

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03781

研究課題名(和文) サブテラヘルツ帯を用いた光通信速度を有する無線システム(Wi-FOS)の研究

研究課題名(英文) Study on sub-terahertz-band wireless system with fiber-optic speed

研究代表者

藤島 実 (Fujishima, Minoru)

広島大学・先進理工系科学研究科(先)・教授

研究者番号：60251352

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,700,000円

研究成果の概要(和文)：サブテラヘルツ帯の一つである300GHz帯を用いて、次世代通信規格6Gで期待される毎秒100ギガビットの通信を100kmにわたって行うことができるWiFOS (Wireless with Fiber-Optic Speed)を検討した。サブテラヘルツ帯などの高周波を用いることは、通信速度の向上に有効であるが、高周波を用いた無線通信は、従来考えられていたような近距離通信に限定されないことを理論的に明らかにした。また、スマートフォンなどで広く使われており、実用化が期待されているCMOS集積回路を用いたトランシーバーを用いて、毎秒80ギガビットの無線通信を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数の機関より公表されている次世代通信規格6G白書によると、通信速度のさらなる向上だけでなく、空・海・宇宙へのサービス範囲の拡大が期待されている。本プロジェクトでは、サブテラヘルツを用いることで、通信速度の向上とサービス範囲の拡大を同時に実現できることを理論的に明らかにし、サブテラヘルツ通信機のデモンストレーションを行った。この技術が進めば、飛行機や船、さらには宇宙でも、地上にいるのと同じような通信環境を提供できるようになると期待される。

研究成果の概要(英文)：Using the 300 GHz band, one of the sub-terahertz bands, we have investigated WiFOS (Wireless with Fiber-Optic Speed), which is capable of 100 gigabits per second communication over 100 km, which is expected in the next-generation communication standard 6G. Although the use of high frequencies, such as sub-THz bands, is effective in increasing the communication speed, we theoretically clarified that wireless communication using high frequencies is not limited to short-distance communication as previously thought. We also demonstrated wireless communication at 80 gigabits per second using a transceiver based on a CMOS integrated circuit, which is widely used in smartphones and other devices and is expected to be put to practical use.

研究分野：集積回路工学

キーワード：無線通信 6G テラヘルツ 300GHz帯 CMOS 集積回路 トランシーバ

1. 研究開始当初の背景

無線通信の伝送速度を光通信の伝送速度まで引き上げ、両者の境界をなくすことは究極の技術目標である。この究極の目標をかなえるために、通信距離を犠牲とすることなく光通信速度を実現する無線 (Wi-FOS: Wireless with Fiber-Optic Speed) の実現を目指した。光通信が実用化されてから半世紀、移動可能で低速な無線通信と、固定で高速な光通信の適用範囲は分かれていた。Wi-FOS では、光通信と同じ伝送速度で互換インタフェースを用いることにより、光通信とシームレスな接続が可能となる。Wi-FOS を実現するための鍵は、①通信に適したテラヘルツ帯周波数の選択、②数十ギガヘルツの超広帯域送受信機、③数十ギガビットの超高速変復調回路にある。本申請では、先行研究で実施した①および②の成果を活用しつつ、③の開発を進めることにより究極の無線 Wi-FOS の実現を目指す。

2. 研究の目的

Beyond 5G は、5G よりもデータレートを向上させるだけでなく、高速通信の対象範囲を空や海、さらには宇宙にまで広げることを目指している。キャリアの周波数が高くなることで、データレートの向上に貢献することが期待される。252GHz から 275GHz までは、これまでに移動体通信や陸上固定通信用に特定されている。さらに、2019 年の世界無線通信会議 (WRC2019) では、275GHz から 296GHz も通信用として特定された。その結果、300GHz 帯の通信には、44GHz の連続した周波数帯を使用することができる。この周波数帯の利用により、100Gb/s を超える通信速度への期待が高まっている。しかし、周波数が高くなればなるほど、通信距離が短くなり、カバー範囲が狭くなるという懸念があった。

3. 研究の方法

光通信とシームレスな接続を可能にする Wi-FOS の実現に向け、通信に用いられる周波数と通信距離の関係を理論的に明らかにするとともに、Wi-FOS を実現する CMOS 集積回路の開発を行った。

4. 研究成果

(1) 通信周波数と通信距離の関係[1,2]

送信電力に対する受信電力の割合である伝搬損失は、フリスの伝搬式にしたがって次のように与えられる。

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

ここでは P_r は受信電力。 P_t は送信電力である。 G_t として G_r は、それぞれ送信アンテナと受信アンテナの利得である。 λ は波長、そして d は通信距離を表す。この式から、アンテナ利得が一定の条件では P_r は λ^2 に比例して小さくなる。つまり、アンテナ利得が変わらなければ P_r は、周波数が高くなるにつれて急激に小さくなる。一方、アンテナの利得 G_t は次式で与えられる。

$$G_t = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \quad (2)$$

ここで A_e は実効アンテナ面積である。等価等方輻射電力を(1)に代入すると $EIRP (= P_t \cdot G_t)$ を(1)に代入すると、次のようになります。

$$P_r = EIRP \cdot G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3)$$

さらに、(2)を G_r に適用すると、次のようになる。

$$P_r = EIRP \frac{A_r}{4\pi d^2} = EIRP \frac{\Omega}{4\pi} \quad (4)$$

ここで、 Ω は送信機から受信アンテナまでの立体角である。(4)から P_r は $EIRP$ と A_r と d で決まり、 λ には依存しないことがわかる。つまり、搬送波周波数と伝搬損失は本質的には無関係である。

(2) 300GHz 帯 CMOS トランシーバー

高いアンテナ利得の通信を実現するためには、ビームステアリング技術が重要である。電子ビームステアリングには、平面上に配置された給電アンテナと受電アンテナの位相を変化させることでビーム方向を制御するフェーズドアレイアンテナが用いられる。送信機にフェーズドアレイを使用し、各アンテナ素子に送信素子を並列に接続すると、アンテナ利得が

向上するだけでなく、電力の空間的な組み合わせにより送信電力が増加する。一般に、周波数が高くなると高い送信電力を発生させることが難しくなるが、並列結合によって送信電力を補うことができる。0dBm 出力電力の送信機とアンテナ利得 7dBi のパッチアンテナを用いる場合、4 (2×2)個の並列素子では通信距離は 50cm に限定されるが、16k (128×128) 個の並列素子を用いると、通信距離は 100km にまで達する[1,2]。そこで、特性の劣る CMOS 集積回路であっても、0dBm 程度の中出力の送信機を実現することが重要である。そこで、今回、送信電力が-1.6 dBm 出力のワンチップ CMOS トランシーバーを開発した。[3,4]

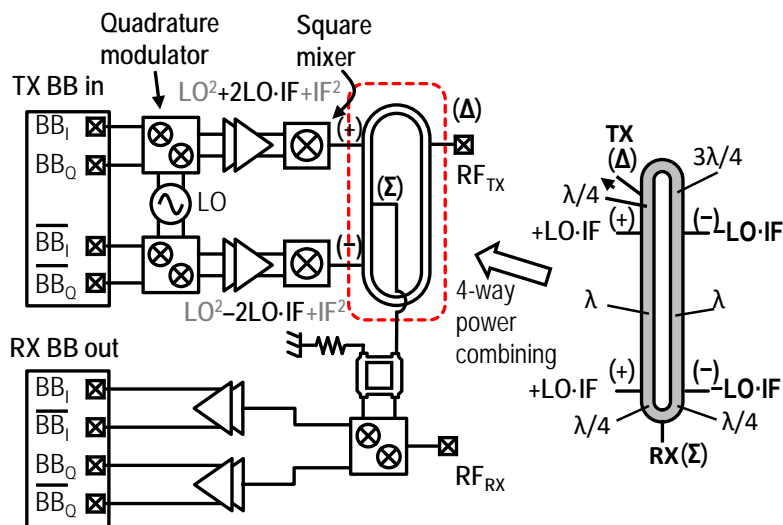


図 1. IEEE 802.15.3d の Ch 66 を利用した 300GHz 帯 CMOS トランシーバーの構成。送信機と受信機の統合にはラットレース回路が使われている。

図 1 は、300GHz の CMOS トランシーバーのアーキテクチャを示す。送信機と受信機にそれぞれ必要な電力結合には、ラットレース回路が使用されている。

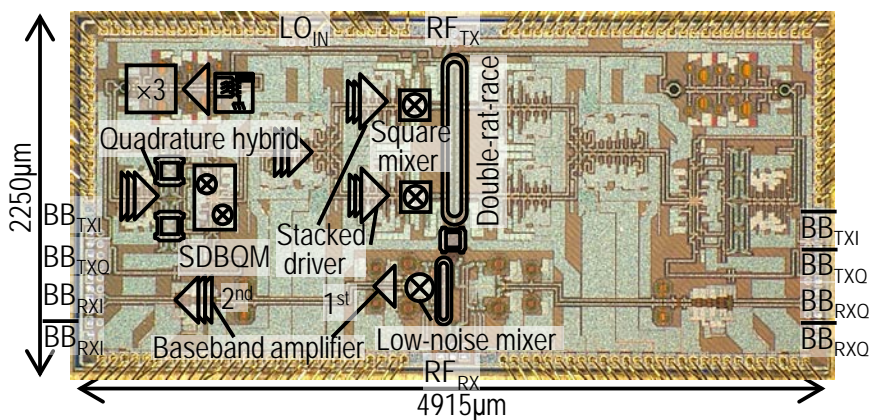


図 2. IEEE 802.15.3d で提案された Ch 66 を用いて、40nm バルク CMOS プロセスで製造された 80Gb/s の 300GHz CMOS トランシーバーのチップ写真。

図 2 は、試作した 300GHz CMOS トランシーバーのチップ写真である。この回路は、40nm のバルク CMOS プロセスで製造された。チップ写真の左半分には主要なブロックが示されており、右半分にも同じブロックが含まれている。ラットレース回路は、ポート数を拡張したダブルラットレース回路を使用しており、4つのミキサー（ doubler ）の出力は電力結合されている。

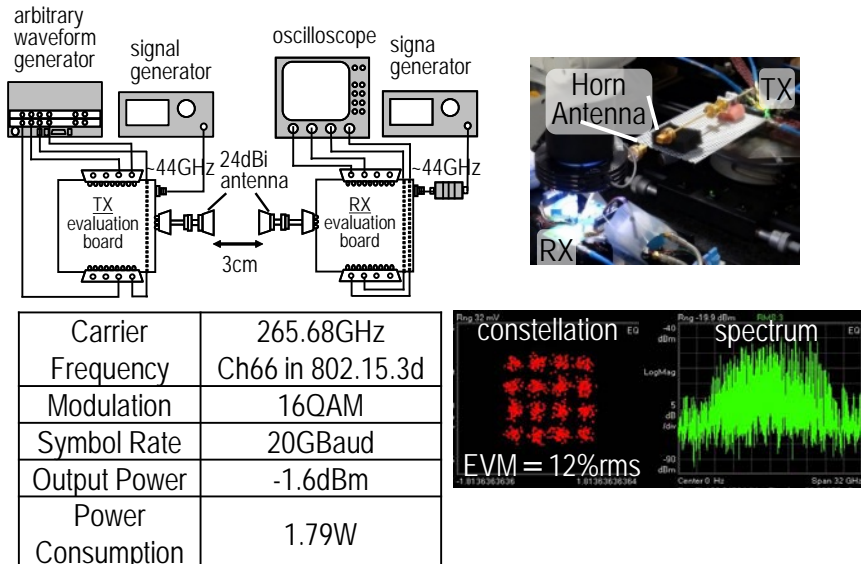


図 3. 80Gb/s の 300GHz 帯 CMOS トランシーバーと IEEE 802.15.3d Ch 66 を用いた無線通信実験。16 QAM、20 Gbaud で 80Gb/s を実現。

図 3 は、無線通信実験の様子である。同じチップを使って、送信用と受信の評価ボードを作成した。送信機には、任意波形発生器からのベースバンド信号が供給される。受信機で生成したベースバンド信号は、リアルタイムオシロスコープに送って信号解析を行った。その結果を左下の表に示す。チャンネル 66 を用いた 16QAM では、通信距離 3cm で最大シンボルレート 20G ボーが得られた。このときのデータレートは 80Gb/s で、送信出力は -1.6dBm であった。目標としていた出力電力 0dBm には届かなかったものの、CMOS 集積回路を用いたフェーズドアレイシステムへの一歩を踏み出すことができた。

参考文献

- [1] M. Fujishima, "Future of 300 GHz band wireless communications and their enabler, CMOS transceiver technologies," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 60, no. SB, p. SB0803, 2021
- [2] M. Fujishima, "Overview of sub-terahertz communication and 300GHz CMOS transceivers," IEICE Electronics Express, 2021, p. 18.20212002, 2021
- [3] S. Lee, R. Dong, T. Yoshida, S. Amakawa, S. Hara, A. Kasamatsu, J. Sato, M. Fujishima, "An 80Gb/s 300GHz-Band Single-Chip CMOS Transceiver," 2019 International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2019), San Francisco, pp. 170-172, Feb. 18 2019.
- [4] S. Lee, S. Hara, T. Yoshida, S. Amakawa, R. Dong, A. Kasamatsu, J. Sato, M. Fujishima, "An 80-Gb/s 300-GHz-Band Single-Chip CMOS Transceiver," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 54, no. 12, pp. 3577-3588, Oct. 15, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 C. Li, B. C. Chye, Y. Yang, E. Yao, M. Fujishima	4. 巻 40
2. 論文標題 MOSFET Small-Signal Model Considering Hot-Carrier Effect for Millimeter-Wave Frequencies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 419-428
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10762-019-00574-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 高野恭弥, 天川修平, 片山光亮, 原紳介, 吉田毅, 藤島実	4. 巻 J102-C
2. 論文標題 テラヘルツ通信を実現する300GHz帯CMOS送信機モジュール	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 348-355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujishima Minoru	4. 巻 2020
2. 論文標題 Study on sub-terahertz-band wireless system with fiber-optic speed	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 41~43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21820/23987073.2020.1.41	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujishima Minoru	4. 巻 5
2. 論文標題 Key Technologies for THz Wireless Link by Silicon CMOS Integrated Circuits	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 50~50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/photonics5040050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Fujishima Minoru	4. 巻 12
2. 論文標題 CMOS集積回路を用いた テラヘルツ広帯域通信と その応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Communications Society Magazine	6. 最初と最後の頁 190 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/bplus.12.190	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Minoru Fujishima	4. 巻 11
2. 論文標題 Emerging applications with terahertz communication	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 124 ~ 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11906/TST.124-130.2018.12.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計37件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 S. Amakawa, M. Fujishima
2. 発表標題 Wideband Power-Line Decoupling Technique for Millimeter-Wave CMOS Integrated Circuits
3. 学会等名 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤島実
2. 発表標題 300GHz帯無線通信とその未来
3. 学会等名 中国地域電波研究者連絡会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 Ultrahigh-Speed Terahertz Transceiver with CMOS Technology,
3. 学会等名 The European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 Terahertz One-Chip CMOS Transceiver
3. 学会等名 The sixth IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IEEE IWS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 One-Chip CMOS Terahertz Transceiver
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 300-GHz-Band CMOS Ultrahigh-Speed Transceiver and Its Future
3. 学会等名 The 4th Japan-Russia Joint Microwave and Telecommunication Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 300-GHz-Band One-Chip CMOS Wireless Transceiver and Its Future
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 Ultrahigh-Speed One-Chip CMOS Transceiver with 300-GHz Band
3. 学会等名 2019 IEEE 13th International Conference on ASIC (ASICON) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤島実
2. 発表標題 270GHz帯CMOS トランシーバとその応用
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端VI (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤駿, 藤島実, 吉田毅
2. 発表標題 CMOSスタック型アンプの高出力化の検討
3. 学会等名 LSIとシステムのワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林知広, 天川修平, 藤島実, 吉田毅
2. 発表標題 線路長を57%短縮するスローウェーブ伝送線路,
3. 学会等名 LSIとシステムのワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林知広, 李尚曄, 天川修平, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 異なるグランドスロット幅を有するスローウェーブ伝送線路の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤駿, 李尚曄, 吉田毅, 天川修平, 藤島実
2. 発表標題 局所帰還を有する80GHzCMOS電力増幅最終段の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤駿, 吉田毅, 天川修平, 藤島実
2. 発表標題 ミリ波帯CMOS多段電力増幅回路の付加電力効率の改善
3. 学会等名 電子情報通信学会集積回路研究会 学生・若手研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤島実
2. 発表標題 300GHz帯CMOS無線伝送
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 スミス 力紀, 李尚曄, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 ショートスタブを用いたミリ波帯低損失CMOSパッド
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Lee, R. Dong, S. Hara, K. Takano, S. Amakawa, T. Yoshida, M. Fujishima
2. 発表標題 300-GHz Wireless Data Transmission System with Low-Snr CMOS RF Front End
3. 学会等名 2019 12th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Lee, K. Takano, S. Hara, R. Dong, S. Amakawa, T. Yoshida, M. Fujishima
2. 発表標題 A-40-dBc Integrated-Phase-Noise 45-GHz Sub-Sampling PLL with 3.9-dBm Output and 2.1% DC-to-RF Efficiency
3. 学会等名 2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Lee, R. Dong, S. Hara, K. Takano, S. Amakawa, T. Yoshida, M. Fujishima
2. 発表標題 A 6-mW-DC-Power 300-GHz CMOS Receiver for Near-Field Wireless Communications
3. 学会等名 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李尚暉, 董銳冰, 原紳介, 高野恭弥, 天川修平, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 300-GHz Wireless Data Transmission System with Low-SNR CMOS RF Front End
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Lee, K. Takano, R. Dong, S. Amakawa, T. Yoshida, M. Fujishima
2. 発表標題 A 300- μ W K-Band Oscillator with High-Q OpenStub Capacitor in 55-nm CMOS DDC
3. 学会等名 The 2018 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Lee, K. Takano, R. Dong, S. Amakawa, T. Yoshida, M. Fujishima
2. 発表標題 A 37-GHz-Input Divide-by-36 Injection-Locked Frequency Divider with 1.6-GHz Lock Range
3. 学会等名 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Amakawa
2. 発表標題 Feedback network design for transistor operating near its performance limit
3. 学会等名 ETCMOS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 Terahertz Wireless Communication with Silicon CMOS Integrated Circuits
3. 学会等名 2018 Thailand?Japan Microwave (TJMW) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 300-GHz-band CMOS wireless communication and its potential applications
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 300-GHz-band communication using silicon CMOS integrated circuits
3. 学会等名 2018 Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 300-GHz-band wireless transceiver with CMOS integrated circuits
3. 学会等名 2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT-2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 Terahertz CMOS technology for beyond 5G
3. 学会等名 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 Ultrahigh-speed terahertz wireless communication with silicon CMOS integrated circuits
3. 学会等名 2nd CIRFE Symposium Symposium on Advanced Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fujishima
2. 発表標題 300-GHz-band CMOS transceiver for ultrahigh-speed terahertz communication
3. 学会等名 SPIE Photonics West (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林知広, 天川修平, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 スロウウェーブ伝送線路におけるグラウンド構造の設計指針
3. 学会等名 電子情報通信学会集積回路研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹川響弥, 天川修平, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 ミリ波帯CMOS低雑音増幅器設計
3. 学会等名 電子情報通信学会集積回路研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 香原翔太, 天川修平, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 平坦な周波数特性を有するミリ波帯CMOS増幅回路の設計法
3. 学会等名 電子情報通信学会集積回路研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀧脇朋也, 天川修平, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 高い電力効率を有するミリ波帯CMOS発振回路の設計法
3. 学会等名 電子情報通信学会集積回路研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 香原翔太, 天川修平, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 広帯域ミリ波帯CMOS増幅回路設計のための整合回路最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会集積回路研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林知広, 天川修平, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 線路長を短縮する伝送線路設計
3. 学会等名 電子情報通信学会集積回路研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安田辰吾, 天川修平
2. 発表標題 伝送線路によるフィードバックを利用したニアfmax増幅器の設計に関する考察
3. 学会等名 電子情報通信学会集積回路研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Minoru Fujishima, Shuhei Amakawa	4. 発行年 2019年
2. 出版社 The Institution of Engineering and Technology	5. 総ページ数 200
3. 書名 Design of terahertz CMOS integrated circuits for high-speed wireless communication	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉田 毅 (Yoshida Takeshi) (30397989)	広島大学・先進理工系科学研究科(先)・准教授 (15401)	
研究分担者	天川 修平 (Amakawa Shuhei) (40431994)	広島大学・先進理工系科学研究科(先)・准教授 (15401)	
研究分担者	LEE SANGYEOP (Lee Sang Yeop) (50811733)	広島大学・先端物質科学研究科・助教 (15401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関