

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	超高密度大気圧熱プラズマジェットを用いた半導体単結晶薄膜成長と大面積電子デバイス応用
研究機関・部局・職名	広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授
氏名	東 清一郎

【研究目的】

本研究では超高密度化した熱プラズマジェット (TPJ) 照射熱処理による融液からの高速結晶成長技術を開発し、一万度以上の高温ガス流を用いる TPJ 加熱の特徴を生かすことで、ナノメートルからマイクロメートル厚のシリコン薄膜単結晶成長技術を確立することを目的とする。具体的には、厚さ 10 nm 以下のナノ薄膜に高速横成長技術を適用することで固液界面通過時のフィルタリング効果を誘起する手法、パターンや局所熱伝導制御技術を利用する手法、成長速度や界面エネルギー制御する手法、等を用いることによって、非晶質基板上で面方位制御されたナノメートル厚単結晶シリコン成長を達成する。作製したシリコン単結晶ナノ薄膜を用いてトランジスタを作製し、低閾値電圧、低リーク電流、高移動度のデバイス実現に挑戦する。具体的には単結晶ウエハを用いて作製する MOSFET と同等の高性能を目標とする。作製したナノ～マイクロメートル厚単結晶薄膜アイランドをウェットエッチングと劈開という簡便な手法を用いてフレキシブル基板へ転写する技術開発に取り組む。これにより、フレキシブル基板上への単結晶薄膜形成技術を確立し、さらに太陽電池試作により本提案の有効性を実証する。

上記計画に加えて、TPJ 照射熱処理技術を実用化につなげる展開、新規応用展開に取り組む。具体的には量産適用可能な TPJ 装置作製を目指して民間企業等と密接な連携を推進する。工程スループットやランニングコストを含めた実用レベルの製造装置の提案を行う。また、応用分野の拡大を図るために、酸化や窒化といった反応性を付加した反応性 TPJ による酸化物薄膜熱処理技術や、SiC 熱処理技術といったパワーエレクトロニクスへの展開の可能性について探索する。

【総合評価】

<input type="radio"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	一定の成果が得られている
<input type="radio"/>	十分な成果が得られていない

【所見】
① 総合所見
<p>本研究では大気圧 TPJ を用いたシリコン結晶成長技術、そのデバイス応用、そして新たな応用への展開を目的としたものであり、所期の目的は達成し、基礎的なデータの取得はほぼ完了した。本研究成果は半導体デバイス性能を左右する結晶成長というキープロセスを大幅な低コストで達成するものである。さらに、これまで有機半導体や酸化物半導体が主役であったフレキシブルエレクトロニクス分野に於いては、本研究の成果に基づき、革新的に高性能、高信頼性の単結晶シリコン薄膜デバイスが活用できるようになり、フレキシブル基盤上 CMOS デバイス技術の大幅な進展が期待される。</p>

② 目的の達成状況
<p>・ 所期の目的が <input checked="" type="checkbox"/> 全て達成された <input type="checkbox"/> 一部達成された <input type="checkbox"/> 達成されなかった)</p>
<p>本研課題により以下のような項目について成果が挙げられた。</p> <p>① 大気圧プラズマジェット照射によるシリコン薄膜の結晶成長過程の解明 マイクロ秒時間領域での結晶成長メカニズムの理解に基づき、細線状のアモルファスシリコン膜に結晶成長を適用することで位置制御しつつ局所的に単結晶を成長できることが明らかになった。</p> <p>② 大気圧プラズマジェット結晶化による単結晶成長と薄膜トランジスタ応用 細線パターンにより位置制御された単結晶シリコン薄膜を用いて $520 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ の高移動度トランジスタの作製に成功し、単結晶ウエハを用いて作製する MOSFET と同等の高性能を達成した。</p> <p>③ 大気圧プラズマジェットによる SiC 結晶中の不純物活性化 SiC ウエハにイオン注入した不純物の TPJ の活性化が可能であることを実証した。</p> <p>④ 薄膜転写技術によるフレキシブル基板上への単結晶シリコン薄膜形成と TFT 応用 高結晶性シリコンを耐熱性の低いガラスやプラスチック上に形成する手法として、中空保持したアモルファスシリコン膜に近赤外半導体レーザー照射することで転写と同時に結晶化させる技術を開発した。また、水のメニスカス力により単結晶シリコン薄膜を異種基板へ転写する技術をトランジスタ作製に応用するプロセス開発し、ガラス基板上および PET 基板上で単結晶シリコン薄膜トランジスタの動作に成功した。本技術によりプラスチック上の CMOS 回路動作の可能性が実証され、また、厚膜シリコンをプラスチック上に転写し、太陽光発電セル作製可能であることも実験的に実証した。</p> <p>以上のような成果により、大気圧 TPJ 技術はディスプレイや太陽電池、更には集積回路プロセス等の関連する分野で広く応用されるようになり、半導体製造の大幅なコスト低減に寄与するものと期待される。</p>

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が
(ある ・ ない)

・ブレイクスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

TPJ 熱処理によるマイクロ秒時間領域での結晶成長メカニズムの理解に基づく結晶化の検証は非常にオリジナリティが高く、かつ新たな結晶成長領域の発見にもつながっており、先進性がある。現存する競合技術に対して、パターンニングと組み合わせて 100 μm を超える単一グレインを形成することも可能で、装置コストや運用コストの面ではさらに優位性が大きい。また、TPJ による巨大グレイン形成は、シードレスの単結晶化技術として非常に大きなブレイクスルーと考えられる。

SiC ウェハの急速熱処理技術は大面積電子デバイスのみならずマイクロ波ミリ波デバイスなど他の分野での重要技術となる可能性があり、近赤外レーザー照射による中空 a-Si 膜の結晶化・転写同時達成技術はオリジナリティ、実用性ともに高く特筆すべき成果と言える。さらに、当初の研究計画になかった SiC 基板へイオン注入した不純物がプラズマジェットにより活性化されることを見出した点も重要な成果である。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

ガラスやプラスチック基板上に単結晶に近い高品質 Si 薄膜を形成できる可能性が広がったという意味で、関連分野の進展に寄与すると考えられる。具体的には、フレキシブルエレクトロニクスや、太陽電池、CMOS デバイスの 3D 化といった分野への波及効果が大きいと期待される。本研究課題の成果により、低コストに単結晶的な Si 薄膜をフレキシブル基板上に形成することができれば、急速な普及が見込まれる。また、CMOS のポスト微細化トレンドとして開発が活発化している 3D-LSI 形成のための新たな基盤プロセスとして利用することも考えられる。これらの実現に伴い半導体産業の活性化や雇用促進が期待される。さらに、CMOS のチャンネル材料の形成というキープロセスであるため、知的財産権等の蓄積により国際的な競争力向上も期待される。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

本統括研究員の研究グループの下、他大学研究員の研究協力グループ、米国の研究員を含むアドバイザーグループ、さらに共同研究を行う企業の実用化検討グループによる研究体制ができており、適切に研究実施のマネジメントが行われている。雑誌論文 12 件 (掲載済み (査読有り) 12 件)、会議発表 119 件 (すべて専門家向け、

国際会議 38 件、国内会議 81 件、図書 1 件、知的財産権の出願・取得 9 件（出願特許 7 件、登録 2 件）であり、適切に研究成果の公表はされており、また、知的財産権に関しても適切に取り組んでいる。

国民との科学・技術対話は「広島大学 学術講演会」として広島市内のキャンパスおよび東広島キャンパス内に於いて各年度 1 回ずつ実施しており、適切に実施されている。