

論文内容要旨（和文）

平成 21 年度入学 博士後期課程

専攻名 システム情報工学専攻

氏 名 中川 俊



論 文 題 目 左手系進行波型トランジスタの設計論に関する研究

第 1 章では本論文の背景を述べる。メタマテリアルとは金属などの小片によって、電磁波長に比べて十分に小さな構造を人工的に構築し周期配列した人工材料である。特に誘電率と透磁率を同時に負とする媒質は、左手系メタマテリアル・左手系媒質と呼ばれ、負の屈折率を呈するといった自然界の媒質にはない特徴がある。左手系媒質を伝送線路で実現した混合右手系・左手系（Composite right/left-handed、以降 CRLH）線路は広帯域動作に優れ、非共振型であるため共振型に比べて損失が小さく製造が容易であるといった特徴がある。また CRLH 線路は右手系の要素も含んでおり、これを考慮して両者を積極的に利用した使い方が実用的であり、さまざまな応用が研究されている。機能拡張を目的に LC 対を追加することで分散曲線を増やした研究も報告されている。LC 対を増加させた CRLH 線路をここでは多段 CRLH 線路と呼び、そのうちでも倍に増やした 2 段 CRLH 線路の基本特性、分散関係や特性インピーダンスについて明らかにし、特性インピーダンスの同時整合の可能性を示す。これらのような機能拡張を目的とした研究が報告されているが、実用化された左手系アプリケーションは極わずかである。そのため実用化を妨げている要因が機能的なものでないとする、基板リークや配線抵抗による信号の減衰が他の要因として推測される。信号の減衰は動作周波数が高くなればなるほどより顕著になる。そのため将来のマイクロ波アプリケーションでの活用を考えると、何らかの対策が求められる。本稿ではトランジスタの増幅効果を用いた左手系伝播波の損失補償を目指した。

第 2 章ではまず左手系伝播波の損失補償手法として左手系進行波型トランジスタ (Left-Handed Traveling-Wave FET、以降 LHTWFET) を提案する。これは二つの CRLH 線路が FET の相互コンダクタンスによって連続的に接続された結合伝送線路である。相互コンダクタンスの効果によりゲート線路の伝播波がドレイン線路上に波を誘起し、そのドレイン線路に誘起された波が伝播することでゲート線路に波が誘起される。これを繰り返すことで左手系伝播波の損失補償が可能となる。しかし、あるモードから他のモードへエネルギー移送が行われるとき、不安定性と呼ばれる現象が発生する。これは伝播波が最終的に発振するものと増幅するものの 2 種類存在する。この 2 種類の不安定性を分散曲線の分岐点を用いて判別することが設計原理の一つである。また LHTWFET は二導体結合線路であるため独自の基本特性をもつ二つの伝播モードが存在する。それぞれの伝播速度が異なるとき、二つのモードの伝播波形の重畳により波形劣化が生じる。各伝播モードの分散関係から利得に関する式を導出し、評価することで一つの伝播モードが増幅利得を得るとき、他の伝播モードは減衰することを明らかにする。この単一伝播モードのみの増幅利得効果が設計原理の一つである。また利得に関する式より、最大利得を呈する周波数の存在を明らかにした。

第 3 章では実験的・数値的評価を行い、設計原理の有効性および妥当性を確認する。不安定性の判別条件を用いて発振と増幅のそれぞれを呈し得る線路パラメータにおける数値解析を行う。このときそれぞれの結果から不安定性の判別条件が設計原理と主張できることが示される。また実験的に設計原理の妥当性を明らかにすることを目的としたテスト線路を構築した。まずテスト回路が想定通りの回路であることを確認する実験を行った。正弦波を入力することで発生する定在波を観測し、各周波数における

半波長の値より分散関係を導出する。計算値と実験値を比較しテスト線路の妥当性を明らかにする。また同条件で行った実験的・数値的評価により両者の類似性を明らかにする。そしてテスト線路においても単一伝播モードのみが増幅利得の効果を呈することを確認し、さらに最大利得を呈する周波数が存在することを明らかにする。

第4章では他の左手系伝播波の損失補償手法について議論した。共鳴トンネルダイオードの負性抵抗を活用したCRLH線路の基本特性を明らかにし、損失補償の可能性について議論する。またLHTWFETの2次元線路への拡張を目指し、基本特性を導出する。それにより1次元線路の設計原理が2次元線路においても適用できるか明らかにする。また期待されるアプリケーションについていくつか検討する。最後に本稿を総括する。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成24年2月2日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 榎原 浩一 

副査 中島 健介 

副査 広瀬 精二 

副査 _____ 

副査 _____ 

副査 _____ 

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

1. 論文申請者

専攻名 情報システム工学専攻

氏 名 中川 俊

2. 論文題目（外国語の場合は、その和訳を併記する。）

左手系進行波型トランジスタの設計に関する研究

3. 審査年月日

論文審査 平成24年1月25日 ～ 平成24年2月2日

論文公聴会 平成24年2月2日

場所 工学部8号館410教室

最終試験 平成24年2月2日

4. 学位論文の審査及び最終試験の結果（「合格」・「不合格」で記入する。）

(1) 学位論文審査 合格

(2) 最終試験 合格

5. 学位論文の審査結果の要旨（1,200字程度）

別紙のとおり

6. 最終試験の結果の要旨

別紙のとおり

別 紙

専 攻 名	情報システム工学専攻	氏 名	中川 俊
学位論文の審査結果の要旨			
本論文の内容を章ごとに記述する。本論文は4章構成である。第1章では本論文で議論される研究テーマのバックグラウンドが示されている。左手系媒質を伝送線路で実現した混合右手系・左手系 (Composite right/left-handed、以降 CRLH) 線路のレビューがなされ、その多段化に関する設計論が展開される。左手系線路の線路長拡大の将来ニーズに対して、信号減衰を補償する機構を備えた能動線路の構築が肝要であるとした。第2章では、上記損失補償をトランジスタの増幅効果に求める左手系進行波型トランジスタ (LHTWFET) が提案されている。2つの CRLH 線路が FET を介して接続された結合伝送線路であるとし、その基本動作原理の説明がつづく。さらに LHTWFET の設計論が展開される。これは次の2点に集約される。自律発振の抑止と単一モードの増幅である。LHTWFET は2導体結合線路であるため独立した伝播モードが2つ存在する。内一方のみが増幅される機構を備えればモード分散が抑止され、さらに整合終端設計も容易となる。以上の設計指針について、LHTWFET の複素分散関係式を評価した解析的な帰結と、有限差分法を用いた数値的帰結との整合性を図ることによって正当性が主張される。第3章は、LHTWFET の実験的評価に基づく帰結が示される。テスト線路を構築しその時間領域は計観測を進め、設計原理の有効性を実証している。具体的には、テスト線路の分散関係の評価、伝搬モードごとの増幅係数評価、整合終端の有効性評価について言及がある。実験的に得られた利得係数の周波数依存性は解析式と整合的に振る舞い、設計論の妥当性がよく実証されている。本論文の研究内容は新規性の代償として実践性に乏しい。第4章では、高周波数化、線路の2次元化、非線形素子の導入といった観点から将来展望に言及されている。実践的価値を推定する材料がよく議論されている。 次に、本論文の内容の印刷公表について言及する。本論文に関連する査読付き論文、同国際会議予稿は次のとおり。関連する学会等の査読を伴わない研究報告が5件である。 S. Nakagawa, K. Narahara, "Compensation of wave attenuation in left-handed traveling-wave field-effect transistors," Progress In Electromagnetics Research Lett. 28, pp. 195-205, 2012. S. Nakagawa, K. Narahara, "Experimental characterization of nonlinear transmission lines for amplification of short pulses," Proc. ICMT2011, pp. 2107-2110, 2011. S. Nakagawa, K. Narahara, "Characterization of left-handed traveling-wave field effect transistors," Proc. 2010 Asia-Pacific Microwave Conf., pp. 2311-2314, 2010. S. Nakagawa, K. Narahara, "Characterization of left-handed traveling-wave transistors," IEICE Trans. Electron. E92-C, no. 11, pp. 1396-1400, 2009. S. Nakagawa, K. Narahara, "Characterization of two-stage composite right- and left-handed transmission lines," IEICE Trans. Electron. E91-C, pp. 631-637, 2008. 以上によって、専攻の学位授与基準を満足するとともに、良好な研究成果をあげていることを評価し、合格と判定した。			
最終試験の結果の要旨			
最終試験は、平成24年2月2日、学位論文に記載された研究内容を口頭での報告および質疑により行った。研究内容報告では、研究成果の新規性・重要性の所在とプレゼンテーション能力の十分な醸成を判定することを、一方質疑では、研究対象についての深い理解、関連する技術領域に関する見識などが十分であることを判定することを主とした。口頭説明は70分をかけた丁寧になされた。報告は学位論文の章立てを踏まえてよくまとめられ、骨子を損なうことなくされた。続いての質疑は50分間におよび、審査委員会委員よりの指摘に対して概ね良好な回答を行った。 以上によって、合格と判定した。			