

避難所生活短縮のためのプラスチック光ファイバを用いた歪・温度分布センサ

代表研究者 東京工業大学 精密工学研究所 水野 洋輔

共同研究者 東京工業大学 精密工学研究所 中村 健太郎

1. 研究目的

長い光ファイバに沿った任意の位置で歪(ひずみ:伸びのこと)や温度を測定できる光ファイバセンサを「分布型光ファイバセンサ」(図 1)と呼ぶ。これを飛行機の翼やビルの内壁、ダムや橋梁など、多様化する構造物に埋め込むことで、それらのヘルスマニタリング、すなわち、地震による損傷や経年劣化などを監視することができる。そのため、分布型光ファイバセンサは、安心・安全のため、世界中で精力的に研究がな

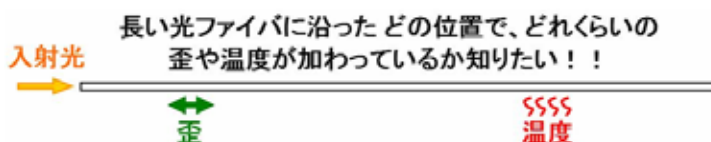


図 1. 分布型歪・温度センサ.

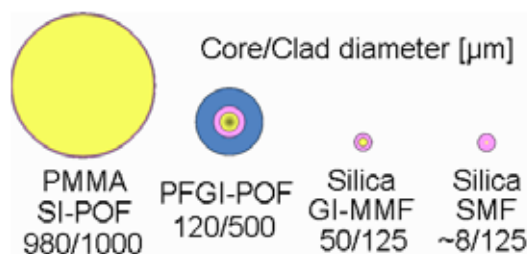


図 2. POF の構造およびシリカガラスファイバとの比較.

されている。分布型光ファイバセンサを構築する際、従来は専らシリカを中心とするガラスファイバが用いられてきた。しかし、ガラスファイバは損傷を受けやすく、取り扱いに気を付けなければならなかった。さらに、数%の歪で切断されてしまうため、それ以上の大きな歪を測定することはできなかった。そこで我々は、プラスチック光ファイバ(POF)に注目している。図 2 に示すように、POF は太いコア径をもち、50%以上の歪にも耐えられるほどの高い柔軟性、安価な敷設コスト、容易なファイバ間接続、高い安全性など、ガラスファイバにはない多くの利点がある。POF 中のブリルアン散乱に関する理論的報告は多数存在し、それゆえその重要性・有用性は多くの専門家によって認識されてはいるものの、私が初観測するまでに実験的報告はなかった。

POF を用いて分布型光ファイバセンサを構築することで、取り扱いが簡単になり、対応可能な歪が大幅に拡大するのはもちろんのこと、最大の利点かつ独創的である点は、センサに対して「記憶」という新たな機能を付与できることにある。この機能は、POF が大きな歪に対して塑性変形を起こし、歪の大きさと印加された位置を POF 自身が記憶する性質を指す。この性質を用いれば、ガラスファイバの場合のように常に高価な解析装置を設置しておかなくても、「構造物には POF だけを埋め込んでおき、地震の後など、1つの解析装置を持って多数の構造物を巡回検診すればよい」という全く新しいコンセプトが生まれる。社会全体で考えれば、光ファイバセンサ技術のコストが大幅に削減され、大規模建造物に

限られていたファイバセンサ技術の対象を一般個人住宅等まで拡大でき、例えば地震後の住民の避難所生活の短縮などに貢献できるものと期待している。大地震の不安と常に隣り合わせの日本にとって、今後ますます求められる技術であろうと考えている。

本研究の目的は、記憶機能を有する分布型光ファイバセンサ実現に向けた非常に重要な第一歩として、POFを用いた歪・温度の分布センシングを世界に先駆けて実現し、cm オーダの高空間分解能とリアルタイム測定可能性を実証することである。更に、センサの性能限界に影響を与える「光ファイバヒューズ」現象をPOF中で初観測したので、これについても概略を紹介する。

2. 原理

我々は前述の目的を光ファイバ中のブリルアン散乱と光の相関制御技術を組み合わせることで達成した。

一般に、センシング原理となりうる光ファイバ中の散乱現象として、レイリー散乱やラマン散乱

が知られている。これらの現象を応用した分布センサは、実装が比較的容易であるが、散乱光の強度情報を利用するため安定性・精度が低かった。そこで、我々を含むいくつかの研究グループは、光ファイバ中の超音波と光の相互作用である「ブリルアン散乱」を利用した分布型センサに着目している。ブリルアン散乱による反射光は、光ファイバ中の超音波によってドップラー効果を受け、周波数が「ブリルアン周波数シフト(BFS)」と呼ばれる量だけ下がることが知られている。この BFS は光ファイバに印加された歪の大きさや温度に比例して変化するため、BFS を測定することでそれらを決定することが可能となる(図3)。この手法は、散乱光の強度ではなく周波数を利用するため、安定性・精度が高いのが特長である。

次に位置分解法について述べる。ファイバ中の光の相関を制御することで位置分解を行

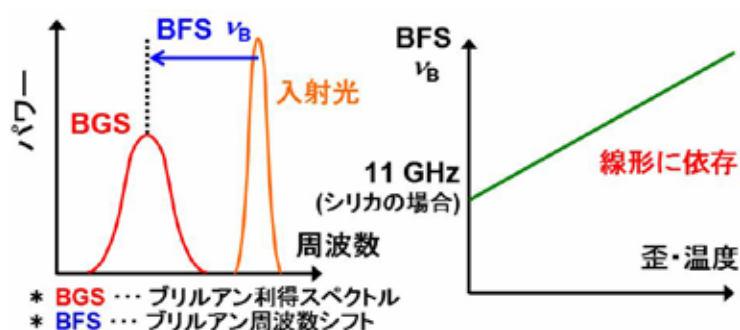


図3. ブリルアン散乱による歪・温度測定原理.

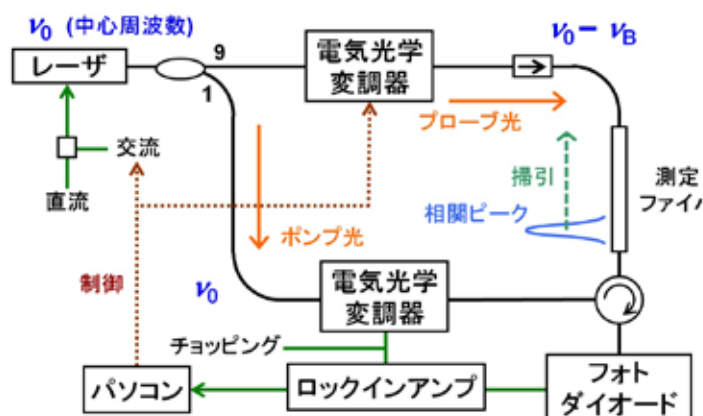


図4. BOCDAの実験系.

う手法「ブリルアン光相関領域解析法 (BOCDA)」および「ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ (BOCDR)」は、光パルスの伝搬時間差に基づく古典的手法よりもはるかに高い空間分解能 (2つの領域が2つと認識可能な最短距離) とリアルタイム測定を実現することができる。相関領域法では、レーザの出力

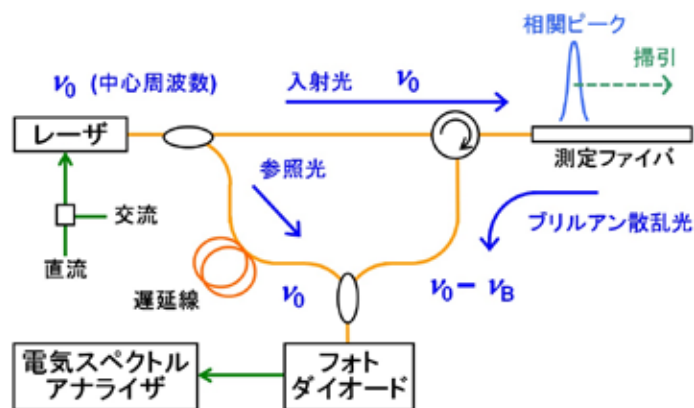


図 5. BOCDR の実験系.

光の中心周波数に変調周波数 f_m で正弦波変調を施す。図 4 に示す BOCDA の場合、レーザの出力光をポンプ光とプローブ光に分岐させ、両光を測定ファイバ中で対向伝搬させる。プローブ光の中心周波数は、電気光学変調器を用いて ν_B だけ下げしておく。すると、測定ファイバ中には、両光の周波数差が時間的に変動しない (両光の時間平均的な相関が高い) 箇所が生じる一方、それ以外の領域では両光の周波数差は時間的に変動する (両光の時間平均的な相関が低い)。ここで、相関が高い箇所を「相関ピーク」と呼ぶ。いま、光周波数は正弦波変調されているので、相関ピークは周期的に立ち並び、その間隔は変調周波数 f_m に反比例する。これを利用し、測定ファイバ中にただ一つだけ相関ピークが立つように f_m を制御すれば、相関ピークに対応した位置での誘導ブリルアン散乱信号のみが抽出できる。さらに f_m を掃引することで、相関ピークを測定ファイバに沿って移動させ、ブリルアン散乱スペクトルや BFS の分布情報を得ることができる。図 5 に示す BOCDR の場合も同様に、測定ファイバ中の特定の位置のブリルアン散乱信号のみを参照光とのビート信号として抽出することができる。これまでに、私は BOCDR を用いて、世界最高 (2014 年 12 月現在) となる 6 mm の空間分解能を達成した。

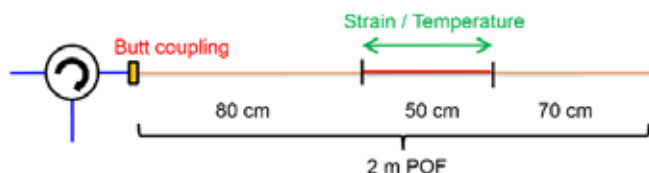


図 6. 被測定 POF (1).

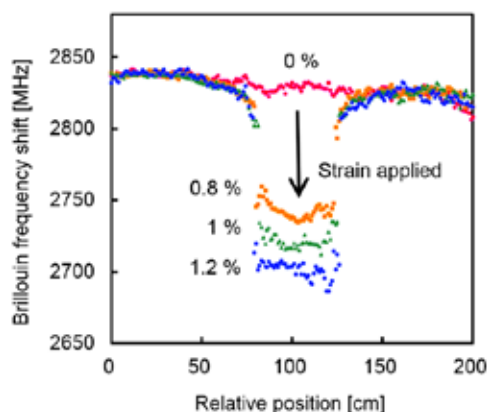


図 7. 歪を変化させたときの BFS の分布測定結果.

3. 実験結果

まず、信号対雑音比の高い状態での測定結果を示すべく、光源の変調周波数を 11.5 MHz 付近で掃引し、変調振幅を 0.9 GHz とした。これは、34 cm の空間分解能に相当する。図 6 に示すように、2 m の POF の 50 cm の区間に歪や温度変化を印加したものを測定対象とした。室温は 18°C であった。サンプリングレートは 3.3 Hz とした。歪を印加した場合の BFS の分布測定結果を図 7 に示す。データ点数は 200 点であり、測定時間は約 1 分であった。歪を印加した 50 cm の区間が明瞭に検出できた。また、歪の大きさに応じて BFS は低周波側にシフトし、その依存係数は $-115.3 \text{ MHz}/\%$ であった。次に、温度を変化させた場合の BFS の分布測定結果を図 8 に示す。やはり、温度を変化させた 50 cm の区間が明瞭に検出できた。BFS の温度依存係数は $-3.27 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ であった。

次に、cm オーダの空間分解能を実証した。光源の変調周波数を 53.4 MHz 付近で掃引し、変調振幅を 0.9 GHz とした。これは、7.4 cm の空間分解能に相当する。測定対象の POF の構造を図 9 に示す。1.3 m の POF の 10 cm の区間の温度を 40°C に設定した。室温は同様に 18°C、サンプリングレートは 3.3 Hz とした。測定したブリルアン利得スペクトルの分布を図 10 に示す。パワーは最大値で規格化した。また、これから BFS の分布を抽出したのが図 11 である。温度を変化させた 10 cm の区間を明瞭に検出することができた。このことから cm オーダの空間分解能を実証できたと言える。

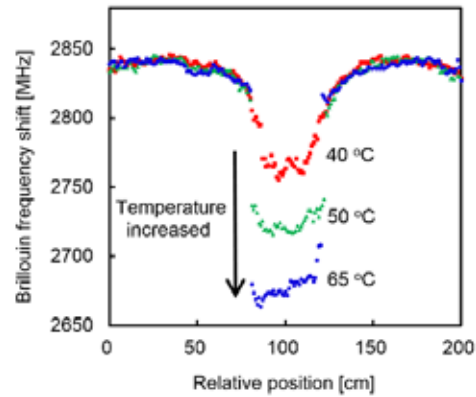


図 8. 温度を変化させたときの BFS の分布測定結果.

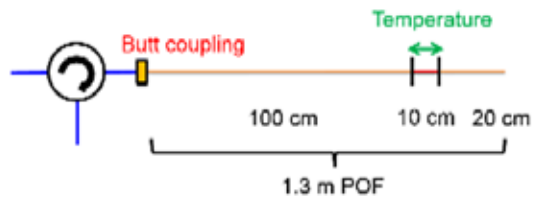


図 9. 被測定 POF (2).

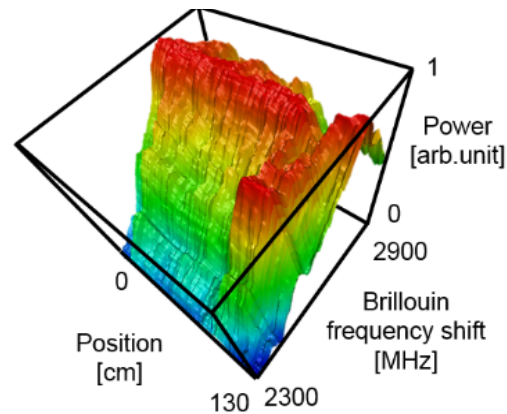


図 10. ブリルアン散乱スペクトルの分布測定結果.

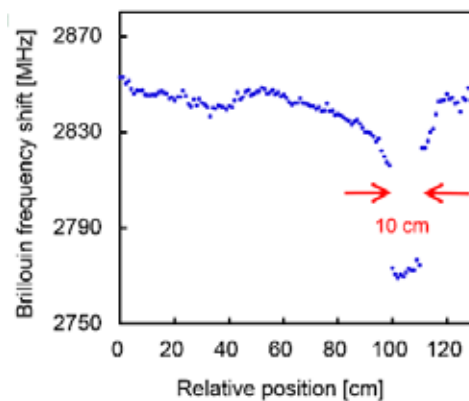


図 11. BFS の分布測定結果.

4. プラスチック光ファイバヒューズの観測

前章までに見てきた POF 中のブリルアン散乱を用いた分布型歪・温度センサの性能を向上させるための一つの方策は、その散乱光パワーを増強させることである。これにより、より信号対雑音比の高い測定や更なる高空間分解能の実現などが期待される。最も単純な手法は、入射光パワーを増強させることである。このようなモチベーションの下、本章では、入射光パワーの上限値を決定する重要な現象「光ファイバヒューズ現象」を POF 中で初めて観測することに成功したので、その詳細を記す。

光ファイバヒューズとは、高パワー光の入射により光ファイバが局所的に加熱され発生した輝点（閃光）が、光ファイバを破壊しながら光源に向かって伝搬する現象である。輝点が伝搬した後の光ファイバはコアが損傷し通信には使用できないため、ヒューズ現象は光ファイバ通信の容量限界を決定する要因の一つとされている。これまでに、ガラス光ファイバにおけるヒューズ現象については多くの報告がなされていたが、POF におけるヒューズ現象は報告されていなかった。

まず我々は、POF 中のヒューズ現象の観測に世界に先駆けて成功し、従来のガラス光ファイバ中のヒューズの値と比較して 1~2 桁低いヒューズ伝搬速度や 180 倍低い閾値パワー密度など、数々の特異な特性を明らかにした（図 12(a)–(c)）。続いて、顕微鏡観察（図 13, 14, 15）やスペクトル解析（図 16）を通じ、ヒューズ後には視覚的にも美しい螺旋状に

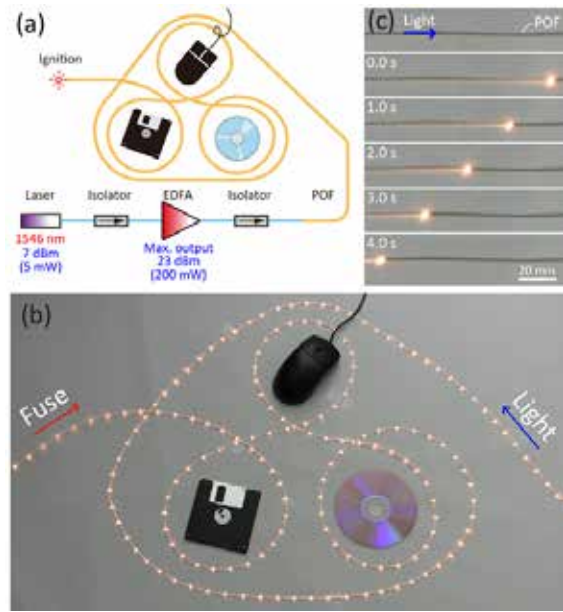


図 12. (a) POF ヒューズ現象観測のための実験系。(b) POF ヒューズが伝搬の様子。撮影した写真を 1 秒おきに重ねて表示した。動画 (http://www.youtube.com/watch?v=t0k_B6EOQhg) も参照。右側から光を入射したため、ヒューズは左側から伝搬した。(c) POF ヒューズ伝搬の様子の拡大図。

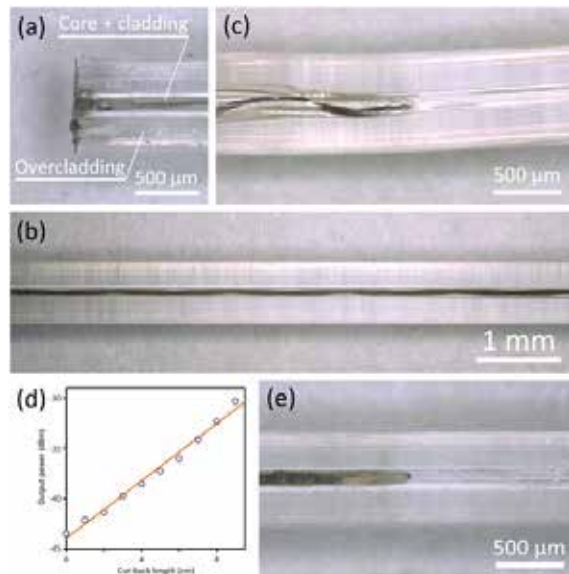


図 13. (a) ヒューズ発生箇所の POF 先端部の顕微鏡写真。(b) ヒューズ伝搬後の POF の様子。(c) 光パワーを落としてヒューズを止めた箇所の様子。(d) ヒューズ伝搬後の POF の光伝搬損失の測定結果（約 1.4 dB/cm）。(e) 金属リングの圧着を用いてヒューズの伝搬を止めたときの様子。

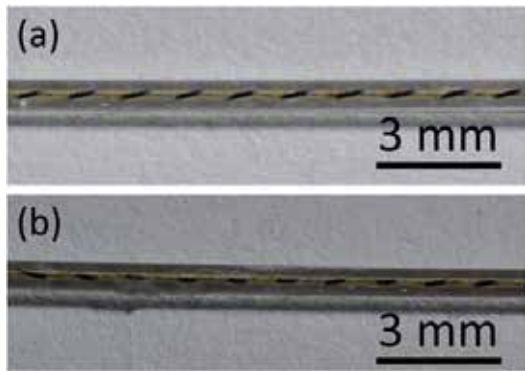


図 14. (a) 高パワーの入射光を用いたときのヒューズ伝搬後の POE の様子。屈折率傾斜型光ファイバ中の光の伝搬モードに基づく、螺旋状の炭化した線が観測された。(b) モード変換によって螺旋の向きが変わった箇所の様子。

振動する黒い炭化跡が残されることや、輝点の中心温度は 3600 K であり、その正体が従来言われてきたようなプラズマではなく熱輻射であることを実験的に証明した。また、これらの実験事実から、ガラス光ファイバとは大きく異なる POE ヒューズの発生・伝搬のメカニズムを解明するとともに、伝搬するヒューズを実時間で遠隔検出する手法を開発した。更に、ヒューズ後の POE は光と電気の両方を通す性質を有することを示し (図 13(d) など)、長い電気光学相互作用長を活用した各種デバイスへの応用可能性も提示した。

5. まとめ

BOCDR 法を用いることで、cm オーダの高空間分解能を有する POE 中のブリルアン散乱を用いた歪と温度の分布センシングを世界で初めて実証した。今後は、POE を用いることの最大のメリットである「記憶」機能の付与の実現を目指す。また一方で、POE センサの性能限界に影響する POE ヒューズ現象を初観測し、その性質を解明した。これら一連の研究成果は、光ファイバ分野のみならず材料・物性分野にも新しく重要な知見をもたらすものである。

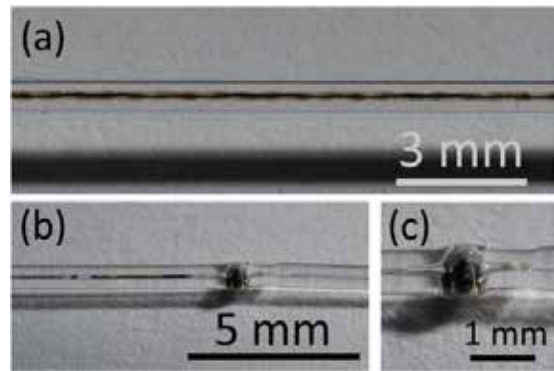


図 15. (a) 更に高パワーの入射光を用いたときのヒューズ伝搬後の POE の様子。螺旋状の線が消失した。(b) 気体発生により自発的に爆発し、ヒューズ伝搬が止まったときの様子。(c) その拡大図。

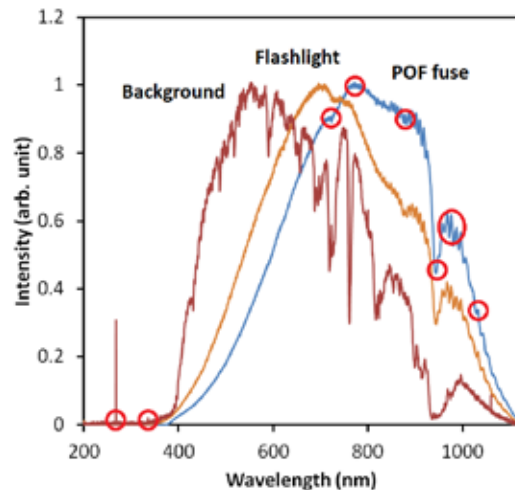


図 16. POE ヒューズの輝点からの放射スペクトル。背景光 (太陽光) と電灯のスペクトルと比較した。特徴的なピークが見られるが電灯のスペクトルと共通しており、プラズマとは言えないことを証明した。プランクの法則により POE ヒューズの輝点の中心温度は約 3600 K であることが分かる。

謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE 21 世紀財団の 2012 年度技術研究助成によって行われた。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 24, pp. 4132-4138 (2014).
- [2] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 6, 6803108 (2014).
- [3] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Appl. Phys. Express*, vol. 7, no. 11, 112501 (2014).
- [4] M. Ding, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Opt. Express*, vol. 22, no. 20, pp. 24706-24712 (2014).
- [5] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 5, 6802807 (2014).
- [6] N. Hayashi, K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 9, 091113 (2014).
- [7] Y. Mizuno, S. Ohara, N. Hayashi, and K. Nakamura, *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 19, pp. 1384-1386 (2014).
- [8] M. Ding, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *IEICE Electron. Express*, vol. 11, no. 18, 20140627 (2014).
- [9] G. Numata, N. Hayashi, M. Tabaru, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 5, 6802306 (2014).
- [10] H. Ujihara, N. Hayashi, M. Tabaru, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *IEICE Electron. Express*, vol. 11, no. 17, 20140707 (2014).
- [11] A. A. Jasim, N. Hayashi, S. W. Harun, H. Ahmad, R. Penny, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Sens. Actuat. A*, vol. 219, pp. 94-99 (2014).
- [12] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 21, pp. 3397-3401 (2014).
- [13] Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 16, pp. 1153-1155 (2014).
- [14] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, and K. Nakamura, *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 3, 6600307 (2014).
- [15] K. Minakawa, K. Koike, N. Hayashi, Y. Koike, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *IEICE Electron. Express*, vol. 11, no. 10, 1-7 (2014).
- [16] N. Hayashi, H. Fukuda, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 17, 173108 (2014).
- [17] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura, and S. Todoroki, *Sci. Rep.*, vol. 4, 4800 (2014).
- [18] K. Minakawa, N. Hayashi, Y. Shinohara, M. Tahara, H. Hosoda, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 4, 042502 (2014).
- [19] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura, and S. Todoroki, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 4, 043302 (2014).
- [20] K. S. Kim, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Ultrasonics*, vol. 54, no. 4, pp. 1047-1051 (2014).
- [21] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 25, pp. 1630-1632 (2013).
- [22] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *J. Lightwave Technol.*, vol. 31, no. 19, pp. 3162-3166 (2013).
- [23] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Appl. Phys. Express*, vol. 6, no. 7, 076601 (2013).
- [24] K. Minakawa, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Appl. Phys. Express*, vol. 6, no. 5, 052501 (2013).
- [25] Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 5R, 058003 (2013).
- [26] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 5, pp. 366-367 (2013).
- [27] Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 1, pp. 56-57 (2013).