

International Training Program

ドイツ ルール大学ボーフム校 派遣報告

名古屋大学工学研究科電子情報システム専攻 氏名 堤 隆嘉

はじめに

今回、International Training Program (ITP) 長期派遣プログラムに参加し、2012年11月23日から2013年1月21日までの約2カ月間、ルール大学ボーフム校(Ruhr-University Bochum)の Uwe Czarnetzki 教授の研究室にて滞在した。この滞在中にテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS: Terahertz time-domain spectroscopy) によるプラズマ密度計測に関する実験やさまざまなプラズマ診断法、プラズマプロセスなどの学習を行ったので、以下に報告する。

ルール大学ボーフム校・研究室紹介

ルール大学ボーフム校はドイツ・ノルトライン＝ヴェストファーレン州ボーフムにある州立大学であり、1962年に発足し、西ドイツで第二次世界大戦のあと最初の大学の発足である。現在教職員は約5,000人、学生は130の国々から36,500人で、ノルトライン＝ヴェストファーレン州の3番目に大きい大学である。学部は20部で、本科は約80科あり、ライフサイエンスや自然科学、エンジニアリングなどさまざまな学問を学ぶことができる。

近年、ルール大学ボーフム校では理系に重きをおいており、物理学や天文学、電気工学などの様々な学部の人々が、プラズマ科学や技術の研究を行っている。また、Center for Plasma Science and Technology (CPST)が設置され、主な研究テーマに生体への応用技術、プラズマプロセス技術の開発・制御などが取り上げられている。

Uwe Czarnetzki教授の研究室も、上記センターの一部としての役割を果たしており、主にレーザー誘起蛍光分光法、発光分光、吸収分光法など分光技術を用いたプラズマ計測を主体としたプラズマ基礎に関する研究を実施している。

私の博士後期課程の研究テーマとして低コヒーレンス干渉計を用いたプラズマ診断法の開発が挙げられる。そのため、今回の滞在中を通して、テラヘルツ時間領域分光法だけでなく様々な光

干渉を用いたプラズマ診断法の知見を得られることができ、博士課程後期課程での研究をより一層発展させるものとなった。

研究内容

(a) 背景

一般的に低密度プラズマの診断法としてマイクロ波を用いた技術が用いられている⁽¹⁾。また、レーザ干渉計を用いることで高密度プラズマ(10^{19} cm^{-3})の診断が可能となっている⁽²⁾。しかし、これらの計測法は、プラズマの複素屈折率による位相変化を測定するために異なる周波数の光源を用いる必要がある。

これらの問題を解決するために、テラヘルツ領域の電磁波によるテラヘルツ時間領域分光計測法(THz-TDS)を用いた計測技術の応用研究がおこなわれている^(3,4)。THz-TDSが用いられる理由に、サブピコ秒程度の非常に高い時間分解能での計測、広範囲のプラズマ密度の計測などが可能であることが挙げられる。そのため、工業分野のプラズマだけでなく様々な分野のプラズマへの応用が可能である。

今回、誘導結合プラズマ(Inductively Coupled Plasma: ICP)のプラズマ密度計測をTHz-TDSに用いておこなった。

(b) THz-TDSを用いた電子密度計測の原理

前述したように、THz-TDSはテラヘルツ領域の電磁波を用いている。この電磁波は、プラズマ中を透過させることで電子密度(=プラズマ密度)また衝突周波数 ν に応じ振幅および位相が変化する。この変化量を読み取ることで電子密度 n_e を測定するといったものである。以下に詳細な原理を述べる。

プラズマ周波数は

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1)$$

で表すことができ、 n_e は電子密度、 m_e は電子の質量である。また、プラズマの複素誘電率は

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) - i \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) \quad (2)$$

である。この複素誘電率をもったプラズマ中を透過後のTHzの時間領域で電界振幅 $E(t)$ は計測され、フーリエ変換(FT : Fourier transform)をすることで周波数領域での複素振幅 $E(\omega)$ を得ることができる。複素振幅は

$$E_{plas}(\omega) = TE_{ref}(\omega) \exp(i(k_{plas} - k_0)L) \exp(-\alpha L) \quad (3)$$

となり、 L は波がプラズマを通過する長さ、 k_0 はプラズマがない状態での透過する波の伝搬定数、 α は吸収係数、 T はフレネルの透過係数である。また、媒体中を透過する波の伝搬定数および減衰定数はそれぞれ $k = \text{Re}\{\varepsilon^{1/2}\}\omega/c$ 、 $\alpha = \text{Im}\{\varepsilon^{1/2}\}\omega/c$ である。この複素振幅の位相差 $\Delta\Phi$ は

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \arg\{E_{ref}(\omega)\} - \arg\{E_{plasma}(\omega)\} \\ &\approx \frac{\omega L}{c} \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

となり、 $\nu \ll \omega$ から衝突周波数 ν は省略することができる。したがって、位相差を計測することでプラズマ周波数 ω_p を計測でき、(1)式より、電子密度が導出できる。

(c) 実験装置

THz-SDを用いた電子密度計測システムおよびICPチャンバーの上部からの概略をFig. 1. に示す。フェムト秒レーザーから発信したレーザー光は半波長板を透過後にビームスプリッターによりプローブ光と誘起レーザー光の二つの光に分波する。プローブ光は1/4波長板を通りディーレイラインにより反射され再び1/4波長板を通り光伝導アンテナに入射する。誘起レーザー光は光伝導アンテナに入射する。この発信側の光伝導アンテナは電極間に電圧を印加した状態でフェムト秒レーザー光が照射されることでTHz領域の電磁波が放射される。このTHzパルス波はプラズマ領域を通過し、受信側の光伝導アンテナに照射される。受信側の光伝

導アンテナはTHzパルス波とフェムト秒レーザー光を同時に照射することで、THzパルス波の電場振幅に応じた電流が生成される。プローブ光のディーレイラインを走査することで受信側の光伝導アンテナに照射されるフェムト秒レーザー光のタイミングを変化させ、THzパルス波の時間波形を検出することが出来る。

ICP型プラズマチャンバーは高さ33 cm、直径15 cmであり、アンテナとTHzパルス波の伝搬ラインとの距離は4 cmである。また、容器にそって多数の永久磁石を並べることにより壁表面に局在する磁場を形成し、放電プラズマの低圧力化や高密度化、均一化を図っている。

(d) 実験結果

THz時間領域型分光法を用いてICPプラズマ中の電子密度計測を行った。ガスにネオンを用い、圧力を2 Paに設定した。また、アンテナへのRFパワーを200Wから1000Wまで変化させ、プラズマの電子密度計測を試みた。また、滞在中にフーリエ変換や位相差の導出、フィッティングなどのプロセスを一貫して行えるようプログラムを作成した。

Figure 2 に放電開始前とRFパワー200Wおよび

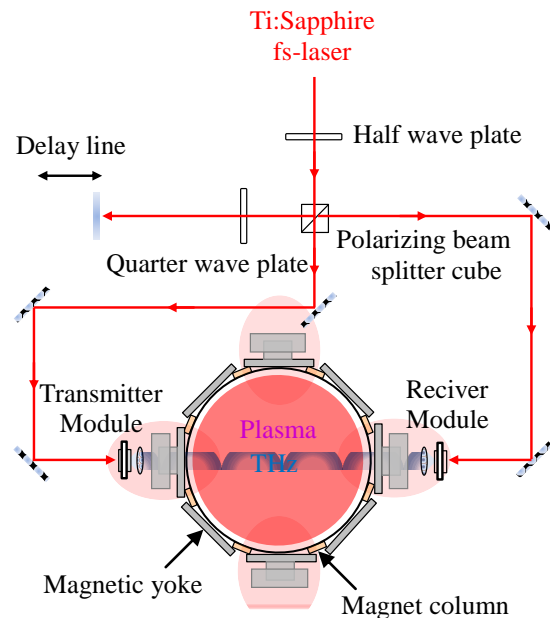


Fig. 1. THz時間領域分光による電子密度計測システム

を1000W印加した際のNeのTHzパルス波の時間波形を示す。Figure 2 から、プラズマ内をTHzパルス波が透過したことにより時間波形が変化していることがわかる。また、RFパワー200Wと1000Wの比較においても波形が異なることが分かる。これはプラズマ内の電子密度変化に伴うプラズマの複素誘電率および伝搬係数の変化が原因である。この時間波形をフーリエ変換することで、(3)式で述べたTHzパルス波の複素振幅および位相を導出することができる。また、前述したように、放電前と放電後の位相差から電子密度を導き出すことが可能である。Figure 3 にNeガスを用いRFパワーを変化させた際の位相差を示す。この結果から、THz-TDSによりプラズマ内の電子密度変化に伴う位相変化が計測できていることが確認できた。また、(4)式によりフィッティングすることでプラズマ周波数が導出でき、(1)式から電子密度を導き出すことが可能である。Figure 3に示した実線はフィッティングラインであり、これから導出した電子密度をFig. 4. に示す。この結果から、RFパワー増加に伴う電子密度の増加を計測することができた。しかし、電子密度は直線的に増加していないことがわかる。これらは高いRFパワーを印加することで電極温度が上昇し対流によりTHzパルス波の伝搬位置の電子密度が低下したことが原因と考えられる。

今回、より高密度プラズマへの応用の可能性を調べるためにガスにXeを用いてNeとの比較を行った。Xeは電離電圧が12.12 eVとNeの21.55 eVに比べ低くなっていることから、Neよりも高密度のプラズマが生成される。実験条件はNeガスを用い

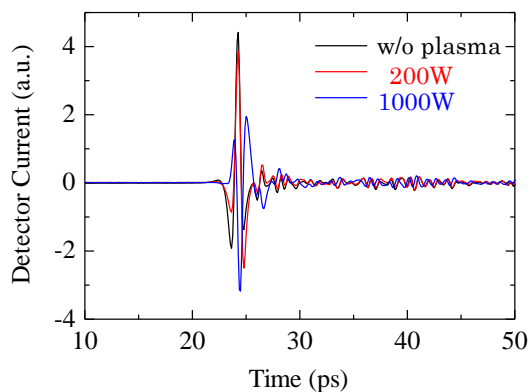


Fig. 2. プラズマ状態における THz パルス波の時間波形変化

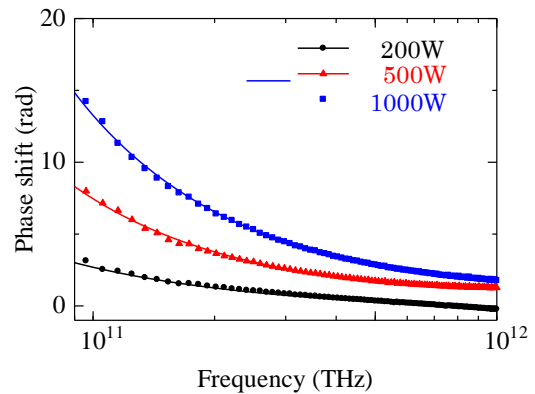


Fig. 3. Ne プラズマにおける RF パワー変化に伴う位相変化量

て電子密度測定を行った際と同様である。Figure 5 に、Xeガスを用いてRFパワー200W~1000Wまで変化させたときの電子密度計測結果を示す。Neガスを用いたときに計測された電子密度範囲 $2.91 \times 10^{19} \sim 1.44 \times 10^{19} / \text{m}^3$ と比べ、Xeガスでは $3.21 \times 10^{19} \sim 6.59 \times 10^{19} / \text{m}^3$ と高密度のプラズマが生成されており、THz-TDSによりさまざまなガスでの電子密度計測が可能であることが確認できた。また、Neプラズマと同様に電極温度の上昇に伴う対流の影響により、電子密度はRFパワーに比例していないことが確認できた。

現在、ディーレイラインにおける走査方法やフーリエ変換やフィッティングなど行うプログラムなどの問題から、リアルタイムでの電子密度モニタリングは行えていない。プラズマプロセスに

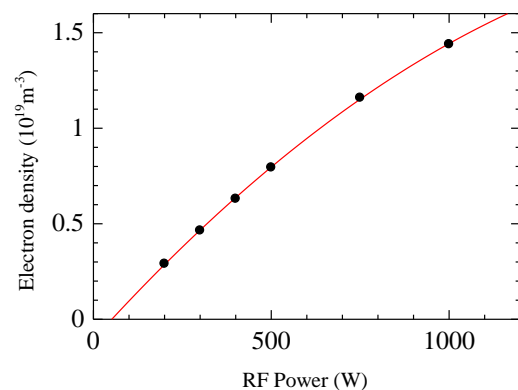


Fig. 4. Ne プラズマにおける RF パワーと電子密度の関係

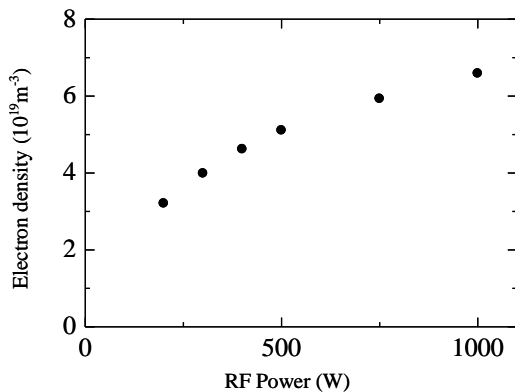


Fig. 5. Xe プラズマにおける RF パワーと電子密度の関係

おける表面反応などの解明において電子密度モニタリングは重要な課題となっている。その課題を達成するため、私自身でリアルタイムでの電子密度モニタリングのためのフーリエ変換から電子密度導出までのプログラムを Lab View(National Instruments 社)により作成した。これにより、電子密度モニタリングの実現に近づいたとともにTHz-TDSのより深い理解を得ることができた。

まとめ

今回、ルール大学ボッフム校の Uwe Czarnetzki 教授の研究室にて 2 ヶ月間滞在し、プラズマ密度計測法であるテラヘルツ時間領域分光法を中心として、さまざまなプラズマ診断法を学ぶことができた。また、ドイツでの研究生生活やコミュニケーションを通じて海外で活躍する研究者において大切なものが何であるかを学ぶこともできた。短期間ではあったが、たいへん貴重な経験ができ自身の成長に繋がったと確信している。

このような機会を与えてくださった堀勝教授、豊田浩孝教授、諸先生方、名古屋大学工学研究科附属プラズマナノ工学研究センターITP 事務局の江良様、また滞在期間中にお世話して下さった田嶋先生に誠に感謝するとともに、親切に迎え入れて下さった滞在先のUwe Czarnetzki教授、および研究室の皆様にご心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Lawrence J. Overzet and Michael B. Hopkins, J. Appl. Phys. **74**, 4323 (1993).
- (2) D. J. Spence, P. D. S. Burnett, and S. M. Hooker, Opt. Lett. **24**, 993 (1999).
- (3) S. P. Jamison, Jingling Shen, D. R. Jones, R. C. Issac, B. Ersfeld, D. Clark, and D. A. Jaroszynski, J. Appl. Phys. **93**, 4334 (2003).
- (4) A. Ando, H. Kitahara, T. Kurose, K. Kitano, K. Takano, M. Tani, M. Hangyo and S. Hamaguchi, J. Appl. Phys. **110**, 073303 (2011).