

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06418

研究課題名（和文）超小型ミリ波無線機の研究

研究課題名（英文）Research on ultra-small millimeter-wave wireless terminal

研究代表者

平野 拓一（Hirano, Takuichi）

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：60345361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：シリコン基板は低い抵抗率(10⁻³Ω・cm)のため、放射効率は10%以下程度である。本課題ではシリコン基板への水素またはヘリウムのイオン照射技術およびスルー・シリコン・ビアを用いた高効率オンチップアンテナの研究を行った。ボンディングワイヤおよびフリップチップ実装を想定した60GHz帯オンチップアンテナではシミュレーションでそれぞれ50%、52%の放射効率が得られた。また、実際のチップ試作の準備として、チップの実装、チップ内の各回路の接続におけるシミュレーション技術を研究してオンチップアンテナのみならず、デジタル・アナログ混載回路の特性評価に必要となる電磁界シミュレーション技術を準備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の無線技術の発展により、5GやIoT(Internet of Things)などの用語に代表されるように多数の機器、端末やセンサが無線通信機能を備えている。そのためには更なる無線機の小型・高速・省電力・低コスト化が求められる。本課題では、そのような時代を切り開くための超小型・高速・低消費電力・低コスト無線機開発のための基礎技術を研究する。また、現在の設計では、電磁界シミュレーション技術が十分活用されておらず、シミュレーションで評価しきれしていない。高集積度の高周波ICの実現には、電磁界レベルでの評価が必要であり、本研究の成果として電磁界シミュレーション評価の基礎技術を公開する。

研究成果の概要（英文）：Since the silicon substrate has a low resistivity (10⁻³Ω・cm), the radiation efficiency is about 10% or less. In this research, we investigated a high-efficiency on-chip antenna using the technology of ion irradiation of hydrogen or helium onto a silicon substrate and through silicon vias. Radiation efficiencies of 50% and 52% were obtained by simulation in the 60 GHz band on-chip antenna assuming bonding wire and flip-chip packaging, respectively. In preparation for the actual chip prototype, we research the simulation technology in packaging technologies and connection of each circuit in the chip to simulate the electromagnetic field required not only for the on-chip antenna but also for the evaluation of the digital/analog mixed circuit.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：小型 無線機 ミリ波 オンチップアンテナ シリコン基板 低損失 イオン照射 スルーシリコンビア

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の無線技術の発展により、5G や「物のインターネット」(IoT; Internet of Things)などの用語に代表されるように多数の機器、端末やセンサが無線通信機能を備えている。将来は更にVR(Virtual Reality),AR(Augmented Reality)技術が発達し、現在の画面出力を眼鏡や脳波に乗せて出力するデバイスが出現すると考えられる。そのためには更なる無線機の小型・高速・省電力・低コスト化が求められる。本課題では、そのような時代を切り開くための超小型・高速・低消費電力・低コスト無線機開発のための基礎技術を研究する。

従来から提案されているシリコンチップ上に製作されたオンチップアンテナは、無線機器のさらなる小型化、低価格化が可能になると期待されているが、熱損失が大きく、効率の低さ(10%程度)が問題である。本課題では、シリコン基板への水素またはヘリウムのイオン照射技術による損失低減およびスルーシリコンビア(TSV)構造の導入による他の回路ブロックとの分離技術を研究する。

2. 研究の目的

本課題ではシリコン基板への水素またはヘリウムのイオン照射技術による損失低減および半導体チップの積層技術として用いられている TSV を用いた構造で放射効率改善を試みる。また、将来の超小型 1 チップ無線機を目指してチップ内の各回路ブロック間の相互結合の評価技術、そして、チップの実装(パッケージ)の接続部の評価のシミュレーション技術を開発する。

オンチップアンテナの損失を減らすために、申請者は過去にイオン照射によるシリコン基板の低損失化を試みた。しかしながら、更なる高効率化のために、シリコン基板に TSV を打つ構造を検討する。TSV により、損失の大きなシリコン基板に電磁界が浸透することなく、外部空間に放射されて高効率化が期待できる。TSV およびシリコン基板の薄厚加工は、現在 NAND フラッシュメモリの大容量化のために積層化する技術で実用化されているものであり、将来の実用化も容易に可能であると考えられる。

3. 研究の方法

電磁界シミュレーションで TSV を用いた高効率オンチップアンテナの検討を行う。電磁界シミュレーションはコンピュータの発達とともに実用的となったが、電磁界解析のモデル化は簡単ではなく、材料定数、境界条件、励振部モデル化などの深い知識が必要となる。これまでに電磁界解析のモデル化について詳しく検討しており、実験と非常によく合う電磁界解析モデル化が可能となった。特に、シリコン CMOS IC の材料定数のモデル化、励振部のモデル化、ダミーメタルのモデル化技術は過去の研究で大きく進展しているため、電磁界解析による検討は実測に非常に近い値が得られている。アンテナ、RF 回路、ディジタル回路、電源回路、I/O は数ミリ角の小さなチップに混載されるため、相互干渉の影響を評価する必要がある。チップを様々なアプリケーションに応用できるような柔軟なアーキテクチャに対応できるよう、電磁界シミュレーションによる EMC、SI、PI の電磁界シミュレータによる評価技術を検討する。

4. 研究成果

シリコン基板は抵抗率 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ (導電率 10^4 S/m)程度のものが用いられ、通信用のミリ波の損失は非常に大きく、放射効率(アンテナの入力電力に対して、外部に放射される電力の割合)は 10%以下となってしまう。そこで、共同研究で検討しているシリコン基板への水素(H)またはヘリウム(He)のイオン照射技術を用いてシリコン基板の抵抗率を $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ まで上げて損失を低減させる技術を用いる。シミュレーションによってイオン照射前・後のシリコンの材料定数の確認を行い、シミュレーションで効率的に特性予測する手法を構築した[2][8]。シリコン基板へのイオン照射によって、放射電磁界の熱損失が低減し、放射効率(または利得)が向上することを確認した[9](図1, 図2)。

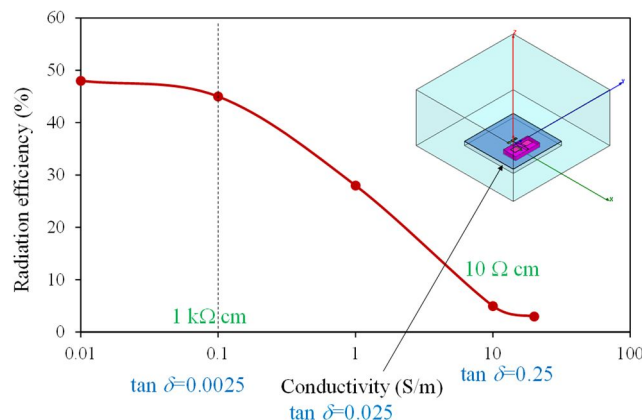


図 1 イオン照射による放射効率の改善効果(計算)

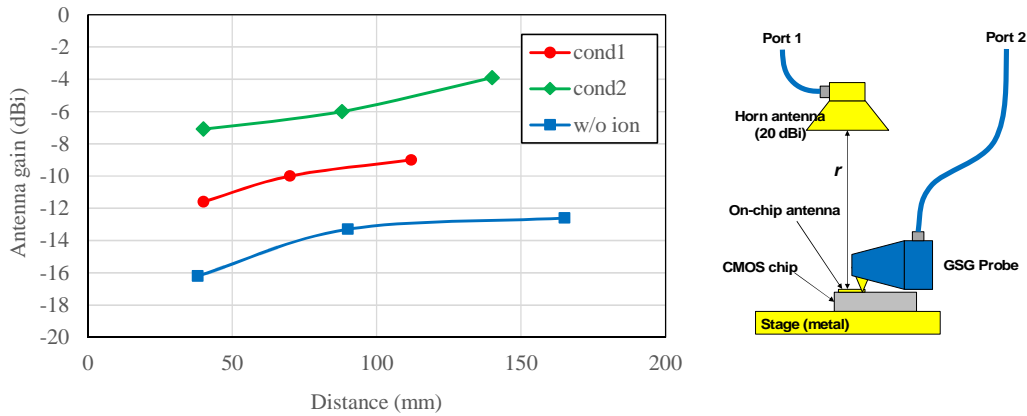


図 2 イオン照射によるオンチップアンテナの利得の改善効果 (測定)
(cond1, cond2 は異なるイオン照射条件を表す)

また、従来、シリコンの導電率のみが変化すると考えられていたが、測定値とシミュレーション結果の比較から、誘電率も変化する可能性があり、テラヘルツ時間領域分光システムを用いてシリコンの比誘電率をテラヘルツ帯で測定した。その結果、イオン照射後は照射前に比べて、比誘電率が4%程度小さくなるという結果が得られた。測定で得られた比誘電率の結果を考慮すると、オンチップアンテナの反射係数の周波数特性は実測により近い結果が得られた[15] (図3)。

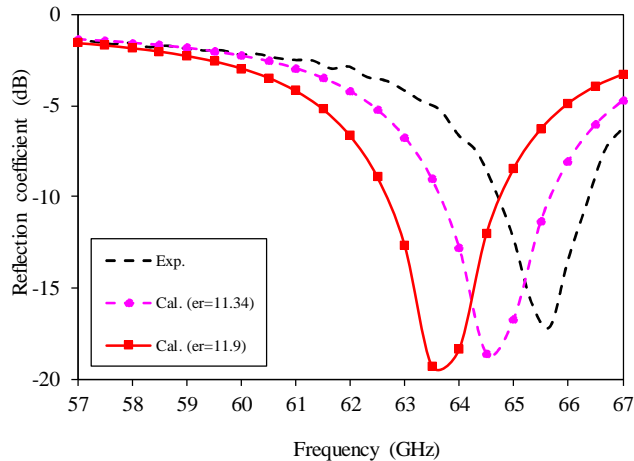


図 3 オンチップアンテナの反射係数の周波数特性 (シリコンの比誘電率の変化の比較)

次に、オンチップアンテナの成果について説明する。チップの実装方法として、現在主流のボンディングワイヤによる実装を想定した 60GHz 帯オンチップアンテナの設計を行った。放射効率を低下させる要因となるシリコン基板に放射電磁波を侵入させないように、スルー・シリコン・ビア(TSV)を用いた高効率オンチップアンテナの検討を行った[16](図4)。TSVは長さ720um、幅200umのオンチップアンテナを囲むように1000um×500umの領域を囲い、その内部はイオン照射をしたと仮定して低損失のシリコンでモデル化した。シミュレーションで50%の放射効率を得られた。イオン照射およびTSVを用いないときの放射効率は5%であり、10倍の改善効果を得られた。現実には、シリコン基板の回路層表面はイオン注入によって非常に導電率が高くなる導電層があることが実験とシミュレーションの比較結果から予測されている。TSVによる電磁界の遮蔽効果により、アンテナ特性の改善において導電層の影響を無視できる構造となる。また、近年スマートフォンなどの機器の薄型化に伴ってコストが下がり、将来有望な技術になってきたフリップチップ実装を想定したオンチップアンテナの設計も行った[11](図5)。フリップチップ実装では回路面がパッケージ基板と bumps で接続されるため、パッケージ基板の高さをアンテナ下部の空間として用い、基板のスルーホール(ビア)で基板への電磁界の漏れを防ぐ壁構造を実現する。シミュレーションで52%の放射効率を得られ、ワイヤボンディング実装と同様に大きな改善効果が確認できた。図6に示す電界分布より、スルーホールは基板への漏れを防いでいるのが確認できた。チップ試作による実測での確認は行えていないが、実際の特性改善と実用的な応用が期待できる成果が得られた。

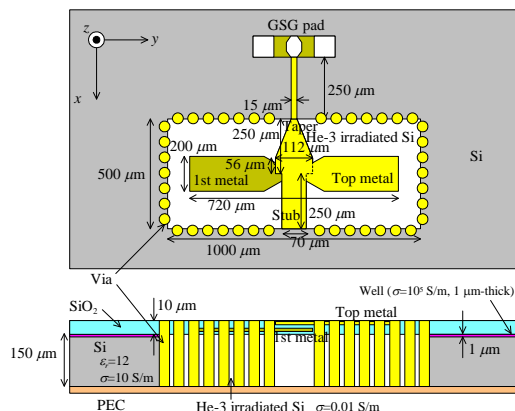


図 4 TSV を用いたワイヤボンディング実装用オンチップアンテナ

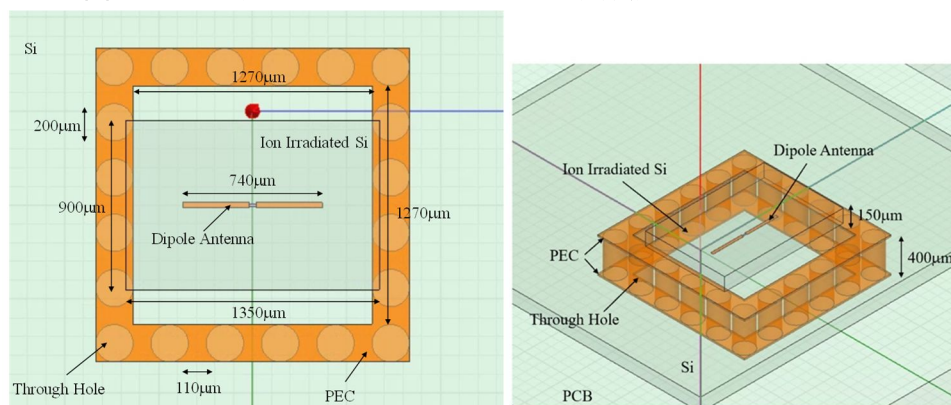


図 5 TSV を用いたフリップチップ実装用オンチップアンテナ

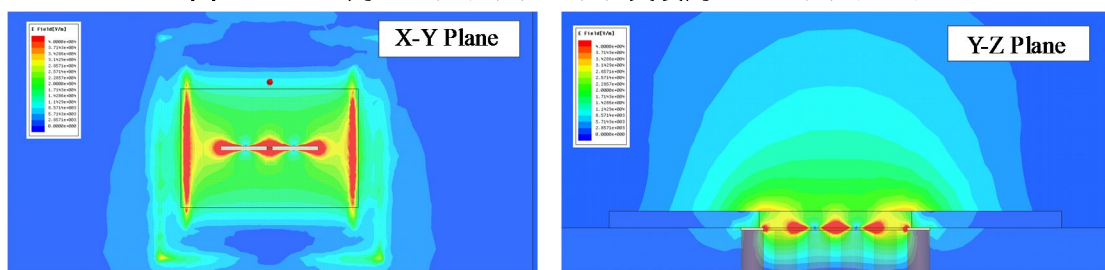


図 6 図 5 のモデルの電界分布 (シミュレーション)

また、実際のチップ試作の準備として、チップの実装、チップ内の各回路の接続におけるシミュレーション技術を研究し、ボンディングワイヤ接続の影響、デカップリングキャパシタを用いた電源ノイズの低減技術、差動伝送技術など、オンチップアンテナのみならず、デジタル・アナログ混載回路の特性評価に必要な電磁界シミュレーション技術を検討し、シミュレーション技術に関する基礎技術を整理した[1][4][5][6][7][10][12][13][14][17][18][20][21][22]。さらに、通信方式についての検討を行い、OAM 伝送と MIMO の等価性などについて理論を整理した[3][19]。

< 論文・学会発表リスト >

論文

1. 平野 拓一, "電磁界シミュレータ利用の勘所 境界条件と励振モデル", 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J101-C, No.10, pp.381-388, Oct. 2018. (招待論文; OpenAccess)
2. 井上 剛, 八木 宏親, 李 寧, 平野 拓一, 岡田 健一, 松澤 昭, "イオン照射によるシリコン基板の高抵抗化技術", 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J101-C, No.9, pp.344-351, Sep. 2018. (招待論文; OpenAccess)
3. T. Hirano, "Equivalence Between Orbital Angular Momentum (OAM) and Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) in Uniform Circular Arrays - Investigation by Eigenvalues -", Microwave and Optical Technology Letters (MOP), Vol.60, No.5, pp.1072-1075, DOI: 10.1002/mop.31111, May 2018.
4. T. Hirano, "Relationship between Q factor and complex resonant frequency: investigations using RLC series circuit," IEICE Electronics Express, Vol.14, No.21, pp.20170941, Nov. 2017. (Open Access)

5. T. Hirano, N. Li, K. Okada, "Analysis of Effective Material Properties of Metal Dummy Fills in a CMOS Chip," IEICE Trans. Commun., Vol.E100-B, No.5, pp.793-798, May 2017.

国際会議

6. T. Hirano, N. Li, K. Okada, T. Inoue, and M. Sogabe, "Electromagnetic Simulation of CMOS On-Chip Spiral Inductors in 5 GHz band," Proc. of IEEE AP-S International Symposium, pp.1903-1904, Atlanta, GA, USA, July 12, 2019.
7. T. Hirano, "Electromagnetic simulation modeling of CMOS chip in Millimeter-Wave Band," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Session: C6L-C, Sapporo, Japan, May 26-29, 2019. (invited)
8. T. Hirano, N. Li, T. Inoue, H. Yagi, K. Okada, A. Matsuzawa, "Loss Reduction of Silicon Substrate by Helium-3 or Proton Ion Irradiation for a Millimeter-Wave CMOS Chip," Proc. of European Advanced Material Congress (EAMC), pp.83-84, Stockholm, Sweden, August 20-23, 2018. (invited)
9. T. Hirano, N. Li, T. Inoue, H. Yagi, K. Okada, A. Matsuzawa, "Gain Measurement of 60 GHz CMOS On-Chip Dipole Antenna By Proton Irradiation," Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Session 3E2.3, Phuket, Thailand, Oct. 30-Nov. 2, 2017.
10. T. Hirano and J. Hirokawa, "Education Materials of Electricity and Magnetism using MATLAB," The 2017 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT2017), TH_1B_2, pp.16-18, Seoul, Korea, August 31, 2017. (invited)

国内学会発表

11. 佐藤奈央・平野拓一・井上 剛・曾我部正嗣・岡田健一, "フリップチップ実装に向けたミリ波帯オンチップアンテナの基礎検討," 電子情報通信学会総合大会講演論文集, C-2-26, p.49, 広島大学(広島県), 2020年3月17日.
12. 平野拓一, "共振の定義の違いと複素共振周波数によるQ値の計算," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-2-49, 東京都市大(東京), 2017年9月13日.
13. 平野拓一, "IoTのためのアンテナ・電波伝搬のシミュレーション技術," 電気学会全国大会, S9-4, pp.S9(9)-S9(11), 東京電機大, 2020年3月13日.
14. 平野拓一, 吉川公磨, "3-10GHz帯乳がん診断用裏面入力プリントダイポールアンテナの設計," 電気学会 電子・情報・システム部門大会, TC16-4, pp.593-595, 琉球大学, 2019年9月6日.
15. 平野拓一・水野麻弥・李 寧・井上 剛・曾我部正嗣・岡田健一, "シリコン基板へのH/Heイオン照射による損失低減と比誘電率の変化," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.119, no.42, EST2019-5, pp.19-23, 名古屋工業大学, 2019年5月17日.
16. 平野拓一, "60GHz帯シリコン CMOS オンチップダイポールアンテナのシリコン貫通ビアによる損失低減の一検討," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.118, no.248, MW2018-87, pp.105-109, 八戸商工会館, 青森県, 2018年10月19日.
17. 平野拓一, "開放空間の電磁界シミュレーションにおける物体から吸収境界壁までの必要距離の定量評価," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.118, no.144, EST2018-34, pp.161-164, 洞爺観光ホテル, 北海道, 2018年7月20日.
18. 平野拓一, "[ポスター講演] ネットワークアナライザによるSパラメータ測定における校正不整合について," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.117, no.462, MW2017-185, pp.55-55, 滋賀県立大学, 彦根, 2018年3月1日.
19. 平野拓一, "2つの等間隔円形アレーアンテナのMIMO固有モード伝送とOAM伝送の類似性," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.117, no.291, MW2017-111, pp.1-4, まりんぴあみやこ, 宮古島, 2017年11月9日.
20. 平野拓一, "電磁界シミュレーションの導波管ポートにおける高次モードの影響," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.117, no.140, MW2017-67, pp.207-210, 帯広商工会議所, 北海道, 2017年7月21日.

出版

21. 平野 拓一(分担), 第4節: ミリ波帯シリコン CMOS 回路の電磁界解析、「高周波対応部材の開発動向と5G、ミリ波レーダーへの応用」、技術情報協会, pp.366-378, ISBN-13: 978-4861047336, 2019年1月.
22. 平野 拓一(分担), 4.3節: 有限要素法を用いた電磁界解析技術、「磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術」、技術情報協会, pp.175-184, ISBN-13: 978-4861047053, 2018年3月.

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 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 平野 拓一	4. 巻 J101-C
2. 論文標題 電磁界シミュレータ利用の勘所 境界条件と励振モデル	5. 発行年 2018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 381-388
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 井上 剛, 八木 宏親, 李 寧, 平野 拓一, 岡田 健一, 松澤 昭	4. 巻 J101-C
2. 論文標題 イオン照射によるシリコン基板の高抵抗化技術	5. 発行年 2018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 344-351
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hirano Takuichi	4. 巻 60
2. 論文標題 Equivalence between orbital angular momentum and multiple-input multiple-output in uniform circular arrays: Investigation by eigenvalues	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microwave and Optical Technology Letters	6. 最初と最後の頁 1072 ~ 1075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mop.31111	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 T. Hirano, N. Li, K. Okada	4. 巻 Vol. E100-B, No.5
2. 論文標題 Analysis of Effective Material Properties of Metal Dummy Fills in a CMOS Chip	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Commun.	6. 最初と最後の頁 793-798
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 T. Hirano	4. 巻 Vol.14, No.21
2. 論文標題 Relationship between Q factor and complex resonant frequency: investigations using RLC series circuit	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.14.20170941	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 平野拓一	4. 巻 Vol.100, No.5
2. 論文標題 電磁界シミュレータ利用の勘所	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 342-348
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 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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 T. Hirano, N. Li, K. Okada, T. Inoue, and M. Sogabe
2. 発表標題 Electromagnetic Simulation of CMOS On-Chip Spiral Inductors in 5 GHz band
3. 学会等名 IEEE AP-S International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hirano, N. Li, K. Okada, T. Inoue, and M. Sogabe
2. 発表標題 Electromagnetic Simulation of CMOS On-Chip Spiral Inductors in 5 GHz band
3. 学会等名 IEEE AP-S International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hirano
2. 発表標題 Electromagnetic simulation modeling of CMOS chip in Millimeter-Wave Band
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤奈央・平野拓一・井上 剛・曾我部正嗣・岡田健一
2. 発表標題 フリップチップ実装に向けたミリ波帯オンチップアンテナの基礎検討
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 平野拓一
2. 発表標題 IoTのためのアンテナ・電波伝搬のシミュレーション技術
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平野拓一・水野麻弥・李 寧・井上 剛・曾我部正嗣・岡田健一
2. 発表標題 シリコン基板へのH/Heイオン照射による損失低減と比誘電率の変化
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hirano, N. Li, T. Inoue, H. Yagi, K. Okada, A. Matsuzawa
2. 発表標題 Loss Reduction of Silicon Substrate by Helium-3 or Proton Ion Irradiation for a Millimeter-Wave CMOS Chip
3. 学会等名 European Advanced Material Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平野拓一
2. 発表標題 60GHz帯シリコンCMOSオンチップダイポールアンテナのシリコン貫通ピアによる損失低減の一検討
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 2018年

1. 発表者名 平野拓一
2. 発表標題 開放空間の電磁界シミュレーションにおける物体から吸収境界壁までの必要距離の定量評価
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuichi Hirano, Ning Li, Takeshi Inoue, Hirochika Yagi, Kenichi Okada, Akira Matsuzawa
2. 発表標題 Gain Measurement of 60 GHz CMOS On-Chip Dipole Antenna By Proton Irradiation
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuichi Hirano and Jiro Hirokawa
2. 発表標題 Education Materials of Electricity and Magnetism using MATLAB
3. 学会等名 The 2017 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平野拓一
2. 発表標題 2つの等間隔円形アレーアンテナのMIMO固有モード伝送とOAM伝送の類似性
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 2017年

1. 発表者名 平野拓一
2. 発表標題 電磁界シミュレーションの導波管ポートにおける高次モードの影響
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 2017年

1. 発表者名 Takuichi Hirano, Takamaro Kikkawa
2. 発表標題 Antenna Technology for Biomedical Imaging
3. 学会等名 国際ナノデバイステクノロジーワークショップ2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平野拓一
2. 発表標題 共振の定義の違いと複素共振周波数によるQ値の計算
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 2017年

1. 発表者名 平野拓一, 吉川公麿
2. 発表標題 3-10GHz帯乳がん診断用裏面入力プリントダイポールアンテナの設計
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野拓一
2. 発表標題 ネットワークアナライザによるSパラメータ測定における校正不整合について
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 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 平野 拓一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 554
3. 書名 高周波対応部材の開発動向と5G、ミリ波レーダーへの応用	

1. 著者名 平野拓一（4.4節分担）他	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 563
3. 書名 磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究紹介（平野拓一） http://www.takuichi.net/research/ 電磁界解析（平野拓一） http://www.takuichi.net/em_analysis/</p>

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