

目次

巻頭言

企業研究者に必要な条件と大学との連携	キオクシア株式会社 名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター	林 久貴	1
--------------------	-----------------------------------	------	---

研究紹介

大気圧プラズマユニット Tough plasma の応用	株式会社 FUJI	神藤 高広	4
------------------------------	-----------	-------	---

研究室紹介

金沢大学 理工研究域 電子情報通信学系 環境電力工学研究室	金沢大学	田中 康規 石島 達夫 中野 裕介 上杉 喜彦	8
----------------------------------	------	----------------------------------	---

学生のためのページ

プラズマエッチングとプラズマダメージの基礎	京都大学	江利口 浩二	13
-----------------------	------	--------	----

海外の研究事情

イタリア パドヴァ滞在記	長野工業高等専門学校	山田 大将	24
--------------	------------	-------	----

応用物理学会優秀論文賞

応用物理学会優秀論文賞を受賞して	ソニーセミコンダクタ ソリューションズ(株)	平田 瑛子	27
------------------	---------------------------	-------	----

応用物理学会講演奨励賞

sPFE によるシリコンナノロッド連続生成と LIB 負極特性	東京大学	田中 章裕 神原 淳	31
------------------------------------	------	---------------	----

国際会議報告

第34回電離気体現象国際会議／第10回反応性 プラズマ国際会議 (XXXIV ICPIG / ICRP10)	首都大学東京	枳久保 文嘉	34
---	--------	--------	----

The 24th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC-24)	大阪大学	茂田 正哉	36
6th International Workshop on Atomic Layer Etching (ALE2019)	ソニーセミコンダクタソリューションズ(株)	辰巳 哲也	37
AVS 66th International Symposium & Exhibition (AVS2019)	ソニーセミコンダクタソリューションズ(株)	辰巳 哲也	38
72nd Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2019)	首都大学東京	朽久保 文嘉	39

国内会議報告

第4回 原子層プロセスワークショップ	大阪大学	唐橋 一浩 浜口 智志	41
第13回 プラズマエレクトロニクス インキュベーションホール	東京工業大学 首都大学東京	赤塚 洋 内田 諭	42
2019年 第80回応用物理学会秋期学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会シンポジウム 『プラズマ制御「前駆体」が拓く生命科学と材料科学』の報告	大阪市立大学 愛媛大学 名古屋大学 東北大学	呉 準席 神野 雅文 近藤 博基 金子 俊郎	43
2019年 第80回応用物理学会秋期学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科内 分科内招待講演報告	九州大学	古閑 一憲	45
2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科内 海外招待講演報告	佐世保工業高等専門学校	猪原 武士	46

行事案内

12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 13th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2020 / IC-PLANTS2020)	豊橋技術科学大学 名城大学	若原 弘明 伊藤 昌文	47
--	------------------	----------------	----

2020年 第67回応用物理学会春季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会企画	九州大学	古閑 一憲	49
8th International Conference on Plasma Medicine (ICPM-8)	名古屋大学	田中 宏昌 堀 勝	51
73rd Annual Gaseous Electronics Conference (GEC73)	Sandia National Laboratory Applied Materials, Inc.	Ed Barnat Kallol Bera	52

掲示板

第18回プラズマエレクトロニクス賞 受賞候補論文の募集	名城大学	平松 美根男	53
令和元年度プラズマエレクトロニクス分科会 幹事名簿			54
令和元年度分科会幹事役割分担			56
令和元年度分科会関連の各種世話人・委員			57
活動報告			59
プラズマエレクトロニクス関連会議日程			61
当会報への広告掲載について			63
編集後記			64

企業研究者に必要な条件と大学との連携

キオクシア株式会社 プロセス技術研究所 林 久貴
(兼任) 名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター

東芝入社当時の状況

1989年に株式会社東芝 ULSI 研究所に配属されて以来 30 年間、半導体プロセス、特にプラズマを用いた微細加工（エッチング技術）に関わって来た経験から、企業研究者に必要な条件(心構え)について私見を述べてみたいと思う。

入社して真っ先に上司に言われた事は、「研究所に入ったからといって研究者になったわけではない。研究者になれ」と入社の際の浮かれた気分を一喝されたのを覚えている。

当時の半導体産業は日本企業が上位を独占しており、正に Japan as No.1 の時代であった。当時の事務所は活気にあふれ、怒号とタバコの煙で満ちており、カオスな光景であった。月曜の朝は特にひどく、週末に書いた週報を上司がチェックして「熱血指導」を事務所中に響き渡る声で実施していた。今の時代ではとても考えられない光景だが、その熱血指導を受けていた人が今では我が社の上層部におり、時折私も熱血指導を受けている。

上司から、研究者になりたければ、その分野で博士号を取れ、と言われた。現に上司の岡野晴雄氏（故人）、そのまた上司の堀池靖浩氏（現 筑波大学）も入社後博士号（論文博士）を取っていた。

まずは博士号を取ることを目標に掲げ、そのためには、査読付き論文 5 本の執筆、国際学会発表、特許提案、研究テーマの設定といった一連の準備が必要であった。

企業は教育機関ではなく、まして給料を払っているのだから、博士号を取るための研究などは存在せず、企業利益の捻出に貢献する研究でない

認められない。また、一旦研究を開始したとしても利益に結び付かない（成果の出ない）研究は直ぐにストップがかかる。

私は博士号を取るまでの 13 年間、またその後もエッチングの研究開発を続けてこられたが、こういう経歴の持ち主は企業では極めて稀だ。

会社を取り巻く状況および会社の方針、社内の人員配置、技術の重要性など、様々な要因から一つの技術を継続して研究できることは極めて珍しく、好きなプラズマエッチングの研究を続けてこられたという点で私は幸運だったと言える。

入社以来 30 年で、登録特許 117 件、国際学会発表 86 件、査読付き論文 34 件を残すことができた。学会発表や論文は、企業の技術力の PR だけでなく、科学技術の発展に寄与する企業研究者の重要な社会的貢献の一つだと考えている。

若い企業研究者の方に常に心掛けてもらいたいことは、企業の儲けに貢献する研究を見抜き、実証し続ける事が、研究活動を続けるために何よりも重要であるということだ。

人との出会いと技術との関係

人との出会いに関しても大変幸運だったと思う。博士号を取得した際、厳しくも丁寧に指導して下さったのは、当時東大にいた堀池靖浩先生だった。東芝出身ということもあり、大御所の先生であるにも関わらず気さくにプラズマ技術黎明期の苦労話や研究に対する考え方、取り組み方を直接指導して頂いたことは、その後の仕事の取り組み方に大いに役立った。博士号を取得した際、先生に「技術者としてのけじめをつけたな」と言われ、

当時アプライドマテリアルズに移られていた岡野氏からは「これでお前も一人前だな」と言われたことを今でも覚えている。

他にも技術研究組合 (ASET) に 1996 年から 98 年まで出向していた際の研究員の方々とは今でも学会などで一緒に仕事をさせていただいている。

また、元東芝で名古屋大学の堀勝先生、関根誠先生とも共同研究等で一緒に仕事をさせていただいている。

単に昔からの知り合いということではなく、互いの持つプラズマに関する技術・知識・経験に必要性を感じて関係が続いているのであり、技術的に意見がぶつかることも度々起こるが、自分も技術を磨き続け、他者から必要とされる存在であり続けたいと願っている。

岡野氏がよく言っていた言葉に、共同研究も、学会も「仲良しクラブじゃダメなんだ」その通りだと思う。

半導体産業における研究

半導体産業は浮き沈みが激しく、また製品の開発スケジュールも短いため、じっくりと研究に取り組む事が出来ないとよく耳にします。しかし、開発テンポが速いという事はそれだけチャンスも多いということだ。私の大学時代の知り合いで、リニアモーターカーの開発をやりたくて JR 東海に入った人がいますが、30 年経った今も実用化されていない。

その間私は、微細化 (<90nm) 対応多層マスクプロセス技術や新規エッチング装置の開発などをおして 10 程度の製品に対し、プロセスレシピや製造装置の量産展開を実現してきた。

プロセスレシピであれ、装置であれ、半導体工場で量産展開されることは、極めて困難な仕事で、いわゆる「死の谷」を超えてきた技術のみが、直径 300mm ウエハの外周数ミリまで、数 nm オーダーの精度で、24 時間 365 日の稼働に耐えうる

ことができる。

工場に並ぶ数百台の装置が、自分の開発した技術を利用して、製品を休みなく作り続けているのを見るのは企業技術者の大きな喜びです。

尚、技術が量産に取り入れられるには、その技術の持つ進歩性だけではなく、タイミング、コストが重要となってくる。

特にメモリ製品にとってコストは最重要で、いくら優れた技術でも、トータル製造コストが容量の増加以上に上がっては採用されません。

例えば、EUV 露光技術に関しても一番の課題は、単位時間当たりの処理能力(スループット)です。どんなに微細なパターンができてでも製造コストが上がってしまえば量産には採用されません。

つまり、研究の段階で最優先に解決すべき課題を知り、それを解決することが実用化にとって極めて重要です。

大学と企業研究のあり方

AI、5G、自動運転の発展に伴い、半導体産業はますます巨大化、技術の高度化が予想されています。特に装置産業は高度化が進んでおり、EUV 露光装置など大規模な装置は、大学で研究することが難しい状況となっています。

プラズマエッチングに関しても、現在喫緊の課題である超深穴加工 (超高アスペクト比エッチング) では、数十キロワットの高周波電力を 300mm ウエハに投入することで、アスペクト比 (深さを穴径で割った値) 50 の加工を実現しています。実験室レベルの装置でこのアスペクト比を加工することは非常に困難だと思います。

高性能な量産装置をベースとした性能向上は装置メーカーとデバイスメーカーが共同して行う方が早道です。

そこで、大学に求められる研究とは、既存装置をベースとした数十パーセント程度の性能向上、いわゆる (improvement) ではなく、数倍以上の

性能飛躍、すなわち (innovation) だと思えます。

大学は、全く新しい概念に基づいた装置、新規ガスや材料、これまで利用されてこなかった温度域や圧力域など、「ぶっ飛んだアイデア」を検討する場であって欲しいと願う。そこで試した無数のアイデアのうち、1 つでも 2 つでも芽が出て実を結ぶことがあれば、大成功でしょう。

産業応用を実現するには、大学と企業が課題を共有し、課題解決への道筋（時間軸とマイルストーン）を描く事が非常に重要で、その途中途中で計画の見直しや、場合によっては中止する勇気が非常に重要だと思えます。

その中でも特に重要なのが時間です。大学と企業ではどうしても時間に対する意識が異なり、時間管理がルーズになってしまいます。1 度タイミングを逸すると、ライバル技術もどんどん先に進んでしまい、2 度とチャンスが巡ってこないということが頻繁に起こります。

たくさんの新規アイデアを短時間で試し、タイミングを逃さないということが大学 - 企業間の共同研究では最重要事項だと思えます。

また、今後はシミュレーション技術の重要性が増してくると思えます。例えば深い穴の中で起こっている現象は直接計測することが不可能なので、シミュレーション技術を駆使して穴の中での現象を物理的、化学的に理解して現状の限界を把握する。そこからあるべきプラズマの状態を導き出し、ブレイクスルー技術を導き出すことが期待されています。

若い研究者の方へ

私の入社した当時 1990 年の世界半導体売上ランキングを見ると、

1 位 NEC、2 位 東芝、3 位 日立、4 位 Intel、5 位 Motorola、6 位 富士通、7 位 三菱、8 位 TI、9 位 Philips、10 位 松下

と日本の会社が 6 社も入っていました。

2018 年の同様のランキングを見ると、

1 位 Samsung、2 位 Intel、3 位 SK Hynix、4 位 TSMC、5 位 Micron、6 位 Broadcom、7 位 Qualcomm、8 位 東芝（メモリ含む）、9 位 TI、10 位 NVIDIA

と日本の会社が 1 社だけとなりました。と同時に、1990 年と 2018 年に同時にランクインしているのは Intel、TI、東芝の 3 社のみです。

この 30 年、いかに業界の変化が激しかったかが伺えます。

ただし、日本の半導体メーカーだけが落ちこぼれていったかというところではなく、1990 年の世界時価総額ランキングにはトップ 10 に日本企業が 7 社入っていました。ところが 2019 年のランキングではトップ 10 はゼロ、トップ 50 にトヨタが入るだけになってしまいました。

日本企業がこの 30 年で総じて弱くなってしまい、特に半導体産業は衰退が目立ったので、学生の人気が出ないのは仕方のないことだと思えます。

しかし世界的に見ると半導体産業は成長産業であり、人気の高い業種です。

また、プラズマ関連技術者の就職先として、半導体業界は依然として大きな割合を占めていると思えます。

プラズマ技術に期待するところも大きく、特にメモリ製品関連では、テクノロジードライバーがリソグラフィーからドライエッチングに変わり、多くのプラズマ技術者が必要となっています。

これからは企業間、企業と大学間の連携が、国の内外を問わずますます重要になってくると思えます。

プラズマに興味がある方で実用化に興味のある方は、是非半導体業界へ足を踏み入れることをお勧めします。競争は激しいですが、世界を相手に技術を磨くことができ、波及効果も抜群です。

研究紹介

大気圧プラズマユニット Tough plasma の応用

株式会社FUJII ロボットソリューション事業本部 神藤 高広

1. はじめに

自動車業界においては HEV/EV/PHV（ハイブリッド車/電気自動車/プラグインハイブリッド自動車）の動きが一気に加速すると同時に、車体の軽量化も求められ高機能樹脂材料の採用が増加傾向にある。

ものづくりにおいては、金属の溶接・ボルト締結技術から接着剤を用いた接着・接合技術の利用比率が増えている。このため、従来の樹脂材料の接着前表面改質処理法のエタノール洗浄や火炎処理、プライマー塗布に代わり、より安定且つ高い品質を実現させる大気圧プラズマ処理について関心が高まりつつある。

弊社では、接着剤・塗料・コーティング材などを利用した接着・接合に適した表面状態をつくり出す装置として、大気圧プラズマユニット Tough Plasma を開発している。

ここで、Tough Plasma の内部構造を図 1 に示す。Tough Plasma はプラズマ生成部の半閉鎖系空間に不活性ガスの窒素を充満させ、改質効果を期待する活性ガスの酸素を混入する。さらに、制御された高電圧を印加する事によりプラズマ状態を安定的に作り出し、高効率に酸素ラジカルを生成する事ができる。

プラズマ生成部では電子と、電子を失った原子（＝プラスイオン）は同等に存在し電気的には中性を示し、処理対象物が樹脂や金属、電子部品の場合でも電気的ストレスを与える事なく表面改質が可能である。

又、Tough Plasma はこの半閉鎖系空間内で酸素をプラズマ化させる為、周囲の環境外乱に影響

される事なく安定且つ高密度なラジカル生成を可能にしている。

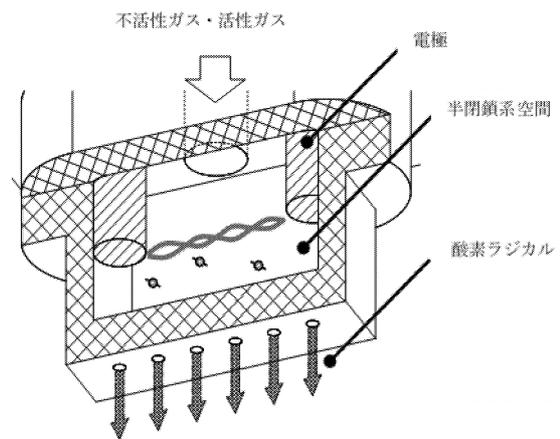


図 1 プラズマ生成部のイメージ

Tough Plasma で生成された酸素ラジカルは非常に反応性が高く、基材表面と接触する際に基材にエネルギーを分け与え、安定する過程で基材表面が水酸基やカルボキシル基などの極性基が形成されることで表面が極性化される。接着剤・塗料やコーティング材と水素結合するため、結果として密着力が向上する。

また、Tough Plasma は非平衡プラズマを高効率に作り出すための制御機器・発生部・照射機構を備えている。このため、樹脂の融点温度を超える事なく反応性の高い酸素ラジカルを基材表面に照射がすることが可能である。

表 1 のように、融点温度の低いポリプロピレンにおいても照射距離 15mm 以上であれば、表面にダメージを与える事なく表面改質を行う事ができる。

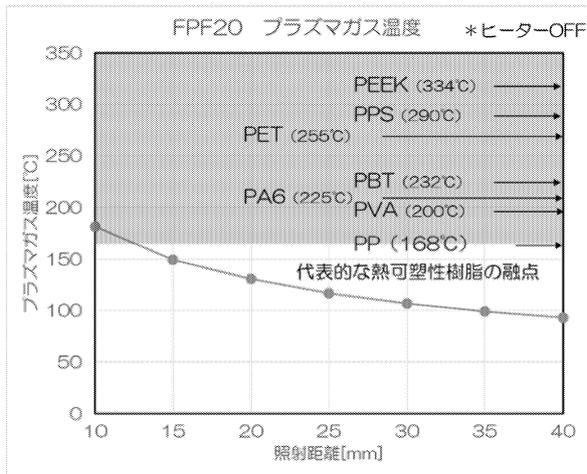


表1 プラズマガス温度

2. 研究内容

Tough Plasma は、先にも述べたように半閉鎖系空間でプラズマ状態をつくり出し、高密度に酸素ラジカルを生成する。

真空紫外吸収分光法[1]により酸素ラジカル絶対密度を測定した結果を表2に示す。測定に使用した装置は Tough Plasma の従来機と新機種 FPF20-GM のどちらも半閉鎖系空間に不活性ガスを充填させ、活性ガスの酸素を混入し高電圧を加えプラズマ化し酸素ラジカルを生成させる構造である。

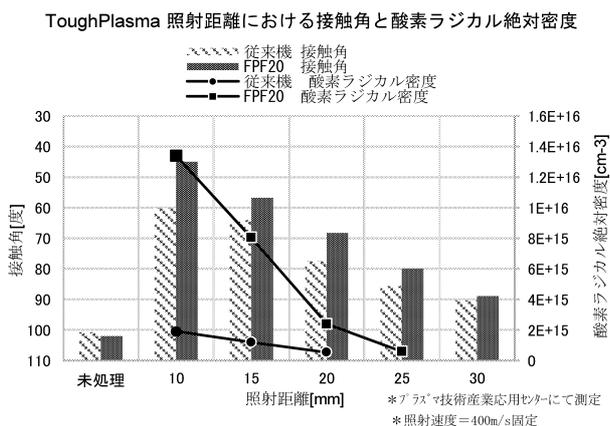


表2 酸素ラジカル密度

酸素ラジカル密度はプラズマ装置の放射口から各々10mm、15mm、20mm、25mm、30mmの

離れた位置で測定している。また、同条件の照射位置にポリプロピレンを設置しプラズマ照射部をロボットに搭載し400mm/sの速度でプラズマ照射した場合の接触角を棒グラフで示している。接着前の表面改質状態を確認する方法として固体試料表面に液体を滴下させ固体と液体の接触角を測定した。

接触角とは、固体試料表面に液体を滴下しときの成す角度を指す。接触角の値が小さい場合は濡れ性が良く親水性を示し、固体表面に対する液体の親和性が高く接着強度を高める表面状態と考えられる。

照射距離10mmのとき、酸素ラジカル絶対密度は FPF20-GM が従来機の約7倍を示している。この時、ポリプロピレンの表面改質状態を示す接触角は約45°を示し十分な濡れ性を実現できている事がわかる。同様に15mm、20mm、25mmにおいても FPF20-GM は高密度な酸素ラジカルを生成し樹脂材料の表面改質を向上させている事がわかる。

また図2のように、プラズマ生成部で発生した酸素ラジカルは、特殊設計を施した先端ノズルを装着する事によって指向性が高く、処理ムラの少ない照射を実現させた。

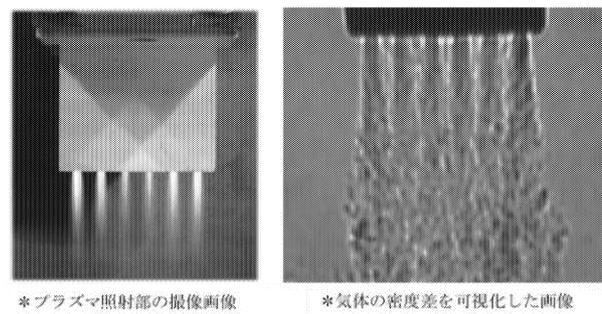


図2 ノズルから照射されたプラズマ画像

次に熱可塑性樹脂のひとつであるポリプロピレンに大気圧プラズマ処理を行った場合の事例につ

いて紹介する。

ポリプロピレンは安価でリサイクルしやすく、耐候性や耐摩耗性、機械的強度にも優れた素材であるため、自動車部品や家電部品、日用品など幅広く使用されている。一方で、ポリプロピレンは炭化水素のみで構成されており、分子内に親水基を持たないことから、表面に塗膜形成を行おうとすると、ポリプロピレンと塗膜層との間で界面剥離が起こり接着や印刷などには不向きであることが知られている。塗膜層との密着性を高めるためには、塗膜と基材表面の親水基が水素結合する必要がある。

ここで、ポリプロピレン表面に大気圧プラズマ処理を行なった様子を図3に示す。

水接触角 95° と疎水性であったポリプロピレン表面が水接触角 50° へと変化し、親水性が向上した。

大気圧プラズマ処理を行うことで親水基を持たないポリプロピレンなどの素材表面でも容易に親水性を向上することができるため、塗膜層との密着性向上も期待できる。

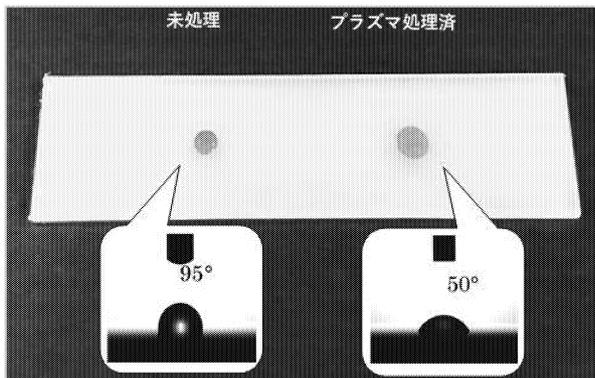


図3 ポリプロピレンの水接触角

さらに、大気圧プラズマ処理を施したポリプロピレン表面について、光電子分光分析(XPS)で解析を行った結果を図4に示す。

炭化水素のみで形成されていたポリプロピレンの最表面と酸素ラジカルが反応し、表面に親水基

(C-O および C=O)が生成されることが分かった。

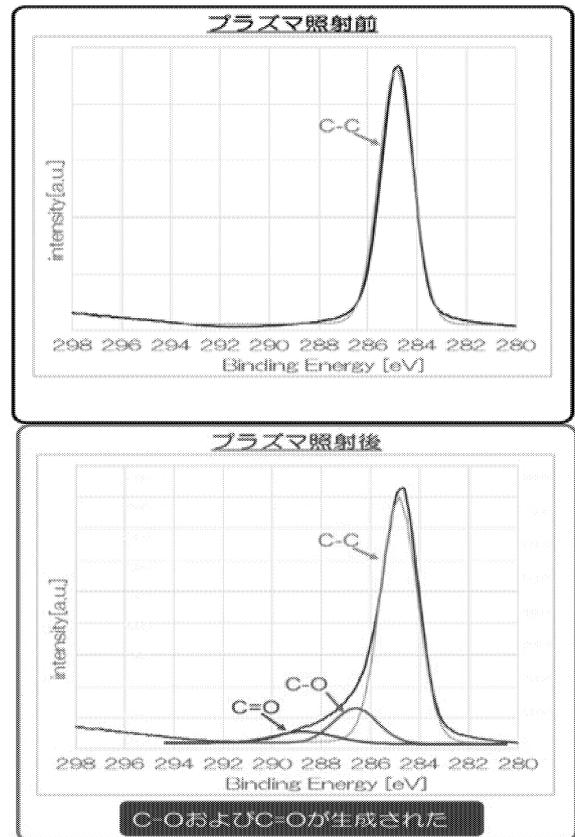


図4 XPS 分析結果

炭素繊維強化プラスチック(CFRP/CFRTP)は、樹脂を炭素繊維で強化することで高い強度や剛性を得ることができ、鉄に比べて比重が約 1/4 という特徴があることから自動車だけでなく航空・宇宙やスポーツ、レジャー分野にも幅広く使用されている。

炭素繊維もポリプロピレンのように親水基を持たないため、炭素繊維と樹脂との密着性・含浸性に課題を抱えており、その結果成型された炭素繊維強化プラスチック自体の物性低下などの問題要因となる。そこで、炭素繊維および炭素繊維強化プラスチックの密着性・含浸性を向上させるために、大気圧プラズマ処理を行い、親水基が付与され親水性が改善されるか検証を行った。

図5に炭素繊維単体の動的接触角データを示す。

炭素繊維単体に大気圧プラズマを照射し、純水への入水（前進）時と引き上げ（後退）時の荷重を測定し炭素繊維の親水性を評価したところ、動的接触角は 68°から 34°に改善された事を確認した。

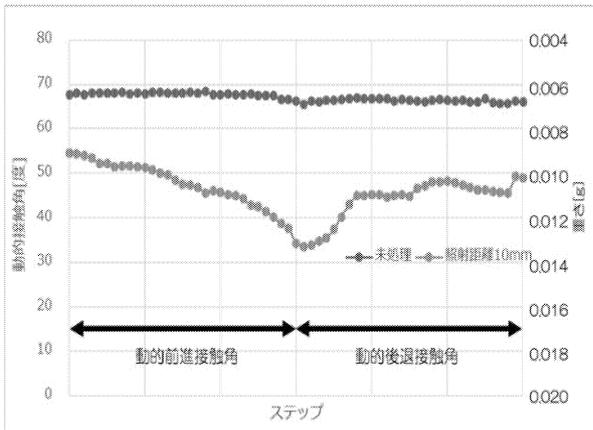


図 5 炭素繊維の動的接触角

また、炭素繊維強化プラスチック表面は図 6 にあるように水接触角 90°と疎水性であるが、大気圧プラズマ処理により水接触角 10°へと変化し、親水性が向上した。このことから、炭素繊維強化プラスチックとそれを構成する炭素繊維のいずれも親水化できることが示唆された。

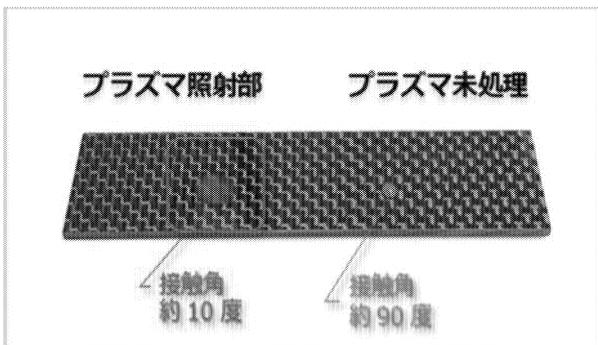


図 6 炭素繊維強化プラスチックの接触角

ポリプロピレンなどの単体樹脂と同様に炭素繊維強化プラスチックも密着性を向上させることが期待できる。

3. おわりに

今回は様々な樹脂の表面改質方法として大気圧プラズマユニット **Tough Plasma** の効果を紹介しているが、樹脂や複合材料だけでなく、弊社では金属やセラミック、異種材料の接合においても同様にプラズマ効果を実現している。

図 7 のように、アルミニウム表面についても、大気圧プラズマ処理により濡れ性が向上することが分かっている。

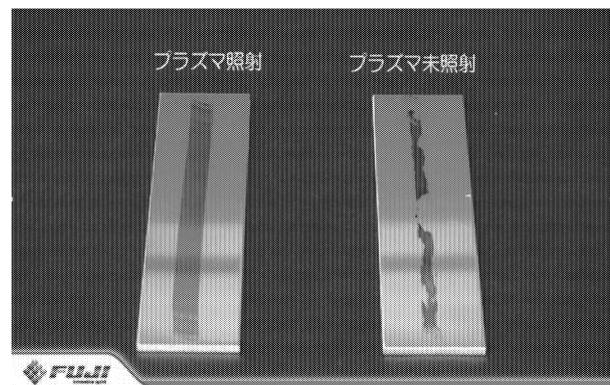


図 7 アルミニウムの濡れ性

大気圧プラズマ処理は自動車分野に限らず幅広い分野において役立つことができると考えられ、今後のものづくりを大きく変貌させる可能性を秘めている。

弊社では、今後も高密度酸素ラジカルの生成技術の研究開発を進めると共に、国内外で使うことのできる安定且つ高品質な装置の開発を行っていく。

参考文献

[1] H. Nagai, et al., Rev. Sci. Instrum. 74, 3453 (2003)

研究室紹介

金沢大学 理工研究域 電子情報通信学系 環境電力工学研究室

金沢大学 田中 康規・石島 達夫・中野 裕介・上杉 喜彦

はじめに

金沢大学角間キャンパスは、金沢城・兼六園（図 1）がある金沢市中心から、車で 15 分程度のところに位置している。同大学理工研究域電子情報通信学系環境電力工学研究室は角間キャンパスの自然科学研究棟 2 号館 5 階にあり、現在、上杉喜彦教授・田中康規教授・石島達夫教授・中野裕介助教の 4 名の教員で構成されている。学生数は 2019 年 10 月の現時点においては、博士後期課程学生 4 名、博士前期課程学生 16 名、卒研生 9 名である。合計 33 名以上の人数を有する研究室は、同一学科（学類）内にはなく、最大勢力となっている。

環境電力工学研究室のルーツは、以前、金沢大学工学部電子・情報学科に高嶋武教授・作田忠裕教授が構成していた、高電圧・大電流を対象とする電力工学研究室にある。その研究室に 1998 年に田中が助手として採用され、2000 年の改組に伴って研究室名を「環境電力工学研究室」と名付けたのが当研究室としての始まりである。この研究室名は、21 世紀の電力工学は環境と調和すべきという作田教授の思いからつけられたものである。

2003 年 1 月に作田教授がなくなられた後、2003 年 8 月に上杉教授が名古屋大学から加われ、2010 年 4 月に田中教授となり、さらに 2011 年 11 月に石島先生が准教授として来られ 3 人の教員が所属することになった。これにより核融合プラズマ（上杉教授）・熱プラズマ（田中）・非平衡プラズマ（石島教授）の異なる領域を専門とする教員が構成する、現体制の原型の「環境電力工学研究室」が生まれた。2019 年 1 月に中野助教（高電圧・真空放電）が加わり、さらに領域を広げた構成と



図 1. 兼六園内の雪つり風景

なっている。偶然にも、上杉教授、田中教授、石島教授、中野助教は、いずれも名古屋大学出身あるいは名古屋大学に職歴を有する人物である。「環境電力工学研究室」の名前をそのまま使用しているのは、金沢大学電気電子系の研究室において、ほかに電力・電気エネルギー系に関連する研究室が無く、その教育を一手に担っていることを学生にもアピールするためである。本研究室では、教員の専門分野においてそれぞれの研究を指導学生とともにそれぞれが行うものの（上杉班、田中・中野班、石島班）、学生の席は完全に混合されており、毎週の研究報告会、論文紹介、輪講、懇親会・パーティ（図 2）などのイベントなどは完全に一体として行っており、運営も一体化している。研究報告会では、それぞれの教員から、専門の異なる視点からの見解・アイデア・意見を自由に出し合い、実験アプローチ法・現象を考えたり、データ処理法（プログラム）、数値的なアプローチ装置の共用を行ったりすることで、より複合的な問題



図2. 卒業生・修了生を交えた懇親会（2016/10）

に取り組めるようにと考えている。特にそれぞれの教員が有する測定手法・装置を、別の専門領域の箇所で使用できたりすること、分析の知識などを交換できることは、極めて有用である。

上杉教授は核融合プラズマ・高熱流プラズマ，田中教授は熱プラズマ・アークプラズマ，石島教授は非平衡プラズマ・液中プラズマ，中野助教は真空放電・高電圧がそれぞれの専門である。それぞれにおいて数種のテーマで研究を進めており，企業様との共同研究もいくつか行っている。

研究内容の数例の紹介

研究内容のいくつかの例をピックアップして以下に紹介する。

(1) 変調熱プラズマを用いた機能性ナノ粒子の高効率高速生成手法の開発

ナノ粒子は、直径が 100 nm 以下の超微粒子を指す。粒径が極端に小さくなると比表面積が著しく大きく表面反応が促進されるほか、バルク材では見られない特有の化学的・光学的・電気磁気学的性質が発現する。そのためナノ粒子は、材料部品、電気電子、情報通信機器、化成品・医薬品・化粧品、住宅などの産業、化学・物理・生物などの基礎研究において、技術ブレークスルー材料として期待されている。特に、電子・環境・エネルギー・医療分野におけるナノ粒子のニーズが確実に高まっている。ナノ粒子応用の社会普及には、

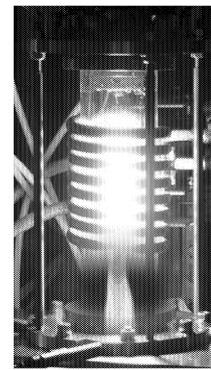


図3. ナノ粒子生成中の熱プラズマからの発光。TiO 分子スペクトル放射強度分布を重畳

ナノ粒子合成を産業化する必要がある。そのための解決課題の一つに、機能性ナノ粒子の大量生成・量産化がある。すなわちナノ材料を大量に、高速にかつ高精度に、安価に選択的に高純度に生成する技術の確立が求められる。

この問題に対して本研究では、我々が独自開発した「変調型誘導熱プラズマ(PMITP)」と「原料時間制御投入法(TCFF)」を組み合わせた

「PMITP+TCFF 法」を考案し、これにより大量に機能性ナノ粒子を生成する手法を確立することを目的としている。変調誘導熱プラズマの入力電力が大きい時間帯において原料を大量に導入し、原料を効率的に完全に蒸発させる(図3)。次に、原料を止めると同時に入力電力を低下させて熱プラズマの温度を急激に低下させる。これにより原料の

蒸発蒸気が過飽和状態となり核生成が生じ、これが成長することでナノ粒子が大量に生成できる。現状では機能性ナノ粒子（酸化物、窒化物、純材料）の場合、入力電力 20 kW において数百 g/h の高レートでナノ粒子に成功している。

(2) 変調型誘導熱プラズマによる高速非平衡プロセスの開発

近年は無電極でクリーンな熱プラズマ空間を形成できる誘導結合型高熱流プラズマが材料分野・プラズマ化学プロセス分野で注目されている。しかし、熱プラズマはガス温度が極めて高く、さらにその制御が容易でなく、基板や生成物に熱的なダメージを与える欠点がある。このため、プラズマのガス温度・流速、反応を制御し、高速プロセスを実現できる新手法の確立が強く望まれている。

本研究では、この制御問題を解決するために、大きな擾乱を時間的に与える「パルス変調高熱流誘導プラズマ PMITP」「任意波形変調熱プラズマ AMITP」、さらには「フィードバック制御型誘導熱プラズマ FBC-MITP」など様々なタイプの変調型誘導熱プラズマ MITP を独自開発している。これにより数十 kW オーダの高熱流プラズマを意図的に時間変動させ、熱流・イオン/ラジカル密度の時間平均値を制御する新手法を実現できる。さらに基材の表面改質に MITP を用いれば、プラズマ下流部における熱流の低減と活性種密度の増加現象と同時に実現できることを見出している。この二現象は局所熱平衡理論に相反する現象で、高熱流プラズマにおける反応論的非平衡性から発現することを示している。

(3) 大面積処理を可能とする新型ループ/平面型高気圧高温変調熱プラズマ源の開発

誘導熱プラズマ装置は、従来、円筒形状の石英容器を用い、その周りに設置したコイルを設置し

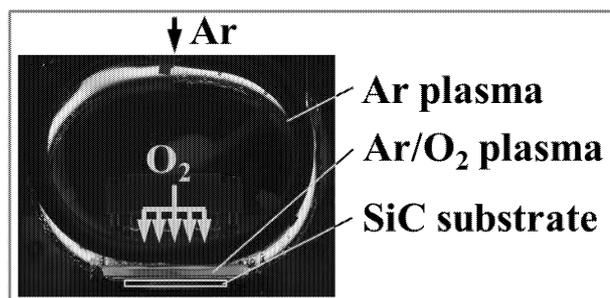


図 4. ループ型誘導熱プラズマからの発光。

た配置としている。このコイルに高周波電流を流すことで、石英管内に円柱形状のプラズマを維持する。しかし、このような円柱形状のトーチでは、熱プラズマ材料プロセスを大面積化する場合に限界がある。すなわちこの形状のトーチを大面積化プロセスに使用しようとする、円柱型トーチの直径を大きくする必要がある。この場合、大きな容積をもった誘導熱プラズマを維持することになり大電力が必要となる。さらに誘導熱プラズマは、原理的にローレンツ力により径方向に収縮しようとしてしまう。そのため大面積化が難しくなる。

本研究では、熱プラズマによる大面積処理を目指し、円筒形状の石英管の代わりに、石英容器の形状をプラズマに沿ったループ型にした「ループ型誘導熱プラズマトーチ」を開発している(図 4)。これらの一様性をさらに向上させるとともに、超高温アニーリング処理への応用、反応性分子ガスを導入する効果と、基材表面の大面積改質、膜生成などを視野に入れている。

(4) 大電流アーク遮断現象と環境低負荷消弧媒体の探索

現在の高度情報化社会を支えるのは、紛れもなく高品質・高信頼性の大規模電気エネルギー供給である。この超高压送電においては事故時に流れる短絡電流は 80 kA 近くにも達する。電力用遮断器はこの大電流を高速に確実に遮断するという責

務を課されている。事故時に発生する大電流を遮断する技術は、高信頼性を有する電力伝送の中核基盤技術であり、しかも電力機器の中で最も技術革新の難しい分野である。最近では再生可能エネルギーの、系統への大規模導入が検討されており、この場合直流系統で運用することも視野に入れる必要がある。また一方で地球温暖化の観点から大電流遮断技術においても環境低負荷化が課題となっている。現在、電力用遮断器は SF₆ 吹付け形が主流である。しかし SF₆ は温室効果が CO₂ の 23900 倍(100 年換算)と極めて高く、気候変動枠組み条約締結国 COP 会議において排出削減ガスに指定されている。このため、SF₆ の使用量を抑えたコンパクトで高エネルギー効率を有する消弧チャンバ、SF₆ に替わる消弧媒体や新概念を導入した遮断方式の実現が、現場で切望されている。

本研究では、大電流アーク遮断現象の解明に向けた「高精度実験」と「高精度数値解析」の両者を強い共同研究で行い、今世代はもとより次世代電力システムで必要となる「コンパクトで高効率なアーク遮断技術」の根幹を担うアークプラズマ遮断現象の基礎学理を明らかにするとともに、新しい遮断技術に繋げるようとしている。最近では、環境負荷の低減の観点から真空遮断器の高電圧適用が進んできている。そこで、真空アークにも着目し、真空アークの遮断現象の減衰過程を実験的にも数値解析的にもアプローチしている。特に数値解析モデルでは、流体ベースの粒子法を導入した新しい解析モデルを提案している。

(5) 水を原料ガスとしたマイクロ波励起プラズマ生成法の開発と応用

近年、非熱平衡プラズマを液中または液表面から作用させ、溶液との化学反応を低温で促進させるプロセスへと応用することを目指した研究が様々な分野で行われている。これは、新



図 5. マイクロ波励起液中気泡内プラズマの生成の様子

規のプラズマ生成法が発展してきたことに加えて、液体を用いる工業プロセスの適用分野の多様性とその波及効果の拡がり期待される。例えば、水が関与する液体-プラズマ相互作用においては、強い酸化力を有する OH ラジカルによる高速プロセスを期待できる。しかし、OH ラジカルは、大気中の寿命が極めて短く、ラジカル生成領域と作用領域を近接させる必要がある。本研究室では、水を原料ガスとしたマイクロ波励起プラズマ源の開発を進めている。マイクロ波により水を加熱・気化させ、マイクロ波の電界によってプラズマを生成させる技術である。マイクロ波は、水などの極性分子の加熱によって気化させることができるため、導電率が小さい超純水を原料ガスとすることができ、クリーンなプロセスへの応用が期待できる。数 kPa といった減圧プラズマとしては、やや圧力が高い条件においても安定してプラズマを生成させることができる。水中気泡内で発生させた、扁平なマイクロ波プラズマを図 5 に示す。半導体製造プロセス工程におけるレジスト除去への適用に向けた研究開発を進めている。

(6) 大気圧非平衡プラズマによる粉体表面処理方法の開発

大気圧非平衡プラズマは、高価な真空装置を必要としないことから、材料の表面改質や排ガス処理、医療分野への応用など多くの分野での利用とともに研究開発が進められている。材料の中でも粉粒体は、電子材料、食品素材、化粧品、医薬品、など幅広く利用され用途が多く、機能性を付与することで付加価値を高めることが求められている。特に、食品業界では低温技術を用いた粉粒体食品素材に対するバクテリアの殺菌法の開発が望まれている。一般的な食品の殺菌プロセスでは高温殺菌法が主流である。しかしながら、高温殺菌法では熱による食品の損傷が生じるため、色彩や臭気、味、栄養素などの要素を保持することが難しい。したがって、熱による品質の劣化を抑え、低コストで処理できる新しい低温殺菌法の需要が高まっている。非平衡大気圧プラズマは、これらの問題を解決する手法の1つとして期待されている。これまでに、粉粒体素材を処理するため、プラズマジェット型や流動床型、円筒型、回転円筒型などのリアクターが報告されている。照射対象を静置した場合には、粉粒体が重なり合う表面にラジカルが作用しないと考えられるため、粉粒体の全表面処理がなされないことが課題である。最も報告が多い流動床型では、低圧や大気圧下における処理が行われているが、処理中に粉粒体の重量分布が生じるため処理時間の調整が困難である。回転円筒型では He ガスを用いた粉粒体の処理が報告されているが、希ガスである He を利用する処理はランニングコストが高く実用化には不向きである。プラズマの高密度化のため印加電圧の周波数を増加させると、プラズマ生成用の電源関連の値段は高くなる。

本研究では、比較的安価である商用周波数の高電圧電源を用い、粉粒体を分散させつつプラズマで表面処理することを目的として、回転電極型の

誘電体バリア放電装置(RE-DBDR)の開発を行っている。本装置の特長は、電氣的に浮遊している薄い平板電極を高速回転させる点である。電極の高速回転によりプラズマ処理中の粉粒体材料の分散性を高め、粉粒体の表面を効率よく連続的に処理する手法を提案している。

(7) 大気圧プラズマ支援によるプラズマ成膜方法の開発

太陽電池、トランジスタ、ディスプレイ等、電気機械器具や情報通信機器などに用いられる電子デバイスの市場は、今後、大きくなることが予想されている。電子デバイスの製作には有機膜や無機膜の成膜技術が不可欠であり、低コストで環境負荷を低減可能な製膜技術は、これからの社会の発展を支える上で重要である。

電子デバイスは有機や無機膜を製膜しパターニングすることで製造される。代表的な製膜法のスパッタ法は、緻密膜を再現よく製膜できるが、製膜時には真空環境とする必要があるため装置コストが高い問題がある。塗布法は、印刷技術のため装置が小型で製造コストが格段に安い溶媒を用いているため溶媒の回収処理が必要となる問題があった。そのため、新しい製膜手法が求められている。これらの課題の解決を目指し、溶液を気化させ大気圧非平衡プラズマにより前駆体を形成させ、製膜する手法の研究開発を行っている。

おわりに

環境電力工学研究室では、温度域・密度域の大きく異なる様々なプラズマを対象と共同して研究を進めていることが特徴の一つである。複合的視点から、研究教育活動を進めていきたいと考えている。

プラズマエッチングとプラズマダメージの基礎

京都大学 江利口 浩二

1. はじめに

プラズマプロセスは幅広い産業分野で利用されている。そこでは、目的に応じた（反応性）気体に（主に減圧下で）外部よりエネルギーを供給し、一部の原子・分子を解離・電離させる。解離・電離した原子・分子の物理的・化学的特徴を有効活用し、（原子スケールで）所望の反応（加工）を実現する。原子スケールの物理化学的処理加工という意味で、プラズマプロセスは従来の機械加工とは異なる特徴をもっている。このプラズマプロセスを利用して生産されている最も身近なものに電子デバイスがある。現在の高度情報化社会を支える多くの電子デバイスの心臓部である大規模集積回路 ULSI (Ultra-Large Scale Integration) circuit[1] の製造工程において、プラズマプロセスは重要な役割を担っている。20 世紀半ばに ULSI を構成するシリコン (Si) と二酸化シリコン薄膜 (SiO₂) からなる金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor : MOSFET) [2] が開発され、集積回路技術[3] が発明された。その後、MOSFET の加工にプラズマエッチングが採用されはじめた。現在、最先端 MOSFET の最小加工寸法は 7 nm に至り [4]、1 つの ULSI の中に数十億個の MOSFET が搭載されている。低コストでこれらを実現するために、プラズマエッチングには原子レベルの高い加工精度（～1 nm レベル）が必要とされている。そのプラズマエッチングは、反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching : RIE) と呼ばれるメカニズム [5] で実現されている。

10 nm レベルの製造技術では、当然ながら原子スケールの不純物や欠陥の存在が問題となる。

「MOSFET 集積化」（スケールリング則 [6, 7] と呼ばれる）の歴史を振り返ると、例えば、III 族および V 族の元素は単結晶シリコン (IV 族) の特性を大きく変動させる”良い”不純物として利用されている [1]。一方で、Si 基板材中の酸素 (O)、鉄 (Fe)、SiO₂ 膜中のナトリウム (Na) は電気特性・信頼性を劣化させる”悪い”不純物、つまり「欠陥」として認識されている [8]。技術発展を経て 1990 年代には、これらはかなりのレベルまで低減された。ところが、これら欠陥の技術的制御が可能になると、新たな問題が報告され始めた。その 1 つが本稿の主題であるプラズマダメージである。RIE では、様々な反応性粒子、高エネルギーイオンが利用されている。これら元素がもし、プロセス中の相互作用で新たに「欠陥」を形成すれば、MOSFET の電気特性・信頼性を劣化させることは容易に類推できる。この機構が「プラズマダメージ (Plasma-induced damage: PID)」である。現代社会は最先端のエレクトロニクス技術を基盤としている。電子デバイスの消費電力、信頼性は工学的な重要課題でもある。詳細は後で述べるが、MOSFET 中の「欠陥」の存在は消費電力を増大させるとともに信頼性劣化を誘発することがわかっている。つまり PID は最終的に我々の日常生活にも影響を及ぼす。

本稿では、プラズマプロセス、特にプラズマエッチングにおける欠陥形成（プラズマダメージ）について記述する。“学生のためのページ”であることを鑑み、可能な限り概要がつかめるように基礎的記述に重点を置いている。もし興味があれば、詳細については、例えば参考文献 [9-11] を参考にされたい。

2. プラズマエッチングとプラズマダメージ

2-1 プラズマエッチング

プラズマエッチングに用いられるプラズマは、電子、イオン、活性種（ラジカル=励起原子・分子）から構成される。大半は活性種である。プラズマエッチングの主要な機構は RIE である。RIE では、プラズマ中で生成した活性種を被エッチング材表面に吸着させ、表面に入射するイオンの運動エネルギーを利用して、活性種と被エッチング材との反応を促進する。この RIE メカニズムは、1979 年に Coburn と Winter によって明らかにされた[12]。塩素ガスによるシリコンの RIE の概念を図 1 に示す。近年、RIE のメカニズムは計算科学、分子動力学 (Molecular Dynamics: MD) 法による表面反応シミュレーションによっても精力的に研究されている[13]。

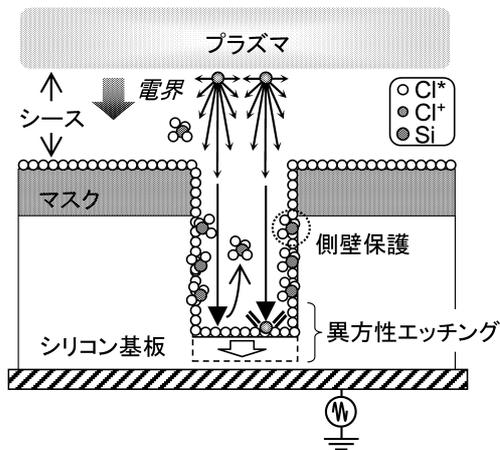


図 1 反応性イオンエッチングの概念図（塩素プラズマによるシリコンのプラズマエッチング例）

RIE プロセス設計における重要なパラメータの 1 つが入射するイオンのエネルギー (E_{ion}) である。外部からのエネルギー供給によりプラズマが維持される場合、プラズマ中では、全体としては熱的非平衡であるが、電子、イオン、中性粒子それぞれは局所熱平衡状態（すなわち温度によって

分布関数が定義できる状態）になっている。電子とイオンのフラックス（粒子束）の違いにより、結果として固体壁とプラズマの境界にはシースと呼ばれる領域が形成される[5]。シース領域での電位差は、フラックス（粒子束）の違いから決定される。電位差 (Φ) は

$$\Phi = -\frac{kT_e}{q} \ln \sqrt{\frac{M}{2\pi m_e}} \quad (1)$$

のように求められる。ここで、 k はボルツマン定数、 T_e は電子温度、 q は素電荷、 M は入射するイオンの質量、 m_e は電子の質量である。RIE では、被エッチング材（ウエハ）が置かれたステージにさらに電力を印加する。その機構により、電位差を Φ よりもさらに増大させ、結果として E_{ion} を大きくし反応促進を図っている。 E_{ion} を大きくすることは、図 1 から予測されるように（シース内での粒子間の衝突を無視すれば）、イオン軌道の指向性が高くなり垂直形状が実現される。垂直形状はエッチングマスクに対する加工精度向上を意味する。最先端 RIE プロセスにより現在では、 ~ 1 nm レベルの加工精度が実現されている。

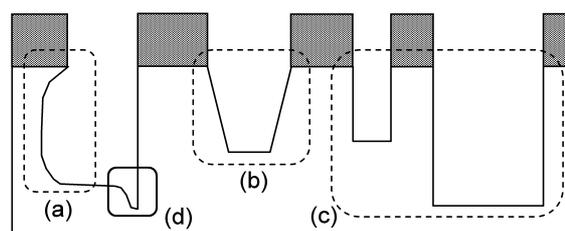
2-2 プラズマエッチングにおける課題

RIE では、高エネルギーイオン（多くの場合、100 eV 以上）が被エッチング材料表面に入射する。これらイオンの軌道は、エッチング形状を支配する。しかし、前述した「 E_{ion} を大きくして垂直形状を実現する」というアプローチだけでは、現在の最先端プラズマエッチング技術は実現できない。詳細は省略するが、イオン軌道、活性種、反応生成物が最適化されない場合、所望とは異なった加工形状になる。その様子を図 2 に示す。従来これらは「加工形状異常」として問題視されてきた。

図 2 において、(a) はボーイング形状あるいはサイドエッチと呼ばれる。イオン入射角の広がり（=斜入射イオンの増加）に加え、図 1 で示す側

壁保護膜が不足している場合に発生すると考えられている。このような形状になると、後の成膜工程で、別の材料の埋め込み不良を誘発することになる。(b)はテーパー形状と呼ばれ、過度の側壁保護膜堆積により発生すると考えられている。エッチング面が下方に進行するたびに、側壁に付着したエッチング副生成物からなる保護膜がエッチングマスクとして作用し、開口部が徐々に狭くなる。そのサイクルの繰り返しにより、エッチング進行とともに溝・穴が先細りする現象である。このような機構が顕在化すると、プロセス途中でのエッチング停止や、底部での電気的コンタクト不良を誘発することになる。(c)は RIE ラグと呼ばれ、底部反応面への活性種フラックス、イオンフラックスのバランスにパターン（開口部面積）依存性が発生した時に観測される。「エッチング副生成物の脱離⇒排出過程」が最適化されていない場合に発生する。なお、開口部面積の大きい場合にエッチング速度低下が観測されるだけでなく、逆の場合も観測される。このようなパターン（開口部面積）に依存したエッチング速度（深さ）の違いは、底部での電気的コンタクト不良やオーバーエッチングステップ時間増加に伴う他のパターンの形状異常を誘発することになる。(d)はマイクロレンチと呼ばれ、側壁で反射したイオンがエッジ部分に多く入射することにより発生すると考えられている。一般に、側面では必ずしも入射イオンは鏡面反射しない。このような形状は、後の成膜工程での材料埋め込み不良に加え、エッチング下地への突き抜けによる不純物拡散を誘発することになる。なお(a)～(d)の加工形状異常は、物理的な指標(寸法)で示されるものであるため、プラズマエッチングの問題として容易に認識されやすい。また、電子顕微鏡による断面観察からも容易に同定される。したがってプラズマエッチングが採用された当初は、これら加工形状異常が微

細加工プロセスにおける重要な開発項目であった。その後、様々な取り組みを経て現在では、各加工形状異常に対する技術的方针は既に確立されている場合が多く、比較的開発初期段階で解決されている。加工形状異常による ULSI 内の MOSFET の性能（電気特性）劣化が量産現場で問題になることは現在では比較的少なくなってきている。



ドライエッチングにおける加工形状異常

図2 RIEにおける加工形状異常の例

2-3 プラズマダメージ

電子顕微鏡などによる断面観察でデバイスの加工形状が最適化され、プラズマエッチングは微細技術の中心的プロセスとなった。しかしながら、プラズマエッチング後に MOSFET に様々な不具合が生じることがわかってきた。プラズマは荷電粒子（電子、イオン）で構成される。また、前述したように RIE では高エネルギーイオンを利用する。これら粒子との相互作用による想定外の現象が 1980 年代半ば頃から報告され始めた。それは前述の「加工形状異常」以外の被エッチング材（デバイス）中での欠陥形成である。MOSFET の品質を劣化させる潜在的欠陥の形成機構は、プラズマダメージ (PID) と呼ばれている。プラズマダメージは、加工されるデバイス表面・界面において、物理的・電気的・光学的相互作用により、材料表面・界面特性、ひいては ULSI 内の MOSFET 特性を劣化させる現象と定義される。

プラズマダメージは、主に3つの機構に分類される[9, 10]。その様子を図3に示す。図中の(A),

(B), (C) が3つの機構に対応する。

第1の機構は、図3の(A)で示すシース領域で加速された高エネルギーイオンとの相互作用によるイオン衝突ダメージである。ここでは物理的ダメージ (Plasma-induced Physical Damage: PPD) と記す。入射イオンの運動量、エネルギーのやり取りにより、材料を問わず、原子間結合切断や粒子侵入により材料物性・信頼性を変化させる現象である。最終的には、PPDにより形成される欠陥を含む欠陥層 (ダメージ層) が形成される。MOSFET にとって、欠陥層の形成は形状異常や性能劣化に至る[14, 15]。

第2の機構は、図3の(B)で示すプラズマとの電気的相互作用[16]、あるいは伝導電流による電気的ダメージ (Plasma-induced Charging Damage: PCD) [11]である。プラズマから流入するイオン電流、電子電流はそれぞれ、1価イオンを仮定した簡単なシースモデルでは、例えば

$$J_{\text{ion}} \approx qn_s u_B \quad (2)$$

$$J_{\text{electron}} \approx \frac{1}{4} qn_s v_e \exp(qV_{\text{bias}}/kT_e) \quad (3)$$

と書ける。ここで n_s はシース端でのプラズマ密度、 u_B はボーム速度、 v_e は電子の熱速度、 V_{bias} はシースにかかる電位差である。電気的相互作用の時間的スケールに加え、MOSFET 構造、ULSI レイアウトによって、これらの電流のバランスが崩れ、強制的に伝導電流が流れる。このプラズマからの伝導電流によって MOSFET 内に過大電流が流れ、絶縁膜を破壊、あるいはその信頼性を劣化させる現象である。この電気的ダメージは 1990 年代に精力的に研究された[11, 17]。PCD は従来の構造解析、組成分析では同定できず、電気特性による評価でのみ解析される。PCD は潜在的欠陥形成機構と言える。現在は、プラズマ源の改善や電流のアンバランスを抑制する回路設計デザインルールの導入などにより対策がなされている。

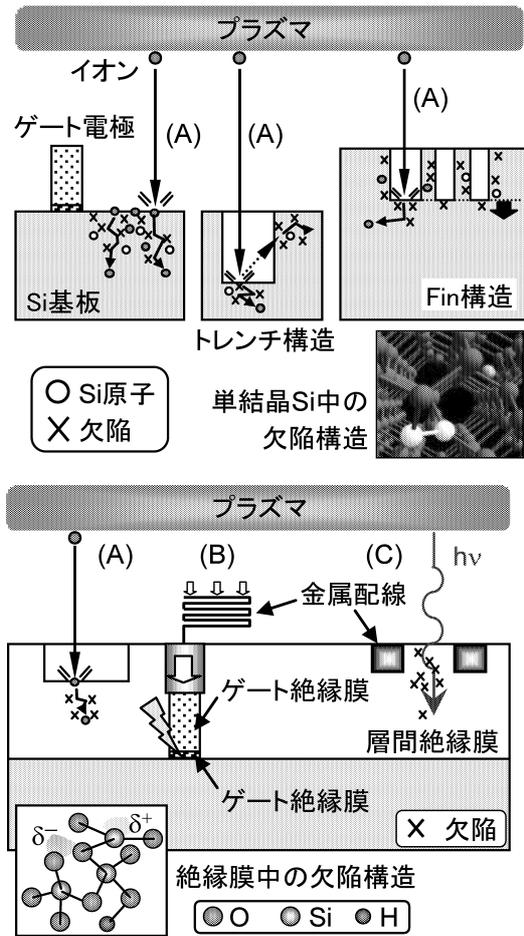


図3 ULSI 製造工程におけるプラズマダメージの主要な機構 (上段: フロントエンド工程, 下段: バックエンド工程)

第3の機構は、図3の(C)で示すプラズマからの高エネルギー光子との相互作用による照射ダメージ (Plasma-induced Radiation Damage: PRD) [18]である。プラズマ中の活性種の励起電子が低いエネルギー状態へ遷移、あるいはイオンと電子との再結合によって、(高エネルギー) 光子が放出される。放出された光子と材料中の結合電子とのエネルギーのやり取りにより、主に絶縁膜中の原子間結合が切れ、誘電率などの物性値が変化し、さらに電荷捕獲準位が形成される現象である。特に配線遅延抑制のために導入された低誘電率膜に対して、その詳細なメカニズムや抑制方法

について精力的に研究されている[19, 20].

なお、絶縁膜などのアモルファス材料では全ての PID メカニズムが欠陥形成の主要因になりうるが、単結晶シリコンなど結晶性の高い材料においては、主に PPD, PCD が主要因である。紫外領域の光子のエネルギー ($p_{\text{photon}} = h\nu$, h はプランク定数, ν は振動数) は結合エネルギーに比べ十分に大きい。それだけでは、周辺の拘束されたポテンシャル系の中で、電子励起を起点にした結合の切断、解離、そして格子間原子形成に至ることは起こりにくい。あるいは、別の言い方をすれば、運動量 ($p_{\text{photon}} = h\nu/c$, c は光速) が十分でないとも言える。つまり、”通常”のプロセスプラズマからの高エネルギー光子束では、電子励起から解離 (ダングリングボンド形成) 機構を直接誘発することはできない。したがって、後で議論する結晶性の高い材料では PRD を考慮しない場合が多い。

物性・信頼性劣化を誘発する PID は、量産現場で問題となることが多く、デバイスの進化に伴い注目されてきた。そのため、プラズマダメージを定量化・予測する手法の確立が必要とされている。また、計算科学により統合的に理解しようという取り組みも盛んである。本稿では、比較的理解しやすい、第 1 の機構、PPD (物理的ダメージ) について以下で議論する。なお、第 2, 第 3 の機構を含めたプラズマダメージ全般については、参考文献[9, 10]を参考にされたい。

3. プラズマダメージの一例：物理的ダメージ

3-1 「物理的ダメージ」のモデリング

プラズマエッチングでは、ウエハステージに高周波電力が投入される。シース領域内に形成される電界は、イオンをデバイス表面に向けて加速する。図 3 (A) で示すように、入射イオンはデバイス表面に衝突する。入射イオンの一部はデバイス

内部で衝突を繰り返しながらエネルギーを失いやがって停止する。その結果、表面領域には、これら侵入イオン、格子間原子、空孔からなる構造が乱れた領域 (ダメージ層) が形成される。例えば、MOSFET ゲート電極周りのプラズマエッチングでは、入射イオンは Si 基板奥深くに侵入し、格子間原子や空孔や歪んだ結合などの欠陥層 (ダメージ層) が形成されることが知られている。その後、それらダメージ層の一部は除去され (Si ロス)、その表面が基準面から後退した Si リセス[14, 15, 21]と呼ばれる構造になる。一方で、除去されず潜在的に残留する欠陥は MOSFET 特性を劣化させると考えられている[22]。歴史的に PPD は、様々な評価方法、ラザフォード後方散乱分光[23, 24], オージェ電子分光[25], X 線光電子分光[26], デバイスを用いた電流電圧特性[25, 27], 電気容量解析[28]などで解析され、既に多くの知見は得られている。なお、シース領域形成とバイアス電力印加は ULSI 製造特有の技術だけではない。PPD はプラズマを使ったすべての材料加工プロセスで起こりうる現象である。

さて、侵入したイオンの振る舞いに着目してみる。デバイス内部で衝突を繰り返したイオンが、深さ方向に対して「統計的に」ある分布をもつことは予想される。図 4 にその様子を示している。1 つ 1 つの衝突過程がランダム (確率的) で大多数のイオンが侵入する場合、それらは飛程理論 (Range theory) [29, 30]によって記述される。つまり、侵入したイオンの分布は、深さ方向 (x) に対して正規分布で近似できる。深さ (x) の領域 dx での粒子数は

$$n_{\text{ion}}(x)dx = \frac{\Gamma_{\text{ion}} t_{\text{pr}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] dx \quad (4)$$

と書ける[31]。ここで、 R_p は深さ方向に測った粒子分布の平均値 (飛程距離, Projection Range),

σ_p は分布の偏差 (Stragglng) と呼ばれる。また、 Γ_{ion} はイオンフラックス、 t_{pr} はプロセス時間である。飛程理論においては R_p 、 σ_p に対し以下の関係が成り立つ。

$$R_p \propto (E_{ion})^\eta, \quad \sigma_p \propto R_p \quad (5)$$

ここで、 η はプロセス、デバイスに依存した定数である。物理的ダメージの指標の1つであるダメージ層厚さ (d_{dam}) は、この飛程理論をプラズマダメージに対して修正することでモデル化できる (プラズマダメージ阻止能理論[32]: PPD-range theory)。PPD-range theory によれば、 d_{dam} は経験的に以下の式で書けることがわかっている。

$$d_{dam} = d_{dam}(E_{ion}) \approx A \cdot (E_{ion})^\alpha \quad (6)$$

ここで、 A 、 α はプロセス、デバイスに依存した定数である。

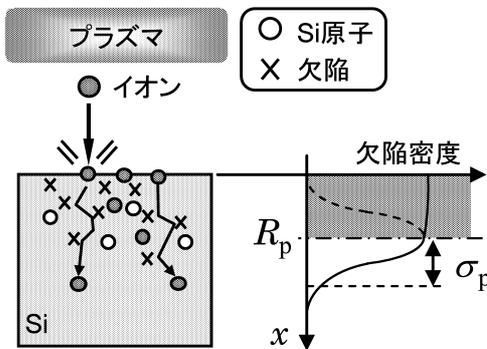


図4 PPD による欠陥形成とダメージ層構造

通常のプロセスでは、デバイス表面に入射するイオンのエネルギーは一定ではなく、ウェハステージに印加する高周波電力の周波数 (通常、数 100 kHz から 100 MHz 程度[33, 34]) に依存したイオンエネルギー分布関数に従う[5]。しかしながら、比較的低イオンエネルギー領域 ($E_{ion} \leq 500$ eV) でのプラズマエッチングで、エ

リブソ分光法などの通常のインラインモニター手法で d_{dam} を評価する場合、(6)式の E_{ion} は入射イオンの平均エネルギー (\bar{E}_{ion} 、直流自己バイアス電圧 V_{dc} とプラズマポテンシャル V_p から計算される) で代表できることがわかっている[32]。

($d_{dam} = d_{dam}(\bar{E}_{ion})$) その実験結果の例を図5に示す。図5は、エリブソ分光法[35]により算出されたダメージ層厚さの平均入射イオンエネルギー依存性を示す。エリブソ分光法は、直線偏光を試料表面に入射させ、反射光の偏光状態を詳細に解析することで、試料表面に形成された反応層厚さを算出する方法である。通常プラズマ曝露を経た Si 領域の表面は、大気曝露により酸化する。エリブソ分光法では、この酸化した表面酸化層と SiO_2 と Si の混合層からなる領域がダメージ層として同定される[36]。実験では、Si 基板を Ar プラズマに曝露している。図は、バイアス周波数 400 kHz と 13.56 MHz それぞれの電力を基板ステージに投入してイオンエネルギー分布関数を変化させて曝露した結果である。また、モデルによる予測結果も合わせて載せている。バイアス周波数にあまり影響を受けることなく、欠陥層厚さが E_{ion} の平均値 ($= q(V_p - V_{dc})$) で記述できることが見て取れる。なお最近の研究から、(6)式の d_{dam} はイオンドーズ量 ($D_{ion} = \Gamma_{ion} t_{pr}$) にも依存することがわかっている[37]。

以上のように、PPD による欠陥層厚さは PPD-range theory を元にしたメカニズムで理解できる。例えば、(上記は統計的モデルであるが) 高アスペクト比 (High Aspect Ratio: HAR) ホール加工での穴底部でのダメージ層の厚さの指標を与える。また、原子層エッチング (Atomic Layer Etching: ALE) でスループット向上を目的とする条件下でのダメージ層厚さを与える。

物理的ダメージの問題は、その指標となるダメ

ージ層厚さや残留欠陥量がプラズマパラメータで決定されている点である。プラズマ密度がイオンフラックスを、シース領域での電圧降下がイオンエネルギーを決定する。しかしながら、それらのパラメータをデバイス寸法に合わせて変化させることはできない。例えば、(1)式の Φ を極端に大きく変化させることは困難である。つまり、物理的ダメージはスケール則と調和しない。この本質的な点が、PPDが問題視される所以でもある。

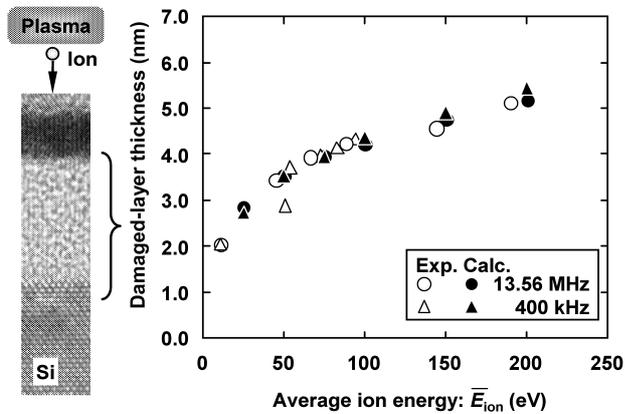


図5 Arプラズマ曝露による欠陥層形成の実験結果とモデル予測

3-2 MDシミュレーション

RIE機構を理解する手段として、シミュレーション技術は重要な役割を担っている。超微細加工の進展に伴い、ULSIの性能が飛躍的に進化した。計算にかかる時間も大幅に短縮された。その中でも、古典的MD法によるRIE機構の研究は近年急速に進歩している。古典的MD法では、対象とする粒子に働く力(\mathbf{f})をその系のポテンシャル(U)から計算し、ニュートンの運動方程式を用いて粒子1つ1つの動き(\mathbf{x})を追跡する。

$$\mathbf{f} = m \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{x} = -\nabla U \quad (7)$$

ここで、 m は対象とする粒子の質量である。PPD-range theoryでは、ダメージ層形成の統計

的振る舞いを記述している。古典的MD法では、個々の粒子の動きを追跡し、欠陥の存在を原理的に予測することができる。ただし、追跡対象とできる粒子数と計算時間の関係から、現実は限られた領域でのシミュレーション(予測)になる。図6は、Arイオン入射による SiO_2/Si 基板の変化を予測した結果である。考慮した粒子はSi, O, Arである。図6のMD法ではポテンシャル関数(U)として、Si-Si系は3体項を含めたStillinger-Weber型[38]を、Arを含む系はWilsonモデル[39]、Si-O系は渡邊らのモデル[40]を実装している。なお、本コードの基本構造は太田らによって開発されたコード[13]である。図6は、Ar原子を100 eVで鉛直方向に1000回入射した後の様子である。図からわかるように、 SiO_2/Si 界面近傍に変位したSiからなる広範囲のダメージ層とSi基板奥深くに局所的な欠陥が形成されている。これらの層からなる構造が断面観察やエリプソ分光法や電気特性解析手法によりダメージ層と同定される。

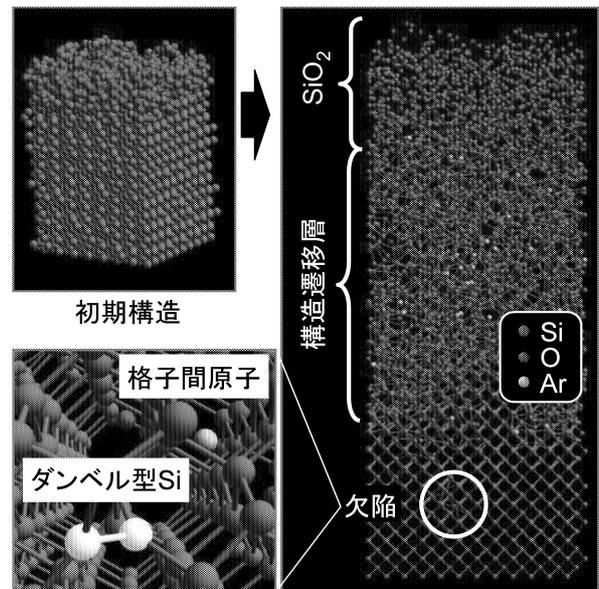


図6 Ar照射による SiO_2/Si 系の欠陥形成過程のMDシミュレーションによる予測

なお、表面近傍の乱れた層よりも基板深さ方向に、孤立した（欠陥）構造が見られる。この構造は多くの場合、打ち込まれた粒子やその粒子により反跳を受けて侵入した粒子から構成されている。格子間原子やダンベル型 Si がその代表例である。2000年代に入って、これらの構造が MOSFET の電気特性に影響を及ぼすことがわかってきた。その形成機構やその構造が MOSFET へ及ぼす影響について注目されている。この影響を明らかにすることが、プラズマダメージ研究の重要なアプローチの1つになっている。

3-3 第一原理シミュレーション

古典的 MD 法は各粒子の動きを追跡する。得られる結果は、それらの物理的な位置・速度であり、力学的エネルギー状態である。実装しているその系のポテンシャルから RIE での物理化学反応の概要は理解できるが、詳細な反応素過程は予測できない。また上で示した孤立した（欠陥）構造が、どのように MOSFET の電気特性に影響を及ぼすのか？は予測できない。なぜなら、これらは「電子状態」から決まるからである。プラズマダメージを包括的に理解するには、それらを決定づける「電子状態」を予測できる手法、つまり量子力学に基づく（第一原理）シミュレーションが必要となる。原理的には、電子状態対応する波動関数 (ψ) についてシュレーディンガー方程式

$$H\psi = E\psi \quad (8)$$

を解くことになる。ここで、 H は系のハミルトニアン、 E はエネルギー固有値である。しかしながら、上式をまともに解くことは困難である。そこで、1つ1つの電子ではなく、空間 (\mathbf{r}) に分布した電子密度 $\rho(\mathbf{r})$ に着目して解く方法が提案され、現在広く利用されている[41]。密度汎関数法

(Density Functional Theory: DFT) と呼ばれる方法である。ここでは、 $\rho(\mathbf{r})$ で記述される有効ポテンシャル $V_{\text{eff}}(\rho(\mathbf{r}))$ を用いてコーン-シャム軌道 (Kohn-Sham orbital) ψ_i とその固有軌道エネルギー E_i を計算する。

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 + V_{\text{eff}}(\rho(\mathbf{r})) \right] \psi_i(\mathbf{r}) = E_i \psi_i(\mathbf{r}) \quad (9)$$

ここで、 $\hbar = h/(2\pi)$ 、また $\rho(\mathbf{r})$ は

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N |\psi_i(\mathbf{r})|^2 \quad (10)$$

である。詳細は省略するが、現在様々な計算コードが入手可能であるので、読者も入手して活用することができる。図7に Quantum-Espresso 計算コード[42]を用いて得られた計算結果[43]を示す。DFT を用いた単結晶 Si 中の欠陥準位については、多くの研究があるが[44-46]、ここではプラズマダメージを想定し欠陥構造の例を示している。プラズマから侵入する様々な元素を含んだ局所欠陥構造を想定し、その系の電子状態を計算した結果である。つまり、図は Si 基板内に様々な欠陥（プラズマからの侵入イオン）が存在すると仮定した場合に、単結晶 Si のバンド構造がどのように変化するのか？を示している。本来、単結晶 Si 中の電子は周期ポテンシャルの中を運動するが、量子力学により取りうる状態が制限される。制限された結果、理想的には存在できない状態（固体物理ではバンドギャップ、エネルギーギャップという）がある[1, 47]。一方で、結晶内に欠陥が存在するとその固有構造が乱されて、バンドギャップ内準位が形成される。このような準位は電子デバイスの電気特性に影響を及ぼす。これらが PPD による欠陥構造である。

これらの欠陥構造により Si バンドギャップ内に準位が形成され、電荷捕獲準位として電気特性変動を誘発することは経験的に予測されている。

例えば、微分電気容量変化を解析する手法（ $1/C^2$ 法）[28]は欠陥量を定量化する電気的手法として有効であると考えられている。 $1/C^2$ 法によれば、図5で示すプラズマ曝露条件下では、体積密度 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の欠陥が形成されることがわかっている。

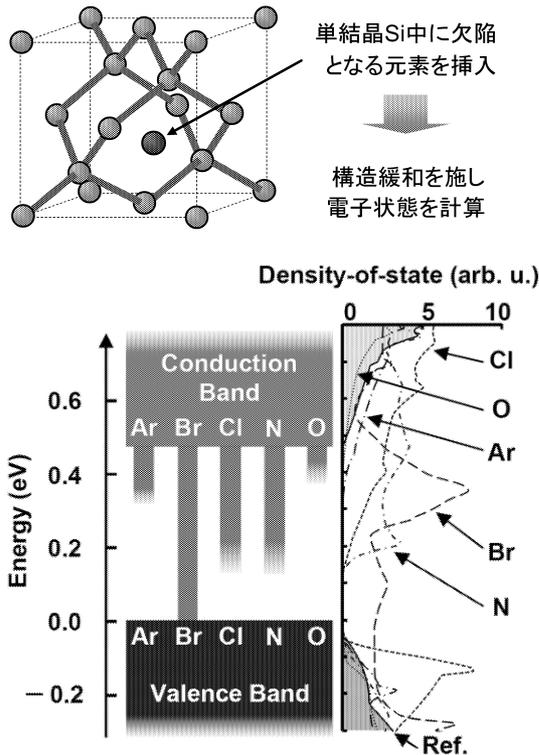


図7 第一原理計算（密度汎関数法）による Si バンドギャップ中の準位形成の計算例

なお、3-2で議論した MD 法では、図6で示すように計算領域に数個の欠陥構造が通常観測される。換算すると、それは微分電気容量解析結果と同じオーダーであることが判明している。DFTによる予測結果を鑑みると、MD法から得られた孤立した（欠陥）構造は実験で定量的に同定された欠陥に対応すると考えられる。つまり、MD法によりダメージ層中の欠陥量を、また第一原理計算から MOSFET への影響を概ね予測できると言える。近年 DFT は、RIE の正確な理解と設計[48]、

プラズマダメージの実デバイスへの影響予測に応用されている。

4. MOSFET 特性劣化モデル

高エネルギーイオン衝撃により、厚さ d_{dam} と定義されたダメージ層が形成されたとする。この厚さ d_{dam} のダメージ層を後の洗浄工程で除去した場合、結果として得られる残留欠陥面密度は、

$$N_{\text{dam}} = \int_{d_{\text{dam}}}^{\infty} n_{\text{dam}}(x) dx \quad (11)$$

となる。これが最終段階の MOSFET のプラズマエッチング時に曝された領域に残留する欠陥面密度に相当する。ダメージ層が除去される様子を図8 (a) (b) に示す。なお、図4に示すモデル図から、(11)式の n_{dam} は (4)式の n_{ion} に近似的に置き換えることができる。

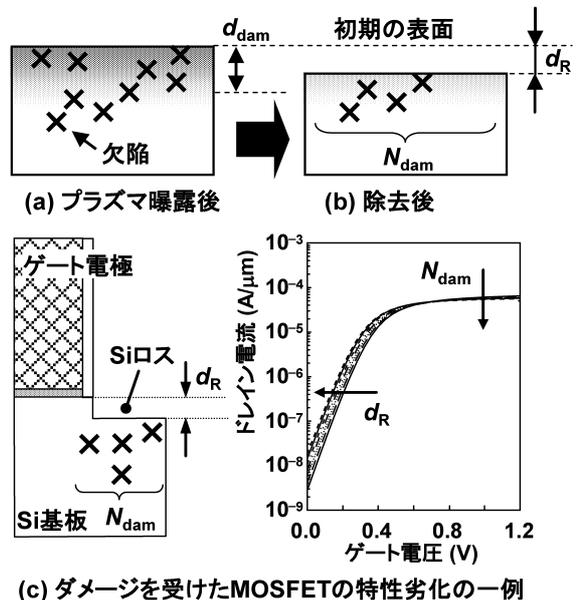


図8 (a) (b) PPDにより形成されたダメージ層が除去される一方で、欠陥が残留する様子。(c) MOSFET 特性変動の予測例[49]。

一方、(11)式からわかるように、ダメージ層除去量に応じて、残留欠陥量（ドレイン電流）、しきい

値は変動する。ダメージ層除去は MOSFET の形状変化を誘発する。この形状変化は Si 表面が後退する現象 (Si リセス), と呼ばれる。多くの場合, そのリセス量は $d_R \approx d_{\text{dam}}$ に対応する。一方で最後まで除去できない孤立した残留欠陥 (N_{dam}) も存在する。デバイス劣化モデルから, これら Si リセスと残留欠陥の影響が予測されている。図 8 (c) にその様子を示す。PPD が MOSFET しきい値及びドレイン電流変動を誘発している。つまり, プラズマダメージを考慮した MOSFET の性能設計が必要となってくるのがわかる。言い換えると, プラズマダメージが生じることを予め想定して, 加工されるデバイスの性能を設計することが必要である。

5. 最近の動向

プラズマプロセスは ULSI 製造のみならず, 様々な製造分野で利用されている。上で述べたように, イオン照射によるプラズマ加工を利用している限り, PPD の発生機構を完全に抑制することは不可能である。そのため, 残留している局所的な欠陥構造を何らかの手法で回復させる方法が期待されている。その中で, ULSI 製造工程で広く用いられている様々な熱処理ステップ (例えばイオン注入後の活性化アニール) を, プラズマダメージ回復にも適用する取り組みがなされてきた [50-52]。しかしながら, 従来のイオン注入後の活性化機構とは異なり, PPD 回復は, ダメージ領域の本質的構造に依存するのではないか? という報告 [52] がされている。未だ詳細なメカニズムは確立していないので, 最近の報告例としてここで説明する。例えば単結晶 Si のような結晶性の高い材料の場合, 残留する欠陥は図 6 で示すような局所的な孤立した構造である。冒頭で欠陥形成について説明したように, 「形成の逆過程である」その回復には, 熱エネルギー移送による熱的運動活性化

だけでなく, その侵入型原子を移動させる必要がある。しかしながら, 結晶性の高い材料では, 周辺が拘束されているために, 結果として回復には, 高温プロセスが必要であること (活性化エネルギーが高いこと) が報告されている [51]。一方で, SiO_2 , SiN 絶縁体のようなアモルファス型構造の場合は, 欠陥そのものに加え, (熱) エネルギー移送に伴うネットワーク構造の運動の自由度が高い。したがって, 絶縁膜系では熱処理というプロセスの効果が期待できることがわかっている [52, 53]。なお, ULSI 製造では熱バジェット制約が厳しいために, 高温熱処理の積極的採用は困難である。したがって, 別のアプローチとして, PPD がデバイス特性に与える影響を予め理解し, デバイス設計に実装した上で, プラズマダメージを最適化する方法論が提案されている [54, 55]。このような, プラズマダメージを最適化する設計手法 (PID-aware design) も必要とされている。

6. おわりに

プラズマエッチングとその負の側面, プラズマダメージ (PID) について概観した。プラズマが科学的に定義され放電機構の研究が始まったのは, W. Crookes, J. J. Thomson, I. Langmuir らの時代である。約 100 年の歴史である。RIE プロセスの研究が約 40 年前にはじまり, その後, プラズマダメージの研究が始まった。加工形状ではなく, 構造解析, 組成分析では同定できない PCD が報告されてから約 35 年である。加工されるデバイスへの影響が甚大であるにも関わらず PID は未解明な点が多い。読者が主導する今後の研究に期待したい。

参考文献

- [1] S. M. Sze and K. K. Ng; "Physics of Semiconductor Devices", 3rd ed. (Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2007).

- [2] M. M. Atalla and D. Kahng; IRE Trans. Electron Devices, **9** (1962) 507.
- [3] J. S. Kilby; IEEE Trans. Electron Devices, **23** (1976) 648. (2000年ノーベル物理学賞)
- [4] TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd.); <https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/7nm.htm>.
- [5] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg; *"Principles of Plasma Discharges and Materials Processing"*, 2nd ed. (Wiley, New York, 2005).
- [6] G. E. Moore; IEDM Tech. Dig., (1975) 11.
- [7] R. H. Dennard et al.; IEEE J. Solid-State Circuits, **9** (1974) 256.
- [8] C. Y. Chang and S. M. Sze; *"ULSI Technology"*, (The McGraw-Hill Book Co., New York, 1996).
- [9] K. Eriguchi; Jpn. J. Appl. Phys., **56** (2017) 06HA01.
- [10] K. Eriguchi; J. Phys. D, **50** (2017) 333001.
- [11] K. P. Cheung; *"Plasma Charging Damage"*, (Springer, Heidelberg, 2001).
- [12] J. W. Coburn and H. F. Winters; J. Appl. Phys., **50** (1979) 3189.
- [13] H. Ohta and S. Hamaguchi; J. Vac. Sci. Technol. A, **19** (2001) 2373.
- [14] S. A. Vitale and B. A. Smith; J. Vac. Sci. Technol. B, **21** (2003) 2205.
- [15] T. Ohchi et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **47** (2008) 5324.
- [16] Y. Yoshida and T. Watanabe; Proc. Int. Symp. Dry Process, (1983) 4.
- [17] K. Hashimoto; Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) 6013.
- [18] T. Tatsumi et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) 2175.
- [19] J. Lee and D. B. Graves; J. Phys. D, **44** (2011) 325203.
- [20] T. Ikeda et al.; J. Appl. Phys., **126** (2019) 083304.
- [21] K. Eriguchi et al.; IEEE Electron Device Lett., **30** (2009) 712.
- [22] K. Eriguchi et al.; IEEE Electron Device Lett., **30** (2009) 1275.
- [23] T. Ito et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **50** (2011) 08KD02.
- [24] M. Fukasawa et al.; J. Vac. Sci. Technol. A, **29** (2011) 041301.
- [25] X. C. Mu et al.; Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 1147.
- [26] G. S. Oehrlein et al.; J. Vac. Sci. Technol. A, **6** (1988) 1989.
- [27] M. Koyama et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **11** (1997) 6682.
- [28] Y. Nakakubo et al.; ECS J. Solid State Sci. Technol., **4** (2015) N5077.
- [29] N. Bohr; Phys. Rev., **59** (1941) 270.
- [30] N. Bohr; Mat. Fys. Medd. K. Dan. Vidensk. Selsk., **18** (1948) 1.
- [31] G. S. Oehrlein et al.; J. Electrochem. Society, **132** (1985) 1441.
- [32] K. Eriguchi et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **49** (2010) 056203.
- [33] A. Kojima et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **44** (2005) 6241.
- [34] K. Kikutani et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **47** (2008) 8026.
- [35] 藤原裕之; "分光エリプソメトリー", (丸善, 東京, 2003).
- [36] A. Matsuda et al.; Thin Solid Films, **518** (2010) 3481.
- [37] T. Hamano and K. Eriguchi; Jpn. J. Appl. Phys., **57** (2018) 06JD02.
- [38] F. H. Stillinger and T. A. Weber; Phys. Rev. B, **31** (1985) 5262.
- [39] W. D. Wilson et al.; Phys. Rev. B, **15** (1977) 2458.
- [40] T. Watanabe et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **38** (1999) L366.
- [41] W. Kohn and L. J. Sham; Phys. Rev., **140** (1965) A1133.
- [42] P. Giannozzi; <http://www.quantum-espresso.org>.
- [43] Y. Yoshikawa and K. Eriguchi; Jpn. J. Appl. Phys., **57** (2018) 06JD04.
- [44] M. Tang et al.; Phys. Rev. B, **55** (1997) 14279.
- [45] W. K. Leung et al.; Phys. Rev. Lett., **83** (1999) 2351.
- [46] L. Colombo; Annual Review of Materials Research, **32** (2002) 271.
- [47] C. Kittel; *"Introduction to Solid State Physics"*, Eighth Edition ed. (John Wiley & Sons, Inc., 2005).
- [48] A. Basher et al.; 72nd Annual Gaseous Electronics Conference, DT2.00007 (2019).
- [49] K. Eriguchi et al.; IEDM Tech. Dig., (2008) 443.
- [50] A. Matsuda et al.; Proc. Int. Symp. Dry Process, (2012) 181.
- [51] M. Fukasawa et al.; Proc. Int. Symp. Dry Process, (2013) 183.
- [52] T. Iwai et al.; J. Vac. Sci. Technol. A, **33** (2015) 061403.
- [53] T. Kuyama et al.; Proc. Int. Symp. Dry Process, (2018) 299.
- [54] K. Eriguchi et al.; Jpn. J. Appl. Phys., **50** (2011) 08KD04.
- [55] K. Eriguchi et al.; Plasma Process. Polym., **16** (2019) 1900058.

イタリア パドヴァ滞在記

長野工業高等専門学校 電子制御工学科 山田 大将

はじめに

2017年の6月末から2か月弱、特別研究員奨励費によりイタリアのパドヴァにある研究機関 Consorzio RFX に滞在しました。当時私は、筑波大学大学院システム情報工学研究科の博士後期課程の3年生であったため、博士論文執筆に向けた焦りもあり、英語も得意ではなかったために、滞在が決まった後は焦りや不安でいっぱいでした。しかしながら、いざ渡航してみると、短い期間でしたが海外で生活し、海外の研究者と共に実験等を行えたことは、私にとって非常に良い経験でした。本稿では、滞在記として、イタリアでのこの経験を書かせていただきたいと思います。

滞在の経緯

Consorzio RFX では、Emilio Martines 教授の研究グループに滞在しました。Martines 教授は、プラズマ物理学や制御熱核融合を専門分野とされる研究者です。核融合研究では、トカマク型及び RFP 型について、トロイダル磁場閉じ込めの実験的研究やモデリングを行っています。他にも、宇宙推進用の MPD スラスタや薄膜堆積用のマグネトロンスパッタリング装置など、様々な種類のプラズマ装置の研究開発に取り組まれています。加えて、近年では低温大気圧プラズマの医療応用にも取り組まれています。私は当時、産業技術総合研究所の榊田創グループ長を指導教員として、低温大気圧プラズマによる血液凝固促進現象に関する研究に携わっておりました。榊田先生は、プラズマの医療応用について、Martines 教授と共同で研究を行われており、この関係で私はイタリアに

来ることができました。

Consorzio RFX

私が滞在した Consorzio RFX はイタリア北東部に位置するパドヴァにあります。パドヴァは、ヴェネト州にある都市で、ヴェネチアから電車で30分程度の距離にあります。観光地としての知名度はヴェネチアに負けてしまうかもしれませんが、落ち着いた非常に魅力的な都市でした。パドヴァについても簡単に紹介したいと思います。パドヴァは北イタリア最古の都市とも言われるほどの歴史のある都市であり、1222年創立のパドヴァ大学のある学術都市としても有名です。このパドヴァ大学は、ガリレオやダンテが教授を務め、コペルニクスが学んだ大学であり、教授や卒業生には有名な歴史上の人物が数多くいます。学内ツアーもあり、ガリレオも実際に教鞭をとっていたという講堂や使用した階段のような台、有名な円形の劇場型解剖室を見ることができました。そこに漂うなんともいえない重みある空気感は、学問の歴史



図1. 市内の様子。

が感じられたように思います。

Consorzio RFX は、パドヴァ大学や聖堂等のある中心部からは少し離れたパドヴァの南側に位置しています。1996年に設立されたプラズマ物理学や核融合の研究機関です。逆磁場ピンチ型のプラズマ実験装置 **RFX (Reversed-Field eXperiment)** によるプラズマの挙動や材料との相互作用等、様々な研究が行われています。**ITER** の中性粒子入射加熱装置実機試験施設 (**NBTf**) の建設も進められています。こうした核融合関連の研究だけではなく、プラズマの産業や医療応用の研究も行われています。

イタリアでの研究

Martines 教授のグループでは、医療応用研究として、角膜感染症（角膜炎）の治療のためのプラズマ源開発や、低侵襲な止血を可能にするプラズマ源開発が行われています [1, 2]。これらの研究は、パドヴァ大学やカタンツァーロ大学といったイタリア内の大学に加えて、産総研とも共同で進められています。また、パドヴァ大学の大学院生も数名所属しており、研究を行っていました。私は、**Martines** 教授のグループで開発されたこれらのプラズマ源に関して、電気特性、発光分光計測による活性種の同定、回転温度計測といったプラズマの基礎的な特性計測実験をパドヴァ大の大学院生と一緒に行いました。複雑な計測ではないので実験自体は難しくありませんが、「英語でコミュニケーションを取りながら行う」という要素が加わるだけで一気に難易度が高いものとなります。また、イタリアですので母国語はもちろんイタリア語です。一緒に実験を行った学生さんは私よりも英語スキルは非常に高かったのですが、英語でずっと話してくれましたが、イタリア訛りもあり何度も聞き返してしまいました。実験は、**Martines** 教授やグループの他の研究員も適宜加わり、ジョー

クも飛び交う賑やかな雰囲気でした。私に気を使いイタリア語ではなく、英語で色々話してくれたのですが、気の利いたジョークの一つもまともに言えなかったことは残念です。（日本語でもたいてい言えないですが。。）加えて、自分の英語力に自信がないために、実験時に感じた意見等を心に留めるだけでなかなか発言できず、当たり障りのない意見しか述べることはできませんでした。多少おかしい文章であっても、どんどん発言することが大事だと分かってはいましたが、それができなかったことは非常に心残りです。

イタリアの研究機関に滞在してみて、日本とは違うと感じる点はいくつもありましたが、一番感じたことはオン・オフの切り替えがとてもはっきりしていたことです。夕方 17 時頃になれば学生も研究者の方々も大部分が帰宅されていました。それに実験等も長く続けることはなく、休憩がしっかりと入ります。ちなみに休憩時やランチ後は、必ずみんなでエスプレッソを飲んでいました。切り替えに重要なアイテムかもしれません。また、一緒に実験を行った学生さんは 1 カ月後締め切りの学位論文を 1 文字も書いていないけど、バカンスで 2 週間島に遊びに行くと話していたことには衝撃を受けました。既に論文執筆の準備が十分にできており、すぐ終わる状況なのかとも思っていました。後で聞いた話では結局卒業は半年伸びたようです。



図 2. 研究所内で飲んだエスプレッソ。

イタリアでの生活

イタリアで生活して感じたのは、やはり食事の美味しさです。観光地で食べたパスタやピザといった定番のイタリア料理はもちろん美味しかったです。お金のない学生の身分でしたので頻繁に外食するわけにもいきませんでしたし、自炊も得意ではなかったもので、基本はスーパーで安いインスタント食品等を買って食べていました。インスタント食品といっても侮れず、水を入れてレンジでチンするだけのリゾットは格別の美味しさでした。色々な味付けがありましたので、ほぼ毎日のように食べていました。生ハムも日本で買うよりも非常に安く、美味しかったです。また、イタリアでは食前酒としてスプリッツがよく飲まれていました。明るいオレンジ色をした甘くて程よく苦いこのお酒がとても気に入り、毎日のように飲んでいました。週末はヴェネチアやローマ等に観光に行きましたが、夏でしたので非常に暑く、冷たく美味しいジェラートは観光の必需品でした。このような食生活をしていたら体重に影響がないわけではなく、2ヵ月弱の滞在で3キロ超の増量でした。。パドヴァの街並みは見ているだけで楽しいので、観光も兼ねてランニングもしていましたが、それ以上に食べていたようです。



図 3. グループで開いてくれた食事会の様子。

おわりに

私は現在長野工業高等専門学校において、低温大気圧プラズマ応用やプラズマの特性計測に関する研究を行っております。本年度は研究室に短期留学生を迎え入れ、2ヵ月程度指導する機会がありましたが、イタリアでの滞在経験は少なからず生かされたように思います。イタリアでの滞在は、色々な気付きもあり、私にとっては強い刺激となった良い経験です。ですが、やはり研究においては、実験に参加するだけでほとんど何も貢献することができなかったという悔しさが強くあります。高専機構には在外研究員制度があり、採択されれば一定期間海外の研究機関で研究活動を行うことも可能です。こうした制度を活用し、海外での研究活動にリベンジしたいと思っています。

イタリアにおいて研究面、生活面共に多大なサポートをしてくださった **Emilio Martines** 教授、研究グループの皆様、博士課程においてご指導くださりイタリア滞在にあたって多大なサポートをしてくださった榊田創グループ長、榊田研究室の皆様、そして滞在中にお世話になったすべての方々 に心より深く感謝申し上げます。最後に、日本学術振興会に心より深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] P. Brun, M. Vono, P. Venier, E. Tarricone, V. Deligianni, E. Martines, M. Zuin, S. Spagnolo, R. Cavazzana, R. Cardin, I. Castagliuolo, A. L. G. Valerio, A. Leonardi, *PloS one*, 7 (3), (2012), e33245.
- [2] G. De Masi, C. Gareri, L. Cordaro, A. Fassina, P. Brun, B. Zaniol, R. Cavazzana, E. Martines, M. Zuin, G. Marinaro, S. De Rosa, and C. Indolfi, *Plasma Medicine*, 8 (3), (2018), 245–254.

応用物理学会優秀論文賞を受賞して

ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社 平田 瑛子

【はじめに】

この度は、第 41 回応用物理学会優秀論文賞という名誉ある賞を賜りまして、共著者共々、大変光栄に存じます。また、ご支援をいただきました関係者の方々、ならびにご推薦・ご選考していただきました先生方に心より感謝申し上げます。今回、受賞しました論文「Cyclic etching of tin-doped indium oxide using hydrogen-induced modified layer」[1]の内容について紹介させていただきます。

【研究背景】

ITO(Tin-doped Indium oxide)は透明電極材料として広く使用されていますが、難エッチング材料に該当します。これまで私たちは H_2/Ar プラズマを使用した ITO 加工メカニズムの解明を行っており、その結果、H イオンを照射することによって変質した In-rich 層の生成と、比較的質量の重いイオンによるスパッタ反応のバランスを考慮したプロセス制御が有効であることが分かりました[2]。

本研究では、H 照射による変質層の生成と除去を繰り返す ITO のサイクルエッチングを実施し、その効果を検証しました。

【実験方法】

ITO(50nm)/ SiO_2/Si 基板のサンプルに、 H_2 プラズマで表面を変質させるステップと Ar プラズマで変質層を除去するステップを繰り返し、サイクルエッチングを行いました(図 1)。2 周波励起 CCP

型エッチング装置を用いて、圧力は 10mTorr、下部電極の温度は $80^\circ C$ 、 H_2 と Ar ガスの流量は 400sccm で一定にしました。膜厚は XRF 及び XRR で測定し、表面解析は TEM、SEM、XPS、イオン侵入 Sim.(SRIM)を用いて分析しました。

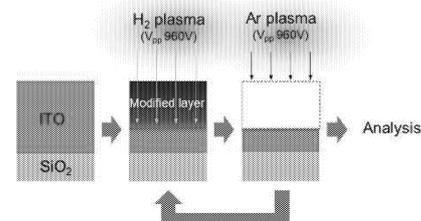


図 1 H_2 と Ar プラズマの ITO サイクルエッチングの概略図

【結果と考察】

H_2 による変質層形成の効果を評価するため、 H_2 プラズマ照射時間に対する ITO エッチレート依存性を評価しました(図 2)。Ar 単ガスのプラズマを照射した際の ITO エッチレートは 17 nm/min ですが、サイクルエッチング (1 サイクル)での最大エッチレートは 51 nm/min で、約 3 倍に増速することが分かりました。H 侵入による ITO の還元がレート増速の主要因と考えられます。また、 H_2 プラズマ照射時間が 20 秒より長い場合、ITO エッチレートは低下し、約 30 nm/min で一定になることが分かりました。ITO エッチレート低下の理由は(a)上部電極や他チャンバーパーツ起因の Si 生成、または(b)20 秒以上の H_2 プラズマ照射による ITO 表面の緻密化や変質、のどちらかが原因と考えられます。

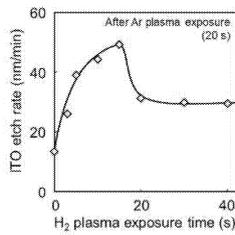


図 2 H₂プラズマ照射時間に対する ITO エッチレート依存性

そこで、エッチレート低下の原因を調査するために ITO 表面を XPS で分析しました。図 3 は H₂ プラズマ照射有無での ITO 表面の Si 濃度を示しています。H₂ プラズマを 40 秒照射したサンプルで Si が検出されました。次に、XRR より ITO 表面の密度を調査した結果、H₂ プラズマ 40 秒照射後の ITO 密度は H₂ プラズマ照射前の密度とほぼ同じであることが分かりました。これらの結果より、ITO のエッチレート低下の理由は(a)チャンバーパーツから Si が生成し、その Si がウエハ上に Si が堆積することで保護膜になったことが原因であることが分かりました。

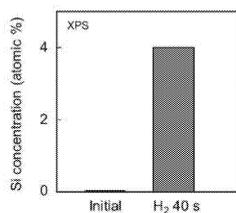


図 3 H₂プラズマ照射有無での ITO 表面の Si 濃度

次に、Ar スパッタの効果を解明するために、H による変質を一定(10 秒)にして Ar プラズマ照射時間を変化させた時の ITO のエッチレートの評価しました。図 4 は 2 つの異なる V_{pp} 値(下部電極)での Ar プラズマ照射時間に対する ITO エッチ量を示しています。高 V_{pp} 値(960V)の場合、ITO

エッチ量は Ar プラズマ照射時間が長くなると共に増加します。Ar スパッタの初期段階では ITO エッチ量は H による ITO 変質によって著しく増加し、その後、表面の変質層が完全に除去されると、下層の非変質の ITO が露出し、非変質 ITO のスパッタが支配的になっています。

一方、低 V_{pp} 値(630V)の場合、ITO エッチ量は 10nm で飽和していることが確認されました。図 5(a)に変質層が約 10nm の H₂ プラズマ照射後 ITO の断面 TEM 画像、図 5(b)は ITO 中の H イオン侵入深さのシミュレーション結果を示しています。過去の検討より、ITO が H 侵入によって還元され、In-rich 層(H 侵入による変質層)が表面に形成されることが明らかとなっています[2]。これより、この TEM 画像の変質層(白い部分)は H 侵入によって形成した In-rich 層と考えられます。図 4 の低 V_{pp} 値の ITO エッチ量(10nm)は図 5 の H の侵入深さのシミュレーション結果に近い値となることが分かりました。これらの結果より、ITO エッチ量は V_{pp} 値を調整し、変質層の膜厚を制御することで自己制御が可能となることが示唆されました。

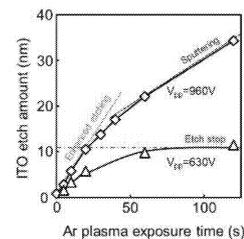


図 4 異なる V_{pp} 値においての Ar プラズマ照射時間に対する ITO エッチ量

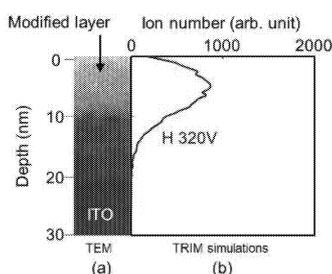


図 5 ITO 中の H イオン侵入深さ
(a)TEM、(b)TRIM シミュレーション

また、デバイス製造において、マスク材料に対する ITO の高選択比加工も不可欠です。異なる材料において保護膜の表面吸着を精密に制御することによって、ITO の高選択比加工の実現を目指しました。一般的に C を含有する膜や Si を含有する膜は保護膜として利用されています。本研究では H₂ プラズマ処理中に上部電極から生成される Si 量を制御し、高選択比サイクルエッチングの検討を行いました。

図 6 は Ar プラズマ照射時間に対する ITO と SiO₂ のエッチ量依存性を示しています。H₂ プラズマ照射時間は 10 秒に設定しました。Ar プラズマ照射時間が短時間(15 秒以下)の場合、SiO₂ に対する ITO エッチングは無限大の選択比が得られました。理由として、H₂ プラズマ照射中に Si が選択的に SiO₂ 上に堆積していることが考えられます。ITO の場合、Ar プラズマ照射時間 0-30 秒でエッチレートが増速しており、ITO より 3 倍高いスパッタイルドを持つ In-rich 層(H による変質層)の存在に起因していると考えられます。表面の還元層の形成と SiO₂ への Si の選択的表面吸着の両方の効果により、ITO/ SiO₂ 高選択比エッチングが可能になりました。

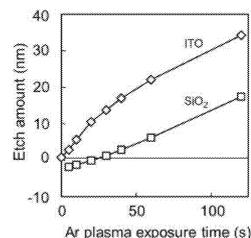


図 6 Ar プラズマ照射時間に対する ITO と SiO₂ エッチ量

図 7 に ITO と SiO₂ の Si 選択的表面吸着モデル図を示します。SiO₂ の場合、Si が表面に堆積するため SiO₂ エッチレートが低下します。H により変質した ITO 変質層表面では、Si 吸着量は SiO₂ より少ないと考えられます。Si が SiO₂ に選択的に吸着する理由は ITO と SiO₂ 表面の酸素量の違いが影響していると推測されます。ITO 変質層表面は酸素量が少ないため、上部電極からの SiH_x と ITO 中の酸素との反応によって揮発性の OH_x が生成することが困難です。そのため、ITO 表面上に堆積する Si 量が少なく、ITO エッチングに Si はほとんど影響を及ぼさないと考えられます (SiH_x + 少量 O(ITO) → SiH_x ↑ + ITO)。一方、SiO₂ 中にはより多くの酸素が存在しています。SiH_x 中の H は SiO₂ 中の酸素と反応し、揮発性の OH_x を生成します。その結果、Si が表面に堆積します (SiH_x + 多量 O(SiO₂) → OH_y ↑ + Si ↓)。その堆積した Si により SiO₂ エッチングが抑制されると考えられます。この選択的表面吸着を用いて ITO/SiO₂ のサイクルエッチングの検討を行いました。

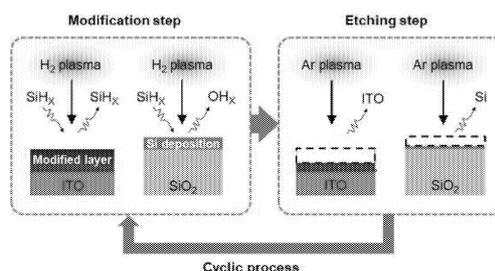


図 7 ITO と SiO₂ の Si 選択的表面吸着モデル図

図 8 は ITO と SiO₂ のエッチ量のサイクル数依存性を示しています。ITO のエッチ量は 3nm/cycle で安定しており、SiO₂ はほぼエッチングされていないことが分かりました。これより、ITO のサイクルエッチングの十分な安定性と ITO/SiO₂ 選択比が無窮大であることが明らかになりました。最初のサイクルでは SiO₂ 中に多くの酸素が存在しているため、SiO₂ 表面に Si が堆積します。2 サイクル目では Si 堆積物が表面を覆うため表面に酸素が無くなり反応できないため、今回のイオンエネルギーの範囲では SiO₂ 表面の Si 堆積物上に Si は堆積せず、Si 堆積物の厚さが飽和していると考えられます。

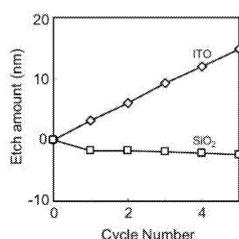


図 8 ITO と SiO₂ エッチ量のサイクル数依存性
(H₂ : 5 秒、Ar : 5 秒)

次に、SiO₂ をハードマスク(膜厚 70nm、スペース 160nm)とした際の、ITO のエッチング形状を SEM で評価しました。図 9(a)は H₂/Ar 混合プラズマでの ITO エッチング形状で、ITO のスペースは 190nm、ハードマスク SiO₂ の膜厚は 59nm であり、スペースの拡大と ITO/SiO₂ 低選択比が課題であることが分かりました。図 9(b)は H₂ と Ar のサイクルエッチング後の ITO 形状で、ITO のスペースは 164nm、ハードマスク SiO₂ は 70nm であり、サイクルエッチング後のハードマスク SiO₂ の厚さはイニシャルの厚さとほぼ同等であることが分かりました。したがって、ハードマスクを用いたサイクルエッチングプロセスを行うことによって、ITO/SiO₂ の高選択比化を確認し、Si 堆積を

制御することによって良好な形状を得ることができました。

本論文では、選択的表面吸着 (Area selective adsorption) と選択エッチング (Selective etching) をエッチング装置内でサイクリックに繰り返す事で難エッチング材料の超高選択比加工を実現しました。今後は、ITO 以外の様々な材料について、サイクルプロセスを用いた超高選択比の加工が求められる事が予想されますが、その実現に向けて反応種の表面吸着データベースの構築が今後ますます重要になると考えられます。

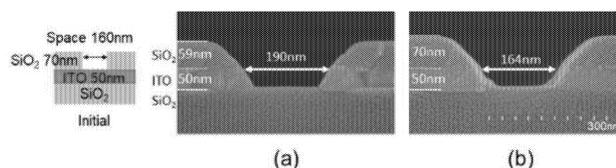


図 9 ITO の断面エッチング形状
(a) H₂/Ar 混合プラズマエッチング、
(b) サイクルエッチング

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の深沢正永氏、辰巳哲也氏、ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社の長畑和典氏、大阪大学の李虎氏、唐橋一浩特任教授、浜口智志教授に多くのご指導を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A. Hirata, M. Fukasawa, K. Nagahata, H. Li, K. Karahashi, S. Hamaguchi, and T. Tatsumi; Jpn. J. Appl. Phys. 57, (2018), 06JB02.
- [2] A. Hirata, M. Fukasawa, M. Okamoto, K. Nagahata, H. Li, K. Karahashi, S. Hamaguchi, and T. Tatsumi; Jpn. J. Appl. Phys. 56, (2017), 06HD02.

sPFE によるシリコンナノロッド連続生成と LIB 負極特性

東京大学 田中 章裕, 神原 淳

はじめに

高密度化が望まれる次世代リチウムイオン電池 (LIB) の負極材料として、高い理論容量を持つ Si が注目されている。しかし充放電に際して、Si の Li 合金化に伴う異方的な体積膨張・収縮により活物質が粉碎され、導電性が低下するという課題を抱える[1]。この課題に対して、Si のナノワイヤ化により導電性ネットワークを維持し、サイクル安定性を向上させる解決法が提唱されている[2]。既往のナノワイヤ生成は、熔融状態の触媒と気相 Si の共存環境下にて、Si がワイヤ状に成長する Vapor-Liquid-Solid (VLS) 機構に基づく[3]。Si と共晶反応を示し、触媒として働く金属元素の融点は、平衡安定状態で Si の融点よりも著しく低いいため、VLS 成長要件を満たすためには、高価なモノシランガスの利用が必須となる。したがって作製プロセスは、別途準備した熔融状態の触媒粒子に対して CVD を行うバッチ式とならざるを得ない。そこで、より安価な粉体を Si と触媒の原料として連続供給する高速作製プロセスの実現のため、separate-injection Plasma Flash Evaporation (sPFE) を用いた連続ナノワイヤ成長の可能性を検討した[4]。本稿では、sPFE による構造の制御可能範囲を探り、ワイヤ状 Si を LIB への応用可能な形状にまで制御するパラメータを探索した結果を紹介する。

sPFE による Si ナノワイヤ生成

sPFE の基本原理は、熱プラズマによる原料粉末の瞬間的な蒸発と、触媒原料の分離供給による Si ナノワイヤ成長環境の実現である。Si 原料粉末

は、完全蒸発することを確認済みの条件下でプラズマ中に投入した。一方、触媒原料粉末は、触媒粒子の熔融状態と Si 蒸気の共存環境を実現するため、プラズマフレームの低温部から投入した。本研究では、Si と共晶反応を示すだけでなく、負極に混合するとサイクル安定性の向上が期待できる Cu を触媒粒子として採用した[5]。Cu 原料粉末の粒径及び供給量を変数とし、プラズマを水冷粉末捕集器内で急冷して、凝縮過程による生成物を捕集器内壁から回収した。Table 1 に、各実験条件における原料粉末の供給量及び平均粒径を示す。

Si ナノロッド成長とその形態変調

SEM 観察より、温度が約 700° C の捕集領域において、直径 0.5~2 μm, 長さ 1~10 μm 程度の Si ナノロッド (SiNR) の生成を確認した。Fig. 1 に、各実験条件で観測された SiNR のロッド径とロッド長の関係を示す。アスペクト比は約 1~9 で、原料粉末の粒径及び供給量によりアスペクト比が大きく異なった。また XRD (X 線回折) パターンでは、Cu₃Si (η) 相のピークが強く検出された。

Table 1 各実験条件における原料粉末の供給量及び平均粒径.

条件	供給量	粒径	供給量	粒径
	(g/min)	(μm)	(g/min)	(μm)
	Si		Cu	
I	1	16	1	10
II	1	16	2	5
III	2	16	2	5

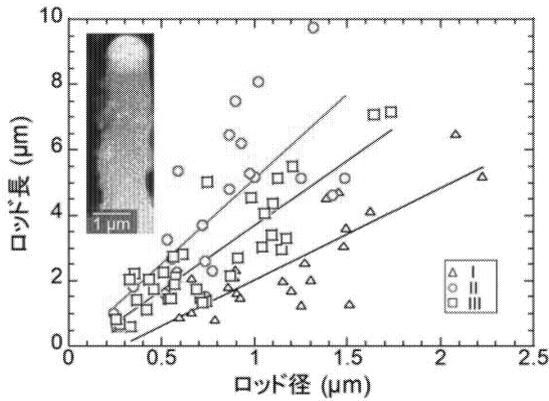


Fig. 1 観測された SiNR の SEM 像(inset)と、ロッド径に対する長さ. 条件 II, III, I の順にアスペクト比が大きかった.

さらに EDS (エネルギー分散型 X 線分光分析) より、ロッド先端部のキャップは、 η 相の組成である 25 at% Si 以上の Si を含むことが確認できた. この結果は、キャップが冷却により凝固し Si を排出した際、ロッド状に Si が析出したことを示唆している.

捕集器内での溶融 Cu 液滴のサイズ変化、及び Si 原子の溶解量を明らかにするため、熱流体解析に基づいたシミュレーションを行った. 捕集器内のガス流線に沿った Si の核生成ポイントと Cu の熱履歴の算出から、プラズマ中で Cu 液滴と Si 蒸気が共存することが判明した. さらに、凝固時に Si を析出する Si-Cu 液滴を形成する Cu 原料粉末の粒径は $4.2 \sim 4.5 \mu\text{m}$ で、内壁到達時には約 $0.6 \sim 2 \mu\text{m}$ に減少すると求めた. これは、観察された SiNR サイズと同程度である.

SiNR 成長モデルと生成収率

前述の形態変化を踏まえて、方向凝固 (Directional Solidification, DS) に従来の VLS 機構を組み込んだ SiNR の成長モデルを提案した (Fig. 2 左図). DS による基本的な成長は、飛行中の加熱冷却時に Si が溶解した Si-Cu 触媒液滴の凝固時に排出される Si 量と、ロッド析出する純

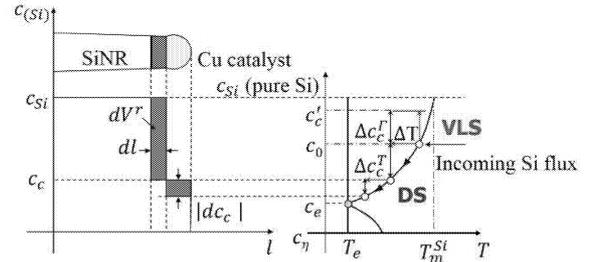


Fig. 2 SiNR 成長モデル. Si-Cu 液滴は捕集器内壁到達後、液相線に沿って冷却され、DS 及び VLS 機構により Si をロッド状に析出させる.

Si 量がつり合う lever - rule に基づく. ロッド中 Si 濃度、触媒中 Si 濃度、ロッド体積及び触媒体積をそれぞれ C^r, C^c, V^r, V^c とすると、この関係は Eq. 1 で表せる.

$$(C^r - C^c)dV^r = -V^c dC^c \quad \text{Eq. 1}$$

ただし前述の Si 溶解量では、観察される SiNR の物質に満たないため、成長時も Si が供給され疑似定常的に成長する VLS 成長を導入した. ここで、Si クラスタフラックスによる微小時間 dt 当たりの触媒中 Si 濃度上昇分 Δc_c^r を、Si クラスタフラックス Γ_{cl} 、触媒表面積 S^c 、触媒中物質 N を用いて Eq. 2 で表した.

$$\Delta c_c^r = \frac{\Gamma_{cl} S^c dt}{N + \Gamma_{cl} S^c dt} \quad \text{Eq. 2}$$

当該成長モデルを基に、DS 成長時の液滴触媒と周境界面との熱伝達係数と、ロッドのアスペクト比の関係を求めた (Fig. 3). 熱伝達係数が小さいほど、ロッド成長への DS の寄与は小さく、アスペクト比が大きい傾向が現れた. したがって、ロッドを大きく成長させるためには、熱伝達を不良にし、VLS 成長を主体にする必要があることが示唆された.

捕集器内での Cu 粒子の熱履歴と、SiNR の成長モデルを基に、投入した原料粉末に対して、実際にロッド成長に寄与した粉末の割合を求めたところ、約 0.13 ~ 14% の Si 原料粉末が SiNR として成長したと示された. ここから、sPFE を用い

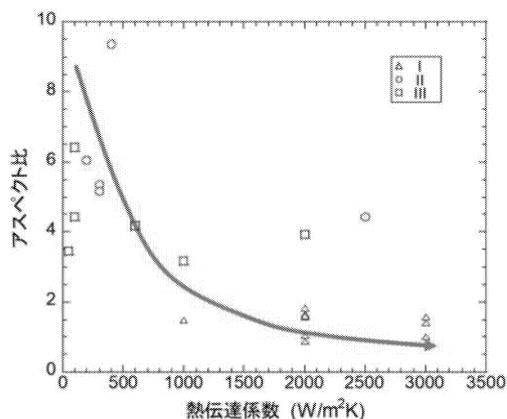


Fig. 3 SiNR 成長モデルより求めた、捕集領域における熱伝達係数とアスペクト比の関係。

た SiNR 作製プロセスの処理速度を求めると、最大 8.3 g/h と求まり、従来のプロセス(45 mg/h) [6] よりも飛躍的に高速なプロセスが実現されたことが分かった。なおロッド状に成長しなかった Si は、ナノ粒子を形成していたことが SEM 観察より確認された。

充放電サイクル特性と SiNR との相関

sPFE 粉末の充放電サイクル特性を Fig. 4 に示す。PFE 粉末で作製した Si 及び Si-Cu ナノ粒子で確認されている充放電容量(~2000 mAh/g) [5] と比べ、容量は著しく小さかった。これは、数ミクロンサイズの Si ナノロッドの初回充電時の体積膨張により、負極内構造が破壊されたからだ

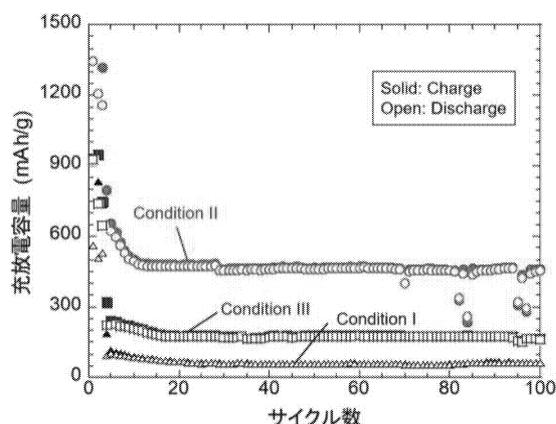


Fig. 4 sPFE 粉末のサイクル特性。アスペクト比と同様、条件 II, III, I の順に容量が大きかった。

考えられる。その結果、粉末内 Si の約 90%を占める、粒径 100 nm 程度の Si ナノ粒子は電気伝導が絶たれ、以降の電極反応に寄与できなかったことが推測される。ただし sPFE 粉末同士で比較すると、アスペクト比が大きいものほど容量が大きかったことは、ロッド形状の特性を表していると考えられる。

終わりに

sPFE により、安価粉体原料からも SiNR の連続生成が可能であることが確認された。触媒粒子の形成過程を含む SiNR 成長モデルを提案し、実験結果との対比によって、sPFE では従来の VLS 機構に加えて、飛行中 Cu 液滴への気体 Si の溶解と、捕集器内壁での冷却時の方向凝固も SiNR 成長に寄与することが示唆された。また成長モデルを通じて、SiNR 形状及び成長速度の制御指針を定量的に明らかにするとともに、負極としての電池特性への影響を示した。以上の研究結果に基づき、当研究室では現在、SiNR のアスペクト比向上及び高効率化を追求し、Si ナノワイヤの LIB 適用に向けた研究を推進中である。

謝辞

本研究の一部は科研費 15H04152 及び谷川熱技術振興基金の支援を受け実施されました。また、本稿で紹介した成果の一部を応用物理学会学術講演会にて発表し、講演奨励賞を頂きました。関係の先生方、諸先輩方に、この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- [1] X. H. Liu, et al., ACS Nano 6, 1522 (2012).
- [2] C. Chan, et al., Nat. Nanotechnol. 3, 31 (2007).
- [3] V. Schmidt, et al., Adv. Mater. 21, 2681 (2009).
- [4] A. Tanaka, et al., in preparation (2019).
- [5] M. Kambara, et al., Encycl. Plasma Technol. 29, 93 (2014).
- [6] C. K. Chan, et al., ACS Nano 4, 1443 (2010).

国際会議報告

第 34 回電離気体現象国際会議／第 10 回反応性プラズマ国際会議 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) / 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP10)

首都大学東京 朽久保 文嘉

第 34 回電離気体現象国際会議 (XXXIV ICPIG) と第 10 回反応性プラズマ国際会議 (ICRP10) の合同会議が 2019 年 7 月 14～19 日の日程で、札幌市教育文化会館にて開催されました。ご存知の通り、ICRP はプラズマエレクトロニクス (PE) 分科会が主催する国際会議であり、1991 年の第 1 回開催以降およそ 3 年毎に開催されており、2015 年 10 月に GEC との合同会議としてホノルルで開催された前回は記憶に新しい所です。ICPIG は 1953 年の創設以来、主としてヨーロッパで開催されてきた低温プラズマ分野における歴史と権威のある会議体であり、日本での開催は 2001 年 7 月の名古屋以来となります (このときの会議報告は PE 分科会会報 No. 35 にあります)。今回は、ICPIG にとって初めての合同会議であったため、参加者が ICRP との合同会議にメリットを感受できることが重要でした。現地実行委員長の北大・佐々木浩一先生、ICPIG・International Scientific Committee (ISC) 委員長の Holger Kersten 先生、ICRP 組織委員長兼 ICPIG・ISC 委員の九大・白谷正治先生を中心として合同会議の準備が行われました。

<参加者数>

会議の参加者数は表 1 に示す通りです。参加者総数は 515 名で、当初より想定していた規模の会議となりました。2001 年名古屋開催の ICPIG と比較した場合、参加者は 185 名減っています。実

は、2001 年 ICPIG への国内の参加者は 471 名であるので、参加者総数の減少分はほぼ国内参加者の減少分となります。また、旧ソ連を含めた東欧諸国からの参加者数もやや減少していますが、その分、韓国、中国、台湾といった近隣アジア諸国からの参加者数が増えています。なお、学生の参加者は 165 名でした。

表 1: 参加者数と参加国

国名	人数	国名	人数
日本	239	イギリス	10
韓国	46	インド	8
中国	27	カザフスタン	8
フランス	26	ベルギー	5
アメリカ	23	ポルトガル	5
ロシア	22	オーストラリア	4
ドイツ	16	マレーシア	4
台湾	15	イタリア	3
オランダ	14	他 (20 カ国)	29
チェコ	11	合計	515

<講演件数>

講演件数は受賞記念講演 3 件、基調講演 (General Invited Lecture) 6 件、招待講演 (Topical Invited Lecture) 47 件、アレンジセッション内招待講演 8 件、一般口頭発表 92 件、ポスター発表 349 件の計 505 件でした。2015 年までの ICPIG では口頭発表は招待講演のみでしたが、2017 年より一般口頭発表を導入され、今回の

合同会議では 92 件に増やしました。これら講演の 1 頁または 2 頁の abstract は電子ファイルとして USB で参加者に配布されました。

<サテライトワークショップ>

本会議の前後にサテライトワークショップが開催されました。7月14日の午後には、“International workshop on nanoparticles and nanostructures synthesized by plasmas for energy applications”, “International workshop on diagnostics of atmospheric-pressure plasmas”, “Atomic and molecular data for plasma applications”, “Challenges in simulation of low-temperature plasma and its applications”の4件が開かれました。また、7月20日には北大に場所を移して“New trends of plasma processes for thin films and related materials”が開かれました。

<Award>

第10回ICRPを記念し、PE分科会では反応性プラズマの基礎・応用分野での長年に渡る顕著な業績を表彰するために Reactive Plasma Award を創設しました。過去のICRP参加者に推薦を募り、選考委員会による選考が行われました。第1回は、Drexel大学のAlexander Fridman先生が受賞され、Opening Ceremony直後のセッションで“Modern Atmospheric Pressure Non-Thermal Reactive Plasmas: from Gliding Arcs to DBD and Jets”という演題で講演されました。

ICPIGでは放電・プラズマ分野の優れた研究者に対してその業績を讃えるために von Engel & Franklin Prize が授与されます。今回はミシガン大学のMark J. Kushner先生が受賞され、最終日に“Plasma Processing for Microelectronics Fabrication: Will Modelling and Simulation Help Maintain Moore’s Law?”という演題で講演されました。

7月16日には、IUPAP Young Scientist Award Lectureとして、ヨーク大学のIstván Czigler氏による講演が行われました。

今合同会議では、学生による優れた口頭発表、ポスター発表を表彰しました。口頭発表では Luka Hansen 氏 (Kiel 大学) と Shahriar Mirpour 氏 (アイントホーフェン工科大学)、ポスター発表では Noritaka Sakakibara 氏 (東京大学) と Rusen Zhou 氏 (クイーンズランド工科大学) がそれぞれ受賞されました。

ICRP JJAP 特集号で最も引用された論文に贈られる Most-Cited Paper Award として、以下の2件の論文が表彰されました。

ICRP-8 特集号 (2014年2月福岡開催)

“Investigating the effect of additional gases in an atmospheric-pressure helium plasma jet using ambient mass spectrometry”, Jun-Seok Oh, Hiroshi Furuta, Akimitsu Hatta and James W. Bradley

ICRP-9 特集号 (2015年10月ホノルル開催)

“Electron transport analysis in water vapor”, Satoru Kawaguchi, Kazuhiro Takahashi, Kohki Satoh and Hidenori Itoh

札幌でのICPIGとICRPの合同会議はプログラム、会場や周辺環境ともに参加者にはとても好評であったように思います。この会議が成功裏に終わられたのは、佐々木浩一委員長を始めとする現地実行委員会の御尽力に加え、PE分科会が培ってきた総合力の賜物と言っても過言ではありません。また、この経験を次へと繋げていくことが大切と強く感じております。PE分科会の皆様には様々な形で御協力いただきましたこと、篤く御礼を申し上げます。

次回のICPIGは2021年にオランダのEgmond aan Zeeにて開かれます。なお、九大の白谷正治先生がICPIG・ISCの委員長に就任されました。次回のICRPはまだ決定していませんが、引き続き、ご支援くださいますようお願い申し上げます。

国際会議報告

The 24th International Symposium on Plasma Chemistry

大阪大学 接合科学研究所 茂田 正哉

2019年7月9日～7月14日の日程で、The 24th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC-24) がイタリアのナポリで開催されました (Chair, Prof. Vittorio Colombo, Università di Bologna)。シンポジウムに先立ち、二日間の日程で若手研究者を対象にしたサマースクールも開催されました。プログラムなど会議の詳細はウェブサイトを参照ください[1]。

ISPC は International Plasma Chemistry Society (IPCS) [2] が母体となり運営される国際会議で、Gordon Research Conference (GRC) と交互に隔年で開催されています。熱プラズマ、低圧プラズマ、大気圧非平衡プラズマにわたってプラズマケミストリーに関する基礎・応用研究を広くカバーしているのが特徴で、1973年から46年続いている、この分野では最大規模の国際会議の一つです。基調講演は5件で、そのうち日本から朽久保文嘉教授 (首都大学東京) が招聘されました。招待講演は22件のうち白谷正治教授 (九州大学)、池原譲教授 (千葉大学)、白藤立教授 (大阪市立大学)、小職 (茂田正哉・大阪大学) の4名が招聘され、日本の研究が高く評価されていることが分かります。全参加者は約558名で、フランスの70名に次いで日本からの参加者は2番目に多く57名でした。参考までに、韓国は46名、中国は43名でした。

会期中、IPCS Board of Directors の選挙が行われ、Africa, Asia and Oceania 地区の新規席数3枠に、野崎智洋教授 (東京工業大学)、小職 (茂田正哉・大阪大学)、Prof. Hai-Xing Wang (Beihang University, China) が選出されました。

渡辺隆行教授 (九州大学)、金賢夏氏 (産業技術総合研究所) は留任しており、席数7枠のうち日本人が4枠を務めることとなります。このことから組織運営でも日本人研究者が高く評価されていることが分かります。若手研究者を対象にした Young Investigator Award、Oral Presentation Award、3min Poster Pitch Award、Poster Award では、前3賞において日本人受賞者はありませんでしたが、Poster Award における Thematic Award を宗像大貴君 (九州大学) が受賞しました。

ISPC-25 は2021年5月23～28日の予定で京都にて開催されます (Chair: 渡辺隆行教授 (九州大学)、浜口智志教授 (大阪大学)) [3]。ホームグラウンドでの催しとなりますので、皆々様のより一層のご活躍の場となれば、延いては日本のプラズマ研究の国際的なプレゼンスをさらに高められる好機となれば幸いに存じます。



ウェルカムレセプションでの一コマ
(熱プラズマコミュニティ)

[1] <http://ispc24.com/>

[2] <http://www.ispc-conference.org>

[3] <http://ispc25.com/>

6th International Workshop on Atomic Layer Etching (ALE2019)

ソニーセミコンダクタソリューションズ(株) 辰巳 哲也

近年、半導体デバイス製造において原子層レベルでの加工制御を目指した Atomic Layer Etching (ALE) に関する研究が活発となり、ドライエッチング関連の技術開発のテーマの一つとして大きな盛り上がりを見せている。今年で第6回目となる ALE ワークショップは米国真空学会 (AVS) が主催する国際ワークショップであり、今年度はシアトル近郊のベルビューにて 2019 年 7 月 21-24 日の日程で開催された。本学会は非常に多くの人が集まる ALD2019 (原子層成膜 Atomic Layer Deposition に関する国際学会) に併催される形で開催され例年 1000 人規模の参加者が訪れる。本年の ALE2019 の採択論文は 53 件で、プレナリーセッションに続いてプラズマを用いる ALE、プラズマを用いない熱反応をベースにした ALE、III-V などの化合物の ALE、クラスタービームなどを用いた新しい ALE、モデリング・シミュレーションによる ALE の解析、ALE のデバイス応用、ALE による選択加工についてのセッション等がそれぞれ開催された。主な招待講演者とその講演内容を下記に簡単にまとめる。

- E. Kessels (Eindhoven, 独) プレナリー
ALD と ALE の近年の発展の全体像
- E. Joseph (IBM, 米) プレナリー
IoT 時代のデバイススケーリングと加工
- S. Tan (LAM, 米)
ALE 時のダメージ制御について
- Y. Li (Univ. of Glasgow, 英)
Power デバイス向けの化合物材料の ALE

- T. Ito (Osaka Univ., 日)
Hfac を用いた Co 等難エッチ材料の ALE
- S. Khan (Fraunhofer, 独)
GaN のリセスゲートの加工への ALE 応用
- N. Kuboi (Sony Semiconductor Solutions, 日)
絶縁膜 ALE Sim と高速化限界について
- A. Raley (TEL, 米)
Wiggling 抑制のための q-ALE の応用例等
- A. Mameli (TNO/Holst Center, 蘭)
Area-selective ALD の反応制御
- K. Shinoda (Hitachi, 日)
絶縁膜,W の Rapid thermal-cyclic ALE

その他の一般講演を含め ALE の原理に関する基礎検討からデバイス応用まで幅広い講演が行われ正に原子レベルでの反応制御のメカニズムが議論された。また ASD (Area Selective Deposition) は ALD と ALE の複合プロセスとして語られることが増えてきており、プラズマ ALD とともに成膜分野におけるプラズマ技術の理解と発展も今後期待される。来年の ALE2020 はベルギーにて開催予定である。



Committee meeting の様子
<https://ald2019.avs.org/>

国際会議報告

AVS 66th International Symposium & Exhibition (AVS2019)

ソニーセミコンダクタソリューションズ(株) 辰巳 哲也

真空関連の幅広い技術発表を集めた国際学会である AVS2019 が今年は 10 月 20-25 日にオハイオ州コロンバスにて開催された。Plasma Science and Technology Division (PSTD) は AVS の中でも最大の分科会で、今年には 116 件の Paper が集まり、プラズマのプロセスから、プラズマ医療、装置、Sim まで幅広いトピックの議論が行われた。



併催された展示会の様子

7月に開催された ALE2019 に続いて、ALE (原子層エッチング)に関する議論は特に活発である。今回は成膜の分科会である Thin Film と共催の Atomic Scale Processing と題したフォーカスセッションが新たに企画され非常に多くの聴衆が集まった。AVS は平行で多数の報告がなされるため筆者は一部のセッションしか聴講できなかったが、以下のような優れた招待講演 (主に半導体デバイス応用関連) を聴講することができた。

- G. Parsons (North Carolina Univ, 米)
TiO₂ の ASD(選択成膜)における Super Cycle
- S. Agarwal (Colorado 大, 米)
Pre-Functionalization を用いた絶縁膜 ALE
- J. P. Chang (UCLA, 米)
難エッチング材 ALE の熱力学的解析

- P. Kurunczi (AMAT, 米)
リボン上のイオンビームによる表面処理
- A. Raley (TEL US, 米)
Self-Aligned Via など BEOL における ALE
- M. Omura (Kioxia, 日)
3D-NAND 向けの HARC エッチング技術
- A. Uedono (Tsukuba Univ., 日)
陽電子消滅による Al₂O₃ 中の欠陥解析
- Y. Yamaguchi (Hitachi, 日)
Complex stabilizer を用いた Al₂O₃ の ALE
- P. Biolsi (TEL America, 米)
Advanced pulse process による高精度加工
- N. Marchack (IBM, 米)
TaN の ALE における酸素の影響について
- Y. Kihara (TEL, 日)
絶縁膜の選択 ALE と高精度 CD 制御

また、今年にはドライエッチングの黎明期を支えた IBM/UC バークレーの John Coburn 氏の追悼セッションが行われ、RIE の原理やビーム装置を用いた基礎解析などの先駆的研究を改めて振り返りその功績を称えた。来年の AVS2020 はコロラド州デンバーにて開催予定である。



会場の Greater Columbus Convention Center

国際会議報告

72nd Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2019) 第 72 回気体エレクトロニクス会議

首都大学東京 朽久保 文嘉

2019年10月28日から11月1日にかけて、米国テキサス州カレッジステーションにて、第72回GECが開催されました。今回のSecretary（現地委員長）はTexas A&M大学のDavid Staarkで、同大学内のTexas A&M Hotel and Conference Centerが会場でした。Texas A&M大学の“A&M”の由来はAgriculture and Mechanicalで、元々は農工大として創設されたが、現在は学生数7万人規模の公立総合大学とのことです。カレッジステーションという地名は日本人には聞き慣れないと思いますが、ヒューストンの北西90 mile、オースティンの東北東90 mileに位置し、ヒューストン空港、またはダラス空港からカレッジステーション空港へ飛行機を乗り継ぐか、ヒューストン空港からシャトルバスでの移動となります。最近では、ジョージ・H・W・ブッシュ元大統領が亡くなったとき、埋葬されたのがカレッジステーションでした。現地の気候は寒暖の差が激しく、日中に25℃近くまで上がった日もあれば、朝8時頃に0℃で、日中も10℃程度の日もありました。周囲には何もないので、自然と会場へと足が向かう環境でありました。

プログラムの構成は例年と同様であり、初日にワークショップ、2日目から最終日の昼にかけて3会場で口頭発表、2日目と3日目の夕方にポスターセッションという構成でした。ワークショップを除く発表件数は、招待講演30件、一般口頭発表160件、ポスター発表182件の計372件です。この件数は、APS-DPPと同時開催であった前回ポートランドの503件、2016年ボーフムの525



Texas A&M Hotel and Conference Center 外観

件、ICRPとの合同開催出会った2015年ホノルルの649件に比べると少ないですが、2017年ピッツバーグの370件、2014年ローリーの372件と同程度でした。このような中、日本からの講演件数は前回と同程度の口頭発表21件、ポスター発表28件であり、京都大学の江利口浩二先生、九州大学の古閑一憲先生、滋賀県立大学の酒井道先生、北海道大学の白井直機先生が招待講演として講演されました。

表1は講演カテゴリー別の口頭発表の件数です。GECはアメリカ物理学会のDivision of Atomic, Molecular and Optical Physicsの会議体であり、Atomic and molecular processesに関する一定数の講演が常にあります。カテゴリー別の講演数では、Plasma modeling and simulationが最多で、低気圧から大気圧まで5セッションで32件の講演がありました。また、Plasma diagnosticsの講演数が多いことも特徴として挙げられます。3名

の招待講演者による Perspectives on Plasma Science (プラズマ科学の展望) というセッションでは、National Science Foundation (NSF) や Dept. of Energy (DOE) の担当者より、最近のプラズマ関連研究 (特に低温プラズマ) の予算、現在進行中のプロジェクトや今後の募集などについて説明がありました。

GEC では、偶数年に受賞講演である Will Allis Prize Talk、奇数年に Foundation Talk が行われ

表 1 口頭発表のカテゴリー別講演件数

1. Atomic and molecular processes	
Electron molecular collisions	11
Heavy particle collisions	6
Electron and positron collisions with atoms	6
Positron transport and applications	4
Electron molecules collisions and related topics	4
2. Plasma science	
Basic phenomena in low-temp plasmas	8
Plasma-surface interactions	6
Plasma diagnostics	19
Plasma modeling and simulation	32
Capacitively coupled plasmas	14
Inductively coupled plasmas	5
Magnetically-enhanced plasmas	7
High pressure discharges	14
Microdischarges	7
Thermal plasmas	6
Plasmas in liquids	12
Negative-ion/dust particle-containing plasma	5
3. Plasma applications	
Plasma materials	14
Green plasma technology	11
Biological/biomedical applications of plasma	7
Plasma thruster	6

ます。今回は Pascal Chabert 先生により、“Transport in low-pressure plasmas: from microelectronics to space exploration” という演題の Foundation Talk が行われました。これは、プラズマ中の電子やイオンの輸送に関する内容であり、両極性拡散やボームのシース条件の教科書的な話からスタートし、実際のプラズマにおける輸送現象、不安定性とそれに伴うパターン形成などについて講演されました。この時のスライド資料は [https:// www.lpp.polytechnique.fr/~Pascal-Chabert-128-](https://www.lpp.polytechnique.fr/~Pascal-Chabert-128/)からダウンロードできます。

バンケットは道を挟んで会議会場の向かい側にあるアメリカンフットボールスタジアム Kyle Field にて開かれました。バンケットの前にはスタジアムの見学ツアーも開催されました。

次回の GEC は、2020 年 10 月 5~9 日に、カリフォルニア州サンディエゴの Double Tree Hotel, Mission Valley にて開催されます。また、2021 年はアラバマ州ハンツビルにて開催される予定です。是非、今からスケジュール帳に記入ください。

今回をもって、私は委員を終え、新たに滋賀県立大学の酒井道先生が Executive Committee 委員に選出されましたことをご報告いたします。今後とも皆様のご協力をお願い申し上げます。



Pascal Chabert 先生の Foundation Talk

第4回原子層プロセスワークショップ

大阪大学 唐橋 一浩, 浜口 智志

2019年6月23日(金) 13:00~18:00に大阪大学中ノ島センター佐治記念ホールにおいて、第4回原子層プロセスワークショップを開催した。

原子層堆積法(ALD)に原子層エッチング法(ALE)を加えた原子レベルの加工法としての原子層プロセス(ALP)の研究には、半導体の微細化、三次元化等の進展にともない多くの関心が寄せられてきており、様々な材料に対するALPへの期待は大きい。本ワークショップは、大学・国立研究機関、半導体デバイスおよび半導体製造装置メーカーだけでなく、ガス・材料等の関連する民間企業の幅広い研究者・技術者によってALP技術の問題意識を共有することにより、同技術のさらなる技術革新を推進することを目的として企画され、主催:高等プラズマ科学国際研究拠点, 共催:日本学術振興会(JSPS) 拠点形成事業(Core-to-Core Program), 先端拠点形成型「データ駆動プラズマ科学国際共同研究拠点形成」, 化学工学会反応工学部会 CVD 反応分科会で行われた。

本稿筆者のひとり、浜口による本ワークショップ開催の趣旨説明の後、大阪大学の小口多美夫氏による招待講演「マテリアルズ・インフォマティクスの概要と応用」が行われた。材料開発のみならずプロセス開発の分野でも重要なツールとなるデータ駆動科学の現状とALP分野に対する応用に関して講演していただいた。続いて、物質・材料研究機構:NIMSの生田目俊秀氏による「原子層堆積法によるHf系酸化膜の作製とその特性」、日立製作所の山口欣秀氏による「有機錯体の生成と熱脱離を活用した難エッチング材料の選択エッチング」、大阪大学の伊藤智子氏による「原子層エ

ッチングプロセスにおける表面反応解析」の講演が行われた。これらは、熱励起による表面反応を利用したALDおよびALEプロセスに関する講演である。特に金属系材料に対する等方性ALEは新しい分野であり、従来のALEの適用範囲を拡げる技術として注目されている。講演では有機系化合物による遷移金属エッチングプロセスにおいて、特に反応性ガスの探索および開発が重要であることが示された。

次に、プラズマ支援原子層プロセスに関して、SONYの平田瑛子氏による「ITO表面反応メカニズムとサイクル加工」、東京エレクトロンの熊倉翔氏による「イオン改質を利用したSiN, SiCエッチング(ALE)」, 名古屋大学の堤隆嘉氏による「プラズマ支援原子層プロセスにおける表界面反応層制御・診断」の講演が行われた。プラズマに含まれる水素および酸素イオンラジカルによる表面改質のエッチングプロセスにおける役割を詳細に示された。

聴講者は92名であり、その内訳はデバイスメーカー、半導体装置メーカー、ガス材料メーカー、装置関連部品メーカーおよび大学関連にわたり、偏ることなく幅広い分野の方々に参加していただき、大変盛況であった。現在、ALDとALEを組み合わせることで選択成長や平坦化技術が開発されつつある。また、ALEにおいてもALDの場合と同様にプリカーサの探索の重要性は認識されてきている。したがって、本ワークショップのようにALDとALEの研究者がともに議論する場をもつことにより、原子層レベルの微細加工の技術革新が推進されると期待される。

国内会議報告

第13回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール

東京工業大学 赤塚 洋

首都大学東京 内田 諭

2019年9月8日(日)～10日(火)、国立中央青少年交流の家(静岡県御殿場市)にて、プラズマエレクトロニクスインキュベーションホールを開催しました。

本企画は、プラズマを利用した研究開発に取り組もうとしているプラズマエレクトロニクス分野の初学者(学生、若手研究者、社会人技術者)を対象とし、プラズマ技術に関する入門から最先端の動向までを十分に理解してもらうために、一流の講師を招いて実施する合宿的講習会です。本名称となってから、13回目の開催となりました。今回の受講者は50名で、うち女性が2名、企業からの参加は1名でした。

金子 俊郎先生による特別講座、ならびに4名の講師陣によるプラズマの基礎からプロセス・応用まで網羅した専門講座に加え、小川 大輔先生による英語講座も実施しました。

初日夕刻にはポスターセッションを設け、講師、幹事、ならびに受講者による評価得点により5名が優秀ポスター賞に選出されました。また、2日目には参加者の交流をより深めるために、野外レクリエーション(ウォークラリー)を行いました。

ポスター賞受賞者(敬称略)

後藤 拓也(名城大)、須田 雄貴(名大)、
瀬尾 瑞樹(東北大)、長山 海澄(東大)、
森山 達行(名大)

講座内容(講師名敬称略)

<特別講座>

「気液界面プラズマの基礎と応用」

金子 俊郎(東北大)

<専門講座>

「プラズマ生成と制御」

石島 達夫(金沢大)

「プラズマ診断・計測」

占部 継一郎(京大)

「プラズマエッチング・原子層エッチング」

田中 基裕(日立ハイテクノロジーズ)

「プラズマの流体シミュレーション」

西田 浩之(東農工大)

<英語講座>

「プラズマ研究者のための英語講座」

小川 大輔(中部大)



担当幹事(敬称略)

校長: 赤塚 洋(東工大)

幹事: 内田 諭(首都大)、近藤 博基(名大)、
高島 圭介(東北大)、鈴木 歩太(東京エレクトロ
ンテクノロジーソリューションズ)、
奥村 賢直(一関工専)、兒玉 直人(名大)、
佐藤 哲也(山梨大)、竹田 圭吾(名城大)

**2019年 第80回 応用物理学会秋季学術講演会
プラズマエレクトロニクス分科会シンポジウム (technical)
『プラズマ制御「前駆体」が拓く生命科学と材料科学』の報告**

**大阪市立大学 吳 準席、愛媛大学 神野 雅文、
名古屋大学 近藤 博基、東北大学 金子 俊郎**

表記の学術講演会が2019年9月18~21日に北海道大学にて開催され、二日目の午後(13:30~17:15)に、本分科会企画シンポジウム『プラズマ制御「前駆体」が拓く生命科学と材料科学』がB32会場にて開催された。2019年秋季学術講演会よりシンポジウムの区分が、シンポジウム(technical)とシンポジウム(non-technical)の2つに変更になり、本シンポジウムはシンポジウム(technical)として行われた。

近年大気圧非平衡プラズマを用いた生命科学(医学・農学・生物学)への応用が盛んに行われているが、そこではプラズマ中で生成される短寿命の活性酸素・窒素種(RONS)およびそれらが作用して過渡的に合成される比較的不安定な有機酸・有機窒素化合物が重要な役割を果たしていると考えられている。これらの物質は、他の長寿命RONSもしくは安定な有機化合物を生成する前段階の物質である「前駆体」と捉えることができ、その反応性の高さから細胞・組織への影響が大きく、前駆体を制御することがプラズマ生命科学の進展には必要不可欠である。一方で、新機能性を有する有機半導体材料、ナノ炭素材料等の創製においては、光、熱、酸などの刺激により、溶液・薄膜・結晶状態で化合物の構造変化を引き起こして「前駆体」を形成し、それに伴い物理的性質の発現やナノ構制御が行われる手法が提案されている。その前駆体の気相中での励起・生成には非平

衡プラズマが重要な役割を果たしており、プラズマ材料科学の進展にはプラズマ生成前駆体の理解と制御が不可欠である。以上の背景から、本シンポジウムは、生命科学、材料科学に必須の「前駆体」にフォーカスし、プラズマならびに他の方法による前駆体の生成制御とその作用機序について議論することを目的として企画された。

講演では、冒頭で本シンポジウムを企画した金子俊郎氏(東北大学)が「はじめに」の題目で、本シンポジウム開催の趣旨、及び本シンポジウムにおける各講演者とその内容について紹介され、その後下記6つの招待講演が行われた。

1. 「プラズマ修飾反応前駆体の生成制御と生物応答」高島 圭介氏(東北大学): 低温大気圧プラズマ中で生成される活性種群を前駆体として捉え、それらの生成・制御手法について紹介されるとともに、気相での活性種群を生物に対する刺激として利用する際には、気液境界での輸送と液相での新たな活性種群の組成制御が重要であることを述べられた。ニトロニウムイオンを例として、プラズマ活性ガスの輸送と液相中での生成、それによるアミノ酸の修飾と生物応答につながる可能性について、実験結果を元に報告された。

2. 「有機酸前駆体のプラズマ生成と細胞機能制御」石川 健治氏(名古屋大学): プラズマを照射した活性液の中に誘起された生体活性有機物質を前駆体と捉えて、これらがどのように生成されて、

どのように生体系（遺伝子、代謝、免疫、シグナル伝達）に影響を与えるかについて、物理作用が誘起する生化学反応の観点で様々な実験結果を元に紹介された。生体活性有機物質の生成には、低温プラズマ特有の前駆体（ラジカル等）から誘導される化学反応を含んでいる可能性があり、複雑な非平衡反応経路を低温プラズマ科学によって解明する必要があることを主張された。

3. 「細胞内生成前駆体による植物機能制御」 朽津和幸氏（東京理科大学）：副題として「諸刃の剣としての活性酸素種の植物における役割」と題して、植物が積極的に生成する活性酸素種を前駆体として捉えて、その活性酸素種の発生・成長・環境応答における役割について紹介された。さらに、プラズマが生成する活性酸素種（前駆体）を制御して外部から印加することによる植物の機能制御の可能性について議論された。

4. 「プラズマ励起前駆体による触媒作用顕在化」 野崎 智洋氏（東京工業大学）：触媒化学分野で重要な反応の1つである安定分子（ CH_4 等）の低温かつ高速転換に関して、①プラズマにより分子をあらかじめ活性化することで触媒反応を加速、②活性種により新しい反応パス・機構が発現、③プラズマ励起活性種による触媒の構造変化に起因して新しい反応パスが発現、の3つの観点で研究例が紹介された。振動励起分子を前駆体として扱うとともに、構造変化した触媒を前駆体と捉える考え方も紹介され、触媒反応に対するプラズマのシナジー効果の重要性についても言及された。

5. 「反応前駆体制御によるナノ物質構造制御合成」 澁田 靖氏（東京大学）：カーボンナノチューブ（CNT）生成における反応前駆体の主な役割として、①炭素源分子の解離反応制御、②CNT キャップおよびチューブ構造制御を挙げられ、「炭素源分子＋触媒微粒子」を反応前駆体と捉えて、Ni, Co, Pt等を例として、様々な計算結果について紹介され

た。また、機械学習を活用することで触媒（前駆体）とCNT成長との分類を行うことを目的として、階層的クラスリング（教師なし機械学習の一種）により、反応に有為な前駆体構造および特徴量を抽出する研究についても紹介された。

6. 「プラズマ生成前駆体制御による単分散ナノ粒子合成」 古閑 一憲氏（九州大学）：反応性プラズマ中のラジカルを前駆体として捉え、その前駆体ラジカルの密度に摂動を加えることによって、摂動強度の増加とともにナノ粒子サイズ分布が狭分散化していくことを紹介された。また、プラズマ中ナノ粒子量の変動のスペクトル解析を行い、理論的検討で予想された摂動の基本周波数の3/5の揺動が発生し、それが非線形結合であることを紹介され、プラズマ生成前駆体を制御することでナノ構造体の精密構造制御を可能とできることを述べられた。

シンポジウムの最後には総合討論の時間が設けられ、会場の90名程度の参加者と分野を横断して、プラズマ生成前駆体制御の意義と生命科学や材料科学への応用の発展性について意見交換を行った。

最後に、シンポジウムで講師を頂きました先生方、活発な議論をして頂きました参加者の皆様、シンポジウムの開催にご協力を頂きました分科会幹事の皆様に、深い感謝の意を表します。



図1. 2019年 第80回 応用物理学会秋季学術講演会、プラズマエレクトロニクス分科会シンポジウム（technical）会場の風景。

国内会議報告

2019年 第80回応用物理学会秋期学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科内 分科内招待講演報告

九州大学・自然科学研究機構 古閑 一憲

第80回応用物理学会秋季学術講演会(2019年9月18日から21日、札幌、北海道大学)の2日目に、分科内招待講演が開催されました。

第22回目となる今回は、長年企業のお立場からプラズマプロセスを牽引されてきたナノテクリサーチ 代表の野尻一男先生をお招きして「ドライエッチングの進展と今後の展望」というタイトルでご講演いただきました。

まずは、エッチングの要となっているプラズマ源についてご説明いただきました。半導体業界に入られた1975年の5 μ mプロセス(16KbitDRAM)から2019年現在の5nmロジック試作までの45年間のデバイスの微細化・高集積化に関連するプロセスの発展についてお話しいただいた。プラズマソースを俯瞰してみると、1970年代後半の容量結合型プラズマを用いた反応性イオンエッチング(RIE)からはじまり、マグネトロンRIE、電子サイクロトロン共鳴プラズマが1980年代、誘導結合型プラズマが1990年代に投入されて後、パルス化や多周波数化、高電力化などによる改良がなされてきたことについて解説していただきました。プラズマプロセスがその発明から50年近く経っている訳で、プラズマ源の開発が30年前には大きなコンセプトが出尽くしている点に筆者は危機感を感じました。もう一度プラズマの物理や化学に立ち返って考えるべきことの様に思えました。

次に、新しいコンセプトのプロセスとして、原子層エッチングについてご説明いただきました。

ノードが10nm程度以下となりプラズマによる作製寸法の限界が見えてきた所で、従来のRIEの限界を打破する新コンセプトとして原子層エッチングや原子層堆積が盛んに研究されています。原子層エッチングは、10nmロジックのセルフアラインコンタクトエッチングで量産に適用され、エッチングのステップ毎に独立制御出来ること平滑表面が得られることなどから今後の発展が期待されている点が挙げられました。海外での大変な盛り上がりには比べ、日本の大学のプラズマ関係者の原子層加工プロセス研究への参加が少ないように見え、研究参入するにあたり何が重要なのかを考える良い機会となったと思います。

加えて、歩留まりや生産性向上について議論されました。大面積加工において特に重要となる、ウェハ内均一性の向上に必要な要素の検討や、ウェハ間、ロット間、チャンバ間の特性ばらつきのための自己診断機能やチャンバコンディショニングについてお話しを戴き、電圧電流プローブを用いたインピーダンスモニタリングによるチャンバメンテナンス予測や、部品の自動交換技術などによる生産性向上についてご紹介いただきました。

最後に、AIや機械学習など情報系技術を取り入れたプロセス制御技術の開発や、新しいモニタリング技術の開発やモデリングの重要性など、今後の展望についてご示唆いただきました。質疑応答を含め、盛況な講演会となりましたこと、野尻様と参加者の皆様に感謝いたします。

国内会議報告

2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科内 海外招待講演報告

佐世保工業高等専門学校 猪原 武士

本分科会企画の海外招待講演は、第80回応用物理学会秋季学術講演会(2019年9月18日～21日於北海道大学)の第1日目9月18日13:45～16:00のPlasma Electronics English Session内にて開催された。

招待講演の1件目(13:45～14:15)は、Ruhr University BochumのTsanko V. Tsankov博士に「INCA: A new scalable large area plasma source at low pressures」の題目でご講演いただいた。INCA(Inductively Coupled Array)という平面にアレイ化された小さなコイルとRF電源を組み合わせた、数Pa以下の低圧領域において平面的で広域なプラズマ源となる新しい放電法の基礎とその応用について報告がなされた。最大約35 eV、3～5 eV程度の適度なMaxwellian電子エネルギー分布を有することや、0.1から10 Paの広い圧力範囲で効率的なカップリングが実現できる等、INCAについての基礎から丁寧な説明がなされた。また、INCAは低圧領域において、制御性が高く、大面積のプラズマ源となることから、プラズマスラストへの応用が期待されるとの紹介がなされた。

招待講演の2件目(14:15～14:45)は、National Taiwan University of Science and TechnologyのMeng-Jiy Wang先生に「Surface Modification by Plasma Techniques and Plasma Assisted Copolymerization for the Incorporation of Biofunctionalities」の題目でご講演いただいた。低気圧から大気圧までのプラズマを表面改質や機能性薄膜の堆積およびプラズマ支援による重合な

ど多岐に渡る研究成果について報告された。アミンやカルボキシル基によってコーティングされた薄膜は、生体細胞の増殖や付着抑制の促進への応用が期待されること、大気圧におけるプラズマ利用の成果として、生体材料から無機材料を用いたプラズマジェットに関する基礎および応用について紹介がなされた。

両講演とも大変興味深い内容であり、講演後も活発な議論が交わされて盛況のうちにセッションが終了した。



写真1：講演の両者 Tsanklo V. Tsankov 先生(左)、および Meng-Jiy Wang 先生(右)

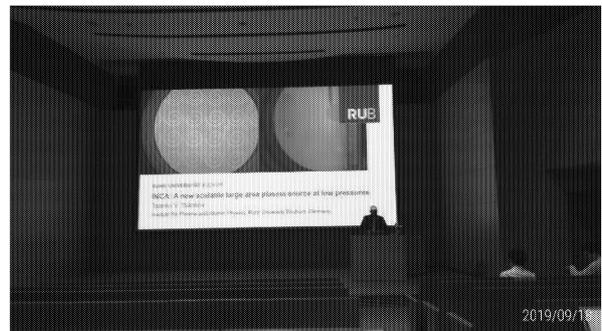


写真2：会場の様子 (Tsankov 先生)

行事案内

12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 13th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma2020 / IC-PLANTS2020)

若原 弘明¹、伊藤 昌文²

¹豊橋技術科学大学、²名城大学

ISPlasma は、東海広域ナノテクものづくりクラスター事業の一環として、当地域に国際競争力を有する先進プラズマナノ科学研究拠点を形成するために 2009 年から毎年開催されている国際会議で、今回は 12 回目となる。一方、IC-PLANTS は、本邦唯一の産業応用プラズマセンターである名古屋大学大学院工学研究科附属プラズマナノ工学研究センターの主催する国際会議とし 2008 年から毎年開催されている。2014 年より、この2つの国際会議を合同し、先進プラズマナノ科学、およびナノ材料、窒化物半導体研究に加え、振興著しいプラズマバイオ分野までも包括的に対象分野として開催している。本会議では、プラズマ分野で長い歴史と研究実績を有する東海地域に世界中から優れた研究者が集い、先進プラズマ科学、窒化物半導体とナノ・バイオ材料への応用について広く議論するとともに、最新の研究成果を発表および討議する。

会期：2020 年 3 月 8 日（日）～3 月 11 日（水）

場所：名古屋大学（愛知県名古屋市千種区不老町）

<関連分野>

◆ プラズマ科学：プラズマ源、先進プラズマ計測技術、モデリングとシミュレーション、液中プラズマ、エッチングプロセス、薄膜成膜プロセス、フレキシブルエレクトロニクス、バイオ／

医療／農業用プラズマ、クリーンエネルギー用プラズマ、ナノテクノロジープラズマ

- ◆ 窒化物半導体：GaN および関連材料の結晶成長、窒化物 MBE 成長、評価技術、デバイスプロセス、光デバイス、電子デバイス、パワーデバイス
- ◆ ナノ材料：ナノパーティクル／ナノチューブ／ナノワイヤ／ナノロッド／2 次元ナノ材料、ポーラス材料／メンブレン、コンポジット／傾斜機能材料、ソフトナノ材料、表面改質／表面機能化、エネルギー応用／環境応用／ナノメディスン／センシング応用
- ◆ バイオ応用：プラズマ農業、バイオイメージング、電気化学デバイス、バイオセンサ、バイオマーカ、バイオ材料、バイオデバイス／ μ TAS / Lab-on-a-Chip

<プレナリー講演：1 件>

Tsunenobu Kimoto (Kyoto University, Japan)

<基調講演：2 件>

Gheorghe Dinescu (National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, Romania)

Takao Someya (The University of Tokyo, Japan)

<招待講演：24 件>

Plasma Science & Technologies

I-Chun Cheng (National Taiwan University, Taiwan)

Jen-Gong Duh (National Tsing Hua University, Taiwan)

Takanori Ichiki (The University of Tokyo, Japan)

Felipe Iza (Loughborough University, U.K.)

He Ping Li (Tsinghua University, China)

Hiroiyuki Nishida (The University of Agriculture and Technology, Japan)

Nozomi Takeuchi (Tokyo Institute of Technology, Japan)

Nitride Semiconductors

T. Paul Chow (Rensselaer Polytechnic Institute, USA)

Yen-Hsiang Fang (Industrial Technology Research Institute, Taiwan)

Fumimasa Horikiri (SCIOCS COMPANY LIMITED, Japan)

Nobuhiko Kokubo (Nagoya University, Japan)

Kazuhiro Ohkawa (King Abdullah University, Saudi Arabia)

Nanomaterials

Hiroshi Furuta (Kochi University of Technology, Japan)

Hiroki Hibino (Kwansei Gakuin University, Japan)

Miao Lei (Guilin University of Electronic Technology, China)

Takeo Matsuki (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST) / Waseda University, Japan)

Wataru Sugimoto (Shinshu University, Japan)

Kaoru Tamada (Kyushu University, Japan)

Junji Yuhara (Nagoya University, Japan)

Bio Applications

Luigi Cordaro (Consorzio RFX, Italy)

Shiro Hara (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan)

Yosuke Kataoka (RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research (BDR), Japan)

Kai Masur (Leibniz Institute for Plasma Science and Technology, Germany)

Gyungsoon Park (Kwangwoon University, Korea)

<チュートリアル : 4 件>

Srabanti Chowdhury (Stanford University, USA)

Uwe Czarnetzki (Ruhr-Universität Bochum, Germany)

David B. Graves (UC Berkeley, USA)

Tsukasa Torimoto (Nagoya University, Japan)

<メインシンポジウム参加費>

早期登録(~2020/1/31) 前・当日登録(~2019/3/11)

一般 : 45,000 円 50,000 円

学生 : 15,000 円 20,000 円

<バンケット>

一般 : 6,000 円 学生 : 3,000 円

<チュートリアル参加費>

・メインシンポジウム参加者

一般 : 1,000 円、学生 : 1,000 円

・チュートリアルのみ参加者

一般 : 10,000 円、学生 : 5,000 円

<問合せ先>

ISPlasma2020 / IC-PLANTS2020 事務局 株式会社インターグループ

TEL: 052-581-3241 / FAX: 052-581-5585

E-mail: isplasma2020@intergroup.co.jp

Website: <http://www.isplasma.jp/index.html>

行事案内

2020年 第67応用物理学会春季学術講演会 プラズマエレクトロニクス分科会企画

九州大学 古閑 一憲

■ はじめに

2020年3月12日(木)～15日(日)に上智大学四谷キャンパス(東京都千代田区)にて第67回応用物理学会春季学術講演会が開催されます。本稿では、プラズマエレクトロニクス分科会企画の概要とスケジュールを紹介いたします。脱稿時点で未定の部分も含まれるため、詳細につきましては応用物理学会のHPでご確認をお願いいたします。

■ (第1日) チュートリアル講演

今春季講演会も、講演会初日に、チュートリアル講演を開催いたします。第9回を迎える今回は、東京エレクトロン株式会社の守屋 剛 先生より、機械学習を用いたプラズマプロセスの最適化に関して基礎から実際のプラズマプロセスの最適化に機械学習を適用した事例紹介までをご講義して戴きます。チュートリアル講演は事前予約制となっています。定員がありますので、お早めにご予約頂きますようお願い致します。

日程：3月12日(木) 9:00～12:10(予定)

会場：未定

講師：守屋 剛 先生(東京エレクトロン株式会社)

講演題目：「(仮) 機械学習をもちいたプラズマプロセス最適化」

■ (第2日) 分科内招待講演

第24回目となる次回の分科内招待講演では、日立ハイテクソリューションズの今井 伸一 様よりご講演を賜ることとなりました。是非とも会場まで足

をお運び頂きますよう、お願い申し上げます。

日程：3月13日(金) 11:00～11:30(予定)

会場：未定

ご講演者：今井 伸一 氏

(日立ハイテクソリューションズ)

講演題目：「(仮) プラズマプロセスを含むデバイス製造プロセスにおける機械学習を用いたスマート化」

■ (第2日) プラズマエレクトロニクス賞受賞式

講演会2日目には、第18回プラズマエレクトロニクス賞の受賞式を予定しています。今回の受賞候補論文の推薦締め切りは2019年12月20日(金)ですので、この記事が皆様に届いた時点ではまだ募集中心かと思われます。自薦、他薦は問いませんので、是非とも奮って推薦下さいますようお願い致します。詳細は、下記のHPをご確認ください。

(http://annex.jsap.or.jp/plasma/PE_files/pe_award.html)

日程：3月13日(金) 13:15～13:30(予定)

場所：分科会企画シンポジウムと同一会場の予定

■ (第2日) 分科会企画シンポジウム

学会2日目の13日(金)に、分科会企画シンポジウム「プラズマ誘起生体反応の機序解明最前線～何が何処まで解ってきたか～」を開催いたします。低温大気圧プラズマや高電圧パルス放電技術の生体応用が注目を集めている。国内研究者のご努力により、現在世界を牽引する研究レベルにあるが、2018年6月

自然科学研究機構・名古屋大学・九州大学を中心としたプラズマバイオコンソーシアム設立を皮切りに、2019年には、名古屋大学 堀 勝 教授を代表とした特別推進研究や岩手大学 高木 浩一 教授を代表とした基盤研究Sが採択され、今以上に学術的な理解が期待される。本シンポジウムでは、現在の研究状況を俯瞰しつつプラズマ照射効果の作用機序に関して議論する予定です。是非とも奮ってご参加ください。

日程:3月13日(金) 13:30~18:00(予定)

会場:未定

講演者案(順不同・タイトルは仮題)

1. 田中 宏昌 (名古屋大)
「プラズマ活性溶液を用いたがん治療における作用機序」
2. 西田 基宏 (生理学研究所)
「イオウ循環・代謝によるレドックス恒常性制御基盤の構築」
3. 池原 譲 (千葉大)
「プラズマによる止血メカニズム」
4. 福原 秀雄 (高知医科大)
「プラズマ直接照射が及ぼす皮膚障害のメカニズム」
5. 北野 勝久 (大阪大)
「大気圧低温プラズマジェットを用いた液中化学反応メカニズム」
6. 神野 雅文 (愛媛大)
「プラズマ水産業の新展開」
7. 高木 浩一 (岩手大)
「パルスパワーによる植物・水産物の革新的機能性制御の学理」

■ 講演奨励賞授業記念講演

第47回(2019年秋季)学術講演会での講演奨励賞の受賞者が応物HPにて発表され、榊原 教貴氏(東京大学)が受賞されました。荣誉ある本賞を受賞された榊原様には、この紙面を借りてお祝い申し上げます。受賞記念講演の日程/会場はまだ未定ですが、プログラムをご確認の上、会場まで是非と

も足をお運びください。過去の講演奨励賞受賞者につきましても下記のHPよりご確認頂けます。

(<https://www.jsap.or.jp/activities/award/lecture/index.html>)

□ 講演奨励賞 受賞記念講演

日程・会場:未定(プログラムをご確認ください)

受賞者:榊原 教貴氏(東京大学)

選考対象発表:フェムト秒レーザー誘起液中プラズマ反応場における水和電子生成、消滅挙動の時空間分解計測

■ English Session

今回もプラズマエレクトロニクス分野を横断するトピックスで「Plasma Electronics English Session」と題した English Session を予定しています。留学生の方に限らず、日本人学生の方も是非とも奮って参加頂ければと思います。なお、今回は海外招待講演を予定しておりません。

■ おわりに

上記案内いたしました行事の他に3月13日(金)の昼には、大分類意見交換会、PE分科会のインフォーマルミーティング、同日夕刻には恒例のPE分科会懇親会も企画される予定です。詳細は担当幹事から改めて案内があると思いますが、是非、スケジュールに加えておいて下さい。また、今回、8.3.プラズマナノテクノロジーは、9.2と13.6とのコードシェアセッションを企画いたします。奮ってご発表いただければ幸いです。不明な点がございましたら、お気軽にお問合せください。

連絡先:古閑 一憲(九州大学)

koga@ed.kyushu-u.ac.jp

行事案内

8th International Conference on Plasma Medicine (ICPM-8) 第 8 回プラズマ医療国際会議

名古屋大学 田中 宏昌、堀 勝

「第 8 回プラズマ医療国際会議」(ICPM-8) が 2020 年 6 月 14 日から 19 日まで韓国インチョンで開催される。現地実行委員長はクアウン大学 Eun Ha Choi 教授である。

プラズマ医療とは、低温プラズマの医療応用を目指す新しい学問領域で、これまでに滅菌、創傷治癒、がん治療、止血など低温プラズマによる画期的な治療効果が報告されてきた。また我が国では、プラズマ医療の学術基盤を構築するために、2012 年度に新学術領域「プラズマ医療科学の創成」

(領域代表：名古屋大学 堀 勝 教授) が立ち上がり、プラズマ科学者、医科学者、分子生物学者などが連携して組織的にプロジェクトを進めることで、プラズマによるがん治療、止血、遺伝子導入などにおいて世界を先導する成果が挙げられてきた。特に、我が国発のプラズマ活性溶液と名付けられたプラズマ照射した溶液によるがん殺傷効果の研究は世界的にも大きなインパクトを与え、ICPM など様々なプラズマバイオ関連の国際会議で大きく取り上げられるに至った。その集大成として、英文教科書「Plasma Medical Science」が 2018 年 7 月 20 日に Elsevier 社より出版された。

プラズマ医療国際会議 (ICPM) は 2007 年および 2009 年に米国テキサス州で開催され、2010 年には第 3 回目がドイツライフスヴァルト、2012 年には第 4 回目がフランスオルレアン、2014 年には第 5 回目が奈良、2016 年には第 6 回目がスロヴァキアブラティスラヴァ、2018 年には第 7 回目が米国フィラデルフィアと概ね 2 年おきに米国、欧州、アジアの様々な都市で開催されることにな

ってきている。ICPM 参加者数は初回以来、順調に増え続け、300 人～400 人規模の国際会議へと成長した。我が国は第 5 回目の奈良と第 6 回目のブラティスラヴァ開催の折に、参加者数が世界一となり、プラズマ医療の発展に貢献した。

トピックとしては、大気圧プラズマの基礎、バイオ応用向けのプラズマ源、プラズマ液体相互作用・プラズマ活性溶液、プラズマ・細胞、プラズマ・組織相互作用、プラズマ滅菌、臨床研究と動物実験、数理モデル・シミュレーション、プラズマ農業など多岐にわたる。また発表の内容もプラズマ源そのものの計測やプラズマ滅菌などの内容からより分子生物学的研究を取り入れた作用機序の解明に関するものや、動物実験、臨床研究など、実用化に向けて前進した内容のものが多く扱われるようになってきた。このような研究の推進にはプラズマ科学者と医科学・生物学者との共同研究が不可欠で、今後も、異分野を巻き込んだブレイクスルーが起こると期待される。

記

会議名：8th International Conference on Plasma Medicine

日時：2020 年 6 月 14 日から 19 日

場所：Songdo Convensia、インチョン、韓国

主催：International Society for Plasma Medicine

詳細情報：icpm8.or.kr/index.php

行事案内

73rd Annual Gaseous Electronics Conference (GEC73)

Ed Barnat, Sandia National Laboratory
Kallol Bera, Applied Materials, Inc.

The **Gaseous Electronics Conference (GEC)**, a special meeting of the APS Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics (DAMOP), promotes ideas on the physical and chemical processes and dynamics taking place in partially ionized, collisional plasma and between the atoms, molecules, charged particles, photons, waves, and fields. In recent years, GEC has also been a leading venue for reporting on emergent areas of plasma-biotechnology, plasma medicine, plasma-metal catalysis, and atmospheric-pressure plasma systems.

Conference

Date: October 5-9, 2020

Venue: Double Tree Hotel, Mission Valley
San Diego, California

URL: <https://www.aps.org/units/gec>

Chair:

Ed Barnat, Sandia National Laboratory

Secretary:

Kallol Bera, Applied Materials, Inc.

Conference Topics

- 1. Atomic & molecular process
- 2. Plasma Science
- 3. Plasma Applications

Conference Program

- Parallel sessions of invited and contributed papers, poster sessions, Allis prize talk
- Tutorials/Workshops on Plasma Physics Fundamentals, AI & ML in Plasma Science & Beyond, Plasma Enhanced Atomic Layer Etch/Atomic Layer Deposition, State of the Art in Validation for Low Temperature Plasma Simulations and Experiments, Realistic implementation of Plasma-surface Interactions in Simulations of Technological Plasmas
- Welcome reception, Banquet, Women in Plasma Physics and Student Networking
- Exhibits from Sponsors

第 18 回プラズマエレクトロニクス賞受賞候補論文の募集

名城大学 平松 美根男

応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会では、毎年、プラズマエレクトロニクスに関する学術的あるいは工業的に価値のある優秀な論文を対象とし、その著者に「プラズマエレクトロニクス賞」を贈り表彰を行っています。候補論文は自薦・他薦を問いません。下記の要領により奮ってご応募下さい。

■ 授賞対象論文

プラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議などで発表され、かつ 2017 年、2018 年、2019 年に発行の国際的な学術刊行物（JJAP など）に掲載された原著論文。受賞者は、表彰の時点においてプラズマエレクトロニクス分科会会員あるいは応用物理学会会員とする。

プラズマエレクトロニクス賞はプラズマエレクトロニクス分野の優秀な論文の著者に授与される論文賞ですが、プラズマエレクトロニクス分科会が強く関与する会議等（直接に主催する会議、応物学会学術講演会の大分類 8. プラズマエレクトロニクス等）での発表や議論を通じて生み出された優れた論文を表彰したいという考えに基づき、賞規定に「プラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議などで発表され」という要件が付与されています。

■ 提出書類

以下の書類各 1 部、およびそれらの電子ファイル(PDF ファイル)一式

- ✓ 候補論文別刷(原著論文 1 件、コピーでも可、第 1 ページに候補論文と朱書する。関連論文

があれば 2 件以内の別刷またはコピーを添付)

- ✓ 当該論文の内容が発表されたプラズマエレクトロニクス分科会が主催する研究会、国際会議等の会議録等のコピー、2 件以内。
- ✓ 著者全員について和文で以下を記入した書類。氏名、会員番号、勤務先（連絡先）
- ✓ 推薦書（自薦、他薦を問わず、論文の特徴、優れた点などを 400 字程度でわかりやすく記述）

■ 表彰

2020 年春季応用物理学関係連合講演会期間中に行います。受賞者には賞状および記念品を贈呈いたします。また 2020 年秋季応用物理学会学術講演会期間中に記念講演を依頼する予定です。

■ 書類提出期限

2019 年 12 月 20 日（金）当日消印有効

■ 書類提出先

〒113-0031 東京都文京区根津1-21-5
応物会館

公益社団法人応用物理学会

プラズマエレクトロニクス分科会幹事長

（封筒表に「プラズマエレクトロニクス賞応募」と朱書のこと）

なお、プラズマエレクトロニクス賞規定他、詳細な情報については、プラズマエレクトロニクス分科会のホームページ

<http://annex.jsap.or.jp/plasma/>

をご覧ください。

2019 年度(令和元年度) プラズマエレクトロニクス分科会幹事名簿

	氏名	所属	住所・電話	メールアドレス
幹事長	平松 美根男	名城大学 理工学部 電気電子工学科	〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 TEL: 052-838-2298 FAX: 052-832-1235	mnhrmt@meijo-u.ac.jp
副幹事長	赤塚 洋	東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所	〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1-N1-10 TEL: 03-5734-3379 FAX: 03-5734-3379	hakatsuk@nr.titech.ac.jp
副幹事長	古閑 一憲	九州大学大学院 システム情報科学研究院 電子デバイス工学部門	〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 TEL: 092-802-3734	koga@ed.kyushu-u.ac.jp
副幹事長	友久 伸吾	三菱電機(株) 先端技術総合研究所 パワーデバイス技術部	〒661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1 TEL: 06-6497-7082 FAX: 06-6497-7285	Tomohisa.Shingo@cw.Mitsubishi Electric.co.jp
幹事 任期 2020年3月	飯野 大輝	キオクシア株式会社	〒235-0017 神奈川県横浜市磯子区新磯子町33 TEL: 050-3175-6675	daiki.iino@kioxia.com
"	伊藤 剛仁	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5-504 TEL: 04-7136-3797 FAX 04-7136-3798	tsuyohito@plasma.k.u-tokyo.ac.jp
"	内田 諭	首都大学東京 システムデザイン研究科	〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL: 04-2677-2749 FAX 04-2677-2756	s-uchida@tmu.ac.jp
"	江藤 宗一郎	(株)日立製作所 研究開発グループ	〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280 TEL: 050-3159-9219	soichiro.eto.tm@hitachi.com
"	呉 準席	大阪市立大学 工学研究科	〒545-8585 大阪市阿倍野区旭町1-4-3	jsoh@osaka-cu.ac.jp
"	大島 啓示	ソニーセミコンダクタソリューションズ (株) 第2研究部門	〒243-0014 神奈川県厚木市旭町 4-14-1	Keiji.Ohshima@sony.com
"	近藤 博基	名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻 堀・関根研究室	〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町	hkondo@nagoya-u.jp
"	清水 一男	静岡大学 イノベーション社会連携推進機構	〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1 TEL&FAX: 05-3478-1443	shimizu@cjr.shizuoka.ac.jp
"	鈴木 歩太	東京エレクトロンテクノロジー ソリューションズ(株)	〒407-0192 山梨県斐崎市穂坂町三ツ沢 650 TEL: 05-5123-4228	ayuta.suzuki@tel.com
"	高島 圭介	東北大学 電子工学専攻・金子加藤研究室	〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05	takashima@ecei.tohoku.ac.jp
"	光木 文秋	熊本大学大学院 自然科学研究科 環境エレクトロニクス研究室	〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2 丁目 39-1 黒髪南キャンパス総合研究棟 TEL&FAX: 096-342-3572	mitsugi@cs.kumamoto-u.ac.jp
"	向笠 忍	愛媛大学 理工学研究科 生産環境工学専攻 熱及び物質移動学研究室	〒790-8577 愛媛県松山市文京町3	mukasa.shinobu.me@ehime- u.ac.jp
"	山田 英明	産業技術総合研究所 関西センター	〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1 丁目 8 番 31 号 TEL & FAX: 072-751-9631	yamada-diamond@aist.go.jp

幹事 任期 2021年3月	佐藤 直幸	茨城大学大学院 理工学研究科 量子線科学専攻	〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 TEL: 0294-38-5109	naoyuki.sato.ele@vc.ibaraki.ac.jp
"	田中 康規	金沢大学 理工研究域電子情報通信学	〒920-1192 石川県金沢市角間町	tanaka@ec.t.kanazawa-u.ac.jp
"	竹田 圭吾	名城大学 理工学部 電気電子工学科	〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501	ktakeda@meijo-u.ac.jp
"	猪原 武士	佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科	〒857-1193 長崎県佐世保市沖新町 1-1 TEL: 0956-34-8476	ihara@sasebo.ac.jp
"	西山 修輔	北海道大学 工学研究院 量子理工学部門	〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目	shu@eng.hokudai.ac.jp
"	奥村 賢直	一関工業高等専門学校 未来創造工学科	〒021-8511 岩手県一関市菟莊字高梨	okumura@ichinoseki.ac.jp
"	兒玉 直人	名古屋大学 大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 横水研究室	〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町	kodama@nuee.nagoya-u.ac.jp
"	占部 継一郎	京都大学 大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 推進工学研究室	〒615-8540 京都市西京区京都大学 桂C3-b3S18 TEL: 075-383-3788	urabe.keiichiro.3x@kyoto-u.ac.jp
"	田上 英人	北九州工業高等専門学校 生産デザイン学科 電気電子コース	〒802-0985 福岡県北九州市小倉南区 志井 5-20-1	tanoue@kct.ac.jp
"	佐藤 哲也	山梨大学 工学部 先端材料理工学科	〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11 TEL&FAX: 055-220-8627	tetsu-sato@yamanashi.ac.jp
"	山羽 隆	ウエスタンデジタル (株)	〒512-8550 三重四日市市山之一色町 800	Takashi.Yamaha@sandisk.com
"	生沼 学	三菱電機 (株) 先端技術総合研究所 環境システム技術部 放電応用グループ	〒661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1 TEL: 06-6497-7069	Oinuma.Gaku@dw.MitsubishiElectr ic.co.jp
"	永井 久雄	パナソニック株式会社 マニファクチャリングソリューション センター	〒571-8502 大阪府門真市松葉町 2 番 7 号 TEL: 080-9940-7267	nagai.hisao@jp.panasonic.com

2019 年度(令和元年度)分科会幹事役割分担

役割分担	新任		留任	
幹事長			平松 美根男	名城大学
副幹事長			赤塚 洋	東京工業大学
			古閑 一憲	九州大学
			友久 伸吾	三菱電機
1. 庶務・分科会ミーティング	竹田 圭吾	名城大学	内田 諭	首都大学東京
2. 春秋講演会シンポジウム シンポジウム・海外招待講演 分科内招待講演 チュートリアル講義			古閑 一憲	九州大学
	田中 康規	金沢大学	山田 英明	産業技術総合研究所
	佐藤 直幸	茨城大学	呉 準席	大阪市立大学
	猪原 武士	佐世保工業高等専門学校	近藤 博基	名古屋大学
	山羽 隆	ウエスタンデジタル	飯野 大輝	キオクシア
3. プラズマプロセッシング研究会 H30 年度：SPP H31 年度：ICRP/ICPIG			赤塚 洋	東京工業大学
	田中 康規	金沢大学	伊藤 剛仁	東京大学
	佐藤 直幸	茨城大学	呉 準席	大阪市立大学
	奥村 賢直	一関工業高等専門学校	清水 一男	静岡大学
	田上 英人	北九州工業高等専門学校	向笠 忍	愛媛大学
4. 光源物性とその応用研究会				
5. プラズマ新領域研究会			古閑 一憲	九州大学
	西山 修輔	北海道大学	光木 文秋	熊本大学
	佐藤 哲也	山梨大学	伊藤 剛仁	東京大学
	猪原 武士	佐世保工業高等専門学校	清水 一男	静岡大学
6. インキュベーションホール			赤塚 洋	東京工業大学
	佐藤 哲也	山梨大学	内田 諭	首都大学東京
	奥村 賢直	一関工業高等専門学校	鈴木 歩太	東京エレクトロニクステクノロジーソリューションズ
	竹田 圭吾	名城大学	高橋 圭介	東北大学
	兒玉 直人	名古屋大学	近藤 博基	名古屋大学
7. プラズマエレクトロニクス講習会			友久 伸吾	三菱電機
	占部 継一郎	京都大学	山田 英明	産業技術総合研究所
	永井 久雄	パナソニック	飯野 大輝	キオクシア
	生沼 学	三菱電機	大島 啓示	ソニーセミコンダクタソリューションズ
	山羽 隆	ウエスタンデジタル	鈴木 歩太	東京エレクトロニクステクノロジーソリューションズ
8. 会誌編集・書記			江藤 宗一郎	日立製作所
	兒玉 直人	名古屋大学	向笠 忍	愛媛大学
	永井 久雄	パナソニック	大島 啓示	ソニーセミコンダクタソリューションズ
9. ホームページ	西山 修輔	北海道大学	高島 圭介	東北大学
10. 会計	田上 英人	北九州工業高等専門学校	光木 文秋	熊本大学
11. プラズマエレクトロニクス賞			平松 美根男	名城大学
12. アカデミックロードマップ (戦略企画室)			古閑 一憲	九州大学
			平松 美根男	名城大学
13. PE 懇親会 秋：札幌，春：東京	生沼 学	三菱電機	江藤 宗一郎	日立製作所
	占部 継一郎	京都大学	呉 準席	大阪市立大学
GEC 委員 (オブザーバー)			枡久保 文嘉	首都大学東京

2019 年度（令和元年度）分科会関連の各種世話人・委員

- | | | |
|--|--------|----------------------|
| 1. 応用物理学会講演会プログラム編集委員 | | |
| 8 大分類代表 | 神野 雅文 | (愛媛大) |
| 8.1 プラズマ生成・診断 | 富田 健太郎 | (九大) |
| 8.2 プラズマ成膜・エッチング・表面処理 | 竹中 弘祐 | (阪大) |
| | 木村 光広 | (キオクシア) |
| 8.3 プラズマナノテクノロジー | 古閑 一憲 | (九大) |
| 8.4 プラズマライフサイエンス | 栗田 弘史 | (豊橋技科大) |
| 8.5 プラズマ現象・新応用・融合分野 | 白井 直機 | (北大) |
| | 石島達夫 | (金沢大) |
| 8.6 Plasma Electronics English Session | 神野 雅文 | (愛媛大) |
| 2. 応用物理学会理事 | 木下 啓藏 | (PETRA) |
| 3. 応用物理学会代議員
(分科会推薦, 各支部推薦等) | 一木 隆範 | (東大) |
| | 木下 啓藏 | (PETRA) |
| | 古閑 一憲 | (九大) |
| | 宮原 奈乃華 | (九大) |
| | 本村 英樹 | (愛媛大) |
| 4. GEC 組織委員会委員 | 朽久保 文嘉 | (首都大) |
| 5. 応用物理学会本部委員会 | | |
| 機関誌企画・編集委員会 | 赤塚 洋 | (東工大) |
| 論文誌企画・編集委員会 | 斧 高一 | (京大/阪大) |
| | 栗原 一彰 | (キオクシア) |
| | 伊藤 剛仁 | (東大) |
| 講演会企画・運営委員会 | 一木 隆範 | (東大) |
| 6. フェロー
(受賞時の所属で記載。元分科会会員を含む。) | 大森 達夫 | (三菱電機) |
| | 岡本 幸雄 | (東洋大) |
| | 小田 俊理 | (東工大) |
| | 斧 高一 | (京大) |
| | 河野 明廣 | (名大) |
| | 木下 啓藏 | (PETRA) |
| | 近藤 道雄 | (産総研) |
| | 寒川 誠二 | (東北大) |
| | 白谷 正治 | (九大) |
| | 菅井 秀郎 | (名大) |
| | 高井 まどか | (東京大学) |
| | 橘 邦英 | (京大) |
| | 辰巳 哲也 | (ソニーセミコンダクタソリューションズ) |
| | 寺嶋 和夫 | (東大) |
| | 斗内 政吉 | (阪大) |
| | 永津 雅章 | (静大) |
| | 中山 喜萬 | (阪大) |
| | 庭野 道夫 | (東北大) |

畠山 力三	(東北大)
林 久貴	(キオクシア)
平松 美根男	(名城大)
藤山 寛	(長崎大)
堀 勝	(名大)
真壁 利明	(慶大)
渡辺 征夫	(九州電気専門学校)

本リストは、応用物理学会の各種委員会等で活躍されている PE 分科会会員を記したのですが、一部を除き、分科会が直接に委員推薦等に関与しているわけではないため、記載漏れがあるかもしれません。記載漏れにお気づきの場合は、会誌担当幹事までお知らせ頂けると幸いです。

活動報告

2019年 第2回プラズマエレクトロニクス分科会幹事会 議事録

開催日時：2019年9月19日(木)11:30~13:00
開催場所：北海道大学 札幌キャンパス B32 会場
進行：平松幹事長(名城大)

本幹事会は、第19回分科内招待講演、意見交換会に引き続き、インフォーマルミーティングとして実施された。

1. 応用物理学会(上智大学 2019.3)シンポジウム

古閑副幹事長(九大)から下記の内容についての報告があった。

・チュートリアル

テーマを”機械学習によるプラズマプロセス最適化”とし、東京エレクトロン 守屋さんを第一候補とする案について承認された。

・シンポジウム(Technical)

プラズマの環境応用、最新スパッタリング技術などのテーマが提案されたが、再度担当幹事で議論し、メールにて承認を伺う予定。

・分科会内招待講演

候補者の選定に苦戦している。他分野でプラズマを使用されている先生方などを候補者とする案が議論された。

2. プラズマ新領域研究会の進捗状況

古閑副幹事長(九大)から、本年度2回開催予定の新領域研究会についての進捗報告があった。

1回目は、2019/9/24-25に、“物理・化学混成系プラズマにおける情報系機能の発現”のテーマで開催予定。

2回目は、伊藤先生(東京大)を中心に企画中。

3. プラズマエレクトロニクス講習の進捗状況

友久副幹事長(三菱電機)から2019/11/12開催予定のPE講習会の準備状況について報告があった。従来会場である東京大学 竹田ホールが改修工事で使用できないため、本年度は、グランパークカンファレンス 401 ホール(東京 田町グランパークプラザ棟 4階)での開催となる説明があった。

4. 12月分科会会報の編集状況

永井幹事(パナソニック)から12月発行予定のNo71 会報の目次案及び進捗状況について報告があった。巻頭言をキオクシア 林さん、Ruhr University Bochum の Czarnetzki 先生依頼している。Czarnetzki 先生がご病気のため、次号に回す可能性があるとの説明があった。

5. XXXIV ICPIC/ICRP-10 の報告

佐々木先生(北海道大)から7/14-19で開催されたICPICについての報告があった。参加人数515名で、プログラム内容も好評だったとの説明があった。

6. 研究会報告

内田先生(首都大学東京)から9/8-10に開催されたインキュベーションホールの実施報告があった。

7. 関連会議について

各先生から関連会議についての紹介があった。

AVS66 開催 2019/10/20: 辰巳さん(ソニー)

GEC 開催 2019/10/28: 朽久保先生(首都大)

DPS 開催 2019/11/21-22: 白藤先生(大阪市大)

APSPT-11 金沢 2019/12/11: 田中先生(金沢大)

ISPlasma 名大開催 2020/3: 伊藤先生(名城大)

ESCAMPIG 開催 2020/7: 白谷先生(九大)

ISPC-25 京都開催 2021: 田中先生(九大)

8. 第 18 回 プラズマエレクトロニクス賞の候補論文募集

平松幹事長(名城大)から PE 賞の候補論文の募集がなされた。

2019 年度 第 3 回目の幹事会は、2020 年 3 月の応用物理学会(2020.3.12-15 上智大学 四谷キャンパス)会期中のインフォーマルミーティング内で執り行う。

9. 第 38 回プラズマプロセッシング研究会

平松幹事長(名城大)から ICRP との合同で 2021 年 1 月の開催予定との紹介があった。

(令和元年度会報編集担当：

永井、向笠、大島、兒玉)

10. 表彰関連

平松幹事長(名城大)より、下記の方々が各賞を受賞されたことの紹介があった。

- ・ 第 41 回 応用物理学会優秀論文賞
ソニーセミコンダクタソリューションズ
平田さん、深沢さん、長畑さん 他。
- ・ 平成 31 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰
(若手科学者賞) 九州大学大学院 富田先生。
- ・ 応用物理学会フェロー キオクシア 林さん

プラズマエレクトロニクス関連会議日程

(国際会議)

2020. 1. 12-18

2020 Winter Conference on Plasma Spectrochemistry
Tucson, Arizona, USA
http://icpinformation.org/Winter_Conference.html

2020. 3. 8-11

12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and nanomaterials (ISPlasma2020)/
13th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (IC-PLANTS 2020)
Nagoya University, Nagoya, Japan
<http://www.isplasma.jp/index.html>

2020. 5. 24-28

IEEE 47th International Conference on Plasma Sciences (ICOPS 2020)
Marina Bay Sands, Singapore, Singapore
<https://www.clocate.com/conference/ieee-international-conference-on-plasma-sciences-icops/2110/>

2020. 5. 31- 6.5

The 24th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices
Jeju, Korea
<https://psi2020.kr/>

2020. 6. 14-19

8th International Conference on Plasma Medicine (ICPM8) / 10th International Symposium on Plasma Bioscience (ISPB 2020)
Incheon, Korea
<http://icpm8.or.kr/index.php>

2020. 6. 15-18

29th Symposium on Plasma Physics and Technology (29th SPPT 2020)
Czech Technical University, Prague, Czech Republic
<https://www.plasmaconference.cz/>

2020. 6. 22-26

47th European Physical Society Conference on Plasma Physics (EPS 2020)
Barcelona, Spain
<https://epsplasma2020.eu/>

2020. 7. 15-18

XXV Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases (ESCAMPIG 2020)
Paris, France
<https://escampig2020.sciencesconf.org/>

2020. 8. 23-28

17th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (Hakone XVII)
Kerkrade, the Netherlands
<https://www.hakone2020.com/home>

(国内会議・会合)

2020. 3. 11-13

令和2年電気学会全国大会
東京電機大学 東京千住キャンパス、東京
<https://www.iee.jp/blog/taikai2020/>

2020. 3. 12-15

第67回 応用物理学会春季学術講演会
上智大学 四谷キャンパス、東京
<https://www.jsap.or.jp/jsap-meeting/future>

2020. 3. 16-19

日本物理学会 第75回年次大会
名古屋大学 東山キャンパス、愛知県
<https://www.jps.or.jp/activities/meetings/annual/annual-index.php>

2020. 9. 1-4

日本物理学会 秋季大会(物理)
熊本大学、熊本県
<https://www.jps.or.jp/activities/meetings/future.php>

2020. 9. 8-11

第81回 応用物理学会秋季学術講演会
同支社大学 今出川校地、京都
<https://www.jsap.or.jp/jsap-meeting/future>

当会報への広告掲載について

応用物理学会 プラズマエレクトロニクス分科会では、分科会会員への情報提供を旨とし、会報への広告出展を募集しております。広告の掲載にあたっては下記のような条件としておりますので、是非ご検討の程よろしくお願い申し上げます。

1. 契約の種類

(A) 年間契約コース

1年間にわたる掲載。通常は6月、12月に発行される2号にわたって掲載されます。掲載号ごとに新規原稿に差替えできます。

(B) 単号契約コース

特定の号のみの掲載。

2. 掲載位置

掲載位置は編集後記の後になります。基本五十音順の掲載になりますが、レイアウト等の都合で適宜変更になる可能性があります。何卒ご了承ください。また裏表紙への依頼がない場合には年間契約の中からまわす場合があります。不都合がある場合にはご相談ください。

3. 入稿

原稿はA4版ネガ、もしくは電子ファイル(pdf)とします。これ以外の場合、かかる費用を別途請求させて頂く場合があります。

4. 広告掲載料

掲載料は下表の通りとします。なお、年間契約の場合も申し込み時点で一括請求とさせていただきます。

	(A) 年間契約コース	(B) 単号契約コース
半ページ	5万円 (4万円)	4万円 (3万円)
1ページ	8万円 (6万円)	5万円 (4万円)
2ページ (見開き指定可)	12万円 (9万円)	8万円 (6万円)
裏表紙	12万円 (9万円)	8万円 (6万円)

※カッコ内は賛助会員企業

5. 問い合わせ先

〒113-0031 東京都文区根津 1-21-5

応物会館 2階

公益社団法人 応用物理学会

TEL: 03-3828-7723

FAX: 03-3823-1810

Email: divisions@jsap.or.jp

HP: <http://annex.jsap.or.jp/plasma/>

編集後記

この度、プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.71 を発行することが出来ました。ご多忙の中、原稿をご執筆いただいた方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

巻頭言では今秋より、応用物理学会 フェローに就任されたキオクシア(株) 林 久貴様より、『企業研究者に必要な条件と大学との連携』という題目で寄稿いただきました。私も、企業に籍を置く者の一人として製造コストやタイミングの重要性は、身に染みて感じています。そんな厳しい環境の中で、研究活動を継続するための心構えや大学との共同研究のあり方など大変参考になりました。

研究紹介のコーナーでは、株式会社 FUJI の神藤 高広様に、近年注目を集めている大気圧プラズマの活用例として、樹脂表面改質による接着・接合技術をご紹介いただいた。自動車産業を下支えするプラズマ技術として、とても興味深く読ませていただきました。この技術は、様々な分野へ展開できる可能性であり、プラズマ技術を携わる者として、更なる応用分野拡大を期待したいと思います。

研究室紹介コーナーでは、金沢大学の田中 康則先生に金沢大学 理工研究域 電子情報通信学系 環境電力工学研究室をご紹介頂きました。核融合プラズマから熱プラズマ、非平衡・液中プラズマ、高電圧・真空放電まで幅広い研究内容をご紹介いただきました。一つの専門分野に拘らず、他分野の視点からの見解や意見を出し合える環境は素晴らしいと感じました。これからは他分野との融合・共創がいかにか大事か、再認識いたしました。

学生のためのページでは京都大学の江利口 浩二先生より『プラズマエッチングとプラズマダメージの基礎』と題して、ドライエッチングの基礎からダメージが発生するメカニズムなどを分かり

易い図を交えて解説していただきました。シミュレーションに関しても詳しくご紹介いただき、ダメージを定量的に理解することで、今後のプロセス開発や研究の参考になるのではないのでしょうか。

海外の研究事情では、長野工業高等専門学校 山田 大将先生に、学生時代に滞在されたイタリアのパドヴァにある研究機関 **Consorzio RFX** での研究活動をご紹介いただきました。海外のメリハリ（オン・オフの切替）のある研究生活。近年、働き方改革が取り沙汰されている日本企業も、メリハリのある働き方を実現するため、休憩時間に職場の皆さんでエスプレッソ飲むような(和やかな)環境・風土づくりが大切かもしれません。

優れた研究を紹介する欄では、応用物理学会優秀論文賞を受賞されたソニーセミコンダクタソリューションズ(株) 平田 瑛子様、応用物理学会講演奨励賞を受賞された東京大学 田中 章裕様に受賞対象の研究を分かり易く解説いただきました。

最後に、幹事長、副幹事長をはじめとする分科会会員の皆様、応用物理学会事務局分科会担当の小田様には本誌編集にあたり、多大なご協力を賜りました。心より御礼申し上げます。尚、分科会会報では、各種報告や行事案内を随時募集しております。今後ともプラズマエレクトロニクス分科会会報をどうぞ宜しくお願いいたします。

(令和元年度会報編集担当：

永井、向笠、大島、兒玉)

プラズマエレクトロニクス分科会会報 No.71
2019年 12月15日 発行
編集:公益社団法人応用物理学会
プラズマエレクトロニクス分科会
幹事長 平松 美根男
発行:公益社団法人応用物理学会
〒113-0031 東京都文京区根津一丁目 21 番 5 号
応物会館
(©2019 無断転載を禁ず)

