

特集 ミリ波集積回路を用いた光制御型デジタル周波数変調器*

Light-Controlled Frequency-Shift Keying Modulator Using a Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit Oscillator

三宅康之 青木 豊 岡田 実 星野浩一 原田博司
 Yasuyuki MIYAKE Yutaka AOKI Minoru OKADA Koichi HOSHINO Hiroshi HARADA
 藤瀬雅行
 Masayuki FUJISE

A light-controlled frequency-shift keying (FSK) modulator for a road-vehicle communication system using millimeter-wave was investigated. In this system, intensity-modulated infrared signals are adopted for modulating the carrier frequency of the 37 GHz band. The modulation principle is based on the impedance change under illumination in an InP-based millimeter-wave monolithic integrated circuit oscillator. Transmission with a bit error rate of 10^{-11} was achieved at a data rate of 155.52 Mbit/s.

Key words : ITS, Road-Vehicle Communication System, MMIC, Millimeter-wave

1. まえがき

ブロードバンド時代の到来とともに、画像、音楽、動画といった大容量情報を取り扱う通信システムへの要求が高まっている。こうした要求は取り巻く環境を問わず、例えば、車で高速道路を移動するような状況であっても、スムーズな情報配信が受けられるような通信システム実現への期待は大きい。こうした背景から、現在、デンソーでは独立行政法人通信総合研究所と共同でミリ波を用いた大容量路車間通信システムの研究に取り組んでいる。

このミリ波路車間通信システムではFig. 1に示すように制御局 (Control station) から配信されるデータを統合基地局 (Base station) で光信号に変換後、路側に設置する局地基地局 (Road side unit) まで光ファイバを通して伝送し、車載端末 (Wireless terminal) とミリ波を用いて無線通信を行う光ファイバリンク無線伝送方式¹⁾を採用している。しかし、ミリ波は大気中での減衰が大きく、通信エリアが数mとなるため、路側に設置する局地基地局及びそれらを束ねる統合基地局が多数必要となる。従って、このシステムを実現する鍵はそれらの簡素・低コスト化とすることができる。

本論文ではミリ波路車間通信システムの統合基地局と局地基地局の低コスト化を実現する光ベースバンド伝送方式を提案するとともに、この伝送方式を実現するためのキーデバイスとなる光制御型ミリ波デジタル周波数変調器を、化合物半導体InP基板からなるミ

リ波集積回路 (MMIC : Millimeter-wave Monolithic Integrated Circuit) を用いて作製し、その通信特性を評価した結果について紹介する。

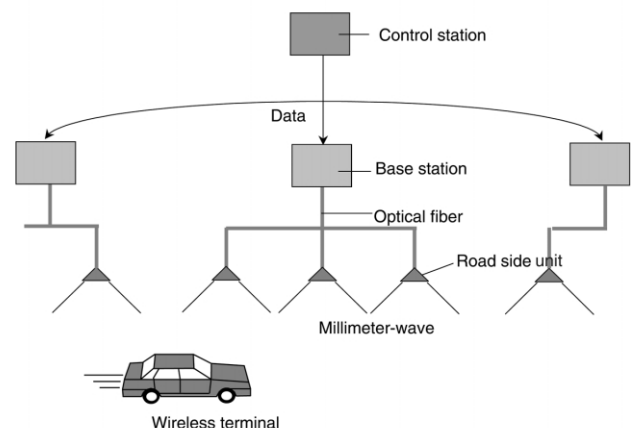


Fig. 1 Road-vehicle communication system using millimeter-wave

2. 光ベースバンド伝送方式

ミリ波路車間通信システムを実現するためには、路側に設置する局地基地局及び統合基地局の低コスト化が大きな課題となるが、現在、この問題を解決するために光無線融合通信技術 (Radio on Fiber : 以下ROFと言う。)を用いた通信システムが提案されている²⁾⁻⁴⁾

このROFは統合基地局と局地基地局を結ぶ光ファイバ内に電波形式に変調した光信号を伝送させ、局地基地局に設置する受光デバイスによって、その光信号を

* 2003年1月9日 原稿受理

そのまま電波に変換し、無線通信を行う技術である。この方式を採用すると、局地基地局に変復調器やデジタル信号インターフェイス等を導入する必要がなくなり、システムの低コスト化に有利と言える。Fig. 2 (a) に典型的なROFシステムのダウンリンク側の構成図を示す。統合基地局では、IF信号を制御局から配信されたデータを用いて変調し、それをミリ波にアップコンバートした後、外部光変調器 (MOD) に導入することによって、レーザーダイオード (LD) から出力する光信号を電波形式に変調する。電波形式に変調した光信号は、光ファイバを通して局地基地局に伝送され、フォトダイオード (PD) によって、そのままミリ波に変換される。

さて、このROFでは光信号をミリ波で強度変調するために統合基地局にミリ波発振器、ミキサが必要となる。また、ミリ波という高周波で直接変調可能なLDがないことから、マッハツェンダ型等の高価な外部光変調器を導入する必要がある。これらは統合基地局のコスト上昇につながる。さらに、局地基地局に設置するPDのミリ波出力が小さいため、後段にミリ波増幅器 (AMP) を導入する必要があるが、一般的にPDとAMPの半導体膜構造が異なるため、それらを1チップに集積化することが困難である。従って、コストのかかるミリ波領域の実装工程を行う必要が生じ、それがコスト上昇の要因となっている。

これに対して我々は統合基地局、局地基地局の双方を簡素・低コスト化可能な光ベースバンド伝送方式を提案した (Fig. 2 (b))。この光ベースバンド伝送方式は制御局から配信されるデータを用いて、直接LDを変調し、ベースバンド状に変調された光ベースバンド信号を光ファイバ内に伝送させる点に特徴がある。つまり、ROFのように光をミリ波のような高周波で変調する必要がないため、統合基地局に高価な外部光変調器を導入しなくてもよく、システムのドラスティックな低コスト化が可能となる。一方、この方式を実現するためには、光ベースバンド信号を受光し、それを直接ミリ波変調信号に変換する新しいデバイスを開発する必要がある。

我々は、光ファイバ通信で用いられる波長が1.55 μ mの赤外光を吸収する化合物半導体InGaAsを用いたInAlAs/InGaAs 高電子移動度トランジスタ (HEMT) に注目し、それを回路中に集積化したMMIC発振器によって、光ベースバンド信号を直接ミリ波デジタル周波数変調 (FSK : Frequency Shift Keying) 信号に変

換する新規なデバイスを考案した。赤外光をInAlAs/InGaAs HEMTに照射すると、InGaAs層に電子-ホール対が生成し、内部で光導電効果と光起電力効果が生じる。その結果、HEMTのインピーダンス特性が変化し、それが発振器の発振条件を変調することで周波数変化を得ることができる。このようなMMIC発振器はミリ波増幅器と集積化し、1チップとすることができるため、ROFのように歩留まりが悪いミリ波実装プロセスを行う必要がなく、システムのさらなる低コストが可能である。

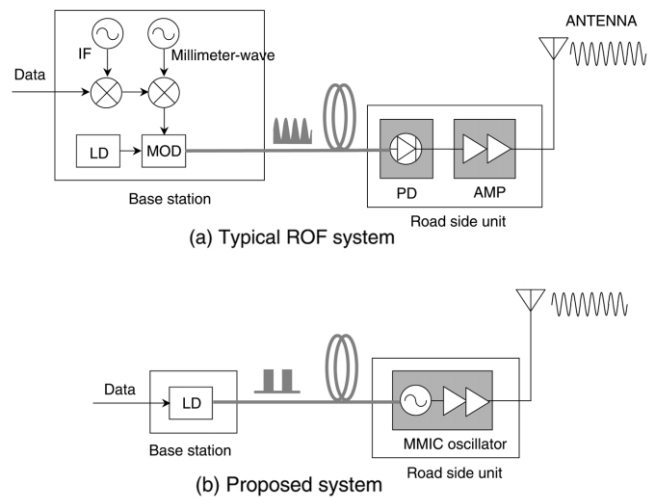


Fig. 2 Typical ROF and proposed system for road-vehicle communication

3 . Light Controlled Oscillator (LCO)

提案した光ベースバンド伝送方式を実現するためには、光ベースバンド信号を直接FSK信号に変換可能な新しいMMIC発振器の開発がキー技術となった。我々はこのMMIC発振器をミリ波路車間通信システム実現の最重要課題に位置付け、光によって周波数を制御することから、電圧制御型発振器にならって、光制御型発振器⁵⁾ (LCO, Light Controlled Oscillator) と呼ぶことにした。以下では、このLCOを用いた光制御型デジタル周波数変調器について言及する。

3.1 InAlAs/InGaAs 高電子移動度トランジスタ

光ファイバ内の伝送損失の小さい、波長が1.55 μ mの赤外光の光子エネルギーは0.8eVであるため、バンドギャップがそれ以下である半導体材料を選択すれば、その波長帯に感度を持つ受光デバイスを構成できる。化合物半導体InGaAsはそのIn組成によって、

バンドギャップを0.8eV以下にすることができるため、InGaAsをチャンネル層に持つInAlAs/InGaAs HEMTは、赤外光を照射することによって、そのインピーダンス特性を変化させることができる。

以上の点に着目すると、このHEMTを回路中に含むLCOは、赤外光を受光することによって、回路内の発振条件が変化し、その発振周波数を変調できる。Fig. 3にLCO中に集積化したInAlAs / InGaAs HEMTの断面図を示す。作製したHEMTは分子線エピタキシ法を用い、100nmのIn_{0.52}Al_{0.48}Asバッファ層、80nmのi-In_{0.53}Ga_{0.47}As光吸収層、20nmのi-In_{0.80}Ga_{0.20}Asチャンネル層、25nmのIn_{0.52}Al_{0.48}Asゲートコンタクト層、25nmのn-In_{0.53}Ga_{0.47}Asキャップ層から構成した。但し、ゲートコンタクト層にはSiによって $5 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ のプレーナドーピングを施した。また、ゲート長とゲート幅はそれぞれ0.50 μm と50 μm で、HEMTの両面に波長が1.55 μm の光に対する反射防止膜をSi₃N₄によって形成した。

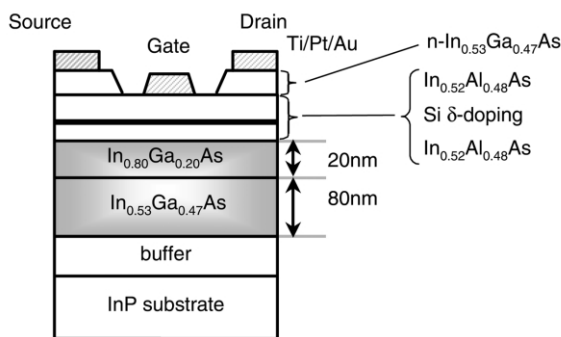


Fig. 3 Schematic cross section of the fabricated InAlAs/InGaAs HEMT

Fig. 4に作製したHEMTの光照射時と未照射時のドレイン電流 - 電圧特性を示す。但し、照射した光の波長、強度はそれぞれ1.55 μm 、1.8mWとし、ゲート印加電圧(V_g)を0.2Vから-0.4Vの間で変化させた。また、光はHEMTのInP基板方向から照射し、光照射時の電流増加量が最大となる点を照射位置とした。光照射によってすべての V_g に対して、ドレイン電流の増加が観測された。これは光照射によってInGaAs層内に電子 - 正孔対が生成し、その結果、InGaAs層の導電率が上昇する光導電効果に起因すると考えられる。実際、この電流増加量は光導電効果から予測されるように入力光電力に比例する結果が得られている。また、最大感度は0.51 A / Wであった。

3.2 LCO

次に以上の特性を持つInAlAs/InGaAs HEMTを回路

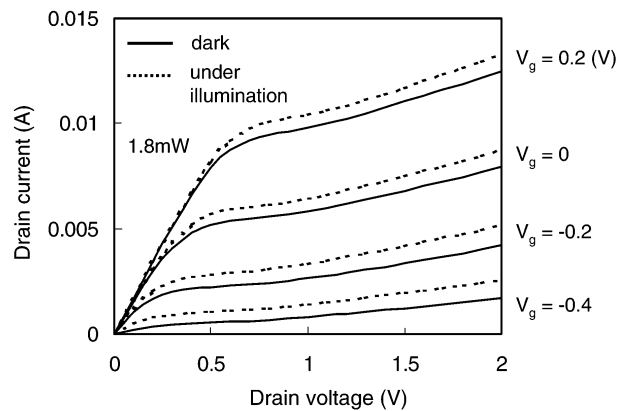


Fig. 4 Drain I-V characteristics of the fabricated InAlAs/InGaAs HEMT with (broken lines) and without (solid lines) optical illumination

中に集積化したLCOの特性について言及する。LCOは発振回路部とバッファアンプ部の二つの部分から構成され(Fig. 5),それぞれに一つずつのHEMT(HEMT1, HEMT2)を集積化している。チップサイズは3 \times 2mm²で、スタブ等の整合回路はコプレーナ型伝送線路によって形成した。光未照射時の発振周波数は38.9GHzで、その時の出力電力は+8.9 dBmであった。Fig. 6に作製したLCOについて、発振周波数変化の入力光強度依存性を示す。但し、光はHEMT1に照射した。光を照射することによって、LCOの発振周波数は低周波側へシフトしている。また、それらのシフト量は V_g によってほとんど変化しなかった。周波数シフト量と入射光強度がほぼ比例関係にあるため、線形性が要求される周波数変調器としての有効性が高いことがわかる。また、光強度変化に対する周波数シフトの大きさは150MHz/mWで、レーザダイオード程度の入力光電力によって、100MHz越える広帯域な周波数シフトが得られる。

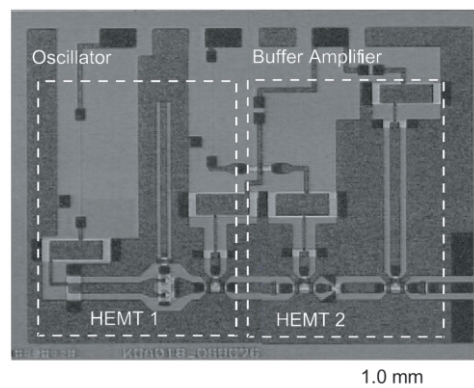


Fig. 5 Photograph of Light Controlled Oscillator consisting of MMIC oscillator

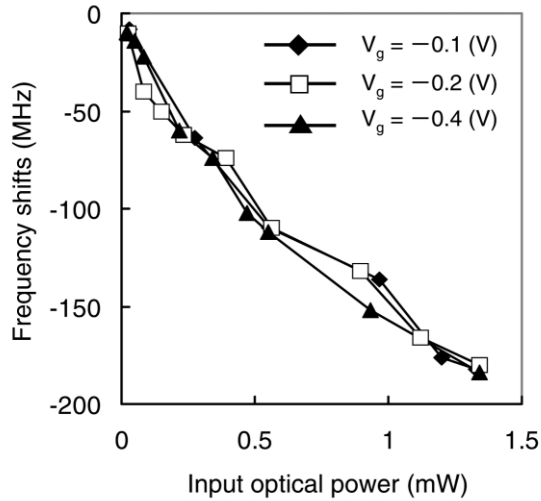
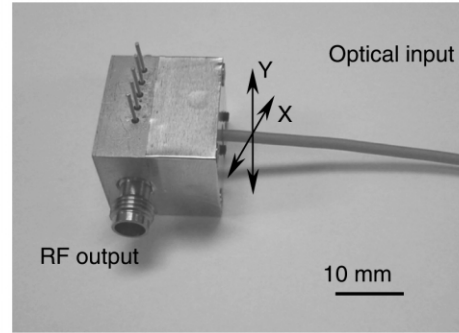


Fig. 6 Input optical power dependence with frequency shifts of the fabricated MMIC oscillator

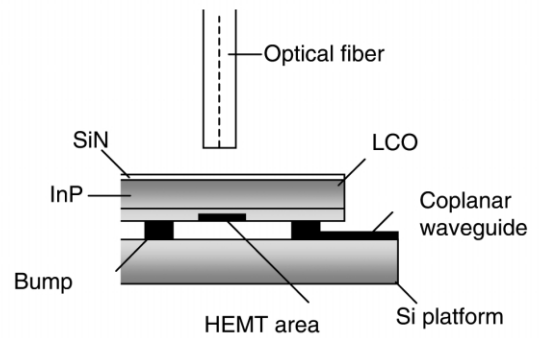
4 . 155.52Mbpsにおける伝送特性

次に作製したLCOを実装した、光制御型ミリ波デジタル周波数変調器の伝送特性を評価した結果について述べる。Fig. 7(a)に作製した変調器の概観写真を示した。パッケージの大きさは縦×横×奥行きが $20 \times 17.5 \times 16.5 \text{ mm}^3$ で、それぞれ一つずつの光入力端子とミリ波出力端子を持つ。光ファイバはX、Yの2軸に沿って可動し、LCO中に集積化したHEMTに入力する光強度を調整できる。Fig. 7(b)に作製した変調器の内部構成図を示す。LCOはSiからなる実装基板上にフリップチップ実装し、そのミリ波出力は直径が $80 \mu\text{m}$ 、高さが $30 \mu\text{m}$ の bumps を介して実装基板上に形成したコプレーナ型伝送線路に出力される。また、光ファイバからの光信号はInP基板側からLCOに入射される。光入力がない場合の出力周波数は 37.9GHz で、その時の出力電力は -24 dBm である。

作製した変調器 (D.U.T) を局地基地局に導入した際のシステム構成をFig. 8に示す。このシステムは光ベースバンド信号を生成する統合基地局 (BS)、光ベースバンド信号をミリ波FSK信号に変換する局地基地局 (RSU)、ミリ波FSK信号を復調し、もとのデータに戻す無線端末 (WT) の三つの部分によって構成される。BSではベースバンド信号発生器 (BB) を用いて、中心波長が $1.55 \mu\text{m}$ である分布帰還型レーザダイオード (DFB-LD) を直接変調し、光ベースバンド信号を生成している。生成した光ベースバンド信号はエルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) によって



(a)



(b)

Fig. 7 Photograph (a) and structure (b) of fabricated FSK modulator

増幅した後に光ファイバ内を伝送させる。RSUには作製した通信モジュールを設置し、光ベースバンド信号をミリ波FSK信号に変換している。WTには低雑音増幅器 (LNA)、ローカル発振器 (LO)、ミキサ (MIX) を設置することによって受信したミリ波FSK信号を 800MHz 付近のIF信号にダウンコンバートし、フィル

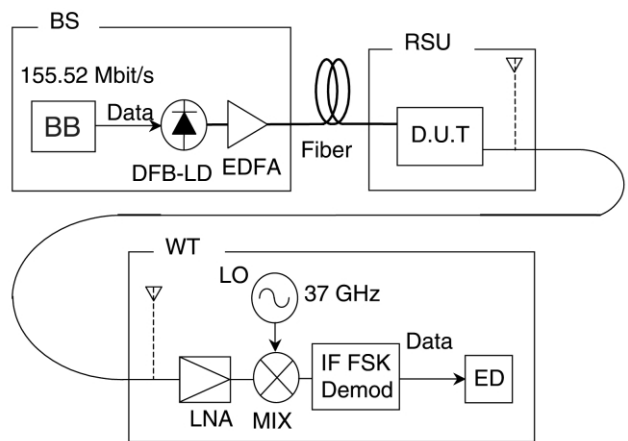


Fig. 8 Experimental setup of road vehicle communication system

タとダイオード検波器から構成した標準的なFSK復調器によって、もとのデータに復調している。さらに、復調信号をビット誤り率測定器(ED)に入力することにより、ビット誤り率を評価した。但し、今回はBSとWTは同軸ケーブルを用いて接続した。

Fig. 9に155.52Mbit/sの伝送速度におけるビット誤り率の入力光強度依存性を示す。入力光強度を増加するとともに、ビット誤り率は向上し、入力光電力が4.7mWのとき、最高で 10^{-11} と優れたビット誤り率を達成した。しかし、さらに入力光電力を増加すると、ビット誤り率は低下し、7.0mWとのとき 10^{-7} となった。これは光照射によってHEMTのチャネル層内におけるキャリアの生成・消滅確率が増加し、発振器の周波数安定度、位相雑音が劣化したためと考えられる。しかしながら、ミリ波路車間通信システムのビット誤り率の要求値⁶⁾である 10^{-6} を上回る、優れた伝送特性を示すことから、作製した光制御型ミリ波デジタル周波数変調器は光ベースバンド伝送方式を実現するキーデバイスとなり得ることが確認できた。

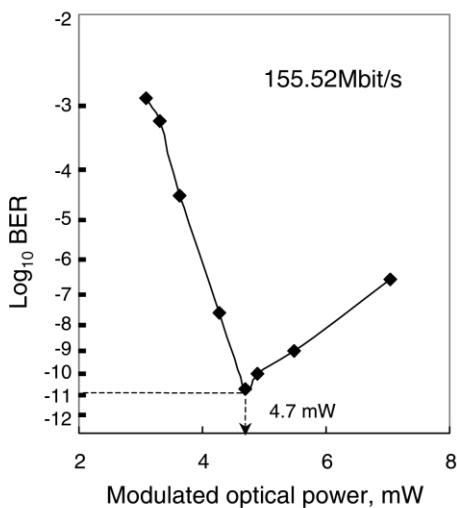


Fig. 9 Measured bit-error rate as a function of modulated optical power for the data rate of 155.52Mbit/s

5. むすび

ミリ波路車間通信システムの統合基地局と局地基地局の双方を低コスト化可能な光ベースバンド伝送方式を提案し、この方式を実現するキーデバイスとなる局地基地局用光制御型ミリ波デジタル周波数変調器を作製した。また、作製した変調器が155.52Mbit/sという高速伝送時にビット誤り率 10^{-11} を達成することを確認し、光ベースバンド伝送方式の実現性を証明した。

<参考文献>

- 1) H. Harada, H. J. Lee, S. Komaki, and N. Morinaga, "Performance Analysis of Fiber-optic Millimeter-Wave Band Radio Subscriber Loop", IEICE Trans. Commun., Vol.E76-B, No.9 (Sep. 1993), pp.1128-1135.
- 2) 原田博司, 前野隆宏, 長尾康之, 久津木研二, 青木豊, 清水崇之, 渡辺彰彦, 大村純夫, 松生雅信, 小椋正紀, 松尾望, 舘田良文, 加藤博光, 徳田清仁, 藤瀬雅之, "ミリ波帯無線信号を用いたROF路車間通信システムにおけるシステム構成方法に関する一検討", 信学技報., Vol.100, No.75, ITS2000-10 (May 2000), pp.55-62.
- 3) T. Kuri, K. Kitayama, and Y. Takahashi, "60-GHz-band full-duplex radio-on-fiber system using two-RF-port electroabsorption transceiver," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol.12, No.4 (April 2000), pp.419-421.
- 4) Th. Engel, E. Dr. ge, G. Unerb. rsch, E. H. B. ttcher, and D. Bimberg, "Reactive matching of millimeter-wave photodetectors using coplanar waveguide technology," Electron. Lett., Vol.34, No.17 (Aug 1998), pp.1690-1691.
- 5) Y. Miyake and K. Hoshino, "A light-controlled oscillator using InAlAs/InGaAs high electron mobility transistor", IEICE Trans. Electron., Vol.E84-C, No.10 (Oct 2001), pp.1356-1360.
- 6) 青木豊, 田口隆志, 原田博司, 藤瀬雅行, "ミリ波帯無線信号を用いたROF路車間通信システムにおける無線スポットアクセス方式の提案", 信学技報., Vol.100, No.75, ITS2000-11 (May 2000), pp.63-68.

< 著 者 >



三宅 康之
(みやけ やすゆき)
第2開発部
化合物半導体光デバイス，ミリ波集積回路の研究に従事



青木 豊
(あおき ゆたか)
第2開発部
化合物半導体デバイス，ミリ波システムの研究に従事



岡田 実
(おかだ みのる)
基礎研究所
ミリ波アンテナ，ミリ波通信システムの研究に従事



星野 浩一
(ほしの こういち)
第2開発部
ミリ波デバイス・実装技術を応用した，光ミリ波モジュール・ミリ波センサの開発に従事



原田 博司
(はらだ ひろし)
独立行政法人通信総合研究所
横須賀無線通信研究センター
工学博士
デジタル信号処理を利用した高速移動通信技術，ソフトウェア無線通信技術，ITSに関する研究に従事



藤瀬 雅行
(ふじせ まさゆき)
独立行政法人通信総合研究所
横須賀無線通信研究センター
工学博士
ミリ波ITS情報通信の研究に従事