

文部科学大臣賞

スローライトブラッグ反射鏡導波路を用いた
ビーム掃引デバイス

～世界最高解像度を誇る革新的な非機械式光ビーム掃引技術の開拓～

東京工業大学 総合理工学研究科 物理電子システム創造専攻
博士課程1年

顧 曉冬

1. 緒 言

情報技術は、我々の生活を支える不可欠な社会基盤になっており、多様な革新的イノベーションが我々の生活を大きく変革し、利便性など様々な果実もたらしてきた。現在の携帯端末を通しての動画配信など、爆発的に成長する情報化社会を支える光ファイバ通信も1960年代のレーザの発明や低損失ガラスファイバの開発など、技術革新から生み出された1つである。大容量光ファイバ通信システムの開発により、情報通信もインターネットの急速な普及を通して、音声から、画像、動画と情報量が急速に拡大している。このように、光エレクトロニクスは、通信ネットワークや情報処理の発展を支えてきた。

光ビーム掃引(スキャナー)デバイスは、図1に示すように、ディスプレイ、イメージセンサー、レーザレーダー、プリンター、光スイッチなど様々な光情報処理機器の基幹要素である。現在、ポリゴンミラー(多面体ミラー)などを機械的に高速回転することで高分解能ビーム掃引が実用デバイスとして広く使用されているものの、掃引速度が遅いことや小型化について限界がある。非機械的な光ビーム掃引の取り組みとして、電気光学結晶を用いたもの、フェーズドアレイ、位相同期レーザアレイ、フォトニック結晶レーザなどの研究が行われてきた[1-9]。特に最近では、光レーザレーダー応用で、北米DARPAによる高速ビーム掃引プロジェクト“SWEEPER”がスタートするなど、世界的にも新たな局面に入りつつある。

ビーム掃引の性能は、図2に示すように、遠方で観測したときに、いかに細かくビームを分解して掃引できるかを示す解像点数が重要となる。解像点数は、最大偏向角とビーム拡がり角の比 $N (= \theta_{\max} / \theta_{\text{div}})$ で定義される。すなわち、大きなビーム偏向角とともに、小さなビーム拡がり角が必要とされる。多くの実用システムでは、解像点数1,000以上の高解像度ビーム掃引が必要とされるが、これまでの非機械式ビーム掃引デバイスでは、いずれも解像点数100に満たないものばかりで技術的限界があった。

本研究では、光の群速度を遅くするスローライト導波路の巨大な構造分散を活用することで、大きなビーム偏向角とともに小さなビーム拡がり角を両立できることを見出した。スローライトは、現在、光素子の小型化、光遅延回路など様々な応用の観点からも研究が進められ

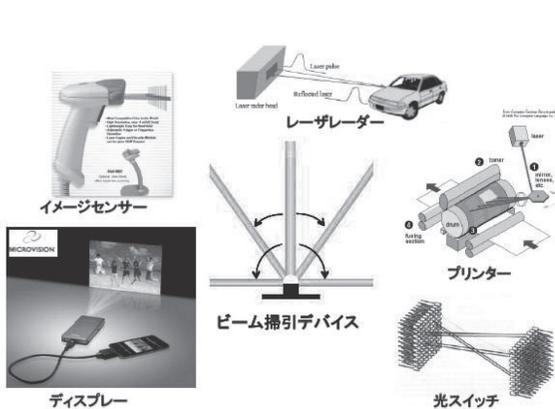


図1 ビーム掃引技術の様々な応用

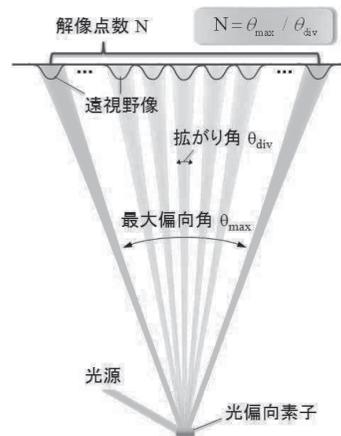
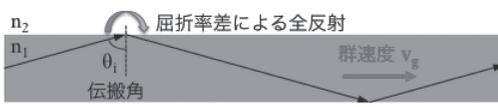


図2 ビーム掃引デバイスの性能指数

ている [10-19]. スローライト導波路の構造分散について着目してみよう. 図3は, スローライト導波路と, 通常の光ファイバなどの全反射を用いた光導波路の伝搬の様子を模式的に示している. 光線幾何学で示される光の伝搬角は, 導波路の屈折率差で制限されるため, 通常数度以内である. 一方, 全反射ではなく, $1/4$ 光学厚さの膜を周期的に形成した Bragg 反射鏡を用いた Bragg 反射鏡導波路 [19, 20] では, 伝搬角を 90° (つまり伝搬方向に対して垂直) に近いところまで大きくすることも可能である. このように大きな伝搬角でジグザグに伝搬する光に対しては, 光の伝搬方向での群速度は, 自由空間に比べて大きく群速度が低下することになる. このようなスローライト伝搬では, 伝搬方向と垂直方向の光の波数ベクトルは, 導波路のコア層の厚さで決まるため, 光の波長を変えると伝搬角が大きく変わる. すなわち巨大な構造分散がもたらされる. 著者らはこの巨大な構造分散を用いることで高解像度のビーム掃引が実現できることを見出した.

著者らは, 上記のスローライト導波路における巨大な構造分散を利用した新たな原理に基づくビーム掃引デバイス(図4)を提案し, そのデバイス設計と高解像度ビーム掃引についてデバイス製作と実験的検証を行ってきた [21-26]. 本技術は, 従来のビーム掃引技術の限界を打破し, 非機械式で, 小型, 高解像度, 高速のビーム掃引を可能とする新たな可能性を切り拓いた. 本小論では, Bragg 反射鏡導波路を用いた高解像度ビーム掃引デバイスの動作原理, 設計と素子製作, そのビーム掃引特性, およびその将来展開について述べる.

一般的な光導波



スローライド導波

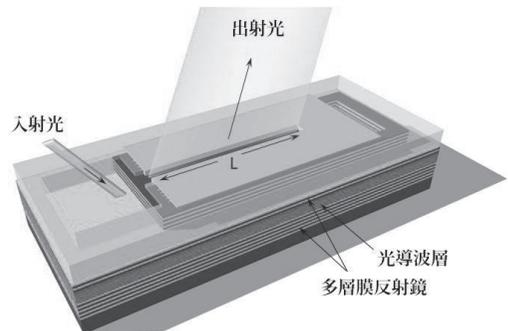
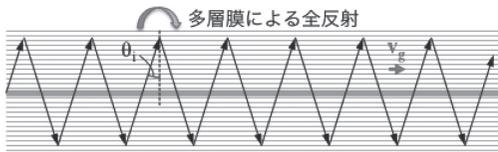


図3 Bragg 反射鏡導波路におけるスローライト伝搬

図4 提案する光ビーム掃引デバイス

2. 動作原理とデバイス設計

前節では, DBR 導波路におけるスローライトの伝搬を紹介した. 本節では, この導波路を用いたビーム掃引の動作原理について述べる. DBR の反射率は材料屈折率差と積層構造のペア数で決まり, そのペア数の増減することで, 所望の反射率を得ることが可能である. ここで, 一部の伝搬光を導波路表面から放射させるため, 上部 DBR のペア数は下部 DBR より少なく設定されている. 図5に, 伝搬光と放射光の幾何学的関係を示している. 放射される光は, 導波路(屈折率 n_{wg})と外部(ここでは空気)の屈折率差により, スネルの法則 ($n_{air} \cdot \sin \theta = n_{wg} \cdot \sin \theta_i$) が適用される. 図5に示すように, 伝搬角 θ_i は, 伝搬光の波数 κ , 導波路の遮断波長の波数 κ_c およびスローライト伝搬定数 β から決められる. これ

らのパラメータを使って、波数 k を波長 λ に替えることで、上部の自由空間に放射される光の偏向角 θ は次の式で示される。以下の式は、DBR 反射鏡を完全導体で近似した近似解析の結果であるが、次に述べる厳密解析とよく一致することを確認している。

$$\sin\theta = n_{wg} \times \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \quad (1)$$

(1) 式から、導波路の遮断波長 λ_c の近傍では、波長変化によって大きく偏向角 θ が変化することがわかる。

次に、フィルムモードマッチング法を用い、電磁界シミュレーションによる厳密解析を行った。図6は、Bragg 反射鏡導波路に異なる波長を持つ光を入射させ、スローライトを伝搬したとき導波路表面周囲の電界振幅分布の相対強度を示している。入射光の波長は 940 nm から 980 nm まで変化させた。空気中の光伝搬を見ると、入射光波長の変化に伴い、放射光の偏向角度は大きく変わることがわかる。例えば、遮断波長近傍から 40 nm 波長を変化させると、50度以上のビーム掃引が可能であることがわかる。1°/nm より大きな角度分散を持つことがわかった。ここで、計算の対象とした構造での遮断波長は 982 nm である。

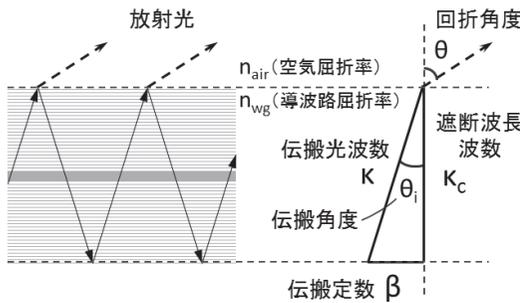


図5 ビーム偏向の原理

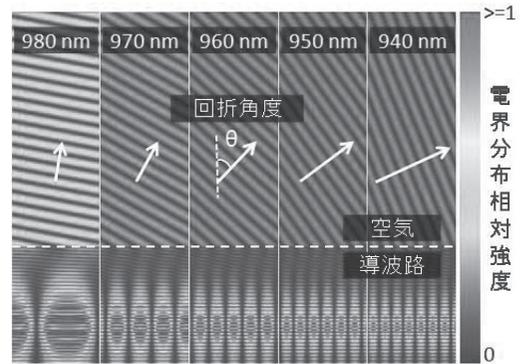


図6 波長掃引によるビーム偏向の計算結果

また、図6の図中で、明確な出力光電界の平行線が確認できる。これは、出力光の高コヒーレント性による平面波としての特性を持つことを示している。コヒーレント光では、ビーム拡がり角 θ_{div} は、放射するビーム幅 w に対して、 λ / w で近似的に求めることができ、放射ビーム幅 w 増加させることによって、ビーム拡がり角を小さくすることが可能である。Bragg 反射鏡導波路では、上・下部反射鏡の高反射率化によって、伝搬損失が極めて小さくし、放射するビーム幅 w を増大することができる。図7に、放射ビームの拡がり角と有効伝搬距離の関係を示す。右の軸は、異なる偏向範囲に対して、緒言に紹介したビーム掃引の性能指数である解像点数を示している。最大偏向角が40度の場合、数ミリメートルの有効伝搬距離が可能であれば、解像点数で1,000を超えることが可能になる。

次に図8に示すデバイス構造を設計した。図8の断面概略図のように、スローライトは左側のレンズファイバーから導波路に結合され、伝搬することができる。この結合方式は斜め入射結合方式と呼ばれている [19]。結合効率を最適するため、結合面をドライエッチングに

より形成し、8ペアのDBRを残している。計算上では、結合損失は3dB以下まで抑えることが可能である。導波路の上部・下部DBRはそれぞれ28、40ペアと設計し、コアの上には酸化狭窄層を利用して横方向の光閉じ込めを形成する。この酸化狭窄技術は同様な構造を有する面発光レーザに広く適用されている。結果として、損失伝搬を大幅に低減することが可能となり、長い有効伝搬距離を得ることができるようになった。

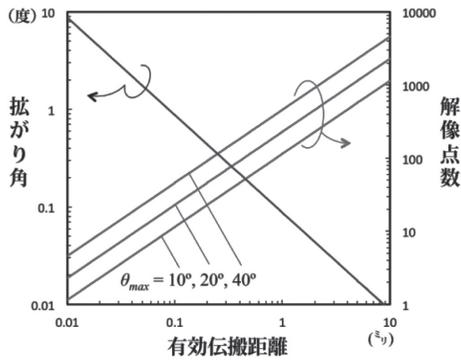


図7 ビーム拡がり角と解像点数

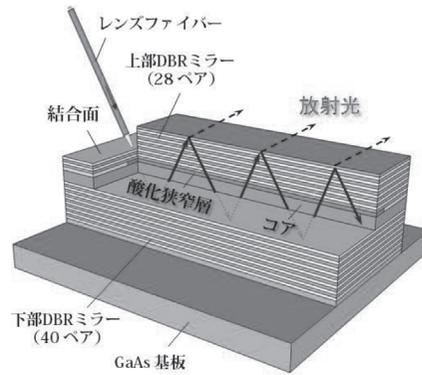


図8 Bragg 反射鏡導波路によるビーム掃引デバイス

3. 実験結果

前節で述べた構造設計に基づきデバイスの製作を行った。製作プロセスを図9に示す。有機金属気相成長法(MOCVD)により、1波長厚みのGaAsを上部・下部DBRそれぞれ28、40ペアの層構造で挟んだウェハ構造を成長した。続いて、2回のリソグラフィとドライエッチングプロセスにより、導波路メサ構造形成と光結合部形成を行った。水蒸気中で加熱することで選択酸化プロセスにより半導体中に Al_2O_3 を形成して導波路の横方向閉じ込め構造を

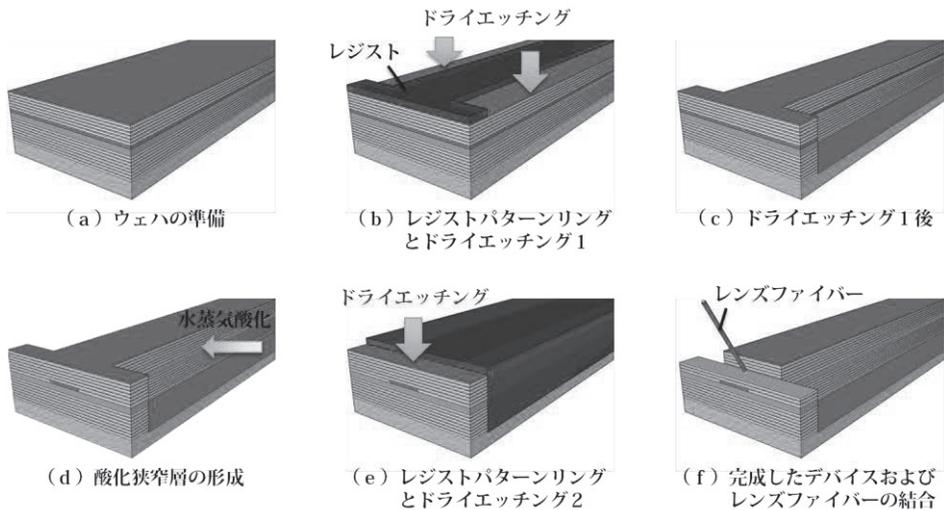


図9 製作プロセス

形成した。図10に製作したデバイスの顕微鏡写真を示す。写真は、素子長1mmで12本のアレイ状に配列したものである。本デバイスは、半導体プロセスにより高密度にアレイ状に配列できることも特徴として有しており、これは後述する光スイッチ素子への適用で大きな意味を持つ。ビーム掃引の測定には、素子長5mm、導波路幅 $6\mu\text{m}$ のものを用いた。

ビーム偏向の測定は、レンズ系により遠視野像をCCD上に投影する遠視野像測定系(図11)を用いた。その角度分解能は、 0.004° の高解像分解能を有する。Bragg 反射鏡導波路への光結合は、波長可変レーザからレンズファイバを通して、光結合部から斜め入射法により直接入射して結合した。レンズファイバの入射角、位置を精密に制御して結合損失を評価した。理論的な結合損失は約3dBであるが、本デバイスの実測値は約10dBであった。この値は、今後結合部分のエッチングの形状制御などで改善できるものと考えている。

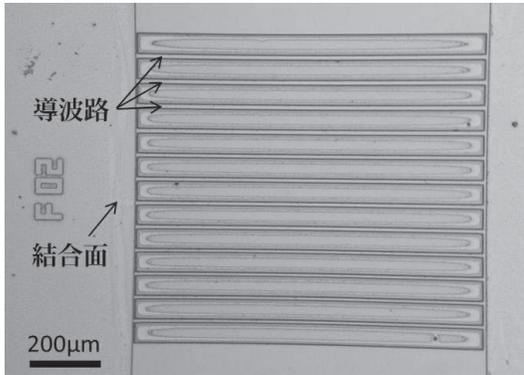


図10 製作した素子の顕微鏡写真

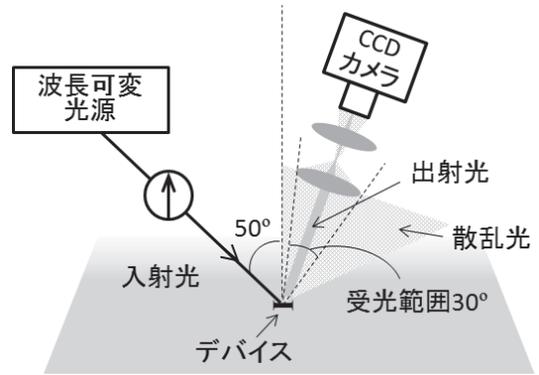


図11 遠視野像(ビーム偏向)測定系

図12は遠視野像の測定結果を示している。入射光の波長を952nmから989nmまで変化させている。入射光の偏光は、電界が基板と水平になるTEモードになるように設定した。波長変化に対して連続的に 60° 以上の大きなビーム偏向が得られた。図12に示すように、伝搬方向(x軸方向)に対しては、非常に小さなビーム広がり角が得られていることがわかる。これは前述したように、導波路の低損失伝搬により有効伝搬距離が長いため、回折限界により狭い出射ビームが得られるためである。それと直交方向は、導波路を伝搬するビームの横方向スポットサイズ(約 $5\mu\text{m}$)で決まっている。実際の応用システムでは、必要に応じてシリンドリカルレンズの使用によって円形ビーム変換することも可能である。また、現在の実験結果はデバイスの片端からの入射であるが、デバイス両端から入射することで、偏向角は2倍、すなわち、 120° ($-70^\circ \sim -10^\circ$ and $+10^\circ$ to $+70^\circ$)に拡大できる。

図13には、ビーム偏向角とビーム広がり角の測定値と計算値を波長に対して示している。実験結果と計算結果がよく一致していることがわかる。ビーム広がり角は、前節の述べたように、伝搬損失で決まる有効伝搬距離で律速されているが、本デバイスでは有効伝搬距離として数mmに及ぶことが近視野像の測定からも併せて確認している。図13から最小のビーム広がり角 0.025° 、958~986nmの波長範囲28nmにわたって、広がり角 0.04° の狭出射ビームが実現されていることがわかる。その波長範囲でのビーム偏向角 41° から、解像点数として1,000以上が得られ、非機械式のビーム偏向としては、従来方式を10倍以上凌駕する世界最高の高解像ビーム掃引を実現した。

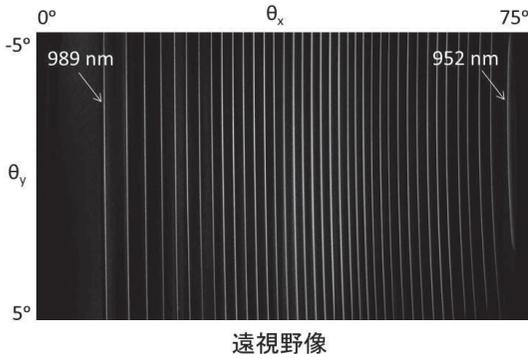


図12 波長を変化に対する遠視野像の変化

このような角度分散素子を用いてのビーム偏向技術について、他の方式との比較を図14に示す。通常の回折格子[27]、VIPA(Virtually Imaged Phased Array) [28]、AWG(Arrayed Waveguide Grating) [29]と本デバイスとの比較を示している。ビーム偏向角の大きさは、角度分散の大きさ $d\theta/d\lambda$ と有効波長帯域の積で決定される。例えば、通常の回折格子は、角度分散値 $d\theta/d\lambda$ は $0.05^\circ/\text{nm}$ 程度と本提案デバイスに比べて1/10以下であり、VIPAについては、有効波長帯域が1/10程度と小さい。結果として同じデバイス長(ビーム幅)に対して、解像点数を比較すると、本提案デバイスが10倍程度大きな値を有することがわかる。このように、大きな角度分散特性と大きな有効波長帯域により、小型で世界最高性能の高分解ビーム掃引特性がもたらされた。

4. まとめと今後の展望

本研究では、周期構造の超高反射率ミラーから構成される低損失 Bragg 反射鏡導波路を形成し、その巨大な構造分散を活用することで、従来の非機械式の光ビーム掃引の限界を打破する高解能光ビーム掃引デバイスを実現した。新規デバイスの構造提案を行い、そのビーム掃引特性を明らかにした。従来の回折格子と比べると1桁以上大きい巨大角度分散特性と100nmに及ぶ有効波長帯域を明らかにし、伝搬損失低減により、出射ビームの回折限界で決まる解像点数は理論的には、数千点にも及ぶことが明らかにした。

実際に、GaAs/AlGaAs系 Bragg 反射鏡導波路を半導体プロセス技術を駆使して、製作し、

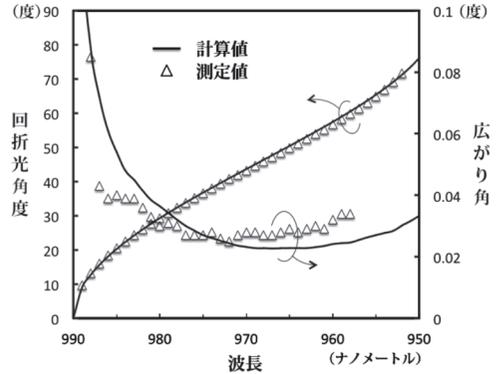


図13 波長変化に対する偏向角とビーム広がり角

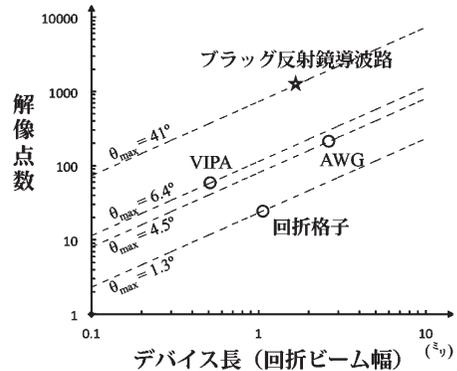


図14 デバイス長と解像点数の関係 (その他の角度分散素子との比較)

そのビーム偏向特性を明らかにした。偏向角 60° 以上におよぶ連続的なビーム偏向を実現するとともに、最小ビーム広がり角 0.025° の狭出射ビームを実現し、解像点数として1,000を越える超高解像ビーム掃引を達成した。これは、非機械方式のビーム掃引の解像点数としては世界最高である。現在の解像点数は、機械方式の最高性能には及ばないものの、導波路の伝搬損失をさらに低減して長尺化 cm オーダーまで行うことで、解像点数10,000の超高解像ビーム掃引に展開することも夢ではない。

最後に応用システムも含め、今後の展望をまとめる。

1) 巨大角度波長分散と超高解像度ビーム掃引への挑戦

超高反射率の多層膜反射鏡(Bragg 反射鏡)による低伝搬損失と巨大構造分散によるデバイスの小型化と高解像点数の両立が可能である。これまでに確立した高精度な薄膜形成技術による多層膜反射鏡技術により、出力ビームの広がり角低減による解像点数の限界(10,000点)への挑戦とイメージセンサー・レーザレーダーへの応用が期待できる。

2) 光通信ネットワークにおける超小型光合分波器・波長選択スイッチへの展開

光波長で経路切り替えを可能とする柔軟な光通信ネットワークでは、多数の波長を分波・合波する光合分波回路、さらには波長空間でのスイッチングを行う波長選択スイッチが必要とされている。本研究で実現された巨大な角度波長分散素子は、高密度のアレイ化も可能であり、自由空間光学系との組み合わせによるスケーラビリティの優れた大規模波長数に対応する超小型光合分波器(図14(a))・波長選択スイッチ(図14(b))への展開が期待できる。

3) 集積化と新機能創成

MEMS 技術との融合により、広帯域の波長可変面発光レーザが実現できる。既に横方向集積によるオンチップビーム掃引光源の初期動作も実証しており超小型ビーム掃引集積光源への展開が期待できる [30]。

また、本論文では直線導波路について述べてきたが、図14(c)に示すようにリング状導波路を形成することで、位相面がスパイラル状に振動する Vortex ビームの形成に成功している [31]。これは、多モード光ファイバ伝送における高速伝送やモード多重伝送などの道を切り開くと期待される。

4) 小型レーザディスプレイへの展開

本技術は、機械方式に依存しない高解像度ビーム掃引技術を提供するもので、図14(d)に示すように、可視光で R, G, B のレーザ光源に本技術を適用することで、非機械式の高精細ディスプレイへの展開も期待できる [32]。

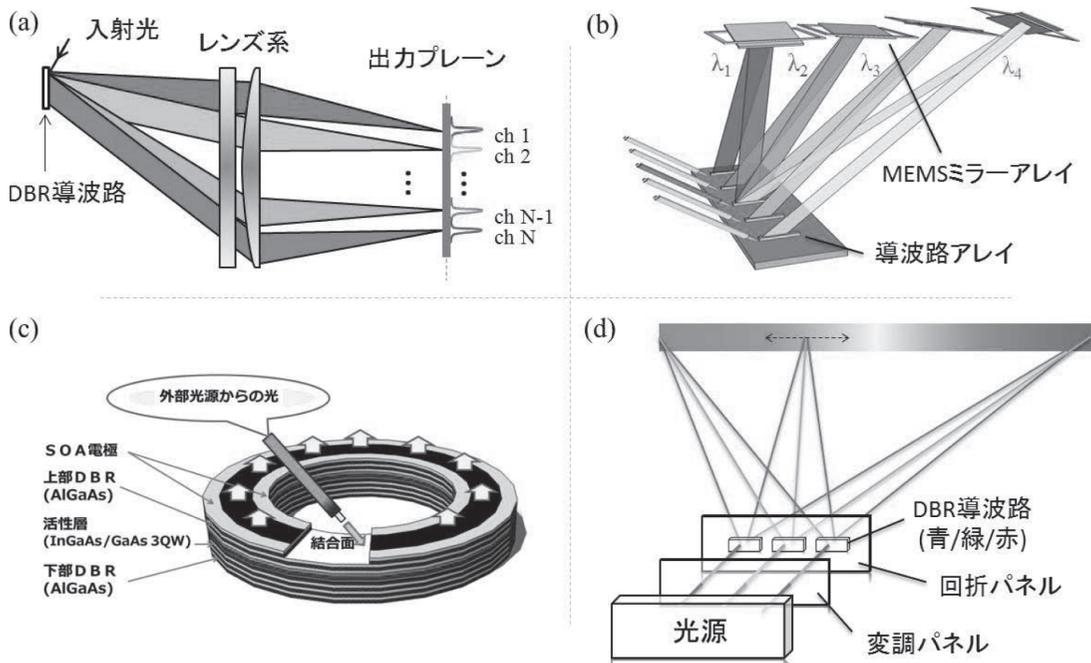


図14 本研究の高解像度ビーム掃引デバイスの応用展開

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始熱心なご指導を賜りました指導教官の小山二三夫教授に深謝いたします。また、本研究室においてこの研究を進める上でお世話になった松谷晃宏博士、坂口孝浩助教、島田敏和氏、今村明博博士(現古川電工)、淵田歩博士(現三菱電機)に感謝いたします。

参考文献

- [1] J. C. Wyant, Applied Optics, 14, pp.1057-1058 (1975).
- [2] T. Matsuda, F. Abe and H. Takahashi, Appl. Opt., 17, 878-884 (1978).
- [3] K. O. G. Varughese, and K.S.R. Krishna, Appl. Opt., 32, 1104-1108 (1993).
- [4] D. A. Scrymgeour, Y. Barad, V. Gopalan, K. T. Gahagan, Q. Jia, T. E. Mitchell and J. M. Robinson, Appl. Opt., 40, 6236-6241 (2001).
- [5] K. Nakamura, J. Miyazu, M. Sasaura and K. Fujiura, Appl. Phys. Lett., 89, 131115 (2006).
- [6] Y. Kurosaka, S. Iwahashi, Y. Liang, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda, Nature Photonics, 4, 447-450 (2010).
- [7] P. F. McManamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum, L. J. Friedman, D. S. Hobbs, M. Holz, S. Liberman, H. Q. Nguyen, D. P. Resler, R. C. Sharp, and E. A. Watson, Proc.

- IEEE, 84, 268-298 (1996).
- [8] J. A. Thomas, and Y. Fainman, *Appl. Opt.* 37, 6196-6212 (1998).
 - [9] F. Xiao, W. Hu, and A. Xu, *Appl. Opt.* 44, 5429-5433 (2005)
 - [10] R. W. Boyd, and D. J. Gauthier, *Progress In Optics*, 43, 497-530 (2002)
 - [11] E. Podivilov, B. Sturman, A. Shumelyuk, and S. Odoulov, *Phys. Rev. Lett.* 91, 083902 (2003).
 - [12] S. Residori, U. Bortolozzo, and J. P. Huignard, *Phys. Rev. Lett.* 100, 203603 (2003).
 - [13] T. F. Krauss, *Nature Photon.* 2, 448-450 (2008).
 - [14] Z. Shi, R. W. Boyd, D. J. Gauthier, and C. C. Dudley, *Opt. Lett.* 32, 915 (2007)
 - [15] U. Bortolozzo, S. Residori, and J. Huignard, *Laser Photonics Rev.* 4, 483-498 (2010)
 - [16] L. Thevenaz, *Nature Photon.* 2, 474 (2008).
 - [17] T. Baba, *Nature Photon.* 2, 465 (2008).
 - [18] T. F. Krauss, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40, 2666-2670 (2007).
 - [19] G. Hirano, F. Koyama, K.Hasebe, T. Sakaguchi, N. Nishiyama, C. Caneau and C-E. Zah. *OFC2007, PDP34*, (2007).
 - [20] P. Yeh, A. Yariv, and E. Marom, *J. Opt. Soc. Am.* 68, 1196-1201 (1978).
 - [21] X. Gu, T. Shimada, and F. Koyama, *Opt. Express*, vol. 19, no. 23, pp. 22675-22683 (2011).
 - [22] X. Gu, T. Shimada, A. Fuchida, A. Matsutani, A. Imamura, and F. Koyama, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 21, pp. 211107-1-3 (2011).
 - [23] X. Gu, T. Shimada, A. Fuchida, A. Matsutani, A. Imamura, and F. Koyama, *Electron. Lett.*, vol. 48 No. 6, pp. 336-337 (2012).
 - [24] M. Nakahama, X. Gu, T. Shimada and F. Koyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 51, 040208 (2012).
 - [25] X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, and F. Koyama. *Opt. Express*, vol. 20, no. 26, B331-338 (2012).
 - [26] X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, and F. Koyama. *IEEE Photon. J.*, Vol. 4, No. 5, pp. 1712-1719 (2012).
 - [27] D. R. Wisely, *Electron. Lett.*, 27, 520-521 (1991).
 - [28] M. Shirasaki, *Opt. Lett.* 21, 366-368 (1996).
 - [29] M. K. Smit, *Electron. Lett.*, vol. 24, 385-386 (1988).
 - [30] T. Shimada, A. Matsutani, F. Koyama, *IEEE Photonics Conference 2012, TuF2* (2012).
 - [31] 望月翔太, 島田敏和, 顧曉冬, 松谷晃宏, 小山二三夫, 電子情報通信学会2013年総合大会, C-3-11 (2013).
 - [32] X. Gu, M. Nakahama, and F. Koyama, *LDC2013, LDC3-4* (2013).