

光ファイバ中のラマン散乱に基づくリアルタイム温度センシングの実証

Pilot demonstration of real-time temperature sensing based on Raman scattering in optical fibers

○中澤 克一郎¹, 野田 康平^{1,2}, 李 ひよん³, 中村 健太郎², 水野 洋輔¹

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

○Katsuichiro Nakazawa¹, Kohei Noda^{1,2}, Heeyoung Lee³, Kentaro Nakamura², and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University ²Tokyo Institute of Technology ³Shibaura Institute of Technology

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

1. はじめに

これまでに、光ファイバを用いた種々の局所型の歪センサが提案されてきた。一般に、歪センサは温度の影響も受けるため、歪と温度を分離して測定するには、異なる計測原理を併用することが多い[1]。光ファイバを用いた温度計測法は数多く報告されているが、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 30 年以上前から知られているが[3]、現状では既存の歪センサとの整合性が高いとはいえない。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: (1) 通信波長帯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、が挙げられる。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。結果として、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。これを実現すべく、我々はこれまでに、193 THz の連続光をシリカ SMF に入射した際に得られるラマン散乱スペクトルにおいて、ある単一周波数におけるパワーに基づいて温度を高速で推定する場合に最適な周波数が約 195 THz であることを解明した[4]。

そこで本研究では、195 THz におけるラマン散乱スペクトルのパワー変化に基づき、リアルタイム温度センサを実現した。

2. 原理と実験系

ラマン散乱スペクトルは、温度の上昇に伴い、主にアンチストークス成分のパワーが増加することが知られている (歪には明瞭な依存性を示さない)。一般にはストークス成分とアンチストークス成分のパワー比に基づいて温度を推定する。しかし、リアルタイム動作を重視する本研究では、アンチストークス成分のうち 195 THz におけるパワーのみに基づいて温度を推定する。室温から 100°C 程度までの範囲では、パワー (dBm) は温度に対して線形に依存する[4]。

今回構築したリアルタイムラマン温度センサの実験系を Fig. 1 に示す。まず、波長 1550 nm (光周波数 193 THz) の連続光を 25 dBm まで増幅し、10 m のシリカ SMF からなるベアファイバに入射した。次に、ラマン散乱により生じる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) により観測し、195 THz におけるパワーを高速取得した (Fig. 2)。OSA によるデータ取得プロセスを最適化し、約 1 Hz のサンプリングレートを実現した。リアルタイム動作を実証するため、測定ファイバ全体を 65°C および 85°C の湯に 20 秒間浸けたときと取り出したときの温度変化の様子を記録した。

3. 実験結果

室温 (約 20°C) 下にある測定ファイバを湯に 20 秒間浸してから取り出したときの、本システムで測定した温度の時間変化を Fig. 3(a) (65°C のとき) および Fig. 3(b) (85°C のとき) に示す。横軸は、湯に浸した時刻を基準とした。湯の温度によらず、湯に浸したときは、測定温度は室温から湯の温度付近まで瞬時に (約 1 秒以内) 上昇した。続いて、湯に浸したまま 20 秒経過する間は、温度はほぼ一定であった。湯から取り出してから、次第に測定ファイバが冷めていく様子が観察された。図中の黒い曲線 (指数関数による近似線) と良い一致を示したことから、ニュートンの冷却の法則に従っているといえる。湯の温度によらず、時定数は約 8.5 秒であった。以上より、本手法で測定ファイバの温度をリアルタイムに計測できることが示された。

4. 結論

通信波長帯の連続光をシリカ SMF に入射した際のラマン散乱スペクトルにおいて、195 THz におけるパワー変化に基づくリアルタイム

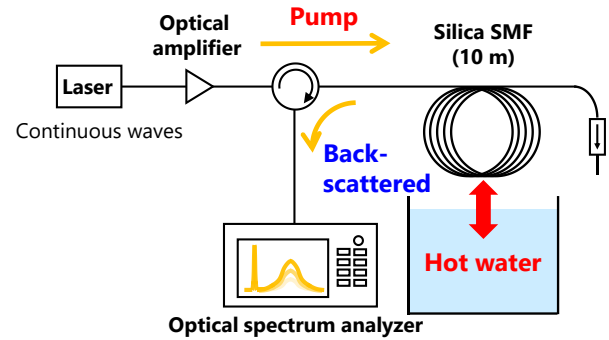


Fig. 1 Setup for real-time Raman temperature sensing.

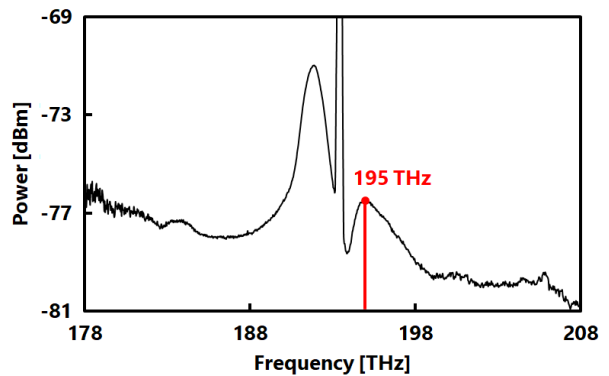


Fig. 2 Typical Raman scattering spectrum. The power at 195 THz was used for real-time temperature sensing.

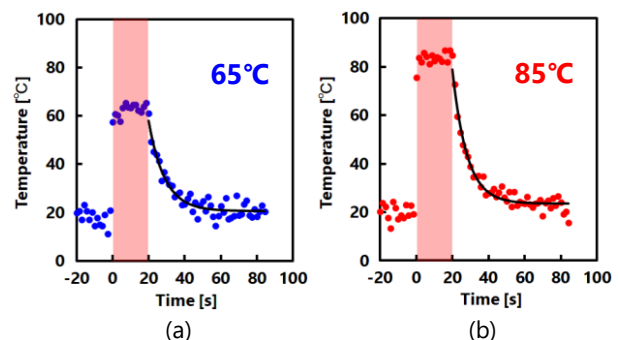


Fig. 3 Temporal variations of measured temperatures when the sensing fiber was immersed into hot water and then taken out. (a) 65°C and (b) 85°C.

温度センサを実現した。温度測定精度の向上や測定ファイバの短縮、歪センサとの融合が今後の課題である。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、横河電機株式会社の古川靖博士に有益なご助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, R. Ishikawa, H. Lee, A. Theodosiou, K. Kalli, and K. Nakamura, *IEEE Sens. J.* **19**, 4458 (2019).
- [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).
- [4] 中澤 他, 2021 秋応物, 12p-N306-8.