

60GHz 帯空間多重無線信号分離・光信号変換デバイスの開発

Development of wireless-optical signal conversion devices with discrimination of space-division-multiplexing signals operating in 60 GHz band



村田 博司 (Hiroshi MURATA, Dr. Eng.)
大阪大学大学院 基礎工学研究科 准教授

(Associate Professor, Graduate School of Engineering Science, Osaka University)

電子情報通信学会 応用物理学会 日本光学会 レーザー学会 IEEE OSA EuMA

受賞：国際会議 EuMC Microwave Prize (2005 年度) 国際会議 IEEE Photonics Global Singapore 2008 最優秀論文賞 (2008 年度)

著書：村田博司 (分担執筆)：“分極反転デバイスの基礎と応用”，宮澤信太郎，栗村直 編，オプトロニクス社 (2005) 村田博司 (分担執筆)：“レーザーハンドブック (第 2 版)”，レーザー学会 編，24.2 光変調素子，オーム社 (2005)

研究専門分野：光エレクトロニクス マイクロ波フォトニクス

あらまし ミリ波帯無線通信のためのアレイアンテナ電極光変調器について紹介する。平面アンテナと共振型変調電極とを結合させたアンテナ電極を光導波路に沿ってアレイ状に配置すると、フェーズドアレイアンテナのような指向性を持つ無線信号-光信号変換デバイスを実現することができる。さらに、強誘電性光学結晶の自発分極反転技術を適用すれば、無線信号-光信号変換の指向性を自在に設定することもできる。外部電源が不要であり、5G 無線通信やミリ波レーダー等で有用と考えられる。本稿では、60GHz 帯での動作実験結果について述べる。

1. はじめに

無線通信技術の社会への浸透には目を見張るものがある。国内のスマートフォン・携帯電話等の契約数は、既に 1 億 5 千万台を超えて、なおも増加傾向にある [1]。無線 LAN/WiFi の Hot Spot は、街の至る所で見られるようになり、無線決済システムの利用も進んでいる。自動車や一般家庭にもさまざまな無線機器が普及しており、さらに、無線通信技術を駆使したネットワーク

ロボットや M2M (Machine-To-Machine)、D2D (Device-To-Device)、IOT (Internet of Things) が注目を集めている。第 5 世代 (5G) 無線へ向けて、無線通信技術は一層の広がりを見せている [2]-[4]。特に、日本では、2020 年の東京オリンピック・パラリンピックを旗印に、無線通信技術の研究開発が加速している。

しかし、無線通信のための周波数資源はマイクロ波帯では枯渇状態であり、今後は搬送波周波数をミリ波帯へ移行させることが不可避となっている。それゆえ、多種多様なミリ波無線信号を、自由自在に伝送・交換・制御するための伝送技術・制御技術の開発が重要となっている。

ミリ波帯においては、大気での伝搬損失が大きくなるので、無線通信におけるセルサイズがマイクロ波帯に比べて小さくなる (スモールセル、ピコセル等と呼ばれる)。これは、同じ搬送波周波数を異なるセルに割り当てることが容易となるため、周波数資源利用効率の点で有利と言えるが、システム全体の構成を考える際には工夫が必要となる。5G 無線を既存 3G/4G あるいは WiFi 等と併用するという方法は、この対応策の 1 つであるが、ミリ波無線を光ファイバー網とリンクさせて光ファイバーを介してミリ波無線あるいは IF 信号を遣り取りする光ファイバー無線 (Radio-over-Fiber : RoF) 技術を活用する方法も有力である [4]-[6]。マイクロ波帯の RoF は、地下街やビル内での携帯電話中継技術としてすでに実用化されているが、ミリ波帯 RoF は発展途上段階にある。

筆者らのグループは、高速電気光学変調器と平面アンテナとを融合させた無線・光信号変換デバイスを提案している [7]-[9]。このデバイスは、ミリ波無線 RoF システムにおいて有用と考えられる。特長としては、アンテナアレイの構成やデバイスの基板を工夫することで、複数の無線信号を受信して、信号の到来方向毎に異なる光信号に分離することができることが挙げられる。つまり、1 つのアレイアンテナの構成のみで、複数チャンネルのフェーズドアレイアンテナと同じ機能が得られる。デバイスの構成はシンプルでかつパッシブ (外部電源不要) であり、レーザー光を供給するだけで複数の無線信号が到来方向毎に分離されて、それぞれ異なる光信号に変換されて出力される。5G 無

60GHz 帯空間多重無線信号分離・光信号変換デバイスの開発

Development of wireless-optical signal conversion devices with discrimination of space-division multiplexing signals operating in 60 GHz band

線通信システムやミリ波レーダー等への応用が期待できる。

本稿では、低誘電率ガラス基板を用いたミリ波帯アンテナ電極光変調器の設計と最新の実験結果[10] について紹介する。

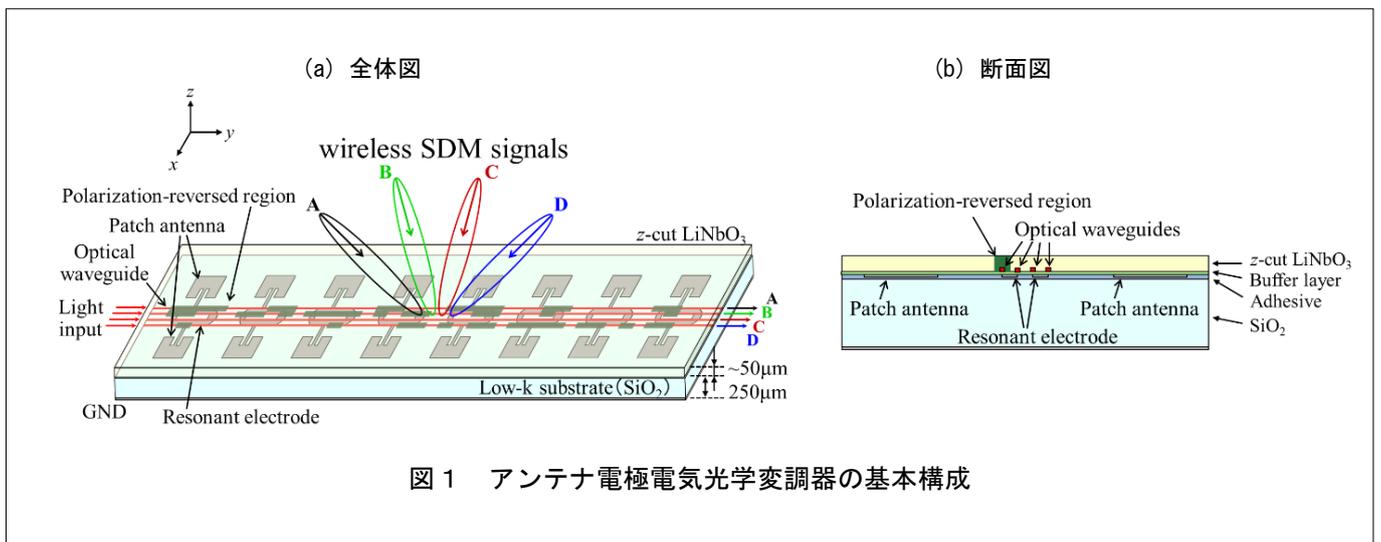
2. アンテナ電極光変調器の構成と動作原理

図1に筆者らが提案しているアンテナ電極光変調器の基本構成を示す。平面アンテナと定在波共振型電極を直結させたアンテナ電極を、光導波路に沿ってアレイ状に並べた構成である。定在波共振型電極の上部には、複数本の光導波路を作製した電気光学結晶薄膜(厚さ ~50 μm) を装荷してある。アンテナ電極で受信した無線信号は定在波共振型電極に送られ、設計周波数において共振型電極に沿って定在波電界が生じる。この電界によって、電気光学結晶中に屈折率変化が誘起される。電気光学効果による屈折率変化がミリ波周波数で振動するために、光導波路中を伝搬する光波はミリ波周波数で位相変調されることになる。このアンテナ電極光変調器の動作のポイントは、光波が伝搬する時間内の変調信号の位相変化(光波走行時間効果と呼ばれる)を利用していることである。光波の伝搬速度は極めて速いが、無線信号の周波数も60GHz程度とかなり高いために、たかだか数mm光波が伝搬する間に無線信号の位相が変化して、変調電極における電界の極性が反転してしまう。つまり、変

調器内を光波が伝搬する時間内における信号の位相変化を考慮する必要がある。一方、この走行時間効果を上手く利用すると、面白い特性を得ることができる。たとえば、アンテナ電極の間隔を適切に調節すると、光波がアンテナ電極間を伝搬するのに要する時間をミリ波信号の1周期に合わせることができる。この間隔でアンテナ電極を等間隔に並べたりニアアレイ構成を用いて、すべてのアレイアンテナを同じタイミングで励振・振動させると、光波が各アンテナ電極を通過する際に常に同じ極性の光変調を受けることになり、累積的な光変調作用が得られる。この状況は、すべてのアンテナで受信した信号を同相で合成するフェーズドアレイアンテナと同じである(光波走行時間効果による時間遅延を利用しているため、同時刻性は失われているが、通常のミリ波無線やレーダーではこの程度の時間遅延は問題にならない)。このデバイスでは、通常のアレイアンテナにおける面倒な信号合成回路が不要である。信号合成における遅延線路の損失・結合の問題が生じないために、アレイアンテナで受信した無線信号をほぼ理想的な条件で合成することができる。

3. 分極反転による指向性制御

このアンテナ電極光変調器の動作におけるもう1つのポイントは、複数の光導波路と分極反転技術(電気光学結晶の持つ自発分極の極性を自在に反転させる技術)を用いることによって、フェーズドアレイとして



60GHz 帯空間多重無線信号分離・光信号変換デバイスの開発

Development of wireless-optical signal conversion devices with discrimination of space-division multiplexing signals operating in 60 GHz band

の機能を多重化できることである。光波の波長はミリ波の 1/1000 程度であるために、ミリ波共振型電極に沿って複数本の光導波路を平行に設置して、それぞれの光導波路中を光波が結合することなく独立に伝搬させることができる。(図 1 では、4 本の光導波路を共振型電極のエッジ部分(強い電界が誘起される部分)に設置してある。)そして、それぞれの光導波路には、異なる分極反転構造を導入することができる。

分極反転構造を導入しても、(線形な)光学特性およびミリ波特性は変化しないが、電気光学効果の符号が反転する。つまり、光波走行時間やアンテナとしての特性は変わらないが、無線信号-光信号変換における相互作用の極性だけが、局所的に選択的に反転することになる。それゆえ、光波走行時間を利用した無線信号合成回路に、いわば、フィルター回路としての特性を付加することができる。光導波路毎にフィルター回路の特性を変えることで、無線信号-光信号変換の指向性を選択的に変えることができる。

図 2 に指向性制御の例を示す。図 2 では、自発分極を反転させた領域を緑色で示してある。分極反転構造を変えることで、無線信号-光信号変換の指向性を調節することができる。図 2 は、8 つのアンテナ電極からなるリニアアレイの構成を用いて、無線信号変換の効率が 15 度ずつ異なるようにした場合の例である。空間多重無線信号の分離が可能であることがわかる。この場合は、空間多重信号の分離比は 13dB となる。これは、理想的なリニアアレイの特性と同じである。

4. 設計

アンテナ電極光変調器において、アンテナ電極を構成する平面アンテナおよび共振型電極は、いずれもミリ波に対する共振器である。したがって、設計においては、両者の共振周波数と入力・出力インピーダンスを合わせることが重要である。それゆえ、3次元電磁界シミュレーター HFSS を用いて、両者の正確な解析・設計を行っている。紙面の都合上、解析・設計の詳細は省略するが、図 1 に示すガラスと電気光学結晶とを貼合わせた構造の基板を用いることで、設計の自由度を増やして、アンテナの利得と共振電極の Q 値を高めた状態で、共振周波数とインピーダンスを合わせるようにしている[8]。図 3 の設計例では、デバイスに照射される無線信号電界の約 220 倍の強さの電界が変調電極上に誘起される。

5. 試作・動作実験

アンテナ電極光変調器の試作・実験についても紹介する。作製の工程を図 4 に示す。これらの工程は、すべて大阪大学岡村研究室で行った。ベースとなる基板には、石英ガラス(厚さ 250 μm)を用いて、その上部に電気光学結晶 LiNbO₃(厚さ 250 μm)を紫外線硬化接着剤で貼付した後、光学研磨により LiNbO₃結晶を 50 μm まで研磨している。光導波路およびアンテナ電極は、ガラスと結晶の貼合せ面に作製してある。作製したアンテナ電極光変調器の写真を図 5 に示す。

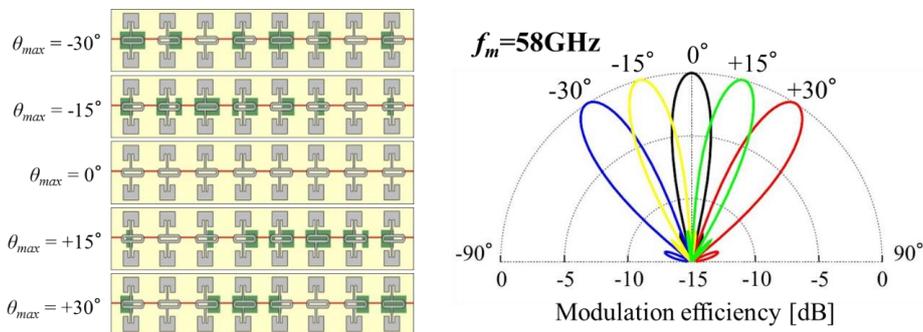


図 2 分極反転構造を変えたときの無線信号-光信号変換の指向性の変化

60GHz 帯空間多重無線信号分離・光信号変換デバイスの開発

Development of wireless-optical signal conversion devices with discrimination of space-division multiplexing signals operating in 60 GHz band

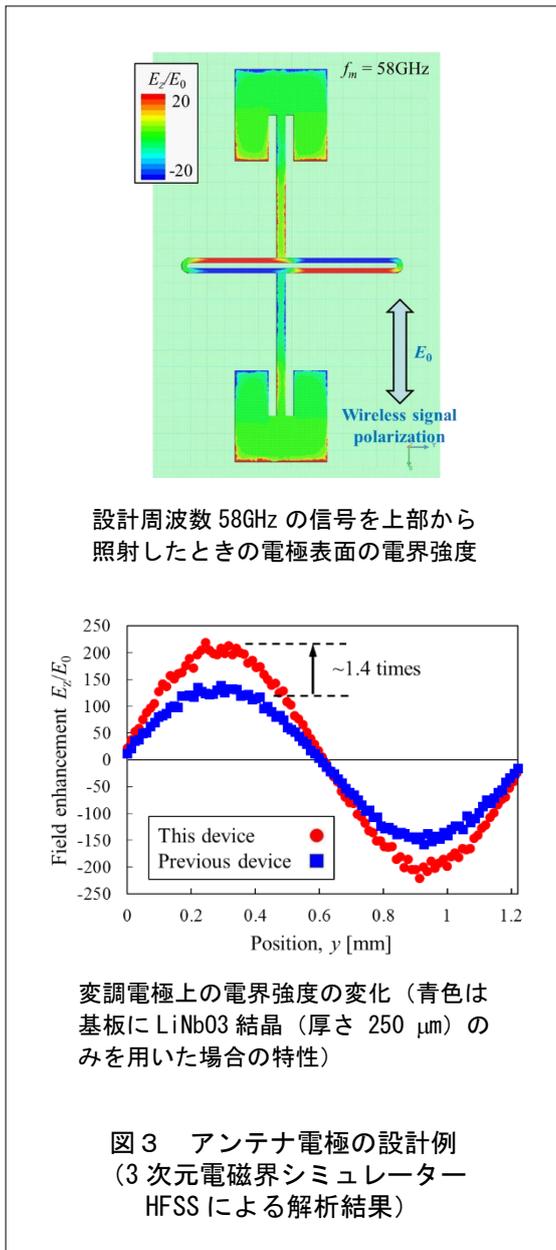
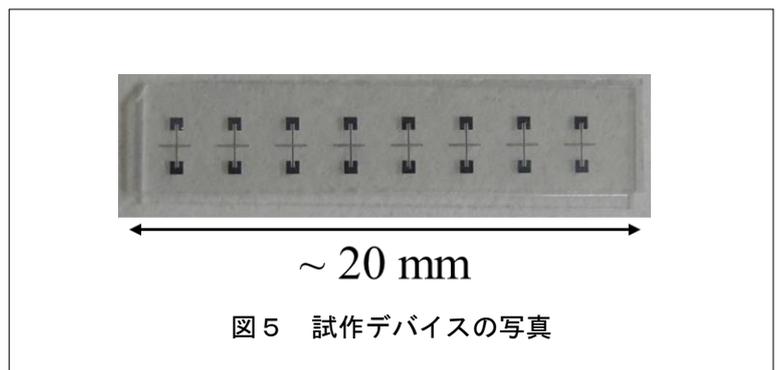
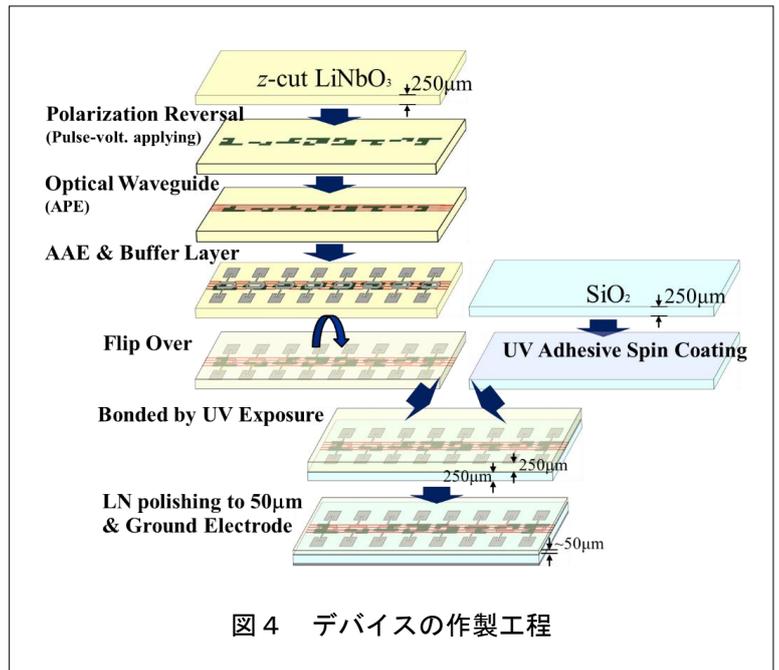


図 6 の実験系を用いることで、アンテナ電極光変調器の基礎特性を評価することができる。半導体レーザーからのレーザー光を光導波路に入力した状態で、光変調器の上部からミリ波無線信号を照射する。無線信号の送信電極は 10mW 程度である。信号の周波数や偏波、照射角度を変化させたときの出力光の光スペクトルを計測することで、アンテナ電極光変調器の特性を調べることができる。

図 7 には、照射角度を変えたときの出力光スペクトルの変化を示す。照射角度を変えると、出力される光



導波路が切り替わることがわかる。これは、分極反転構造によって指向性が制御できていることを示している。図 7 の特性をレーダーチャートに纏めたものを図 8 に示す。無線信号-光信号変換のピーク角度は、設計値と良く一致した。このアンテナ電極光変調器だけで、空間多重無線信号を分離することができる。

最後に、このアンテナ電極光変調器を用いたデータ伝送実験[10] について紹介する。無線通信システム応用の特性を調べるために、図 9 に示す系で評価を行っている。ベクトル変調したミリ波信号をアンテナ電極光変調器に照射して、光変換、光信号伝送後の波形変化を評価している。QPSK 変調信号を用いた場合の特性も図 9 に示す。良好な結果が得られていることがわかる。

60GHz 帯空間多重無線信号分離・光信号変換デバイスの開発

Development of wireless-optical signal conversion devices with discrimination of space-division multiplexing signals operating in 60 GHz band

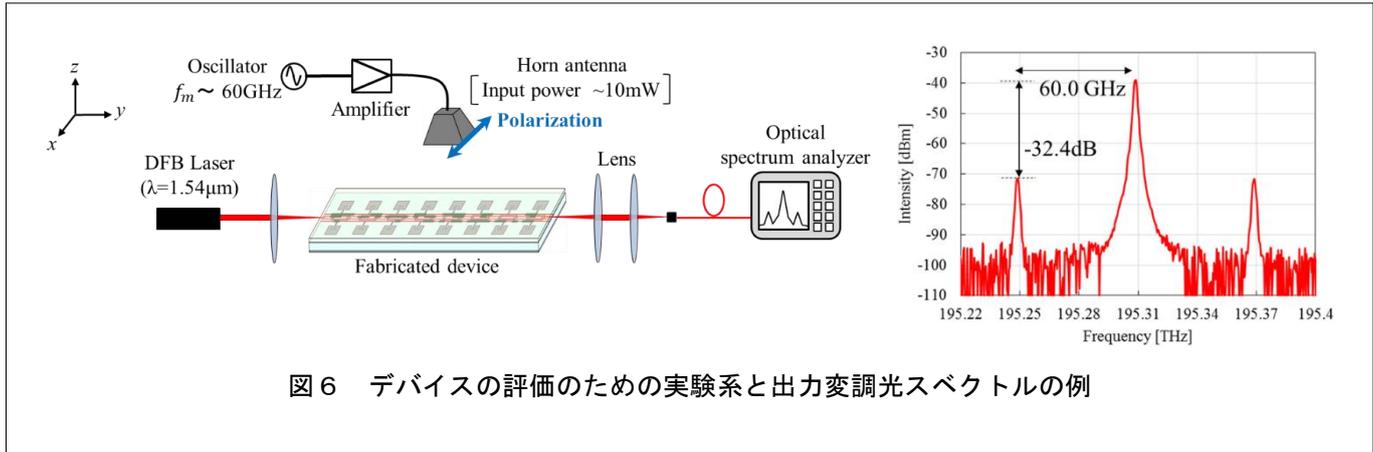


図6 デバイスの評価のための実験系と出力変調光スペクトルの例

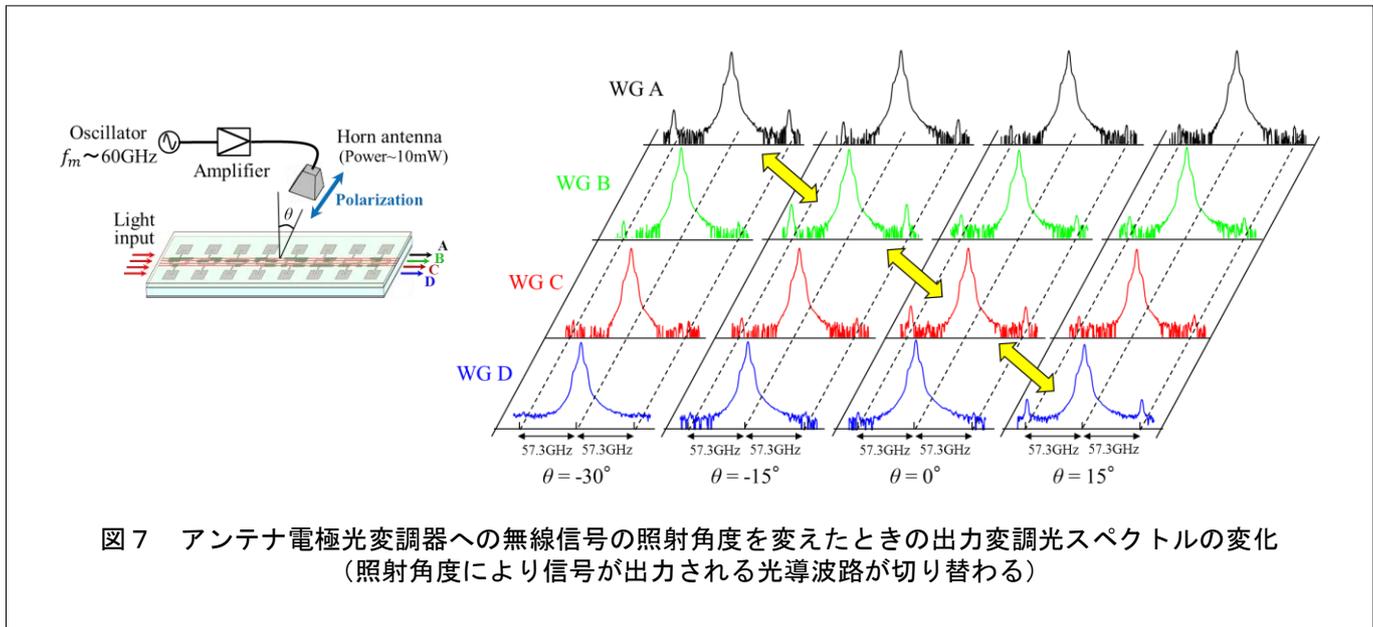


図7 アンテナ電極光変調器への無線信号の照射角度を変えたときの出力変調光スペクトルの変化 (照射角度により信号が出力される光導波路が切り替わる)

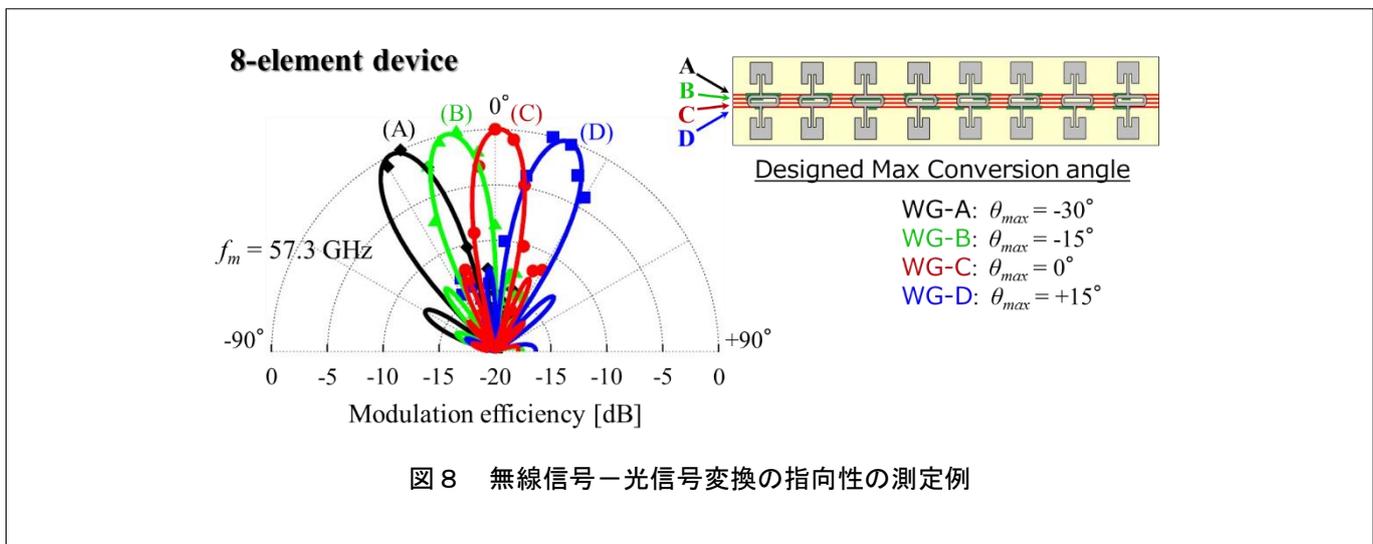
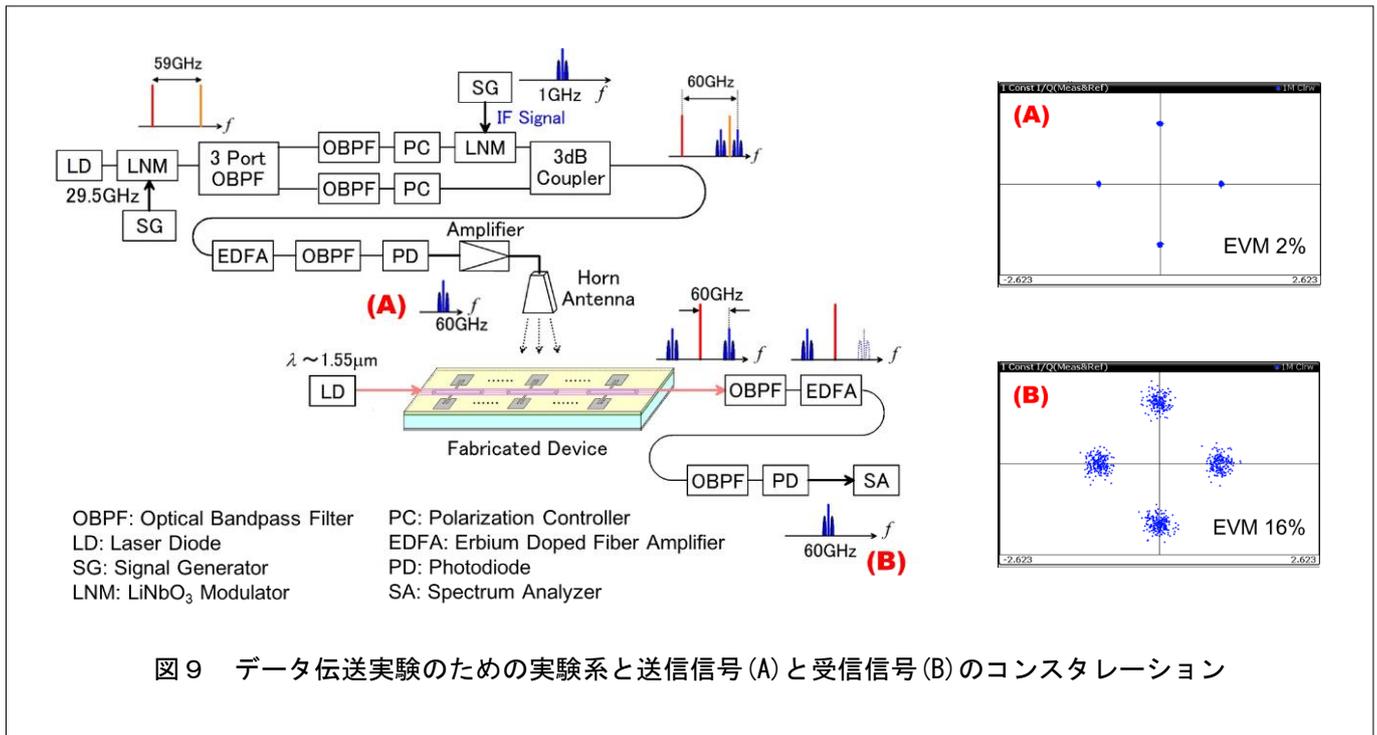


図8 無線信号-光信号変換の指向性の測定例

60GHz 帯空間多重無線信号分離・光信号変換デバイスの開発

Development of wireless-optical signal conversion devices with discrimination of space-division-multiplexing signals operating in 60 GHz band



6. むすび

ミリ波帯で動作するアンテナ電極光変調器について紹介した。作製したアンテナ電極光変調器を用いて、小電力（送信電力 < 10mW）60 GHz 帯無線信号を 1 ~ 2m 離れた位置で受信して光信号に変換して情報を取り出すことができる。現在、20 Mbps QPSK 信号のエラーフリー受信に成功している。ミリ波を用いた無線通信システム、特に、多くのユーザーが集中する高密度ユーザー環境におけるパッシブな無線信号ピックアップや、工場の生産ライン等における機器からの信号モニタ等への応用が期待できる。

謝 辞

日頃ご指導頂く、大阪大学 岡村康行名誉教授、永妻忠夫教授に深くお礼を申し上げます。本稿で紹介したデバイスの作製および動作実験は、大阪大学大学院基礎工学研究科岡村研究室の卒業生諸君と井上敏之特任助教のご協力によるものである。卒業生諸君と井上助教に深く感謝します。

参考文献

- [1] 一般社団法人 電気通信事業者協会 ホームページ <http://www.tca.or.jp/database/index.html>
- [2] D. Bojic, E. Sasaki, N. Cvijetic, W. Ting, J. Kuno, J. Lessmann, S. Schmid, H. Ishii, and S. Nakamura, "Advanced wireless and optical technologies for small-cell mobile backhaul with dynamic software- defined management," IEEE Com. Magazine, vol. 51, pp.86-93, 2013.
- [3] 栗本, 萩原, "特集 第5世代移動通信 (5G)の最新動向," 信学会誌, vol.98, 2015 -5, pp.341-430, 2015.
- [4] N. J. Gomes, P. P. Monteiro, A. Gameiro, "Next Generation Wireless Communications Using Radio over Fiber," John Wiley & Sons, 2012.
- [5] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," Nature photonics, vol.1, pp.319-330, 2007.
- [6] A. J. Seeds and K. J. Williams, "Microwave Photonics," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol.24, pp.4628-4641, 2006.

60GHz 帯空間多重無線信号分離・光信号変換デバイスの開発

Development of wireless-optical signal conversion devices with discrimination of space-division-multiplexing signals operating in 60 GHz band

- [7] H. Murata, R. Miyanaka and Y. Okamura, “Wireless space-division-multiplexed signal discrimination device using electro-optic modulator with antenna-coupled electrodes and polarization-reversed structures,” *Int. J. Microwave & Wireless Technol.*, vol.4, pp.399-405, 2012.
- [8] N. Kohmu, H. Murata and Y. Okamura, “Electro-optic modulators using double antenna-coupled electrodes for radio-over-fiber systems,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E96-C, pp.204-211, 2013.
- [9] H. Murata and Y. Okamura, “High-speed signal processing utilizing polarization-reversed electro-optic devices,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol.32, pp.3403-3410, 2014.
- [10] 井上, 村田, 岡村, “アレイアンテナ電極電気光学変調器を用いたフォトニックベースミリ波無線リンク”, *信学技報*, vol. 116, no. 15, MWP2016-6, pp. 23-26, 2016.

この研究は、平成23年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成24～26年度に実施されたものです。