

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420296

研究課題名(和文)左手系進行波型トランジスタを用いた非線形パルス生成制御に関する研究

研究課題名(英文) Management of nonlinear solitary waves developed in composite right- and left-handed traveling-wave field-effect transistors

研究代表者

檜原 浩一 (Koichi, Narahara)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：00422171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：左手系波動ではパワーは位相と逆向きに伝搬する。この特性が左手系波動を介した共鳴相互作用に与える効果をCRLH線路を題材とし明らかにした。

左手系波動により3波混合が正面衝突で顕在化する。ソリトン崩壊では放出低速ソリトンが必ず左手系となるため高速ソリトンのパルス幅が入力よりも小さくなる。この属性は短パルス生成のために有意義である。調和共鳴によれば第二高調波生成の効率化が果たされる。

FETによる増幅作用の導入によって損失補償を果たした。コヒーレント構造を分岐特性と合わせ明らかにした。縮約方程式を得て散逸ソリトンや停留ソリトン励起の可能性を見出し数値的に実例を示した。そしてその制御法提案に至った。

研究成果の概要(英文)：The envelop of a left-handed (LH) wave moves to the opposite direction to its carrier. This study clarifies how this exotic property affects the resonances of LH waves using CRLH structure.

Owing to the left-handedness, three-wave mixing becomes significant by head-on collisions of short envelope pulses. By the soliton decay in a nonlinear CRLH line, the incident envelope emits several pairs of the fast and slow solitons. It is found that the slow soliton travels backward and the fast soliton becomes shorter for wider incident envelope. Moreover, the generation of second harmonic waves in a nonlinear CRLH line is analyzed on the basis of harmonic resonance.

We introduced field-effect transistors to compensate for decaying waves. Introduction of FETs allows for the line to support either dissipative or stationary soliton that is expected by the reduced Ginzburg-Landau equation and is really observed numerically. We then establish the scheme for managing such solitary waves.

研究分野：Electronics

キーワード：メタマテリアル 非線形孤立波 進行波型トランジスタ 左手系波動 非線形線路 離散ブリーザー

1. 研究開始当初の背景

(1)メタマテリアルは概して自然界に存在する物質では生じ得ない電磁特性を人工的な構造で実現した物質である。21世紀に入って伝送線路の形態をもつメタマテリアルとして右手左手混在 (Composite Right- and Left-Handed, 以下, CRLH) 線路が提案された。比較的広い帯域に渡って左手系の性質が現れ、一方、有限の周波数において波数がゼロとなる性質や強い分散をもつ性質なども手伝って、ゼロ次モード発振器、方向性結合器、漏れ波アンテナなど従来にない興味深い機能回路が実現されている。

(2)CRLH 線路に非線形素子を導入し、左手系ソリトン、高調波生成などをもとにした広帯域左手系波動応用の研究が、研究代表者を含む複数の研究機関で開始された。CRLH 線路は強分散性であるので、非線形シュレディンガー (NS) 方程式に従う包絡ソリトンが生ずる。この包絡ソリトンが光通信工学に应用され、明らかな技術的価値を發揮している。

(3)線路の損失補償機構を与えるとこによってその有用性は増大する。しかしながら増幅媒体との融合に関する研究は十分に進展していない。

2. 研究の目的

(1) CRLH 線路に非線形性を導入することによって実現される共鳴現象を精査し、左手系波動介在の価値を明らかにする。非線形共鳴現象は波数及び周波数が保存される場合に極大化する。CRLH 線路の特徴的な分散関係は高度な高調波生成を期待される。

(2) 左手系進行波型電界効果トランジスタ (TWFET) において非線形包絡パルス損失補償を実証する。これにより線路の大規模化が許容され相互作用長を要する非線形現象の利便性向上が図られる。

3. 研究の方法

初年度に、1次元左手系 TWFET の包絡パルス設計、PCB 試作による無損失包絡パルスの実測及び包絡パルス間相互作用による高調波パルス設計論の検討を並行して行う。

第二年度に、漸近的手法と分岐理論に基づいて TWFET の波動伝搬特性を明らかにする。これをもとに PCB 試作評価結果の検討を行う。そして第三年度に、パルス制御の具体的な方策の提案を行う。

4. 研究成果

CRLH 線路は、周波数に応じて右手系、左手系の各波動の伝搬を許容する一方、有限の周波数で波数がゼロを呈するといった特徴的な分散関係を有する。右手系容量にショットキーバクタを用いることで、CRLH 線路の分散特性や左手系波動に対して非線形性を導入し、右手系波動に対する場合との差異に注目した形での高調波生成やソリトン崩壊の定量化を試みる。左手系波動の介在によって得られた新しい共鳴現象は次の3項である。

- ・対向衝突パルス間三波混合による高効率高調波生成
- ・調和共鳴による自発的第二高調波生成
- ・ソリトン崩壊による短パルス生成

以下それぞれの概要を示す。

対向して伝搬する包絡パルスの衝突によって3波混合が生じ、対向するパルス周波数の和を周波数とする高調波が生成される。特に、対向パルス周波数が合致している場合には、倍波は波数ゼロを呈する。微分展開法を伝送方程式に適用することによって相互作用を記述する3WRI方程式を得ることができる。この時倍波生成効率を記述する係数を閉じた式で得ることができる。ここでは、生成効率の特性を利用した倍波生成の提案を行う。図1(a)のように異なるバイアス電圧を与えた非線形 CRLH 線路を点 P で接続する。第一区間近端に基本波パルスを与える。第二区間において基本波キャリア周波数が禁制帯に含まれ倍波が右手系分散領域とするよう設計する。基本波パルスは点 P で全反射され、重ね合わせによって対向パルス衝突と同様の3波混合を単一のパルス入力で引き起こす。一方、区間1では倍波パルスは伝搬せず、基本波、倍波パルスの分離に成功する。数値解析結果を図1(b)に示した。所定の結果が得られている。

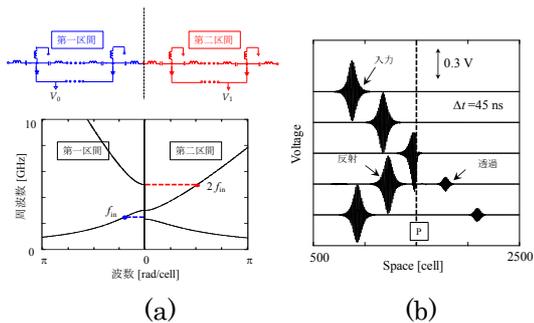


図1: 3波混合を利用した倍波生成

基本波(波数 k_f , 角周波数 ω_f)に対して倍波の波数 k_s , 角周波数 ω_s が基本波のその2倍となる時調和共鳴が生じ, 基本波から倍波が自励的に発生する。自然には基本波は左手系, 倍波は右手系分岐に位置することとなる。右手系においては倍波生成に伴って基本波は減衰する。いまの場合には基本波位相がその包絡波に対して逆進するために倍波包絡波も逆進することになる。それゆえ, 位相が進む向きに対して基本波, 倍波とも振幅が増大する。基本波と倍波の振幅が大となる空間領域が合致するために効率よく倍波が生成される。図2に効果的に倍波生成する構成を示す。左端に基本周波数の発振器を接続し, 右端より倍波を得る。入出力インピーダンス $Z_{in,out}$ を基本波の特性インピーダンス Z_f と整合させる。 $Z_s \gg Z_f$ とし, 線路長を波長の整数倍とすることで倍波の空洞共振を引き起こす。

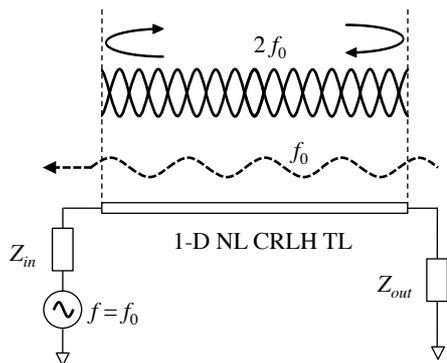


図2: 調和共鳴を利用した倍波生成効率化
 一般に角周波数 ω_2 , 波数 k_2 の包絡パルスを入力する。このとき, 波数 $k_{1,3}$, 角周波数 $\omega_{1,3}$ が $k_2 = k_1 + k_3$, $\omega_2 = \omega_1 + \omega_3$, かつ, $V_g(k_1) < V_g(k_2) < V_g(k_3)$ を満足するとき, 入力パルスは自励的に低速包絡パルス(角周波数 ω_1 , 波数 k_1), 高速包絡パルス(角周波数 ω_3 , 波数 k_3) に崩壊する。崩壊後のパルス振幅, 幅は Zakharov-Shabat 方程式の固有値問題を解くことで閉じた形式で予言される。それによると, 崩壊後生ずるソリトンの一方が左手系分岐にあるため逆進しパルス幅は比較的大きい。そして他方のパルス幅は短くなる。興味深いことには, 入力パルス幅が大となるほど崩壊後の高速パルスの幅は小となる。図3はソリトン崩壊の様子を示した数値解析結果である。図3(a)ではパルス幅の小さい入力に対してソリトン対(A, A')が生じている。一方, 図3(b)では幅の大きな入力パルスが (A, A'),

(B, B'), (C, C')と付した3つの高速・低速パルス対に崩壊している。パルス A', B', C'は左手系分岐にあり逆進する。結果として前進崩壊パルス A, B, Cは入力に対して短パルス化している。

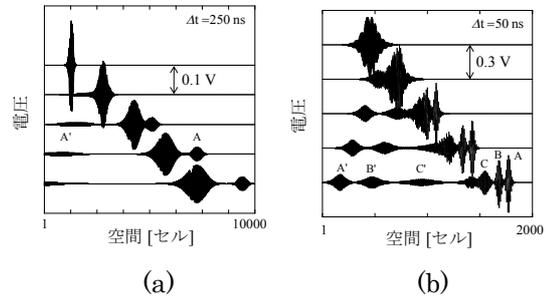


図3: ソリトン崩壊の数値解析例. 入力パルス幅(a)小, (b)大

以上の共鳴相互作用について最適化によって作用長の縮減に努める一方, 損失補償の実現性について検討を行うべきである。ここでは, FETを周期装荷する構成を議論したい。図4に検討する伝送線路の単位セル構造を示す。FETはソース接地とし, ゲート・ドレインそれぞれにCRLH構造を持つ伝送線路が接続される。ゲート線路の右手系容量をバラクタとする。FETへの給電は幸運にも速やかである。左手系インダクタを介してゲート・ドレインへの電圧印加がなされ, セル間の直流は左手系容量によって抑止される。

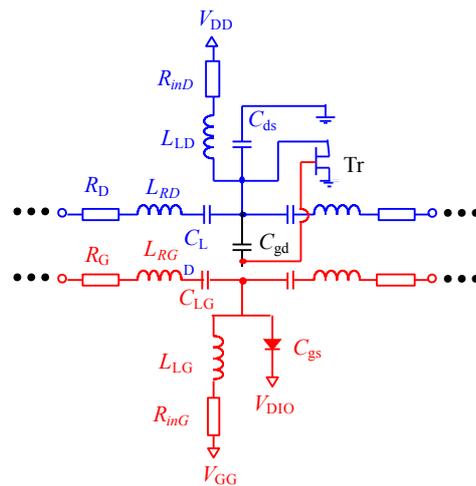


図4: CRLH構造を備えた進行波型トランジスタ(赤:ゲート線路, 青:ドレイン線路)もとよりCRLH構造はLC対の組み合わせであり, かつその共振周波数近傍での動作を前提としている。FETをはじめとする能動素子の導入は容易に発振を誘発する。これを排除するための設計指針が求められる。検討する

線路は発振器が空間的に拡張された系を形成している。したがって発振の臨界条件下では、複素 Ginzburg-Landau 方程式に縮約することによって、発振の属性を明らかにするなどしてこれを回避する設計が可能となる。しかるに散逸系の非線形パルスは振幅、パルス幅、速度に関する自由度を持たない場合が主であり、共鳴相互作用についていえば否定的な結果が予想される。一方で、損失成分が軽微でありかつ FET の作用についても線形化が可能であるような場合には、保存系孤立波に対する寄与を摂動的に扱うことも許されるだろう。実際、縮約方程式は図 4 の V_{DIO} 値が増加するとき超臨界から亜臨界ホップ分岐に転ずることがわかった。亜臨界時には様々なコヒーレント構造が期待される。一例として図 5 に停留ソリトンを示した。

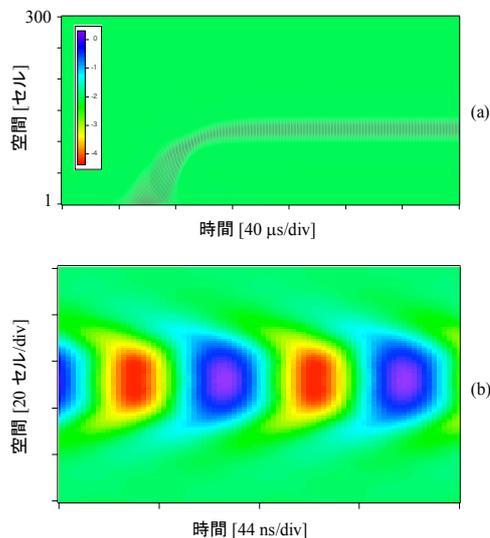


図 5 : TWFET 上の停留ソリトン

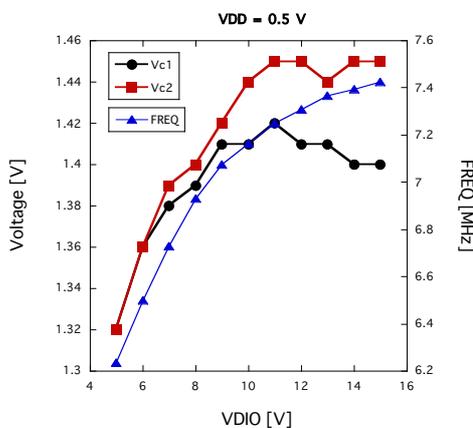


図 6 : TWFET の分岐構造の実測

最後に試作 TWFET の評価結果を総括する。亜臨界分岐時のピーク及びバレー電圧をそれぞれ V_{c1} , V_{c2} とする。それらの V_{DIO} 依存性

図 6 に示した。超臨界から亜臨界への転化が生じており整合的である。また、時間領域計測によって停留パルスを確認した。素子特性のばらつきがありアンダーソン局在による作用も手伝っているものと考えられる。成因に加えてその配置制御手法を新たに開発した。

5. 主な発表論文等 [雑誌論文] (計 11 件)

- (1) K. Narahara, "Experimental characterization of mutually synchronized voltage edges in point-coupled tunnel diode transmission lines," IEICE Electron. Express 14, No. 6, pp. 1-8, 2017, DOI: 10.1587/elex.14.20170054. (査読有)
- (2) K. Narahara, "Multiphase oscillator using traveling pulses developed in a system of transmission lines with regularly spaced resonant-tunneling diodes," J. Infrared Mill. Terahertz Waves, 2017, DOI: 10.1007/s10762-017-0371-4. (査読有)
- (3) K. Narahara, "Multiphase oscillator using dissipatively coupled transmission lines with regularly spaced tunnel diodes," Int. J. Circ. Theor. Appl., 2016, DOI: 10.1002/cta.2284. (査読有)
- (4) K. Narahara, "Numerical characterization of nonlinear oscillatory waves in a composite right- and left-handed traveling-wave field-effect transistor," Int. J. Circ. Theor. Appl., 2016, DOI: 10.1002/cta.2245. (査読有)
- (5) K. Narahara, "Mutual synchronization of oscillating pulse edges in point-coupled transmission lines with regularly spaced tunnel diodes," Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 42, pp. 236-246, 2016, DOI:10.1016/j.cnsns.2016.04.029. (査読有)
- (6) A. Satou and K. Narahara, "Numerical Characterization of Dyakonov-Shur Instability in Gated Two-Dimensional Electron Systems," Int. J. High Speed Electron. Syst. 25, pp. 1640024 1-10, 2016, DOI:10.1142/S0129156416400243. (査読有)
- (7) K. Narahara, "Asymmetrical solitary waves in coupled nonlinear transmission lines," Wave Motion 58, pp. 13-21, 2015, DOI:10.1016/j.wavemoti.2015.06.004. (査読有)
- (8) K. Narahara, "Characterization of leap-frogging solitary waves in coupled nonlinear

transmission lines," Nonl. Dyn. 81, pp. 1805-1814, 2015, DOI 10.1007/s11071-015-2108-z. (査読有)

(9) K. Narahara, "Harmonic resonance in a composite right- and left-handed transmission line periodically loaded with Schottky varactors," Int. J. Circ. Theor. Appl. 44, pp. 492-503, 2015, DOI: 10.1002/cta.2089. (査読有)

(10) K. Narahara, "Efficiency of three-wave mixing in nonlinear composite right- and left-handed transmission lines," IEICE Electron. Express 11, No. 16, pp. 1-8, 2014, DOI: 10.1587/elex.11.20140547. (査読有)

(11) K. Narahara, "Soliton decay in composite right- and left-handed transmission lines periodically loaded with Schottky varactors," IEICE Electron. Express 11, No. 23, pp. 1-10, 2014, DOI: 10.1587/elex.11.20140881. (査読有)

〔学会発表〕 (計 1 件)

(1) 檜原浩一, "非線形メタマテリアル線路における共鳴相互作用," 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 2016年7月24日, 首都大学東京.

〔図書〕 (計 2 件)

(1) K. Narahara, to appear as a chapter in *Resonances* published by InTech, 2017.

(2) K. Narahara, Nova Science Publishers, *Advances in Solitons Research*, pp. 61-90, 2015, ISBN: 978-1-63483-640-1.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ele.kanagawa-it.ac.jp/~narahara/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

檜原 浩一 (NARAHARA KOICHI)

神奈川工科大学・工学部電気電子情報工学科・教授

研究者番号 : 00422171