

Whispering-gallery モードセンサの断面形状最適化

Cross-sectional shape optimization of whispering-gallery mode sensors

広島大工¹, 徳島大工² ○ 竹澤 晃弘¹, 原口 雅宣², 岡本 敏弘², 北村 充¹Hiroshima Univ.¹, Tokushima Univ.²○Akihiro Takezawa¹, Masanobu Haraguchi², Toshihiro Okamoto², Mitsuru Kitamura¹

E-mail: akihiro@hiroshima-u.ac.jp

1. はじめに

近年 Whispering-Gallery(WG) モードでの共振を利用したリング状化学センサに関する研究が盛んに行われている。このようなセンサは、検出対象の状態変化により誘電率が変化し、共振器の共振波長がシフトする現象を検出に利用しており、性能指標としては、検出感度すなわちシフト量の大きさ及び、時系列での応答の速さの二つが挙げられる。それらは Q 値やモード形状によって評価され、発振波長や誘電体の誘電率、共振器形状によって決まる。この中で、共振器形状がそれらの指標に与える影響は、大域的には検証されてきたが、詳細な最適形状の導出は未だ試みられていない。そこで本研究では、構造最適化法の一つであるトポロジー最適化を用いて、化学センサに用いるリング上誘電体共振器の断面形状の最適設計を行う。

2. 数値計算の詳細

最適化は有限要素法を用いた数値計算に基づいて行う。また、装置のモデル化は円柱座標系を用いた軸対称モデルに基づき行う。状態方程式はヘルムホルツ方程式であり、状態変数は磁場 $\mathbf{H}$ とする。 $\mathbf{H}$ は時間依存の周期的な項と空間依存の項の積で以下のように表す。 $(\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r})H(t) = e^{iM\phi}[H_r(r, z), iH_\phi(r, z), H_z(r, z)]^T e^{-i2\pi f t})$ ここで、 f は共振周波数、 M は方位角モードの次数を表す。解析領域は開空間とし、周囲を PML 領域で囲み、設計領域は装置の断面部分とする。装置を構成する誘電体は比誘電率 $\epsilon = 11.2896$ の GaAlAs とする、設計変数は SIMP 法に基づき定式化し、設計領域の比誘電率を密度関数 ρ を用いて以下のように表す。

$$\epsilon = \epsilon_{\text{air}} + \rho(\epsilon_{\text{GaAlAs}} - \epsilon_{\text{air}}) \quad (0 \leq \rho \leq 1) \quad (1)$$

本研究では、最適化の最初の段階として、検出領域において高い電場が生じるモード形状を得ることを目的とする。ここでは最適化問題を、検出領域における電気エネルギーの最大化問題として以下のように定式化する。

$$\underset{\rho}{\text{maximize}} J(\rho) = \int_{\Omega} \epsilon |\mathbf{E}|^2 dx \quad (2)$$

ただし、 Ω は検出領域であり、 $\mathbf{E}$ は電場ベクトルである。図 1 に解析領域の概形を示す。寸法は、設計領域を高さ $1.5\mu\text{m}$ 、幅 $2\mu\text{m}$ に、検出領域を高さ $0.05\mu\text{m}$ 、幅を設計領域右端より $0.5\mu\text{m}$ とした。図 2 に最適形状及び、電気エネルギー、電場強度の分布を示す。中央部にくびれを持つ特徴的な形状が得られ、このくびれ部に強い電場集中が起こっていることがわかる。指定した検出領域に電場が集中するような形状が得られたことから、センサ検出感度向上のための最適化に成功したといえる。

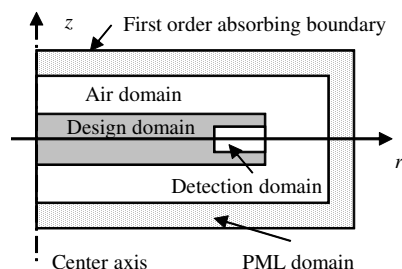


Figure 1: Design domain

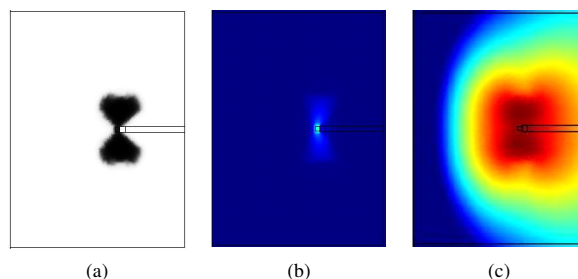


Figure 2: Optimal results. (a) Optimal configuration (b) Electric energy distribution (c) Electric field intensity