

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：55401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560354

研究課題名（和文） ミリ波・テラヘルツ波帯低価格・高性能プリント回路の研究

研究課題名（英文） Study on Cost-effective and High-performance Printed Circuits at Millimeter to Terahertz Wavelengths

研究代表者

黒木 太司（FUTOSHI KUROKI）

呉工業高等専門学校・電気情報工学分野・教授

研究者番号：30195581

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、周波数利用が錯綜している昨今、その開発が期待されているミリ波・テラヘルツ波電磁波帯において、従来のプリント伝送線路に比べて伝送損失が低減され、しかも低価格で提供されうる新たなプリント伝送線路を創出することであり、新しい原理に基づく両面金属装荷トリプレート伝送線路を提案し、これをもとに低価格 FR-4 基板を用いたフィルタ、アンテナ、発振器などを 60GHz で実現した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop cost-effective and high-performance printed circuits at millimeter to terahertz frequency spectrums, being attracted much attentions due to exhaustion of frequency resources. To realize such printed circuit, we proposed the bilaterally metal-loaded printed transmission line and the new types of filter, antenna, and oscillator have been successfully designed and fabricated by using the low-cost FR-4 substrate at 60 GHz frequency bands.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波・テラヘルツ・電磁波伝送線路・プリント伝送線路

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロストリップ線路やコプレーナ線路に代表される各種プリント伝送線路は IC との整合性の良さや、量産性の良さなどからセンチ波帯で多用されるが、動作周波数が上昇するにつれて伝送損失が急増してしまう。この損失急増の問題点は、伝送線路の長さを短くすれば解決できるように思われがちであるが、センチ波帯以上の超高周波帯では、各種機能回路は伝送線路で構成されること

から、損失増加に伴う回路の Q の劣化は避けられず、この点が超高周波帯、とりわけミリ波・テラヘルツ波帯におけるプリント伝送線路性能向上の隘路になっている。

この損失増加の原因としては、周波数の上昇とともにプリント伝送線路を構成する誘電体基板の誘電体損失が増加することや、プリント銅箔両端の電流集中の影響などが考えられるが、近年、各種プリント伝送線路用銅張誘電体基板では、銅箔を誘電体基板上に

高い密着度で貼り付けるため、図1に示すように基板面が面荒らしされ、そのため銅箔裏面の電流路は表皮効果の影響で、銅箔表面の電流路に比べて長くなり、結果として伝送損失が増加することが指摘された(埼玉大)。この傾向は周波数が増加するほど顕著になり、特にミリ波・テラヘルツ波帯においては、銅箔裏面の見かけの導電率(実効導電率)が劣化し、伝送損失は著しく増大すると予想される。

一方、プリント伝送線路の低損失化に関する検討は、諸研究機関にて古くから行われ、線路をサスペンデットにする(電通大)、或いは中心導体の形状に丸みをつける(NTT)、MEMS技術を用いる(ミシガン大)などの工夫がなされているが、いずれの研究報告も銅箔裏面の実効導電率改善に関するアプローチがなされていないために、本質的な伝送損失改善の効果は得られていない現状である。

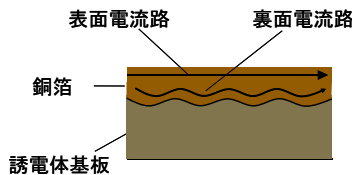


図1 誘電体基板に蒸着された銅箔中の電流分布の概略

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、周波数利用が錯綜している昨今、その開発が期待されているミリ波電磁波帯、更には電波と光波の谷間でその利用技術の確立が興味深いテラヘルツ波電磁波帯において、従来のプリント伝送線路に比べて格段に伝送損失が低減され、しかもこのような超高周波帯電磁波利用促進を妨げる大きな要因である「回路の高価格化」を解消した、低価格で提供される新たなプリント伝送線路を創出することにある。

## 3. 研究の方法

本研究では低価格プリント回路を実現するため、誘電体基板の両面に等電位からなる中心導体を有する導波構造を提案した。一例として図2に誘電体基板両面に中心導体を形成したトリプレート線路(以下両面金属装荷トリプレート線路、BITラインと呼ぶ)の構造と電磁界分布を示すが、誘電体基板内における電磁界の分布が弱いため、以下の特徴を有することが明らかになった。

- 中心導体裏面の電流分布が減少し、誘電体の面荒らしによる導体損失の増加を抑えることができる。
- 周波数の上昇に伴い誘電正接は増加する傾向にあるが、この導波構造ではその影響を受けにくく、誘電体損失が軽減される。

- 上記項目に関連して、ガラスエポキシ基板(FR-4)や紙フェノール基板などの、極めて低価格であるが、誘電正接はミリ波帯で劣悪な基板材料を利用しても、ミリ波プリント伝送線路の低損失性が確保でき、結果として低価格ミリ波デバイスが提供出来る可能性がある。
- 周囲温度の変化により誘電体基板の厚みは変化するが、この導波構造では電磁界分布が誘電体基板の外部に分布することから、伝送線路定数が温度変化の影響を受けにくい。
- 従来この導波構造で問題視されていた、回路構造の不整から発生する不要モードも、両金属面にビアホールを設置することで容易に抑制できることを示した。

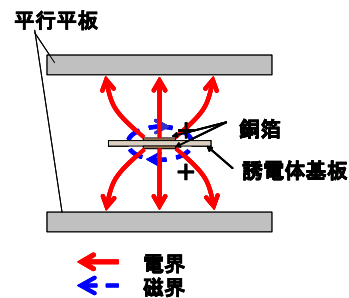


図2 両面金属装荷トリプレート線路

## 4. 研究成果

上記両面金属装荷トリプレート線路を用い、以下の成果を得た。

- 本研究を開始する前に、使用する低価格FR-4基板の誘電定数、及びFR-4基板に蒸着された銅箔の、表面及び裏面の実効導電率を、2GHzから60GHz帯と広範囲にわたり精密に測定した。その結果、これまで計測されることが無かった裏面の実効導電率は、標準値と比べて90%以上劣化することを明らかにした。

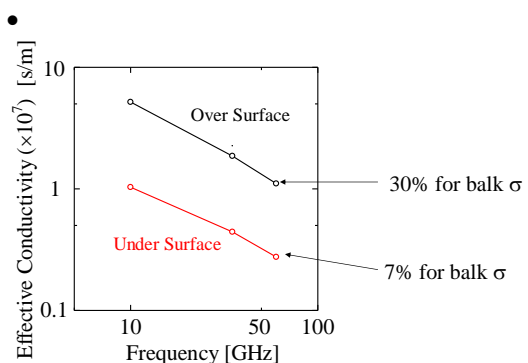


図3 表面、裏面の実効導電率の測定値

- FR-4基板で構成した30GHz帯両面金属

装荷トリプレート伝送線路の線路寸法を、理論的に決定し、そのデータをもとに帯域通過フィルタを試作した結果、挿入損失 1dB 以下と、これまで実現し得なかった低損失プリント線路フィルタが、低価格ではあるが極めて劣悪なミリ波特性の FR-4 基板を用いても実現できることを実証した。

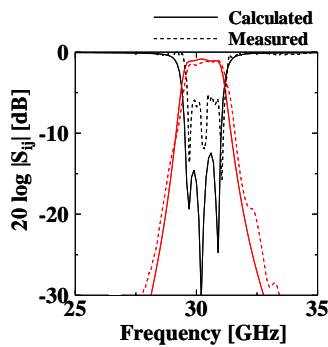
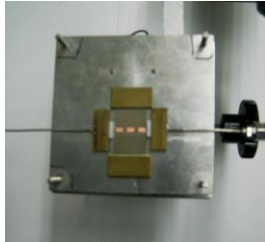


図 4 BIT ラインフィルタ

- FR-4 基板で構成した 60GHz 帯両面金属装荷トリプレート伝送線路(BIT ライン)に半導体素子を実装するための基本検討を行った。具体的にはガンダイオードを実装したミリ波発振器を試作し、簡便な構造で位相雑音が-105dBc/Hz (100kHz オフセット) という低雑音な発振器が実現できた。

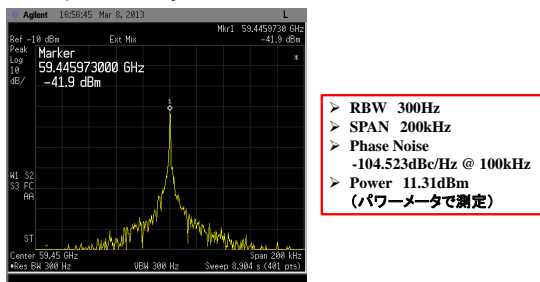


図 5 60GHz 帯発振器の特性

- アンテナに関しては、FR-4 基板で小型の一次放射器を設計試作し、実際にその利得を計測した結果、放射素子としての FR-4 基板は放射特性の低下を招くことはなく、高効率に放射できることを確認

した。

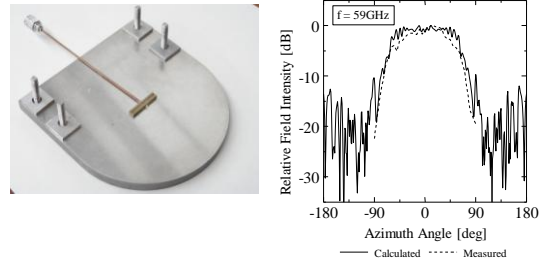


図 6 60GHz 帯一次放射器の特性

- またこの放射素子でフェーズドアレイを構成し、電子的にビーム走査可能なアンテナを考案した。

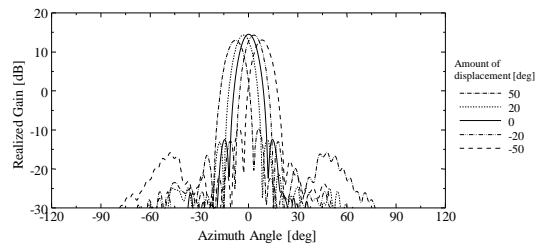


図 7 60GHz 帯フェーズドアレイのビーム走査特性

- BIT ラインと構造を異にするが、プリント線路を固定する誘電体基板を全く用いずとも伝送線路が形成できる新たな導波構造を見出し、35GHz 帯で帯域フィルタを設計試作したところ、挿入損失 1~2dB 以下で、スプリアス特性の良好な低価格ミリ波フィルタを実現することができた。この構造では、FR-4 基板より低価格化が期待できることから、本研究の次なるステップと位置付けたい。

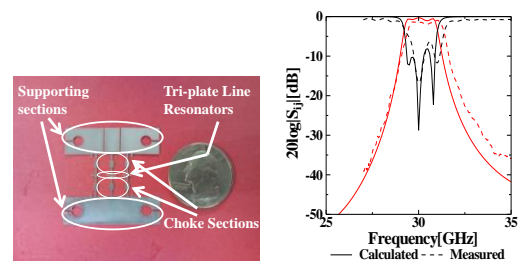


図 8 新たな導波構造の提案とその帯域フィルタへの応用

- 主な発表論文等 (研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- Yasuyoshi Okita, Futoshi Kuroki, and Yuki Kawahara, "Choke-Supported Tri-plate Transmission Line Filter for Loss Reduce

- Technique”, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.133, No.5 pp.957-961 (May, 2013)
2. Tomonori Morita and Futoshi Kuroki, “Vertical Strip Transmission Line Primary Radiator Using FR-4 Substrate at 60GHz”, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.133, No.5, pp.962-965 (May, 2013)
- [学会発表] (計 4 6 件)
1. 一瀬健人、明石歩、黒木太司、“平行平板内装荷 60GHz 帯金属ロッド共振器の無負荷 Q の測定”、電子情報通信学会総合大会、C-2-109 (2013 年 3 月、岐阜)
  2. 森田智紀、黒木太司、“垂直ストリップ線路放射器を用いた 60GHz 帯アレイアンテナの検討”、電子情報通信学会総合大会、C-2-49 (2013 年 3 月、岐阜)
  3. 沖田靖能、黒木太司、“直線偏波検出用 60GHz 帯プローブ”、電子情報通信学会総合大会、C-2-48 (2013 年 3 月、岐阜)
  4. Futoshi Kuroki and Tomonori Morita, “Vertical Strip Transmission Line Primary Radiator Etched on FR-4 Substrate at 60 GHz”, Electronic Proceedings of USNC-URSI National Radio Science Meeting B7-8 (January 2013 in Boulder, USA )
  5. Futoshi Kuroki and Tomohiro Tanaka, “Consideration on Principle of Operation of Self-injection Locked NRD Guide Gunn Oscillator Using Equivalent Circuit Model”, Electronic Proceedings of USNC-URSI National Radio Science Meeting D1-3 (January 2013 in Boulder, USA )
  6. 黒木太司、沖田靖能、“60GHz 帯垂直偏波検出プローブの試作”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.81-84 (2012 年 12 月、山梨)
  7. Yasuyoshi Okita, Futoshi Kuroki, and Yuki Kawahara, “Design on Fish-bone Shaped Tri-plate Transmission Line Filter at Millimeter Wave Lengths”, Proceedings of the 41th European Microwave Conference, pp.388-391 (November 2012 in Amsterdam, Netherlands)
  8. 森田智紀、黒木太司、“2 次元パラボラ反射鏡で給電した 60GHz 帯レンズ付きホーンアンテナにおけるビーム走査特性”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.55-58 (2012 年 9 月、上福岡)
  9. 沖田靖能、黒木太司、川原祐紀、“1 段チョーク回路から成る 30GHz 帯魚骨形トリプレート線路フィルタの設計”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.33-36 (2012 年 9 月、上福岡)
  10. 一瀬健人、田中智大、黒木太司、“金属ロッド共振器を用いた 60GHz 帯反射型自己注入同期 NRD ガイドガン発振器の発振特性の計算”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.1-4 (2012 年 9 月、上福岡)
  11. 沖田靖能、黒木太司、川原祐紀、“30GHz 帯魚骨形トリプレート線路フィルタのチョーク回路の検討”、電子情報通信学会ソサイエティ大会、CS-2-9 (2012 年 9 月、富山)
  12. 森田智紀、黒木太司、“2 次元パラボラ反射鏡で給電した 60GHz 帯レンズ付ホーンアンテナの設計”、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-2-68 (2012 年 9 月、富山)
  13. 井上晋吾、黒木太司、“FR-4 基板を用いた BIT ラインにおける基本・高次モードの損失特性”、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-2-2-31 (2012 年 9 月、富山)
  14. Yasuyoshi Okita, Futoshi Kuroki, and Yuki Kawahara, “A High Q Technique Using Fishbone-Shaped Tri-Plate Resonator and Its Applications at Millimeter Wave Frequencies”, Electronic Proceedings of Thailand-Japan MicroWave 2012, 4 pages, (August, 2012 in Bangkok, Thailand)
  15. Tomonori Morita and Futoshi Kuroki, “Reflection and Radiation Characteristics of Vertical Strip Transmission Line Primary Radiator Using FR-4 Substrate at 60GHz”, Electronic Proceedings of Thailand-Japan MicroWave 2012, 4 pages, (August, 2012 in Bangkok, Thailand)
  16. 井上晋吾、黒木太司、“FR-4 基板を用いた BIT ラインにおける基本モード及び高次モードのミリ波伝送特性”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.37-40 (2012 年 6 月、岐阜)
  17. 井上晋吾、黒木太司、“ミリ波帯における FR-4 基板面方向の誘電特性の測定”、電子情報通信学会総合大会、C-2-63 (2012 年 3 月、岡山)
  18. 森田智紀、黒木太司、“FR-4 基板を用いた 60GHz 帯垂直ストリップ線路 1 次放射器の反射・放射特性”、電子情報通信学会総合大会、C-2-50 (2012 年 3 月、岡山)
  19. 沖田靖能、黒木太司、川原祐紀(川島製作所)、“30GHz 帯魚骨形帯域フィルタの試作”、電子情報通信学会総合大会、C-2-42 (2012 年 3 月、岡山)
  20. 井上晋吾、黒木太司、“ミリ波帯における FR-4 基板の誘電特性の測定”、電子情

- 報通信学会マイクロ波研究会、pp.5-8 (2011年12月、山口)
21. 森田智紀、黒木太司、“FR-4 基板を用いた 60GHz 帯垂直ストリップ線路 1 次放射器の設計”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.1-4 (2011年12月、山口)
  22. Futoshi Kuroki, “Anew-learning Microwave Guided Theory and Basic Circuit Design for Young Engineers in Industrial Battlefields -Using the Smith-chart and S-matrix Efficiently-”, Proceedings of Tutorial Lecture in Microwave Workshops & Exhibition (MWE2011), pp.42-58 (November, 2011 in Yokohama, Japan)
  23. Yasuyoshi Okita and Futoshi Kuroki, “Study on Low-loss and Low-cost Band-pass Filters at Millimeter Wavelengths”, Proceedings of International Student Conference 2011 in Dalian (Promoting Project for International Relationship of eight Colleges-of-Technology in Chugoku-area), C5 , (November, 2011 in Dalian, China)
  24. Shingo Inoue and Futoshi Kuroki, “Study on Evaluation of Cost-effective Dielectric Substrate at Millimeter-wave Frequencies”, Proceedings of International Student Conference 2011 in Dalian (Promoting Project for International Relationship of eight Colleges-of-Technology in Chugoku-area), C3, (November, 2011 in Dalian, China)
  25. Tomonori Morita and Futoshi Kuroki, “Vertical Strip Transmission Line Primary Radiator with Tapered Reflection Plate for Pencil-beam Antennas at 60GHz”, Proceedings of 2011 Korea-Japan Microwave Conference, p.262-265 (November, 2011 in Fukuoka, Japan)
  26. Yasuyoshi Okita and Futoshi Kuroki, “Design on Fishbone Shaped Tri-plate Transmission Line Filter at Millimeter Wave Length”, Proceedings of 2011 Korea-Japan Microwave Conference, p.118-121 (November, 2011 in Fukuoka, Japan)
  27. 沖田靖能、黒木太司、“ミリ波帯魚骨形トリプレート帯域フィルタの設計”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.41-44 (2011年10月、東京)
  28. 越智亮輔、井上晋吾、黒木太司、“60GHz 帯における FR-4 基板の誘電特性の評価”、平成 23 年度 (第 62 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会資料 3-11 (2011年10月、広島)
  29. Yasuyoshi Okita and Futoshi Kuroki, “Fabrication of Band-pass Filter Made by Only Metal Strip at 30GHz”, Proceedings of Thailand-Japan MicroWave 2011, pp.74-77, (August, 2011 in Bangkok, Thailand)
  30. 沖田靖能、黒木太司、“低損失化を目的とした 30GHz 帯魚骨形トリプレート帯域フィルタ”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.9-12 (2011年6月、多治見)
  31. Futoshi Kuroki and Hiroyuki Kawagashira, “Cost Effective Printed Filter Using BIT Line at Millimeter-wave Frequencies (Invited Paper)”, Proceeding of 2011 China-Japan Microwave Conference, pp.378-381 (April 2011 in Hangzhou, China)
  32. Tomonori Morita and Futoshi Kuroki, “Improvement on Reflection Performance of Primary Radiator Using Vertical Strip Transmission Line at 60GHz”, Proceeding of 2011 China-Japan Microwave Conference, pp.193-196 (April 2011 in Hangzhou, China)
  33. Futoshi Kuroki, “Consideration on Millimeter-wave Technologies. – Why Don’t You Perceive the Severe Realities? –”, Workshop Digest of “Latest Technologies Are Changing the Framework of Microwave Industries” in 2011 China-Japan Microwave Conference, pp.60-70 (April 2011 in Hangzhou, China)
  34. 森田智紀、中村元紀、黒木太司、“60GHz 帯垂直ストリップ線路 1 次放射器の反射・放射特性”、電子情報通信学会総合大会、C-2-56 (2011年3月、東京)
  35. 黒木太司、沖田靖能、川頭弘幸、“高次モードを考慮した 60GHz 帯両面金属装荷トリプレート伝送線路の設計”、電子情報通信学会総合大会、C-2-66 (2011年3月、東京)
  36. 川頭弘幸、表佑介、黒木太司、“FR-4 及びガラスファイバ PTFE 基板を用いた 30GHz 帯 BIT ラインフィルタの比較検討”、電子情報通信学会総合大会、C-2-91 (2011年3月、東京)
  37. Hiroyuki Kawagashira, Yusuke Omote, and Futoshi Kuroki, “Study on Suppression of Unwanted Emission at Asymmetrical BIT Line Structure”, Proceedings of International Student Conference 2011 in Okayama (Promoting Project for International Relationship of eight Colleges-of-Technology in Chugoku-area), A-9, (January, 2011 in Okayama, Japan)
  38. Shimpei Takeda, Ko-ichi Ohue, and Futoshi Kuroki, “Study on Numerical Calculation of Q-factors in Microwave Oscillators”, Proceedings of International Student Conference 2011 in Okayama (Promoting Project for International Relationship of eight Colleges-of-Technology in Chugoku-area), A-9,

- (January, 2011 in Okayama, Japan)
39. Futoshi Kuroki, “Special Lecture of Consideration on Millimeter-wave Technologies –Why don’t you get hold of the basic concepts and perceive the reality”, Proceedings of Tutorial Lecture in Asia Pacific Microwave Conference, pp.29-38 (December, 2010 in Yokohama, Japan)
  40. S. Takeda, K. Ohue, F. Kuroki, and T. Ohira, “A Consideration on Numerical Calculation of Q-factors in Oscillation Circuit Based on Formulation of S Parameters”, Proceedings of Asia Pacific Microwave Conference, pp.508-511 (December, 2010 in Yokohama, Japan)
  41. H. Kawagashira, Y. Omote, and F. Kuroki, “Study on Construction of Cost-effective Printed Circuits at Millimeter-wave Frequencies”, Proceedings of Asia Pacific Microwave Conference, pp.1490-1493 (December, 2010 in Yokohama, Japan)
  42. 川頭弘幸、表祐介、黒木太司、“FR-4 基板を用いた 30GHz 帯 BIT ラインフィルタの試作”、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-2-45 (2010 年 9 月、大阪)
  43. 一瀬健人・黒木太司、“センチ波帯プリント線路帯域フィルタの一構成法”、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-2-44 (2010 年 9 月、大阪)
  44. 竹田慎平、黒木太司、太平孝、“イミッタンス行列及び散乱行列による 2 端子対発振回路 Q ファクタの数値計算”、電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-2-7 (2010 年 9 月、大阪)
  45. 一瀬健人、黒木太司、“ミリ波帯プリント線路帯域フィルタの構成法に関する考察”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.65-68 (2010 年 9 月、東京)
  46. 川頭弘幸、表祐介、黒木太司、“FR-4 基板を用いたミリ波帯 BIT ラインフィルタ”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、pp.61-64 (2010 年 9 月、東京)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

黒木 太司 (FUTOSHI KUROKI)  
呉工業高等専門学校・電気情報工学分野・教授  
研究者番号：30195581