

2-4 Beyond 5G を実現するテラヘルツ通信

2-4 Terahertz Communications for Beyond 5G

原 紳介 ムバラク モハメド 鐵本 智大 関根 徳彦 笠松 章史

HARA Shinsuke, Mohamed H. Mubarak, TETSUMOTO Tomohiro, SEKINE Norihiko, and KASAMATSU Akifumi

本稿では、Beyond 5G を実現するテラヘルツ通信の実現に向けた取組として、一般普及に適したシリコン CMOS 集積回路技術を利用したテラヘルツ無線通信送受信機の研究と光技術を用いた低位相雑音のテラヘルツ波発生技術について概説する。シリコン CMOS では増幅器の実現が難しい 300 GHz 帯において、アーキテクチャの工夫により開発した CMOS 受信機回路と、アンテナ・CMOS 集積回路・PCB 技術を組み合わせることで実現したビームステアリング CMOS 受信機モジュールの開発例について紹介する。光技術を用いたテラヘルツ波発生については、低位相雑音テラヘルツ波発生における光技術を用いる利点とマイクロ光コムという集積化可能な光周波数コム光源を用いた手法を紹介する。

This paper outlines research into terahertz transceivers using silicon CMOS technology and photonics technology for low phase noise terahertz-wave generation as efforts to realize terahertz communications beyond 5G. It presents a CMOS receiver circuit developed by low-noise-amplifier-less architecture in the 300-GHz band, where it is difficult to realize amplifiers in silicon CMOS. In addition, a beam steerable CMOS receiver module that combines antenna, CMOS integrated circuit, and PCB technologies is also presented. In the photonics part, the general advantages of photonic technologies for low phase noise terahertz-wave generation and integrated optical frequency combs, also referred to as microcombs, are introduced.

1 まえがき

近年普及しつつある第5世代移動通信システム(5G)よりも高度な通信インフラとして、次世代の無線通信規格「Beyond 5G / 6G」の実現が期待されている。

2020年には総務省主体のロードマップが「Beyond 5G 推進戦略懇談会」により策定され[1]、多方面でこの基盤技術の開発が活発化している。2で詳述されているようにこのロードマップでは、Beyond 5G / 6Gの機能の一環として、「超高速・大容量」、「超低遅延」を具備することが求められている。この要求を満たす要素技術の一つとして、周波数 100 GHz 以上のテラヘルツ波を利用した無線通信技術の実現が期待されている。

テラヘルツ波は「電波」と「光」の中間の周波数帯の電磁波であり、利活用が進んでいない“未開拓の周波数資源”の一つである。一般的に電磁波は周波数が高いほど減衰が大きくなるが、1 THz 以下のテラヘルツ波帯において、大気中の気体分子による吸収特性の影響の少ない周波数帯域「大気の窓」が多数存在する。大気の窓は数十～100 GHz 近くの帯域にわたる領域がある

ことから、もしこの帯域で無線通信用途に幅広い周波数が割り当てられて利用が始まれば、周波数資源の枯渇によって生じる通信容量不足の解消とともに、ICT技術による産業構造の変革を加速させる超高速無線通信技術が確立できると予想される[2]。この期待の下、テラヘルツ周波数帯の一つである 300 GHz 帯に関しては、国際電気通信連合の無線通信部門 (ITU-R) で無線周波数割り当ての議論が進み、252～325 GHz の約 70 GHz の帯域を利用した 100 Gb/s の無線通信を目指す規格 IEEE 802.15.3d も定められた[3][4]。

無線通信においては、情報を高周波信号に変えて送信アンテナに送り出す送信機、発信された電波を受信して必要に応じて情報を取り出すための受信機が必要になる。信号処理部と受信信号処理部の電波側の末端部分に当たる RF フロントエンドは、アンテナとベースバンド信号処理部の間の高周波信号の処理を担う部分であり、増幅器や周波数混合器(ミキサ)、発振器などにより構成される。無線周波数集積回路(RFIC)はこれら機能ブロックを単一の半導体基板上に一体化した集積回路であり、半導体基板上の能動素子(トラン

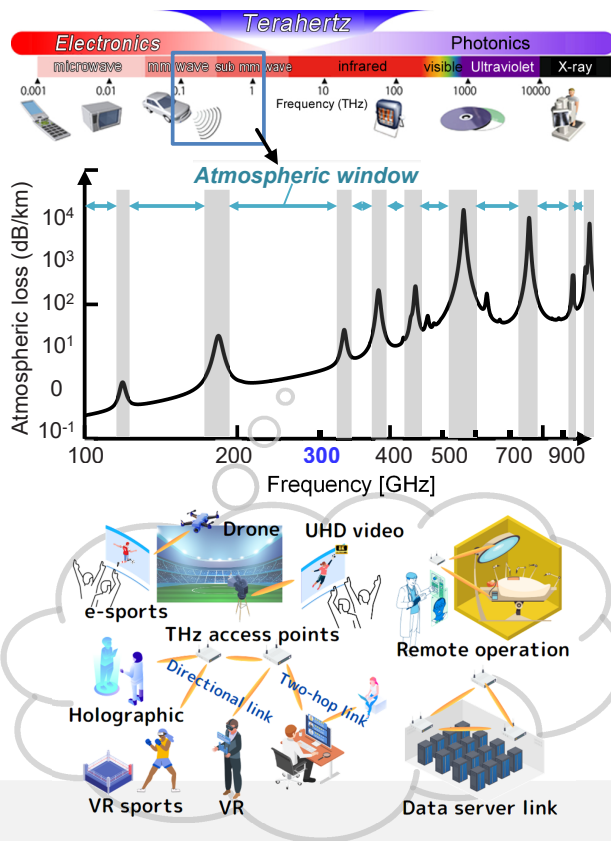


図1 100 GHz～1 THzの大気減衰率 [4] とテラヘルツ帯無線通信の応用例

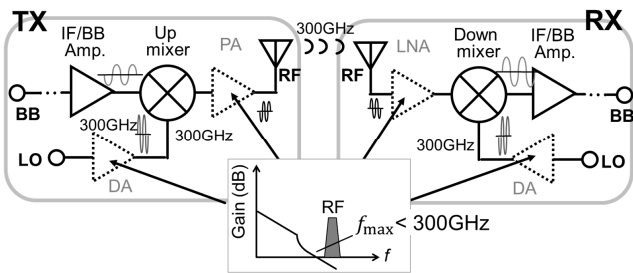


図2 従来の無線送受信機アーキテクチャと、 f_{max} がキャリア周波数以下の際に生じる課題

ジスタ、ダイオードなど)や受動素子(抵抗、キャパシタ、インダクタなど)により実現される。

テラヘルツ無線通信を実現するためには、テラヘルツ帯の搬送周波数で動作するRFICを開発することが不可欠になるが、利用するテクノロジー(半導体技術)のトランジスタの性能がシステムの性能に直接影響する。RFICに利用される主なテクノロジーとして、III-V族化合物半導体(InP、GaNなど)、歪技術^{ひずみ}を応用したシリコンゲルマニウム(SiGe)、シリコンCMOS技術が挙げられる。それぞれの技術の特徴を表1に示す。トランジスタの高速性は、電流利得遮断周波数(f_T)及び最大発振周波数(f_{max})により表されるが、III-V族化合物半導体やSiGeはその材料特性により優れた高周波特性を有しており、テラヘルツ無線通信用RFIC

表1 半導体技術の比較

	III-V	SiGe	CMOS
高速性	☹️	😊or😊	😊
出力電力	😊	😊or😊	😊
消費電力	😊	😊or😊	☹️
集積度	☹️	😊	😊
コスト	☹️	😊	😊

のテクノロジーとして適しているといえる。一方でシリコンCMOSは、高度な微細化技術と安定的な大量生産が可能である点から集積度・コストが格段に優れ、また他のデジタル計算処理やメモリ回路などと集積・一体化することも可能である。テラヘルツ無線通信を広く一般に普及させるためには、RFICもシリコンCMOSによって作られることが理想的であるといえる。しかし、その高周波特性は微細化技術により向上してきたが、他のテクノロジーに比べていまだに劣っている。

一般的に、 f_{max} より高い周波数帯域では信号増幅ができず、高い利得・出力の増幅器を実現するためには、動作周波数よりも約2倍以上高い f_{max} が求められる。このため f_{max} が300 GHz程度のシリコンCMOSでは、アンテナと直接接続するパワーアンプ(PA)と低雑音増幅器(LNA)が、300 GHz帯では設計できない。広い帯域が未活用として残っている300 GHz帯の無線送受信機の開発をシリコンCMOSで行う場合、図2に示すようにPA、LNAを含まないアーキテクチャによる回路技術が必要となる。

この課題解決に向けて、シリコンCMOSを利用した300 GHz帯の無線送受信機集積回路を開発してきた。次章より、この研究成果の一部として300 GHz帯CMOS無線受信機回路とビームステアリングCMOS受信機モジュールについて紹介する。また、別観点のアプローチとして、将来的な光電融合を見据えて、電子技術単独では実現困難な性能や機能を得るための光技術の開発が進んでいる。その取組のうち低位相雑音テラヘルツ波発生に関する話題を本稿の最後に紹介する。

2 300 GHz 帯 CMOS 無線受信機回路

図3に開発した300 GHz帯受信機回路のブロック図を示す[5]。先述したように、シリコンCMOSでは300 GHz帯で増幅器を設計できないため、LNAを使わないミキサファーストのアーキテクチャを採用している。高周波(RF)信号を中間周波数(IF)へ変換する

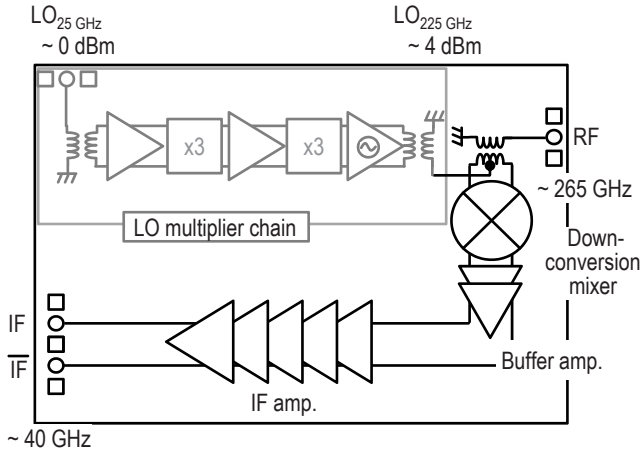


図3 高周波集積回路の例 (300 GHz 帯受信機回路のブロック図)

ためのダウンコンバージョンミキサ、バッファ増幅器とIF増幅器により構成され、またチップ外部より供給される局所発振(LO)信号をミキサへ供給するために9通倍するLO通倍回路群が付与されている。

高周波集積回路は図のように、様々な役割を果たす回路ブロックを縦続的に接続して構成する。各ブロック単体の性能を高めつつ、ブロック間の信号伝播の効率を高めることが、設計を行う上で重要になる。特に受信機回路においては、微弱RF信号をノイズに埋もれさせないようにするため雑音指数が重要な指標となる。縦続接続した場合の雑音指数(NF_{total})に関するフリスの式を以下に示す。

$$NF_{total} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \dots + \frac{NF_n - 1}{G_1 \times G_2 \times \dots \times G_{n-1}} \quad (1)$$

NF_{total} は各回路段の雑音指数(NF)と利得(G)により表され、特に初段性能(雑音指数 NF_1 、利得 G_1)が重要になる。ミキサーファーストのアーキテクチャを採用した本回路では、この初段に配置したダウンコンバージョンミキサがその役割を担うが、LNAと異なり利得はプラスにはならない。そのため初段ミキサの低雑音化と高利得(低損失)化の実現と、また後段の増幅器と効率的な接続を実現することが回路特性を向上するうえで重要になる。

実際に試作した300 GHz帯受信機回路のチップ写真を図4(a)に示す。初段配置のダウンコンバージョンミキサにゲート接地型ミキサを採用した(図4(b))。トランジスタと信号線の寄生抵抗を低減可能であり、また最小限のスタブのみで入力整合を取ることが可能であるため、雑音特性と損失の低減が実現できる。ダウンコンバートされたIF信号用の増幅器には、キャパシタクロスカップリング手法を用いたコモンソース型増幅器を採用した(図4(c))。トランジスタのゲートドレイン間の寄生容量を低減させ、利得の向上が実現できる。伝送線路はGNDウォール付きマイクロスト

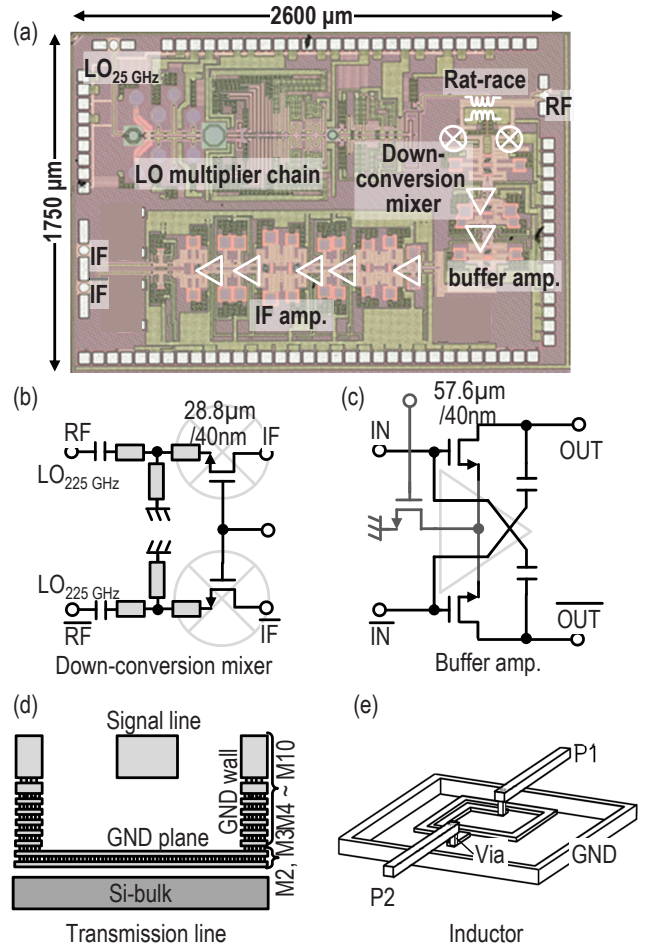


図4 (a) 試作した300 GHz帯無線受信機回路のチップ写真 (b) ダウンコンバージョンミキサと(c) バッファ/IF増幅器の回路図 (d) 伝送線路と(e) インダクタの構造図

リップ線路を採用し、信号線に厚膜配線層を利用することで伝搬損失の低減を実現している(図4(d))。またインダクタのパラメタライズセル(P-cell)を独自設計し、IF信号の整合回路に用いることでチップ面積の小型化を実現している(図4(e))。 $f_{max} \approx 280$ GHzの40 nmプロセスを使用した本回路は、上記のようなシリコン高周波回路技術を多数駆使して設計している。

試作したCMOS受信機の性能評価結果を図5に示す。測定・評価はNICTネットワーク研究所 先端ICTデバイスラボ(ミリ波研究棟)の共用設備であるマニュアルプローバ及びネットワークアナライザなどを用いて実施した。高周波プローブを用いたオンウェハ測定の結果、出力特性として、26 dBの変換利得(CG)、17.4 dBの雑音指数が得られた。

試作した受信機回路を、導波管変換機構を備えたプリント回路基板(PCB)上にフリップチップ実装することでモジュール化し(図6(a)-(c))、無線伝送実験を実施した。試作した受信機モジュールの通信性能を、市販されている300 GHz帯アップコンバータと26 dB_iのホーンアンテナ、各種測定機器を利用して評価した

(図 6 (d))。この結果、16QAM 変調信号を用いた無線伝送において、最大 76 Gbit/s のデータレートが得られた (図 6 (e))。

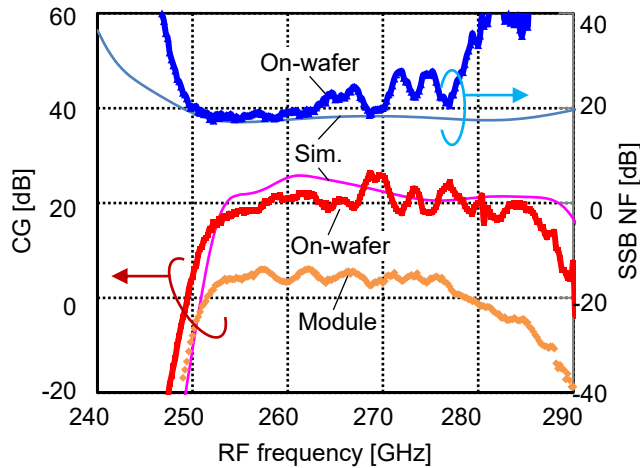


図 5 試作 300 GHz 帯無線受信機の周波数特性

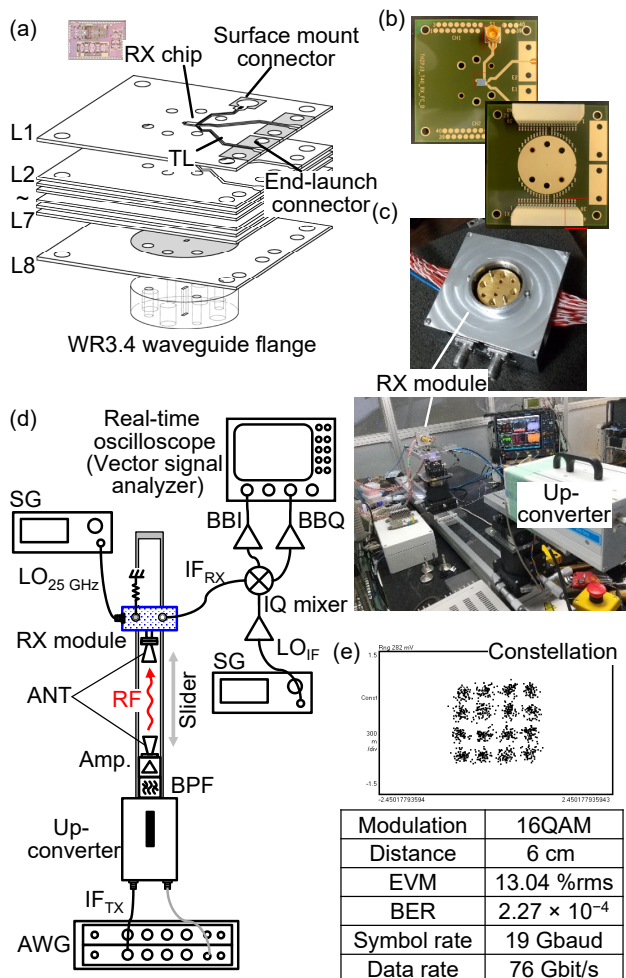


図 6 (a) モジュール用 PCB の構造図 (b) 基板と (c) モジュール写真 (d) 無線実験セットアップ (e) 無線実験結果

3 300GHz 帯 ビームステアリング CMOS 無線受信機

Beyond 5G 高速無線通信の実現に向けて、テラヘルツ帯で動作する RF フロントエンド (送信/受信機) の研究が盛んに行われている。特にフェーズドアレー方式やメカニカルアンテナ方式などのビームステアリング技術は、アンテナアレー数に乗じた等価等方放射電力 (EIRP) の向上と、ビーム指向性の任意制御を実現できる点で、テラヘルツ無線通信への応用が期待されている。しかしテラヘルツ帯は波長が短いため、グレーティングロブ低減に必要なアンテナピッチ ($\leq \lambda/2$) を満たすシステム構成は容易に実現できない。

本章では、新たに開発した 2 次元ビームステアリング CMOS 受信機モジュールを紹介する。開発した受信機は、2 次元ビームステアリングを実現するため、水平面 (E 面)、垂直面 (H 面) のビームステアリングにフェーズドアレー方式とメカニカルアンテナ方式をそれぞれ利用したハイブリッド構成を採用した。この受信機モジュールは、上下走査が可能な平面円筒レンズアンテナと、1.25 mm ピッチのアレイ配置の一次放射器を有するマルチポート導波管、受信機 CMOS 回路 IC をマルチチップ実装した PCB により構成される (図 7)。1 次元フェーズドアレーとメカニカルステアリングによる水平、垂直面のビームパターンの走査範囲は、それぞれ 28° 、 18° で設計された。フェーズドア

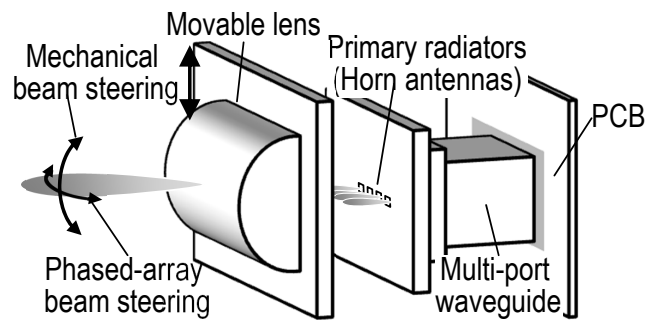


図 7 2次元ビームステアリング CMOS 受信機

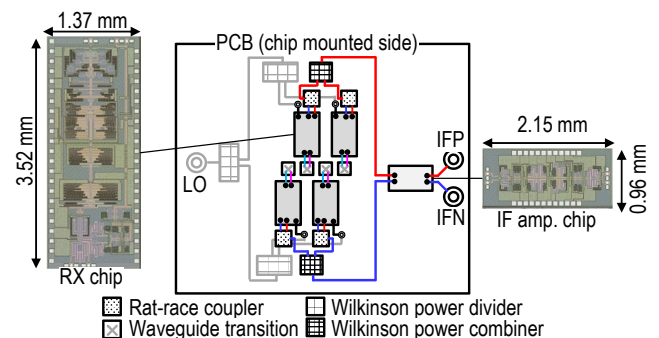


図 8 CMOS フェーズドアレー受信機 PCB のブロック図

レーは主に受信機 CMOS チップを搭載した PCB により実現され、本報告ではこの PCB に焦点を当て報告する [6]。

図8に多層PCB上に構築したフェーズドアレー受信機のブロック図を示す。4つの受信機チップと1つのIFアンプチップがフリップチップ実装され、受信機チップにはダブルバランスミキサ、差動バッファアンプ、位相シフター付きLO通倍器チェーンが含まれている [7]。ミキサファーストアーキテクチャの本回路において、260 GHz 帯の RF 信号は PCB 上導波管変換器とバンプを介して給電され、45 GHz 帯の IF 信号へ効率的に信号変換を行う。

フェーズドアレーを実現するために、4つの導波管変換器を [8]、マルチポート導波管と一次放射器の寸法に合わせて 1.25 mm ピッチ ($1.1 \lambda @ 260 \text{ GHz}$) で多層 PCB 上に1次元状に配置した。信号の伝搬損失を抑制するためには、受信機チップは導波管変換器に隣接して1対1で配置することが好ましい。しかしながら受信機チップの幅は 1.37 mm であり一次放射器の配置ピッチを超えてしまうため、シンプルな並列配列はできなかった。そのため本研究では、受信機チップを千鳥格子状に実装した。

実装チップと受動回路を、導波管変換器に対して点対称に配置することで、上下経路で差動信号を形成した。この信号合成/分岐/伝搬のために、多層PCB上でRat-raceカプラ、Wilkinsonコンバイナ、50 Ω線路、スルービア配線などのパッシブ素子を設計・開発した [9]。チップから出力される約 45 GHz の位相シフトされた差動 IF 信号は、Rat-raceカプラでシングルエンドに変換し、Wilkinsonコンバイナにより2チップからの出力を合成した(図9(a))。経路は信号のアンバランスを抑制するため、等長の伝送線路にて接続した。受信機チップから同じ強度・位相の信号が出力されると仮定した場合、挿入損失は -0.5 dB と予測され、ビームステアリング時の効果的な信号合成が可能であることが推測された(図9(b))。12 GHz の LO 信号は、チップ実装面の反対側(裏面)の同軸コネクタより供給され、3つのWilkinsonパワーデバイダによって4分岐した。スルービア配線を経てチップ実装面に伝搬された後、LO信号はダウンコンバータチップに供給した(図10(a))。IF信号と同様に、経路は信号のアンバランスを抑制するため、等長の伝送線路にて接続した。シミュレーションの結果、信号分岐を含めた挿入損失は12 GHzのLO信号に対して -8.3 dB と予測され、低

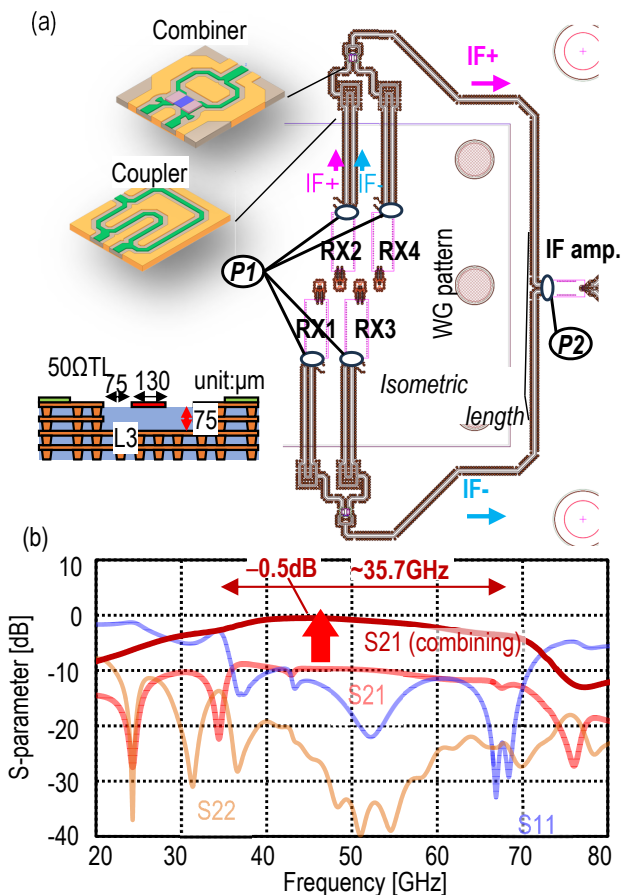


図9 IF信号経路及びシミュレーション

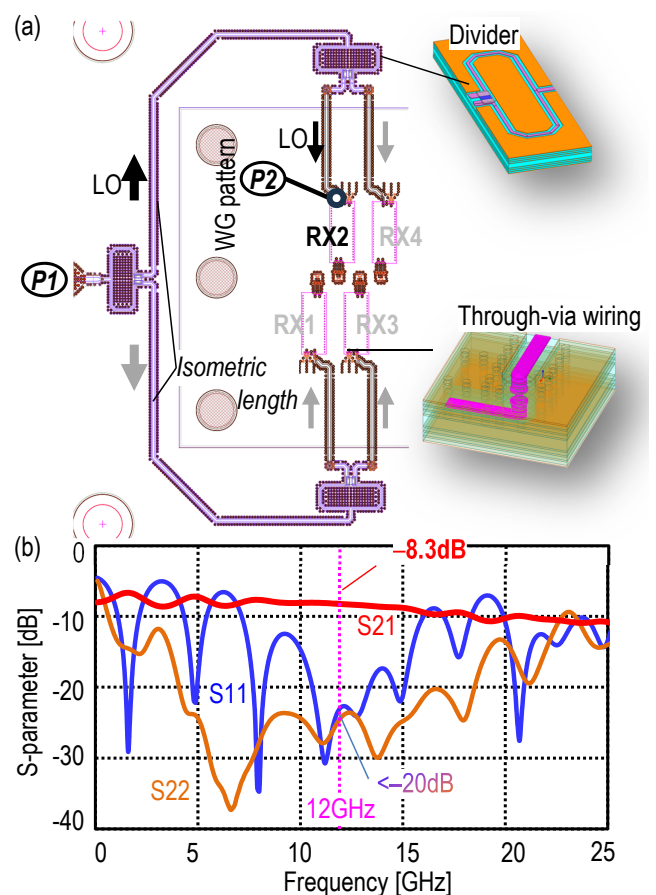


図10 LO信号経路及びシミュレーション

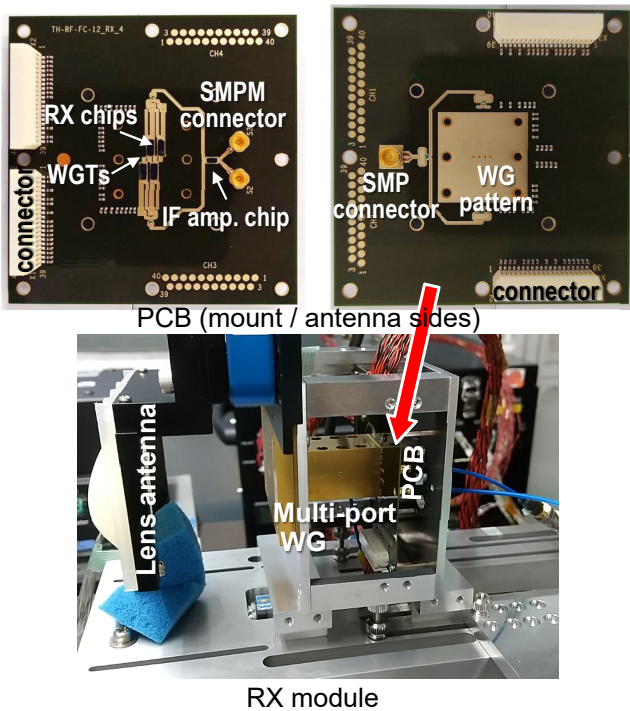


図 11 PCB と受信機モジュール写真

損失の伝搬が可能であることが予測された(図 10 (b))。

試作した PCB の写真を図 11 に示す。チップ実装面の裏側には導波管との接続パターンを形成しており、高精度で一次放射器を備えたマルチポート導波管と連結する。その後、上下走査が可能な平面円筒レンズアンテナと機械的に接続し、2次元ビームステアリング受信機モジュールが完成する。

試作したビームステアリング受信機モジュールを用いて、フェーズドアレイビームステアリングの無線通信実験を、NICT ネットワーク研究所 先端 ICT デバイスラボ(ミリ波研究棟)の共用設備内にて実施した。測定セットアップを図 12 (a) に示す。送信側は市販測定器を用いて -5 dBm の出力系を構築し、これと 40 dBi の高利得レンズアンテナと組み合わせた。RX モジュールは送信機から 65 cm 離れたステージ上に設置し、ステージを回転させることでステアリング角を評価した。RX モジュール出力の IF 信号は、チャンネルイコライジング機能付きベクトルシグナルアナライザ (VSA) で信号波形が解析し、IEEE Std. 802.15.3d のチャンネルレイヤをもとに評価した。

図 12 (b) に BER10^{-3}における無線通信性能の結果を示す。結果、28°のステアリング角において、QPSK と 16QAM それぞれ 25.92 Gb/s (Ch.57), 17.28 Gb/s (Ch.33) のデータレートを達成した。

4 光技術を用いた低位相雑音テラヘルツ波発生

無線通信の高速大容量化や基準信号生成には、低位相雑音な発信器を利用することが望ましい。100 GHz を超えるテラヘルツ波帯においては、低位相雑音化の観点で光を用いた信号発生手法の優位性が見えてくる。図 13 に電子技術、光技術のそれぞれによる低位相雑音信号の発生手法を模式的に示した。電子技術では、一般に、低周波数帯の低位相雑音な発信器の周波数を逡倍することで高調波を取り出すが、出力の雑音パワーは逡倍数の二乗に比例して大きくなってしまふ。一方、光技術では、2つの単色レーザー光の差周波を高速フォトダイオードで受光して取り出す方法が典型的に用いられるが、この際の雑音パワーは出力の周波数に依らず、利用するレーザー光の相対位相雑音に制限される。故に、出力の周波数が高い程、光技術による発生手法が低位相雑音化の観点で有利になる。これに加えて、光技術を用いた電波発生手法は、光通信網で伝送された信号を受光する事で無線信号に直接変換できることからアナログ RoF (Radio-over-Fiber) との親和性が高い。一方で、低位相雑音化にはレーザー光源の安定化が必要であり、そのために高安定な共振器等、高価で小

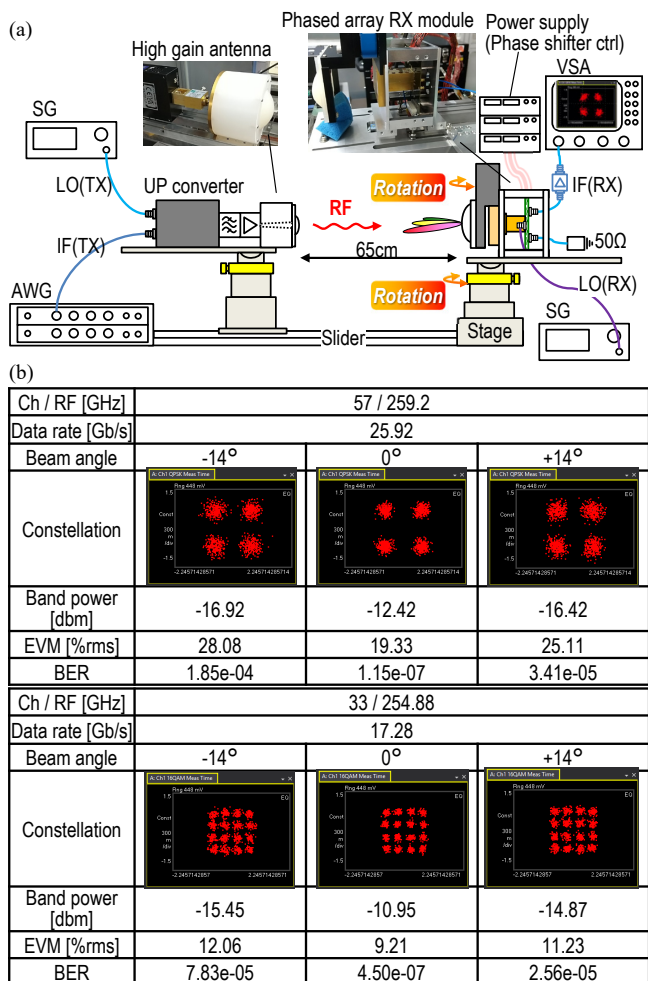


図 12 (a) 測定セットアップ (b) 無線通信性能

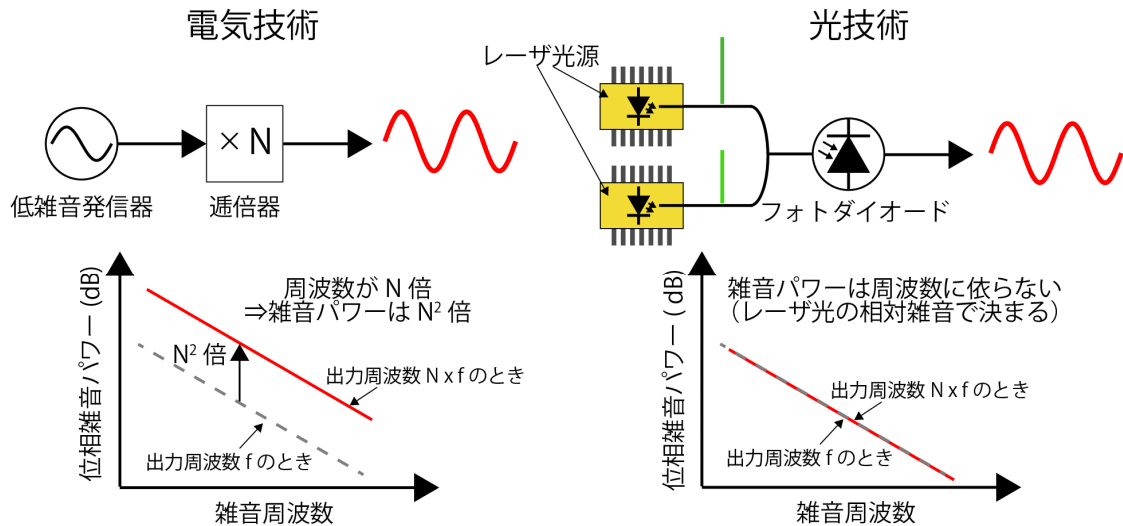


図 13 電子技術・光技術による低位相雑音テラヘルツ波発生手法の模式図

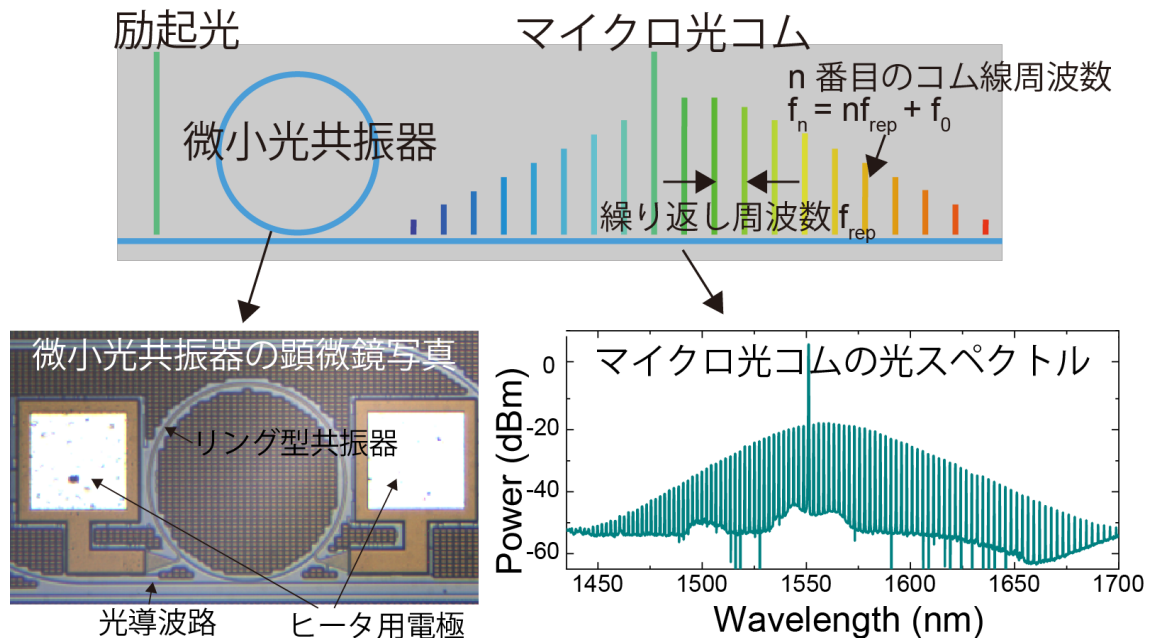


図 14 マイクロ光コムの発生法の模式図、微小光共振器の顕微鏡写真、実験で得られたマイクロ光コムの光スペクトル

型化が困難な設備が求められることが、幅広い民生応用へ展開するための課題となっている。

近年、集積可能で低位相雑音な光源としてマイクロ光コムが注目されている [9] (図 14)。これは、チップ上に作製された微小光共振器中で発生可能な光周波数コム光源であり、典型的には、微小光共振器に高強度の単一波長レーザを入力した際に起こる連鎖的な縮退・非縮退四光波混合を介して励起される。励起光周波数や光強度等を制御することで低位相雑音化が可能であり、特に光周波数分割という手法で超低位相雑音のテラヘルツ波発生が可能である事が示された [10]。NICT においては、これまで、微小光共振器作製及びマイクロ光コム発生 [11]、光通信応用 [12]、マイクロ

光コムの評価手法の開発 [13] 等の研究に取り組んできた。

マイクロ光コムは、集積性と低雑音性を兼ね備える事から Beyond 5G / 6G における新規のテラヘルツ波発信器として有望であるが、光通信にも低消費電力な多波長光源として利用できる可能性も秘めている。しかし、性能面・機能面で改善が必要な課題がまだ少なくない。例として、レーザ、光共振器、フォトダイオード等の異種材料から成るデバイスの共集積化、コム発生の高効率化、出力周波数の可変幅拡大等が主に挙げられる。NICT においてもこうした課題の解決に向けた取組を進めており、その一つとしてマイクロ光コムを利用した広帯域周波数可変なテラヘルツ波発信器の

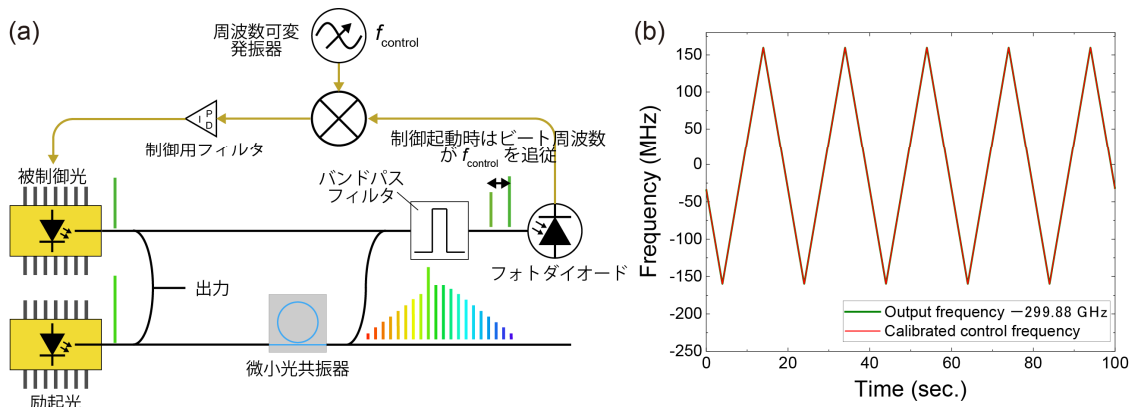


図 15 (a) 広帯域周波数可変テラヘルツ波発信器の実験系の模式図 (b) 周波数掃引実験結果

原理実証実験を行った [14]。図 15 (a) に実験系の模式図を示す。ここでは、周波数が 300 GHz 程度離れた 2 つの単一波長レーザ光源の差周波を出力としており、それをマイクロ光コムに位相同期した状態で周波数掃引することで低位相雑音と広い可変幅の両立を目指した。1 つのレーザ光はマイクロ光コム (繰り返し周波数 300 GHz 程度) の励起光として利用され、発生したマイクロ光コムの一部はもう 1 つのレーザ光 (被制御光) と合波される。このとき、バンドパスフィルタによって被制御光と被制御光に周波数が最も近い 1 本のマイクロ光コム線が取り出され、フォトダイオードでそれらのビート信号が検出される。得られたビート信号は周波数ミキサに入力され、周波数可変 RF 発信器の出力 (周波数 $f_{control}$) と比較される。ここで、ビート信号周波数と $f_{control}$ が一致するように被制御光に帰還を加えると、2 つのレーザの相対位相雑音がマイクロ光コムに位相同期し、低位相雑音の 300 GHz 信号が得られると同時に、 $f_{control}$ を変化させることによって出力周波数の調整が可能になる。実際に制御ループ起動時に周波数掃引を行った結果を図 15 (b) に示す。出力周波数が制御周波数 $f_{control}$ の変化を良く追従し、マイクロ光コム単独の場合の典型的な可変幅 (数十 MHz 程度) より一桁大きい 300 MHz の掃引範囲が得られたことが分かる。なお、この可変幅の制限要因は制御ループ内の一部の回路素子の動作帯域であった。別の素子を利用して $f_{control}$ を 10 GHz とした条件でも位相同期は確認できたため、回路素子を適切に選定すれば原理的には連続可変範囲を 10 GHz 以上とすることも可能と考えられる。

5 まとめ

Beyond 5G / 6G の取組は既にスタートしており、そのロードマップが「Beyond 5G 推進戦略懇談会」により策定された。Beyond 5G / 6G の機能として、「超高

速・大容量」、「超低遅延」を具備することが求められており、テラヘルツ帯無線通信はこれらを実現するための要素技術の一つの候補として期待される。本稿ではテラヘルツ帯無線通信技術の基盤技術を担うと考えられるシリコン CMOS 高周波回路を利用した 300 GHz 帯無線受信機の開発について紹介した。また、テラヘルツ波帯における低位相雑音な発信器開発の取組としてマイクロ光コムという新規光源を用いた手法を紹介した。今後、送受信機の性能の向上とともに、実用化に向けた更なる開発が期待される。

謝辞

本稿のシリコン CMOS 集積回路に係る研究開発は総務省「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」の一環として行われました。研究の実施にあたり助言をいただいたプロジェクトメンバーに感謝いたします。

【参考文献】

- G. Ducournau, P. Szriftgiser, F. Pavanello, E. Peytavit, M. Zaknoute, D. Bacquet, A. Beck, T. Akalin, J.-F. Lampin, and J.-F. Lampin, "THz communications using photonics and electronic devices: The race to data-rate," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol.36, no.2, pp.198-220, Feb. 2015, doi: 10.1007/s10762-014-0112-x
- Final Acts WRC-19. Accessed: July 12, 2022. [Online]. <http://handle.itu.int/11.1002/pub/813b5921-en>
- IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks-Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer, IEEE Standard 802.15.3d-2017, 2017.
- AMATERASU. Accessed: July 12, 2022. [Online]. <https://smiles-p6.nict.go.jp/thz/jp/decay.html>
- S. Hara, R. Dong, S. Lee, K. Takano, N. Toshida, A. Kasamatsu, K. Sakakibara, T. Yoshida, S. Amakawa, and M. Fujishima, "A 76-Gbit/s 265-GHz CMOS Receiver With WR-3.4 Waveguide Interface," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol.57, no.10, pp.2988-2998, Oct. 2022, doi: 10.1109/JSSC.2022.3179560.
- S. Hara, M. H. Mubarak, A. Kasamatsu, Y. Sugimoto, K. Sakakibara, K. Takano, T. Yoshida, S. Amakawa, and M. Fujisima, "25.9-Gb/s 259-GHz Phased-Array CMOS Receiver Module with 28° Steering Range," 2024 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS2024), pp.1-4, doi: 10.1109/RWS56914.2024.10438659.
- T. Yoshida, S. Hara, T. Hagino, M. H. Mubarak, A. Kasamatsu, K. Takano,

- Y. Sugimoto, K. Sakakibara, S. Amakawa, and M. Fujishima, "A 2D Beam-Steerable 252–285-GHz 25.8-Gbit/s CMOS Receiver Module," 2023 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC), pp.1–3, doi: 10.1109/A-SSCC58667.2023.10347997.
- 8 M. H. Mubarak, S. Hara, S. Tanoi, T. Hagino, I. Watanabe, and A. Kasamatsu, "Development and Characterization of Wideband Power Divider for Sub-THz Transceiver Modules," 2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), pp.154–156, doi: 10.1109/IMOC57131.2023.10379721.
- 9 Tobias J. Kippenberg, Alexander L. Gaeta, Michal Lipson, and Michael L. Gorodetsky., Science 361, 567, 2018.
- 10 T. Tetsumoto, T. Nagatsuma, M. E. Fermann, et al., "Optically referenced 300GHz millimetre-wave oscillator," Nat. Photon. 15, pp.516–522, 2021.
- 11 Shota Sota, Koichiro Handa, Shun Fujii, Takasumi Tanabe, Yoshinori Uzawa, Kentaro Furusawa, and Norihiko Sekine, "Fabrication of silicon nitride based high-Q microring resonators prepared by the hot-wire CVD method and their applications to frequency comb generation," Opt. Mater. Express 14, pp.1128–1138, 2024.
- 12 Shun Fujii, Shuya Tanaka, Tamiki Ohtsuka, Soma Kogure, Koshiro Wada, Hajime Kumazaki, Shun Tasaka, Yosuke Hashimoto, Yuta Kobayashi, Tomohiro Araki, Kentaro Furusawa, Norihiko Sekine, Satoki Kawanishi, and Takasumi Tanabe, "Dissipative Kerr soliton microcombs for FEC-free optical communications over 100 channels," Opt. Express 30, pp.1351–1364, 2022.
- 13 Ayaka Shoda, Tomohiro Tetsumoto, Kentaro Furusawa, Kazuhiro Imai, Motonobu Kourogi, and Norihiko Sekine, "Broadband and precise characterization of comb-resonance detuning of microresonator frequency combs based on coherent detection," Opt. Continuum 3, pp.234–241, 2024.
- 14 T. Tetsumoto, K. Furusawa, and N. Sekine, "A frequency-tunable photonic terahertz oscillator referencing to a microresonator frequency comb," 2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Sapporo, Japan, 2023.



関根 徳彦 (せきね のりひこ)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
室長
博士(工学)
テラヘルツデバイス・システム

【受賞歴】

2021年 第66回前島密賞 [団体：功績3号]
2020年 電子情報通信学会エレクトロニクス
レター論文賞
2017年 第28回電波功績賞 電波産業会代表
理事表彰



笠松 章史 (かさまつ あきふみ)

未来 ICT 研究所
小金井フロンティア研究センター
研究センター長
博士(工学)
高周波電子デバイス・システム

【受賞歴】

2023年 令和5年度情報通信月間推進協議会
会長表彰 志田林三郎賞
2019年 第64回前島密賞
2017年 第28回電波功績賞 電波産業会代表
理事表彰



原 紳介 (はら しんすけ)

未来 ICT 研究所
小金井フロンティア研究センター
超高周波 ICT 研究室
主任研究員
博士(理学)
高周波集積回路、ナノ電子デバイス

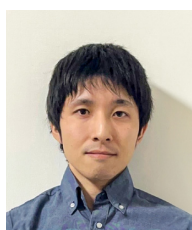
【受賞歴】

2018年 IEIECE 論文賞
2017年 RFIT2017 学会賞受賞
2015年 RFIT2015 学会賞受賞



ムバラク モハメド

未来 ICT 研究所
小金井フロンティア研究センター
超高周波 ICT 研究室
研究員
博士(工学)
高周波電子デバイス・システム



鐵本 智大 (てつもと ともひろ)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
主任研究員
博士(工学)
集積フォトニクス、マイクロ波フォトニクス