

温度センシング用シリカトロイド微小光共振器の実装技術

小林 美紗子, 西村 治郎, 田邊 孝純

慶應義塾大学 理工学部電子工学科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

Packaging Technology of a Silica Toroidal Optical Microcavity for Temperature Sensing

Misako KOBAYASHI, Jiro NISHIMURA, and Takasumi TANABE

Department of Electronics and Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University,
Yokohama, Kanagawa, 223-8522, Japan

(Received October 1, 2015)

Silica toroid microcavities is an ideal platform if we want to obtain high sensitivity and small device size simultaneously. However, it requires precise alignment of a tapered optical fiber in order to couple light into the microcavity. In this study we report on the packaging of a silica toroidal microcavity with an input-output tapered optical fiber, which enable us to make this device portable and use for practical applications. The obtained Q of the packaged device is 1.7×10^6 , and we performed thermal sensing by using this device.

Key Words: Microcavity, Optofluidics, Optical sensor, Tapered nano-fiber, Packaging

1. はじめに

微小光共振器は光を非常に小さな領域に高い密度で長時間閉じ込めることが可能な素子である。光を用いた各種センサ(温度センサや化学物質センサ)は幅広い分野での利用が期待されており、それらは物質の複素誘電率(屈折率や吸収)の変化に由来する光の変化を検出することで動作する。特に、可燃性・支燃性物質の検出には、着火の恐れがあるような電気で駆動する検出器を用いるのは好ましくなく、光によるセンサの活躍が期待される。

しかし、一般的に光と物質の電気双極子との相互作用は小さいため、高い感度を得るには光と検出媒質との相互作用長を大きくする必要があり、その結果素子が大きくなってしまいう問題がある。したがって一般的に素子サイズと感度にはトレードオフが存在する。一方で微小光共振器を用いれば、光を長く閉じ込めることができるので、小型なデバイスでも高感度なセンシングができると期待されている。その中でもWGM(Whispering Gallery Mode)共振器の1つであるシリカトロイド共振器が近年特に注目を集めている¹⁾。シリカトロイド共振器は 10^8 オーダー以上の高 Q 値が見込めるうえ、Si-SiO₂という単一材料から作製可能であるため集積化に向いているという利点がある。

シリカトロイド共振器を用いることで、光コム発生²⁾や高感度センシング³⁻⁸⁾などの応用が可能となる。特にWGM共振器による高感度センシングは2000年代前半から盛んになってきた研究であり、重水検出³⁾や温度セン

サ⁴⁾、タンパク質の検出⁵⁾、単一ナノ粒子⁶⁾やインフルエンザウイルス⁷⁾の検出、揮発性有機化合物の検出と同定⁸⁾などが行われている。

WGM共振器をセンシングに用いる際には、直径数100 nmとなるように延伸させたテーパナノファイバを用いてWGM共振モードを励起させる。高効率に結合させるためには、共振器中を周回する光の伝搬速度と、ナノファイバ中を伝搬する速度を整合する必要がある。特に、エバネッセント波を介して結合させるので、テーパファイバの位置をWGM共振器の側面に精密にアライメントする必要があり、実験室外に持ち出すのは容易ではない。

その課題を解決するため、我々はWGM共振器の形状を制御することで、安定的な結合を実現する手法を開発したが^{9,10)}、その一方で、WGM共振器にテーパファイバを固定してパッケージングする報告もなされている^{11,12)}。しかしこれらの手法ではWGM共振器に紫外線(Ultra Violet: UV)硬化性樹脂を付着させるため、光コム発生やセンシングなどの応用には向かないという問題点がある。

本報告では、シリカトロイド共振器に直接UV硬化性樹脂を付着させずにパッケージングする手法を検討し、評価した。また、作製した素子を用いて温度センシングのデモンストレーションを行った。

2. パッケージング手法の検討

先述のように、現在報告されているパッケージング手法はWGM共振器にUV硬化性樹脂を付着させるため応用

が限られる。さらに、 SiO_2 の屈折率は1.45程度であり、低屈折UV硬化性樹脂を用いなければ光が共振器の外に漏れ出てしまう。そのため、これらの報告では屈折率が1.3程度のUV硬化性樹脂を用いているが、この硬度は低く安定性が低いと考えられる。そこで、本報告では屈折率が1.6程度だが、高い硬度を得られるUV硬化性樹脂を用いてFig. 1のような手順でパッケージングを行った素子の両側に0.1 mL程度のUV硬化性樹脂を液滴し、その状態で微小共振器素子を調芯装置にセットアップした。次に、調芯装置に固定されたテーパファイバとの精密な位置アライメントを行う。その後光学測定を行い、適切に透過スペクトルが測定できる位置を確認する。UV光を照射するとUV硬化性樹脂が収縮するので、テーパファイバの位置がずれることを防止することや、パッケージング後の素子の強度安定性をより高めることを目的として、Fig. 2のようにシリカトロイド共振器の左右に300 μm の幅の台を付ける構造のものを作製した。この台はシリカトロイド共振器を作製するのと同様にフォトリソグラフィにより作製している。シリカトロイド共振器の作製時には CO_2 レーザーリフローを行うが、台に対してはリフローを行わないことでテーパファイバの位置アライメントに適した高さにすることができる。しかし実際には、それでもUV硬化性樹脂を硬化させると数 μm 程度の移動が生じるため、あらかじめその変化分を見越してテーパファイバの位置をずらしておく。その状態のままUVランプを照射しUV硬化性樹脂を硬化させてテーパファイバと微小光共振器の位置を固定化させる。最後に、テーパファイバを調芯装置から取りはずす。

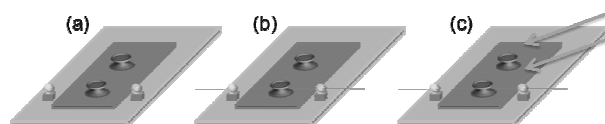


Fig. 1 Schematic illustration of the procedure of silica toroid microcavity packaging. A small drops of UV curable polymer are placed on both side of a cavity (a). Tapered nano-fiber is aligned in order to couple light with a silica toroid microcavity (b). UV light is exposed for about 30 minutes (c).

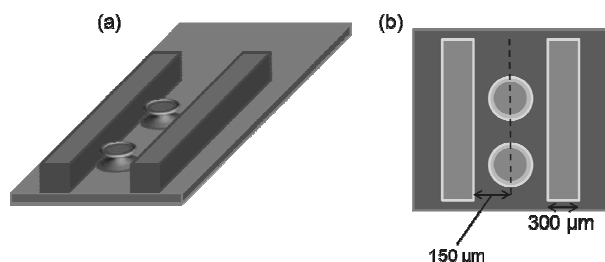


Fig. 2 (a) Schematic illustration of a silica toroid microcavities with tables for fiber holding. (b) Illustration from the top of the chip.

3. パッケージングされた共振器の評価

3.1 Q 値測定

Fig. 1に示した手順でパッケージングを行いケースに収めた状態の素子の写真と電子顕微鏡(Scanning electron microscope: SEM)画像をそれぞれFig. 3(a)と(b)に示す。今回は汎用ケースを用いたため $40 \times 30 \times 55 \text{ mm}^3$ のケースに収納したが、チップサイズは5 mm^2 以下であるので、本質的にパッケージングした素子サイズはmmオーダーであれば十分である。テーパファイバの両端はシングルモードファイバである。パッケージングを実現したことによって、素子への入出力は直接シングルモードファイバを介して高効率に行えるようになった。このことが本研究において重要な点であり、強調したい成果である。

UV光照射前後とテーパファイバを調芯装置から取り外した後の透過スペクトルをFig. 4に示す。Fig. 3とFig. 4より、持ち運びが可能なサイズの箱にパッケージングでき、パッケージングされた状態で $Q = 1.7 \times 10^6$ を達成できたことがわかった。

UV光照射によりUV硬化性樹脂が収縮することを考慮してUV光照射前のアライメントを行ったため、Fig. 4(a)のUV光照射前の透過スペクトルには共振が見られないが、UV光照射後には共振が見られる。パッケージング後には、ほぼ全ての素子で共振スペクトルが得られるが、これもシリカトロイド共振器の左右に付けた台によ

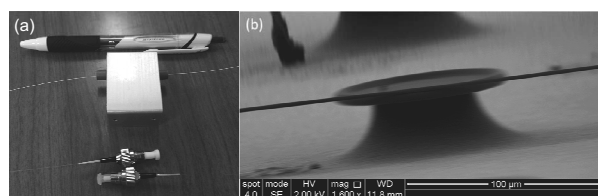


Fig. 3 (a) Photograph of the packaged device installed in a metal case connected with input and output fibers. The device is fabricated with a process shown in Fig. 1. (b) SEM image of a packaged cavity with tapered nano-fiber.

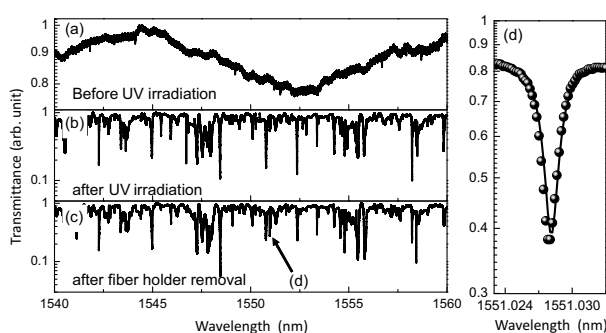


Fig. 4 Transmittance spectra of the device, before UV light exposure (a), after UV light exposure (b), and after it is removed from the tapered fiber alignment system (c). The magnified transmittance spectrum of one of the resonance (d).

り位置ずれが抑えられるようになったためである。

また、UV光照射後とテーパファイバを調芯装置から取り外した後の透過スペクトルにおいて多数のモードが存在しているのは、シリカトロイド共振器とテーパファイバがFig. 3 (b)で観測されたように側壁に接しているため、over couplingの状態であるからである。

3.2 安定性の評価

次に、作製した共振器のパッケージングの実用性について調べるために、作製してからの経過時間と振動の影響について評価した。

まず、作製してからの経過時間に対する安定性について評価を行った。1つのデバイスを作製直後、作製してから3日後、14日後に透過スペクトルを測定した。Fig. 5にその結果を示し、それぞれの透過スペクトルより得られた Q 値の変化をTable. 1に示す。通常我々が Q 値と呼ぶのは、透過スペクトルより得られる Q_{load} のことを指す。一方で、共振器の性能を議論するためには、共振器の固有 Q 値 Q_{int} と結合 Q 値 Q_{couple} を分けて考えなくてはなら

ない。 Q_{load} と透過率 T の関係は

$$Q_{\text{couple}} = \frac{Q_{\text{load}}}{\sqrt{T}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{Q_{\text{load}}} = \frac{1}{Q_{\text{int}}} + \frac{1}{Q_{\text{couple}}}$$

となることから、作製直後、作製してから3日後、14日後の共振器の Q_{int} と Q_{couple} を求めることができる。その結果、 Q_{int} の方が Q_{couple} より大きな割合で低下していた。テーパファイバと共振器の位置関係がずれると Q_{couple} に影響を与えるため、パッケージングは十分に安定していると言える。一方で、 Q_{int} は共振器に埃や OH^- 基などが付着することによって低下することから、パッケージングされた共振器を真空中など埃や OH^- 基の少ないところに保存することでより長い期間、性能を保持できると考えられる。

次に、共振状態にあるシリカトロイド共振器とテーパファイバの真上から中心周波数40 kHz $\pm$ 1 kHzの超音波スピーカを近づけることで振動に対する安定性を調べた。この周波数帯の音波は空気中の減衰が比較的小さく1dB/m程度であり、距離計測等の様々な機器に用いられている。

テーパファイバが揺らぎ、光が共振器に結合する強度が変化すれば、その振動周波数に対応する光強度変動が観測されるはずである。そこで、透過光強度をフォトダイオードで観測し電気スペクトルアナライザで測定して評価した。その結果をFig. 6に示す。振動を与えない環境で透過スペクトルを測定すると、パッケージングした素子は透過光強度の揺らぎが低減している。特に、100 MHz以下の周波数において低減の効果が顕著に表れている。パッケージングした素子においては、テーパ光ファイバと共振器の表面がしっかりと接触していると考えられ、共振器やテーパ光ファイバの機械的な振動が光結合に与える影響が抑えられると予想できる。使用しているトロイド共振器の機械的な固有振動数はおよそ50 MHz付近に存在することからも、パッケージングの有効性が示されているといえる。

超音波スピーカで振動を与えると、パッケージングの有無にかかわらず、振動の影響は観測されるものの、Fig. 6(b)に示すようにその影響はパッケージングによって低減されていることがわかる。MHzを超える高周波数に観測される理由ははっきりとはわからないものの、観測結果として470 MHz付近の振動が低減されている。振動の影響が軽減された理由は、直観的にはファイバの固定端の間の距離が著しく近くなったからだと考えられる。パッケージングしていない状態ではテーパファイバの固定位置間の距離は治具の制約をうけて7 cm程度となるが、パッケージングすればその距離は1 cm未満である。さらにフォトリソグラフィで作製した固定台が共振器素子の両側に配置されているため、実効的な距離はさらに短い。

簡単のためにファイバを両端が固定された梁として考えると振動のエネルギー ε は、 α を定数、 c を振幅、 R を

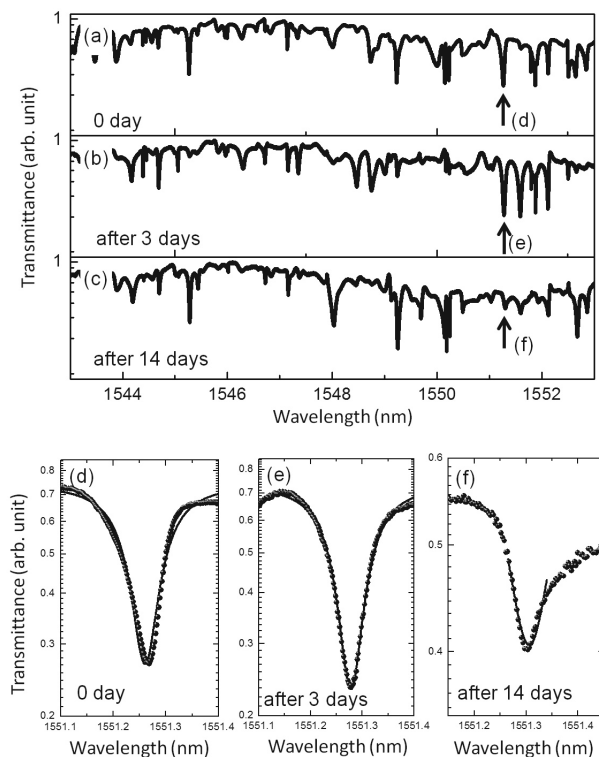


Fig. 5 Measured transmittance spectra of 0, 3, and 14 days after the fabrication of the packaged device (a-c). (d-f) are the magnified transmittance spectrum of one of the resonant mode. The Q of this mode has changed from (d) 9.9×10^5 , (e) 9.8×10^5 , to (f) 4.6×10^5 .

Table 1 Q s of 0, 3, and 14 days after the fabrication of the packaged device

days	Q_{load}	Q_{int}	Q_{couple}
0	9.9×10^5	2.0×10^6	2.0×10^6
3	9.8×10^5	1.9×10^6	2.0×10^6
14	4.6×10^5	8.3×10^5	1.0×10^6

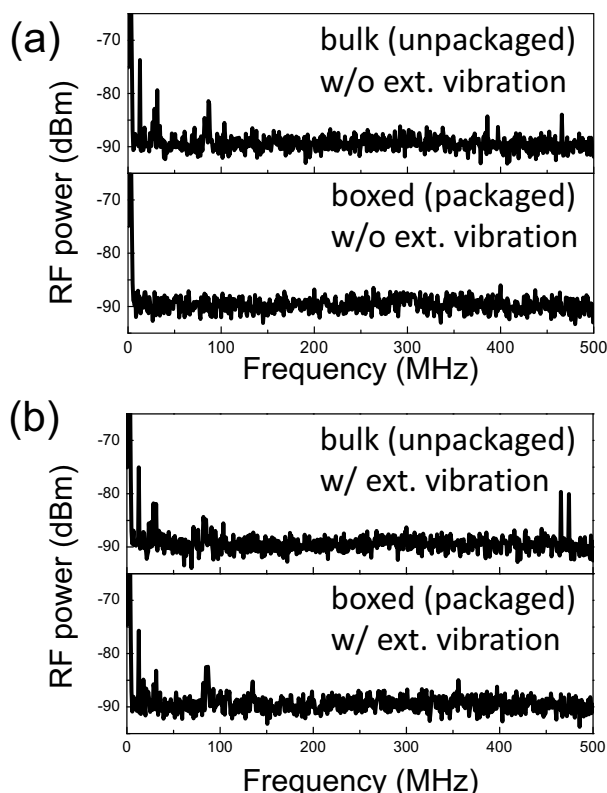


Fig. 6 Effect of the vibration. The radio-frequency of the transmitted intensity of the continues-wave light at the cavity resonance of the packaged and unpackaged cavities without (a) and with external vibration (b).

ファイバ半径, E をヤング率, l を固定端間の距離として

$$\varepsilon = \alpha \cdot \frac{c^2 R^2 E}{l^2} \quad (2)$$

と表すことができる. 先述したようにパッケージングされている場合の l は1 cm以下, パッケージングされていない場合の l は7 cm程度であるので, (2)より振動のエネルギーを一定として c を計算するとパッケージングされている場合はパッケージングされていない場合の約0.14倍以下になっていることから, 計算でもパッケージングすることで振動の影響が抑えられることが確かめられる.

4. パッケージングを用いた温度センシング

次に, パッケージングされた共振器を用いて温度センシングを行った結果について紹介する. パッケージングした素子をペルチェ素子上に置き, 実測値を得るためにプローブ型の温度計(測定誤差0.05 °C, 分解能0.1 °C)を用いた. 各温度における透過スペクトルを測定し, 共振波長シフトを測ることによって得られた温度と共振波長シフトの関係をFig. 7に示す. Fig. 7に示した近似直線から, 作製したパッケージングによる温度の感度は13.2 pm/°Cと計算できる. これはシリカの熱光学定数及び共振器サイズに依存する量であり, パッケージングさ

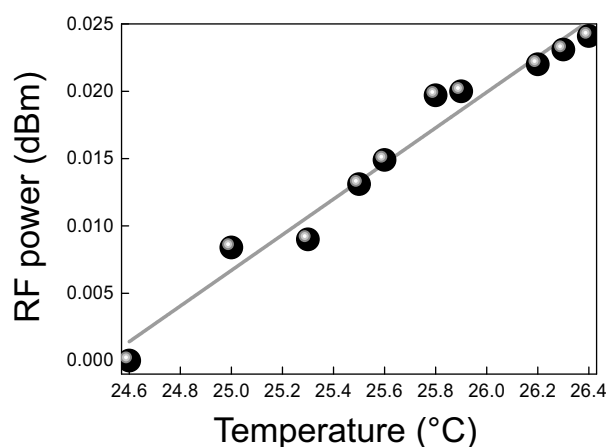


Fig. 7 Demonstration of temperature sensing. Resonant shift versus temperature of the packaged device. Solid line is the fitting.

れていないWGM共振器による温度センシングの感度は5 pm/°C程度と報告されている¹³⁾.

本センサは両端がシングルモードに接続されたmmサイズの極めて小さな素子なので, 人が入ることが難しい場所にインストールしておき光ファイバでネットワークを組めば, リアルタイムでリモート温度センシングが可能となるうえ, わずかな相対温度変化をいち早くとらえることができる多点同時計測ネットワークを組むことができる.

5. センシング応用に向けた流路内パッケージング

最後に, 気体・液体センシング応用に向け, 流路内共振器をパッケージングした結果について紹介する. 共振器を流路内にパッケージングした写真をFig 8に示す. また, Fig. 8のように作製した素子を用いて, 純水を流路に流した状態で透過スペクトルを測定した結果をFig. 9に示す. 液中測定においては液体の光吸収が Q 値を決める大きな要因となる. 1550 nmでの水の吸収係数は9.6 cm⁻¹と大きいことから高 Q 値が得られないので,

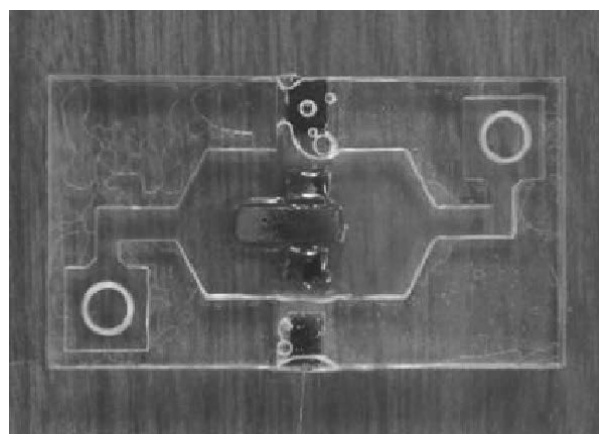


Fig. 8 Photograph of a packaged cavity integrated in a microfluidic channel.

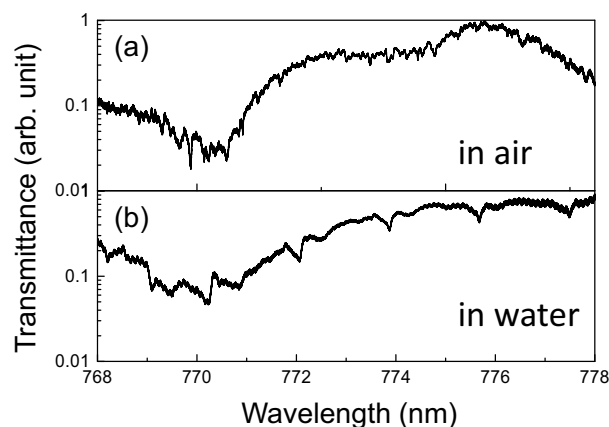


Fig. 9 Transmittance spectra of packaged cavity integrated with a microfluidic channel in the air (a) and in water (b).

本実験においては水の吸収係数が 0.025 cm^{-1} と小さい可視～近赤外領域の波長(760～780 nm)を用いた¹⁴⁾。

Fig. 9より、純水を流した状態でも共振が見られており、共振器とテーパファイバが液中でも測定可能な状態でパッケージングされていることが示された。また、Fig. 9より Q 値を求めると空気中で $Q = 1.7 \times 10^6$ 、純水中で $Q = 1.6 \times 10^4$ となった。 Q 値が低下しているうえ、空気中に比べて液中でモード数が少なくなっているが、空気の屈折率が1.00、純水の屈折率が1.33、 SiO_2 の屈折率が1.44であることを考えると、共振器中に閉じ込められるモードが少なくなり、共振器の外に光が漏れ出す量が多くなることは妥当だといえる。

しかし、流路に純水を流した際に共振が見えなくなることが多い等、ファイバの固定性を向上させることが課題である。

6. まとめ

シリカトロイド共振器とテーパファイバを測定可能な状態でパッケージングした。時間や振動に対する安定性も評価した。パッケージングした素子には光の入出力用のシングルモード光ファイバが1入力、1出力あり、そのまま様々なセンシングに用いることができる。例えば、

我々は本論文で報告した温度センシング以外にも、高感度なpHセンシング応用も報告している¹⁵⁾。

一方で、シリカトロイド共振器の持つ高 Q 値を考えると $Q = 1.7 \times 10^6$ は十分な値とは言えず、 Q 値の向上は今後の課題としてあげられる。また、センシング応用に向け、流路内のパッケージングも実現できたが、液体を流してもファイバが移動しないように固定性を向上させることが課題である。

微小光共振器素子を用いると高感度な温度センシングが行えること自体は既知である。しかしながら、それを実際にパッケージングした形態でデモンストレーションした例はこれまでに例がない。本報告は微小光共振器素子をフィールドで利用できる形態でデモンストレーションした世界初の成果である。同素子の有用性を示す一つの例として重要な成果として位置づけられる。

参考文献

- 1) D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillane, and K. J. Vahala: *Nature* **421** (2003) 925.
- 2) T. J. Kippenberg, R. Holzwarth, and S. A. Diddams: *Science* **332** (2011) 555.
- 3) A. M. Armani and K. J. Vahala: *Opt. Lett.* **31** (2006) 1896.
- 4) J. M. Ward and S. Nic Chormaic: *Appl. Phys. B* **100** (2010) 847.
- 5) F. Vollmer, D. Braun, A. Libchaber, M. Khoshshima, I. Teraoka, and S. Arnold: *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 4057.
- 6) J. Zhu, Ş. K. Özdemir, L. He, D. Chen, and L. Yang: *Opt. Express* **19** (2011) 16195.
- 7) T. Lua, H. Leea, T. Chena, S. Herchakb, J. Kima, S. E. Fraser, R. C. Flagand, and K. Vahala: *Proc. Nat. Acad. Sci.* **108** (2011) 5976.
- 8) K. Scholten, X. Fan, and E. T. Zellers: *Lab Chip* **14** (2014) 3873.
- 9) T. Kato, W. Yoshiki, R. Suzuki, and T. Tanabe: *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 121101.
- 10) R. Suzuki, T. Kato, T. Tetsumoto, and T. Tanabe: *AIP Advances* **5** (2015) 057127.
- 11) Y. Yan, C. Zou, S. Yan, F. Sun, Z. Ji, J. Liu, Y. Zhang, L. Wang, C. Xue, W. Zhang, Z. Han, and J. Xiong: *Opt. Express* **19** (2011) 5753.
- 12) F. Monifi, S. K. Özdemir, J. Friedlein, and L. Yang: *IEEE Phot. Technol. Lett.* **25** (2013) 1458.
- 13) C. H. Dong, L. He, Y. F. Xiao, V. R. Gaddam, S. K. Ozdemir, Z. F. Han, G. C. Guo, and L. Yang: *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 231119.
- 14) W. M. Irvine and J. B. Pollack: *Icarus* **8** (1968) 324.
- 15) J. Nishimura, M. Kobayashi, R. Saito, and T. Tanabe: *Appl. Opt.* **54** (2015) 6391.