

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19360187  
 研究課題名 (和文) 超急速熱処理における非接触温度測定と不純物の短時間活性化に関する研究  
 研究課題名 (英文) Noncontact Temperature Measurement During Rapid Thermal Annealing and Investigation on Impurity Activation  
 研究代表者  
 東 清一郎 (HIGASHI SEIICHIRO)  
 広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授  
 研究者番号：30363047

## 研究成果の概要 (和文)：

熱プラズマジェット (TPJ) 照射中のシリコンウエハ表面温度を非接触測定しつつヒ素 (As) およびホウ素 (B) の活性化と極浅接合形成を試みた。B は処理温度の上昇とともに活性化率は上昇し、1400 K 以上で低いシート抵抗値に飽和するのに対して、As は 1000 K 程度の低温でも高効率活性化し、処理温度だけでなく高い加熱・冷却速度が重要な処理条件であることが明らかになった。接合深さ 11.9 nm、シート抵抗 1095  $\Omega$  の極浅接合の形成に成功した。

## 研究成果の概要 (英文)：

Activation of As and B atoms in Silicon wafer surface by thermal plasma jet (TPJ) annealing has been investigated. The sheet resistance of B-implanted samples saturates at an annealing temperature higher than 1400 K, while it is 1000 K in the case of As-implanted samples. In the case of As, not only the annealing temperature, but faster heating and cooling rates play important role to achieve efficient activation.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2008 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測システム

## 1. 研究開始当初の背景

ULSIにおける極浅接合 (USJ) 形成や薄膜トランジスタ (TFT) のソース・ドレイン部形成に急速熱処理 (RTA) による不純物活性化が極めて重要な技術として注目されている。特にミリ秒時間に数100Kの加熱・冷却をおこ

なう超急速熱処理 (URTA) 技術が精力的に研究されているが、従来ミリ秒の時間領域で基板表面温度を精度よく測定する技術が無く、不純物拡散制御やURTAプロセスのIn-situモニタリングにおける重要課題のひとつとなっている。このため、半導体中の不純物をURTA

で高効率に活性化するために必要な熱処理パラメータを明確化する手法の確立が不可欠であった。

## 2. 研究の目的

本研究課題においては、非接触温度測定技術を開発し、測定誤差を 10 K (測定絶対温度 1700 K の 0.6%) 以下まで低減することと、空間・時間分解能を制限する要素を明確にすることを目的とする。更に、URTA による加熱・冷却速度と半導体中の不純物活性化率の関係を明らかにし、本温度測定技術のプロセスモニタとしての有効性を検証することを目的とする。

## 3. 研究の方法

URTA は熱プラズマジェット照射によりおこなう。Ar ガスの DC アーク放電により発生した熱プラズマを直径 4mm のノズルから噴出しジェットを形成する。プラズマジェット前面にて被処理基板を高速走査 (~2000 mm/s) し URTA をおこなう。これにより 1 ~ 数 10 ミリ秒の時間領域で最高処理温度 ~ 1800 K の URTA が可能である。処理中の温度測定のために光学系を設置し、基板裏面側からプローベレーザー光照射し、反射光強度をバンドパスフィルタ後方に設置したフォトダイオードにより測定する。測定された実時間反射率波形を解析することにより基板内温度分布をミリ秒の時間分解能で求める。

## 4. 研究成果

(1) 波長 1.31  $\mu\text{m}$  のレーザー光を用いて URTA 中に測定した実時間反射率を解析することで Si ウエハの非接触温度測定が可能であることを実証した。(図 1 参照)

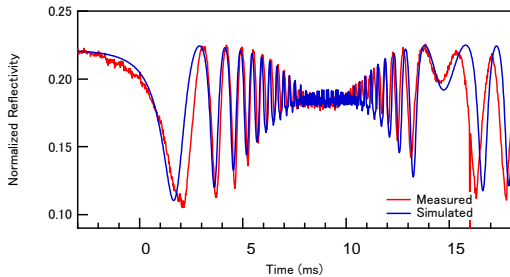


図 1. Si ウエハの超急速熱処理中のプローベレーザー ( $\lambda=1310\text{ nm}$ ) の実時間反射率. 赤線は実測、青線はシミュレーションにより再現した波形を示す。

(2) ミリ秒 URTA 中の Si ウエハ表面温度を理想的には  $\pm 1\text{K}$  の精度で測定可能であることを明らかにし、本研究の非接触温度測定技術が極めて高精度であることが分かった。

(3) URTA により高ドーパアモルファス Si を固相結晶化することによって、熱平衡固溶限を超えるキャリア密度を達成可能であり、

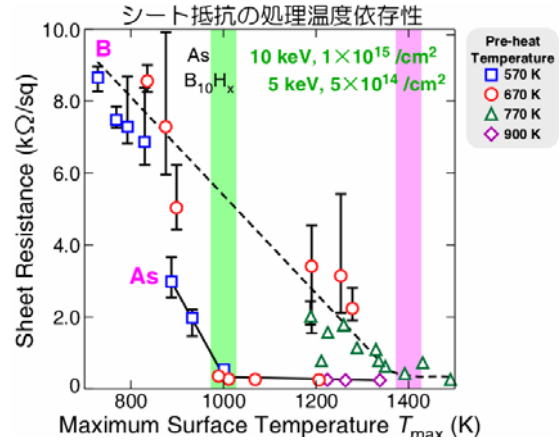


図 2. As および B をイオン注入したシリコンウエハに TPJ 照射ミリ秒熱処理を行った後のシート抵抗の処理温度依存性。

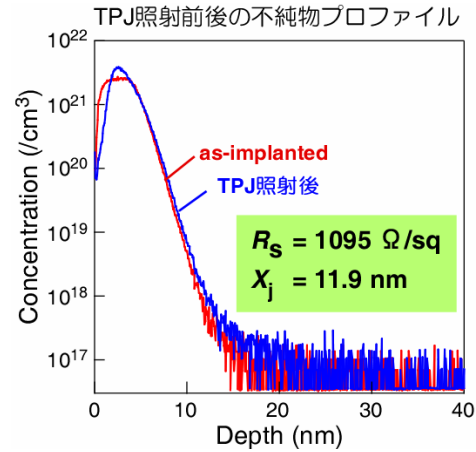


図 3. TPJ 照射ミリ秒熱処理により形成した極浅接合内の As 深さ方向分布。

高効率不純物活性化に有効であることを実証した。

(4) 前記不純物活性化技術を TFT 作製工程へ適用したところ電界効果移動度  $67\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  の優れた電気特性が得られ、半導体素子作製工程へ導入可能であることを実証した。

(5) DC アーク放電をおこなう陽極-陰極間ギャップ (ES) を従来の 1 mm から 3 mm へと拡大すると、ジュール加熱により熱プラズマの温度が 15000 K から 23000 K へと上昇し、これによって熱処理時のパワー密度を 3 倍の  $33\text{ kW/cm}^2$  へと格段に増加できることが明らかになった。

(6) この結果、従来 200 K 程度しか加熱できなかった Si ウエハ表面を 600 K 以上昇温可能となり、熱プラズマジェットを Si ウエハの不純物活性化に適用可能となった。

(7) この高パワー密度熱プラズマジェットを用いて極浅接合形成実験を実施した結果、As および B をイオン注入した Si ウエハをミリ秒熱処理したところ、それぞれ到達温度 1000 K および 1400 K 以上で低シート抵抗を達

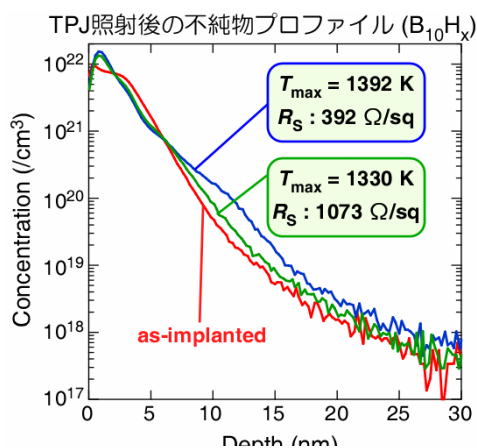


図4. TPJ 照射ミリ秒熱処理により形成した極浅接合内の B 深さ方向分布。

成する高効率不純物活性化に成功した。(図2参照)

(8) As の活性化には処理温度だけでなく、加熱・冷却速度を精密制御することで大幅な高効率化が達成できることを明らかにした。

(9) As クラスタイオン注入した試料を熱処理し、接合深さ 11.9nm、シート抵抗 1095 Ω の極浅接合形成に成功した。(図3参照)

(10) B クラスタイオン注入した試料でも、接合深さ 21.8nm、シート抵抗 392 Ω を達成した。(図4参照)

#### 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6件)

- ① K. Matsumoto, S. Higashi, H. Murakami, and S. Miyazaki, "Activation of B and As in Ultrashallow Junction During Millisecond Annealing Induced by Thermal Plasma Jet Irradiation," *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** (2010) 04DA02. 査読有り
- ② S. Higashi, K. Sugakawa, H. Kaku, T. Okada, and S. Miyazaki, "Characterization of Microcrystalline Silicon Thin Film Transistors Fabricated by Thermal Plasma Jet Crystallization Technique," *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** (2010) 03CA08. 査読有り
- ③ H. Furukawa, S. Higashi, T. Okada, H. Kaku, H. Murakami, and S. Miyazaki, "Millisecond Rapid Thermal Annealing of Si wafer Induced by High Power Density Thermal Plasma Jet Irradiation and Its application to Ultra Shallow Junction Formation," *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** (4) (2009) 04C011. 査読有り
- ④ 東 清一郎, 宮崎 誠一, "熱プラズマによるアモルファスシリコンの結晶化," 「講座 熱流を伴う反応性プラズマ

を用いた材料合成プロセス 3. 結晶化・相変化制御への応用」 *プラズマ・核融合学会誌* **85**(3) (2009) pp. 119-123. 査読有り

- ⑤ H. Furukawa, S. Higashi, T. Okada, H. Kaku, H. Murakami, and S. Miyazaki, "In-situ Monitoring of Si Wafer Temperature during Millisecond Rapid Thermal Annealing," *Electrochem. Soc. Trans.*, **13** (1) (2008) pp. 31-36. 査読有り
- ⑥ H. Furukawa, S. Higashi, T. Okada, H. Kaku, H. Murakami and S. Miyazaki, "In-situ Measurement of Temperature Variation in Si Wafer During Millisecond Rapid Thermal Annealing Induced by Thermal Plasma Jet Irradiation," *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**(4) (2008) pp. 2460-2463. 査読有り

[学会発表] (計20件)

- ① S. Higashi, "Millisecond Annealing Induced by Atmospheric Pressure Thermal Plasma Jet Irradiation and Its Application to Ultra Shallow Junction Formation," *Ext. Abs. 2010 Int. Workshop Junction Tech. (IWJT-2010), (Shanghai, China, May. 10-11, 2010)*, pp. 30-35. [Invited]
- ② 東 清一郎, 「大気圧熱プラズマジェットを用いたシリコン膜のマイクロ秒溶解結晶化と高性能TFT作製応用」, 電子情報通信学会技術研究報告 シリコン材料・デバイス (2010年4月23日沖縄青年会館), *信学技報* **110** (15) (2010年4月16日) pp. 39-44. [招待講演]
- ③ K. Matsumoto, S. Higashi, H. Furukawa, T. Okada, H. Murakami, and S. Miyazaki, "Activation of B and As in Ultra Shallow Junction with Heating and Cooling Rates Controlled Millisecond Annealing Induced by Thermal Plasma Jet," *Ext. Abs. 2009 Int. Conf. Solid State Dev. Mat., (Sendai, Japan, Oct. 7-9, 2009)*, pp1018-1019.
- ④ 東 清一郎, 「結晶化・相変化への応用熱プラズマジェットによるアモルファスシリコンの結晶化」 第31回真空展 VACUUM2009 併設真空トピックス, 日本真空協会9月研究例会, スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会第115回定例研究会(2009.9.16), 東京ビッグサイト Sputtering & Plasma Processes, **24** (4) (2009) pp. 11-22. [招待講演]
- ⑤ S. Higashi, "Millisecond Thermal Processing for TFT and ULSI," *Semiconductor Tech. for Ultra Large Scale Integrated Circuits and Thin Film Transistors II, (Xi'an, China, Jul. 5-10, 2009)*. [Invited]

- ⑥ K. Sugakawa, S. Higashi, H. Kaku, T. Okada, and S. Miyazaki, "Characterization of Microcrystalline Silicon Thin Film Transistors Fabricated by Thermal Plasma Jet Crystallization Technique," *Proc. AM-FPD 09, (Nara, Japan, Jul. 1-3, 2009)*, pp. 117-120.
- ⑦ 東 清一郎, "熱プラズマジェットによるミリ秒急速熱処理とその半導体プロセス応用," 第 44 回応用物理学会スクール「安価、簡単、便利 ～大気圧プラズマの基礎と応用～」(2009 年 4 月 1 日 筑波大学) pp. 57-71.
- ⑧ H. Furukawa, S. Higashi, T. Okada, H. Murakami, and S. Miyazaki, "Generation of High Density Thermal Plasma Jet and Its Application to Millisecond Annealing of Si Wafer Surface for Shallow Junction Formation," *Proc. Int. Symp. Dry Process, (Tokyo, Japan, Nov. 26-28, 2008)*, pp. 267-268.
- ⑨ H. Furukawa, S. Higashi, T. Okada, H. Kaku, H. Murakami, and S. Miyazaki, "Millisecond Rapid Thermal Annealing of Si Wafer Induced by High Density Thermal Plasma Jet Irradiation," *Ext. Abs. 2008 Int. Conf. Solid State Dev. Mat., (Tsukuba, Japan, Sep. 24-26, 2008)*, pp. 852-853.
- ⑩ H. Kaku, S. Higashi, T. Yorimoto, T. Okada, H. Furukawa, and S. Miyazaki, "Application of Thermal Plasma Jet Annealing to Channel Crystallization and Doping for Thin Film Transistor Fabrication," *Dig. Tech. Pap. AM-FPD 08, (Tokyo, Japan, Jul. 2-4, 2008)*, pp. 33-36.
- ⑪ H. Furukawa, S. Higashi, T. Okada, H. Kaku, H. Murakami, and S. Miyazaki, "In-situ Monitoring of Si Wafer Temperature during Millisecond Rapid Thermal Annealing," *213<sup>th</sup> Electrochemical Society (ECS) Meeting Abs. (Phoenix, USA, May. 18-22, 2008)* p. 620.
- ⑫ H. Kaku, S. Higashi, H. Furukawa, T. Okada, T. Yorimoto, H. Murakami and S. Miyazaki, "Impact of Annealing condition on the Efficiency of Dopant Activation Induced by Thermal Plasma Jet Crystallization of Heavily-Phosphorus-Doped Amorphous Si films", *1<sup>st</sup> Int. Conf. on Plasma-NanoTechnology and Science (IC-PLANTS 2008) (Nagoya, Japan, Mar. 13-14, 2008)* p. 5.
- ⑬ S. Higashi, "Application of Thermal Plasma Jet to Crystallization of Amorphous Si Films on Glass Substrate and Thin Film Transistor Fabrication", *6<sup>th</sup> Asian-European Int. Conf. Plasma Surf. Eng. (AEPSE 2007) Workshop on Flat-panel and Flexible Devices (Nagasaki, Japan, Sep. 28, 2007)*, p.1.
- ⑭ H. Furukawa, S. Higashi, T. Okada, H. Kaku, H. Murakami and S. Miyazaki, "In-situ Measurement of Temperature Variation in Si Wafer During Millisecond Rapid Thermal Annealing Induced by Thermal Plasma Jet Irradiation," *Ext. Abs. 2007 Int. Conf. Solid State Dev. Mat., (Tsukuba, Japan, Sep. 19-21, 2007)*, pp. 376-377.
- ⑮ H. Kaku, S. Higashi, T. Yorimoto, T. Okada, H. Furukawa, H. Murakami, and S. Miyazaki, "Formation of Source and Drain for Polycrystalline Si Thin Film Transistors Using Thermal Plasma Jet Induced Impurity Activation," *Proc. 4<sup>th</sup> Int. TFT Conf., (Seoul, Korea, Jan. 24-25, 2008)*, pp. 331-334.
- ⑯ H. Kaku, S. Higashi, H. Furukawa, T. Okada, T. Yorimoto, H. Murakami and S. Miyazaki, "High Efficiency Dopant Activation Induced by Thermal Plasma Jet Crystallization of Heavily-Phosphorus-Doped Amorphous Si Films", *Ext. Abs. 5<sup>th</sup> Int. Symp. Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-V), (Tokyo, Japan, Nov. 12-14, 2007)*, pp. 51-52.
- ⑰ 東清一郎, "Poly-Si TFT 新たなSi膜結晶化法 (熱プラズマジェット法)" シンポジウム「Poly-Si TFT最近の展開と今後」, 第 68 回応用物理学会学術講演会講演予稿集No. 0, p. 68 (2007.9.4-8、北海道工業大学). [招待講演]
- ⑱ H. Kaku, S. Higashi, H. Furukawa, T. Okada, H. Murakami and S. Miyazaki, "Dopant Activation Induced by Thermal Plasma Jet Crystallization of Heavily-Phosphorus-Doped Amorphous Si Films", *Dig. Tech. Pap. AM-FPD 07, (Hyogo, Japan, Jul. 11-13, 2007)*, pp. 33-36.
- ⑲ 東清一郎, "熱プラズマジェットを用いたミリ秒急速熱処理技術のTFT作製プロセス応用", 半導体界面制御技術第 154 委員会第 58 回研究会資料, (首都大学東京, 2007.5.16) pp. 43-51. [招待講演]
- ⑳ H. Kaku, S. Higashi, T. Okada, T. Yorimoto, H. Murakami and S. Miyazaki, "High Efficiency Activation of Phosphorus Atoms Induced by Thermal Plasma Jet Crystallization of Doped Amorphous Si Films", *Abst. 2007 Material Research Society Spring Meeting, (San Francisco, U. S. A. Apr. 9-13, 2007)*, p. 27.

[図書] (計1件)

- ① 「薄膜トランジスタ」浦岡行治, 神谷利夫, 木村睦, 佐野直樹, 鮫島俊之, 清水耕作, 竹知和重, 中村雅一, 東清一郎, 古田守, 堀田将, 薄膜材料デバイス研究会編 コロナ社 (3章分担執筆) (2008年11月21日) 229ページ (75~133ページ)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/semicon>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

東清一郎 (HIGASHI SEIICHIRO)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授

研究者番号 : 30363047

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし