УДК 535.417.2

# ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛНОВОДНОГО РЕЗОНАТОРА С ВЫСОКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ ЧЕРЕЗ СУБВОЛНОВУЮ ЩЕЛЬ

# Х. СААКЯН, О. АРОЯН, Х. НЕРКАРАРЯН<sup>\*</sup>

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

\*e-mail: knerkar@ysu.am

(Поступила в редакцию 31 октября 2016 г.)

Рассмотрено возбуждение стоячих ТМ-волн в одномодовом резонаторе с металлическими границами посредством субволновой щели. В предложенной структуре входящая через щель волновая энергия существенно зависит от длины падающей волны. В результате добротность системы, рассчитанная методом конечных элементов, в ближней инфракрасной области достигает значения  $10^4$ . Существенное изменение энергии рассеянной волны достигается изменением значения диэлектрической проницаемости на величину  $5 \times 10^{-4}$  или толщины резонатора на 0.5 нм. Чувствительность системы к параметрам структуры позволяет использовать систему в различных приложениях, таких как устройства оптической бистабильности, модуляторы и оптические датчики вибрации, смещения и температуры.

## 1. Введение

Развитие волоконной и интегральной оптики привело к разработке широкой гаммы малогабаритных оптических устройств, фильтров, модуляторов, дефлекторов и т. д. Неотъемлемым элементом почти любого сложного оптического и микроволнового прибора является резонатор [1-4]. Одним из ключевых направлений развития физики сегодня является квантовая теория измерений и связанный с ней интерес к манипуляциям с отдельными квантовыми объектами. Оптические резонаторы являются базовыми элементами и играют существенную роль как в этих исследованиях [5-6], так и в исследованиях оптической бистабильности [7] и рамановского рассеяния [8]. Именно с помощью миниатюрных высокодобротных резонаторов в оптическом диапазоне были впервые продемонстрированы неклассические состояния электромагнитного поля и проведены впечатляющие эксперименты по наблюдению эффектов взаимодействия отдельных фотонов и отдельных атомов [9–12]. Тесно связаны с этим направлением и такие приложения, как квантовые компьютеры, квантовая криптография и квантовая обработка информации [5-6, 13]. Одним из основных требований для наблюдения квантовых эффектов является изоляция системы от внешнего классического мира и уменьшение в ней диссипации, что для резонаторов означает повышение добротности. Для практических приложений важно реализовать резонаторы с высокой добротностью *Q* и малым объемом *V* мод, так как отношение *Q/V* определяет интенсивность и время когерентности различных взаимодействий полости и интегрируемость устройства. В настоящее время среди различных микроструктур наиболее перспективными являются объемные оптические резонаторы Фабри–Перо [14–16], микроцилиндры [17], микротороиды [18] и фотонные кристаллы [19–20]. В свою очередь, в плазмонных резонаторах можно получить высокую степень ограничения мод в субволновых пределах [21–23]. Однако внутренние потери, связанные с поверхностными плазмон–поляритонными модами, существенно уменьшают добротность плазмонных резонаторов до значений, намного ниже их диэлектрических аналогов [24–26].

Следует отметить, что несмотря на простоту геометрической конструкции вне поля зрения исследователей оказался одномодовый волноводный резонатор с металлическими границами (рис.1). По-видимому, это связано с проблемами ввода волновой энергии и относительно большими потерями. В настоящей работе мы исследовали возможность ввода энергии волны в объемный резонатор через субволновую щель, которая создает благоприятные условия для увеличения добротности резонатора. В работе [27] аналитически исследован процесс прохождения перпендикулярного поляризованного светового излучения через субволновую щель в тонком экране идеального электрического проводника. Эти результаты согласуются с численными расчетами и демонстрируют, что щели шириной ~100 нм могут привести к нерезонансным (широкополосным)



Рис.1. Схема поперечного сечения структуры. Темная область заполнена серебром, в то время как остальная часть заполнена диэлектрической средой с проницаемостью  $\varepsilon_d$ , где *s* – сдвиг щелевого центра от центра резонатора.

увеличениям амплитуды поля в ~100 раз и эффективности передачи в ~10 раз в ИК области спектра. Этот факт открывает новые возможности усовершенствования металлических одномодовых волноводных объемных резонаторов.

Система ввода/вывода волновой энергии через щель имеет следующие преимущества. Во-первых, отпадает необходимость уменьшения толщины торцевой металлической стенки резонатора для обеспечения через нее ввода/вывода волновой энергии. При толщине стенок, значительно превосходящих скин-слой, существенно уменьшается проникновение поля в металл и в результате уменьшаются потери. Во-вторых, выходящая из резонатора волна из-за субволновой ширины щели имеет сильную расходимость и ее легко отделить от отраженной от стенки волны. В-третьих, меняя положение щели относительно распределения поля стоячей волны в резонаторе, можно управлять вводом/выводом излучения и, следовательно, добротностью резонатора. В-четвертых, отпадает необходимость фокусировки пучка света для оптимального возбуждения одномодового режима. Ниже покажем, что эти преимущества позволяют существенно увеличить добротность резонатора.

# 2. Структура системы и метод расчета

Структура плоскопараллельного резонатора с субволновой щелью показана на рис.1. Рассматриваемая структура проанализирована с помощью метода конечных элементов (МКЭ) с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Численные расчеты реализованы в двухмерной 2D модели, так как поля одинаковы вдоль оси *z*.

Изучено поведение волн в ближней ИК области спектра на длинах волн  $\lambda$ около 1000 нм, так как в этом диапазоне есть хорошие полупроводниковые лазеры и создаются оптимальные условия для поддержки одновременно плазмонных и колебательных мод в резонаторе. Чтобы иметь одномодный волноводный резонатор, были взяты: ширина резонатора d = 316 нм, длина резонатора L =20000 нм и значение диэлектрической проницаемости окружающей среды  $\varepsilon_d =$ 2.5. Во избежание излучательных потерь от поверхностей резонатора левый, правый и верхний металлические слои были значительно шире, чем нижний металлический слой. Главную роль для возбуждения резонатора играет нижний металлический слой, который имеет щель с размером w. Для соблюдения условий усиления эффективности передачи через щель, введенных теорией, описанной в работе [27], толщина h нижней металлической пластины взята меньше размера щели w. Для диэлектрической проницаемости серебра мы использовали значения из работы [28]. Возбуждение резонатора осуществлялось падающей на нижнюю металлическую поверхность плоской волной, которая имеет только компоненту  $E_x$ .

### 3. Результаты и их обсуждение

Исследованы зависимости волновых полей от длины волны падающего излучения при наличии диэлектрической среды с  $\varepsilon_d = 2.5$ . На рис.2 представлено распределение компоненты волнового поля  $E_x$ .



Рис.2. Компонента поля  $E_x$ , возбужденного на резонансной длине волны 1008.75 нм в серебряной пластине плоскопараллельного резонатора субволновой щелью. Длина резонатора L = 20000 нм, ширина d = 316 нм, размер щели w = 100 нм, толщина нижнего металлического слоя h = 70 нм, сдвиг щели от центра резонатора s = 0 нм и проницаемость диэлектрической среды  $\varepsilon_d = 2.5$ .

Из соотношения ширины резонатора и длины волны в резонаторе (рис.2), а также поляризации электрического поля легко убедиться, что в резонаторе формируется фундаментальная колебательная ТМ-волна, которая описывается дисперсионным соотношением

$$\tan\left(\frac{\chi_d}{2}d\right) = \frac{\mathfrak{E}_m}{\chi_d} \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_m},\tag{1}$$

где

$$\chi_d = \sqrt{\varepsilon_d \frac{\omega^2}{c^2} - k^2} , \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{x}_m = \sqrt{k^2 - \varepsilon_m \frac{\omega^2}{c^2}} \,. \tag{3}$$

Здесь k – волновое число ТМ-волны,  $\omega$  – угловая частота и c – скорость света в вакууме.

На рис.За представлена зависимость абсолютного значения Е<sub>x</sub> в резонаторе от длины волны в вакууме для различных толщин h металлического слоя. Здесь наряду с формированием волноводной моды на длине волны 990 нм формируются также другие моды с более низкими значениями добротности. Можно предположить, что эти моды формируются разными способами, поскольку при увеличении толщины металлического слоя фазы мод откликаются на воздействие падающей волны противоположно. При толщине 50 нм проникновение через слой существенно, что способствует резонансному формированию мод с низкими значениями добротности. Однако для волноводной моды на длине волны 990 нм этот случай неблагоприятен, поскольку как внутренние, так и излучательные потери велики. Между тем при толщине 90 нм практически нет проникновения через металлический слой и работает исключительно канал щели. Тогда в резонаторе ослабевают моды с низкими значениями добротности и, наоборот, резко усиливается волноводная мода на длине волны 990 нм. Дело в том, что при возрастании толщины металлического слоя существенно ослабевает значение электрического поля в металле и в результате уменьшаются внутренние потери резонансной волноводной моды. Таким образом, в условиях ввода волновой энергии в резонатор через щель добротность резонансной моды достигает значения 10<sup>4</sup>, чего невозможно достичь при проникновении волновой энергии через боковую стенку. Следует отметить, что такое высокое значение добротности достигается в ближней ИК области с использованием относительно простой структуры и метода возбуждения.



Рис.3. Зависимость абсолютного значения амплитуды  $E_x$  в резонаторе от длины волны для (а) различных значений h, когда сдвиг щели от центра резонатора s = 120 нм, и (b) при различных s, когда высота нижнего металла h = 70 нм. Длина резонатора L = 20000 нм, ширина d = 316 нм и размер щели w = 100 нм, проницаемость диэлектрической среды  $\varepsilon_d = 2.5$ .

На рис.3b представлена зависимость амплитуды  $E_x$  в резонаторе от длины волны для различных значений сдвига щели *s*. Очевидно, что резонансная частота системы и расстояние между пиками меняются. В этих условиях распределение поля волны очень чувствительно к изменениям параметров структуры. Это дает возможность контролировать значения резонансной длины волны и расстояния между пиками.

Мы исследовали также зависимость поля в резонаторе от диэлектрической проницаемости (рис.4а) и ширины резонатора (рис.4b). Как видно из рис.4a, значительное изменение рассеянной энергии волн может быть достигнуто за счет изменения диэлектрической постоянной на величину  $5 \times 10^{-4}$ . Того же результата можно достичь, изменяя ширину резонатора на 0.5 нм. Чувствительность к параметрам структуры позволяет использовать систему в различных приложениях: устройствах оптической бистабильности, модуляторах и оптических датчиках вибрации, перемещения и температуры.

Кроме того, из рис.4а и b, следует, что зависимости волнового поля внутри резонатора от диэлектрической проницаемости и от ширины резонатора имеют почти такой же характер, т. к. физическая основа одинакова для этих двух случаев. Действительно, изменение диэлектрической проницаемости вносит изменение в длину волны в резонаторе, и условие резонанса меняется. С другой стороны, когда мы фиксируем длину волны и варьируем ширину резонатора, резонансное условие также меняется. Оба эти сценария должны удовлетворять одному и тому же условию согласования фаз, поэтому подобные резонансные пики имеют аналогичную форму.



Рис.4. Зависимость абсолютного значения амплитуды  $E_x$  в резонаторе от (а) относительной проницаемости диэлектрической среды и (b) ширины d резонатора. Длина резонатора L = 20000 нм, ширина d = 316 нм, размер щели w = 100 нм, высота нижнего металла h = 70 нм, щелевой сдвиг от центра резонатора s = 0 нм и длина волны 1000 нм.

## 4. Заключение

Исследована возможность возбуждения одномодового волноводного резонатора с металлическими границами через субволновую щель, что создает благоприятные условия для увеличения добротности. В этих условиях фазовый сдвиг проходящего излучения существенно зависит от длины падающей волны, что позволяет увеличить коэффициент добротности резонатора до  $10^4$  в ближней ИК области спектра. Накопление волнового поля в резонаторе очень чувствительно к изменению параметров структуры. Показано, что рассеиваемую из структуры мощность можно эффективно контролировать изменением диэлектрической проницаемости среды, заполняющей резонатор. Например, изменяя диэлектрическую проницаемость на величину  $5 \times 10^{-4}$ , можно достичь изменения мощности более, чем в четыре раза. Тот же результат можно получить, изменив ширину резонатора на 0.5 нм. Исследуемые свойства предложенного резонатора открывают широкий диапазон возможных применений структуры от устройств оптической обработки информации до различных сенсоров.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. C.K. Law, H.J. Kimble. J. Mod. Opt., 44, 2067 (1997).
- 2. M.J. Hartmann, F.G.S.L. Brandão, M.B. Plenio. Nature Phys., 2, 849 (2006).
- 3. D.G. Angelakis, M.F. Santos, S. Bose. Phys. Rev. A, 76, 031805(R) (2007).
- 4. T. Pellizzari, S.A. Gardiner, J.I. Cirac, P. Zoller. Phys. Rev. Lett., 75, 3788 (1995).
- 5. D.F. Walls, G.J. Milburn. Quantum Optics. Springer-Verlag, New York, 1995.
- 6. L.-M. Duan, M.D. Lukin, J.I. Cirac, P. Zoller. Nature, 414, 413 (2001).
- 7. Y. Shen, G.P. Wang. Opt. Express, 16, 8421 (2008).
- 8. S.M. Spillane, T.J. Kippenberg, K.J. Vahala. Nature, 415, 621 (2002).
- 9. A.D. Greentree, C. Tahan, J.H. Cole, L.C.L. Hollenberg. Nature Phys., 2, 856 (2006).
- C.J. Hood, T.W. Lynn, A.C. Doherty, A.S. Parkins, H.J. Kimble. Science, 287, 1447 (2000).
- 11. P.W.H. Pinkse, T. Fischer, P. Maunz, G. Rempe. Nature, 404, 365 (2000).
- J.M. Gérard, B. Sermage, B. Gayral, B. Legrand, E. Costard, V. Thierry-Mieg. Phys. Rev. Lett., 81, 1110 (1998).
- X. Maître, E. Hagley, G. Nogues, C. Wunderlich, P. Goy, M. Brune, J.M. Raimond, S. Haroche. Phys. Rev. Lett., 79, 769 (1997).
- 14. K.J. Vahala. Nature, 424, 839 (2003).
- 15. D.W. Vernooy, V.S. Ilchenko, H. Mabuchi, E.W. Streed, H.J. Kimble. Opt. Lett., 23, 247 (1998).
- 16. D.K. Armani, T.J. Kippenberg, S.M. Spillane, K.J. Vahala. Nature, 421, 925 (2003).
- 17. V. Tekkozyan, A. Babajanyan, Kh. Nerkararyan. Optics Commun., 305, 190 (2013).
- 18. A. Vardanyan, H. Haroyan, A. Babajanyan, Kh. Nerkararyan, B. Friedman. Plasmonics, 7, 1 (2012).
- 19. J. Vuckovic, M. Loncar, H. Mabuchi, A. Scherer. Phys. Rev. E, 6501, 016608 (2002).
- K. Srinivasan, P. Barclay, O. Painter, J. Chen, C. Cho, C. Gmachl. Appl. Phys. Lett., 83, 1915 (2003).

- 21. **В.А. Теккозян.** Изв. НАН Армении, Физика, **48**, 323 (2013).
- 22. Т.А. Арутюнян, А.Ю. Варданян, А.А. Ахумян, Х.В. Неркарарян. Изв. НАН Армении, Физика, 47, 433 (2012).
- 23. Х.В. Неркарарян, С.Б. Овсепян. Изв. НАН Армении, Физика, 46, 165 (2011).
- 24. M. Sumetsky. Opt. Lett., 35, 2385 (2010).
- A. Vardanyan, H. Haroyan, A. Babajanyan, Kh. Nerkararyan, K. Lee, B. Friedman. J. Appl. Phys., 111, 053112 (2012).
- C.-L. Zou, Y.-F. Xiao, Zh.-F. Han, Ch.-H. Dong, X.-D. Chen, J.-M. Cui, G.-C. Guo, F.-W. Sun. J. Opt. Soc. Am. B, 27, 2495 (2010).
- 27. A. Pors, Kh.V. Nerkararyan, Kh. Sahakyan, S.I. Bozhevolnyi. Opt. Lett., 41, 242 (2016).
- 28. P.B. Johnson, R.W. Christy. Phys. Rev. B, 6, 4370 (1972).

#### ሆԵԾ ԲԱՐՈՐԱԿՈՒԹՅԱՄԲ ԱԼԻՔԱՏԱՐԱՅԻՆ ՌԵԶՈՆԱՏՈՐԻ ԳՐԳՌՈՒՄԸ ԵՆԹԱԱԼԻՔԱՅԻՆ ՃԵՂՔԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

#### Խ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ, Հ. ՀԱՐՈՅԱՆ, Խ. ՆԵՐԿԱՐԱՐՅԱՆ

Ուսումնասիրված է TM տիպի կանգուն ալիքների գրգռումը մետաղական պատերով միամոդ ռեզոնատորում բացված ենթաալիքային ձեղքի օգնությամբ։ Առաջարկված համակարգում ձեղքից ալիքային էներգիայի մուտքի գործակիցը խիստ կախված է ընկնող ալիքի երկարությունից։ Արդյունքում՝ համակարգի բարորակությունը, որը հաշվարկվում է վերջավոր տարրերի մեթոդով, հասնում է մինչև 10<sup>4</sup> մոտ ինֆրակարմիր գոտում։ ձեղքից ցրվող էներգիայի զգալի փոփոխության հնարավոր է հասնել փոփոխելով ռեզոնատորում դիէլեկտրիկ թափանցելիության արժեքն ընդհամենը 5×10<sup>-4</sup>–ով, կամ փոփոխելով ռեզոնատորրի հաստությունը 0.5 նմ–ով։ Համակարգի զգայուն կախվածությունը կառուցվածքային պարամետրերից հնարավորություն է ընձեռում համակարգը օգտագործել զանազան կիրառություններում, ինչպիսիք են՝ օպտիկական բիստաբիլությունը, օպտիկական մոդուլյատոր-

# WAVEGUIDE RESONATOR WITH HIGH QUALITY FACTOR EXCITED THROUGH THE SUBWAVELENGTH SLIT

#### KH. SAHAKYAN, H. HAROYAN, KH. NERKARARYAN

The excitation of standing TM wave by subwavelength slit in the single-mode waveguide resonator with metallic borders is considered. In the presented structure the entrance energy through the slit strongly depends on the incident wavelength. Consequently the *Q*-factor of the system calculated by using finite element method reaches up to values of  $10^4$  in the near infrared region. The significant change of the scattered wave energy is achieved by changing the dielectric constant value by  $5 \times 10^{-4}$  or the resonator thickness by 0.5 nm. The sensitivity of the system from the parameters of structure allows using the system in various applications such as devices of optical bistability, modulators, and optical sensors of vibration, displacement and temperature.