Accurate On-chip Grounded CPW Line Model in THz Band



西川 健二郎 (Kenjiro NISHIKAWA, Dr. Eng.) 鹿児島大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 教授 (Professor, Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University) IEEE IEICE

受賞:電子情報通信学会学術奨励賞(1996年3月) 電子情報通信学会通信 ソサイエティ Best Paper Award (2006年9月) 電子情報通信学会エレク トロニクスソサイエティ活動功労賞(2008年3月,2009年3月) 電子情報 通信学会論文賞(2011年5月) 電子情報通信学会通信ソサイエティ活動功 労賞(2016年9月)

著書:ミリ波技術の基礎, 電気学会(分担)(2009年) 研究専門分野:マイクロ波工学

あらまし 本研究は、THz 帯集積回路を実現する上で不 可欠なオンチップコプレーナ*1 (CPW) 伝送線路の高精 度モデルを提案、解析している。提案するオンチップ CPW 伝送線路モデルは、THz 帯以上の周波数帯信号を 伝送する際に生じる異常表皮効果を考慮した導電率の異 なる導体層を多層に積層する年輪導体モデルである。提 案モデルの検証を行うため、年輪導体モデルを採用した 特性インピーダンス50ΩのオンチップCPW 伝送線路に ついて、0.1 THz~2 THz の範囲で電磁界シミュレーシ ョン解析を行っている。解析結果から得られた表面抵抗 の周波数特性は、0.1 THz~0.6 THz, 0.7 THz~1.3 THz, 1.4 THz~2.0 THz それぞれの周波数帯域において、周 波数の 0.5 乗、0.58 乗、0.67 乗に比例する結果を得てい る。これらの結果は、提案する伝送線路モデルが古典的 表皮効果領域、遷移領域、異常表皮効果領域を高精度に 表現することができることを示している。

1. 研究の背景・目的

近年、無線通信速度の一層の高速化を目指して、より 広帯域な帯域幅を取ることができる THz 帯(0.1~10 THz)を用いた無線通信システムの研究開発が進められ ている。また、THz 帯周波数はイメージングシステム、 セキュリティーシステム、センシングシステム、電波天 文等への応用も期待されている。一方、上記のようなシ ステムを構成する電子デバイス、集積回路の研究開発に おいても、動作周波数が1THzを越えるものが実用化さ れつつある[1]。THz 帯集積回路(THz Monolithic IC, TMIC)の高性能化を実現するためには、デバイス性能 のみならず、設計に必要なデバイス特性、オンチップ受 動素子特性を高精度に示すモデリングが重要である。特 に、受動素子の基本要素である伝送線路の高精度モデリ ングは、TMIC実現には必要不可欠である。

金属導体を高周波信号が伝搬する際、信号は導体表 層に集中して伝搬する。これを表皮効果と呼び、信号 が集中している領域を表皮効果領域(表皮深さ)と呼 ぶ。信号が流れる領域は、周波数の0.5 乗に従って小 さくなる。すなわち、表皮効果領域の表面抵抗値が0.5 乗に比例して大きくなる。さらに周波数が高くなり、 THz帯領域になると、表皮領域が導体中の電子の平均 自由行程と同程度もしくはそれ以下になる異常表皮効 果と呼ばれる現象が生じ、表面抵抗値は周波数の2/3 (=0.67)乗に比例して大きくなる[2]。すなわち、表 面抵抗 *Rs*、角周波数ω、透磁率μ、導電率σとすると、 古典的表皮効果領域の表面抵抗は、

$$Rs = \left(\frac{\omega\mu}{2\sigma}\right)^{0.5} \propto f^{0.5} \qquad (1)$$

異常表皮効果領域の表面抵抗は、

$$Rs = \left(\frac{\omega^2 \mu^2 l}{6\beta\sigma}\right)^{\frac{1}{3}} \propto f^{0.67} \quad (2)$$

と記載できる[2]-[8]。また、図1は、異常表皮効果の 概念図である[5]。低周波数帯では表皮深さは電子の平 均自由行程より大きいが、周波数が高くなりTHz帯に なると、表皮深さが電子の平均自由行程より小さくな る。このような状態では、電子が導体表面で散乱され、 表面抵抗が一層大きくなる。図2は、銅の表皮深さと 周波数の関係を示したグラフであり、0.1 THz での表 皮深さは206 nm である。銅の平均自由行程は40 nm であるので、40 nm以下の表皮深さでは異常表皮効果 が生じる。しかしながら、実際には異常表皮効果は表 皮深さ200 nm以下で観察され、表皮深さ200 nm か ら40 nmの間は遷移領域であり、異常表皮効果が増加 し、古典的表皮効果は低下する。

Accurate On-chip Grounded CPW Line Model in THz Band





異常表皮効果による伝送線路の伝送損失を表す伝送 モデルとして、土谷らによって多層導体モデルが提案 されている[9]。土谷らの多層導体モデルは、導体の抵 抗率を層ごとに変更したものである。彼らの提案導体 モデルを用いた伝送線路の伝送損失は、従来の伝送モ デルと比較して、100 GHz で 5%、300 GHz で 10% 増加するという結果を示している。しかしながら、こ のモデルを用いて 1 THz 以上の周波数帯での伝送損 失を計算した場合には、指数値として 0.67 より小さい 値となっている。従って、提案モデルにおいても THz 領域において高精度な伝送特性を示しているとは言え ず、TMIC を実現するには新たな高精度伝送モデルが 必要である。

2. 提案モデル

2.1. 導体及び信号線モデル

土谷らが提案している多層導体モデル[9]では、導体の上下表層から内部にいくに従って導電率を変化させて、異常表皮効果を次式で示される導電率p(x)を用いてモデル化している。

$$\begin{split} \rho(x) &= \rho_0 \frac{\left(1 + \frac{2C}{x}\right)^2}{1 + \frac{4C}{x}} \quad (3) \\ C &= A\lambda(1-p) \quad (4) \end{split}$$

*ρ*₀は、バルクの銅の導電率(1.72×10⁻⁸)、*A*は定数、*λ* は平均自由行程、*p*は導体表面の鏡面性、x は導体表面 からの距離である。ここでは、*A*=1, *p*=0, *C*=*λ*=40×10⁻⁹ としている。図 3 のグラフは、式(3)で示される。



Accurate On-chip Grounded CPW Line Model in THz Band

図 4(a)は、本稿で提案する導体の年輪モデルの断面 図である。導体の外周部から内部にかけて、樹木の年 輪のように導電率が変化するモデルである[10]。一方、 図 4(b)は、土谷らが提案している導体モデル[9]、図 4(c)は、従来の単一導電率導体モデルである。また、 表1は、図4に示した各モデル、各層の層厚、導電率、 規格化導電率を示している。図4(a)に示す提案モデル は、5層構造であり、導体の外周部ほど薄く、導電率 が大きく、内部に行くに従って層厚を厚くし、導電率 をバルク銅の値に近い値としている。このような構造 とすることにより、THz帯で生じる異常表皮効果の現 象をモデル化している。



表 1 各層	の厚みと導電率、	、規格化導電率
--------	----------	---------

<i>x</i> [nm]	$\rho(x)/\rho_0$	Layer resistivity($\Omega \cdot m$)
-10	5	8.50×10^{-8}
10-30	2.45	4.17×10^{-8}
30-50	1.71	2.91×10^{-8}
50-100	1.35	2.30×10^{-8}
100-	1	1.72×10^{-8}

図5は、提案モデルに用いたグランド付CPW線路の構造及びその物理寸法を示している。SiIC上で作成、使用

されることを考慮した構造、寸法としている。導体は銅、 誘電体は SiN としている。信号線導体は、図 4(a)で示し た提案導体モデルを用いて構成されている。提案モデル の有効性を評価するために、本研究では、Keysight Technology 社の電磁界解析ソフトウエア EMPro を用い て THz 帯の伝送特性解析を行なっている。



2.2. 高次伝搬モード*2の抑圧

THz 帯等高周波帯での信号伝送においては、基本モ ードでの伝送以外に高次モードでの伝送も生じる。こ こでは、異常表皮効果によって生じる伝送損失を高精 度にモデル化するために、可能な限り高次モード伝送 が生じない構造を採用している。図5に示すグランド 付 CPW 線路において、上層の接地導体と下層の接地 導体をビアホールで接続することにより、高次モード 伝送を抑圧している。図6は、ビアホールを形成した グランド付 CPW 線路の断面図である。上下接地導体 を接続するビアホールは、高次モード伝送を最大限抑 圧できる位置として、接地導体の端部から0.1 μm 内 側に入った位置に形成している。また、ビアホール形 状は、0.1 μm 角の直方体である。

Accurate On-chip Grounded CPW Line Model in THz Band



図7は、ビアホール形成による高次モード伝送抑圧 効果を示す電磁界シミュレーション結果である。図中 の矢印は、電界の大きさと方向を示している。ビアホ ールが無い場合は、上下層の接地導体間に電界が生じ ていることがわかる。これは、接地導体間に電位差が 生じていることを示しており、基本モード以外の高次 モード伝送が生じていることを示している。一方、ビ アホールを形成した CPW 線路モデルにおいては、電 界が信号線導体及びその周りの接地導体のみに集中し ている。すなわち、グランド付 CPW 線路の基本モー ドのみの伝送が実現できていることを示しており、ビ アホール形成が高次モード伝送の抑圧に有効であるこ とが示されている。図8は、グランド付 CPW 線路の 伝送特性を解析した結果であり、図中の赤線はビアホ ール有り、青線はビアホール無しの場合を示している。 ビアホール無いモデルでは、種々の周波数帯で高次モ ード伝送による伝送損失が増加しているが、ビアホー ル有りのモデルにおいては、2 THz まで高次モード伝 送が生じず、伝送損失の急激な増大を生じない結果と なっている。ビアホールを採用、形成することによっ て、高次モード伝送抑圧を有効に行えることを示して いる。

3. 検証結果

図9は、電磁界解析ソフトウエアを用いて解析したグ ランド付 CPW 線路の信号線導体周辺の電界分布を示し ている。電界分布は、0.1 THz 及び2 THz 時の分布を示 している。2 THz の解析結果は、0.1 THz 時と比較して 明らかなように、電界分布は信号線の周辺に集中してい ることがわかる。この結果は、本研究で提案している





Accurate On-chip Grounded CPW Line Model in THz Band

年輪モデルが THz 帯における解析モデルとして有効 かつ妥当であるということを明らかにしている。



図 10 は、図 4 に示している導体モデルを用いて解 析したグランド付 CPW 線路の 0.1 THz から 2 THz ま での伝送損失を示している。赤線、オレンジ線、青線 は、それぞれ提案モデル(年輪モデル)、土谷らのモデ ル、単一導電率導体モデルの結果を示している。単一 導電率モデル採用のグランド付 CPW 線路の伝送損失 は、周波数の 0.5 乗に依存して増加し、土谷らのモデ ルを用いた場合は、周波数の 0.56 乗に依存して増加し ている。一方、提案モデルを用いた場合は、特に、0.7 THz 以上の周波数帯での伝送損失増加が従来モデル と比較して大きくなっている。 図 11 は、提案モデルを用いた場合の伝送損失特性 のみを示した図であり、伝送損失は 0.6 THz 以下では 周波数の 0.5 乗に依存し、1.4 THz 以上では周波数の 0.67 乗に依存する結果となっている。中間領域の 0.7 THz~1.3 THz において、周波数の 0.58 乗に依存して いる。この値は、林ら[8]が導波管を用いて測定評価し た銅の表面抵抗値を同じ値である。以上の結果から、 本研究で提案する導体の年輪モデルは、古典的表皮効 果領域から異常表皮効果が生じる THz 帯の周波数領 域において、高精度に伝送損失特性を示すことができ るモデルであると言える。





Accurate On-chip Grounded CPW Line Model in THz Band

4. まとめ・将来展望

本研究では、異常表皮効果が生じる THz 帯における オンチップ伝送線路の高精度モデルを確立するために、 新たに年輪型の導体モデルを提案している。提案モデ ルを用いてグランド付 CPW 線路を用いて、0.1 THz から 2 THz において電磁界シミュレーションを用い て検証を行い、古典的表皮効果領域から異常表皮効果 領域が生じる帯域において、良好な伝送特性を表現す ることができていることを確認している。今後は、提 案モデルの有効性を検証するため、実測による検証を 行うとともに、TMIC の設計に向けた伝送線路モデル の CAD への組み込みを進めていく。

用語解説

*1 コプレーナ (CPW) 線路

高周波帯で使用される平面型伝送線路の1つで、 同一面上に信号線導体と接地導体を形成した構成と なっている伝送線路。

*2 高次伝搬モード

高周波信号を伝送する伝送線路では、周波数が高 くなり、線路構造寸法が波長に対して無視できない サイズとなった場合に、基本モード(平面波)以外 に生じる伝搬モード。

謝 辞

本研究開発を推進するにあたり、多大な貢献をいただいた垣内英志氏、崎山裕太氏に感謝いたします。

参考文献

- M. Urteaga, Z. Griffith, M. Seo, J. Hacker, and M. Rodwell, "InP HBT Technologies for THz Integrated Circuits," Proceedings of IEEE, vol. 105, no. 6, pp. 1051-1067, June 2017.
- [2] H. E. G. Reuter and E. H. Sondheimer, "Theory of the Anomalous Skin Effect in Metals," Nature, vol. 161, no. 4089, pp. 394-395, March 1948.
- [3] S. Nagai, T. Hayashi, and A. Sanada, "Measurements of Anomalous Skin Effect in 1 THz Band," 2013 IEEE Int. Microwave Symp. Dig., WEPL-3, June 2013.

- [4] 林, 永井, 真田, "1THz 帯における常温異常表皮効果の実験的評価," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 307, pp. 47-50, MW2013-139, 2013年11月.
- [5] 土谷,小野寺,"伝送線路の損失に対する異常表皮効果の影響,"電子情報通信学会技術研究報告,vol.
 111, no. 351, pp. 77-81, MW2011-139, 2011 年 12月.
- [6] R. Sarvari, "Impact of Size Effects and Anomalous Skin Effect on Metallic Wires as GSI Interconnects," Ph. D dissertation, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Tech., Atlanta, GA, USA, 2008.
- [7] F. Schnieder, T. Tischler, and W. Heinrich, "Modeling Dispersion and Radiation Characteristics of Conductor-backed CPW with Finite Ground Width," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 51, no. 1, pp. 137-143, Jan. 2003.
- [8] 林,真田,"1 THz帯における金属の常温異常表皮 効果の実験的評価,"2015年電子情報通信学会総合 大会,C-2-44,2015年3月.
- [9] A. Tsuchiya and H. Onodera, "Gradient Resistivity Method for Numerical Evaluation of Anomalous Skin Effect," Signal Propagation on Interconnects (SPI), pp. 139-142, May 2011.
- [10] H. Kakiuchi, Y. Sakiyama, and K. Nishikawa,
 "On-chip Grounded CPW Line Model with Anomalous Skin Effect in THz Band," 38th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2017), 2A_14a-2, May 2017.

この研究は、平成25年度SCAT研究助成の対象と して採用され、平成26~27年度に実施されたもの です。