

International Training Program

ドイツ ルール大学ボッフム校 派遣報告

名古屋大学工学研究科電子情報システム専攻 荒巻光利

ルール大学ボッフム校にて、外部共振器型半導体レーザー（ECDL）を用いたプラズマ分光システムの開発を行った。滞在期間は平成 21 年 2 月 13 日から平成 21 年 3 月 13 日の 1 ヶ月間で、Uwe Czarnetzki 教授の研究室でお世話になった。装置開発の期間としては比較的短期であったが、レーザー光源を完成させ、その性能評価を行った。また、作製したレーザー光源を用いた予備的なレーザー吸収分光計測を行った。このように当初計画を完了することが出来たのは、受け入れ先研究室のスタッフおよび学生の皆さんの協力のおかげであり、ここにお礼を申し上げたい。本格的な計測実験は次回派遣以降となるが、以下に今回の派遣報告をまとめる。

ボッフムとルール大学の紹介

ボッフムは、ドイツのノルトライン・ヴェストファーレン州に属する、かつては炭坑と鉄鋼の街として栄えた人口 40 万人弱の工業都市である。1970 年代には全ての炭坑が閉鎖されたが、博物館

として利用されている炭坑があり、当時の様子を垣間見ることが出来る。近年、この地方の産業の中心は鋳工業から、自動車や繊維産業等へと変化している。

ルール大学は、街の中心となっているボッフム中央駅から地下鉄で 10 分ほど南に移動した場所に位置している。ルール大学の学生数は約 3 万 4 千人、教職員数は約 5000 人である。学生の約 10% が留学生である。ボッフムには他にも大学がいくつかあり、大学関係者が多い街である。

大学校舎は、デザインが統一されており（図 1）見分けが付きにくいというえに、丘に立てられており建物により階層構造が異なるため、慣れるまではしばしば道を間違えた。大学周辺は自然が豊かで、キャンパスの南側には公園があり（図 2）天気の良い日には芝生で昼食をとるのも良さそうだが、今回訪問した期間はほとんど毎日雨か曇りで、その機会は無かった。

公園を越えてさらに南に向かうと、ルール川に突き当たり、川沿いを散歩する人々に出会う。ド



図 1 ルール大学校舎



図 2 ルール大学内公園



図3 ルール川沿いの散歩道

イツ人は散歩好きだと良く言われるが、あまり天気の良いくない夕方にもかかわらず子供から大人まで多くの人が散歩を楽しんでいた(図3)。ルール川を挟んだ向かいの丘には、16世紀の町並みで有名なハッティンゲンが見える。

ルール大学は、街中心から少し離れているため、静かな環境で研究に集中するには非常に適した大学だと感じた。

滞在先研究室紹介

滞在先の Uwe Czarnetzki 教授の研究室は、プラズマの基礎研究において著しい成果を挙げており、昨年 *Journal of Physics D* に掲載された論文は、*Journal of Physics D* の 2008 年に最も参照された論文に選ばれている (D O'Connell et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** (2008) 035208)。Czarnetzki 教授の研究室では、レーザー誘起蛍光減光法、レーザー誘起蛍光法、トムソン散乱計測、発光分光法、吸収分光法等、主に光学的手法を用いてプラズマの診断を行っている。

外部共振器型半導体レーザー (ECDL) の開発

近年、中性ガスとプラズマの相互作用を考慮したプラズマおよび中性ガスの空間構造形成の理解が注目され始めている。低ガス圧、高電離度の条件では、電子の圧力が中性ガスの圧力を超える場合があり、プラズマが中性ガス分布を非一様にする事が報告されている。従って、大面積で均一

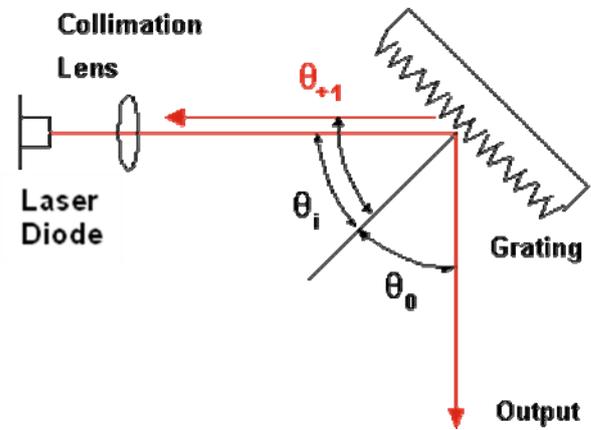


図4 外部共振器型半導体レーザー

なプラズマプロセスを実現するには、プラズマの一様性だけでなく、中性ガスの分布も含めた理解が必要となる。中性ガスのローカルな圧力を評価するには、その密度と温度を測定する必要がある。これらの情報は中性ガスのドップラースペクトルを観測することによって得られるが、温度の低い中性ガスの観測には線幅の狭い波長可変レーザーが必要となる。パルスレーザーの線幅は比較的に広いので、温度の低い中性ガスの速度分布を観測するには適していない。

今回我々は、プラズマ中のアルゴン準安定原子のドップラースペクトルの観測を目的として、線幅が十分に狭く波長可変な光源として、アルゴン準安定状態の $(^2P_{3/2})4s[3/2]^o_2$ を $(^2P_{1/2})4p'[1/2]_1$ へと励起する 696.735 nm の ECDL を開発した。光源には、日立製レーザーダイオード (HL6738MG) を用いた。HL6738MG は、データシート上は 695 nm までしか発振しないため、今回レーザーダイオードを比較的高温で動作させた。動作温度と室温の差が大きいため、温度安定性には特に配慮して開発を行った。

図4に ECDL の概念図を示す。レーザーダイオードの出力は、レンズにより平行光にされた後、回折格子によって反射される。このとき、1 次回折光をレーザーダイオードに帰還することによって発振波長を安定化させることができる。回折格子に対するレーザー光の入射角 θ_i は以下の条件を満たす必要がある。

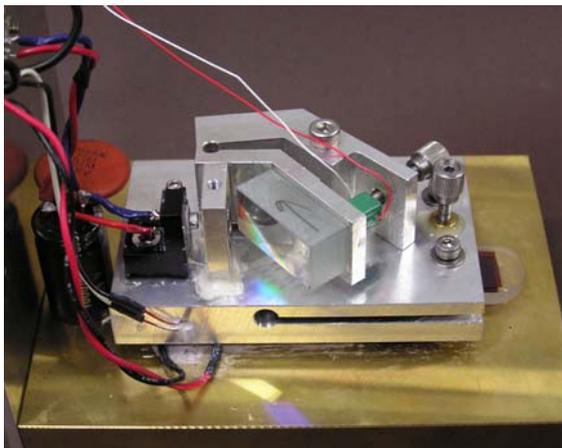


図5 作製した外部共振器型半導体レーザー

$$\frac{\lambda}{2} = \delta \sin \theta_i$$

ここで、 λ はレーザー光の波長、 δ は回折格子の格子間隔である。回折格子の角度を調整することで、帰還する波長を選択し、発振波長の制御が可能となる。

図5に今回作製したECDLを示す。ECDLの発

振波長は、ダイオードレーザーの温度、動作電流、回折格子の角度で決まるため、これらを精度良く制御・安定化する必要がある。回折格子の角度は、精密ねじで粗調整を行った後、ピエゾ素子によって精密に制御される。波長の掃引はピエゾ素子にランプ電圧を印加することで行う。また、温度および動作電流は、それぞれ約10 mK および6 μ Aの精度で安定化されている。

今回、動作電流のフィードフォワード制御等を行わないで、約5 GHzの範囲でECDLの波長をモードホップフリーで掃引することができた。レーザー出力は約10 mWであった。

アルゴン準安定原子のレーザー吸収分光

今回作製したECDLの性能の確認のため、レーザー吸収分光計測を行った。

図6に実験装置を示す。プラズマは、スパイラルアンテナによる誘導結合放電によって生成されている。放電条件は、RF電力 1 kW (13.56 MHz)、アルゴンガス圧 0.1 Paであった。ECDLの出力の一部は、ビームスプリッターによって分離され、ファブリ・ペロー干渉計によってECDLがシングルモードで発振していることの確認に用いられる。

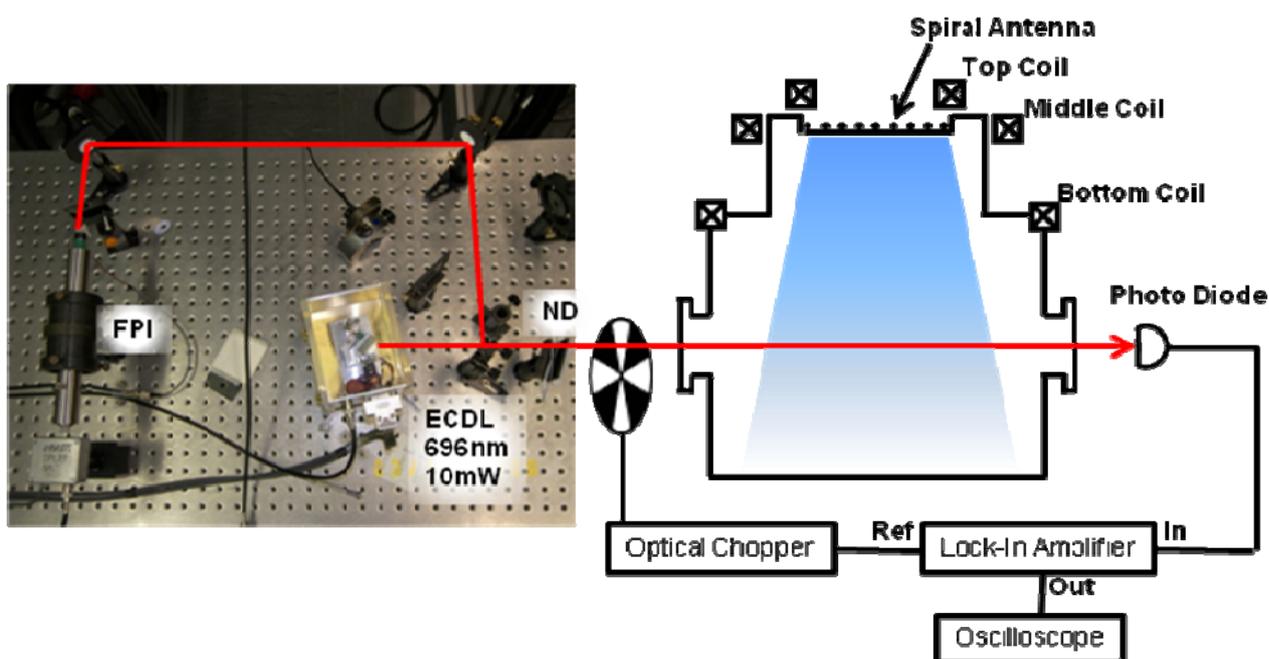


図6 実験装置

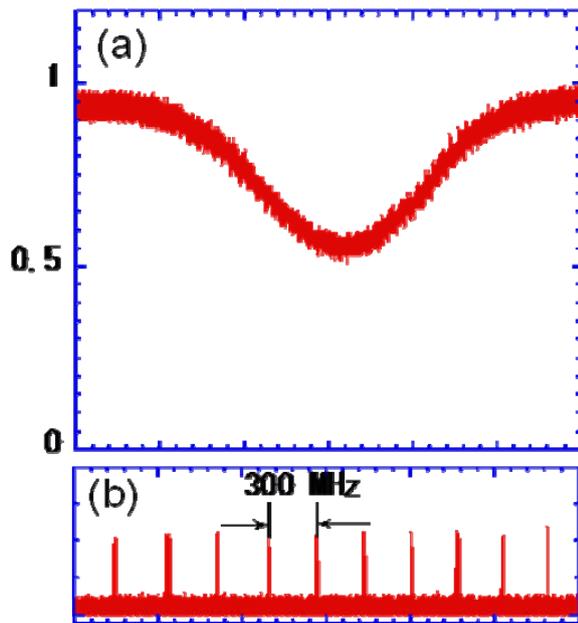


図 7 (a) 吸収スペクトル、(b) ファブリ・ペロー干渉計の干渉縞

また、ECDL の波長掃引時には、ファブリ・ペロー干渉計の干渉縞を周波数マーカーとして用いる。ここで、ファブリ・ペロー干渉計のフリースペクトルレンジは 300MHz であった。レーザー光は、吸収の飽和を避けるため ND フィルタで減衰させられた後、光チョッパーによって 900 Hz で強度変調されて、真空容器側面の観測窓から導入される。入射窓前面でのレーザー強度は $5 \mu\text{W}$ であった。透過光強度は、フォトダイオードによって電気信号に変換され、その変調成分はロックインアンプによって検出され、オシロスコープによって記録される。

図 7 にレーザー吸収分光で得られたアルゴン準安定状態原子のドップラースペクトル (図 7(a)) とファブリ・ペロー干渉計の干渉縞 (図 7(b)) を示す。300 MHz ごとに得られる干渉縞を用いて掃引周波数を校正することで、吸収スペクトルの半値全幅は約 1 GHz と見積もられた。この半値幅から見積もられるアルゴン準安定原子の温度は約 420 K と室温に近い値となった。今回の計測で、ECDL の掃引周波数、安定性ともにプラズマ分光に用いるのに十分な性能であることが示されたと

ともに、対象となるプラズマ中に吸収分光に十分な量のアルゴン準安定原子が存在することも確認できた。

次回訪問時には、さらに詳細なレーザー吸収分光計測を行うとともに、レーザー誘起蛍光法を用いたアルゴン準安定原子の空間分布の観測も行う予定である。