

Спецкурс “Оптические микрорезонаторы”.
Лекция 12. Изготовление оптических
микрорезонаторов. Кварцевые микросферы и
микроторы. Кристаллические
микрорезонаторы. Интегральные технологии.
Методы измерения добротности.

М.Л.Городецкий

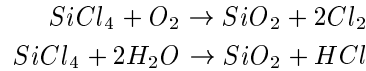
26 сентября 2007 г.

0.1 Плавленный кварц

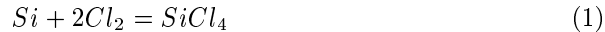
Кварц, химически являющийся диоксидом кремния (SiO_2) является одним из самых распространенных минералов на Земле, в земной коре на его долю приходится около 12%. Он входит в большинство горных пород, слагающих литосферу: граниты, гнейсы и т.д., является главным, а то и почти единственным компонентом песчаника, галечника, кварцита, песка, гравия и жильных пород. Кварц встречается в природе и в виде отдельных прозрачных кристаллов горного хрусталя, достигающих гигантских размеров, а также в виде других форм, широко используемых в качестве поделочных, полудрагоценных и драгоценных камней (агат, оникс, халцедон, опал, цитрин, аметист, сердолик, топаз) окраска которых обусловлена примесями. Кварц – кристалл, но при температуре выше 1700 градусов он плавится и при последующем быстром охлаждении превращается в изотропное кварцевое стекло. В природе такое стекло называется обсидианом. Плавленный кварц высокой чистоты обладает чрезвычайно низкими оптическими потерями в видимом и ближнем ИК диапазонах и именно кварц является главным материалом в оптических кабелях, опутавших земной шар. Мировое производство плавеного кварца составляет порядка 200000 тонн в год.

Для того чтобы получить плавленный кварц высокой частоты используется несколько методов. Примечательно, что в англоязычной литературе плавленный кварц обозначают двумя разными словами: “fused quartz” и “fused silica”. Fused quartz действительно согласно названию получают плавлением высокочистого кристаллического кварца, а синтетический “fused silica” получается искусственно либо осаждением окисленного газообразного кремния, либо чаще пиролизом или гидролизом в кислородно-водородном

пламени при температуре около 1800° тетрахлорида кремния $SiCl_4$ с последующим осаждением оксида на внутреннюю поверхность кварцевой трубы (внутренний процесс) либо на кварцевый стержень (внешний процесс) [?].



Тетрахлорид получают сжиганием кремния или его соединений в хлоре



Эта жидкость с душливым запахом кипит при 57.6° и может быть очень хорошо очищена многократной дистилляцией. Из тетрахлорида получают как высокочистый кремний для электроники, так и плавеный кварц для волноводов.

0.2 Изготовление сферических мини и микрорезонаторов различного размера.

Для изготовления сферических минирезонаторов используется высокочистый плавеный кварц, например, отечественный типа КУВИ или типа KS-4V производства США. В качестве заготовок удобнее всего брать небольшие цилиндры сечением до 10 мм^2 и длиной до 40мм с полированной поверхностью. Перед использованием нарушенный поверхностный слой образцов после предварительной стандартной очистки стравливался в плавиковой кислоте и промывались в дистиллированной воде.

Очищенные образцы для удобства дальнейших манипуляций приваривались к кварцевому стержню длиной до 30 сантиметров в пламени газовой или водородной горелки. При этом по характеру белого свечения образца можно было судить о чистоте образца. Опытным путем было установлено, что если на поверхности образца можно было видеть отдельные свяжющиеся точки, то из такого образца не удавалось в дальнейшем получить резонаторы с очень высокой добротностью. В этом случае образец подвергался повторному травлению.

Затем образец приваривался другим концом ко второму кварцевому стержню и растягивался в пламени горелки после нагрева посередине до толщины 0.1 до 1.0 миллиметра. После пережигания получающейся кварцевой нити и обламывания слишком длинных концов получались сразу две заготовки из которых и изготавливались в дальнейшем резонаторы.

Общий принцип изготовления резонатора из заготовки состоит в следующем. Самый кончик заготовки приваривается к кварцевой подложке, на которой планируется размещение резонатора, разогревается до белого свечения и растягивается до нужной толщины $\sim 10 \div 100$ мкм в зависимости от требуемого размера будущего резонатора и чуть выше в расплавленном состоянии обрывается. В результате на подложке оказывается прикрепленный короткий кварцевый ус ~ 1 мм с утолщением на конце. При разогревании

этого утолщения до температуры плавления, под действием сил поверхностного натяжения образуется сферический резонатор правильной формы на ножке. Можно отметить, что сходным способом пользовался Антони ван Левенгук, для получения из стекла стеклянных микросферических линз своих микроскопов.

Для изготовления резонаторов были последовательно опробованы несколько методов, что позволило постепенно увеличить достигаемое значение добротности с $\sim 10^8$ [1] до $\sim 10^{10}$ [2]. Самым первым был опробован метод изготовления микрорезонаторов с помощью CO_2 лазера (ИЛГН-704, 40Вт).

Несмотря на простоту и кажущуюся чистоту обработки, лазерный процесс изготовления диэлектрических микросфер обладает рядом недостатков. Главным из них является невозможность достижения однородного температурного поля на поверхности образца. Сфокусированный луч лазера прогревал нитевидную заготовку неравномерно, что приводило к отклонениям формы резонатора от сферической. Кроме того, неоднородность нагрева вызывает поверхностное испарение кварца и его осаждение на более холодные области. Испарение можно было отчетливо наблюдать по появлению слабого белого налета на поверхности подложек.

Оказалось, что резонаторы лучшего качества (с добротностью $\sim 10^9$) получаются при их изготовлении в пламени обыкновенной газовой горелки с соплом малого диаметра. Однако наилучшие результаты были получены пока с помощью водородно-кислородной микрогорелки [?].

Как было установлено опытным путем, наилучшие результаты получались при последующем отжиге в течении нескольких минут уже сформированного резонатора в области пламени с более низкой температурой.

0.3 Жидкости и аморфные материалы

Основным требованием к материалам высокодобротных резонаторов является низкий уровень потерь. Поскольку многие неорганически и органические жидкости весьма прозрачны в оптическом диапазоне, неудивительно, что высокодобротные моды типа шепчущей галереи часто наблюдались в экспериментах с каплями аэрозолей, которые представляют собой почти идеальные сферы или сфероиды, формируемые силами поверхностного натяжения. Микроскопические капли широко использовались для резонансной спектроскопии высокого разрешения (см. обзор [3]). Они также использовались для исследования флуоресценции и лазерной генерации в жидкостях, содержащих красители [4, 5, 6, 7]. Стимулированное рамановское рассеяние исследовалось в CS_2 [8], CCl_4 [9], воде [10], глицероле [11], и в каплях других жидкостей.

Применение жидких резонаторов с модами шепчущей галереи естественным образом ограничено, что объясняется сложностью манипуляции с ними, быстрым испарением и механической неустойчивостью поверхности.

0.4 Полимерные резонаторы

Другим примером аморфных резонаторов являются полимерные микросферы [12, 13, 14, 15, 16]. Хотя изготовление полимерных резонаторов, особенно в виде микросфер и несложно, до недавнего времени не удавалось получить достаточно высокодобротные микрорезонаторы. Это связано с тем, что в большинстве полимеров оптические потери являются существенными. Добротность полимерных резонаторов ограничивается рэлеевским рассеянием, поглощения вблизи края энергетической зоны, и мультифононным поглощением. Наилучших результатов на сегодняшний день удалось добиться при использовании полимера PDMS. Максимальная продемонстрированная добротность составила 2×10^6 на длине 980 нм [17]. Нельзя не отметить оригинальную технологию изготовления полимерных микротороидов, разработанную в этой работе. Полимерные резонаторы реплицировались с кварцевых, технология изготовления которых, разработанная в той же группе, описана выше. Кремниевая подложка с несколькими кварцевыми микротороидами сначала силанизировалась триметилсиланом для избежания прилипания, и заливалась тем же полимером PDMS, который является достаточно гибким силиконовым эластомером и позволяет извлечь из образовавшейся матрицы без ее повреждения кварцевые микротороиды. В образованную отожженную и специально обработанную для облегчения извлечения реплицированных резонаторов матрицу заливается затем требуемый для микротороидов полимер – тот же PDMS или Vicast (который дает несколько худшую добротность порядка 5×10^5 и после полимеризации благодаря упругости матрицы и отливки извлекается без повреждения).

0.5 Кристаллические микрорезонаторы

0.6 Кварцевые микроторы

(См. Powerpoint презентацию)

0.7 Измерение предельной оптической добротности микросфер

Самым простым способом измерения добротности микрорезонаторов является динамический способ, описанный в наших статьях [?, ?] который предусматривает непосредственное наблюдение резонансной кривой на экране осциллографа при линейной частотной модуляции измерительного генератора. В качестве измерительного генератора использовался гелий-неоновый лазер ЛГ-52-3, перестраиваемый в пределах доплеровской линии усиления газовой He-Ne смеси пьезотрансляцией одного из зеркал. Усиленный сигнал развертки осциллографа пилообразной формы поступал на пьезопакет, которым перемещалось переднее зеркало. Напряжение подаваемое на пакет регулировалось в пределах от 0 до 300 вольт, что позволяло менять в широких пределах масштаб смещения частоты вплоть до ее полной

остановки. Сфокусированный закрепленным на трехкоординатной подаче микрообъективом луч лазера попадал в призму, нагруженную резонатором. Переизлучение резонатора, регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя, а сигнал с ФЭУ, в свою очередь поступал на вход двухлучевого осциллографа. Такая схема позволяла наблюдать форму резонансной кривой на отбор. Для того, чтобы по форме резонансной кривой определить числовые значения добротности наблюдаемой моды, частотная шкала измерений калибровалась. Калибровка осуществлялась формированием серии частотных меток с помощью электрооптического или акустооптического модулятора. Для этого амплитудно модулированный луч вспомогательного гетеродинного лазера смешивался на полупрозрачном зеркале с измерительным лазером со свипируемой частотой, детектировался ФЭУ и отображался двухлучевым осциллографом синхронно с сигналом из резонатора. Частотные метки биений наблюдались при совпадении частоты перестраиваемого лазера с основной частотой гетеродина и боковыми компонентами отстроеными на частоту модуляции.

Добротность резонатора определялась по полуширине резонансной кривой, калиброванной с помощью частотных меток. Для расширения частотного интервала при наблюдении спектра сферических микрорезонаторов использовался нагрев резонатора сфокусированным излучением лампы накаливания. Изменение температуры резонатора приводило к пропорциональному сдвигу его резонансных частот. (В плавленом кварце основной причиной температурной зависимости резонансной частоты является изменение показателя преломления, поскольку коэффициент теплового расширения $\sim 2 \cdot 10^{-7} K^{-1}$ много меньше чем температурный коэффициент показателя преломления $1,5 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.) Таким образом удавалось наблюдать моды резонатора в диапазоне до 10 ГГц.

В отличие от резонатора типа Фабри-Перо, в котором связь с внешним лазерным лучом является фиксированной, связь с модами типа шепчущей галереи может быть плавно уменьшена до нуля увеличением зазора между призмой и резонатором. (Подробнее о теории оптической связи с микросферами будет рассказано далее). Для нахождения собственной добротности микросфер можно использовалось асимптотическое стремление добротности к собственной при уменьшении коэффициента связи при перемещении резонатора относительно поверхности возбуждающей призмы. Система прецизионной безгистерезисной подачи была собрана на основе кварцевого камертона, на который через стальную пружину воздействовал микрометрический винт. Таким образом контролируемое смещение резонатора, закрепленного на камертоне относительно призмы составляло около 10 нанометров.

Свежеприготовленный резонатор на подложке устанавливался под микроскопом на площадке камертона на расстоянии от 5 до 20 микрометров от плоскости призмы. Сфокусированный микрообъективом луч измерительного лазера вводился в призму необходимым образом, при этом из-за слабого рассеяния на поверхности призмы можно было непосредственно наблюдать точку отражения луча. С помощью микрометрического винта резонатор

приводился в соприкосновение с призмой и пятно от луча перемещением объектива подводилось к точке касания. При точной геометрической настройке положения центра пятна на белом экране, перекрывающим выходной луч наблюдалась характерная интерференционная картина аналогичная кольцам Ньютона. При удалении резонатора от призмы на величину ~ 0.1 мкм интерференционные полосы исчезали и оставалось лишь переизлучение мод резонатора и переотражение от призмы. После этого можно было начинать измерения.

Для измерения значений добротности $> 10^9$ использовался другой метод – определение времени затухания света в минирезонаторе. Для этого излучение перестраиваемого лазера, настроенного на одну из мод резонатора, резко (за время порядка нескольких десятков наносекунд) выключалось с помощью акустоптического затвора в момент возбуждения одной из мод резонатора. Затухающее излучение регистрировалось с помощью ФЭУ и сигнал подавался на осциллограф, развертка которого запускалась одновременно с прерыванием лазерного луча. Быстродействие модулятора и фотодетектора позволяли измерять с 10% погрешностью $Q \geq 3 \times 10^8$, ниже этого значения добротность легко измеряется с той же погрешностью по ширине резонансной кривой.

На Рис. ?? показана кривая затухания для рекордного значения добротности в микросфере диаметром 750 мкм, Измеренная примерно через 1 минуту после изготовления. Экспоненциальная аппроксимация дает значение $\tau = 2.7 \pm 0.1 \mu s$, которое вместе с инструментальными ошибками приводит к оценке $Q = (0.8 \pm 0.1) \times 10^{10}$. Эта величина Q близко приближается к максимальному пределу, определяемому фундаментальными потерями в материале, и она была воспроизведена по крайней мере в трех резонаторах от 600 мкм до 900 мкм, изготовленных за 50-60 с. до начала измерения и с разбросом, не превышающем 20%.

0.8 Динамический метод измерения добротности

Самым распространенным методом измерения добротности является простое измерение ширины резонансной кривой при перестройки частоты лазера, возбуждающего резонатор.

Упрощенные укороченные уравнения для возбуждения резонатора выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{a} + (\delta +igt)a &= i\frac{T}{\tau_0}b_{in} \\ b_{out} &= Rb_{in} + iTa, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь a – амплитуда поля в резонаторе, b_{in} и b_{out} – амплитуда входной и выходной волны, $\delta = \delta_0 + \delta_c$ – суммарный декремент затухания, складывающийся из собственных потерь и нагружения $\delta_c = \frac{T^2}{2\tau_0}$, а $g = \frac{d\omega}{dt}$ – скорость свипирования частоты, $\Delta\Omega = gt$. При $t = 0$ генератор проходит через резонанс. Если частота сканируется достаточно медленно, так что время

прохода частоты генератора через полосу резонатора много меньше времени звона $1/(2\delta)$: ($g/\delta \ll \delta$), производной медленно меняющейся амплитуды можно пренебречь и выходная мощность просто квазистационарно прорисовывает резонансную кривую:

$$|a|^2 = \frac{T^2}{\tau_0^2} \frac{1}{\delta^2 + \Delta\omega^2} |b_{in}|^2, \quad (3)$$

ширину которой можно измерит на уровне $1/2$ и тем самым определить добротность

$$Q = \frac{\omega}{\Delta\omega_{1/2}} = \frac{\omega}{2\delta}. \quad (4)$$

Если добротность резонатора становится очень высока, а время звона высокодобротных резонаторов может быть много больше микросекунд, то для того, чтобы таким образом прорисовать резонансную кривую приходится проводить сканирование очень медленно, чему мешают различного рода флуктуации и уходы частоты резонатора. С этим неудобством столкнулись ранее при исследовании свойств высокодобротных резонаторов в СВЧ диапазоне [?]. Однако существует метод, позволяющий ничего не меняя в схеме измерения определять добротность с высокой точностью при быстром свипировании.

Решением дифференциального уравнения является следующее выражение:

$$a(t) = i \frac{T}{\tau_0} \int_{-\infty}^t e^{ig(t'^2 - t^2)/2 + \delta(t' - t)} dt' = \frac{i^{3/2} \sqrt{\pi} T}{\sqrt{2g\tau_0}} e^{i\frac{\delta^2}{2g}} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{igt + \delta}{\sqrt{2g}i^{3/2}} \right) \right]. \quad (5)$$

Случай медленного прохождения через резонанс соответствует медленному прохождению через резонанс, при этом аргумент функции ошибок велик и раскладывая функцию ошибок при большом значении аргумента $1 - \operatorname{erf}(x) \simeq \frac{1}{\sqrt{\pi}x} e^{-x^2}$ мы приходим к тому же выражению. Если же полоса резонанса проходится быстро, $\Delta\omega = gt \gg \delta$, но время перестройки $t < 1/\delta$, аргумент мал $|x| \ll 1$ и $\operatorname{erf}(x) \simeq \frac{2}{\sqrt{\pi}}x$

$$\begin{aligned} a(t) &\simeq \frac{i^{3/2} \sqrt{\pi} T}{\sqrt{2g\tau_0}} e^{i\frac{\delta^2}{2g}} e^{-i\Delta\omega(t)t - \delta t} b_{in} \\ b_{out}(t) &\simeq \left[R + \sqrt{\frac{2i\pi}{g}} \delta_c e^{i\frac{\delta^2}{2g}} e^{-i\Delta\omega(t)t - \delta t} \right] b_{in} \\ |b_{out}(t)|^2 &\simeq R^2 + \frac{2\pi\delta_c^2}{g} e^{-2\delta t} + R \sqrt{\frac{\pi\delta_c^2}{2g}} e^{-\delta t} \cos(\Delta\omega(t)t - \frac{\delta^2}{2g} - \frac{\pi}{4}) \end{aligned} \quad (6)$$

Задание 12.1 *Исследуйте численно различные режимы измерения добротности при свипировании частоты и смоделируйте получающиеся осциллограммы.*

Список литературы

- [1] M. L. G. V. B. Braginsky and V. S. Ilchenko, Phys. Lett. A **137**, 393 (1989).
- [2] A. A. S. M. L. Gorodetsky and V. S. Ilchenko, Opt. Lett. **21**, 453 (1996).
- [3] R. M. S. R. Symes and J. P. Reid, Phys. Chem. Chem. Phys. **6**, 474 (2004).
- [4] M. B. L. H. M. Tzeng, K. F. Wall and R. K. Chang, Opt. Lett. **9**, 499 (1984).
- [5] M. B. L. J. F. O. R. K. C. H.-M. Tzeng, K. F. Wall and P. W. Barber, Aerosol Science and Technol. **2**, 193 (1983).
- [6] M. B. L. H.-M. Tzeng, K. F. Wall and R. K. Chang, Opt. Lett. **9**, 273 (1984).
- [7] H. M. T. S. X. Qian, J. B. Snow and R. K. Chang, Science **231**, 486 (1986).
- [8] H.-B. Lin and A. J. Campillo, Phys. Rev. Lett. **73**, 2440 (1994).
- [9] P. C. R. L. A. H. L. E. C. V. S. M. J. R. G. Pinnick, A. Biswas and G. Fernandez, Opt. Lett. **13**, 494 (1988).
- [10] R. M. S. R. J. Hopkins, R. Symes and J. P. Reid, Chem. Phys. Lett. **380**, 665 (2003).
- [11] H. L. A. Biswas, R. L. Armstrong, and R. G. Pinnick, Phys. Rev. A **40**, 7413 (1989).
- [12] A. D. H. E. K. M. L. S. R. E. S. M. Kuwata-Gonokami, R. H. Jordan and S. Ozawa, Opt. Lett. **20**, 2093 (1995).
- [13] M. Kuwata-Gonokami and K. Takeda, Opt. Materials **9**, 12 (1998).
- [14] C. Z. P. Rabiei, W. H. Steier and L. R. Dalton, J. Lightwave Technol. **20**, 1968 (2002).
- [15] Y. H. G. T. Paloczi and A. Yariv, Electron. Lett. **39**, 1650 (2003).
- [16] L. J. G. S. Ashkenazi, C.-Y. Chao and M. O'Donnell, Appl. Phys. Lett. **85**, 5418 (2004).
- [17] L. A.L.Martin, D.K.Armani and K.J.Vahala, **29**, 533 (2004).