

GeSnナノワイヤトランジスタによる次世代多機能LSI基盤技術の創製

Study of GeSn NW Growth for Next Generation LSI

H31助自85

代表研究者 松村 亮 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
研究員

Ryo Matsumura

Researcher, International Center for Materials Nanoarchitectonics,
National Institute for Materials Science

Since Moore's scaling law, which has been the guiding principle for improving silicon (Si) large scale integrated circuit (LSI) performance, has been reaching its limit, an approach is required to embed semiconductor materials with high mobility and new functions on LSI. As one of the solutions, it is required to realize a germanium tin (GeSn) crystal having extremely high mobility and optical function on a Si substrate or an insulating film. However, since the thermal equilibrium solid solubility of tin (Sn) in germanium (Ge) is extremely low (~1%), it is very difficult to form a high quality GeSn crystal having high Sn concentration. Therefore, we are studying a crystal growth method by a non-thermal equilibrium process for the purpose of realizing a GeSn crystal having a Sn concentration that breaks the thermal equilibrium solid solubility in Ge and making it a nanostructure.

In this report, we introduce two non-thermal equilibrium approaches to realize the GeSn crystal growth, which were carried out during the research period. As a result, GeSn nanowires and thin films having high Sn concentrations have been successfully realized. Moreover, crystallization phenomena were closely discussed, which resulted in publication of two research papers in high impact journals. As a future work, we are now working on p/n junction formation using molecular beam epitaxy, and gate stack formations using atomic layer depositions to establish GeSn transistor process.

研究目的

近年、シリコン集積回路の高性能化を支えてきたスケーリング則が物理的限界を迎えている。このスケーリング限界を打破しLSI性能の持続的な向上を実現するために、高移動度材料を用いた演算デバイスをSi基板上へ混載した多機能LSIの実現が強く求められている。

ゲルマニウム(Ge)にスズ(Sn)を添加したゲルマニウム・スズ(GeSn)は、直接遷移バンド構造を示し、有効質量の小さいキャリア伝導が支

配的となることから、SiやGeに比べて非常に高いキャリア移動度を有することが知られている。申請者は、高品質なGeSn結晶を実現し、その高いトランジスタ動作特性を実証することができれば、世界に例のない「LSI上への超高速トランジスタの混載」が可能となると構想している。

しかし、GeSnを多機能LSIの材料として応用するためには、大きな問題点が存在する。

- ・非常に小さいGe中のSn固溶度(~1%)
- ・小さいバンドギャップに起因するリーク電流の増大

・GeSnへのイオン注入を用いたドーピング法の不確実性

申請者はSi基板にボトムアップ成長やトップダウン法を用いて形成したGeSnナノワイヤを用い、縦型ナノワイヤトランジスタを実現することでこれらの問題点が解決できると着想した。

以上から、申請者はGeSn結晶成長・ナノワイヤへの展開、およびそれを用いたGeSn縦型ナノワイヤトランジスタの実現、その高速動作の実証を目的として、研究を推進している。

概 要

LSI性能向上の指導原理となっていたスケーリング則が限界を迎える今、高移動度・新機能を有する半導体材料をLSI上に混載するアプローチが求められている。その解の一つとして非常に高移動度、かつ光機能を有するGeSn結晶をSi基板や絶縁膜上に実現することが求められるが、SnのGe中の熱平衡固溶度は非常に低い(~1%)、高Sn濃度を有するGeSn結晶を高品位形成することは非常に難しい。また、GeSnは非常にバンドギャップの狭い材料であるため、トランジスタ応用を考える際はリーク電流を抑制するために、ナノワイヤ化してサラウンディングゲート構造とすることが求められる。そのことから我々は、Ge中の熱平衡固溶度を打破するSn濃度を有するGeSn結晶を実現し、ナノ構造化することを目的として非熱平衡プロセスによる結晶成長法を研究している。

本報告書では研究期間中に行った、大きく2つのアプローチによるGeSn結晶成長手法を紹介する。まず一つ目は金属触媒を用いたナノワイヤ結晶成長法である、VLS法をGeSnナノワイヤ成長に応用した手法である。本研究では、本来VLS法に用いるAu触媒の中に、Snを添加し、Ge系材料ガスを用いてナノワイヤ成長を行うことで、ナノワイヤ成長中にSnを取り

込みGeSn化することを着想し、それを実現した。実現した結晶成長後のナノワイヤ中のSn濃度は、触媒中のAu-Sn組成を変調することで0-6%程度の範囲で制御が可能となり、熱平衡固溶度を打破する高いSn濃度を有するGeSnナノワイヤ成長も実現している。またこのプロセス中に発見したナノワイヤの成長方位依存性についても詳細に調査し、自由エネルギーの観点から詳細に議論することができ、ハイインパクト誌であるアメリカ化学会(ACS) Nano Lettersへの採択へとつなげることができた。

また、さらなるSn濃度向上のために、我々が有するレーザーアニール技術を用いた研究も行った。我々の持つCWレーザーアニール装置は、CWレーザーでありながら、マイクロ秒レベルでの高速熱処理が可能であり、また熱処理時間も精密に制御することが可能な特徴ある物である。この装置を用い、GeSnの超高速な結晶成長を制御された条件で誘起することで、熱平衡固溶度を大きく打破する高いSn濃度を有するGeSn結晶が実現できると考えた。その結果、絶縁膜基板上において最大13%のSn濃度を有するGeSn結晶薄膜を実現した。また、レーザーアニールの熱処理条件をマイクロ秒レベルで精密に変調することでSn濃度の制御にも成功しており、様々な条件で結晶成長を誘起することで、GeSn中のSn析出現象を詳細に調査することができた。これらの成果はアメリカ電気化学会が発行するECS Journal of Solid State Science and Technologyにて詳細に発表した。

現在は、実現した結晶を用いたデバイス実証向け、周辺プロセスの確立を行っている。トランジスタ応用のためには、ジャンクションとゲートスタックを実現する必要があり、それぞれ分子線エピタキシー法と原子層堆積法を用いる予定にしている。先んじて実験を開始していたpnジャンクションの形成技術は既におお

よそ確立できており、今後は原子層堆積装置を用いたゲートスタック構造を実現し、トランジスタ動作を実証していく予定である。

－以下割愛－