

令和元年6月13日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14252

研究課題名(和文) マイクロ波/ミリ波エレクトロニクスのための非晶質酸化半導体共鳴トンネル素子

研究課題名(英文) Resonant tunneling diodes based on non-crystalline oxide semiconductors for micro/millimeter wave electronics

研究代表者

前澤 宏一 (Koichi, Maezawa)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：90301217

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：塗布型酸化半導体を用いた共鳴トンネルダイオードの実現に向けて検討を行った。半導体材料としては、比較的バンドギャップ、有効質量が小さいIn₂O₃を対象とした。また、バリア材料としては、In₂O₃と性質の近いGa₂O₃、及び、より薄く、均一な構造を作成可能と考えられるHMDS(ヘキサメチルジシラザン)自己整合単分子膜を対象とした。これらを用いてn_{in}ダイオードを作製し、電流ブロック特性を確認し、RTDのバリア層として使用可能なことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、移動度の小さい非晶質酸化半導体を用いて高性能な共鳴トンネル素子(RTD)を作製し、マイクロ波/ミリ波エレクトロニクスの基礎を築くことにある。非晶質酸化半導体は、散乱頻度が高いため、移動度が小さく、高周波トランジスタを作るのは難しい。しかし、有効質量は比較的小さく、量子効果の発現は可能である。特にRTDは、散乱頻度が高くても、逐次トンネルの効果により十分に高性能な素子が作製可能と考えられる。これを用いて無線通信が可能な高周波回路が形成できれば、IoTへの応用など、その効果は大きい。

研究成果の概要(英文)：We investigated the possibility of the resonant tunneling diodes (RTDs) based on solution-processed oxide semiconductors. We first discussed the possibility of high frequency operation of such RTDs, and showed that the RTDs operating with sequential tunneling mechanism might operate at high frequencies in spite of the high scattering rate and low mobility. We fabricated the In₂O₃/Ga₂O₃/In₂O₃ and In₂O₃/HMDS/In₂O₃ n_{in} diodes using spin-coat method to investigate the materials appropriate for the barrier layers of the RTDs. The current-voltage characteristics showed current-blocking at low voltages, which imply that both Ga₂O₃ and HMDS layers can work as a tunneling barrier.

研究分野：半導体電子工学

キーワード：共鳴トンネル素子 酸化半導体 有効質量 逐次トンネル マイクロ波集積回路 溶液プロセス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、酸化物半導体が興味を集めている。酸化物半導体は液相プロセスによる作製も可能であり、フレキシブル基板など、これまでにない様々なアイテム上へ安価に電子回路を構築することができる。もし、これを用いて無線通信が可能な高周波回路が形成できれば、IoT への応用など、その効果は大きい。しかし、非晶質酸化物半導体は移動度が小さく、通常のデバイスで十分な高周波特性を得ることは困難である。これに対し、共鳴トンネルダイオード(RTD)は、酸化物半導体でも十分な高周波特性が得られる可能性がある。また、RTD は高性能な歪みセンサなどへの応用も可能であり、液相プロセスで作製できればその効果は大きい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、移動度の小さい非晶質酸化物半導体を用いて高性能な共鳴トンネル素子(RTD) を作製し、マイクロ波/ミリ波エレクトロニクス基礎を作ることにある。非晶質酸化物半導体は、散乱頻度が高いため、移動度が小さく、高周波トランジスタを作るのは難しい。しかし、有効質量は比較的小さく、量子効果の発現は可能である。特に RTD は、散乱頻度が高くても、逐次トンネルの効果により十分に高性能な素子が作製可能と考えられる。その動作速度は、移動度ではなく、有効質量、及び、それに依存する電流密度で決まるため、高周波動作も可能である。本研究では、非晶質酸化物半導体による RTD を実現し、その高周波回路への適用性を実証する。

3. 研究の方法

(1) 非晶質酸化物半導体による逐次トンネル型 RTD

本研究は、上記の目的を達するため、逐次トンネル現象を利用した RTD を試作する。ここでは、まず、これまでのコヒーレントな共鳴トンネル現象と比較して、逐次トンネル現象による共鳴トンネル効果について簡単に説明する。

RTD の最も重要な特徴は量子井戸構造による負性抵抗特性である。負性抵抗のメカニズムは、通常はファブリーペロー共振器と同様な多重反射による電子の選択的透過として説明される。これは、散乱がないコ

ヒーレントな場合(図 1(a)) であるが、散乱頻度が大きくても、負性抵抗は生じる。これは、エミッタの三次元状態から、量子井戸に生成された二次元状態へ、電子がトンネル注入される際の状態密度の違いによるものであり、逐次トンネルと呼ばれる(図 1(b))。つまり、散乱頻度の大きな酸化物半導体でも RTD の負性抵抗は生じる。また、RTD の動作速度は移動度ではなく、ピーク電流密度によって決まる。ピーク電流密度は主として有効質量とバリアの高さ、厚さに依存する。散乱の多い非晶質酸化物半導体も有効質量は比較的小さいため、高い電流密度と良好な高周波特性が期待できる。

(2) 塗布型酸化物半導体の作製

酸化物半導体の作製には、スパッタなど真空プロセスを用いる方法と、液相プロセスを用いる方法があるが、ここでは、作製が容易で、様々な基板への成膜が可能な液相プロセスを用いて検討を行った。半導体としてはバンドギャップ、有効質量が比較的小さく、RTD に適していると考えられる In_2O_3 を用いることとした。 In_2O_3 薄膜の成膜には、溶液として 2-メトキシエタノールに硝酸インジウム()を 40mg/ml 加えたものを使用した。まず、基板表面の濡れ性の改善のために、200 で 5 分間 UV-オゾン処理を行い、その後、大気中で 4000rpm で 50 秒間のスピコートを行った。さらに大気中で 200 、30 分間のアニールを行った。これを 1 工程として、必要な厚さになるまで工程を繰り返した。一回の工程による膜厚は約 7nm であった。成膜した In_2O_3 上には

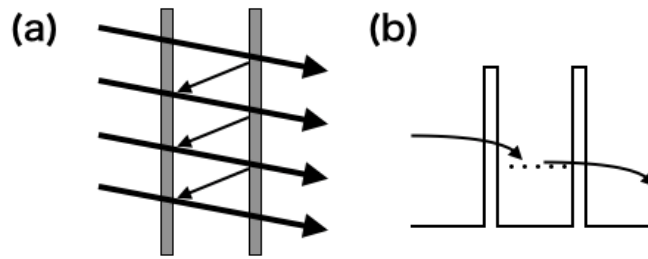


図 1 共鳴トンネル効果の 2 つのメカニズム。
(a) コヒーレントトンネル、(b) 逐次トンネル

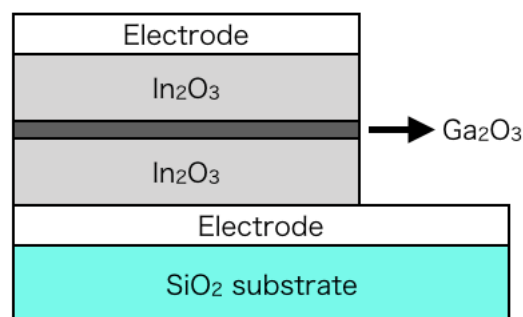


図 2 バリア層の特性評価のための n-i-n ダイオード。

電界効果型トランジスタ(FET)を試作し、膜質を評価した。

(3) バリア層の検討

RTD に適したバリア層としては、十分なバリア高さが得られること、及び、トンネル可能な薄膜が形成できること、という二つの条件がある。ここでは、 In_2O_3 膜と性質の似た Ga_2O_3 、及び、自己整合単分子膜が成膜できるヘキサメチルジシラザン(HMDS)を検討した。 Ga_2O_3 は硝酸ガリウムを用いて In_2O_3 と同様な方法で製膜した。一層の厚さは 2nm 程度であった。また、HMDS もスピノコートで製膜した。バリア層評価のために、上記バリア層を用いて、図 2 に示すような nin ダイオードを試作した。

4. 研究成果

成膜した In_2O_3 について FET 特性を測定することにより評価した。図 3 の様に良好な特性が得られた。相互コンダクタンスのゲート電圧依存性から移動度、電子濃度を評価したところ、 $0.1 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ 、 $n=2.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であった。なお、ここで得られた移動度は MOS 界面のものであり、バルク中では、これよりやや高い値を示すと考えられる。いずれにせよ、RTD 試作に問題ない特性が得られた。

次にこの In_2O_3 層を用いて作製した nin ダイオードの特性を図 4 に示す。この図は、 Ga_2O_3 バリア層を 1 工程分挿入した nin ダイオードとバリア層のないダイオードの電流電圧特性を比較したものである。バリア層の挿入により、電流がブロックされていることがわかる。図 5 には、 Ga_2O_3 バリア層の厚さを変えた時の nin ダイオードの電流-電圧特性をより広い電圧領域に対して示した。電流-電圧特性はトンネル電流の増大を示すと思われる特徴的な非線形な特性を示した。図 6 には HMDS をバリア層とした場合の nin ダイオードの電流-電圧特

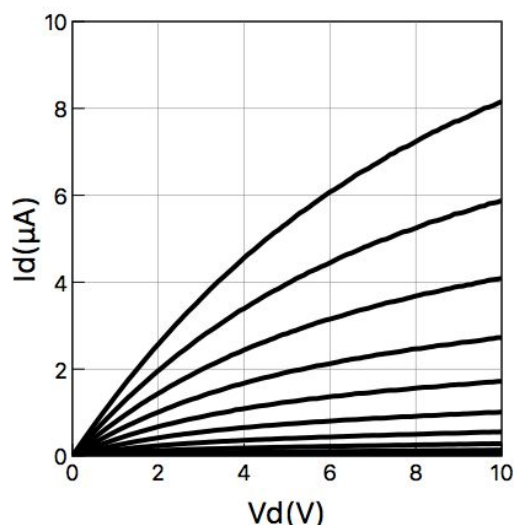


図 3 In_2O_3 膜質評価のために作製した電界効果型トランジスタ(FET)の特性

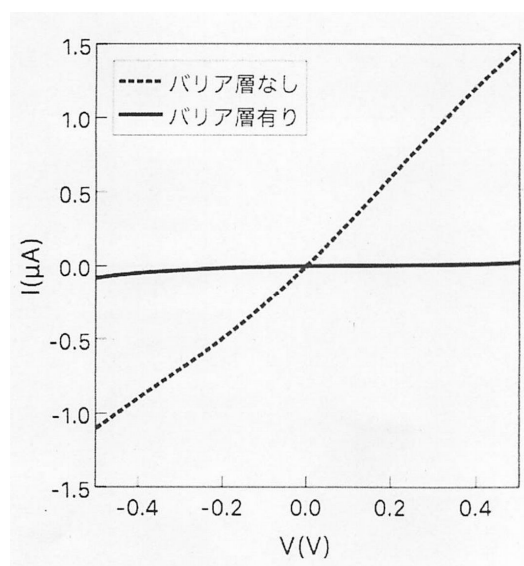


図 4 Ga_2O_3 バリア層の効果

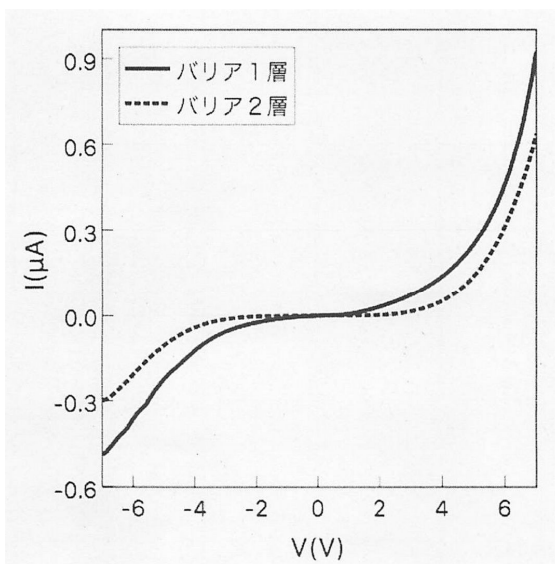


図 5 膜厚の異なる Ga_2O_3 バリア層による電流変化

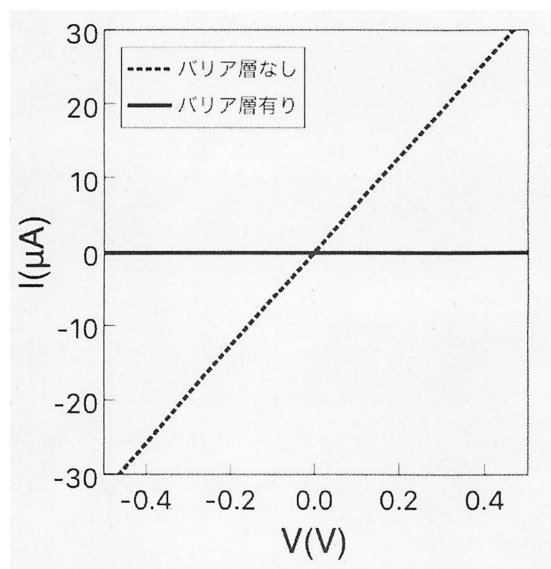


図 6 HMDS バリア層の効果

性を示す。こちらでも、はっきりとした電流ブロックが見られた。現在、RTD 特性の確認を目指し、これを二重バリア層に拡張する方向で実験を進めている。

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

塗布型酸化物半導体共鳴トンネル素子のための $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{In}_2\text{O}_3$ nin ダイオードの評価

遠矢浩士、森雅之、前澤宏一

第 10 回集積化 MEMS シンポジウム (札幌市民交流プラザ) 平成 30 年 10 月 31 日

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：森 雅之

ローマ字氏名：MORI, Masayuki

研究協力者氏名：遠矢 浩士

ローマ字氏名：TOYA, KOSHI

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。