

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

前年度の派遣（平成 21 年 2 月 13 日から平成 21 年 3 月 13 日）に続き、今年度は平成 21 年 5 月 29 日から平成 21 年 7 月 28 日の 2 ヶ月間、Uwe Czarnetzki 教授の研究室でお世話になった。Czarnetzki 教授の研究室では、レーザー誘起蛍光（LIF）法、レーザー誘起蛍光減光法、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。前回の派遣では、外部共振器型半導体レーザー（ECDL）を作製し、その性能評価を行った。今回は、この ECDL を用いて、プラズマ中のアルゴン準安定原子を、レーザー誘起蛍光法およびレーザー吸収分光法によって計測した。以下に派遣の概要をまとめる。

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。図 1 は、ボッフムの繁華街から徒歩 10 分程度の距離にあるドイツ鉱山博物館である。この博物館は、ドイツ国内でも有名な鉱山博物館で、地下の炭坑を見学することができる。隣町のエッセンのツォルフェライン炭坑は 2001 年に世界遺産に登録されており、見学コースの整備などが進められている。近年、この地方の産業の中心は、鉱工業から自動車や繊維産業等へと変化している。

今回の派遣期間は気候が良い季節だったため、非常に多くのお祭りやコンサートが開催されていた。図 2 は、ボッフムの繁華街全体を使った野外コンサートのメイン会場の様子である。他にもいくつものステージが設置されており、街全体がコンサート会場となる。この期間は、普段比較的静かなボッフムの街が、多くの観光客と地元の人たちで大騒ぎになる。この他にも、ルール工業地帯を挙げて開催される産業文化イベント「エクスト



図 1 ドイツ鉱山博物館



図 2 ボッフム市街で行われた野外コンサートの様子

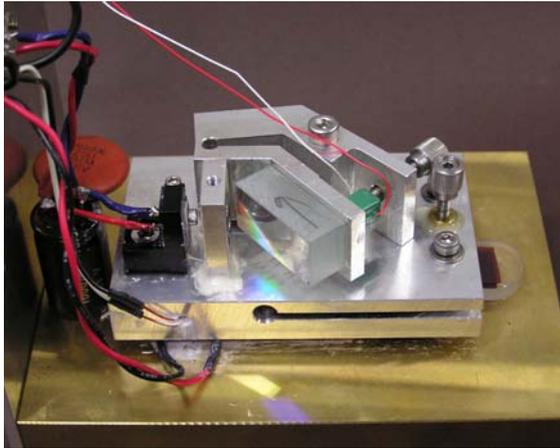


図3 作製した外部共振器型半導体レーザー

ラ・シヒト(ExtraSchicht)」など、ほぼ毎週のように様々な催しが開催される。

ルール大学は、街の中心となっているポ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。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。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。ポ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。

高密度プラズマ中のアルゴン原子測定

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、大面積で均一なプラズマプロセスを実現するには、プラズマと中性ガスの相互作用と、その結果形成される空間構造の理解が不可欠である。中性ガスの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広いため、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。

我々は、プラズマ中のアルゴン準安定原子の観測を目的として、線幅が十分に狭く波長可変な光

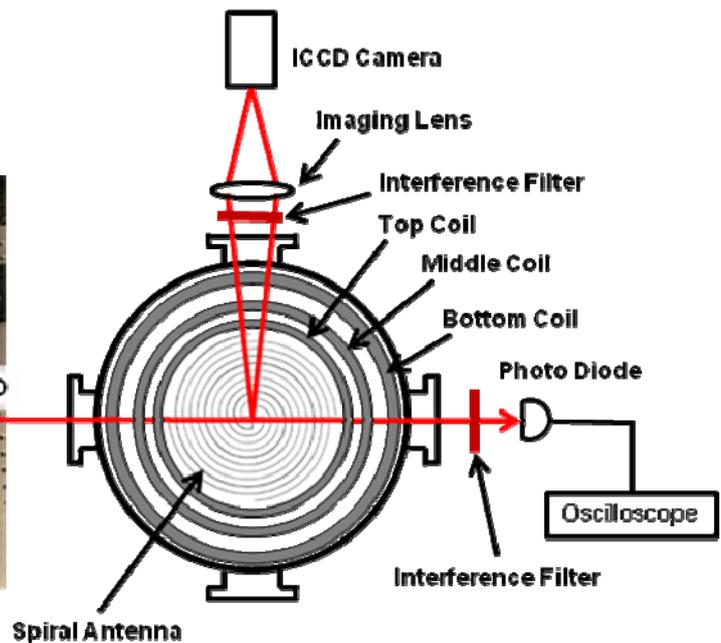
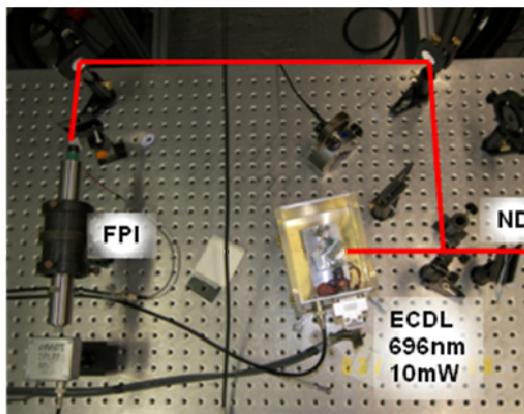


図4 実験装置

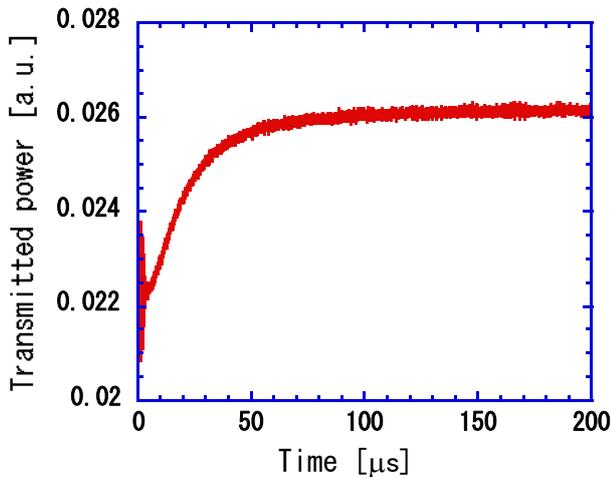


図5 レーザー透過光強度の RF 電力停止後の時間変化

源として、アルゴン準安定状態の $4s[3/2]_2^o$ を $4p'[1/2]_1$ へと励起する 696.735 nm の ECDL を開発した。図3に前回派遣時に作製した ECDL 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。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・安定化した。ECDL 出力のモードホップフリーな周波数掃引範囲は、動作電流のフィードフォワード制御等を行わずに、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。

図4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あるいはヘリコン波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。吸収分光を行う際には、吸収の飽和を避けるため減光フィルタによって 0.1% 程度に減衰させて入射する。透過光は、干渉フィルタによりプラズマの発光から分離され、フォトダイオードによって検出される。一方、LIF 測定を行う場合は、レーザー光は減衰させず、レンズを用いて収束させて入射する。 $4p'[1/2]_1$ へと励起されたア

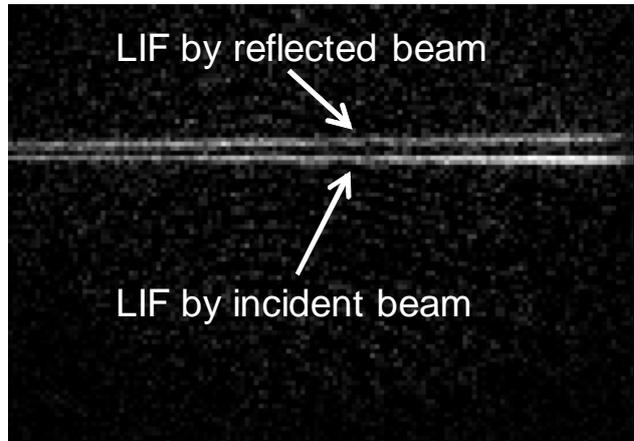


図6 ICCD カメラによる LIF 画像計測

ルゴン原子が、 $4s[1/2]_1$ へと脱励起する際に放出する 826.68 nm の蛍光を観測する。LIF 信号は干渉フィルタによってプラズマの発光から分離され、イメージンシファイア付き CCD (ICCD) カメラで観測される。測定中、ECDL がシングルモードで発振していることと、発振波長が変化していないことを確認するため、レーザー出力をビームスプリッターによって一部分離し、ファブリ・ペロー干渉計でスペクトルを観測している。

実験結果

図5に ECDL の波長をアルゴン準安定原子の共鳴中心に固定して測定した、レーザー透過光強度の RF 電力停止後の時間変化を示す。アルゴン準安定原子を生成する高エネルギー電子は、放電停止後速やかに減衰するため、準安定原子は減少し、透過光強度は時間と共に増加する。この透過光強度の時間依存性から、プラズマパラメータを得る研究を、派遣終了後も共同研究として継続している。その成果は、論文として近く発表する予定である。

図6は、ECDL の波長をアルゴン準安定原子の共鳴中心に固定して ICCD カメラで測定した、LIF 信号の径方向分布である。2本見えている LIF 信号のうち、下側が入射ビームによる LIF で、上側は出口側の窓で反射した戻り光による LIF を示している。励起レーザーの周波数をアルゴン準安定

原子の共鳴周波数の周辺で変化させながら、同様の LIF 画像を測定することでドップラースペクトルの空間変化が得られる。その情報は、中性原子圧力の空間分布を知るには不可欠であるが、今回の測定では十分な SN で観測することができず、その改善が今後の課題となった。

派遣終了後の共同研究の進展について

ITP による派遣をきっかけに、Czarnetzki 教授との共同研究を開始し、派遣終了後も継続して研究を行っている。平成 21 年 10 月には、ルール大学

の Doc 2 Doc, International Invitation Programme により、国内の共同研究先である九州大学から博士課程の荻原公平氏がルール大学へと招聘され、方向性プローブによるプラズマ診断を行った。また、平成 22 年 1 月には、今後の共同研究を円滑にすすめるため、ドイツ滞在中に共同で研究を行った博士課程の Yusuf Celik 氏が、ECDL 作製技術を習得するために来日した。平成 22 年 3 月には、今回の派遣の成果に関連して、ドイツ物理学会にて Y. Celik 氏が成果報告を行った。