

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 24年 5月 15日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009年度～2011年度

課題番号：21560358

研究課題名（和文）共鳴トンネル素子によるミリ波帯モノリシックアイソレータの開発

研究課題名（英文）A implementation of millimeter-wave monolithic isolators by using resonant tunneling devices

研究代表者 須原理彦 (Michihiko Suhara)

首都大学東京 理工学研究科 電気電子工学専攻

研究者番号：80251635

研究成果の概要（和文）：本研究では、共鳴トンネルダイオードを用いたモノリシック集積型アイソレータのミリ波帯・サブミリ波帯デバイスとしての実現可能性の検討を行った。得られた成果は、共鳴トンネルダイオード2素子および高移動度トランジスタ1素子からなるジャイレータ構成により信号伝送の一方方向性が得られる設計条件および帯域上限を明らかにし、極微細メサ形状の複数形成と電極層の集積形成のためのマスクレス露光のプロセスを確立したことである。

研究成果の概要（英文）：This work presents feasibility studies for an implementation of millimeter-wave monolithic isolators by using resonant tunneling devices. We have clarified a criterion and an upper frequency limit to realize the unilateral signal transmission by using a gyrator, which consists of two resonant tunneling diodes and one high mobility transistor. Moreover, process conditions of mask-less optical lithography have been found to obtain multi-mesa and a contact layer for an electrode to be integrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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・機器

キーワード：共鳴トンネルダイオード、ジャイレータ、アイソレータ、ミリ波・サブミリ波

1. 研究開始当初の背景

無線通信用機器に用いられる集積回路において増幅・発振を行う能動素子は、反射波による信号の逆流に本質的に過敏である。例えば出力より2桁小さい微弱な反射波によっても、増幅器での信号歪みや雑音増加が生じる。マイクロ波帯では、非可逆回路素子である「アイソレータ」既に産業化されており、集積回

路外部に独立単体デバイスとして挿入／設置することにより、反射信号を抑制し、信号伝搬の一方方向性を確保している。次世代のミリ波帯(30-300GHz)の集積回路において、この「アイソレータ」を半導体基板上にモノリシックに形成できれば、無線システムの更なる軽薄短小化に貢献できる。ところが、この「モノリシック集積型アイソレータ」の開発が未

だなされていない。

既存のアイソレータの原理は、金属導波管内部に設置したフェライトなどの磁性材料中で電磁波の偏波回転方向により透磁率が異なる現象と、抵抗膜による電磁界吸収現象とを組み合わせて、出力側からの反射電磁界を抑制することにある。磁性材料が必須であるから、異種材料である半導体との集積一体化が困難であること、導波管が必要であるから、製品サイズが数 cm 以上と大型になることが「モノリシック集積型アイソレータ」の開発を遅らせている。

2. 研究の目的

本研究では、ミリ波集積回路に必要な不可欠な非可逆（非相反）デバイスであるアイソレータを、共鳴トンネル素子を用いてモノリシック半導体素子として構成可能であること理論的に示し、従来は原理上必須であったが故に集積化を困難にしていた磁性材料や導波管構造が不要な新原理アイソレータとしての実現可能性を検討する。

3. 研究の方法

共鳴トンネルダイオード (RTD) を含むジャイレータの室温動作実現のための材料系の選択肢としては、これまでミリ波増幅器用のトランジスタ HEMT などで、多くの研究・実用化がなされてきている材料系である GaAs 基板上の GaAs/AlGaAs 系と InP 基板上の InGaAs/InAlAs 系ヘテロ構造の 2 種類が候補として考えられる。我々のグループでは、結晶成長装置を現有していない。したがって、以下に述べる観点から材料系選択をした上で最適設計を行い、申請の予算を用いてエピウエハの結晶成長を外注する。ヘテロ層構造（ヘテロ接合層厚、スペーサ層厚、ドーピング濃度）の最適設計には、シュレーディンガー方程式とポワソンの方程式をセルフ・コンシステントな解析手法を用いる。

4. 研究成果

本年度の成果の骨子二つは、(A) 共鳴トンネルダイオード (RTD) と高電子移動度トランジスタ (HEMT) を用いたモノリシック集積型アイソレータ実現可能性の理論的検証を継続検討する事、(B) 実際の集積型アイソレータのデバイス構造を考案し従来の RTD プロセスよりも簡便なマスクレス露光によって微細なメサを形成可能なプロセスを確立する事である。

(A) についてはモノリシック集積ジャイレータの構成¹を基本構成とし、RTD を二つと HEMT を一つ、伝送線路による抵抗を一つ用いて非可逆伝送特性となるように構成している。信号の反射特性を表す S_{12} と通過特性を

表す S_{21} を小信号等価回路解析により計算し、それら非対角要素の非対称性を評価した。本研究で導入したアイソレータ実現条件は $g_m = 1/RL \cdots (1)$ 式、 $1/RL - 1/R_{rtd} = Y_0 \cdots (2)$ 式の二つである。ここで、 g_m は HEMT の相互コンダクタンス、 RL は伝送線路の設計抵抗、 R_{rtd} は RTD の微分負性抵抗値、特性アドミタンスである。(1)(2) 式は寄生成分を除いた理想的な場合における S パラメータを計算することで導かれた基本設計指針を示す条件式であるが、実際のデバイスには寄生抵抗成分が含まれているため、(1)(2) 式が適切な設計指針となり得るかを検証した。実際の素子作製時に含まれるレベルの寄生パラメータ群を適切な等価回路素子として考慮した場合と理想的な場合とを比較した結果、(1)(2) 式が適切なアイソレータ動作設計指針と見なすことが可能であることを明らかにした。

共鳴トンネルダイオードは微分負性抵抗を生じる 2 端子素子であり、その動的モード制御が重要である。今回のアイソレータ応用の場合やアンテナを集積したレクテナとしての応用例では、直流動作点で安定化していることが必須である一方で、発振素子としての応用では自励発振の制御が必須であるが、それら動作モードは RTD の寄生素子成分だけでなく、集積する周辺素子設計の影響を大きく受ける。そこでアイソレータ応用のための RTD 安定化条件の検討をも包含した、より広範囲の応用への適用も鑑みた理論体系の構築を目指して、普遍的な動特性解析手法の確立も行った。

一方、(B) については、高速原子ビーム (FAB) 照射によるドライエッチングプロセスとセルフアラインプロセスとしてマスクレス露光による RTD 作製プロセスを確立した。Ar の FAB を用いたドライエッチング条件（放電電圧、放電電流、中性化率、基板温度）を最適化することにより、高密度な微細メサ形成条件を明らかにした。マスクレス露光については以下の条件が重要であることを本研究の RTD プロセスにおいて明らかにした。一つめは、メサ上だけ実質的に絶縁膜を薄くするために、現像したい部分のみメサ埋め込み用絶縁膜の膜厚の半分以上の高さにすること、二つめは、現像したい部分の上面に形成する Al や Pt 等の電極用金属を露光時のメサ上部反射鏡としても兼用できるような露光最適化条件である

当初目標より遅れた点は、モノリシックアイソレータの設計基板を用いた RTD プロセス確立には至ったもののアイソレーション動作確認の実証に至らなかったことである。その理由は、実際のアイソレータ用のエピ基板を用いて作製した共鳴トンネルダイオードにおいてアイソレータ作製に十分な微分負性抵抗特性が観測できなかった点にある。こ

これはエピ基板構造における設計値からの偶発誤差や系統誤差が要因となっている可能性がある。本研究で生じた問題点は、本研究で設計・発注したエピ基板構造を用いて作製した共鳴トンネルダイオードにおいて、アイソレータ作製に十分な微分負性抵抗特性が観測できなかった点にある。この原因は、エピ基板構造における設計値からの偶発誤差や系統誤差が要因となっている可能性がある。今後の研究遂行の課題としては、エピ基板の断面観察と測定結果を総合的に解析することにより偶発誤差、系統誤差を定量的に評価し、それを適切に設計、エピ成長プロセスにフィードバックすることが考えられる。その上で、モノリシック集積化プロセスと動作確認を行うこととなる。

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 8 件)

- (1) H.Tomioka, M.Suhara, and T.Okumura, "Broadband equivalent circuit modeling of self-complementary bow-tie antennas monolithically integrated with semiconductor for terahertz applications" IEICE, Trans. Electron. vol.E92-C, no.2, pp.269-274,2009 (査読有り)
- (2) H.Shin-ya, M.Suhara, N.Asaoka, M.Naoi, "Implementation of physics-based model for current-voltage characteristics in resonant tunneling diodes by using the Voigt Function", IEICE Trans. Electron., E93-C, 8, pp.1295-1301, 2010 (査読有り)
- (3) K.Asakawa, M.Suhara, "Equivalent circuit modeling of triple-barrier resonant tunneling diodes taking nonlinear quantum inductance and capacitance into account", Physica Status Solidi C,7,10,p.2555, 2010 (査読有り)
- (4) S.Ito and M.Suhara, "Demultiplexing property owing to a composite right/left-handed transmission line with leaky wave radiation toward functional wireless interconnect", IEICE Trans. Electron., E93-C, 5, pp.619-624, 2010 (査読有り)
- (5) S.Takahagi, H.Shin-ya, K.Asakawa, M.Saito, M.Suhara, "Equivalent circuit model of triple-barrier resonant tunneling diodes monolithically integrated with bow-tie antennas and analysis of rectification properties towards ultra wideband terahertz detection", Jpn.J.Appl.Phys. 50, pp.01BG01-1-5 ,2011 (査読有り)
- (6) N.Tanaka, M.Saito, M.Suhara, "Analysis of low loss and wideband characteristics for lumped element isolators implemented by using tunnel diodes", IEICE Trans. Electron., E94-C, 5, pp.820-825, 2011 (査読有り)
- (7) K.Asakawa, Y.Kurakami, M.Saito, M.Suhara, " A novel method to clarify nonlinear equivalent circuits of tunnel diodes by extracting rate constants for nonequilibrium electrons", Physica Status Solidi C,9,2, p.278, 2012
- (8) M.Nakamura, S.Takahagi, M.Saito, M.Suhara, "Analysis of a monolithic integrated rectenna by using an InGaAs/InAlAs triple-barrier resonant tunneling diode for zero bias detection of submillimeter-wave", Physica Status Solidi C,9,2, p.377, 2012

[学会発表] (計 28 件)

- (1) H.Shin-ya, M.Suhara, N.Asaoka and M.Naoi, "A closed-form modeling of current-voltage characteristics in triple-barrier resonant tunneling diodes on the basis of energy level broadening expressed with a Voigt function", TWHM2009(8th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics), FrB-4, pp.102-103, 2009 (査読有り)
- (2) K.Asakawa M.Naoi, Y.Iki, M.Shinada and M.Suhara, "Estimation of nonlinear quantum inductance and capacitance in AlInAs/InGaAs triple-barrier resonant tunneling diodes", ISCS2009(The 36th International Symposium on Compound Semiconductors), P1.16, pp.125-126, 2009 (査読有り)
- (3) M.Suhara and H.Tomioka, "Analysis and modeling of wideband characteristics of monolithic integrated self-complementary antennas", 1P-07, TeraTech'09 (2nd International Workshop on Terahertz Technology 2009 (査読有り)
- (4) 新屋秀秋, 須原理彦, "Voigt 関数を用いた三重障壁共鳴トンネルダイオードの I-V 特性のモデリングと共鳴準位幅広がり の評価", P2-26, 光通信研究会予稿集, Extended Abstract The 32th International Symposium on Optical Communications 2009, P2-26, p.85, 2009 (査読無し)
- (5) S.Takahagi, H.Shin-ya, K.Asakawa, M.Saito, M.Suhara, "Analysis of frequency conversion characteristics in terahertz region by using resonant tunneling diodes integrated with ultrawideband antennas" 2010 International Symposium on Organic and Inorganic, Electronic Materials and

- Related Nanotechnologies (EM-Nano 2010), pp. 2010 (査読有り)
- (6) N. Tanaka, M. Saito, M.Suhara, "Analysis of low loss and wideband characteristics for monolithic isolators using resonant tunneling diodes", Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2010), Tokyo, Japan June, 2010 (査読無し)
- (7) 板垣陽介, 浅川澄人, 斉藤光史, 須原理彦, "微分負性抵抗領域にバイアスされた共鳴トンネルダイオードの緩和振動抑制条件の理論解析", 電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス 110(80), 53-58, 2010 (査読無し)
- (8) 新屋秀秋, 斉藤光史, 須原理彦, "共鳴トンネルダイオードにおける非線形等価回路モデルを用いた動特性解析", 光通信研究会予稿集, Extended Abstract The 34th International Symposium on Optical Communications 2010 (査読無し)
- (9) 田中宣彦, 斉藤光史, 須原理彦, "共鳴トンネルダイオードを用いた低損失広帯域モノリシックアイソレータの動作解析", Extended Abstract The 34th International Symposium on Optical Communications 2010 (査読無し)
- (10) 板垣陽介, 斉藤光史, 須原理彦, "共鳴トンネルダイオードにおけるバイアス安定化/自励振動発生臨界条件の理論解析", Extended Abstract The 34th International Symposium on Optical Communications 2010 (査読無し)
- (11) 浅川澄人, 斉藤光史, 須原理彦, "Particle Swarm Optimization による共鳴トンネルダイオードの等価回路パラメータ", Extended Abstract The 34th International Symposium on Optical Communications 2010 (査読無し)
- (12) 高萩智, 斉藤光史, 須原理彦, "広帯域アンテナ集積一体型三重障壁共鳴トンネルダイオードを用いたゼロバイアス検波に関する研究", Extended Abstract The 34th International Symposium on Optical Communications 2010 (査読無し)
- (13) 須原理彦, 浅川澄人, 板垣陽介, 斉藤光史, 新屋秀秋, 高萩智, "三重障壁共鳴トンネルダイオードの特性解析とモデリング", 電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス 110(203), 25-30, 2010 (査読無し)
- (14) 板垣陽介, 斉藤光史, 須原理彦, "共鳴トンネルダイオードにおける自励振動抑制条件の理論解析", 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 (CD-ROM) 2010 年エレクトロニクス(2), 47, 2010 (査読無し)
- (15) 高萩智, 斉藤光史, 須原理彦, "三重障壁共鳴トンネルダイオードを用いたミリ波・サブミリ波帯におけるゼロバイアス検波の理論解析" 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2010 (査読無し)
- (16) 浅川澄人, 斉藤光史, 須原理彦, "共鳴トンネルダイオードにおける自己バイアス効果を考慮した動特性解析", 電子情報通信学会総合大会 2010 (査読無し)
- (17) M.Nakamura, S.Takahagi, M.Saito, M.Suhara, "Analysis of a monolithic integrated rectenna by using an InGaAs/InAlAs triple-barrier resonant tunneling diode for zero bias detection of submillimeter-wave", 38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2011), We-2 B.02, pp.14-15, 2011 (査読有り)
- (18) K.Asakawa, Y.Kurakami, M.Saito, M.Suhara, "Evaluation of rate constants characterizing nonlinear quantum inductance and capacitance in InGaAs/InAlAs resonant tunneling diodes", 38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2011), We-2 B.03, pp.16-17, 2011 (査読有り)
- (19) K.Asakawa, H.Shin-ya, M.Saito, M.Suhara, "Nonlinear analysis for dynamic performance of resonant tunneling diodes", 9th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronincs (TWHM 2011) 7-3, pp.85-86, 2011 (査読有り)
- (20) 中村昌人, 高萩智, 斉藤光史, 須原理彦, "ボウタイアンテナと三重障壁共鳴トンネルダイオードとを集積したゼロバイアス検波レクテナに関する解析", 電子情報通信学会技術研究報告 IEICE, 111, 167, ED2011-51, pp.67-72, 2011 (査読無し)
- (21) 浅川澄人, 倉上祐司, 斉藤光史, 須原理彦, "粒子群最適化手法を用いた三重障壁共鳴トンネルダイオードの非線形等価回路の同定" 電子情報通信学会技術研究報告 IEICE, 111, 167, ED2011-52, pp.73-77, 2011 (査読無し)
- (22) 高萩智, 斉藤光史, 須原理彦, "三重障壁共鳴トンネルダイオードによるゼロバイアス検波の非線形解析", The 34th International Symposium on Optical Communications 2011, P2-8, p.57, 2011 (査読無し)
- (23) 板垣陽介, 斉藤光史, 須原理彦, "アンテナ集積一体型共鳴トンネルダイオードの動特性解析", The 34th International Symposium on Optical Communications 2011, P3-25, p.108, 2011 (査読無し)

