

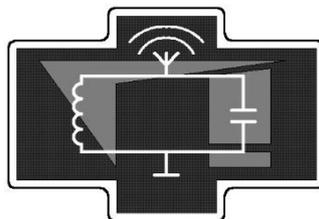
Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова  
Физический факультет

---

**О.В. Боровкова**

# **МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ**

Методическая разработка для спецкурса  
"Оптические явления в нелинейных средах и микрорезонаторах"  
кафедры физики колебаний



Москва, 2021 г.

УДК 535.015

Печатается по решению кафедры физики колебаний  
физического факультета МГУ

**О.В. Боровкова**

*Методы изготовления оптических микрорезонаторов.*

Методическая разработка для спецкурса "Оптические явления в нелинейных средах и микрорезонаторах" кафедры физики колебаний. – М., изд. физического факультета МГУ, 2021, 45 с.

Методическая разработка предназначена для студентов 4 курса кафедры физики колебаний отделения радиофизики физического факультета МГУ, слушающим курс «Оптические явления в нелинейных средах и микрорезонаторах», а также для студентов отделения радиофизики, интересующихся данной темой. Пособие знакомит студентов с существующими на данный момент методами изготовления оптических микрорезонаторов с гигантской добротностью, рассказывается о свойствах материалов, служащих для изготовления микрорезонаторов, обсуждаются достоинства и особенности разных методов и подходов.

Методическая разработка подготовлена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

# Введение

В настоящее время область оптических микрорезонаторов с гигантской добротностью переживает бурный расцвет. Широкие и разнообразные возможности, которые открывает использование микрорезонаторов для задач нелинейной оптики, создания сверхчувствительных измерительных приборов в биологии и химии, реализации модельных объектов в квантовой физике и др., привлекает ученых и исследователей со всего мира. Свет, попав в микрорезонатор, отражается от его стенок и распространяется внутри за счет эффекта типа шепчущей галереи, обходя внутреннюю поверхность резонатора множество раз. При многократных проходах свет интерферирует сам с собой. Моды, которые имеют весьма незначительную разность фаз при одном обороте вдоль поверхности резонатора, накапливают ее и после многочисленных обходов микрорезонатора гасятся за счет деструктивной интерференции. Поэтому микрорезонаторы с гигантской добротностью поддерживают лишь очень ограниченное число оптических состояний с чрезвычайно узкими резонансами в спектре.

Для того, чтобы свет мог многократно обходить вдоль внутренней поверхности микрорезонатора необходимо, чтобы материал, из которого изготовлен микрорезонатор, обладал очень низкими потерями на данной длине волны, а также, чтобы потери, связанные с неоднородностями, шероховатостями поверхности и проч., можно было бы минимизировать за счет полировки. Исходя из этих условий и подбираются материалы и методы изготовления микрорезонаторов.

В настоящее время, микрорезонаторы изготавливаются из самых разных материалов, в зависимости от задач и области применения конкретного микрорезонатора. Материалом может служить плавный кварц, различные кристаллические материалы, жидкости, разнообразные полимеры. Отдельно хочется отметить интегральные технологии изготовления микрорезонаторов, получившие бурное развитие в последние годы.

# 1. Плавленый кварц

Традиционным и самым первым материалом, из которого изготавливались микрорезонаторы, является плавленый кварц (диоксид кремния,  $\text{SiO}_2$ ).

Этот материал прозрачен в диапазоне длин волн примерно 0,2-2мкм. Этот диапазон захватывает видимую часть спектра, а также ближний ИК, включая телекоммуникационную частоту, 1,55мкм. При этом показатель преломления материала меняется незначительно в своей полосе прозрачности [1].

Для применений в области нелинейной оптики важную роль играет тот факт, что плавленый кварц имеет близкую к нулю величину дисперсии групповой скорости в ближнем ИК диапазоне. Точное равенство достигается при длине волны 1,273мкм. На этой длине волны набор мод, возбуждаемый в микрорезонаторе будет эквидистантным.

Плавленый кварц изготавливают при помощи плавления различных природных кремнеземов, то есть диоксидов кремния. К кремнеземам принадлежат такие минералы как песчаник, галечник, песок, гравий, жильные породы, кварцит и т.д. В кристаллическом виде кварц встречается в природе в виде горного хрусталя, агата, оникса, аметиста, сердолика, топаза и т.д. Эти драгоценные и полудрагоценные камни в основе своей состоят из одного и того же соединения, диоксида кремния, отличаясь лишь составом примесей, придающим им разные оттенки и свойства.

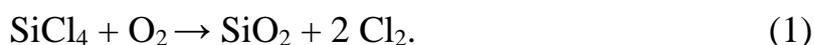
Естественно, для изготовления различных промышленных изделий и элементов высокотехнологичных устройств, в том числе, оптических микрорезонаторов с гигантской добротностью, используется плавленый кварц высокой степени чистоты. Для этого нужно либо качественно очищать природные материалы от разного рода примесей, либо синтезировать высокочистый кварц.

Плавленый кварц или кварцевое стекло – это аморфная модификация кварца, которая применяется в технике и научных исследованиях. Температура

плавления кварца около 1710-1730°C. При температуре выше (обычно вплоть до 1800°C) природный кварц плавится, становится вязким и при быстром охлаждении становится изотропным кварцевым стеклом (в англоязычной литературе его называют fused quartz).

Высокочистое кварцевое стекло можно получить также методом синтеза. В этом случае, полученный материал называют синтетическим кварцем (fused silica в англоязычной литературе). Он получается при помощи метода термического оксидирования из тетрахлорида кремния (SiCl<sub>4</sub>). Тетрахлорид кремния хорошо поддается очищению и поэтому его часто выбирают как исходный материал для получения чистого кварца для элементов электроники и других высокотехнологичных применений.

Различают так называемое сухое и влажное термическое оксидирование. При сухом термическом оксидировании хлорид кремния нагревается в атмосфере, содержащей кислород, с образованием кварца и газообразного хлора:



Напротив, при влажном процессе термического оксидирования хлорид кремния нагревается в присутствии водяного пара, с образованием синтетического кварца и хлороводорода:



Как исходный материал можно использовать также чистый кремний (Si) в процессах, аналогичных описанным в уравнениях (1-2).

Необходимо отметить, что для изготовления оптических микрорезонаторов с гигантской добротностью лучше не использовать синтетическое кварцевое стекло, изготовленное влажным методом. Это связано с тем, что кварц очень чувствителен к присутствию гидроксильных групп -ОН, которые приводят к появлению дополнительных пиков поглощения на длинах

волн 0,95мкм, 1,34мкм и 1,39мкм (см. рис. 1), а при изготовлении материала влажным методом, он будет богат такого рода гидроксильными группами, что приведет к ухудшению резонансных характеристик микрорезонатора.

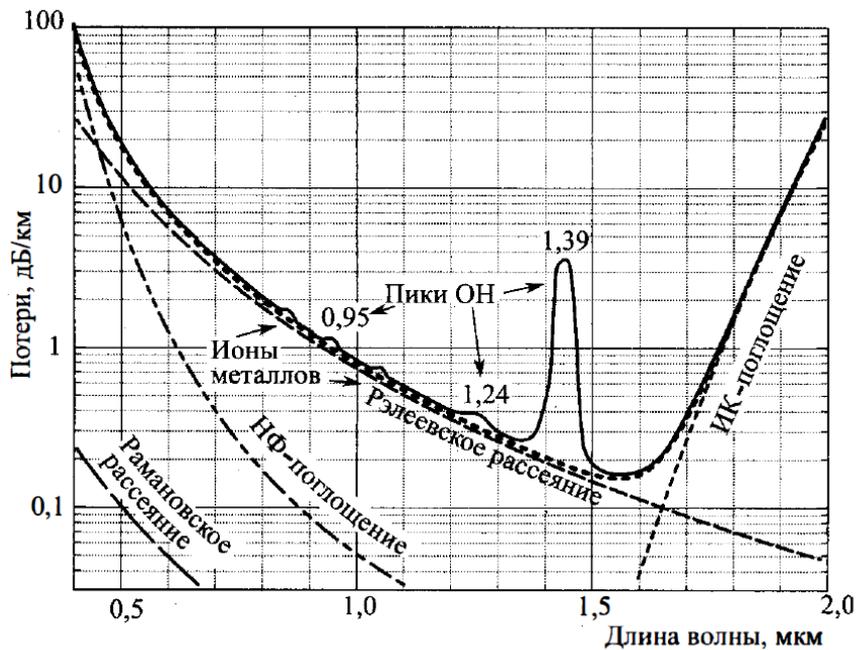


Рисунок 1. Спектр оптических потерь в плавленом кварце [2].

С другой стороны, сухой метод изготовления плавленого кварца требует значительно более длительного времени по сравнению с влажным методом.

Область прозрачности плавленого кварца занимает диапазон длин волн от 200 нм (область УФ) до 2 мкм (что соответствует области ближнего ИК диапазона). Это свойство обеспечило широкое применение плавленого кварца для технологий и научных исследований в области оптики и фотоники. Оптические элементы, материал для оптических волокон, подложки из кварцевого стекла и т.д.

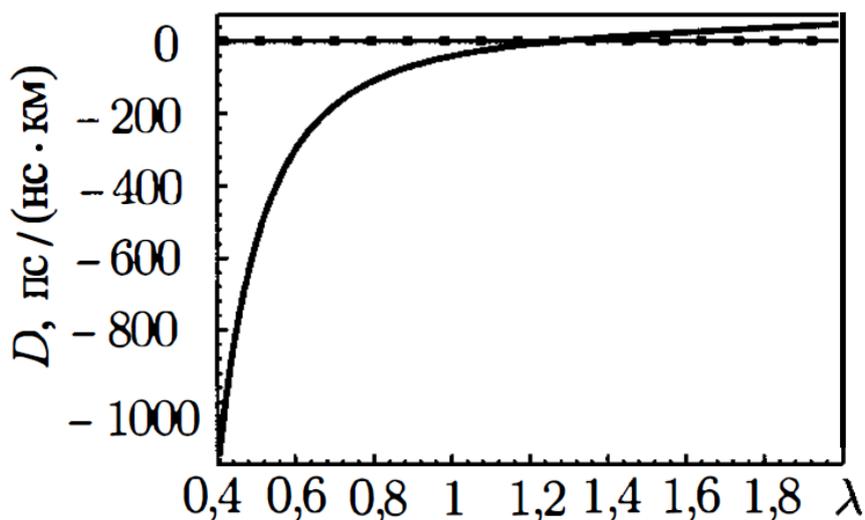


Рисунок 2. Спектр материальной дисперсии групповых скоростей в плавленом кварце [2].

Помимо широкого диапазона прозрачности плавленый кварц обладает близкой к нулю материальной дисперсией групповых скоростей,  $D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$ , вблизи телекоммуникационных частот (рис. 2). Нулевая дисперсия групповых скоростей достигается на длине волны примерно 1,273 мкм. Дисперсия групповых скоростей определяет отклонение спектра микрорезонатора от эквидистантного, которое ярко проявляется в нелинейных режимах. Напротив, при нулевой или близкой к нулю дисперсии групповых скоростей, спектр резонатора остается близким к эквидистантному даже в нелинейном случае.

## 2. Микросферы из плавленого кварца

Плавленый кварц плохо режется. Его можно сверлить, резать при помощи вращающихся дисков, но нельзя разрезать привычным нам всем способом. Поэтому для изготовления микрорезонаторов из плавленого кварца используются методы, основанные на нагреве и плавлении материала.

Очень подробно процесс изготовления микрорезонаторов и плавленого кварца описан в Главе 12 в работе [2], поэтому здесь мы только кратко изложим основные этапы методики.

Для изготовления микрорезонатора из плавленого кварца берутся цилиндры диаметром до  $10 \text{ мм}^2$  и длиной до 40 мм. Так как изготовленные заготовки хранятся и транспортируются без соблюдения условий высокой чистоты, то их поверхность необходимо сначала очистить от пыли, мельчайших частиц и т.д. Для этого цилиндрические заготовки сначала помещают в плавиковую кислоту и выдерживают около 1 минуты, а затем промывают в дистиллированной воде.

Для удобства дальнейшей работы концы цилиндра привариваются к двум вспомогательным кварцевым стержням длиной до 30 см при помощи газовой горелки с соплами малого диаметра. В качестве горючего вещества в горелках используются водород и кислород. Температура в верхней части пламени газовой горелки достигает  $1700^\circ\text{C}$ , что достаточно для плавления кварца. При этом по наличию или отсутствию на поверхности цилиндра из высокочистого кварца ярких светящихся точек, сгорающих частиц примесей, можно судить о качестве очистки в плавиковой кислоте и необходимости повторения процедуры. Затем в пламени той же горелки исходный цилиндр растягивают до толщины 0,1-1 мм в области перетяжки (см схему на рис. 3). И затем пережигают, оставляя короткий ус, длиной примерно 1 мм с утолщением на конце. Этот кварцевый ус затем приваривают к кварцевой подложке и снова растягивается и обрывается, отделяя вспомогательный кварцевый стержень. Таким образом, остается кварцевая подложка, к которой прикреплен кварцевый ус с утолщением на кончике. Это утолщение нагревается, формируется капля и под действием сил натяжения образуется микросфера очень высокого качества.

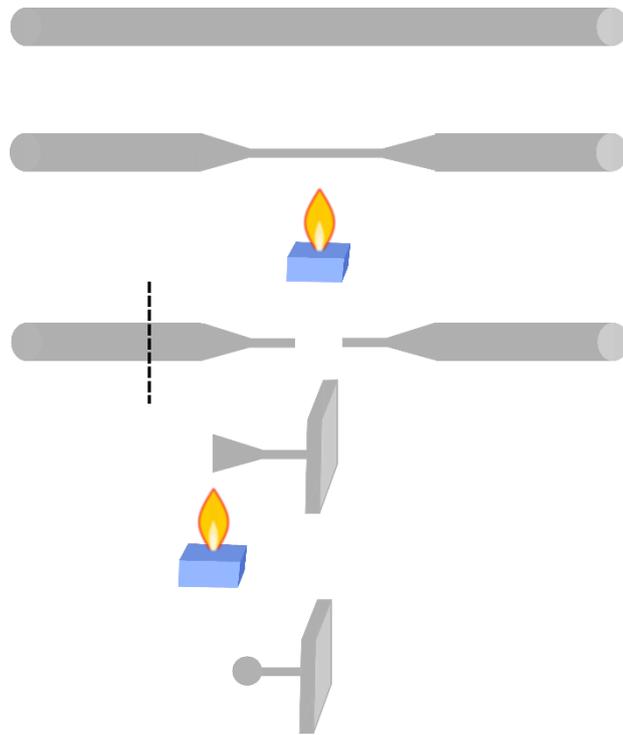


Рисунок 3. Схема процесса изготовления микрорезонатора из плавленного кварца.

Кроме того, можно встретить работы, где вспомогательный стержень не удаляют, а микросферу создают прямо на кварцевом усе (см. рис. 4) [3].

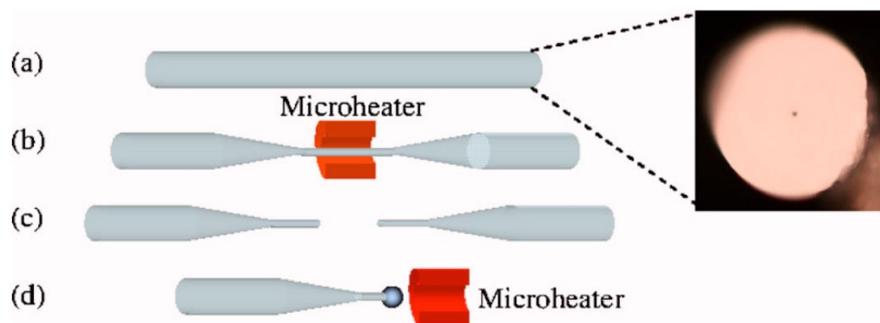


Рисунок 4. Схема процесса изготовления микрорезонатора без подложки [3].

Уже в ранних работах микросферы, изготовленные данным методом, демонстрировали гигантские добротности. Например, сразу после изготовления микрорезонатор в виде микросферы демонстрировал добротность  $8 \cdot 10^9$ , а уже

через 5 минут добротность снижалась до  $10^9$ . Связано это с тем, что изготовленный микрорезонатор находится в атмосфере, где присутствуют водяные пары, и гидроксильные группы, попадая на поверхность микрорезонатора, немного снижают его добротность.

Метод плавления при помощи газовой горелки позволяет изготавливать микрорезонаторы с очень высокими добротностями, но не позволяет изготавливать резонаторы с заранее заданными значениями рабочих частот мод микрорезонатора. Эти частоты зависят от радиуса микросферы, а он, в свою очередь, сильно зависит от скорости растягивания кварцевого цилиндра. При необходимости можно немного уменьшить размер получившейся микросферы, погрузив ее в слабый раствор плавиковой кислоты. Такая процедура не приводит к заметной деградации характеристик добротности образца, но при этом позволяет немного изменить резонансные характеристики микросферы. Правда, и в этом случае не удастся с высокой точностью и надежностью создавать микросферы с наперед заданными параметрами.

Описанный метод не пригоден для изготовления микрорезонаторов из кристаллических материалов, только для материалов с аморфной структурой, так как отжиг в пламени горелки нарушает структуру кристаллических материалов и меняет их оптические и диэлектрические свойства [4].

Помимо газовой горелки были попытки использовать непрерывный  $\text{CO}_2$ -лазер. Он прост в использовании, не приносит дополнительных примесей, но при этом имеет неоднородное температурное поле, что приводит к неравномерному прогреву образца и отклонениям формы резонатора от правильной сферической, а следовательно, и добротность полученных образцов будет ниже. Кроме того, из-за неравномерного прогрева происходит поверхностное испарение кварца и осаждение его на другой стороне образца, что еще больше снижает добротность готовой микросферы. Поэтому именно при изготовлении микросфер лучше всего использовать газовые горелки с соплами малого диаметра.

### **3. Веретенообразные микрорезонаторы из плавленного кварца и других материалов**

Использование для прогрева материала CO<sub>2</sub>-лазера вместо газовой горелки может быть целесообразно в тех случаях, когда необходимо изготовить микрорезонаторы формы, отличной от сферической [5-8]. Например, этот метод используется для изготовления так называемых веретенообразных микрорезонаторов (в англоязычной литературе используется термин *bottle microresonator*).

Веретенообразные микрорезонаторы представляют собой микроутолщения на оптических волокнах. Микрорезонаторы на основе микросфер имеют малую плотность частот мод и достаточно большие межмодовые расстояния, они не позволяют осуществлять плавную перестройку частот мод. Напротив, веретенообразные микрорезонаторы за счет плавного изменения их диаметра имеют большую плотность мод, чем микрорезонаторы на основе микросфер, и дают возможность плавно перестраивать частоту моды резонатора просто смещаясь вдоль оси веретена. Кроме того, веретенообразные микрорезонаторы имеют малый модовый объем, а также непосредственную связь с волокном. Если же в процессе работы можно слегка растягивать волокно, то силы натяжения также слегка меняют свойства микрорезонатора. Такое растяжение можно осуществлять при нагреве образца.

Впервые, веретенообразные микрорезонаторы с достаточно высоким уровнем добротности, а именно,  $3,6 \cdot 10^8$ , были показаны в работе [5].

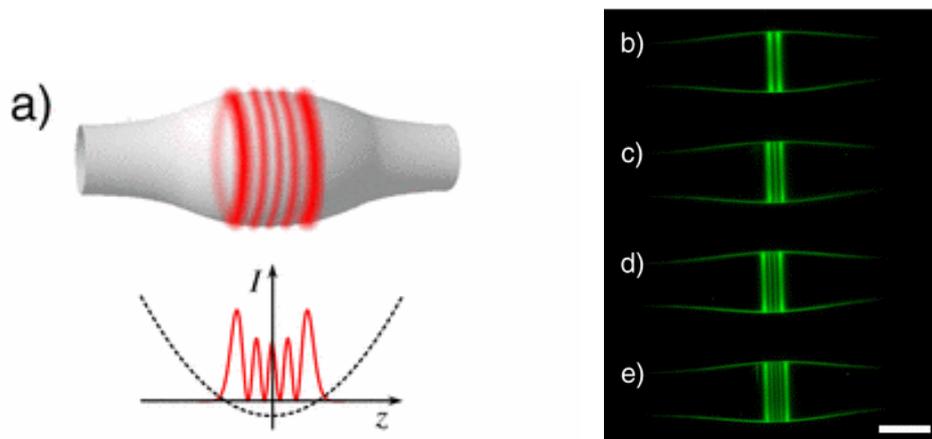


Рисунок 5. а) Концепция веретенообразного микрорезонатора. b-e) Изображения различных мод в веретенообразном микрорезонаторе, полученные при помощи флуоресцентного излучения ионов эрбия, которыми допирован микрорезонатор [5].

Для изготовления веретенообразных микрорезонаторов сперва производится нагрев небольшого участка (длиной несколько миллиметров) цилиндрической заготовки оптического волокна и его растяжение. Затем, на сужающейся перетяжке волокна, расположенной между двумя микроконусами, создается выпуклость. Каждый из микроконусов реализуется путем локального нагрева сужающейся перетяжки волокна сфокусированным лучом  $\text{CO}_2$ -лазера при небольшом растяжении ее. Образовавшаяся выпуклость формирует веретенообразный микрорезонатор с параболическим изменением диаметра волокна вокруг своей центральной зоны [5] (см. рис. 5 и 6d).

В более поздних работах было предложено получать веретенообразные резонаторы при помощи реверсивного механического движения, так называемым методом «размягчения и сжатия» [7]. Кусок волокна нагревается и одновременно сжимается (см. рис. 6b). Это сжатие размягченного диоксида кремния приводит к получению веретена, чьи параметры определяются параметрами сжатия и нагрева. Преимущество этого метода в простоте, так как он может быть реализован при помощи большинства имеющихся в продаже оптоволоконных сварочных аппаратов. Однако, получаемые микрорезонаторы демонстрируют добротности всего около  $10^7$ , кроме того, диаметр

изготавливаемого веретена не может быть меньше диаметра стандартных оптических волокон [8].

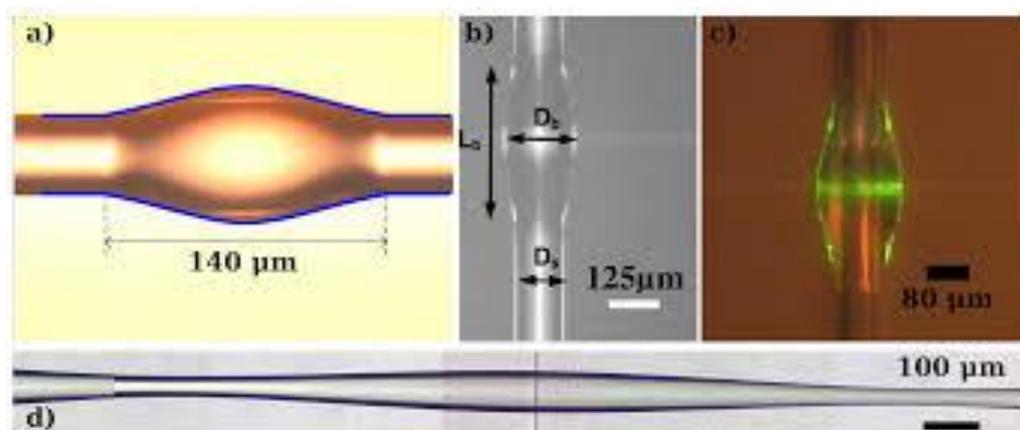


Рисунок 6. Микроскопические изображения веретенообразных микрорезонаторов, изготовленных различными методами. а) Микрорезонатор из эпоксидной смолы, обработанный УФ излучением [9]. б) Микрорезонатор, изготовленный методом «размягчения и сжатия» [7]. с) Микрорезонатор из халькогенидного стекла [10]. д) Веретенообразный резонатор, изготовленный при помощи нагрева и растяжения. Иллюстрация взята из работы [8].

Помимо диоксида кремния для изготовления веретенообразных микрорезонаторов применяют также эпоксидную смолу, затвердевающую под действием ультрафиолета (УФ) (см. рис. ба). С ее помощью можно создавать утолщения на оптическом волокне, которое благодаря силам, действующим на границе раздела сред, самоорганизуется в микроверетено [9]. Эти резонаторы имеют добротность около  $10^5$ , которая сильно зависит от резонансных длин волн и мощности излучения, используемой для их зондирования (из-за большого термооптический коэффициент у эпоксидной смолы) [8].

Оптические волокна изготавливаются не только из плавящего кварца, но и из других материалов, например, из халькогенидных стекол<sup>1</sup>. И на их основе

<sup>1</sup>Халькогенидные стекла – это бескислородные соединения серы, селена или теллура, обладающие прозрачностью в широком спектре электромагнитного излучения, от видимого до дальнего ИК, высоким показателем преломления, высокой светочувствительностью и высоким коэффициентом нелинейности. Халькогенидные стекла широко применяются в лазерах, фотонных интегральных схемах и в волоконной оптике.

также можно изготавливать веретенообразные микрорезонаторы. Например, в работе [10] был изготовлен веретенообразный микрорезонатор из диэлектрического цилиндра из сульфида мышьяка ( $As_2S_3$ ), в котором под действием фоторефракционного эффекта создается локальное изменение показателя преломления (см. рис. 6с).

Помимо сплошных веретенообразных микрорезонаторов можно изготавливать также и полые микрорезонаторы, используя описанные выше методики, но используя вместо сплошных оптических волокон диэлектрические капилляры. Подробнее об этом можно прочитать в обзоре [8].

## **4. Изготовление набора микрорезонаторов на одном стержне**

Дальнейшее совершенствование технологии обработки и изготовления микрорезонаторов при помощи  $CO_2$ -лазера позволило изготавливать несколько микрорезонаторов с разными диаметрами на одном стержне из плавленого кварца [11, 12]. Примеры таких структур показаны на рис. 7. На длине волны 10,6 мкм плавленый кварц обладает высоким поглощением так, что он плавится и испаряется от сфокусированного пучка  $CO_2$ -лазера с мощностью более 5Вт. При этом в импульсном режиме, с длительностью импульсов 5сек [11] или 3 сек [12] не происходит осаждение испаренного материала на другой стороне микростержня, как это происходит в непрерывном режиме работы лазера.

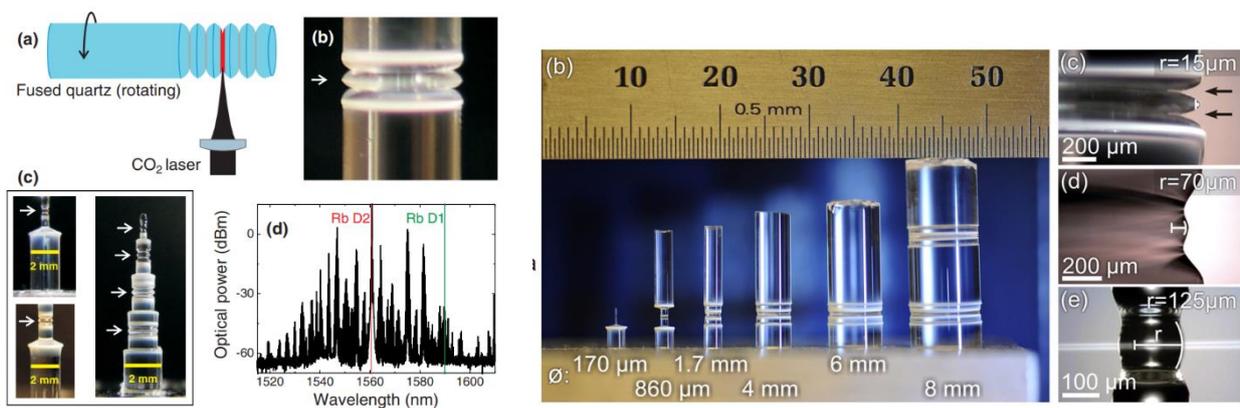


Рисунок 7. Изображения наборов микрорезонаторов с несколькими различными диаметрами, изготовленных на одном микростержне из плавленного кварца. Иллюстрации слева взяты из работы [11]. Иллюстрации справа – из работы [12].

Заготовки микростержней из плавленного кварца вращают при помощи шпинделя на шарикоподшипнике, а луч от CO<sub>2</sub>-лазера падает нормально поверхности микростержня, вырезая и полируя сфероидальные микрорезонаторы. Важно отметить, что представленная в работах [11, 12] методика изготовления микрорезонаторов механизирована и позволяет одновременно и вырезать, и полировать микрорезонаторы. Процесс изготовления занимает менее 1 минуты, при этом с вероятностью практически 100% получается микрорезонатор с добротностью порядка  $5 \cdot 10^8$ . Данная технология позволяет изготавливать резонаторы с заданным диаметром с точностью  $\pm 10 \mu\text{м}$ , что соответствует межмодовому расстоянию в 160 МГц в конечном сфероиде диаметром 2 мм.

Однако, описанная методика не позволяет изготавливать компактные одиночные микрорезонаторы, которые бы можно было помещать на чипы и использовать в планарных геометриях.

## 5. Изготовление микротороидов из плавленного кварца

Потребность в микрорезонаторах в виде тонких дисков или тороидов связана с желанием монтировать такие резонаторы на чипы и интегральные микросхемы. Однако, долгое время резонаторы на чипах демонстрировали слишком низкую добротность, которая была на несколько порядков ниже, чем добротности, стабильно получаемые в микросферах и микросфероидах.

Впервые микрорезонаторы с гигантской добротностью, изготовленные на кремниевой пластине, служащей заготовкой для создания интегральных схем, были продемонстрированы в научной группе под руководством К. Вахала [13]. На рис. 8 приведено изображение изготовленного кварцевого микродиска, собственная добротность которого составляла  $10^8$ .

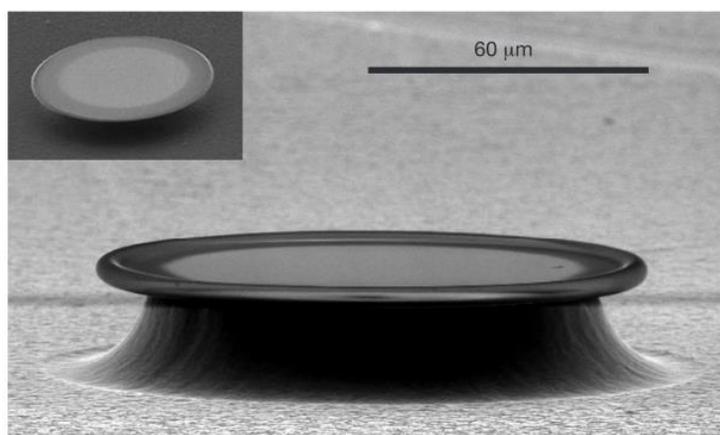


Рисунок 8. Изображение, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа, изготовленного микродиска из плавленного кварца после его обработки  $\text{CO}_2$  лазером. Вставка показывает микродиск до обработки лазерным излучением. Собственная добротность данного микродиска  $10^8$ .

Иллюстрация взята из работы [13].

Процесс изготовления подробно описан в работе [13]. Для изготовления была взята кремниевая пластина (заготовка для интегральных схем) с покрытием из диоксида кремния толщиной 2 мкм, нанесенным методом влажного термического оксидирования. Процесс изготовления состоял из четырех этапов: фотолитография, нанесение маски на слой двуокиси кремния, избирательное сухое травление кремния и селективное оплавление протравленного кварца. На рис. 9 приведена схема процесса изготовления.

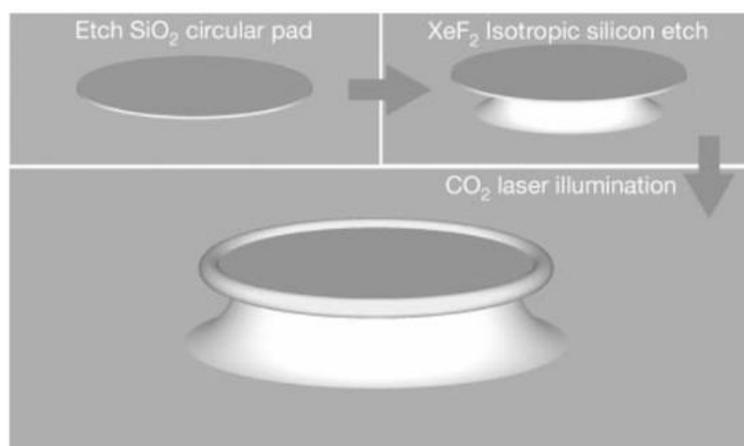


Рисунок 9. Процесс изготовления высокодобротных микрорезонаторов на полупроводниковой пластине для интегральных схем. Иллюстрация взята из работы [13].

При помощи фотолитографии на поверхности слоя плавленного кварца создавались области в форме диска, покрытые фоторезистом, диаметром 160 мкм. Диски из фоторезиста служили как бы маской в процессе обработки заготовки раствором плавиковой кислоты (hydrofluoric acid solution или HF solution) при комнатной температуре, которая удаляла плавленный кварц везде, где не было маски из фоторезиста. Оставшиеся диски SiO<sub>2</sub> затем подвергались обработке газом XeF<sub>2</sub> под давлением в 3 Торр. Выбор газа был обусловлен тем, что он позволяет равномерно удалить кремний, оставляя диски из плавленного кварца на более узких «столбиках» из кремния. Так как при возбуждении оптических мод типа МШГ свет концентрируется в периферийных областях

микродиска, необходимо удалить в этой области подложку из кремния, обладающую более высоким показателем преломления, чем диоксид кремния. В противном случае будут образовываться известные из волноводной оптики моды подложки, которые будут снижать собственную добротность микрорезонатора. На данном этапе, после удаления кремниевой подложки, добротности микродисков уже превышали  $10^5$  (на врезке рис. 8 показано изображение микродиска на данном этапе изготовления, полученное электронным сканирующим микроскопом). Однако, так как моды типа МШГ чувствительны к качеству поверхности микрорезонатора, необходимо провести финальную обработку поверхности микродиска, чтобы повысить его добротность.

Кварцевые микродиски обрабатывали при помощи излучения  $\text{CO}_2$ -лазера с длиной волны 10,6 мкм. На данной длине волны чистый кремний прозрачен и лазерное излучение проходит через него без потерь. В то же время диоксид кремния на данной длине волны уже не является прозрачным и испытывает значительное поглощение, что приводит к нагреву и подплавлению образца. Лазерное излучение мощностью  $100 \text{ МВт/м}^2$  фокусировалось в пучок диаметром около 200 мкм. В результате края кварцевого диска слегка оплавливались, образуя правильную тороидальную форму за счет сил поверхностного натяжения. Кроме того, сама поверхность микрорезонатора сглаживается также под действием сил поверхностного натяжения. При этом диаметр диска немного уменьшается, достигая в итоге размера 120 мкм в диаметре.

Оценка добротности изготовленного микрорезонатора проводилась на телекоммуникационных частотах (то есть вблизи 1500 нм) при помощи растянутого волокна с диаметром волокна в перетяжке порядка нескольких микрометров. Аккуратно перемещая волокно вблизи микрорезонатора достигался режим критической связи, когда вся мощность энергии из элемента связи передавалась в резонатор. Нерезонансные потери при этом составляли менее 5%.

Измерение добротности изготовленных микрорезонаторов производилось двумя способами. Во-первых, непосредственным снятием резонансной кривой

при помощи сканирующего одномодового лазера в режиме отсутствия связи. Измерения, проведенные для резонаторов в диапазоне значения радиуса тороида от 80 до 120 мкм, а также толщины тора от 5 до 10 мкм, показали значения добротности, превышающие  $10^8$ .

Вторым независимым и более точным методом измерения добротности был метод, основанный на измерении времени жизни фотонов по времени звона резонатора (cavity ring down). Сканирующий лазер работает в режиме той моды, для которой наблюдается режим критической связи. При помощи этой моды возбуждается мода в резонаторе и в тот же момент отключается лазер накачки. Так как мода возбуждается при помощи элемента связи, то получаемая добротность будет нагруженной. Измеренное время звона резонатора в режиме критической связи было равно 43 нс. Учтя присутствие нагрузки и межмодовое взаимодействие, для собственной добротности резонатора было получено значение  $1,25 \cdot 10^8$ .

Впоследствии подобная методика применялась и в других научных группах по всему миру для изготовления кварцевых микротороидов.

Таким образом, плавленный кварц позволяет изготавливать самые различные микрорезонаторы в виде микросфер и микросфероидов. Технологии изготовления из плавленного кварца используют как простую газовую горелку, так и механизированные технологии вытачивания при помощи мощного сфокусированного импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера. Последняя технология позволяет не только получать резонаторы с гигантской добротностью, но и контролировать геометрические параметры полученных образцов. Помимо этого, комбинируя методы фотолитографии и травления, можно создавать кварцевые микрорезонаторы на подложках из кремния.

## 6. Микрорезонаторы из кристаллических материалов

Методики обработки материалов, описанные в разделах 2-5 данного пособия, не пригодны для работы с разного рода кристаллическими материалами, многие из которых обладают выдающимися нелинейными свойствами, а также окнами прозрачности, отличными от полос пропускания плавленого кварца. Среди кристаллических материалов наиболее интересны и наиболее широко используются в настоящее время такие материалы как щелочноземельные фториды, а также электрооптические кристаллы.

Примерами щелочноземельных фторидов являются флюорит или фторид кальция,  $\text{CaF}_2$ , фторид бария ( $\text{BaF}_2$ ) и фторид магния ( $\text{MgF}_2$ ). Все они обладают более широким диапазоном прозрачности, чем плавленый кварц. На рис. 10 приведены зависимости полос прозрачности для трех упомянутых материалов.

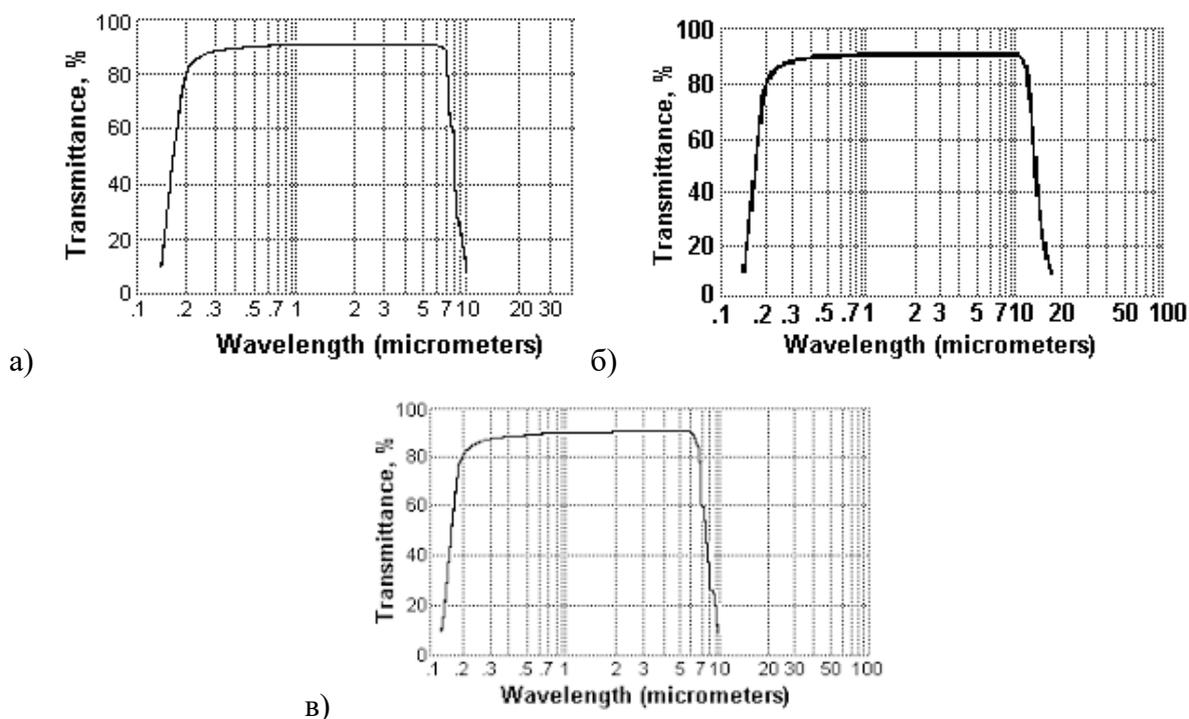
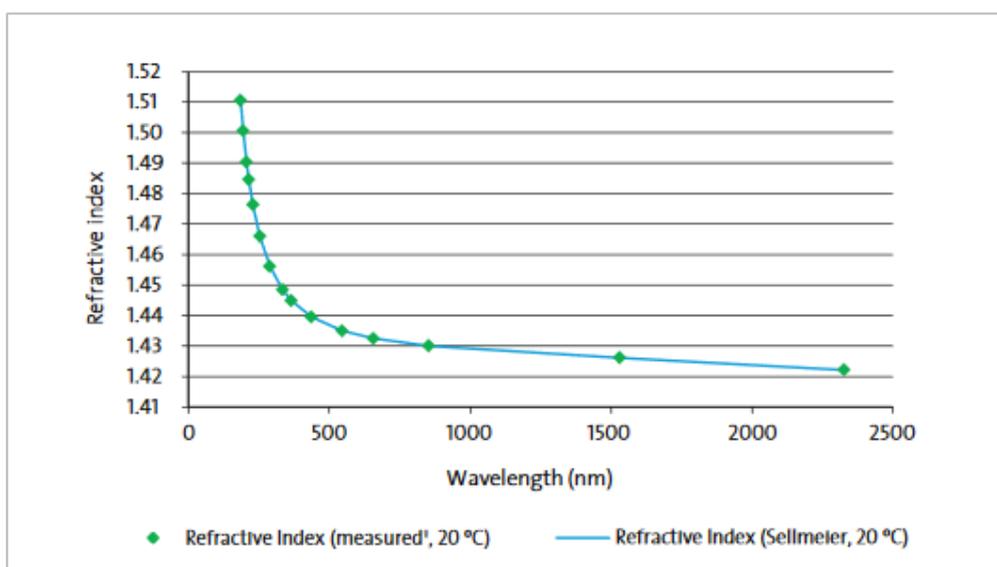


Рисунок 10. Области прозрачности а) флюорита, б) фторида бария и в) фторида магния.

Фторид кальция обладает достаточно малым показателем преломления (см. рис. 11), который в оптическом диапазоне длин волн оказывается ниже даже показателя преломления плавленого кварца. Это позволяет легко подбирать оптические элементы для элементов связи, например, призм. Фторид кальция отличается высокой оптической однородностью, поэтому монокристаллы флюорита широко используются для изготовления спектроскопических окон, призм, линз и т.д.



*CaF<sub>2</sub> Refractive index (20 °C in Nitrogen, 1013.25 hPa, 36% RH)*

Рисунок 11. Дисперсионная зависимость показателя преломления флюорита. Приведенные данные основаны на работе [15].

Из трех упомянутых выше материалов фторид бария обладает наиболее широкой полосой пропускания, ее правый край заходит глубоко в область среднего ИК диапазона, доходя вплоть до 10 мкм. Однако, он также является очень токсичным, что осложняет работу с ним. Еще одной особенностью фторида бария, о которой стоит упомянуть в данном контексте, является анизотропия его нелинейной оптической восприимчивости третьего порядка, то

есть  $\chi^{(3)}$ . Поэтому кристаллы фторида бария могут применяться для улучшения временного контраста сверхкоротких лазерных импульсов.

Фторид магния помимо широкой полосы прозрачности обладает высокой твердостью, устойчивостью к тепловым и механическим нагрузкам, а также малой терморепракцией, то есть влиянием нагрева, который неизбежен при возбуждении мод с чрезвычайно малым объемом, оказывает слабое влияние на оптические свойства микрорезонатора.

Кроме того, к кристаллическим материалам, применяемым в настоящее время для изготовления микрорезонаторов с гигантской добротностью, относятся и электрооптические кристаллы, такие как ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) и танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ ) и т.д. Кристаллы ниобата лития не имеют центра симметрии, они обладают высокой оптической нелинейностью и фотоупругостью. Благодаря сильным электрооптическим свойствам ниобат лития чрезвычайно широко применяется в оптических волноводах, оптических фильтрах, оптических модуляторах, переключателях и т.д.

Для изготовления микрорезонаторов из кристаллических материалов применяется методика, совмещающая вытачивание первоначальной формы на прецизионном станке алмазного точения (SPDT – Single Point Diamond Turning) и последующую асимптотическую абразивную полировку. Подробно и детально техника алмазного точения применительно к изготовлению микрорезонаторов описана в работах [4, 14, 16].

Для изготовления микрорезонаторов МШГ используются кристаллические пластины из выбранного кристаллического материала. На рис. 12 приведена схема обработки заготовки для изготовления микрорезонатора. Из большой пластины материала вырезаются заготовки прямоугольной формы нужного размера при помощи пилы с алмазным диском. Затем из прямоугольной заготовки вырезаются цилиндры, которые приклеиваются на держатель (пьедестал) из латуни. При приклеивании используется клей, который отвердевает при облучении УФ лампой. Например, это могут быть оптические клеи от Norland Products (например, NOA 60, 61, 63, 65, 68) [14]. Кроме клея

могут использоваться эпоксидная смола и этилцианакрилат, но они отвердеваю достаточно быстро и не позволяют долго центрировать кристаллическую заготовку. Точное центрирование заготовки на пьедестале очень важно, так как это определяет точность аксиальной симметрии изготовленного микрорезонатора. Указанные клеи размягчаются при нагреве до 300-400°C и позволяют отклеить готовый микрорезонатор от держателя. Важно отметить, что многие кристаллические материалы, служащие для изготовления микрорезонаторов, являются довольно хрупкими и требуют осторожного обращения при всех манипуляциях, в частности, при приклеивании.

## Manufacturing

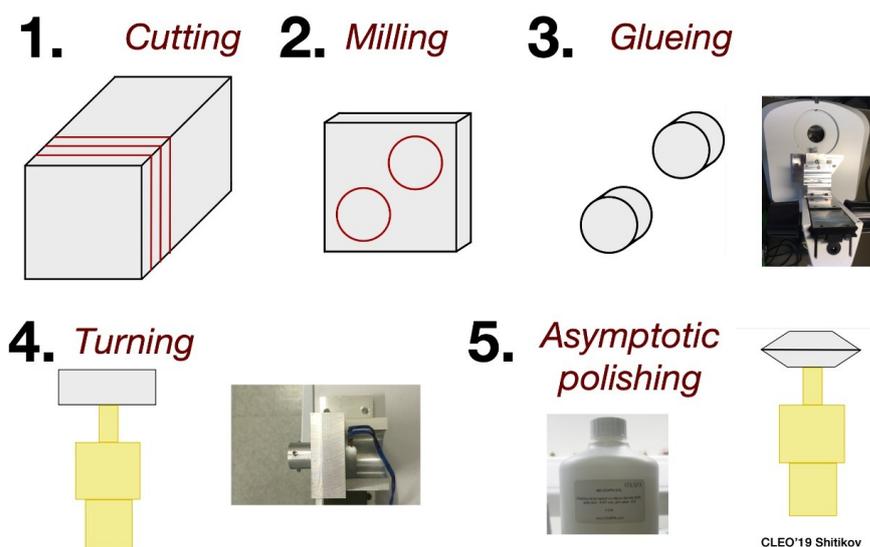


Рисунок 12. Схема обработки заготовки и изготовления микрорезонатора с МШГ из кристаллического материала. Иллюстрация любезно предоставлена А.Е. Шитиковым.

Держатель с центрированной и закрепленной заготовкой помещается на вращающийся шпиндель прецизионного станка для точения. Процесс точения на станке DAC ALM Lathe (см. рис. 13) автоматизирован. Программный код на языке DAC ALM позволяет задать профили боковой поверхности, например, угловая, сферическая, прямоугольный выступ, начальные параметры заготовки

и конечные желаемые параметры микрорезонатора. Вытачивание производится алмазными резцами. Резцы располагаются в держателе перпендикулярно оси вращения шпинделя со вставленным резонатором. Как правило, для точения необходимо как минимум два резца: грубый для черновой обработки и финальный чистовой. На качество изготавливаемых микрорезонаторов с МШГ влияют скорость вращения шпинделя, скорость движения резца и глубина захода резки при точении. В процессе точения и заготовка, и резец сильно прогреваются, поэтому на резец и резонатор необходимо распылять охлаждающую жидкость, которая сразу же отсасывается в воздухозаборник вместе со срезанными стружками материала заготовки. При этом жидкость не должна попадать внутрь шпинделя и других механических деталей станка, а также должна быстро улечиваться, не оставляя следов на кристалле. Без использования жидкости точить можно лишь на минимальной скорости и с минимальной глубиной захода, но при этом и качество выточенного резонатора получается хуже, и резцы изнашиваются быстрее.



Рисунок 13. Прецизионный станок алмазного точения DAC ALM Lathe. Иллюстрация взята из работы [14]. Более детальное описание станка и изображения его рабочей области можно найти в работе [4].

После точения производится очистка микрорезонатора от кристаллической стружки с помощью салфеток, смоченных в метаноле. На рис. 14 приведены фотографии микрорезонаторов после точения. Микрорезонаторы, выточенные только на станке алмазного точения с одной точкой (как на рис. 13), имеют добротность порядка  $10^5$ - $10^6$ . При использовании другого типа станка, с полировкой вдоль двух плоскостей, достигаются добротности порядка  $10^8$  за счет одного лишь вытачивания резцами.

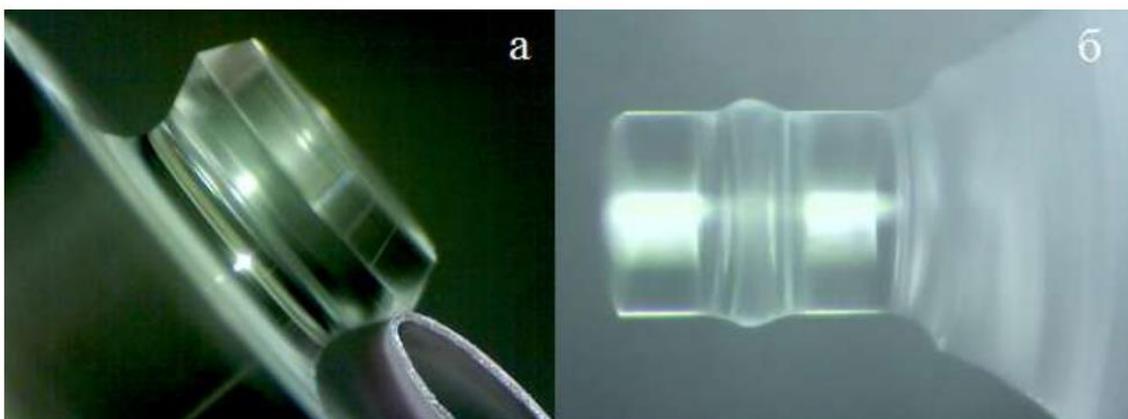


Рисунок 14. Микрорезонаторы, выточенные на прецизионном станке алмазного точения. Микрорезонаторы имеют а) треугольный и б) сферический выступ. Иллюстрация взята из работы [14].

Для улучшения качества выточенных микрорезонаторов применяется их последующая ручная полировка с помощью алмазных шкурок и алмазных суспензий с уменьшающимся размером зерен (от 5 мкм до 0,03 мкм). Алмазные шкурки менее плотно прилегают к поверхности резонатора, поэтому для более качественной полировки используют именно салфетки, пропитанные суспензией. Полировка каждым видом суспензии производится в течение 10-15 минут. Суспензии наносятся на безворсовые салфетки, которые слегка прижимаются к боковой поверхности микрорезонатора, как показано на рис. 15, и полируют ее, удаляя мелкие, микроскопические шероховатости. При полировке необходимо регулярно проводить очистку поверхности резонатора от остатков абразива, что представляет собой дополнительную трудность, так как необходимо исключить попадание пылинок или других микроскопических загрязнений на поверхность микрорезонатора. В случае, если при очистке на поверхность резонатора попадает пылинка, она может поцарапать поверхность резонатора. Если пылинка оказалась более крупной по размеру, чем используемая в настоящий момент суспензия, то для удаления получившейся царапины необходимо снова взять суспензию с более крупным зерном и повторить процесс полировки.

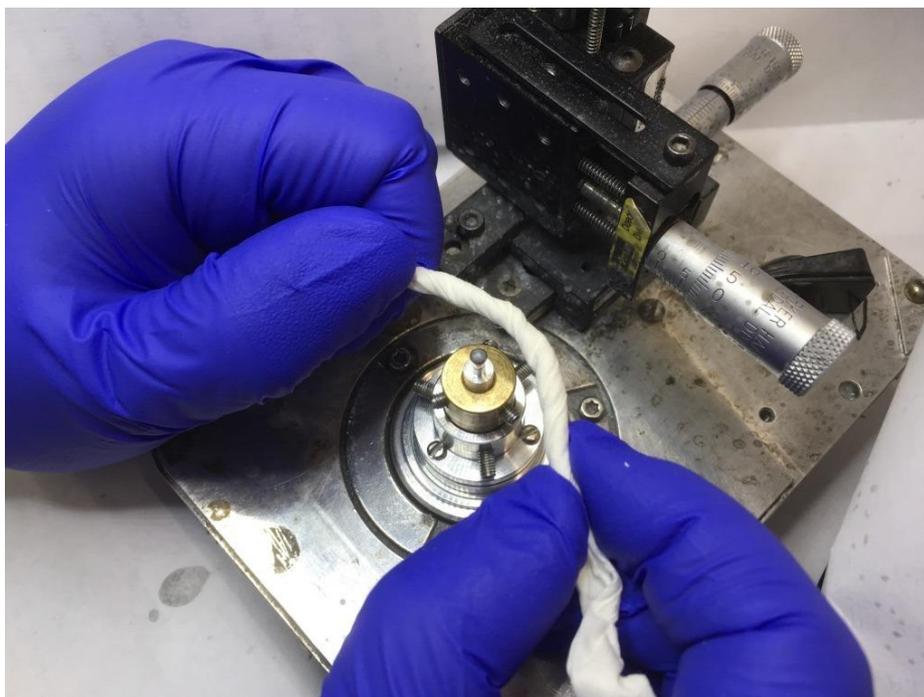


Рисунок 15. Ручная полировка микрорезонатора при помощи салфетки с мелкозернистой алмазной суспензией. Фотография любезно предоставлена А.Е. Шитиковым.

Помимо алмазных суспензий, в последнее время для полировки микрорезонаторов стали применяться также безуглеродные суспензии. Это связано с тем, что при полировке поверхности резонатора область контакта нагревается и материал микрорезонатора может вступать в реакцию с алмазом, образуя тончайшую карбидную пленку на поверхности [17]. Так происходит, например, с кремнием, на поверхности которого образуется тончайший слой карбида кремния. Пленка как правило обладает отличным от материала резонатора показателем преломления и это служит дополнительным источником потерь, снижая добротность резонатора.

Также нужно упомянуть, что длительная полировка может существенно изменить геометрические параметры изготовленного микрорезонатора, поэтому так важно проводить регулярный контроль не только качества поверхности, но и его оптических и резонансных свойств.

Для контроля качества полировки на первых этапах можно использовать оптический микроскоп, однако при дальнейшем улучшении качества

поверхности дефекты, чьи размеры меньше дифракционного предела, становятся не видны в обычный оптический микроскоп. В этом случае контроль качества полировки осуществляется при помощи последовательного измерения добротности мод после каждого этапа полировки. Более подробное описание процесса полировки и контроля качества микрорезонатора можно найти в работах [4, 14].

Описанная методика ручной полировки позволяет улучшить добротность выточенных кристаллических микрорезонаторов на три порядка и более. Для резонаторов из ниобата лития и танталана лития были достигнуты добротности порядка  $10^8$ , что сопоставимо с внутренними потерями в материалах, которые фундаментально ограничивают максимально возможную добротность для данного резонатора. Для микрорезонаторов из фторидов кальция, магния и бария была продемонстрирована добротность  $10^{10}$ .

Помимо метода ручной полировки применяется также методика обдува выточенных микрорезонаторов азотом, которая тоже позволяет улучшить качество поверхности [18].

После вытачивания и полировки поверхности для дальнейшего улучшения качества микрорезонатора можно произвести его отжиг в печи при температурах порядка  $650^{\circ}\text{C}$  в течение суток. При нагреве материала микроскопические дефекты внутри кристаллической решетки материала приходят в движение и выходят на поверхность микрорезонатора, где могут быть удалены при помощи полировки. Это дополнительно повышает качество изготовленного микрорезонатора.

## 7. Изготовление микрорезонаторов на интегральной плате

Для множества практических задач, которые решает современная физика, одними из ключевых требований являются компактность и совместимость с интегральными технологиями. Однако, все описанные выше методики изготовления микрорезонаторов не пригодны для того, чтобы создавать аксиально-симметричный резонатор непосредственно на поверхности кремниевой платы, а еще лучше внедренным в нее. Даже описанная в работе [13] методика позволяет создавать микрорезонаторы, приподнятые над поверхностью пластины на несколько десятков микрон так, чтобы вблизи пространственной области возбуждения оптических мод не было кремния, как материала с более высоким показателем преломления, вызывающим излучательные потери в подложку.

Однако, технологии интегральной волоконной оптики могут предложить решение этой задачи. Планарный резонатор, который можно было бы изготовить на интегральной плате, может представлять собой закольцованный интегральный волновод. Но для создания высокодобротных микрорезонаторов не подходят обычные технологии изготовления интегральных волноводов на чипе.

Необходимо сразу подчеркнуть, что, как и для объемных микрорезонаторов, так и для интегральных микрорезонаторов на чипе, нет одного оптимального материала для изготовления. Ниже будет рассмотрено три материала, нитрид кремния, плавный кварц и германат кремния, для которых удалось разработать технологические процессы изготовления микрорезонаторов с наибольшей добротностью.

Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$  или, для краткости, SiN) активно применяется как для изготовления волноводов, так и для резонаторов благодаря своему широкому диапазону прозрачности вблизи телекоммуникационных частот, большой

запрещенной зоне и выдающимся нелинейным свойствам. Например, в волноводах из нитрида кремния можно получать когерентное электромагнитное излучение со сверхшироким спектром (так называемый суперконтинуум) благодаря одновременному воздействию аномальной дисперсии групповых скоростей и высокой эффективной нелинейности. Кроме того, в интегральных микрорезонаторах в чипах можно достаточно точно управлять законом дисперсии и получить близкую к нулю аномальную дисперсию в достаточно широком диапазоне длин волн, а значит широкую гребенку [19].

Широко распространенная и обычно применяемая технология изготовления интегральных волноводов из нитрида кремния требует нанесения на кремниевую пластину тонкой пленки SiN при помощи плазменного химического осаждения из паровой фазы (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) и последующего отжига при температуре до 1200°C. Однако, изготовленные таким образом пленки SiN имеют слишком высокие значения внутреннего напряжения, что приводит к появлению мельчайших трещин. На этих трещинах происходит рассеяние света, что для высокочастотных микрорезонаторов неприемлемо, так как значительно снижает добротность.

В работе [20] был предложен технологический процесс изготовления пленок SiN в несколько этапов. В процессе химического осаждения из паровой фазы при низком давлении (low pressure chemical vapor deposition, LPCVD), температура циклически (temperature cycling) меняется, и между нанесениями материала пластина охлаждается до комнатной температуры. Это позволило существенно снизить внутренние напряжения в изготавливаемом материале и за счет этого уменьшить риск возникновения микротрещин. Кроме того, новая методика позволила изготовить пленки SiN с большей высотой, чем удавалось до этого времени, и добиться большей локализации поля внутри материала. Изготовленные по предложенной технологии кольцевые резонаторы из нитрида кремния продемонстрировали собственную добротность  $3 \cdot 10^6$ .

Однако, предложенная в работе [20] методика изготовления пленок приводила к тому, что у изготовленных образцов между слоями нитрида кремния

находились слои диоксида кремния нанометровой толщины. Эта особенность связана именно с использованием многоступенчатого процесса напыления нитрида кремния. Кроме того, технологии травления, разработанные для изготовления интегральных волноводов обычно оптимизированы для того, чтобы добиться более гладких боковых поверхностей волноводов (для уменьшения потерь на рассеяние), но часто недостаточно аккуратно переносят рисунок маски фоторезиста. Из-за этого, а также особенностей технологического процесса, изготовленные волноводы часто имеют отклонения в линейных размерах вплоть до сотни нанометров.

В 2016 году была разработана методика, получившая название фотонный дамасский процесс (photonic Damascene process) [21]. Он позволяет решить как проблему внутренних напряжений в материале, так и качества нанесения маски и травления.

Для изготовления чипа с микрорезонатором используется четырехслойная пластина, изготовленная следующим образом. На поверхность кремния последовательно нанесены слои диоксида кремния, аморфного кремния и снова диоксида кремния. Верхние два слоя служат для создания структурной маски для последующего травления, а третий слой – формой для изготовления волноводной структуры. Этапы изготовления микрорезонатора показаны на рис. 16.

На первом этапе при помощи электронно-лучевой литографии наносится маска для создания волноводов, как кольцевого резонатора, так и элементов связи (рис. 16а). При помощи сухого травления маска переносится в слой аморфного кремния (рис. 16b). Затем при помощи фотолитографии наносится маска в виде шахматной доски (с клетками  $5\text{мкм} \times 5\text{мкм}$ ) для снятия внутренних напряжений структуры. Эта маска также переносится в слой аморфного кремния, который выступает в качестве твердой маски.

При помощи метода сухого травления твердая маска переносится в слой  $\text{SiO}_2$ , расположенный ниже (рис. 16с). Интересно отметить, что данный слой диоксида кремния выращивался методом влажного термического

оксидирования. В данном случае это не уменьшает добротности резонаторов, так как диоксид кремния служит не материалом микрорезонатора, но внешней средой для него. В этом случае присутствие гидроксильных групп в плавленом кварце не оказывает серьезного влияния на потери и добротность резонатора.

Так как кремниевая маска травится в 10 раз медленнее, чем находящийся под ней диоксид кремния, то не возникает проблем ни с шероховатостями боковых поверхностей, ни с эрозией (разрушением) маски. После завершения травления остатки кремниевой маски удаляют.

Затем при помощи осаждения из паровой фазы при низком давлении на структуру наносится нитрид кремния. Благодаря тому, что предварительно была создана структура для снятия внутренних напряжений, нитрид кремния наносится за один раз сразу нужной толщины (рис. 16d). Избыток нитрида кремния затем удаляется при помощи химико-механической полировки (рис. 16е). Этот метод сочетает в себе абразивные и агрессивные химические суспензии для удаления неровностей и шероховатостей поверхности.

Затем применяется термический отжиг, чтобы добиться увеличения плотности пленки нитрида кремния за счет удаления из нее остатков водорода.

На финальном этапе наносится защитный слой низкотемпературного оксида (рис. 16f) и обрабатываются боковые поверхности чипа перед разделением пластины на отдельные чипы.

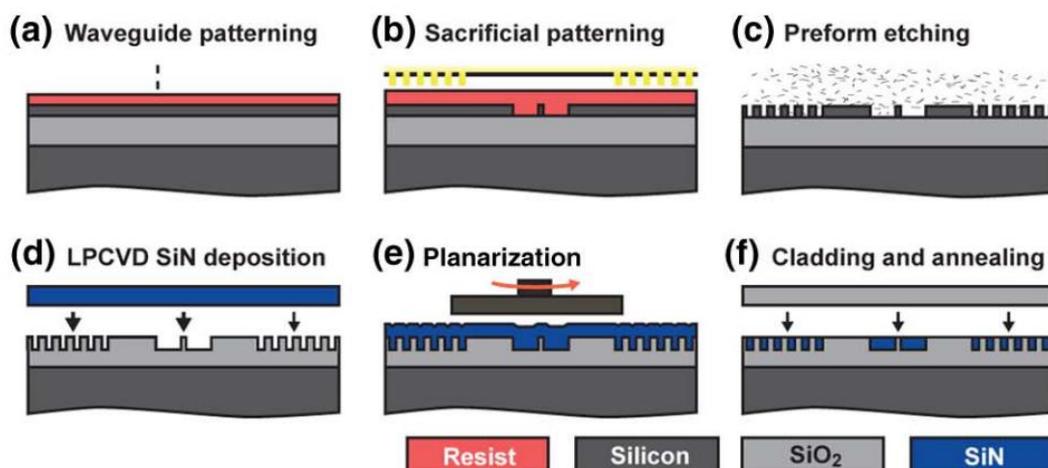


Рисунок 16. Схема изготовления интегрального микрорезонатора при помощи фотонного дамасского процесса. Иллюстрация взята из работы [21].

Полученные описанным методом волноводные каналы имеют ширину 1,5 мкм и высоту 0,85 мкм. Волноводы имеют практически вертикальные боковые стенки и плоскую поверхность сверху. Изображения изготовленной структуры, полученные при помощи фокусированного ионного пучка показывают, что нитрид кремния однородно заполняет форму и внутри него не наблюдается никаких границ и переходов.

Еще одним достоинством предложенного метода является то, что он позволяет располагать волноводные каналы в непосредственной близости друг от друга. Например, на расстоянии всего 200 нм.

Измерения показали, что микрорезонаторы, изготовленные описанным выше методом имели добротность  $3,7 \cdot 10^6$ . Такая добротность, конечно же, была существенно ниже, чем та, которую демонстрировали в то время объемные оптические резонаторы, как из плавленого кварца, так и из кристаллических материалов.

Описанная методика позволяет изготавливать не только одиночный микрорезонатор на чипе, но и набор микрорезонаторов с интегральными элементами связи для них. Например, как это было сделано в работе [22], где при помощи фотонного дамасского процесса была изготовлена структура из

микрорезонаторов диаметром около 600 мкм. Ширина кольца более 1,5 мкм, высота –  $750 \pm 20$  нм (см. рис. 17). Собственные добротности изготовленных микрорезонаторов из нитрида кремния были около  $10^7$  вблизи телекоммуникационных частот.

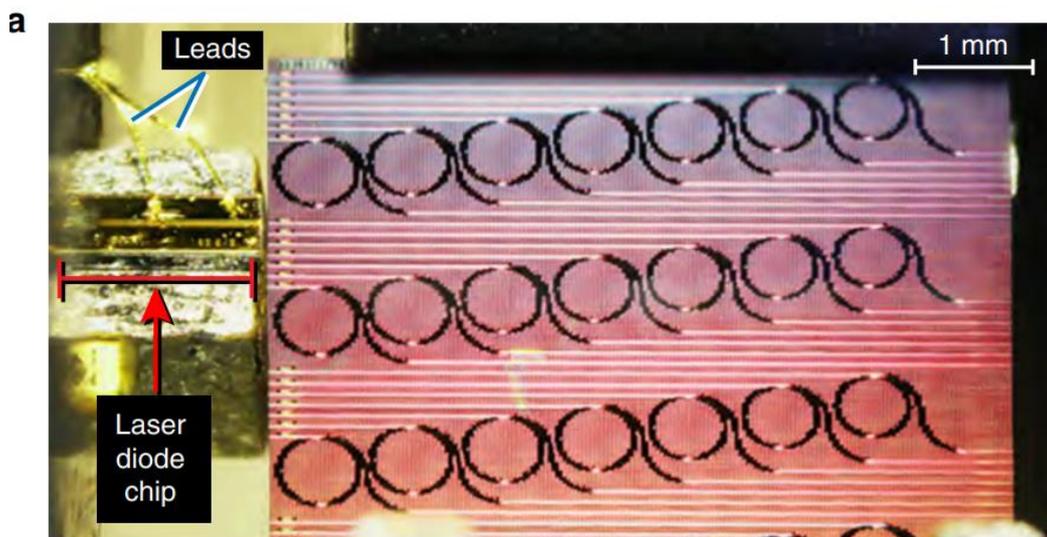


Рисунок 17. Структура из нескольких интегральных микрорезонаторов, изготовленных при помощи фотонного дамасского процесса. Иллюстрация взята из работы [22].

Долгое время добротность интегральных микрорезонаторов оставалась на 2-3 порядка ниже, чем добротность объемных микрорезонаторов. Но в 2020 году в работе [23] были продемонстрированы интегральные кольцевые микрорезонаторы из плавленного кварца разного диаметра и содержащие различные семейства мод, собственная добротность которых в области телекоммуникационных частот превышала  $10^9$ , а соответствующая нагруженная добротность была порядка  $0,6-0,8 \cdot 10^9$ . Такая величина добротности соответствует хорошим качественным объемным резонаторам как из плавленного кварца, так и из кристаллических материалов.

Микрорезонаторы изготавливались при помощи комбинации методики термического оксидирования высокочистых пластин кремния, оптической

литографии, влажного травления плавиковой кислотой и сухого травления фторидом ксенона. Интересной особенностью изготовленных в этой работе микрорезонаторов является то, что поперечное сечение резонаторов имеет форму клина. На рис. 18 эти клиновидные сечения можно видеть на панелях b и c.

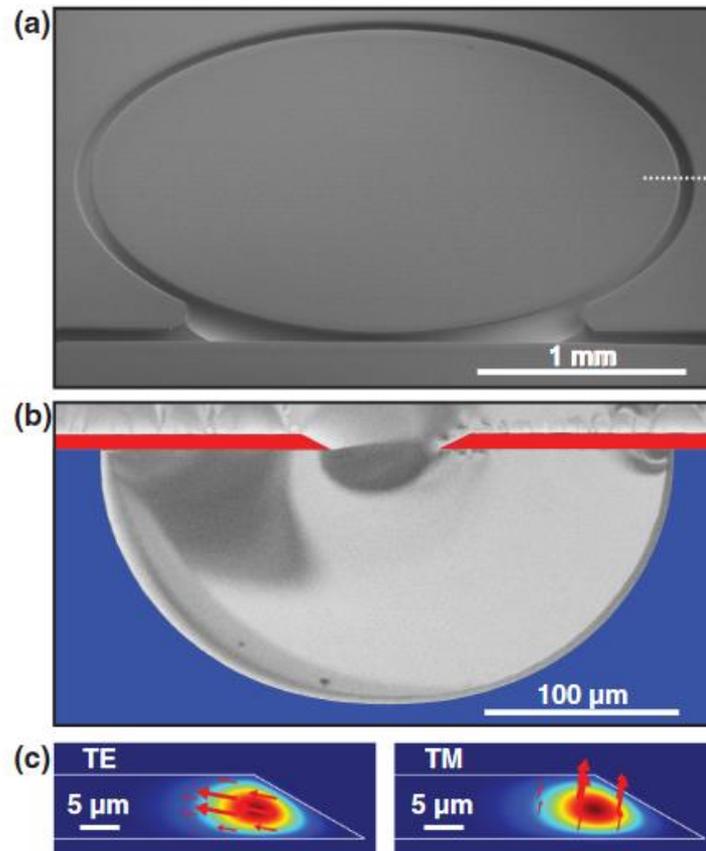


Рисунок 18. Изображение а) кварцевого интегрального кольцевого микрорезонатора и б) поперечного сечения микрорезонатора и части подложки с вытравленным участком, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа. в) Фундаментальные ТЕ (слева) и ТМ (справа) моды электрического поля, рассчитанные численно. Иллюстрация взята из работы [23].

Отметим несколько важных моментов, которые применялись в данной работе и помогли изготовить микрорезонаторы столь высокого качества. Во-

первых, как на этапе влажного, так и на этапе сухого травления осуществлялся строгий контроль температуры с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Температурный контроль позволяет более аккуратно и в большей степени удалить кремний, чтобы сократить оптические потери. Во-вторых, на финальном этапе изготовления кварцевые резонаторы 2-3 раза подвергались отжигу при температуре  $1000^\circ\text{C}$  в течение 20 часов в ультрачистой азотной атмосфере, чтобы удалить воду из структуры и снизить объемные напряжения в кварцевой структуре.

Добротность измерялась растянутым волокном как при помощи спектра резонансной кривой, так и методом измерения времени звона изготовленного резонатора. Чтобы уменьшить потери рассеяния на механических вибрациях растянутого волокна, элемент связи помещался поверх клиновидного края резонатора в непосредственном контакте с поверхностью. На рис. 19 приведены спектральные зависимости для собственной и нагруженной добротностей в диапазоне от 1530 нм до 1630 нм. Также анализ резонансных свойств изготовленных кольцевых микрорезонаторов показал, что с ростом диаметра резонатора возрастает и его добротность.

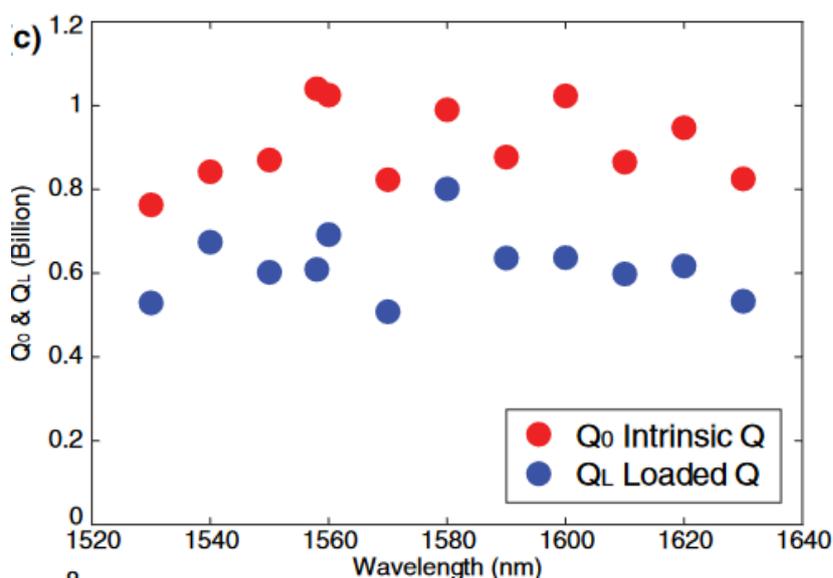


Рисунок 19. Спектральная зависимость собственной и нагруженной добротностей. Иллюстрация взята из работы [23].

Совсем недавно была предложена идея создания интегральных микрорезонаторов из закольцованных волноводов с сердцевиной из германата кремния ( $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ ) и оболочкой из кремния [24]. В таком устройстве микрорезонатор является полностью кристаллическим, без добавления аморфных материалов наподобие плавленого кварца. Волноводы из  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  известны своими как линейными, так и нелинейными свойствами. В работе [24] описана методика изготовления интегральных микрорезонаторов из  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$ , где монокристаллические материалы выращены эпитаксиальным методом (закономерное нарастание одного кристаллического материала на другом). Сердцевина закольцованного волновода изготовлена из  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ , а оболочкой служит монокристаллический кремний. Сечение такого резонатора показано на рис. 20. Ширина кольца из германата кремния – 3 мкм, высота – 500 нм. Авторы работы отмечают, что значение высоты слоя оптимизировано: при уменьшении высоты слоя, увеличиваются излучательные потери мод, а более толстый слой подвержен возникновению внутренних напряжений и дефектов в материале. Радиус резонатора – 4,8 мм.

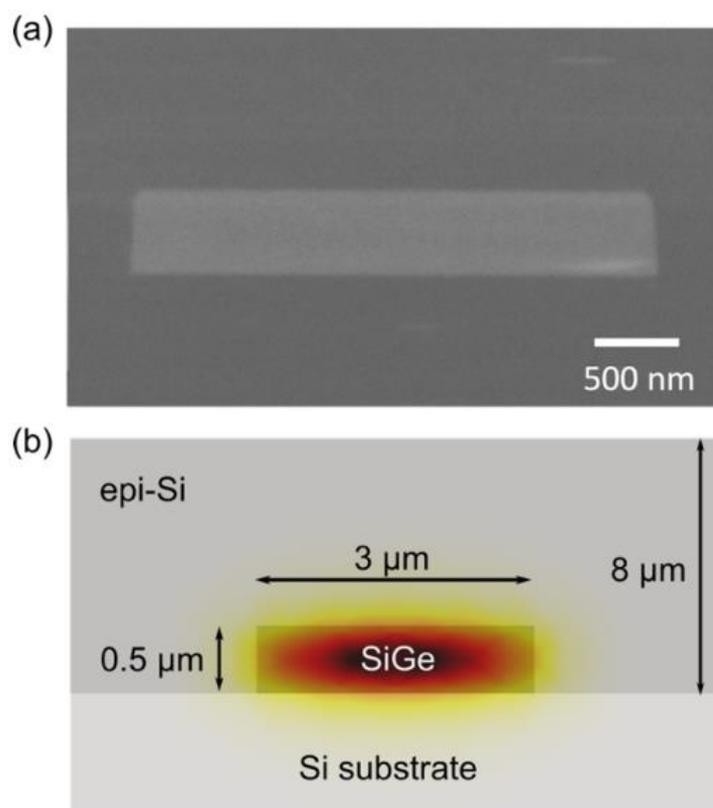


Рисунок 20. а) Изображение сердечника кремний-германиевого резонатора, окруженного кремниевой оболочкой, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. б) Соответствующие размеры волновода и оболочки с наложенным распределением электрического поля TE моды, рассчитанным численно. Иллюстрация взята из работы [24].

Оптические моды, возбуждаемые в таком комбинированном микрорезонаторе  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$ , проникают также в монокристаллический кремний (см. рис. 20b), за счет чего снижаются потери на поглощение. В то же самое время, из-за низкого контраста между показателями преломления сердцевинки и оболочки закольцованного волновода эффективно снижаются потери на рассеяние.

В широком спектральном диапазоне, от 1300 нм до 1650 нм, была измерена добротность для оптических мод TE и TM типа (рис. 21). Максимальное значение собственной добротности, а именно,  $(1,71 \pm 0,06) \cdot 10^8$ , было получено для TM моды на длине волны 1450 нм. Этому значению добротности соответствует уровень потерь  $0,39 \pm 0,02$  дБ/м. Интересно отметить, что хотя

величина добротность для ТЕ мод ниже, чем для ТМ, но своего максимального значения она достигает тоже вблизи длины волны 1450 нм.

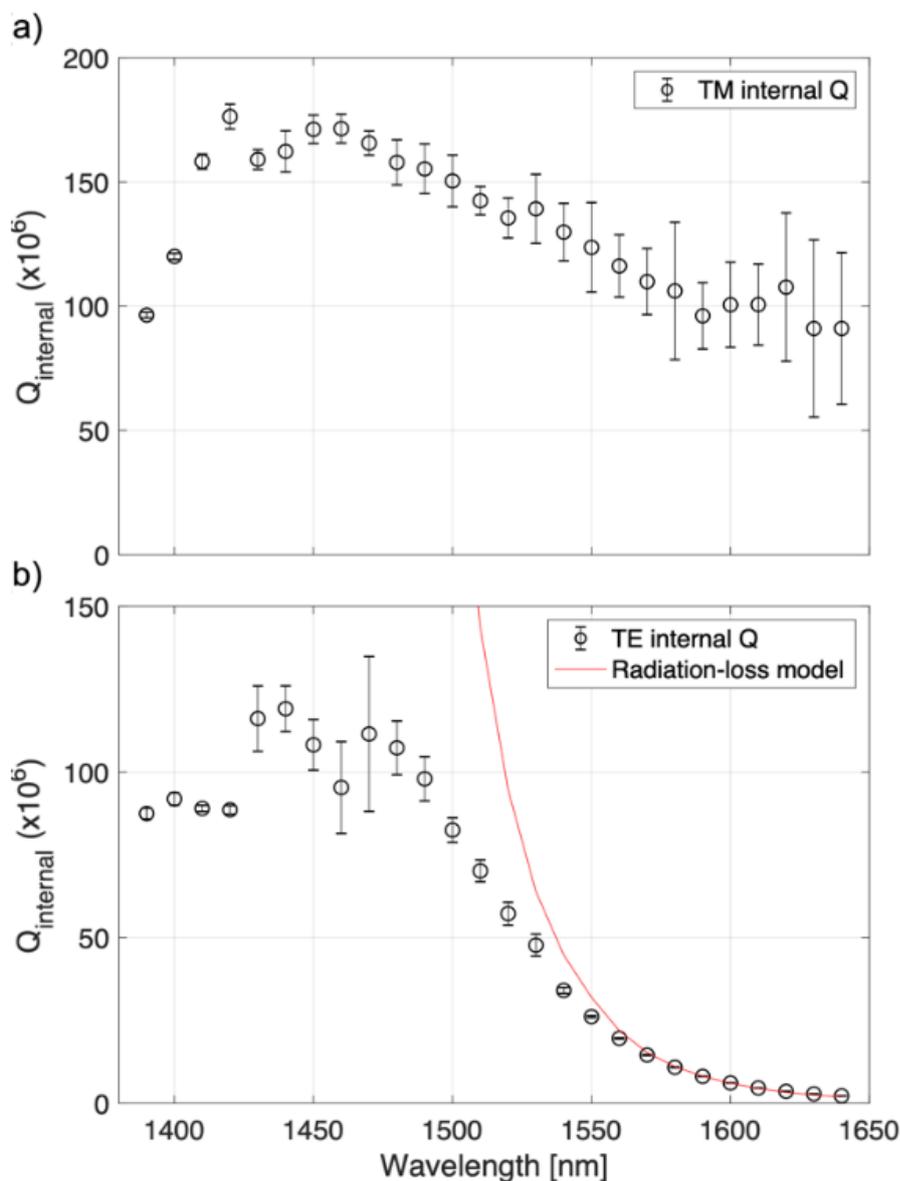


Рисунок 21. Сравнение спектров собственной добротности для а) ТМ и б) ТЕ мод одномодового резонатора. Данные основаны на результатах измерений. Иллюстрация взята из работы [24].

С уменьшением длины волны потери усиливаются за счет приближения к краю зоны поглощения. В то же время с ростом длины волны нарастают радиационные потери на изгибе волновода и, тем самым, ограничивают

добротность TE мод. При этом TM мода, для которой эффективный показатель преломления волновода выше, не имеет подобного ограничения сверху.

## 8. Заключение

В разделах 6 и 7 значительное внимание было уделено подробному описанию технологических процессов и методов, которые используются для изготовления того или иного типа микрорезонатора. Такое пристальное внимание связано с тем, что минимальные особенности технологического процесса могут оказать значительное или даже решающее влияние на успешное достижение требуемых гигантских добротностей изготовленных микрорезонаторов. При этом, зачастую в статьях технологические процессы и методы изготовления описываются недостаточно точно или вообще опускаются. На это, в частности, указывают в своей заметке, опубликованной в журнале Nature Nanotechnology, проф. Т. Киппенберг и М. Берейхи [25]. Они подчеркивают, что для читателей может быть интересно указание не только тех методов и материалов, которые дали положительный или наилучший результат, но и тех, которые не подошли. Дело в том, что на проверку и подбор материалов, температурных условий, времени отжига и травления тратятся время и силы ученых в различных группах, а также финансовые ресурсы. Знание о том, что данная методика или данные параметры были проверена какой-либо группой с неудачным результатом вряд ли послужит материалом для статьи, но может быть ценна для других научных групп. В связи с этим, проф. Т. Киппенберг предлагает обмен научной информацией в рамках созданной им и его научной группой базы данных NanoFab (<http://nanofab-net.org>), своеобразного архива научных знаний и идеи в области микро- и нанотехнологий. Статьи публикуются на принципах открытых знаний и объединяют результаты ученых из различных лабораторий.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1.Плавленный кварц .....	4
2.Микросферы из плавленого кварца .....	7
3.Веретенообразные микрорезонаторы из плавленого кварца и других материалов .....	11
4.Изготовление набора микрорезонаторов на одном стержне .....	14
5.Изготовление микротороидов из плавленого кварца .....	16
6.Микрорезонаторы из кристаллических материалов .....	20
7.Изготовление микрорезонаторов на интегральной плате .....	29
8.Заключение.....	41
Оглавление .....	42
Список литературы.....	43

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. H. Malitson. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica, *J. Opt. Soc. Am.* 55, 1205-1208 (1965).
2. М.Л. Городецкий. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. Москва, Физматлит, 2011.
3. P. Wang, G.S. Murugan, T. Lee, X. Feng, Y. Semenova, Q. Wu, W. Loh, G. Brambilla, G.S. Wilkinson, and G. Farrell. Lead silicate glass microsphere resonators with absorption-limited Q, *Appl. Phys. Lett.* 98, 181105 (2011).
4. К.Н. Миньков, Г.В. Лихачев и др., Изготовление высокодобротных кристаллических микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи с использованием точечного алмазного точения, *Оптический журнал*, Т. 88 (6), стр. 84-92 (2021).
5. M. Pöllinger, D. O'Shea, F. Warken, and A. Rauschenbeutel. Ultrahigh-Q Tunable Whispering-Gallery-Mode Microresonator, *Phys. Rev. Lett.* 103(5), 053901 (2009).
6. J.M. Ward, D.G. O'Shea, B.J. Shortt, M.J. Morrissey, K. Deasy, S.G. Nic Chormaic, Heat-and-pull rig for fiber taper fabrication. *Rev. Sci. Instrum.* 77, 083105 (2006).
7. G.S. Murugan, J.S. Wilkinson, M.N. Zervas, Selective excitation of whispering gallery modes in a novel bottle microresonator. *Opt. Express* 17, 11916–11925 (2009).
8. P. Bianucci, Optical Microbottle Resonators for Sensing, *Sensors* 16, 1841 (2016).
9. G. Gu, C. Guo, Z. Cai, H. Xu, L. Chen, H. Fu, K. Che, M. Hong, S. Sun, F. Li, Fabrication of ultraviolet-curable adhesive bottle-like microresonators by wetting and photocuring. *Appl. Opt.* 53, 7819–7824 (2014).
10. F. Luan, E. Magi, T. Gong, I. Kabakova, B.J. Eggleton, B.J. Photoinduced

- whispering gallery mode microcavity resonator in a chalcogenide microfiber. *Opt. Lett.* 36, 4761–4763 (2011).
11. S.B. Papp, P. Del’Haye, S.A. Diddams, Mechanical control of a microrod-resonator optical frequency comb. *Phys. Rev. X* 3, 031003 (2013).
  12. P. Del’Haye, S.A. Diddams, S.B. Papp, Laser-machined ultra-high-Q microrod resonators for nonlinear optics. *Appl. Phys. Lett.* 102, 221119 (2013).
  13. D.K. Armani, T.J. Kippenberg, S.M. Spillane, K.J. Vahala, Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip. *Nature* 421, 925 (2003).
  14. Н.Г. Павлов, Радиофотонные устройства на базе оптических микрорезонаторов: дис. ... канд. ф.-м. наук. ФИАН РАН, Москва, 2018.
  15. I.H. Malitson, A Redetermination of Some Optical Properties of Calcium Fluoride. *Applied Optics* 2, 1103 (1963).
  16. A.A. Savchenko, A.B. Matsko, V.S. Ilchenko, L. Maleki, Optical resonators with ten million finesse. *Opt. Express* 15, 6768 (2007).
  17. S. Goel, A. Agrawal, R.L. Reuben, Diamond machining of silicon: a review of advances in molecular dynamics simulation. *Int. J. Mach. Manuf.* 88, 131 (2015).
  18. Shun Fujii, Yuka Hayama, Kosuke Imamura, Hajime Kumazaki, Yasuhiro Kakinuma, and Takasumi Tanabe, All-precision-machining fabrication of ultrahigh-Q crystalline optical microresonators. *Optica* 7, 694 (2020).
  19. K. Saha, Y. Okawachi, B. Shim, J.S. Levy, R. Salem, A.R. Jonson, M.A. Foster, M.R.E. Lamont, M. Lipson, and A.L. Gaeta, Mode-locking and femtosecond pulse generation in chip-based frequency combs. *Opt. Express* 21, 1335 (2013).
  20. A. Gondarenko, J.S. Levy, M. Lipson, High confinement micron-scale silicon nitride high Q ring resonator. *Opt. Express* 17, 11366 (2009).
  21. M.H.P. Pfeiffer, A. Kordts, V. Brasch, M. Zervas, M. Gieselmann, J.D. Jost, T.J. Kippenberg, Photonic Damascene process for integrated high-Q microresonator

- based nonlinear photonics. *Optica* 3, 20 (2016).
22. A.S. Raja, A.S. Voloshin, H. Guo, S.E. Agafonova, J. Liu, A.S. Gorodnitskiy, M. Karpov, N.G. Pavlov, E. Lucas, R.R. Galiev, A.E. Shitikov, J.D. Jost, M.L. Gorodetsky, T.J. Kippenberg, Electrically pumped photonic integrated soliton microcomb. *Nature Communications* 10, 680 (2019).
23. L. Wu, H. Wang, Q. Yang, Q.-X. Ji, B. Shen, C. Bao, M. Gao, K. Vahala, Greater than one billion Q factor for on-chip microresonators. *Opt. Letters* 45, 5129 (2020).
24. R. Schilling, C. Xiong, S. Kamalapurkar, A. Falk, N. Marchack, S. Bedell, R. Haight, C. Scerbo, H. Paik, J.S. Orcutt, Ultrahigh-Q on-chip silicon-germanium microresonators. arXiv:2111.10292 (2021).
25. M.J. Beryhi, T.J. Kippenberg, Nanofabrication meets open science. *Nature Nanotechnology* 16(8), 850 (2021).