Whispering Gallery Mode による ポリマーマイクロフォトンクス

五神 真

東京大学大学院工学系研究科
Makoto GONOKAMI

極限的な光素子によって光子を一つ一つ操ることは光学・技術の究極的な目標である。このためには、大きな非線形性を示す材料を用いて光を強く閉じ込めるデバイスをつくることが必要となる¹⁾。光を効率よく閉じ込めるためには、材料の透明性が鍵となる。有機ポリマー材料は無機材料にくらべ、多様性、可塑性といった優れた特性をもつ反面、密度揺らぎや分子振動との結合が大きく、光透過性能は劣ると考えられてきた。しかし、最近のポリマー光ファイバー (POF) の急展開によってこの常識は覆されつつある。すなわち、われわれは優れた透明度と可塑性、制御性を合わせ持つ材料を手にしつつある。ここでは、この特性を活用した光素子として WG (Whispering Gallery) モードによる光閉じ込めを利用した光素子について紹介し、ポリマーによるマイクロフォトンクスの可能性を探る。

光を量子レベルで制御するために微小光共振器の研究が基礎応用両面で活発に進められている。光と物質を有効に相互作用させるためには、(1) 自然放出結合係数 β (全自然放出過程の中で注目している共振器モードがしめる割合)、(2) 共振器の Q 値 (quality factor) を高めることが本質となる。 β を高めるためには、光が閉じ込められる領域を 3 次元的に小さくしなければならない。 $\beta=1$ でレーザー発振動作を行うと無閾値レーザーとなる。共振器の Q 値は次式で与えられる。

$$Q = \frac{2\pi\tau_{\text{cav}}}{\tau} \quad (1)$$

ここで、 τ_{cav} は共振器中に蓄えられた光のエネルギーが $1/e$ になるまでの時間で τ は光の周期である。可視光域では無磁波を完全に反射する物質は存在しないので、通常誘電体の多層構造を用いる。この場合、微小共振器の Q 値は加工精度によって制限され半導体の場合で通常 100 から 5,000 程度である。別の光閉じ込め構造として微小球や微小円盤の WG モードの利用が注目されている。WG モードは全反射によって光を閉じ込めるものである。ミー理論によると球形共振器の WG モードの Q 値は直径 10 ミクロンの透明球の場合 10^{15} 以上にもなる。物質の表面張力により真球度の高い球が自然につくられる場合が多い。微小球の実際の Q 値は材料の吸収によって制限される。吸収係数を α とすると、この上限値 Q_{abs} は次式で与えられる。

$$Q_{\text{abs}} = \frac{2\pi}{\alpha\lambda} \quad (2)$$

100 dB/km の損失は $Q_{\text{abs}}=10^8$ に対応する。したがって、高い Q 値を実現するためには透明度の高い材料を用いなければならない。実際、シリカガラスを用いた最近の研究では 5×10^9 もの Q 値が報告されている²⁾。われわれは、ポリスチレン微小球に色素をドープした試料を

図1 微小球 (a) および微小円盤 (b) の WG モードによる光閉じこめ

用いて、光励起によるレーザー発振の研究を行っている³⁾。直径 $10\mu\text{m}$ のポリスチレン球の Q 値は 10^4 程度と評価されている。色素のゲイン領域に Q 値の高い WG モードは 100 本以上も存在し、通常レーザー発振は複雑な多モードとなる。ゲイン媒質を表面層にのみに配置する構造により、ほぼ単一モード発振も実証している¹⁾。このシェル状微小球レーザーの入出力特性と共振器量子電気力学による計算から、色素の自然放出は事実上 WG モードのみに結合していることがわかった。これは、ゲイン幅の十分狭い発光体を一つの WG モードにのみ結合させると β 値をほぼ 1 にできることを意味する。

さて、微小球共振器に共鳴近傍の周波数の単色光をあてると、微小球内に入った光の強度に依存して屈折率が変化して共鳴が移動する。その結果、入力に対して出力が 2 つの値を取る現象、非線形光双安定性が生じる。Braginsky⁴⁾ によるとこの閾値入力パワーは共振器のモード体積に比例し、3 次の非線形感受率に逆比例する。また共振器の Q 値の 2 乗に逆比例する。例えば、 $\chi^{(3)}=10^{-9}$ esu の材料で直径が $10\mu\text{m}$ の微小球で Q 値が 10^7 の WG モードにおける光双安定の閾値はわずかに数光子の程度になり、まさに極限的な量子光素子となる。

POF の進展によって $Q_{\text{abs}} \geq 10^7$ を出さうる材料の選択の幅が広がった。これ自体あるいは適当な活性物質を導入することによって光子レベルの操作が行える量子光素子を実現する可能性は大いに高まったといえるであろう。

文 献

- 1) 五神 真: 光学, 24, 526 (1995)
- 2) L. Collot, V. Lefevre-Seguin, M. Brune, J. M. Raimond, S. Haroche: *Eur. Phys. Lett.*, 23, 327 (1993)
- 3) M. Kuwata-Gonokami, K. Takeda, H. Yasuda, K. Ema: *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, 31, L99 (1992)
- 4) V. B. Braginsky, M. L. Gorodetsky, V. S. Ilchenko: *Physics Letters*, A137 (1989) 393

(物理工学専攻・助教授, 理博, 専門=光物性, 量子エレクトロニクス)