

レーザー加工時に発生する有害ガスの 実時間モニタリングに関する研究

東海大学 理学部 物理学科
教授 山口 滋
(平成 11 年度研究開発助成 AF-1999015)

I. はじめに

温暖化現象をはじめとして我々をとりまく環境問題では、排気ガスや廃水に微量に含まれる物質の影響が、最近、広く認識されるようになりこれらの監視は重要性を増している。また、医薬品・半導体生産工程では、雰囲気に含まれる微量な不純物(例えばアンモニアなど)を監視・制御することが要求されている。レーザー加工時には空気あるいは、窒素をアシストガスにするため反応場でNOやNO₂が過渡的に発生する可能性がある。また、加工時に消費する酸素量をリアルタイム計測して分析することは加工品質を制御する観点からも今後重要と考えられる。

このようなガス濃度分析では、多種類の成分が混在する中からある物質を特定し、濃度 10ppm程度のレベルのガスを、高精度・短時間で定量することが必要となってくる。一方、小型の半導体レーザーでラマン散乱を得ようとする試みはいくつがあるが、10W級の実験報告は装置の特性上、筆者らの知る限りない。

最近、100W級の安定な強度を得ようとする装置として、Power build-up cavity(PBC)が、D.A.King²⁾らによって報告されている。PBC システムは、低出力の無反射(AR)コートダイオードレーザーと高フィネスの外部共振器である PBC で複合共振器を構成し、PBC 内に非常に高い光強度を得ることができる装置である。PBC はダイオードレーザーを使うにもかかわらず、フィードバック回路や温度コントロールを必要としないため、非常に簡単な光学系で装置が構成される。これを用いることによるレーザーガスセンサーの小型化、簡素化が期待できる。現在までのところ、この複合共振器の安定動作に関する特性や、モード特性などの解析は十分に行なわれてはいない。そこで筆者らは、この複合共振器の基本特性の解析やガス検出の基礎実験を行なったので報告する。

II. 動作原理

ラマン散乱を利用したガスセンシング装置としてダイオードレーザーと外部共振器を組み合わせたものは数多く研究されている。³⁾しかし、それらの多くは、発振周波数を不安定にする外部共振器からダイオードレーザーへの戻り光を遮断するためのアイソレーター、共振器内のモードを低次モードに保つための空間モードフィルター、精密な共振器長制御を行うためのPZT(Piezoelectric Transducer)などを必要とするため、光学系が非常に複雑になる。^{4),5),6),7)}また、半導体レーザーの発振波長の安定化には、フィードバック回路を使った電流のコントロールと半導体素子の温度コントロールが、必要とされている。

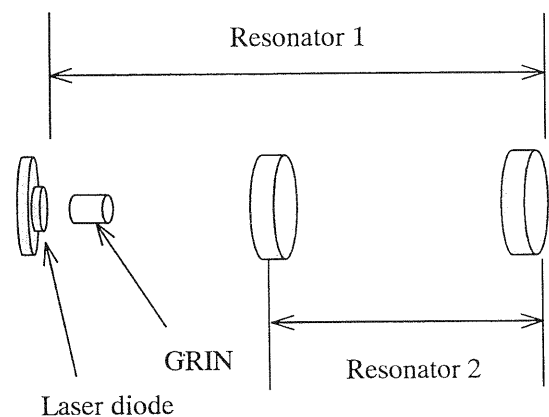


FIG.1 Power build-up cavity

PBC システムは、基本的に AR コートダイオードレーザー(波長 670nm、出力 15mW、ARコート反射率約 10⁻⁴)、

コリメート用 Gradient index(GRIN)レンズ (焦点距離 1.85mm)、PBC をつくる 2 枚の平凹高反射率ミラー (ミラー直径 6mm、曲率半径 100mm、透過率 10^{-5} ~ 10^{-3})、直流電源だけから構成される非常に簡素な構造で、コンパクトである。出力 15mW のダイオードレーザーを用いて PBC 内に 100W 以上の光強度を得ることが可能であり、非常に高い周波数安定性を持っている。

この装置では、2 枚のミラーからなる PBC と半導体の一方の端面と PBC の一方のミラーからなる共振器の 2 つで複合共振器を構成している (FIG.1 参照)。PBC 内に高い光強度を得るためには、2 つの共振器が適当な結合をすることが重要である。このとき、フィネスを非常に高くしてある ($F \approx 10^4$) ため大部分の光が PBC 内に閉じ込められるが、わずかにミラーを透過してダイオードレーザーに戻る光がフィードバックの役割を果たす。PBC では戻り光をフィードバックに使い、ダイオードレーザーの AR コート面を空間モードフィルターとして使うため、基本的に AR コートダイオードレーザー、Gradient index(GRIN)レンズ、2 枚の高反射ミラーだけで装置を構成することができる。外部共振器とダイオードレーザーの距離が最適な状態では、ダイオードレーザーの出射端面が十分に空間モードフィルターの役割を果たすため、共振器内に高次モードは存在できなくなり、共振器内のモードは TEM₀₀ となる。(FIG.2 参照)

また、単純にアライメントを変化させることで Hermite - gaussian, Laguerre-gaussian の任意の高次モードでも安定な発振が可能である。これらの内の典型的なものを FIG.3 から FIG.5 に示す。フィルターの径を変化させることができないために、最適なフィルター効果を得るためには、ダイオードレーザーの出射端面上でのビーム径が非常に重要となる。

ダイオードレーザーは、He-Ne レーザーなどに比べて広い利得分布を持っているため、外部共振器からの戻り光によるフィードバックが比較的容易に可能であ

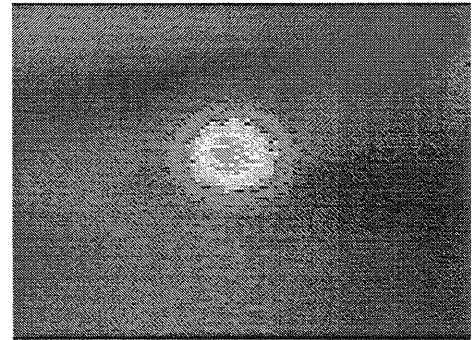


FIG.2 TEM₀₀ モー

る。半導体の温度コントロールを行わない状態では、温度の変化に伴って利得分布が変化し、発振周波数が不安定になってしまう。この装置では外部共振器から漏れてくる光がフィードバックの役割を果たすことによって、発振周波数の不安定化を防いでいる。温度変化によって利得分布が多少変化しても、ダイオードレーザーの比較的広い利得分布とフィードバック光は必ず重なる周波数を持つため、常にこの周波数から発振が起こり、発振周波数は一定に保たれる。

III. 実験方法

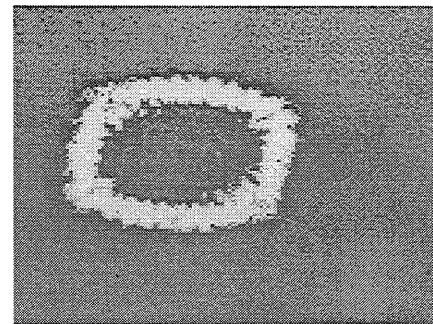


FIG.3 Laguerre-gaussian の高次モード 1

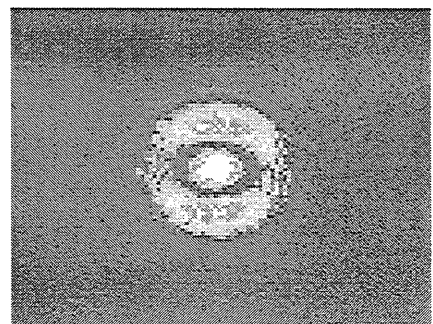


FIG.4 Laguerre-gaussian の高次モード 2

AR コート面で最適の空間モードフィルター効果を得られることが、PBC 内に高い光強度を安定に得るため、共振器内のモードを TEM_{00} に保つために非常に重要である。複合共振器内の各位置におけるビーム径を ABCD 行列による計算、ビームプロファイラによる測定から求めた。

また、AR コート面上でのフィードバック光のビーム径を決定するパラメータである GRIN レンズ-PBC 間距離 D ($L=40\text{mm}$ 固定)、PBC の長さ L ($d=35\text{mm}$ 固定) (FIG.1) を変化させて PBC 内の光強度の変化を調べた。検出器には、シリコンフォトダイオードを用い、PBC のエンドミラーを透過した光を測定して PBC 内の光強度の変化を調べた。

IV. 実験結果

(1) 共振器の特性

ABCD 則を用いて典型的なセットアップの場合の PBC 内、及びフィードバック光のビーム径の計算を行なった。PBC の長さ 35mm 、GRIN レンズ-PBC 間距離 15mm 、レーザーダイオード-GRIN レンズ間距離 $50\mu\text{m}$ のとき、PBC 内のビームウェストは約 $92\mu\text{m}$ 、フィードバック光の GRIN レンズ上での径が、約 $123\mu\text{m}$ 、ダイオードレーザー端面上では、約 $120\mu\text{m}$ という結果が得られた。共振器内には、ほとんど平行なビームが伝搬していることがわかる。また、ダイオードレーザーの AR コート端面上でのフィードバック光のビーム径は、およそ $120\mu\text{m}$ 程度となった。

FIG.5 に GRIN レンズ-PBC 間距離 D を変化させた場合の規格化した PBC 内の光強度の変化を示す。 $D=15\text{mm}$ で PBC 内光強度が最大になっており、この距離が最適値と思われ、この時のフィードバックビームの AR コート面上での径は、約 $120\mu\text{m}$ である。 d が 30mm から 45mm で光強度は非常に低い状態になる。PBC-GRIN レンズ間距離が大きくなるに伴う GRIN レンズ-レーザーダイオード間距離の変化により、フィードバック光のビーム径が最小値になるため、空間フィルター効果を得られなかったためであると考えられる。 50mm で再び高い強度を示してから次第に強度が低下するのは、 d が大きくなるに伴ってレーザーダイオード端面上でのビーム径が大きくなり、フィルターにより排除されるレーザー強度が大きくなるため、フィードバック光の強度が下がることによるものであ

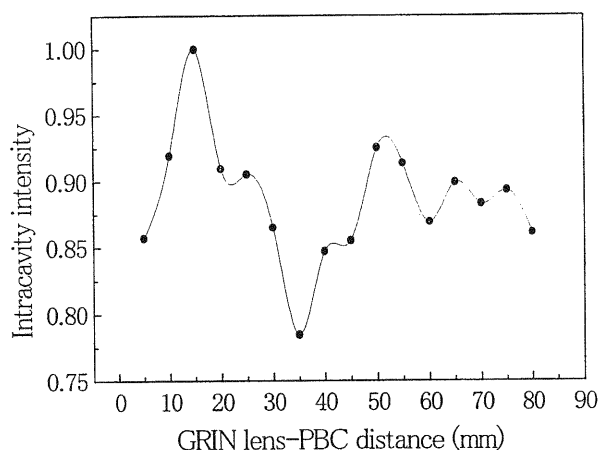


FIG.5 GRIN レンズ PBC 間距離と光強度の関係

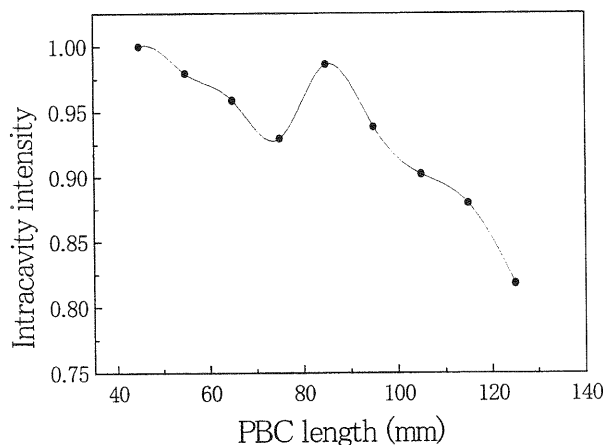


FIG.6 PBC の長さ と光強度の関係

ると考えられる。

d を固定して PBC 長 L を変化させた場合の規格化した PBC 内の光強度の変化を FIG.3 に示す。PBC-GRIN レンズ間距離 D をパラメータにとった場合に比べて $d=100\text{mm}$ までの共振器の安定条件内では強度の変化が非常に小さいことが分かる。これは、ダイオードレーザー面上でのビーム径の変化が D をパラメータにとった場合に比べて小さいため、フィードバックビームの強度変化が少なかったからと思われる。 $D=100\text{mm}$ 以上の共振器の安定条件を満たさない領域では、急激に強度が低下していることが分かる。

(2) ガス検出・分光試験結果

PBC 共振器の安定化が達成できたので、まず、 $50\%N_2$ 、 $50\%O_2$ の混合ガスを調整し、そのラマン散乱がリアル

タイムで計測できるか測定試験を行った。PBCの光軸から 30mm離れた位置にバンドルファイバー(コア系 125 μm 、50 本、N. A. =0.24)を置き散乱光を分光器(ORIEL INSTRUMENTS MS-275)に導光した。結果を FIG.7 に示す。

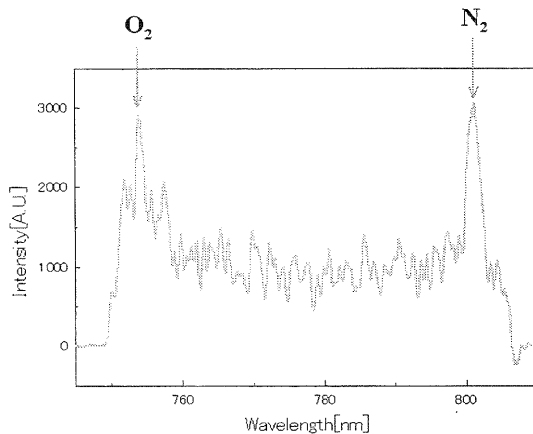


FIG.7 50%/50%酸素窒素混合ガス分光測定結果

酸素と窒素の散乱光強度のピーク位置は、分光器の波長分解能 0.08 nmの範囲で安定していることが判明した。また、半導体レーザーの温度制御を行っていないが散乱光強度は、一定しており濃度とよい相関関係がある。S/Nから判断すると 100 p p mレベルまでの計測が可能である。

V. 結論

ガス分析用の半導体レーザー複合共振器(PBC)を試作しラマン散乱光による多成分リアルタイムガス検出の基礎試験を行った。

PBC 内に高い光強度を安定に得るための最適なスポットサイズは、約 120 μm と推測される。また、PBC の長さを変化させたときの光強度の変化が非常に小さかったことから、フィードバック光のダイオードレーザー上でのスポットサイズが非常に重要であることが示された。高いPBC内光強度を得るためには、フィードバックビーム径が約 120 μm になるように GRIN レンズ-PBC 間距離、PBC 長を組み合わせることが重要であることがわかった。

また、酸素、窒素のラマン散乱強度をリアルタイムに捕らえ多成分のガスをリアルタイムに分析可能であることがわかった。今後、レーザー加工時の酸素消費量のモニター実験や排出NO₂ 検出の実時間検出実験を行う予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご支援をいただいた(財)天田金属加工機械技術振興財団の皆様に深謝いたします。

REFERENCES

- 1 山本博司、尾崎幸洋 “ラマン分光法による高感度ガス分析とその応用” レーザー研究、vol.25. No.10 pp697-701 (1997)
- 5 David A.King and Richard J.Pittaro “Simple diode-pumped power buildup cavity” Opt.lett.vol.23 No.10 pp1-3 (1998)
- 4 G.Bianchini, P.Cancio, F.Minardi, F.S.Pavone, F. Perrone, M.Prevedelli, M.Inguscio “Wide-bandwidth frequency locking of a 1083-nm extended-cavity DBR diode laser to a high-finesse Fabry-Perrot resonator” Appl.Phys.B 66, 407-410(1998)
- 2 J.J.Laserna, ”MODERN TECHNIQUES IN RAMAN SPECTROSCOPY” JOHN WILEY & SONS, (1996)
- 3 Ph.Laurent, A.Clairon, Ch.Brent “Frequency Noise Analysis of Optically Self-locked Diode Lasers” IEEE J.Quantum Electron. vol. 25. No.6. 1131 (1989)
- 6 Kotaro Suzumura, Chikako Ishibashi, and Hiroyuki Sasada, “Precise frequency-difference measurement between the 1.66- μm transitions of methan” Optics Letters, Vol.22, No.17, pp1356-1358 (1997)
- 7 P.G.Wigley, Q.Zang, E.Miesak, and G.J.Dixon, “High-pawer 467-nm locked signal-resonant sum-frequency laser” OPTICS LETTERS, Vol.20, No.24, pp2469-2498 (1995)