

International Training Program 韓国 成均館大学 派遣報告

名古屋大学工学研究科電子情報システム専攻 近藤 祐介

1. はじめに

私は、International Training Program (ITP) 長期派遣プログラムに参加し、成均館大学 Center for Advance Plasma Surface Technology (CAPST)においてHan教授の指導の下で研究活動を行いました。

私は絶縁膜のエッチングについて研究しており、実験及びプラズマモデルによるエッチング機構の解明を行っています。エッチングにはプラズマ中のイオン・ラジカルの組成・バランスが大きく影響しており、特にラジカルはプラズマ中の密度が高く、プラズマ中での反応及び表面反応に大きく影響します。そのため、プラズマ中のラジカルを測定することはプラズマエッチングの制御を行うために大変重要な課題となっています。

CAPSTのHan教授の研究グループではスパッタリングやプラズマ化学気相堆積法 (PECVD) を用いた薄膜形成とその特性制御・応用に関する研究に力を入れています。その中で特性制御に向け、プラズマ中のラジカル密度測定法として、真空紫外光 (VUV) を用いた手法によるシランプラズマ中のラジカル密度の測定装置構築及び測定が行われています。私の測定に関する知見・経験を活かしつつ、ラジカル測定に関する新たな知見を得るために、真空紫外吸収分光装置の構築及び測定に関する研究を行いました。

2. 研究内容

プラズマ中のラジカル密度を測定する方法として吸収分光法が挙げられる。吸収分光法とは、プラズマを透過した光強度の入射光に対する減衰の程度から、プラズマに含まれる粒子の絶対密度を計算する方法である。図1に吸収分光法の概略図を、また原理を以下に示す。

下準位の原子密度 N_1 と吸収係数 $\kappa(\nu)$ は以下の関係式で結びつけられる。

$$\int \kappa(\nu) d\nu = \frac{c^2}{8\pi\nu_0^2} \frac{g_u}{g_l} A_{ul} N_1 \quad [1]$$

ここで c は光速、 ν_0 はスペクトル線の中心周波数、 g_u 、 g_l はそれぞれ上準位、下準位の統計重率、 A_{ul} は吸収スペクトル線のアインシュタインA係数 (遷移確率)を示す。光源からの平行光がプラズマ中を透過すると、Lambert の法則から、

$$\kappa(\nu) = -\frac{1}{L} \ln \left[\frac{I_0(\nu) - I_A(\nu)}{I_0(\nu)} \right] \quad [2]$$

となる。ここで $I_0(\nu)$ は透過光強度、 $I_A(\nu)$ は吸収強度、 L は吸収長を示す。観測された光の強度は周波数について積分した値となり、

$$I_0 = \int e_0 f_0(\nu) d\nu \quad [3]$$

$$I_A = \int e_0 f_0(\nu) [1 - \exp\{-\kappa_0 f_A(\nu)L\}] d\nu \quad [4]$$

と表される。ここで、 $f_0(\nu)$ は光源の発光ラインプロファイル関数で、光源がインコヒーレント光の場合、ガウス型となる。 $f_A(\nu)$ は原子による吸収ラインプロファイル関数で、低圧においては原子の熱運動に起因するドップラー拡がりの寄与が最も大きく、同様にガウス型となる。また、 e_0 は $f_0(\nu)$ の中心周波数における光源の発光強度、 κ_0 は中心周波数での吸収係数である。式[2]から式[4]の3つの式より、

$$\int \kappa(\nu) d\nu = \kappa_0 \int f_A(\nu) d\nu \quad [5]$$

が得られる。式[1]と式[5]より、

$$N_1 = \frac{8\pi\nu_c^2}{c^2} \frac{g_l}{g_u} \frac{\kappa_0}{A_{ul}} \int f_A(\nu) d\nu \quad [6]$$

が求められる。

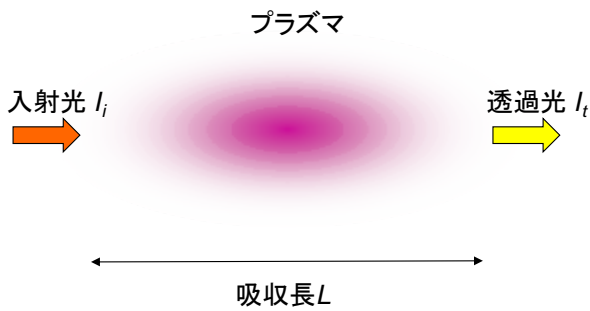


図1 吸収分光法

VUV高原には大気圧マイクロホローカソードランプ(MHCL: Micro Hollow Cathode Lamp)を用いた。MHCLはインコヒーレントな光源であるため、吸収プロファイル、並進温度を仮定し、絶対密度しか求めることができないが、レーザーを用いるよりも計測装置が簡便であるという利点がある。図2に測定に用いたVUV測定装置の写真と構成図を示す。

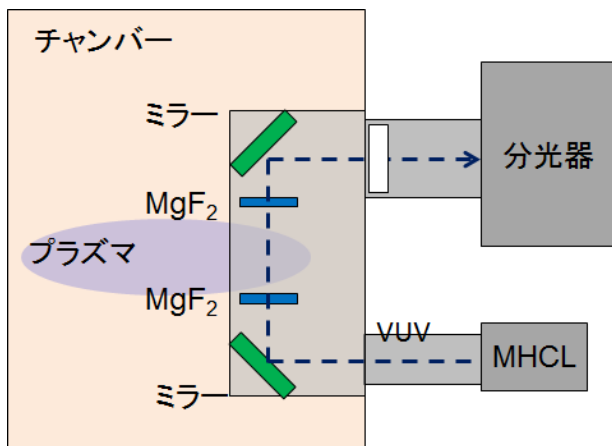
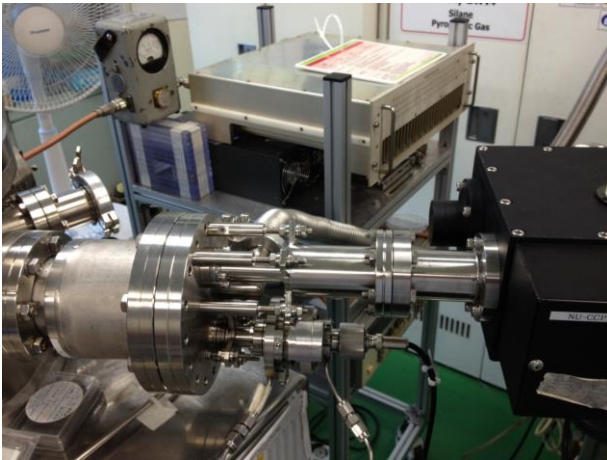


図2 VUV吸収分光法装置構成図

まず、VUV光の光軸を調整するために、光源側と分光器側のアジャスターを調整することによって、最大の強度が得られる位置に調節した。このとき光源にはHeを250 sccm、He+O₂+H₂+N₂の混合ガスを2.5 sccmで導入し大気圧とし、印加電圧を電流が10-12 mAとなるよう印加し大気圧プラズマを生成し、VUV光を生成した。強度測定には分光器に取り付けた光電子増倍管(PMT)を用い、-1200 V印加したときの強度を測定した。用いた波長は全波長、120 nm (N)、121.6 nm (H)、130.3 nm (O)、164.0 nm (He)、174.3 nm (N)を用いた。しかし全波長を測定したときの最大信号強度は4 mV程度しか得られなかった。測定には最低でも100 mV以上の強度が無ければ困難であるため、信号が弱い原因の調査を行った。

信号が弱い原因を調査するために、図3に示すように光源と分光器を直接接続し、光源の発光強度が十分であることを確認した。

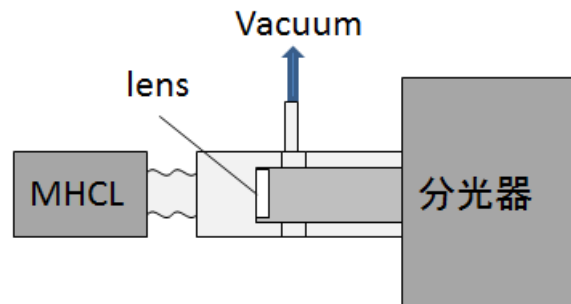


図3 光源-分光器直接接続構成図

直接接続し、光軸調整を行った結果、分光器側のレンズにプロセスガスが直接接触することを防ぐためのMgF₂窓の有無により、信号強度が大きく変化することが確認され、MgF₂窓でのVUV光の減衰が信号強度の低下につながっていたと考えられることが確認された。MgF₂なしの信号強度は121.6 nmで260 mV程度と測定には十分な発光が得られていると考えられることも確認された。今回の測定装置構成ではMgF₂窓の有無による実験及び装置への悪影響は無いため、以降の実験ではこのMgF₂窓を取り除いている。

信号低下の原因と考えられるMgF₂を取り除いたため、次に再度測定装置を構成し、発光信号強度の確認を行った。光軸調整及びレンズのフォー

カスの調整を行った結果、表1のような発光信号強度が得られた。また、図4に波長121.6 nmの発光信号強度を示す。

表1 測定発光強度

波長 [nm]	発光信号強度 [mV]
全波長	160
120.0	4.8
121.6	240
130.3	44
164.0	20
174.3	11.2

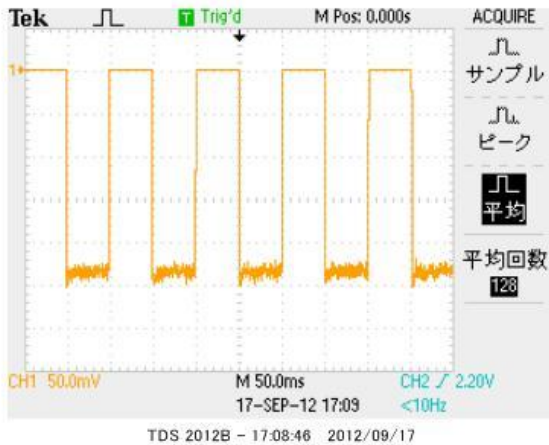


図4 波長121.6 nmの発光信号強度

表1及び図4に示した測定されたH(121.6 nm)の発光強度は吸収分光測定を行うには十分な強度であると考えられる。しかし、N(120.0, 174.3 nm)及びO(130.3 nm)に関しては吸収分光測定を行うには強度が不足していることが分かった。H以外の発光信号が弱い原因を解明するため、チャンバー側に取り付けられている、チャンバーと測定装置を分離しているMgF₂窓を取り外して測定しても、発光強度は変化しなかった。そのため、ミラーで減衰しているものと考えられる。ミラー(AI)はMgF₂コートがなされていない場合、反射率が小さくなる(< 160 nm)ので、コートが無いミラーを使用している可能性があることが分かった。

Hは測定可能な発光強度が得られているため、実際にチャンバーでH₂のプラズマを生成し、Hラ

ジカルの測定を行った。用いたチャンバーは容量結合型プラズマCVD装置でH₂ガスを流量1000 sccmで導入し、圧力を1 Torrとした。電極に180 Wのパワーで電力を印加し、プラズマを生成、チャンバー壁に取り付けたVUV吸収分光装置で121.6 nmの波長の信号強度のプラズマON/OFF時の変化を測定した。その結果、H₂ガスを導入し、プラズマを生成していないときとプラズマを生成したときでは信号強度は145 mVで変化が無かった。プラズマ生成部より測定位置までは距離があるため、測定位置ではラジカル密度が低く、吸収が測定可能なほど起きていないと推測される。吸収が足りない場合、吸収長を長くすることで吸収を大きくすることが出来るが、測定装置は吸収長47 mmで固定されており、用いた測定装置では測定が不可能であると考えられる。

吸収長の問題を解決するため、図5に示す吸収長を大きく取れるよう装置構成を設計した。また必要な部品を発注した。しかし、帰国までに完成せず、VUV吸収分光測定を成功することは出来なかった。しかし、測定装置構成の初期から問題を解決し、測定可能な状態まで携わることができ、この知見は今後の研究にも活かせるものであると考えられる。

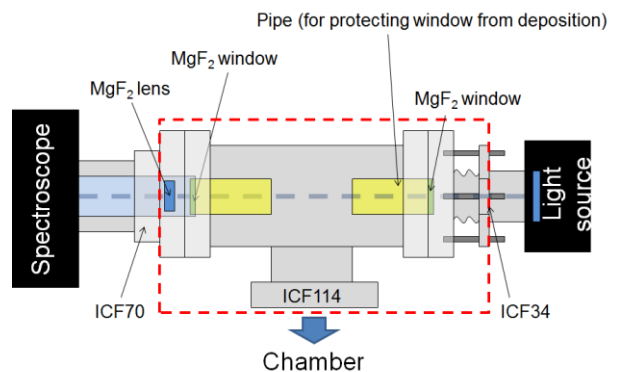


図5 対向型VUV吸収分光装置構成

3. 韓国での生活について

私が韓国での生活を始めたのは8月の終わりで、日韓の関係が悪化しているさなかであり、ITP 参加直前は大変不安でした。しかし、Han 先生をはじめとする CAPST のメンバーには暖かく受け入れて頂き、生活を通して特に影響を感じることはありませんでした。

食生活は CAPST の学生とチゲなどの韓国料理を食べに行ったり、近くのコンビニエンスストアで済ましたりすることが多かったです。韓国の料理は大変から辛い物が多く、初めはその辛さのため胃腸が痛むこともありましたが、2 ヶ月後にはある程度ですが慣れ、韓国料理を満喫できたと思います。大学近くには駅もありソウルまで1時間程度で行くことが出来、街を散策したり、世界遺産に行ったりと韓国の文化に触れるいい機会を得ることもできました。

研究生生活に関しては毎日9時ごろに研究室に向かっていましたが、その時間にはすでに研究室に来て、作業している学生も多数おり、研究への意識の高さを感じました。一緒に実験を行っていた Shin さんと議論しながら遅いときは11時近くまで実験をしていることもありましたが、英語でコミュニケーションを行っていましたが、うまく意思疎通が出来ないことがしばしばあり、CAPST の学生たちに比べ、私の英語力の低さを痛感し、韓国の学生の世界への意識の高さも感じる事が出来ました。成均館大学で行われた講演会を聴講する機会もありました。スライドこそ英語で書かれていましたが、話は韓国語であり、十分に理解は出来ませんでした。貴重な経験であったと思います。

4. 最後に

このような機会を与えてくださった堀勝教授、関根誠教授、豊田教授、ITP 関係者の皆様に心より感謝申し上げます。また、研究面から生活面まで幅広く面倒を見てくださった Han 先生をはじめとする CAPST の皆様に心より感謝申し上げます。