

# 薄膜トランジスタ(TFT)の製造工程に不可欠なアモルファスSi(注1)の結晶化を出力が安定していて低コストのアーキ放電による熱プラズマジェットで実現 従来のエキシマレーザーによるコストを1/10に大幅低減

液晶や有機ELの表示素子に不可欠なTFTの作製は、これまでアモルファスSiにエキシマレーザーを照射して、熱処理で結晶化する技術が主流になっています。しかし、エキシマレーザーは出力が不安定で、装置の価格もランニングコストも高額なため、新たな高性能かつ低コストな加工法が求められています。プラズマジェットによる本結晶化技術はこれらの問題を同時に解決する有力な新技術です。

- 需要の拡大が予想される、大型テレビや携帯情報端末などの液晶や有機EL表示素子の製造に不可欠なTFTの作製を低コストで、しかも高精度、短時間で実現できます。
- 熱プラズマジェット照射によるミリ秒超急速熱処理における基板温度を測定するために開発した非接触温度測定技術は、集積回路の製造工程での加工温度モニタリングへの応用も期待されています。

## 競合技術への強み

	TFT性能	コスト	欠陥密度
エキシマレーザーによる結晶化技術 [既存技術]	◎ 移動度は 100cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	✕ (初期コストは数億円、かつ高ランニングコスト)	✕ (膜中ダンダリングボンド密度は~10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> )
アーキ放電プラズマジェットによる結晶化技術 [本研究]	○ 移動度は~75cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> 実用上は十分	◎ (初期コストは数千円、従来の1/10程度)	◎ (膜中ダンダリングボンド密度は~5×10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup> 、従来の1/10以下)

▲従来のエキシマレーザーによる加工と本研究の比較

- ①装置の簡素化：本体の直径は10cm程度で、4mmのノズルからプラズマジェットを噴射する(サイズは試作段階のため小型)ため、簡単な構造になります。
- ②大出力=高速化：数ミリ秒でアモルファスSi膜が結晶化するので、秒速1mほどの速さで加工できます。
- ③装置およびランニングコストの低下：大気圧下での結晶化が可能で、エキシマレーザーのような真空装置が不要。エキシマレーザーで用いられているハロゲンガスによる腐食がないのでメンテナンスコストを低減できます。
- ④低欠陥化：エキシマレーザーによる結晶化Si膜と比較すると、結晶粒径が小さいにもかかわらず、膜中ダンダリングボンド(注2)密度は、1/10程度と極めて低欠陥の加工ができます。

## ここがポイント

- ①熱プラズマジェット照射によって、熱処理時間2-3ms、最高到達温度900-1800Kの範囲で加熱・冷却し、その速度を精密に制御する技術を開発しました。
- ②アモルファスSi膜は1100K程度の温度から固相結晶化(SPC:Solid Phase Crystallization)を開始し、融点を越えると溶融して、冷却の過程で再結晶化する二段階相変化過程を経て結晶化することを明らかにしました。
- ③レーザーを用いたミリ秒時間の分解能をもつ非接触温度測定技術を開発しました。この測定技術は、精密な温度制御による正確なアモルファスSiの結晶化を実現するコア技術で、半導体素子の製造に必要とされるSiウエハ(基板)の加工中の処理表面の温度測定にも適用できます。
- ④熱プラズマジェットの照射によるアモルファスSiの相変化メカニズムを明らかにし、結晶化した多結晶Si膜中の欠陥密度を、5×10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>以下に低減す

るプロセス技術を開発しました。

⑤熱プラズマジェット照射による高効率不純物ドーピング技術を開発しました。熱プラズマジェット結晶化およびドーピングにより、電界効果移動度75cm<sup>2</sup>/Vs、閾値電圧2.9Vの高性能TFTの作製に成功しました。

## ブレイクスルーへの道のり

**2003年以前**：大学着任前、EPSONでエキシマレーザーによる結晶化の研究をしていた時から、設備が高額で「低コスト化」へのニーズを感じていました。**2003年**：応用物理学会誌に掲載された「熱プラズマによる産業廃棄物処理技術」をヒントに、プラズマを使って、ミリ秒時間でアモルファスSi膜を結晶化させるアイデアを着想し、実験を試みました。**2003年度**：4回生が卒業論文に「熱プラズマ照射装置を用いたアモルファスSi結晶化」を発表。これを特許出願し、翌年広島大学TLO(技術移転機関)に渡しました。プラズマ照射装置については、まったくのゼロからのスタートで、まず情報を集めて設計し、学生たちと手作りで約4か月を費やして製作しました。**2004年**：結晶化の目処がつく。他大学の協力を得て、薄膜トランジスタを作ることに着手しました。NEDO産業技術研究助成に申請し、採択されました。**2005年**：ミリ秒単位での温度測定技術の開発に着手。併せて基板内の温度の分布を調べることにしました。研究の結果、温度計測の精度は、1700Kで、30K。これにより温度の上げ下げをコントロールできるようになりました。**2006年**：本温度測定技術で結晶化のメカニズムを調べたところ、結晶化のプロセスは結晶化温度によって2種類あることが判明しました。**2007年**：温度測定のレーザー光プローブ法と解析ソフトウェアを開発し、温度測定技術を開発。結晶化したSi膜の欠陥(結合が切れている状態)密度を測定し、結晶境界に欠陥があるかどうかを調べました。ミリ秒結晶化Si膜では、結晶の欠陥は少ないことが判明しました。エキシマレーザーと比べて欠陥の発生は1/10程度で、TFTの試作も行って性能を評価したところ、トランジスタとして十分な結果が得られました。

## ■サクセス・キー

異分野の学会へも出席したことが本研究(プラズマをアモルファスSi製造装置に利用する)の着想を産みました。また、研究を開始する6か月前程に、十分な予備技術調査(研究開発の方針検討)を実施したことも有益で、研究に着手した後の動きが早くなりました。常識に捉われない考え方、所属する研究分野に捉われない広く柔軟な発想を持ち続けたことで、昔から知られた方法であった熱プラズマにも



▲大気圧下で発生したプラズマジェット

目を向けて成果を出すことができました。

## ■ネクスト・ストーリー

「線状のプラズマ源をつくる」を目標に、加工速度(スルーput)および処理の均一性向上といった大量生産における課題解決のため、連携企業とともに取り組んでいます。またプラズマジェットを用いたアモルファスSiの結晶化技術は、まだ装置化(製品化)されていませんが、本年度中に試作機を作製してデモ実験をスタートさせ、2010年あたりを目処に商品化を実現できたいと思っています。半導体産業にかかわる研究者は、非常に高い水準の信頼度を求めるため、新しい技術の導入よりも評価の定まった既存の技術に頼る傾向が強いです。よって装置の製品化、半導体製造現場に導入しうるだけの十分な信頼性の確保に向けて努力していきます。

(注1)アモルファスSiとは、シリコン原子が三次元的に一定の規則性をもたないで結合したもの。結晶シリコンに比べて不安定だが、未結合手(ダンダリングボンド)に水素を結合させて安定化した状態で工業材料として利用する。

(注2)ダンダリングボンド(dangling bond)とは、結晶表面や結晶中の欠陥付近で原子が共有結合の相手を失って、結合に関与しない電子(不対電子)による未結合手のことをいう。ダンダリングボンド上の電子は電気的に活性なため、半導体結晶中の電子の移動度等、物性に大きな影響を与える欠陥となる。



プロジェクトID・研究テーマ名・年度

05A13002a「プラズマジェットを用いたアモルファスSi膜結晶化技術の薄膜トランジスタ製造プロセス応用」(平成17年度第1回公募)

代表研究者・所属機関・所属部署名・役職名

東清一郎 広島大学大学院先端物質科学研究科 半導体集積科学専攻 准教授