

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420359

研究課題名(和文)光ビーム走査アンテナ

研究課題名(英文)Optical beam scanning antenna

研究代表者

新井 宏之(Arai, Hiroyuki)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00193053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：光波帯での超高速無線データ通信の実現のために、高利得な光アンテナのビームを走査できるものとして、光の波長を1500～1600nmで走査する方式について光スイッチと組み合わせることで5つのビームを用いて±60度の広角走査を可能とするアンテナシステムについて、従来のグレーティング導波路に代わる新たにワッフル導波路を提案してその特性をシミュレーションにより確認した。また、提案アンテナの原理を確認するために、シリコンファウンダリーを利用することで試作を行い、高利得光アンテナのビーム走査が実現できることを実験的にも確認した。また、提案アンテナを用いた回線設計も行い光無線通信の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, an optical beam scanning antenna by a waffled waveguide is proposed for optical ultra-high speed wireless communication. The radiation pattern is steered in a range of ±60 degree by 5 switched beams and wavelength sweeping from 1500 to 1600 nm. The proposed antenna structure is simulated and fabricated by silicon photonics to verify its characteristics. The demonstrated results are promising work for optical wireless communication. The communication range is also presented using the proposed antenna system.

研究分野：電磁波工学

キーワード：光アンテナ ビーム走査 ワッフル導波路 シリコンフォトニクス 回線設計 漏れ波導波路

### 1. 研究開始当初の背景

単一モード光ファイバの伝送容量は、2008年当時では約 100Tbps が限界とされ、その要因は、大電力伝送によるファイバフューズ現象による破壊伝搬と非線形シャノン限界であった[1][2]。しかし、マルチコアファイバによる空間多重やモード多重伝送が実験的に確認され、2012年には伝送容量は 1.05Pbps に達し、近年の帯域・距離積は 1 Ebps・km を実現している[3]。光ファイバによる近年の伝送容量の増加は著しい。これに対して、携帯電話に代表される移動体通信では、1993年以降に導入されたデジタル方式による数 kbps であったデータ伝送速度が、2001年からの第3世代方式により 384kbps、2006年の3.5世代では 14Mbps、2010年の3.9世代で 100Mbps と上昇を続け、約20年間で105倍となっている。さらに、第4世代では低速移動時に 1Gbps を実現しており[4]、2020年に実現が期待される第5世代では 10Gbps 以上を目標としている[5]。一方無線 LAN では、ミリ波帯の WiGig において、ビームフォーミングアンテナを用いて 10m 程度の短距離で 7Gbps を実現している[6]。また、120GHz 帯を用いた 10Gbps のデータ伝送も報告されているが移動体向けの用途ではない[7]。しかし、スマートフォン等を用いた通信容量の増加は著しく、2010年から4年間で月間平均の通信トラフィックは10倍に増加しており[8]、近い将来に 1TBps 以上の伝送容量を実現することは必須である。

通信のチャネル容量は、SISO を前提にすると  $SN=30dB$  で  $10bps/s/Hz$  となり、テラビットを実現するには数百 THz の搬送周波数が必要となる。なお、MIMO を考えると100素子の受信アンテナが利用可能であればチャネル容量は  $1kbps/s/Hz$  まで増加するので、搬送周波数を低くできるが、端末機器に導入するのは容易ではない。そこで、光領域での無線通信が必要となる。光無線として Free Space Optics (FSO) では  $0.3\sim 14\mu m$  の大気窓を利用した光ファイバ回線のバックホールとして使用され[9]、雨等による減衰が問題となるが、最大で 10Gbps の伝送容量が得られる[10]。このときの伝搬損失はレイリー散乱が支配的で、波長  $\lambda=1.5\mu m$  で 1km 当たり 9.45dB である。

一方、近距離用途には赤外線通信があり、Infrared Data Application (IrDA)、DATA 1.4 では、1m で 16Mbps、Ultra Fast IR (UFIR) で 100Mbps、また Giga-IR として 1Gbps のものが規格策定中である[11]。また、規格として統一されていないが、赤外線リモコンでは  $5\sim 10m$  の距離で  $300\sim 1200bps$  のデータ伝送が可能である。この他には LED による可視光通信が開発されており、伝送速度は数 Mbps~100Mbps で Gbps までの拡張が期待されている[12]。

### 2. 研究の目的

無線でのテラビットの伝送容量を目指すために、光波帯で高利得のビーム走査アンテナと高速の光変調器の開発が不可欠である。光変調器は多値変調による 100Gbps の伝送容量を実現する小型変調器が Si フォトニクス結晶のスローライト効果を用いて開発されている[13]。そこで本研究では、まず光アンテナの利得を短距離の回線設計から必要な値を求め、その利得を実現できるアンテナ構造とビームの広角操作法を検討する。

以上のように、テラからペタビットの無線データ伝送を実現するためのキーデバイスである光ビーム走査アンテナを実現することが本研究の目的であり、漏れ波アンテナにより広範囲にビーム走査できる新しい構造の光アンテナを実現させる

### 3. 研究の方法

本研究の第一段階として光短距離無線通信における伝搬距離とアンテナ利得について検討した。ビーム走査用に波長可変レーザを用いることを前提とし、システムの簡単化のため受信側ではビーム走査を行わないもの考える。受信用のフォトダイオードとして既存の製品としてある長波長 InGaAs フォトダイオードの特性を考慮し(受光径  $300\mu m$ )[14]、信号検出には暗電流  $I_D(A)$  に 20dB を加えた電力が必要と仮定する。また、入力電力は JIS 規格のレーザ製品安全基準である  $1\sim 5mW$  を目安とする[15]。

電力と利得を  $P_i, G_i$  ( $i=t$  が送信,  $i=r$  が受信)とし、フォトダイオードの受光面積を  $A(m^2)$ 、受光感度を  $R(A/W)$  とすれば伝送距離  $d(m)$  は自由空間の伝搬損失から求められ、フォトダイオードの受信利得を、簡単のため 0dBi とし、送信アンテナ利得に対する伝搬距離を計算したものが図1である。

この結果よりレーザの安全基準 Class 2(可視光の基準)である 1mW から、不可視光を含む Class 1M での 5mW を許容出力とすると、伝送距離は送信アンテナ利得が 30dB で  $0.7\sim 1.7m$ 、40dB で  $2.4\sim 5.3m$  となる。以上より、短距離光無線通信の送信アンテナ利得として 30~40dB を目安として検討を行う。

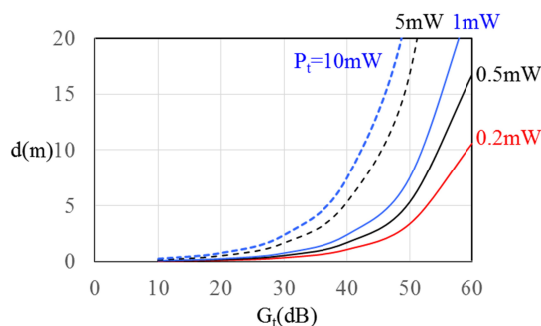


図1 送信アンテナ利得と伝搬距離

光アンテナのビーム走査として、MEMS (Micro Electro Mechanical system) と反射鏡、偏光板、オプティカルアレイ (OPA) 等があり[16], 文献[17]では OPA を絶縁膜が内包されたシリコンウェハ(SOD)上に集積化し、入力波長を変化させてビーム走査を行う方法が提案されている。また、グレーティング導波路を用いたフェーズドアレイ構成で二次元ビーム走査が検討されている[18][19]。これらの用途は通信や計測であるが、指向性利得についての検討が少ない。

本研究で想定している、高速動作が可能な波長可変レーザの可変帯域は 1510 ~ 1620 nm[20], 1490 ~ 1650 nm[21]のように 100 nm 程度であることを前提とすると、高利得の漏れ波アンテナの実現には、導波路に与える摂動を十分小さくしてアンテナの開口長を長くする必要があるので、シリコンフォトニクスによって導波路を作成するが、厚みが 210nm のシリコン導波路は厚さ 2 $\mu$ m の二酸化ケイ素(SiO<sub>2</sub>)の基板で挟まれた構造で導波路に形成されるパターンの深さが 70nm と固定される。グレーティング導波路では溝幅を小さくすれば良いが、加工上の制限もあり図 2 に示す正方形孔を並べたワッフル導波路を新たに検討した。また、リブ型導波路にグレーティングを直交させることで、開口分布制御を行うアンテナも提案されている[23]。

図 2 のパラメータを用いた漏れ波アンテナの指向性利得の計算結果を図 3 に示す。ここで、z 軸方向の周期は 2000, y 軸方向は 20 である。なお、グレーティング導波路を形成するときは y 軸方向に一樣な構造とし、計算は CST MW-STUDIO を用いている[24]。これから明らかなように、ワッフル導波路ではグレーティング導波路と比較して 10dB 以上の利得向上が得られる。また、ワッフル導波路では 35dBi 以上で、短距離無線通信用として十分な値である。

ワッフル導波路による光漏れ波アンテナではビーム走査範囲が 10 度程度と小さい。そこで、複数のパラメータを持つアンテナを切り替えることでビーム走査範囲を拡大する手法を提案し、切り替え用のマッハツェンダー(MZ)型スイッチの検討も行った。

設計した光アンテナの特性を確認するため、外部のファウンダリーに委託し試作したアンテナを図 4 に示す。ワッフル導波路により高利得化を確認するために、グレーティング導波路も同時に試作し、その特性を比較した結果が図 5 である。チューナブルレーザによって導波路に入力する波長を 1480 ~ 1590nm と変化させることでアンテナから放射される指向性がスキャンされていることが確認できる。また、ワッフル導波路からの放射はビームが狭くグレーティング導波路より指向性利得が向上していることも確認した。

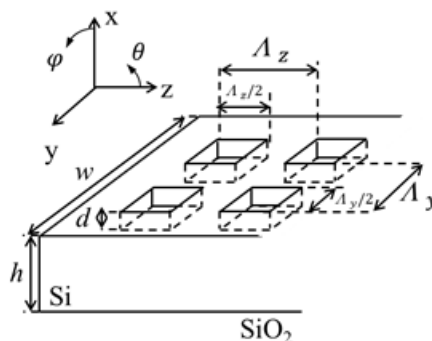


図 2 ワッフル導波路のパラメータ

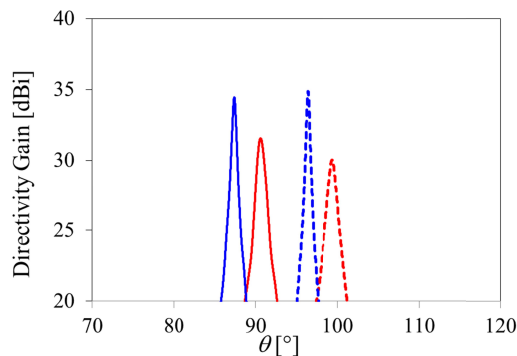


図 3 漏れ波アンテナの指向性利得

青線はワッフル、赤線はグレーティング導波路、実線  $\lambda=1500$ nm, 破線  $\lambda=1600$ nm,  $h = 0.12$ ,  $d = 0.07$ ,  $\Lambda_z = 0.57$ ,  $\Lambda_y = 0.24$ , [ $\mu$ m],  $N_y = 20$ ,  $N_z = 2000$ .

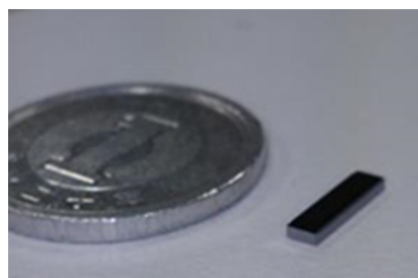
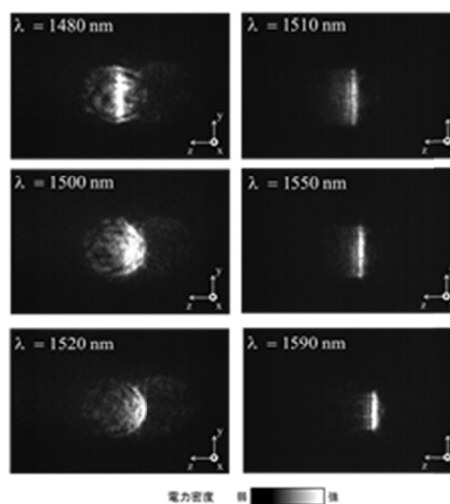


図 4 試作したワッフル導波路



(a)グレーティング (b)ワッフル

図 5 試作アンテナのビーム走査特性

#### 4 . 研究成果

本研究では超高速の無線データ伝送を可能とする光短距離無線通信について、高利得アンテナを用いたシステムを用いることで短距離通信が実現できる可能性を示した。また、高利得なビーム走査アンテナとしてワッフル導波路による光漏れ波アンテナをシリコンフォトニクスにより製作するためにシミュレーションを行い 35dBi 以上の高利得でビーム走査が可能なることを明らかにした。さらに、試作によりアンテナの基本特性について確認した。

#### 文 献

- [1] 中沢正隆, “光通信インフラの限界に挑戦する,” ITU ジャーナル, vol. 39, no. 5, pp. 3-4, May 2009.
- [2] T. Morioka, “New generation optical infrastructure technologies: “EXAT initiative” towards 2020 and beyond,” Optoelectronics and Communication Conference (OECC), FT4, July 17, 2009.
- [3] [www.nict.go.jp/press/2015/03/26-1.html](http://www.nict.go.jp/press/2015/03/26-1.html)
- [4] [www.nict.go.jp/press/2015/03/26-1.html](http://www.nict.go.jp/press/2015/03/26-1.html)
- [5] [www.soumu.go.jp/main\\_content/000282113.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000282113.pdf)
- [6] [www.wi-fi.org/](http://www.wi-fi.org/)
- [7] 永妻, 枚田, “120 GHz 帯を利用した 10 Gbit/s 無線技術,” NTT 技術ジャーナル, pp. 36-39, 2004.9.
- [8] [www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/index.html](http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/index.html)
- [9] H. Henniger and O. Wilfer, “An introduction to free-space optical communications,” Radioengineering, Vol. 19, No. 2, pp.203-211, June 2010.
- [10] [wcn.eurasipjournals.com/content/2012/1/91](http://wcn.eurasipjournals.com/content/2012/1/91)
- [11] [www.irda.org](http://www.irda.org)
- [12] vlca.jp, 一般社団法人可視光通信協会。
- [13] 北條他, “楕形 pn 接合を搭載したフォトニック結晶小型シリコン QPSK 変調器”, 応用物理学会春季講演会, no. 12a-A16-5, Mar. 2015.
- [14] [www.kyosemi.co.jp/sensor/nir\\_photodiode/](http://www.kyosemi.co.jp/sensor/nir_photodiode/)
- [15] [kpde030](http://kpde030)
- [16] [kikakurui.com/c6/C6802-2011-01.html](http://kikakurui.com/c6/C6802-2011-01.html)
- [17] P. F. McManamon, et al., “A review of phased array steering for narrow-band electro optical systems”, Proc. IEEE, vol.97, no. 6, pp.1078-1096, Jun. 2009.
- [18] Karel Van Acoleyen, et al., “Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator”, Opt. Lett., vol. 34, no. 9, pp.1477-1479, 2009.
- [19] Karel Van Acoleyen, et al., “Two-dimensional dispersive off-chip beam scanner fabricated on silicon on insulator”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.

23, No. 17, Sep., 2011.

- [20] J. K. Doylend et al., “Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-insulator”, Optics Express, Vol.19, No.22, 2011.
- [21] [www.newport-japan.jp/pdf/92.pdf](http://www.newport-japan.jp/pdf/92.pdf)
- [22] [www.cornestech.co.jp/images/uploads/file/products/pdf/tunable\\_laser.pdf](http://www.cornestech.co.jp/images/uploads/file/products/pdf/tunable_laser.pdf)
- [23] Q. Song, et al., “Silicon-based optical leaky wave antenna with narrow beam radiation,” Opt. Express 19, 8735-8749, 2011.
- [24] [www.cst.com/Products/CSTMWS](http://www.cst.com/Products/CSTMWS)

#### 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 13 件)

- 橋口 弘、新井宏之、近藤圭祐、馬場俊彦、“グレーティング及びワッフル導波路を用いた光通信用漏れ波アンテナの減衰定数による評価” B-1-118, 2016年3月総合大会, 九州大学。
- 山本将司、橋口 弘、新井宏之、“円形ワッフル導波路の放射特性” B-1-119, 2016年3月総合大会, 九州大学。
- 蘆原 成、新井宏之、“Si細線導波路フェーズドアレーを用いた光通信用2次元ビーム走査型漏れ波アンテナに関する検討” B-1-120, 2016年3月総合大会, 九州大学。
- Hiroyuki Arai, “Optical beam scanning antenna for ultra high speed short range communication system,” 2016 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP2016), Busan, Korea, Invited Session, Jan. 27-29, 2016.
- Hiroshi Hashiguchi, Hiroyuki Arai, Keisuke Kondo, and Toshihiko Baba, “Optical Leaky Wave Antenna Using Waffle Waveguide,” 2015 IEEE International Workshop on Electromagnetics (iWEM2015), Hsinchu, Taiwan, POS2.3, Nov. 16-18, 2015.
- Hiroyuki Arai, Hiroshi Hashiguchi, Keisuke Kondo and Toshihiko Baba, “2D Beam Scanned Optical Leaky Waveguide Antenna,” International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2015), Hobart, Tasmania, Australia, Nov. 9-12, 2015
- 蘆原成、新井宏之、“Si細線導波路を用いた光無線通信用ビーム切り替えアンテナ,” BS-1-10, 2015年9月総合大会, 東北大学。
- 橋口 弘、新井 宏之、近藤 圭祐、馬場 俊彦、“ワッフル導波路を用いた光通信用漏れ波アンテナの性能評,” BS-1-11, 2015年9月総合大会, 東北大

学 .

Hiroyuki Arai and Yodai Morimoto,”  
Optical Beam Scanning Antenna by  
Waffled Leaky Waveguide,” 2015  
IEEE AP-S Symposium on Antennas  
and Propagation and URSI  
CNC/USNC Joint Meeting  
(AP-S/URSI2015), Vancouver, BC,  
Canada, TUP-A1.2A.9, pp.2049-2050,  
July 19-24, 2015.

新井宏之, 森元陽大, “ワッフル導波路  
による光漏れ波アンテナ”, 電子情報通  
信学会アンテナ・伝播研究会, AP32,  
AP2014-144, 2014年11月, 山形大学

Yodai Morimoto and Hiroyuki Arai,  
“Wide Angle Beam Scanning Leaky  
Wave Antennas for Optical wireless  
communication,” 2014 Asian  
Workshop on Antennas and  
Propagation (AWAP2014), Kanazawa,  
Japan, Poster Session 1-16, May  
15-16, 2014.

森元陽大, 新井宏之, “光通信用ビーム  
走査型誘電体漏れ波アンテナ用MZ型  
波長無依存スイッチの設計,” B-1-182,  
2014年3月総合大会, 新潟大学 .

森元陽大, 新井宏之, “光通信用ビーム  
走査型誘電体漏れ波アンテナに関する検  
討”, B-1-58, 2013年9月ソサイエティ  
大会, 福岡工業大学 .

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

新井 宏之 (ARAI, Hiroyuki)  
横浜国立大学・工学研究院・教授  
研究者番号 : 00193053