоте f_{RF} , то в оптическом спектре вблизи основной линии оптической несущей f_{car} появляются боковые компоненты $f_{car} \pm f_{RF}$. Для получения максимальной модуляции все три частоты ($f_{car} + f_{RF}$, $f_{car} - f_{RF}$, f_{car}) должны быть резонансными. Если ширина оптической спектральной линии $\Delta f_{1/2}$ меньше частоты модуляции, то f_{RF} должно быть кратно Δf_{FSR} .

Электрооптическим эффектом называется явление изменения показателя преломления среды под действием электрического поля. Этот эффект анизотропен и, обычно, описывается в терминах оптической индикатрисы. По сути, индикатриса представляет собой фигуру второго порядка (эллипсоид), построенную при помощи обратного тензора диэлектрической проницаемости и показывающую показатель преломления для поля в заданном направлении. Таким образом изменение диэлектрической проницаемости имеет следующий вид

$$\delta \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{il} k_{lmn} \varepsilon_{mj} E_n^{RF}, \quad (1)$$

где ε_{jk} - тензор диэлектрической проницаемости, r_{ijk} - тензор электрооптического эффекта, E_j^{RF} - j -компонента формы радио моды. Волновое уравнение можно решить методом теории возмущений. В первом порядке малости $\delta \varepsilon_{ij}$ сдвиг резонанса принимает вид

$$\frac{\delta f_m}{f_m} = \frac{\int (E_p^{WGM})^* \varepsilon_{pi} r_{ijk} E_k^{RF} \varepsilon_{jq} E_q^{WGM} dV}{\int (E_j^{WGM})^* \varepsilon_{jk} E_k^{WGM} dV}, \quad (2)$$

где δf_m - сдвиг частоты оптической моды под номером m , f_m - её исходная частота, E_j^{WGM} - j -компонента её формы (распределения поля). Интегрирование ведётся по области с электрооптическим материалом (ММШГ) и по всем

индексам в правой части ведётся суммирование. Стоит отметить, что при многомодовом режиме E_q^{WGM} в числителе принадлежит моде накачки отличной от m . Учитывая простую зависимость МШГ по азимутальному углу ($e^{im\varphi}$), интегрирование можно частично провести. Тогда интеграл в числителе упростится $\int \alpha_{ijk}^C E_k^{RF} E_i^{WGM*} E_j^{WGM} r dr dz$. Величина α_{ijk}^C зависит от $M_+ = n - m + l$ и $M_- = n - m - l$, где n - азимутальное число моды накачки, а l - радиочастотной моды. α_{ijk}^C не ноль если M_+ или M_- равно $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$. Для диаганального ε_{jk} и $M_+ = M_- = 0$

$$\alpha_{\lambda k}^C = \frac{\pi}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \varepsilon_1^2 r_{13} + \varepsilon_2^2 r_{23} \\ 0 & 0 & \varepsilon_1^2 r_{13} + \varepsilon_2^2 r_{23} \\ 0 & 0 & 2\varepsilon_3^2 r_{33} \\ \varepsilon_3(\varepsilon_2 r_{41} - \varepsilon_1 r_{52}) & \varepsilon_3(\varepsilon_2 r_{42} + \varepsilon_1 r_{51}) & 0 \\ \varepsilon_3(\varepsilon_2 r_{42} + \varepsilon_1 r_{51}) & -\varepsilon_3(\varepsilon_2 r_{41} - \varepsilon_1 r_{52}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

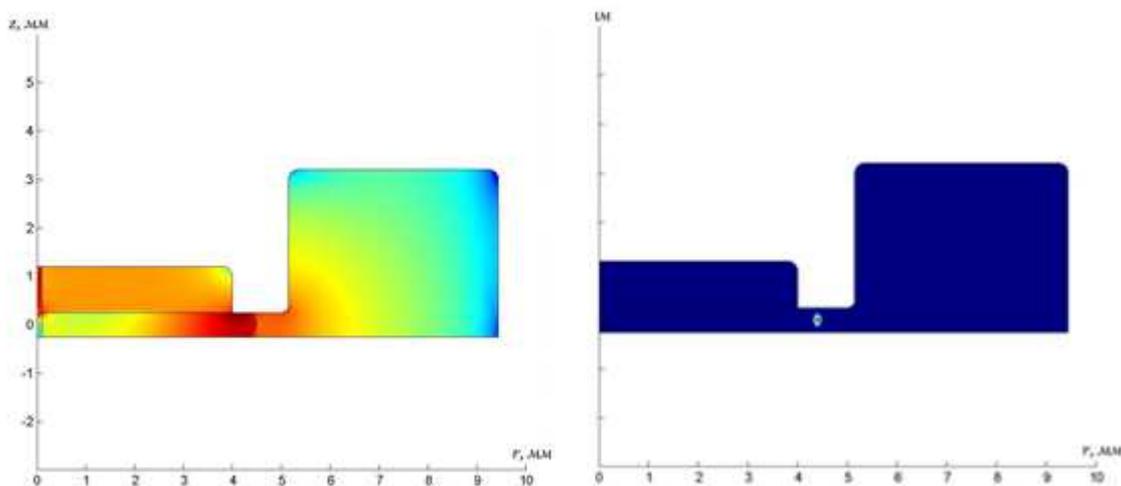


Рис. 2 Радиочастотная мода (слева) и МШГ (справа) в металлическом резонаторе с сосредоточенной ёмкостью, в которую вставлен ММШГ. Цилиндрические координаты.

где использованы шестимерные индексы – $\lambda = i = j$ при $i = j$ и $\lambda = 9 - i - j$ при $i \neq j$. В Ниобате лития, где $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$, $r_{42} = r_{51}$ и многие коэффициенты $r_{\lambda k}$

равны нулю, $\alpha_{\lambda k}^C$ ещё более упрощается, а допустимыми M_+ и M_- остаются только $0, \pm 3$.

Для анализа конфигураций резонаторов может быть применено численное моделирование методом конечных элементов. Оно позволяет с хорошей точностью оценить собственные частоты резонаторов произвольной формы и материала и соответствующие распределения полей. Используя эти распределения можно рассчитать сдвиги резонансных частот оптических мод под действием радиочастотных мод используя формулу (2).

На Рис.2 приведены результаты моделирования для одной из конфигураций металлического резонатора с сосредоточенной ёмкостью, со встроенным ММШГ из ниобата лития. Рассчитанное значение сдвига (на единицу энергии внутри резонатора) составило $0.06 \text{ 1/Дж}^{1/2}$ при частоте $2 \cdot 10^{12}$ Гц. Так же моделирование показало, что моды ТМ типа лучше взаимодействуют с радиочастотным полем.

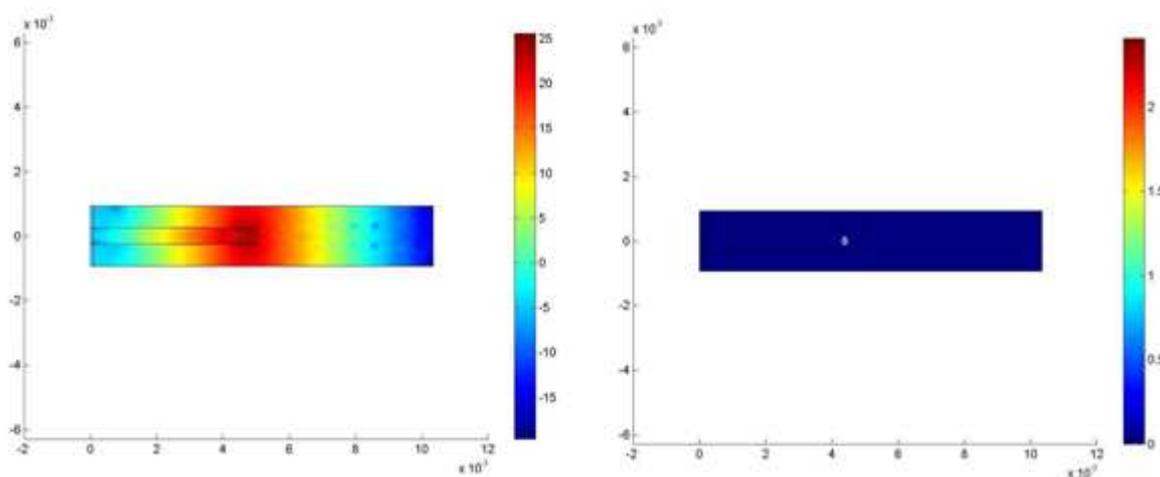


Рис. 3 Статическое поле (слева) и МШГ (справа) в ММШГ, с плоским конденсатором на конце. Цилиндрические координаты.

На Рис. 3 можно видеть такое же моделирование для ММШГ, конец которого находится в обычном плоском конденсаторе. Конфигурация на Рис. 3 показала вдвое меньший сдвиг частоты. Однако при сдвиге конденсатора ближе к началу координат эффективность удаётся улучшить до тех же $0.06 \text{ 1/Дж}^{1/2}$.

Так же проверялась конфигурация, когда радиочастотная мода так же представляла собой МШГ. Такое возможно, если вставить диск из ниобата лития внутрь большего диска из материала с высокой (>100) диэлектрической проницаемостью на радиочастотах. Однако из-за высокого показателя преломления поле плохо проникает в оптический резонатор и сдвиг частоты получается слабым.

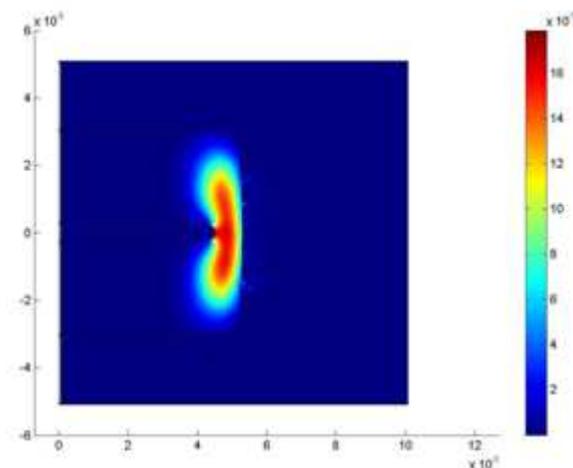


Рис. 4 Радиочастотная МШГ в диэлектрическом резонаторе с $\varepsilon = 800$, в который вставлен ММШГ из ниобата лития. Цилиндрические координаты.

Литература

- [1] V. B. Braginsky, M. L. Gorodetsky and V. S. Ilchenko, "Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes," vol. 137, pp. 393-397, 1989.
- [2] М. Л. Городецкий, Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью, Москва: Физматлит, 2011, р. 416.
- [3] V. S. Ilchenko, X. S. Yao and L. Maleki, "Microsphere integration in active and passive photonics devices," in *Laser Resonators III: Proceedings of SPIE*, SAN JOSE, CA, 2000.
- [4] V. S. Ilchenko and L. Maleki, "Novel whispering-gallery resonators for lasers, modulators, and sensors," in *LASER RESONATORS IV: Proceedings of SPIE*,

SAN JOSE, CA, 2001.

- [5] V. S. Ilchenko, A. B. Matsko, A. A. Savchenkov and e. 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] D. A. Cohen and A. F. J. Levi, "Microphotonic components for a mm-wave receiver," *Solid-state electronics*, vol. 45, pp. 495-505, 2001.
- [7] D. A. Cohen, M. Hossein-Zadeh and A. F. J. Levi, "Microphotonic modulator for microwave receiver," *Electronics Letters*, vol. 37, pp. 300-301, 2001.
- [8] L. Maleki, A. F. J. Levi, S. Yao and V. S. Ilchenko, "Light modulation in whispering-gallery mode resonators". USA Patent US 6473218 B1, 29 Oct 2002.
- [9] D. A. Cohen, Lithium niobate microphotonic modulators, Dissertation ed., Faculty of the graduate school University of Southern California, 2001, pp. 1-178.
- [10] V. S. Ilchenko, A. A. Savchenkov, A. B. Matsko and L. Maleki, "Sub-microWatt photonic microwave receiver," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, pp. 1602-1604, 2002.
- [11] V. S. Ilchenko, A. A. Savchenkov, A. B. Matsko and L. Maleki, "Whispering gallery mode electro-optic modulator and photonic microwave receiver," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 20, pp. 333-342, 2003.
- [12] V. S. Ilchenko, A. B. Matsko, I. Solomatine, A. A. Savchenkov, D. Seidel и L. Maleki, «Ka–band all-resonant photonic microwave receiver,» *IEEE Photonics Technology Letters* , т. 20, № 19, pp. 1600-1602, 2008.