

# 平成 30 年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

## 調査研究報告書（公開版）

【研究題目】計測と計算を組み合わせた半導体プロセスプラズマ

【整理番号】TK18-051

【代表機関】研究開発法人 産業技術総合研究所

【調査研究代表者（氏名）】布村正太

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】

国立大学法人 東京大学：伊藤剛仁

国立大学法人 筑波大学：坂本瑞樹

【TIA 外連携機関】

東京エレクトロン株式会社

【報告書作成者】 布村正太

【報告書作成年月日】H31 年 3 月 26 日

【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

「計測と計算を組み合わせた半導体プロセスプラズマ」の理解と制御に向け、研究会等を開催し機関内外の連携を推進した。具体的には、以下の技術検討会並びに国際ワークショップを開催した。

○第一回技術検討会（主催）

（日時：2018年7月26日（木）、場所：東京エレクトロン（株）穂坂事業所）

1. 「課題説明」（鈴木歩太 TEL）
2. 「電子光技術研究部門先進プラズマプロセスグループの研究概要」榊田創（AIST）
3. 「プラズマ-ガス-材料複合系における物理計測」江角直道（筑波大）
4. 「プラズマ状態の第一原理シミュレーション」杉野修（東大）
5. 「量産装置を用いたプロセス診断技術開発の取り組み紹介」笠嶋悠司（AIST）
6. 「小型プラズマ生成装置を用いたプラズマ材料表面相互作用研究」坂本瑞樹、鈴木佑（筑波大）
7. 「半導体プラズマプロセス下の欠陥のその場検出について」布村正太（AIST）
8. 「新たなニーズ」伝宝（TEL）
9. 「全体討論」青柳昌宏（AIST）

○第二回技術検討会（主催）

（日時：2018年10月12日（金）、場所：東京エレクトロン 赤坂 Biz タワー）

1. 「レビュー」（鈴木歩太 TEL）
2. 「研究内容紹介」藤田大介（NIMS）
3. 「研究内容紹介」雨宮健太（KEK）
4. 「研究内容紹介」上殿明良（筑波大）
5. 「全体討論」 全員

○第三回技術検討会（「Workshop on Plasma and Material Science」との共催）

（日時：2019年3月14日（木）、場所：筑波大学 Laboratory of Advanced Research B）

1. Uwe Czarnetzki（Ruhr-Universität Bochum）

“Stochastic Electron Heating in Low-Temperature Plasmas”

2. Cedric Mannequin (Grenoble Alps University)

“Atomic Layer Etching of GaN”

3. Kazunori Koga (Kyushu University)

“Tracking Analysis of Collision Process of Two Fine Particles Trapped in Ar Plasmas”

4. Hajime Sakakita (AIST)

“Recent Activities in Innovative Plasma Processing Group, AIST”

5. Shota Nunomura (AIST)

“Defect Management of Semiconductor Devices during Plasma Processing”

6. Akira Uedono (University of Tsukuba)

“Vacancy-type Defects in Hydrogen Implanted GaN Probed by Positron Annihilation”

7. Mitsutoshi Aramaki (Nihon University)

“Laser Diagnostics in Flowing, Recombining, and Atmospheric Pressure Plasmas”

8. Naomichi Ezumi (University of Tsukuba)

“Synergistic Effect of Nitrogen and Hydrogen Seeding Gases on Plasma Recombination Process”

9. Mizuki Sakamoto (University of Tsukuba)

“Hydrogen Recycling Process on the High Temperature Tungsten Target”



図1 第三回技術検討会（「Workshop on Plasma and Material Science」との共催）の様子。

#### 【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

最先端半導体デバイスの作製に用いるプラズマプロセスの理解と制御に向け、以下の調査研究を進めた。産総研では、一例としてプラズマ照射下の半導体材料の欠陥評価に関する基礎研究を行った。以下に具体的な実験手法と結果を記す。

図2に実験装置の概要を記す。水素プラズマ照射下においてSOI(silicon on insulator)内を流れる光電流を実時間計測し欠陥のその場評価を行った[1]。サンプルとして、p型SOI(300nm, 150–300Ωcm, 100配向)、埋め込み酸化膜(BOX, 500nm)、シリコン支持基板(725μm)を用い、表面に光電流計測用の電極(ITO/Ag/ITO)を形成した。サンプルはプラズマ処理前にDHF洗浄し自然酸化膜を除去した。

図3に、水素プラズマ照射及びその後の熱アニール時の光電流の時間変化を示す[2]。水素プラズマ照射中に光電流は減少し、熱アニールによって光電流は回復する傾向を示した。また、プラズマ照射時間が長くなるにつれ、光電流の減少は大きくなった。これらの結果は、次のように解釈できる。水素プラズマ照射に伴い、水素原子がシリコン表面に到達し表面欠陥を形成する。ま

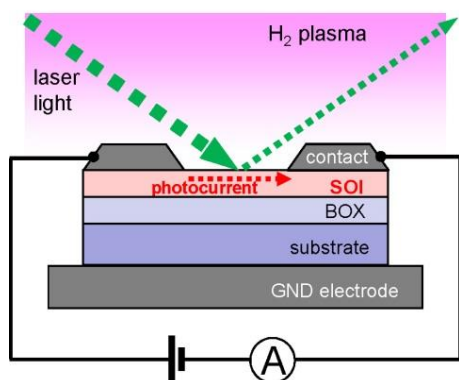


図2 光電流のその場計測。水素プラズマ照射中にSOI内の光電流を計測し欠陥の増減を評価。

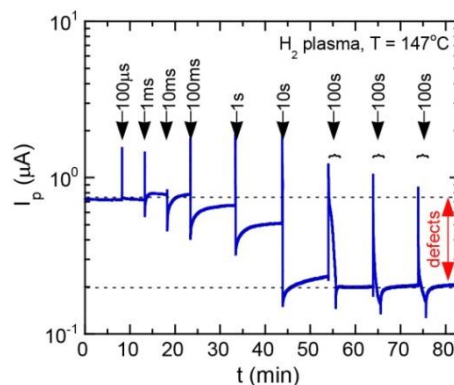


図3 水素プラズマ照射に伴うSOI内の光電流の時間変化。水素プラズマ照射中に光電流は減少しその後の熱アニールにより光電流は回復する。

た、水素原子がシリコン内部に侵入し、ダングリングボンド等のバルク欠陥を形成する。そのため SOI 内のキャリア再結合が増大し光電流は減少する。一方、照射後の熱アニール中には、プラズマ照射によって引き起こされた表面欠陥並びにバルク欠陥は水素原子により終端されると共に構造緩和するので光電流は回復する。これらの結果を論文として発表すると共に学会で発表した [2]。今後は、欠陥の発生と修復のメカニズムを解明すると共に欠陥制御によるデバイス高性能化を進める。

上記研究に加え、東大では、液滴を用いた大気圧プラズマ材料プロセスに関する先駆的な研究 [3] やその場観察を可能とするパルス型振動分光システムの構築を行った。筑波大では、プラズマ照射によるタングステン表面変化の分光エリプソメトリー測定 [4, 5] や、プラズマ照射に伴うシリコン内欠陥に関する研究 [6]、酸化チタン薄膜形成に向けた ALD 技術の開発とイオンエネルギーの制御 [7, 8] 等に関する研究を進めた。また、国際ワークショップ等で研究成果の発信を行った [9]。

#### 【今後の活動予定】

機関内での共同研究（一例として、産総研と筑波大での共研）を継続し連携強化を図ると共に科研費等への競争的資金への共同申請を行う。また、KEK とは、放射光を用いたプラズマの励起状態の計測に関して実験を検討しているところである。機関外との連携では、東京エレクトロン株式会社との連携強化を進めると共に、半導体デバイスメーカーとの連携を模索する。

#### 参考文献

1. S. Nunomura *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **10**, 054006 (2018).
2. S. Nunomura *et al.*, to be accepted in AIP advances.
3. 伊藤剛仁, “液滴を用いた大気圧プラズマ材料プロセス” H30 年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「荷電現象がもたらす微粒子—流体混成系の多様性と機能性」, 東北大学, 2018 年 9 月 5-6 日。(招待講演)
4. Diagnostics for Surface of Tungsten Exposed to Deuterium Plasma by Spectroscopic Ellipsometry, Y. Suzuki, M. Sakamoto, S. Ino, N. Ezumi, Y. Nakashima, 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2018), 2018.8.27-31, Tsukuba, Japan
5. 「プラズマ照射によるタングステン表面変化の分光エリプソメトリー測定」、鈴木佑、坂本瑞樹、江角直道、竹田將生、辻杏樹、寺門明紘、野尻訓平、東郷訓、山田洋一、坂本隆一、第 35 回プラズマ・核融合学会年会, 2018. 12. 3-6, 大阪大学吹田キャンパス (大阪府吹田市)
6. Y. Sato, S. Shibata, A. Uedono, K. Urabe and K. Eriguchi, “Characterization of the distribution of defects introduced by plasma exposure in Si substrate”, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **37**, 011304(1-5) (2019). [DOI: 10.1116/1.5048027]
7. S. Iwashita, K. Denpoh, M. Kagaya, T. Kikuchi, N. Noro, T. Hasegawa, T. Moriya, A. Uedono, “Ion energy control and its applicability to plasma enhanced atomic layer deposition for synthesizing titanium dioxide films”, *Thin Solid Films* **660**, 865-870 (2018). [DOI: 10.1016/j.tsf.2018.03.001]
8. Iwashita, T. Moriya, T. Kikuchi, M. Kagaya, N. Noro, T. Hasegawa, and A. Uedono, “Effect of ion energies on the film properties of titanium dioxides synthesized via plasma enhanced atomic layer deposition”, *J. Vac. Sci. Technol. A* **36**, 021515(1-8) (2018). [DOI: 10.1116/1.5001552]
9. Recent Activities in Innovative Plasma Processing Group, AIST, Hajime Sakakita, Workshop on Plasma and Material Science, University of Tsukuba, 2019.3.14

以上