

International Training Program アメリカ テキサス大学ダラス校 派遣報告

名古屋大 工学研究科電子情報システム専攻 氏名 竹内 拓也

International Training Program (ITP) 長期派遣プログラムに参加し、2010年1月7日から2010年3月11日までの約2カ月間、アメリカのテキサス大学ダラス校 Goeckner 教授・Overzet 教授の研究グループにて研究を行いましたので、ここに報告致します。

研究について

(a) 研究テーマ

私の博士課程前期課程での研究テーマは「プラズマエッチングにおけるフォトレジスト表面反応基礎過程に関する研究」であり、その一部としてフルオロカーボンプラズマとのフォトレジストの表面反応を研究しておりました。Goeckner 教授・Overzet 教授の研究グループでは、フーリエ変換赤外吸収分光法(FT-IR)を用いたプラズマ中の活性種の絶対密度計測方法を確立しており、研究グループの特徴の一つとなっています。そこで今回の派遣プログラムでは、Goeckner 教授・Overzet 教授の研究グループでの私の研究テーマを「酸素添加によるフルオロカーボンプラズマ中の活性種の変化の観察」とし、フルオロカーボンプラズマ中においてどのような活性種が生成されるかを調査致しました。これらの活性種がプラズマ中にどれだけ存在しているかを把握することは、私の博士課程前期課程での研究テーマでも、より詳細な反応過程の解明へと繋がるものであり非常に関連性の強いものでした。

(b) 実験

1、2週目は研究を開始するにあたって、これまでに Goeckner 教授・Overzet 教授の研究グループで行われた研究を把握するためにフルオロカーボンプラズマの気相診断を行っていた卒業生の博士學位論文を読みました。今回私が使用させて頂いた実験装置は、GEC(Gaseous Electronics Conference) reference cell と呼ばれるもので、13.56 MHz の高周

波(RF)を電極に印加して誘導結合型プラズマ(ICP)を生成する装置で、前述のプラズマ中の活性種の絶対密度計測のための透過型 FT-IR システムが組み込まれており、またラングミュアプローブによる電子密度計測を行うことが可能でした。図1.に実験装置の概略図を示します。実験を開始するにあたって、この装置を使用している博士課程の学生 Cristina に彼女の研究を例として具体的な装置の使用方法を教えて頂きました。その際、電子密度の挙動について議論を行い、教わるだけではなく彼女の役に立てたのではないかと思います。

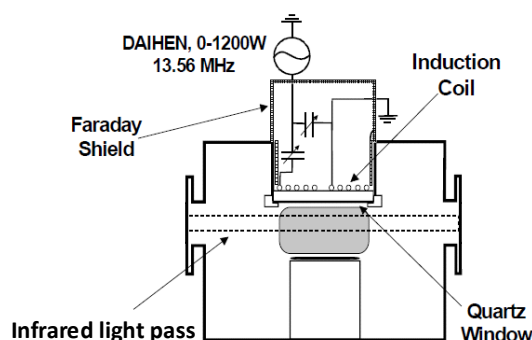


図 1. GEC reference cell 概略図

今回私が行った FT-IR による絶対密度計測は、適応可能な圧力領域があり、赤外線吸収度がプラズマ状態でない CF_4 の圧力に比例する圧力領域、Beer's Law が成立する領域のみで行うことが可能な手法です。3週目には FT-IR の使用方法の習得も兼ねてこの適応可能な圧力領域を調査致しました。条件は、吸収長(チャンバー直径) 64 cm, ガス流量を 1 sccm, 圧力を 3~60 mTorr まで変化させました。図 2.に求めた CF_4 ガス圧力と赤外線の吸光度の関係を示します。この結果から、今回用いた実験装置では 0 ~ 15 mTorr までの圧力領域で絶対密度計測が可能であることがわかりました。また、

この圧力領域における赤外吸収定数も求め、これを用いて、絶対密度の算出を行いました。

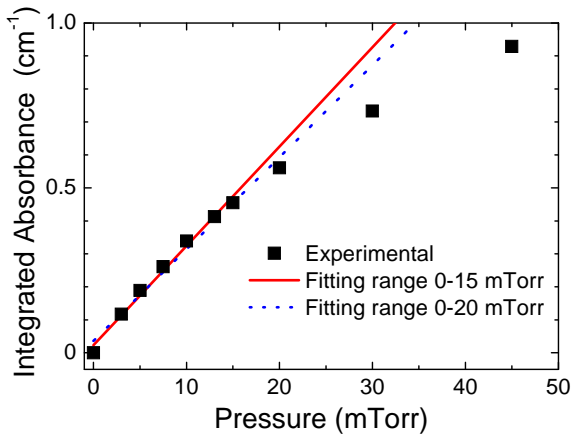


図 2. CF₄ ガス圧力と赤外線吸光度の関係

4 週目は上部電極に 13.56 MHz の高周波を印加して CF₄ プラズマを生成して活性種の計測を行い、プラズマ on-off 時の比較を行いました。実験条件は RF 100 W, 圧力 10 mTorr, CF₄ 20 sccm としました。図 3. その結果を示します。CF₄ の吸光領域では、プラズマ off 時よりもプラズマ on 時の方が吸収が小さく CF₄ が解離されていることがわかります。しかしながら、CF₃ などの活性種は吸光が弱く、確認はできませんでした。

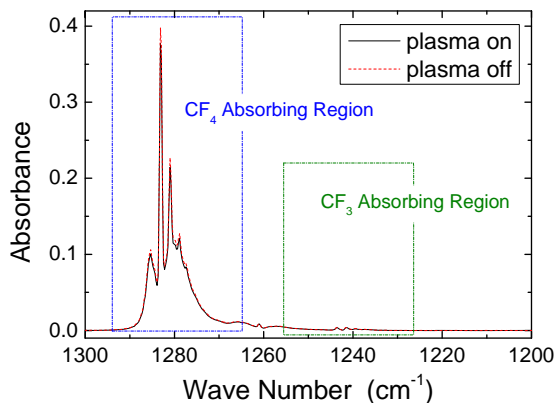


図 3. IR スペクトル プラズマ on-off の比較

そこで、Goekner 教授と相談し、RF 電力を上げて H モードの高密度のプラズマで計測を行うという方針にしました。しかし、CF₄/O₂ プラズマの H モードは非常に不安定であり、特に Beer's Law

の成立する 10mTorr 台の低圧力領域においては、高電力を印加してもプラズマが安定せず、計測を行うことができませんでした。Gabriel というこの装置の扱いに慣れ親しんでいる博士課程の学生と共に、慎重にマッチングを取り、低圧力領域でのプラズマ生成を試みましたが、なかなかプラズマを安定した状態にできませんでした。プラズマが安定しない原因としては、CF₄ に含まれるフッ素の電気陰性度が強いためにプラズマ中で負イオンが形成され、電子密度が減少してしまうことが原因であると考えられます。そこで、5 週目以降は電子密度が高く、比較的安定なプラズマが生成できる高圧力領域の 60 mTorr で実験を行うこととし、高周波電力 100 W 程度の E モードと 500 W 程度の H モードの比較を行いました。実験条件は、RP 電力 100 W, または 500 W, 圧力 60 mTorr, CF₄/O₂ 総流量 20 sccm, 酸素流量比 5 % としました。図 4. にそれぞれの条件における IR スペクトルの比較を示します。H モードの CF₄/O₂ プラズマにおいては、100 W の E モードでは観測されなかった COF₂ を計測しました。

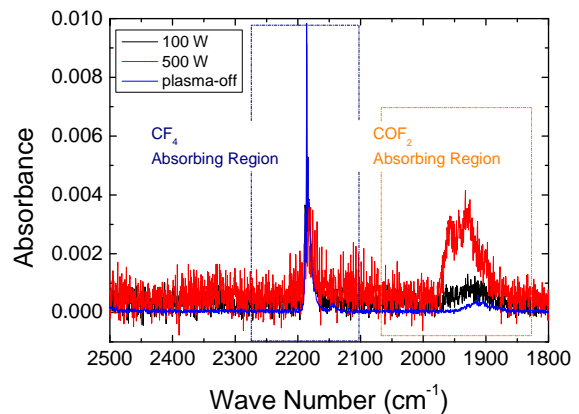


図 4. E モード・H モードにおける IR スペクトルの比較

同じ装置を使用する学生が複数名いるため、6 週目は装置を使用できない時間がありました。他の学生が行っていた研究で、プラズマ中で生成された荷電粒子がシース中でどのように加速され、基板に到達し反応が生じるかを理解するためにシースでの電界分布を知る必要があったので、M. A. Lieberman らの Principles of plasma discharges and materials processing 及び Analytical Solution for

Capacitive RF Sheath (IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 16, NO. 6, DECEMBER 1988) を参考にし、RF 電力によって生成された Ar の CCP の無衝突シースにおける電界強度分布の算出を行いました。シース厚さは非線形の振幅を持つものとし、電界強度の決定には次の式を用いました。

$$E(x, t) = \frac{\tilde{J}_0}{\epsilon_0 \omega} (\cos \omega t - \cos \phi), \quad s(t) < x$$

$$= 0, \quad s(t) > x.$$

ここで、 J_0 はプラズマから電極へ流れる電流密度、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ω は RF の角周波数であり、 ϕ は、シース厚さの実効振幅 S_0 [cm] としたとき、プラズマシース端からの距離 x [cm] と次の関係を持つ。

$$\frac{x}{\bar{s}_0} = (1 - \cos \phi) + \frac{H}{8} \left[\frac{3}{2} \sin \phi + \frac{11}{18} \sin 3\phi - 3\phi \cos \phi - \frac{1}{3} \phi \cos 3\phi \right]$$

$$\bar{s}_0 = \tilde{J}_0 / (e \omega n_0), \quad H = \frac{J_0^2}{\pi \epsilon_0 T_e \omega^2 n_0} = \frac{1}{\pi} \frac{\bar{s}_0^2}{\lambda_D^2}$$

図 5. に時間を固定した場合の、横軸をシース端からの距離とした電界強度の位置依存性を示す。条件は、電子密度 $1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、プラズマポテンシャル 62 V、電子温度 T_e 1~3 eV、電流密度 J_0 66.2 A/m² とした。図 5. より、電子温度が大きくなるにつれてシース厚さが薄くなる傾向が確認できました。

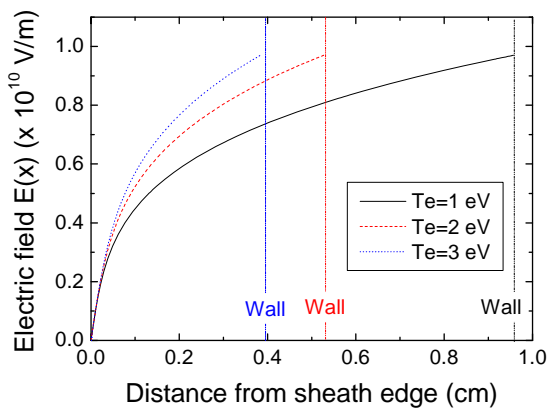


図 5. 電界強度位置依存性

シース内における電界強度の今回の実験とは直接は関係のないものですが、プラズマ物理をより深く理解する良い機会となりました。

Gabriel と研究を行っている間に日本での私の研究について説明したところ、フォトレジストとフルオロカーボンプラズマとの反応機構の調査に感心を持ってくれました。そしてフォトレジストをコーティングしたウェハを装置に入れてプラズマを照射した結果と今回行ったウェハのない状態での気相診断の結果を合わせて、フォトレジストからの反応生成物の観察を行えないかという提案を頂きました。残念ながら日本で私が研究に用いているフォトレジストはアメリカに持ち込んではおらずその場で実際に行うことはできませんでした。テキサス大学で使用されていた別のフォトレジスト(1813)を用いて、反応生成物の観察を行いました。実験条件は PR 電力 400 W、圧力 60 mTorr、CF₄ 20 sccm としました。図 6. にフォトレジストのある場合とない場合それぞれの IR スペクトルを示します。フォトレジストのない状態と比較してフォトレジストがある場合は CF₃、CF₂ が気相中に多く存在しており、これらがフォトレジスト表面から生成されていることがわかりました。

今後は共同研究として私が日本で研究に用いているフォトレジストからの反応生成物の観察を行うことを予定しています。

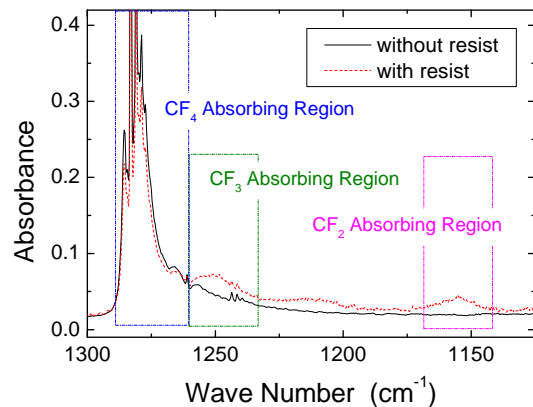


図 6. フォトレジスト有無での IR スペクトルの比較

(c) その他

毎週水曜日に代表の学生1名が自身の研究に関連する論文1通を紹介・解説するミーティングに参加させて頂きました。ミーティングでは学生間での議論も活発に行われており、学生の研究に対する意欲的な姿勢を肌で感じ取ることができ、とてもよい刺激になりました。

生活について

初日はダラス・フォートワース国際空港まで Goeckner 先生が迎えに来て下さいました。テキサスでは車での移動が一般的であり、空港からテキサス大学ダラス校までは車で40分程度ですが、公共交通機関を利用すると、バス・電車を乗り継いで2時間30分程かかってしまいます。後にも述べますが、テキサスで生活するには自動車を所持していないと若干不便でした。大学に到着してからは Goeckner 教授に研究室を案内して頂き、その後学生寮の鍵を借りて、初日は寮でゆっくり休みをとることになりました。寮に関しては、消耗品以外は調理器具、洗濯機、タオル等ほぼ全て完備されており、非常に快適な生活を送ることができました。なお、天候に関しては「テキサスは温かい」との話を聞いていましたが、私がアメリカを訪問した最初の週は例年より強い寒波がテキサスを直撃しており、日本にいたときよりも寒く感じました。

2日目には、大学で生活を行う上で必要な身分証等の申請に行きました。幸い Goeckner 教授・Overzet 教授の研究グループに日本人の博士課程の学生が1名在学中であり、身分証の申請を始め、近くのスーパーを案内して頂いたり、観光地を紹介して頂いたり、いろいろと生活面でその学生に面倒を見て頂けることとなりました。

滞在中の食事は基本的に自炊を行っていました。大学にもダイニングホールはありますが、\$8で食べ放題という方式を取っており、日常的に利用するには不向きであると感じました。ただ、ダイニングホールの料理自体は美味しく種類も豊富で

したので、滞在期間中5回利用しました。

以上のように、今回の派遣はフルオロカーボンプラズマの気相診断に関する研究を始めとして、学生との交流、海外での生活などを通して、今後の研究を更に発展させたり、日米互いの文化の理解を深めたりするきっかけとなるもので、私にとってかけがえのない2カ月間になったと思います。

最後に、このような素晴らしい機会を与えて下さった堀勝教授、関根誠教授、豊田浩孝教授、諸先生方、名古屋大学工学研究センター、現地での研究指導及び生活支援をして下さった、Goeckner 教授、Overzet 教授、諸学生、この度の ITP 長期派遣プログラムに携わって頂いた全ての方々にご心より感謝申し上げます。