

## 2-3 光変調技術を応用したフォトニックデバイス

### 2-3 *Novel Photonic Devices Based on Electro-optic Modulation Technologies*

坂本高秀 品田 聡 川西哲也 土屋昌弘 Paul Kit Lai Yu 井筒雅之  
SAKAMOTO Takahide, SHINADA Satoshi, KAWANISHI Tetsuya, TSUCHIYA Masahiro,  
Paul Kit Lai Yu, and IZUTSU Masayuki

#### 要旨

近年電気光学効果を用いた光変調技術の進展は著しく、情報通信研究機構(NICT)では、光変調技術を駆使した、より高度な機能を持ったフォトニックデバイスの開拓を目指している。最新の高精度加工技術を採用することにより、新構造デバイスの創生が可能となる。また、電気光学効果の特徴を的確に応用すれば、新機能デバイスを創出することも可能となる。本稿では、近年 NICT で独自に開発している光変調型フォトニックデバイスに関する研究事例を紹介する。(1)無線信号検出用アレイアンテナ型光変調デバイス、(2)高効率光変調用光リング共振器型光変調デバイス、(3)光-マイクロ波発振器型光コム発生器、を取り上げる。

Recent progresses in optical modulation using electro-optic effects have re-newed photonic signal processing technologies crucial in future advanced optical communication systems. NICT is now exploring novel functional photonic devices and subsystems based on electro-optic modulation technologies. In this paper, we review on recent research activities in NICT around these exotic technologies, picking up following three topics: (1) optical modulator array with patch antennas for weak radio-wave detection, (2) optical ring filter based on Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> waveguide loop for high efficient modulation, (3) photonic-electronic oscillator for self-oscillating optical comb generation.

#### [キーワード]

光変調器, 電気光学効果, ニオブ酸リチウム光導波路, 光デバイス, 光サブシステム

Electro-optic effect, Optical modulator, LiNbO<sub>3</sub> waveguide, Photonic device, Photonic subsystem

## 1 はじめに

電気光学効果を用いた光変調器の歴史は古い[1]。光変調器は元来、電気信号を光信号に変換するために用いられてきた。ニオブ酸リチウム結晶(以下、「LiNbO<sub>3</sub>結晶」もしくは「LN結晶」と呼ぶ。)中の電気光学効果を適用した、導波路型光変調器は、高速・低損失かつ低コストな光変調の手段として注目を集め、精力的に研究開発が進められてきた[2]。現在の最新の技術的位置付けでは、LiNbO<sub>3</sub>導波路型光変調器は、光ファイバ通信システムの基幹系の送信機における光のデジタル

変調を実施するために、欠かせない光デバイスとなりつつある。

NICTでは、この光変調技術を有機的に発展させ、新機能フォトニックデバイスを実現することを目指している。これは、従来のような光デジタル通信における電気-光変換の手段に限定した固定観念にとらわれず、新しい機能を有するフォトニックデバイスの開拓を目指すものである。なぜ今、光変調器型デバイスなのか、という問いかけには、以下のように答えることができる。まずは、光通信システムが急速に発展し、その形態や用途・目的が質的に変化し多様化しつつあること

に注目する必要がある。光通信網の複雑なネットワーク化は避けられず、ノード処理に技術革新が求められている。光変調デバイスには、その広帯域特性から、強力な光信号処理の要素技術の役割が期待される。また、通信網へのアクセス手段の多様化も注目すべき重要な技術的傾向である。無線、光の垣根を取り払い、光と無線の融合システムを構築する必要性が高まりつつある。ここでも、光変調器型デバイスは、無線通信システムと光通信システムの間をシームレスに接続する強力な手段となり得る。これらの技術的ニーズは必然的傾向であり、光と電気の世界を機能的に結びつける技術開拓は急務である。いかにスマートに、光変調デバイスの特徴を生かしたデバイスを実現するかが挑戦的課題となる。

一方、光変調器型デバイス開拓を展開する上で、以下の技術的熟成も重要な背景である。一つは、デバイスの高精度加工技術が発展し、複雑な電極構造・光導波路構造を持ったデバイス開発が挑戦可能となりつつあることである。デバイスの構造自体に、最新の高精度加工技術を適用することにより、新しい機能を持ったフォトニックデバイスを創生することが可能となる。また、光変調技術自体の成熟度は高く、理論値に近い光変調信号を高精度かつ高安定に得られることも重要な技術的背景である。これは、所望の機能を的確に抽出し、新たなサブシステム構築を展開する上での強力な手段になる。

本稿では、以下の三つの技術を紹介する。

(1) 光ファイバ無線アップリンクのための、パッチアンテナ給電による  $\text{LiNbO}_3$  光変調器、(2) 高効率光変調のための、Ti 拡散  $\text{LiNbO}_3$  導波路を用いたリング構造光フィルタ、(3) 光コム信号の自励発生のための、マイクロ波-光発振回路、の3技術である。これらはそれぞれ、(1) マイクロ波共振、(2) 光共振、(3) マイクロ波-光間共振をうまく利用したデバイスと分類することもできる。(1)、(2) は光変調器のデバイス構造を工夫するものであり、(3) は光変調器の機能を展開するものである。

## 2 パッチアンテナ給電型 $\text{LiNbO}_3$ 光変調器

本章では、 $\text{LiNbO}_3$  光変調器の変調電極にパッチアンテナを形成した、無線信号検出デバイスを紹介する。これは、遠隔地における無線信号を検出する機能を有し、光ファイバ無線システムにおけるアップリンクのための要素技術となり得る。空間伝播された微弱な無線信号を検出するために、各検出器を直列化した構造を持つ。変調器電極の微細加工技術を駆使した新規デバイスである[3]。

低損失長距離伝送が可能な光ファイバネットワークと、移動性、分配性に優れた無線ネットワークを融合させたファイバ無線システムの実現が期待されている[4]。この実現には、光とミリ波(マイクロ波)を相互に変換するインターフェイスの開発が課題である。これまで、光信号をミリ波信号に変換するダウンリンク技術として、波長の異なるレーザのビート信号[5]や往復通倍変調器[6]によるミリ波生成技術が報告されている。一方、アップリンク技術は、受信パワーが低く、ミリ波信号から光信号に直接変換する簡易な構成が困難なため、有用な報告がなされていない。

本研究では、単位長さ辺りの変調効率が高く、小型な共振型光変調器[7]–[10]に着目し、これにアンテナを取り付け、受信パワーから直接変調器を駆動させる光・ミリ波変換インターフェイスを提案している。これをさらにアレイ化することにより、低い受信パワーにおいても大きな変調度を得られる可能性がある。図1に、提案するアンテナ付き共振型光変調器アレイの構成例を示す。(a) は一つのパッチアンテナから電力を分配して変調器に供給しており、アレイ数  $N$  の平方根に比例した位相変化を得ることができる。(b) は変調器の個々にアンテナを取り付けており、アレイ数に比例したより大きな位相変化を得ることができる。

パッチアンテナは図2(a)に示すように、両面銅箔付きプリント基板をもとに、エッチングにより製作した。前面に10 GHzで共振する正方形の銅片を持ち、全面グラウンドの裏面からコネクタにより接続されている。図2(b)は四つ製作したアンテナの  $S_{11}$  特性であるが、9.8 GHz を中心に

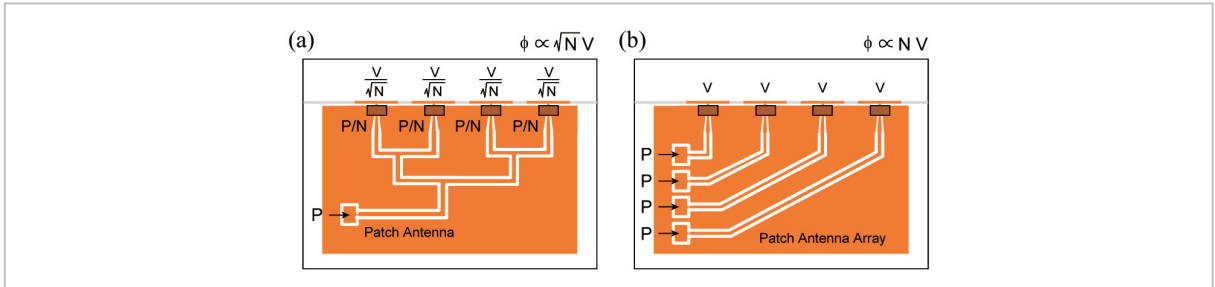


図1 ミリ波・光変換のためのアンテナ付き共振型光変調器アレイ

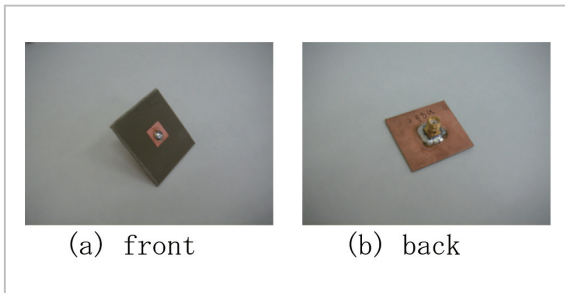


図2 製作したパッチアンテナ

1.0 GHz ほどの帯域を持っており、共振型光変調器の変調帯域に整合するといえる。

製作した四つの変調器アレイに対し、ハイブリットに接続するパッチアンテナを製作し、空間伝送入力による変調実験を行った。図3に空間伝送実験系を示す。製作したアンテナは、変調器の各ポートに同じ長さのケーブルを用いて接続されている。ネットワークアナライザから生じたRF信号は増幅器を通り、ホーンアンテナを介して、空間に発せられる。

図4に受光スペクトルを示す。図4はパッチア

ンテナを接続し動作させた共振型変調器の数の依存性を示しており、アンテナ間(ホーンアンテナ・パッチアンテナ間)の距離を1 mとした。光に対して理想的にRF信号が同相で各変調器に加えられたと仮定すると、1素子当たりの位相変化量はおよそ0.01 radである。図4に示した半波長電圧(15 V/π)から入力パワーを見積もると、0.048 V (-13.4 dBm)の電圧が変調器一つ当たりに入力されたと見積もられる。

### 3 LiNbO<sub>3</sub>光導波路型リング共振器

本章では、LiNbO<sub>3</sub>基板上に形成された、導波路型光リング共振器を紹介する。これは、低損失導波路でリング回路を形成することにより、高Q (=高い光閉じ込め)の光共振器を実現することができる。また、導波路は電気光学結晶で形成されるため、高効率光変調器として応用できる。光導波路に対する微細加工技術を駆使した新規デバイスである。

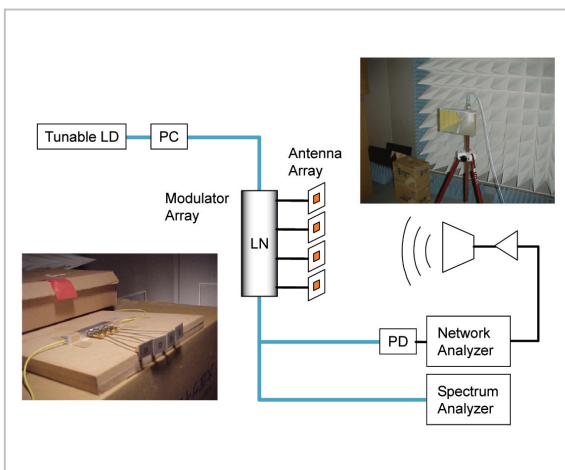


図3 空間伝送によるアンテナ付き共振型変調器アレイの受信評価実験系

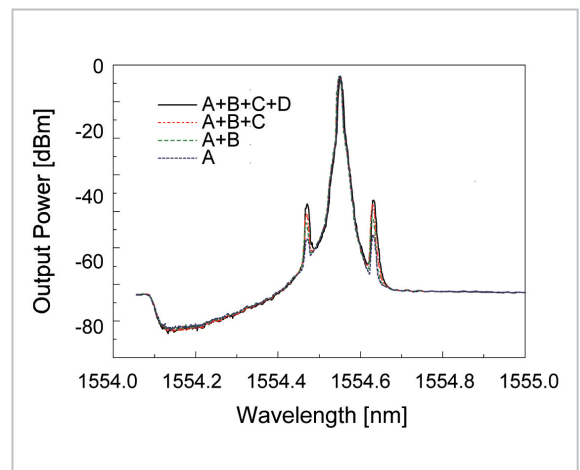


図4 受信後の光スペクトル(アンテナ間距離1 m)



リング構造と方向性結合器の組合せで構成される光共振器は光フィルタとしての利用が期待されており、半導体光導波路などでリングを作製した例がこれまでに数多く報告されている[12]。一方、電気光学効果による光変調の効率向上を目指したLiNbO<sub>3</sub> (LN)を用いたリング構造も報告されている。半導体デバイスに比べ大きなリング構造を持つことが特徴で、ファイバ無線システムなどで必要とされる光によるミリ波・マイクロ波のフィルタリングなどに用いることができる[13]。しかし、これまで報告されたLNリング構造ではディスク上の共振器が用いられており、ファイバとの結合効率向上が大きな課題となっている。ここでは商用の光変調器で広く用いられているTi拡散LN導波路を用いたリング構造を提案し、作製したデバイスの基礎特性の測定結果を報告する。

図5にTi拡散LN導波路を用いたリング構造を示す。Ti拡散導波路ではコアとクラッドの屈折率差が小さく、円形のリング構造を作製する際に曲げ部分での損失が増大するという問題があった。一方、我々の提案する、図5に示すような二つの反射構造と方向性結合器を組み合わせた構造では、導波路部分には急激な曲げは不要で、Ti拡散導波路だけで構成されるので、商用で用いられているプロセスで作製可能である。反射構造は一方から入力された光をもう一方にのみ反射させるもので、二つを対向させ、導波路で接続することで、リング構造が実現できる。

図6に作製したデバイスの光透過特性の測定結果と、共振構造内のパラメータ( $\kappa$ :方向性結合器の結合効率、 $\gamma_1$ :方向性結合器の損失、 $\gamma_2$ :リング構造内の損失、 $\gamma_3$ :デバイスとファイバの結合効率)でフィッティングした理論値を示した[14]。基板はZ-cutを用いた。結合効率は

92.5%で、リング構造内での損失は2.4 dB、反射構造での損失は各1 dB程度であった。FSRから算出したリングの光路長は61.74 mmであった。また、リング構造を用いた共振器ではリング内での損失がある場合でも結合効率を調整することで消光比を無限大に近づけることが可能である[15]。図7に $\kappa$ を56.11%として計算した結果を示した。消光比は30 dB以上となる。電気光学効果を利用した結合効率の変化によるフィルタ特性の高精度制御が可能であることが分かる。我々の提案するTi拡散LN導波路を用いたリング構造はファイバとの結合が容易であり、かつミリ波帯まで応答可能な電気光学効果を持ち、高速制御可能な光フィルタ、高感度光変調器などへの応用が期待できるものである。また、パラメータのフィッティングによって、各要素の特性を高精度に確定することが可能である。

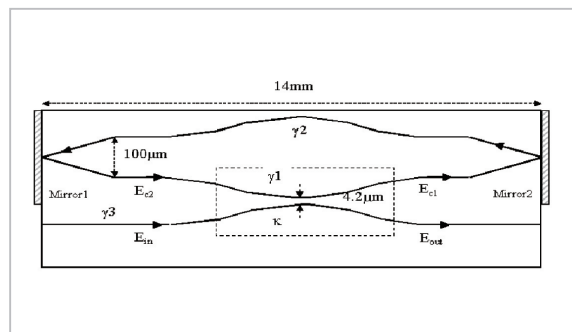


図5 導波路型リング共振器のデバイス構造

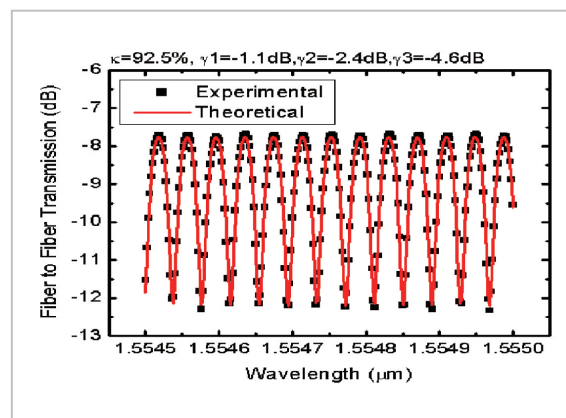


図6 導波路型リング共振器の光透過特性

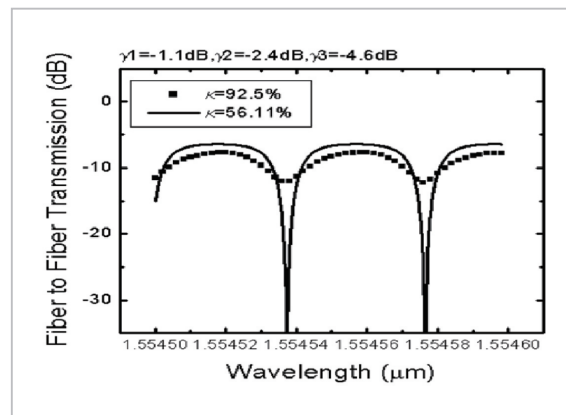


図7 結合効率の変化による光透過特性の制御

## 4 自励発振型光コム発生器

本章では、LiNbO<sub>3</sub>基板上に形成された、自励発振型光コム発生器を紹介する。これは、光変調器から得られる光変調信号を検出し、変調器電極に正帰還をかけることにより得られる。発振器内では、マイクロ波-光信号間でエネルギーを交換しながら発振し、変調信号を自励生成する。変調器の非線形駆動により、高調波信号が生成され、多波長光源等として応用できる。光変調機能に注目したサブシステム型新規デバイスである。

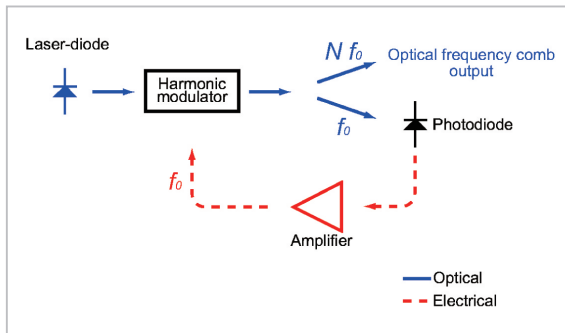


図8 自励発振型光コム発生器の概念

光周波数コム発生は、種々の光制御・信号処理への応用が期待できる重要な技術である。絶対周波数測定のための光周波数基準、マイクロ波・ミリ波周波数帯の局発信号の遠隔供給[4]、無線望遠鏡等天文観測システムで用いられるアレイアンテナの制御信号などとしての応用[4]が考えられている。

また、より実践的には、光波長多重分割多重伝送システムのための多波長光源等への適用の期待も大きい。光周波数コム発生の最大の特徴は、単一のコム発生器により、等間隔の周波数差を持った複数の光周波数・波長成分を生成できる点である。現在、このような信号を生成するためには、複数の半導体レーザー光源を使用する手法が最も一般的であり、半導体レーザーのアレイ化等の検討がなされてきた。しかしながら、半導体レーザーアレイを用いて光コムを形成する場合、各コム成分を光周波数・光位相レベルで同期制御することは非常に困難である。例えば、高密度 WDM システムで用いられる多波長光源への適用を考える時、各波長成分の精密な波長精度が要求されるが、発振波長制御技術はシステムの高コスト化をもたら

す。また、光計測・ミリ波遠隔供給等の用途のためには、複数の光周波数成分の光位相同期を実現する必要が生じるが、半導体レーザー間の位相同期は必ずしも現実的でない。

一方、光周波数コム発生においては、多波長信号を一括に取得できる点が特徴的である。また、生成される光周波数コム信号においては、各光周波数成分間の光周波数・位相同期を比較的容易に達成できることが多い。

半導体や光ファイバを用いたモード同期レーザー[16]や、LiNbO<sub>3</sub>変調器等の光変調技術を駆使した手法[17]が検討されてきた。また、光ファイバ等の中で誘起される非線形効果を利用したスーパーコンティニューム生成技術[18]は、光周波数コムの帯域幅拡大に効果的である。

しかしながら、これらの光周波数コム発生技術の問題点は、概して外部発振器を必要とし、自励発振による周波数コム生成を可能としない点にある。既存技術の中では、例外として、受動モード同期レーザーもしくはそれに準じる技術を用いると、光周波数コムの自励生成が可能である。しかしながら、モード同期レーザーの発振制御及び安定動作は一般には困難であり、実用化に課題が残る。

この問題を解決するために、本研究グループでは、これまでに、高調波信号光発生器を組み込んだ光電気発振器を提案している[19]–[20]。光電気発振器とは、光変調成分を検出し、正帰還をかけることにより得られるマイクロ波発振器である[22]。提案方式では、発振器内の光変調器を用いて高調波光変調成分を生成しながら自励発振により光周波数コムが得られる。特徴は、得られる多モードの光周波数成分が発振動作に寄与せず、単一モード発振が得られるため、高安定動作を容易に達成できる点である。また、双安定点等を持たないため、発振開始・維持のために、複雑な制御機構を必要としない。

図9に得られた光コム信号のスペクトルを示す。このコム発生の手法の大きな特徴の一つとして、優れた波長可変特性に特徴付けることができる。図9(a)は帰還回路の光フィルタの同調制御[23]により、光コム信号の中心波長制御を実現した例である。10 nm以上の波長可変帯域を有する帯域100 GHz、周波数間隔10 GHzの光周波数コム発生が確認された。一方、図9(b)は、レプリカ作成[23]

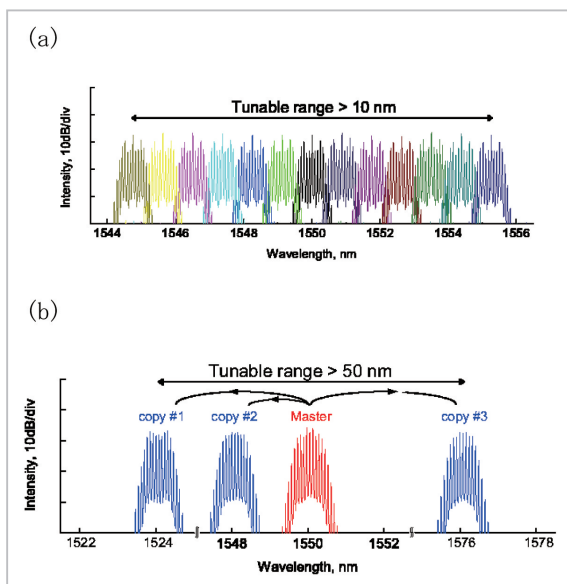


図9 自励発振のより取得された光コム信号のスペクトル

(a) 光フィルタ同調制御によるもの、(b) レプリカ作成によるもの

により、より広帯域な波長可変機能を実現した例である。50 nm 以上の波長可変帯域を有する帯域 100 GHz、周波数間隔 10 GHz の光周波数コム発生が確認された。

## 5 まとめ

近年 NICT で独自に開発している光変調型フォトニックデバイスに関する研究事例を紹介した。次世代フォトニックネットワークにおける重要な要素技術としての役割が期待される。

## 参考文献

- 1 M.Izutsu, Y.Yamane, and T.Sueta, "Broad-Band Traveling-Wave Modulator Using a LiNbO<sub>3</sub> Optical Waveguide", IEEE J. Quantum Electron. Vol. QE-13, No.4, pp.287-289, 1977.
- 2 例えば, G.L.Li and P.K.L.Yu, "Optical Intensity Modulators for Digital and Analog Applications", J. Lightwave Technol. Vol.21, No.9, pp.2010-2030.
- 3 S.Shinada, T.Kawanishi, T.Sakamoto, M.Andachi, K.Nishikawa, S.Kurokawa, and M.Izutsu, "A 10-GHz resonant type LiNbO<sub>3</sub> optical modulator array", IEEE Microwave Theory and Wireless Component Lett. (submitted).
- 4 例えば, W.D.Jemison, E.Funk, M.Bystrom, P.R.Herczfeld, I.Frigyes, and T.Berceli, "Fiber radio: from links to networks", Microwave Photonics 2001, Tu-4.19, pp.169-172, 2001.
- 5 T.Kuri and K.Kitayama, "Optical Frequency Shift for Millimeter-Wave-Band Radio-on-Fiber Systems", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.14, pp.1163-1165, 2002.
- 6 T.Kawanishi, S.Oikawa, and M.Izutsu, "Reciprocating Optical Modulation for millimeter-wave generation by using a dual-section fiber Bragg grating", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., 20, No.8, pp.1408-1415, 2002.
- 7 M.Izutsu, K.Kouichi, and T.Sueta, "Guided-wave light modulator using a resonant coplanar electrode", IEICE Trans., C-1, Vol.J71-C, No.5, pp.653\_658, 1988.
- 8 T.Kawanishi, S.Oikawa, K.Higuma, Y.Matsuo, and M.Izutsu, "LiNbO<sub>3</sub> resonant-type optical modulator with double-stub structure", Electron. Lett. Vol.37, No.20, pp.1244-1246, 2001.
- 9 M.Izutsu, "Arrayed light modulators as receiving antennas", 29th European Microwave Conference, Workshop M-FrW2, Munich Germany, Oct. 1999.
- 10 M.Sasaki, D.Done, T.Kawanishi, O.Shimotsu, S.Oikawa, and M.Izutsu, "60 GHz band resonant type LiNbO<sub>3</sub> light modulator", IEICE General Conference, C-3-125, Tokyo, 1999.

- 11 J.X.Chen, T.Kawanishi, K.Higuma, S.Shinada, J.Hodiak, M.Izutsu, W.S.C.Chang, and P.K.L.Yu, "Tunable Lithium Niobate Waveguide Loop", IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.16, No.9, pp. 2090-2092, 2004.
- 12 S.Suzuki, et. al., J. Lightwave Technol., 20, 745, 1992.
- 13 D.A. Cohen, et. al., Electron. Lett., 37, 300, 2001.
- 14 J.X.Chen, et. al., IEEE Photon. Tech. Lett., 16, 2090, 2004.
- 15 A.Yariv, Electron. Lett., 36, 321, 2000.
- 16 T.Sakamoto, T.Kawanishi, and M.Izutsu, "Optoelectronic oscillator using a LiNbO<sub>3</sub> phase modulator for self-oscillating frequency comb generation", Opt. Lett., Vol.31, No.6, pp811-813, Mar. 2006.
- 17 例えば S.Arahira S.Oshiba, Y.Matsui, T.Kanji, and Y.Ogawa, Opt. Lett., Vol.12, pp.854-856, 1993.
- 18 M.Sugiyama, M.Do, T.Hasegawa, T.Shiraishi, and K.Tanaka, "Compact Zero-Chirp LiNbO<sub>3</sub> Modulator for 10-Gb/s Small-Form-Factor Transponder", ECOC 2004 Proceedings Post Deadline Paper, Th4.2.3, pp.20-21, Stockholm, 2004.
- 19 T.Sakamoto, T.Kawanishi, S.Shinada, and M.Izutsu, "Optoelectronic oscillator using LiNbO<sub>3</sub> intensity modulator with resonant electrode", Electron. Lett., Vol.41, No.12, pp.716-718, 2005.
- 20 T.Sakamoto, T.Kawanishi, and M.Izutsu, "Optoelectronic Oscillator Using Push-Pull Mach-Zehnder Modulator Biased at Null Point for Optical Two-Tone Signal Generation", Conference on Laser and Electro Optics (CLEO/IQEC2005), CTuN5, May 2005.
- 21 T.Sakamoto, T.Kawanishi, S.Shinada, and M.Izutsu, "Self-Oscillating Milli-meter-Wave Generation Using Reciprocating Optical Modulator", Conference on Laser and Electro Optics (CLEO/IQEC2005), CTuN3, May 2005.
- 22 X.Yao and L.Maleki, Electron. Lett. Vol.30 pp.1525-2526, 1994.
- 23 T.Sakamoto, T.Kawanishi, and M.Izutsu, "50-nm Wavelength-Tunable Self-Oscillating Electro-Optic Frequency Comb Generator", the 2006 Optical Fiber Communication Conference (OFC2006) in Anaheim, California, OWI25, Mar. 2006.



坂本高秀

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ研究員(旧基礎先端部門光情報技術グループ専攻研究員) 博士(工学)  
高速光変調技術の開発、光通信



品田 聡

新世代ネットワーク研究センター超高速フォトニックネットワークグループ研究員(旧基礎先端部門光情報技術グループ専攻研究員) 博士(工学)  
光変調器、超高速フォトニックネットワーク



川西哲也

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ主任研究員(旧基礎先端部門光情報技術グループ主任研究員) 博士(工学)  
高速光変調技術の開発



土屋昌弘

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループリーダー(旧基礎先端部門光情報技術グループリーダー) 博士(工学)  
フォトニクス、エレクトロニクス



Paul Kit Lai Yu

カリフォルニア大学サンディエゴ校 Ph.D.  
フォトニクス、エレクトロニクス



井筒雅之

高級研究員(新世代ネットワーク研究センター担当) 工学博士  
光エレクトロニクス