

# 光ファイバ型ラマン温度センサの高速化に向けた最適観測周波数の解明

## Optimization of observed frequency for high-speed fiber-optic Raman temperature sensing

○中澤 克一郎<sup>1</sup>, 野田 康平<sup>1,2</sup>, 李 ひよん<sup>3</sup>, 中村 健太郎<sup>2</sup>, 水野 洋輔<sup>1</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学 工学研究院 <sup>2</sup>東京工業大学 未来産業技術研究所 <sup>3</sup>芝浦工業大学 工学部

○Katsuichiro Nakazawa<sup>1</sup>, Kohei Noda<sup>1,2</sup>, Heeyoung Lee<sup>3</sup>, Kentaro Nakamura<sup>2</sup>, and Yosuke Mizuno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yokohama National University <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology <sup>3</sup>Shibaura Institute of Technology

E-mails: nakazawa-katsuichiro-sd@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

### 1. はじめに

光ファイバを用いた様々な局所型の歪センサが提案されている。それらは一般に温度変化の影響も受けるため、歪と温度を分離して測定するには、異なる原理に基づく温度計測を併用することが多い[1]。光ファイバを用いて温度を計測する手法は多々知られているが、ここではラマン散乱[2]を用いた手法に注目する。

ラマン散乱パワーの温度依存性を用いた温度センサはよく知られているが[3]、既存の歪センサとの整合性が高いとはいえない現状である。既存の歪センサの多くが満たしている特徴として、以下の4点が挙げられる：(1) 通信波長帯の 1550 nm (193 THz) の光源を用いている、(2) 連続光を用いている、(3) 標準的なシリカ単一モードファイバ (SMF) を用いている、(4) リアルタイム動作が可能である。しかし、微弱なラマン散乱光を観測するためには、短波長帯・光パルス・高非線形光ファイバのいずれか(あるいは複数)を用いた上、時間をかけて信号処理を行うことが多い。よって、上記(1)-(4)の特徴を兼ね揃えたラマン温度センシングの報告はいまだなされていない。

そこで本研究では、上記の特徴を有するラマン温度センサの実現に向けて、測定に最適な周波数の解明を行う。

### 2. 原理と実験方法

一般に、193 THz 帯の入射光に対する SMF のラマン散乱スペクトルは、低周波側および高周波側に 10~13 THz 程度シフトした帯域に現れる(それぞれストークス成分およびアンチストークス成分と呼ぶ)。アンチストークス成分のパワーは、温度に対して強い依存性を示すため、温度センシングの原理として活用できる。パワーベースであるため動作が比較的不安定であることから、ストークス成分のパワーとの比を用いて安定化を図ることも多い。しかし、本研究では、高速動作に重点を置くため、アンチストークスのパワーのみを用いた温度センシングに着目する。

### 3. 実験結果

まず、室温 25°C において、193 THz、25 dBm の連続光を 10 m のシリカ SMF に入射した時の後方散乱光のスペクトルを、光スペクトラムアナライザ (OSA) を用いて観測した (Fig. 1)。入射光の波長を中心として、広帯域にラマン散乱スペクトルが現れた。以下では、アンチストークス成分に着目する。A 点 (206 THz) は誘導ラマン散乱の場合に最もパワーが大きくなることが知られている波長である[3]。一方、B 点 (195 THz) でもラマン散乱によるピークが現れた。

次に、A 点と B 点付近のラマン散乱スペクトルの温度依存性を測定した (Fig. 2)。ここから、A 点と B 点におけるパワーの温度依存性をプロットしたのが Fig. 3 である。依存性はどちらもほぼ線形で、依存係数 (温度感度) は A 点が 0.0017 dB/°C、B 点が 0.0012 dB/°C であった (A 点に比べて B 点の感度は約 30% 低い)。

続いて、A 点と B 点におけるパワーの時間的安定度 (ここでは、時間変動の標準偏差として定義) を調査した。OSA のゼロスパン機能を用いて、各温度における A 点と B 点のパワーを時間に対してプロットした結果を Fig. 4 に示す。A 点に比べて B 点は時間変動が小さく、その標準偏差は A 点が 0.100 dB、B 点は 0.041 dB であった (A 点よりも B 点のほうが時間的安定度は 2.4 倍以上高い)。

以上から、「感度を時間的安定度で割った値」(一般に、温度センサにとって極めて重要な性能指標) は、A 点に比べて B 点の方が 1.7 倍以上高いといえる。すなわち、本研究により、室温付近で温度センサを実装する場合、従来用いられていた A 点よりも B 点の方が適していることが明らかになった。

### 参考文献

[1] Y. Mizuno, R. Ishikawa, H. Lee, A. Theodosiou, K. Kalli, and K. Nakamura, *IEEE Sens. J.* **19**, 4458 (2019).

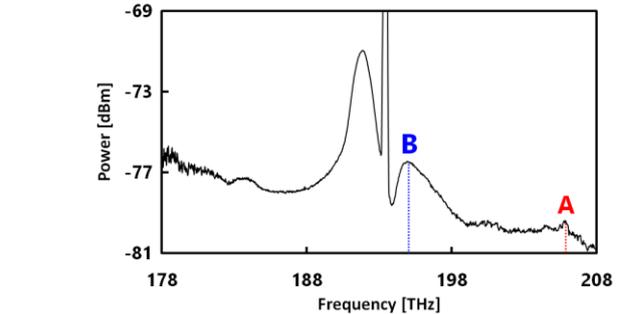


Fig. 1 Raman scattering spectrum in a wide range.

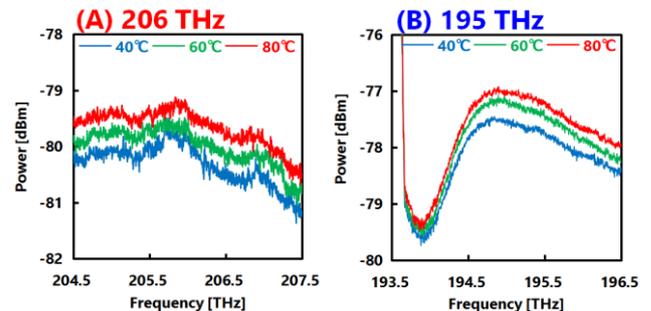


Fig. 2 Temperature dependencies of Raman scattering spectra; magnified views around (A) 206 THz and (B) 195 THz.

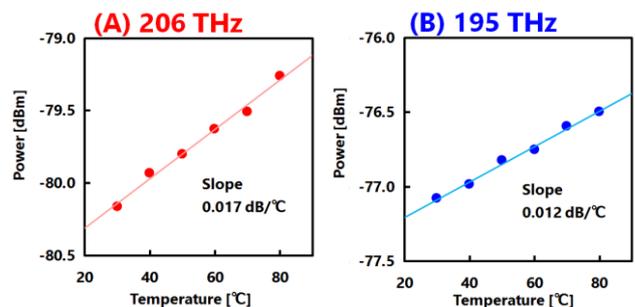


Fig. 3 Raman scattering powers plotted as functions of temperature at (A) 206 THz and (B) 195 THz. The solid lines are linear fits.

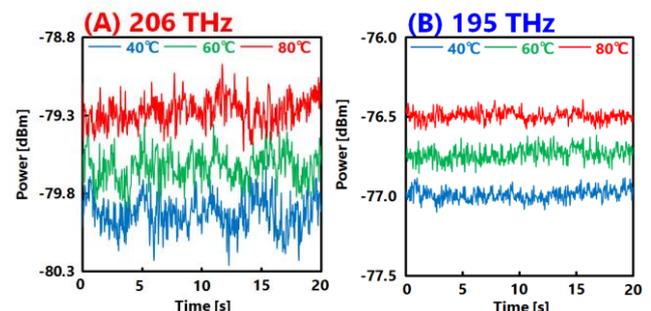


Fig. 4 Temporal variations of Raman scattering powers at different temperatures at (A) 206 THz and (B) 195 THz.

[2] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, Boca Raton, 2001).

[3] J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby, and J. N. Ross, *Electron. Lett.* **21**, 569 (1985).