

## 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 4 月 12 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656080

研究課題名（和文） 量子効果／弾性波複合機能集積体における空間周波数ロッキングとその応用

研究課題名（英文） Spatial frequency locking in integrated quantum effect and elastic wave devices and its applications

研究代表者

前澤宏一（MAEZAWA KOICHI）

富山大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号：90301217

研究成果の概要（和文）：格子歪は伝導帯変形ポテンシャルを介して伝道帯端のエネルギーを変調する。この効果は通常非常に小さく、電子デバイスに与える影響は小さい。本提案では、相互作用を大きくするため、共鳴トンネル素子(RTD)を分布定数化した伝送線路を構成し、それに表面音響波を作用させること考えた。この目的実現のためのプロセス技術、回路構成などについて検討を進め、新しいデバイス実現のための見通しを得た。

研究成果の概要（英文）：Elastic strain can affect the device properties through the band edge shifts caused by the deformation potential. Ordinarily this effect is very small on electron devices. In this study, we propose to use an active transmission line periodically loaded with resonant tunneling diode pairs to strengthen these effects. In this configuration, surface acoustic waves can affect the transmission line through the line, which enhances the effects. We have investigated fabrication process and effective circuit configuration for this aim, and have clarified the promising potential.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	0	800,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	660,000	3,660,000

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：共鳴トンネル、弾性波、伝送線路、異種材料集積、InP

## 1. 研究開始当初の背景

格子歪は伝導帯変形ポテンシャルを介して伝道帯端のエネルギーを変調する。しかし、現在まで、半導体電子素子に対する格子歪や音響波の効果に関する研究は少ない。これはその効果が非常に弱いことに原因があった。例えば、これまでに歪による FET のしきい値変化や、共鳴トンネル素子(RTD)のピーク電流が歪により変化することなどが報告さ

れているが、これらの報告は大きな静的な圧力を結晶に加えたときの変化であり、ここで目的とするような動的特性制御に使用することは困難であった。ここでは、この効果を強化するため、格子歪に敏感な RTD を分布定数化した伝送線路を用いるとともに、これを電気機械結合定数の大きな水晶基板上に集積することを試みる。分布定数化した素子を用いることは、単に作用距離を伸ばすだけ

でなく、空間周波数ロッキング現象や、時間領域の情報位置情報へ変換することなど、様々な応用の可能性がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、量子効果素子に対する格子歪の効果、特に表面音響波(SAW)の効果の検証と、これを用いた新しい機能集積体の提案である。音響波は格子の歪が伝播する波であり、これによるバンド構造の変化や、ピエゾ効果を介して発生する電界が素子特性に影響を与える。

音響波と素子の相互作用が利用できれば、電氣的、光學的制御に次ぐ第三の素子特性制御方法となり、様々な可能性が開ける。ここでは特に、音響波と電磁波の4桁の速度の違いを利用し、周波数の大きく異なる波動間の空間周波数領域でのロッキングや、時間領域情報の位置領域への変換など、従来にない新しい可能性を追求する。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、その要素技術となる以下の3点について検討を進めた。

### (1) RTD への格子歪の影響の評価

まず、本研究で最も重要な共鳴トンネル素子への格子歪の影響を調べる。そのために、RTDを装荷した弾性振動子を試作することとした。そのためのプロセス技術の検討を行った。

### (2) RTD 装荷分布定数線路の検討

本研究ではRTDを分布定数化した伝送線路を構成し、それに表面音響波を作用させることでその効果を増大させることを試みる。これは、単に作用距離を伸ばすだけでなく新しい効果も期待できる。例えば、音響波と、RTD分布定数線路間の空間周波数のロッキングなどである。このために、まず、RTDを分散配置した伝送線路の性質について検討した。

### (3) 異種材料集積化技術の検討

将来的に電気機械結合定数の大きな石英などの基板を使うための、異種材料集積化技術の検討を行った。手法としては、液体中においた基板上に微小デバイスブロックを配置するFluidic Self Assembly法を採用する。

## 4. 研究成果

以下、研究方法に記載の項目にしたがって、これまでに得られた研究成果について述べ

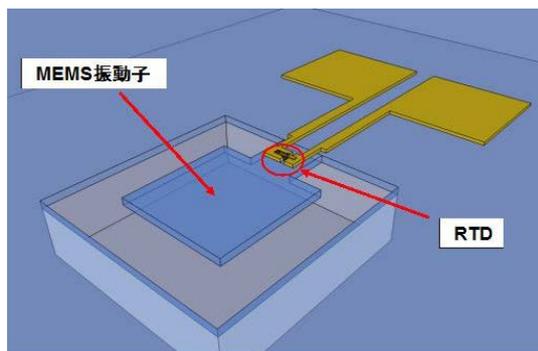


図1 RTDを装荷した振動子

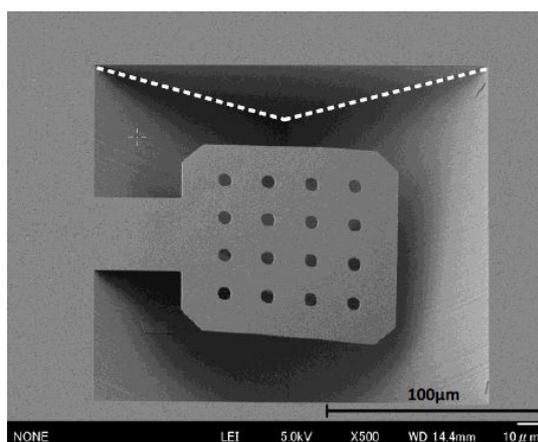


図2 作製したMEMS振動子

る。

### (1) RTD への格子歪の影響の評価

標記評価を行うため、RTDを装荷した弾性振動子の作製を検討した。図1に振動子の構造を示す。

InGaAs/InAlAs層よりなる振動子はInP基板を選択的にエッチングすることによる中空に形成される。この支えの部分にRTDを形成し、振動子の変位によるRTD特性の変化を測定するのが目的である。これまで、選択エッチング技術を中心にプロセス検討を行い、図2に示すような構造が作製できるようになった。今後、RTDを装荷した構造を作製し、RTD特性への格子歪の影響を詳細に測定する予定である。

### (2) RTD 装荷分布定数線路の検討

RTDを装荷した伝送線路の性質についてシミュレーションにより検討するとともに、試作を行った。

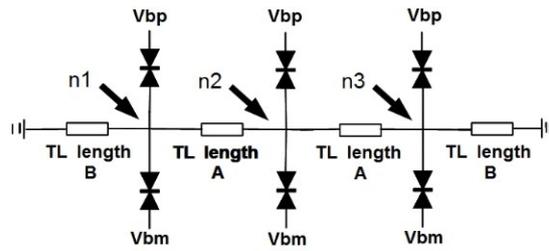


図3 RTD 装荷伝送線路を用いた発振器

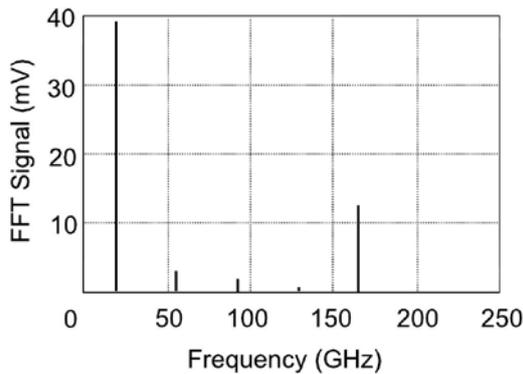


図4 RTD 装荷伝送線路発振器の出力スペクトルのシミュレーション結果

まず、RTD 伝送線路の両端を終端した形の発振器(図3)を提案し、その特性を検討した。この伝送線路は、RTD を負性抵抗領域にバイアスすることで、負の損失を持つ伝送線路、つまり、信号増幅の効果を持つ伝送線路とみなすことができる。この両端を接地(ただし、実際は、信号を出力できるように一方の端は小さな抵抗を介して接地)すると、両端で反射されながら、信号が増幅され、発振器として働く。この時、基本発振は、発振波長の1/2が線路長と等しい。この発振器の発振スペクトルを調べたところ、非常に興味深い結果が得られた(図4)。図から分かるように、基本波発振に加え、非常に高い次数(9次)の高調波が観測される。この原因を調べたところ、以下の機構が明らかになった。RTD を装荷した伝送線路は、負性抵抗を別にして、インダクタ、容量からなる一種のローパスフィルタ特性を示す。しかし、本構造の場合、RTD 装荷線路の離散性と周期的構造により、高周波の共鳴バンドが形成される。この共鳴バンドに一致する高次高調波は強く伝搬し、一方、これ以外の高調波は減衰する。この高調波バンドは、RTD の大きさや、線路のインダクタ、容量などにより、基本波の発振周波数とは別に設計可能であり、自由度が高い。この高次高調波を使えば、非常に高い周波数と安定性が容易に得られる可能性がある。このことは、本研究で目的とする弾性波との結合においても重要な知見であり、その可能性を広げる

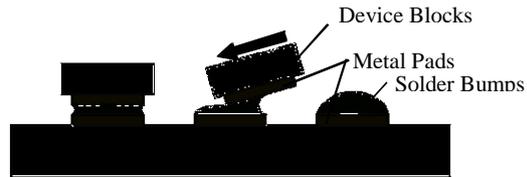


図5 溶融金属バンプを用いた Fluidic Self Assembly 法の概念図

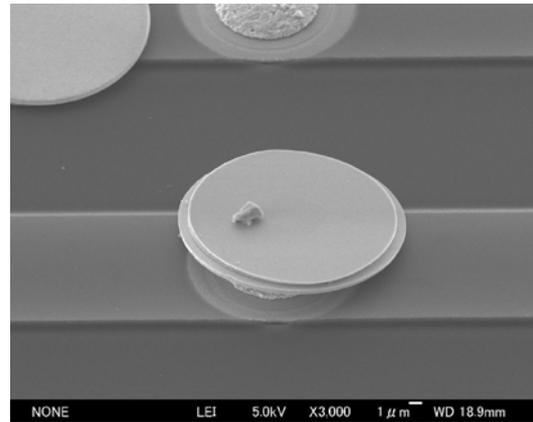


図6 配置された RTD ブロックの例

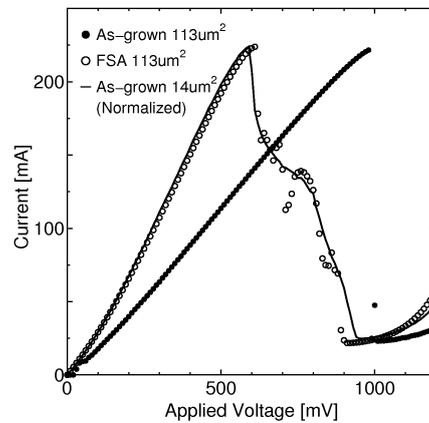


図7 FSAにより配置された RTD と InP 基板上の RTD の電流-電圧特性

ものである。

### (3) 異種材料集積化技術の検討

溶融金属バンプを用いた Fluidic Self Assemblyによる微小RTDブロックの自己整合配置技術について検討を行った。

図5に本方法の概念図を示す。低融点金属によるバンプを設けた基板を、加熱した溶液中に置き、そこに微小デバイスブロックを散布する。この時、低融点金属バンプと濡れ性の良い、金属パッドを持つブロック面は、溶融したバンプに表面張力による吸着される。

この方法は、電気的な接続と、機械的な接続が同時に形成できるため、歩留まり向上に適した方法である。ここでは、ミクロンオーダーの低融点金属バンプの作製方法、RTDブロックの作製方法、FSAにおける様々な条件の検討を行い、かなりの歩留まりでブロックを配置することが可能になった。図6は直径18 $\mu$ のRTDブロックを配置した例である。また、本技術により配置したRTDブロックは、RTD層が低抵抗な金属に挟まれる構造となるため、非常にシリーズ抵抗が小さく、高性能であることを明らかにした。図7にInP基板上のas grownのRTDと本技術により配置したRTDの電流-電圧特性の測定結果を示す。ピーク電圧が小さく、寄生抵抗の小さなRTDが実現できていることが分かる。

#### 5. 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)

- ① J. Pan, K. Hayano, M. Mori, K. Maezawa, "Possibility of High Order Harmonic Oscillators Based on Active Transmission Lines Loaded with Resonant Tunneling Diode Pairs," IEICE Trans. Electron., 査読有, Vol. E95-C, No. 8 (2012) pp. 1385-1388.
- ② K. Maezawa, J. Pan, D. Wu, M. Mori, "A Proposal of High-Performance Samplers Based on Resonant Tunneling Diodes," IEICE Trans. Electron., 査読有, Vol. E95-C, No. 11 (2012) pp. 1830-1833.

[学会発表] (計16件)

- ① 中野純、大勝崇外、森雅之、前澤宏一, Fluidic Self-Assembly (FSA)のための微小はんだバンプの作製, 2010年電子情報通信学会ソサイエティ大会
- ② 中野純、大勝崇外、柴田知明、森雅之、前澤宏一, Fluidic Self-Assembly (FSA)のための微小はんだバンプの作製(II), 2011年電子情報通信学会総合大会
- ③ 早野一起、森雅之、前澤宏一, 共用共振器を省略した共鳴トンネル3次高調波発信器, 2011年電子情報通信学会総合大会
- ④ 潘 杰、森雅之、前澤宏一, High Frequency Oscillators based on Active Transmission Lines Loaded with Resonant Tunneling Diode Pairs, 2011年電子情報通信学会総合大会
- ⑤ 前澤宏一、笠原康司、潘杰、森雅之, 共鳴トンネルダイオードペアを装荷した右手/左手系複合伝送線路における信

- 号増幅, 子情報通信学会電子デバイス研究会(ED)報告 ED2010-201, p53-56
- ⑥ K. Maezawa, K. Kasahara, M. Mori, "A Traveling Wave Amplifier Based on Composite Right/Left Handed (CRLH) Transmission Lines Periodically Loaded with Resonant Tunneling Diode Pairs," 2nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2010).
- ⑦ K. Maezawa, S. Shibata, K. Takaoka and M. Mori, "High Speed Circuits Based on Resonant Tunneling Diodes and Their Application to Analog Digital Converters," 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10).
- ⑧ 柴田知明、中野純、大勝崇外、森雅之、前澤宏一, Fluidic Self-Assembly (FSA)のための微小はんだバンプの作製, 2011年電気学会電子・情報・システム部門大会.
- ⑨ 早野一起、森雅之、前澤宏一, RTDpair発振器の発振周波数に対する測定系の影響, 2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会.
- ⑩ Jie Pan, M. Mori, K. Maezawa, "Possibility of High Order Harmonic Oscillators Based on Active Transmission Lines Loaded with Resonant Tunneling Diode Pairs," 9th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2011).
- ⑪ J. Nakano, T. Shibata, T. Okatsu, M. Mori, K. Maezawa, "Fluidic Self-Assembly for Heterogeneous Integration of High Performance Resonant Tunneling Diodes Using Low-Melting Point Alloy Bumps," 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011).
- ⑫ 呉東坡、潘杰、森雅之、前澤宏一, 共鳴トンネルダイオードを用いた高性能サンプリング回路の提案, 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会.
- ⑬ 森田弘樹、中野純、柴田知明、坂本宙、森雅之、前澤宏一, 超音波ディップコート法を用いた微小はんだバンプの作製, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会2012.
- ⑭ 潘 傑、早野一樹、森雅之、前澤宏一, 共鳴トンネル素子を用いた装荷したアクティブ伝送線路を用いた高次高調波発振器の可能性, 電子情報通信学会、電子デバイス研究会(ED)報告 ED2011-147, p31-34 (2012).
- ⑮ 前澤宏一、潘杰、呉東坡、中野純、森雅

之，共鳴トンネル素子を活かす集積化技術とTHz信号処理への挑戦，電気学会「シリコンナノデバイス集積化技術」調査専門委員会、「クラウド時代のユビキタス電子デバイス」調査専門委員会 合同委員会.

- ⑩ 前澤宏一、潘杰、吳東坡、森雅之，共鳴トンネルデバイスを用いたテラヘルツ帯信号処理の可能性，2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

前澤 宏一 (MAEZAWA KOICHI)

富山大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号：90301217