

# 光を用いた環境負荷物質の高感度モニタリング

安達 雅 浩<sup>\*1</sup> 川崎 昌 博<sup>\*2</sup>  
黒川 悟<sup>\*3</sup> 森本 朗 裕<sup>\*4</sup>  
太田 浩 二<sup>\*5</sup> 鎌田 賢 司<sup>\*5</sup>  
京都電子工業株式会社  
ターボ・オブテックス株式会社

## 【要 旨】

光を用いた高感度計測手法であるキャビティリングダウン分光法（CRDS：Cavity Ring-Down Spectroscopy）は、限られたスペースで気体中の微量成分モニタリングが可能な技術として注目されており、計測装置の小型化が期待できる。本研究開発において、光源に高速光パルスを適用し、検出部分の省スペース化を検討した。またCRDSによる小型モニタリングユニットの試作・評価を行い、容易にCRDS計測可能な構成を実現したので、併せて報告する。

## 1 はじめに

環境負荷物質のモニタリングに必要な気体中の微量成分検出には、リアルタイムで高感度に計測可能な光計測技術を用いた製品が多く見られ、さらに近年の半導体プロセス技術や光通信技術の向上により、安価で高性能な半導体レーザーが実現したことで、小型化・低価格化が進められている。電氣的に温度・波長をコントロール可能な半導体レーザーは、光通信分野・DVDやCD等の高密度記録デバイスとして開発されてきたが、吸光分析や計測分野での光源としての利用価値が高い。また計測技術の向上から、吸光分析手法として長い光路を要しない「CRDS」が注目されており[1]、半導体レーザーとの組み合わせにより、コンパクト

な分析装置の実現が期待できる。しかしCRDSは、光学系が複雑で、調整に大変時間がかかるため、容易に構成できる手法の確立が求められている。そこで本研究開発においては、これまでの研究成果として得られた、半導体レーザーのゲインスイッチング動作により発生可能な高速光パルスを用いて、光路長の短尺化を検討し、更に吸光計測のための省スペース化・光学調整の単純化を目指し、簡易CRDSユニットの試作を行った。

## 2 実験方法

CRDSの原理を図1に示す。図1-1のように、2枚の高反射率ミラーを対向して配置し、一方からパルス光を入射し、もう一方からミラー間を往復する度に出射する光パルスを受光する構成がCRDS光学系で、その受光波形を下図に示している。図1-2は、ミラー間に測定対象物である吸光物質を挿入したときの図とそのときに得られる受光波形を示している。受光波形の減衰の速さは、式(1)において吸光物質の濃度に比例するため、

\*1 研究開発課 技師

\*2 京都大学工学研究科 教授

\*3 独立行政法人産業技術総合研究所

\*4 立命館大学理工学部 教授

\*5 独立行政法人産業技術総合研究所 主任研究員

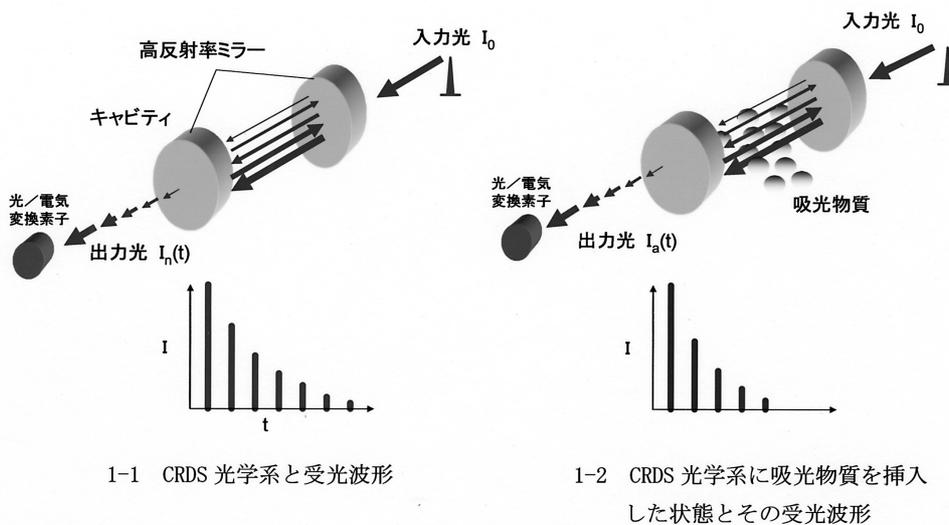


図1 CRDS原理

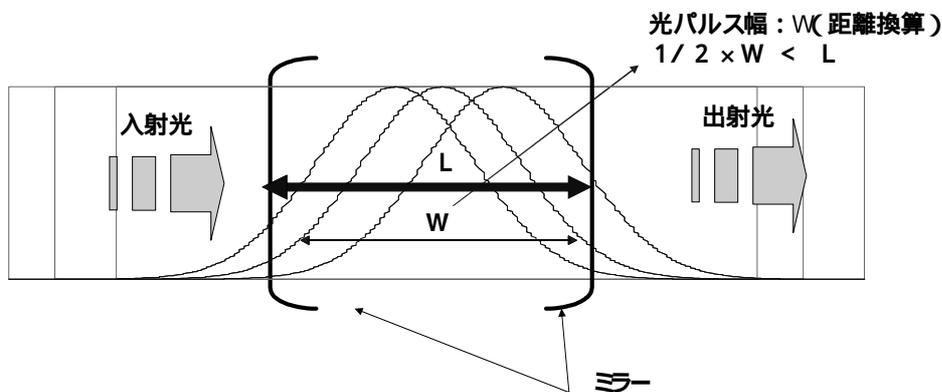


図2 CRDSのためのキャビティ長と光パルス幅の最適化の必要性

減衰波形を比較することで、濃度を定量化することが可能である。入射した光パルスの滞在時間は、吸光分析における光路長に相当するため、高反射率ミラー間をレーザ発振に用いられる「キャビティ」状態に構成することで、光パルスの実効的光路長は長距離となり、低濃度や低吸光係数の物質でも高感度の測定が実現できる。[2]

$$\text{abs} = I / I_0 = (k + k) t \quad (1)$$

このような長光路化した吸光分析構成が可能なCRDSは、低濃度・低吸光係数物質の測定に有用であり、その反面、短光路化することで、更なるコンパクト化を図ることが可能で、ハンディな高

感度ガスモニタリング装置への応用が期待できる。ところが図2に示すとおり、キャビティ長と光パルス幅について最適化を行わなければ、往復する光パルス同士が重なり、リングダウン波形を得ることができない。例えばキャビティ長1mの場合、光の速度から換算して、パルス幅は1.5ns以下でなければ、往復する光パルス同士が重なってしまうため、目的とする短いキャビティ長には更に高速の光パルスが必要となる。そこで半導体レーザのゲインスイッチング動作により発生する高速光パルス[3]により、光路長の短尺化のための実験を図3のとおり行った。ゲインスイッチング動作のための半導体レーザへの電気入力

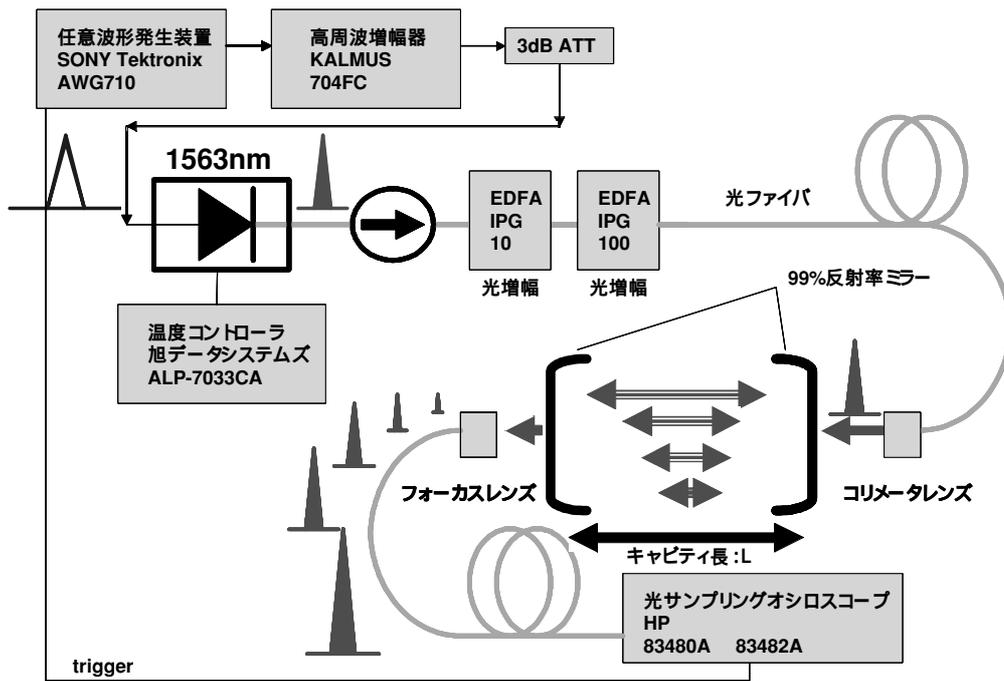


図3 実験構成

波形は、任意波形発生装置（AWG710 SONY Tektronix社製）を用いて、正弦波を1/16波長分のみ切り出した図4の波形を用いた。この波形を高周波増幅器（704FC KALMAUS社製）を用いて増幅し、半導体レーザに入力した。発生した光パルスを図5に示す。FWHM（半値全幅）でパルス幅100ps程度、およそ3cmの光路長に相当する。空气中で反射率99.5%のミラーはリングダウン回数が100回程度 [4] なので、例えばキャビ

ティ長を10cmとした場合、伝送距離は20m程度となる。光パルスの繰り返し周期は、十分にリングダウン波形が減衰する時間間隔をおく必要があるため、1MHz繰り返し周期の光パルスをキャビティに入力した。

### 3 実験結果及び考察

図3において、キャビティ長Lを、60cm、10cmでの測定結果を図6、図7に示す。

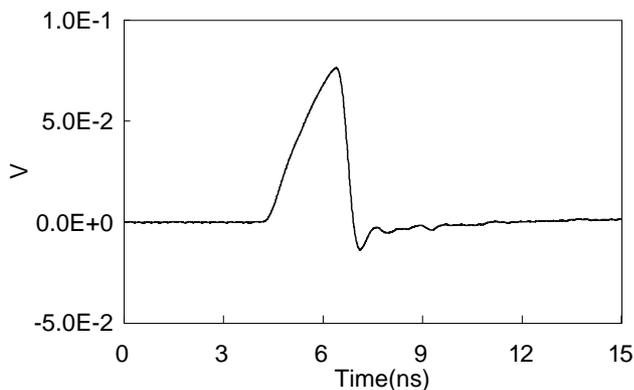


図4 半導体レーザへの電気入力波形

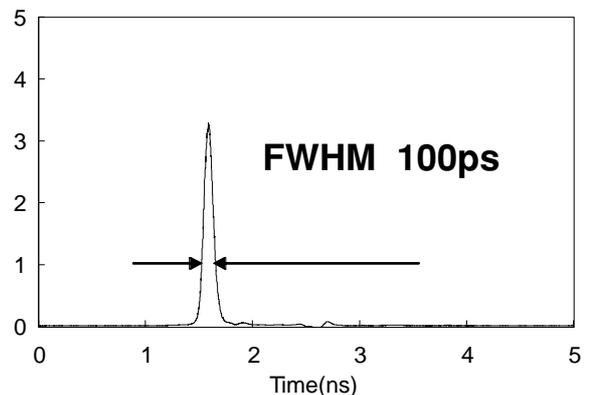


図5 発生した光パルス波形

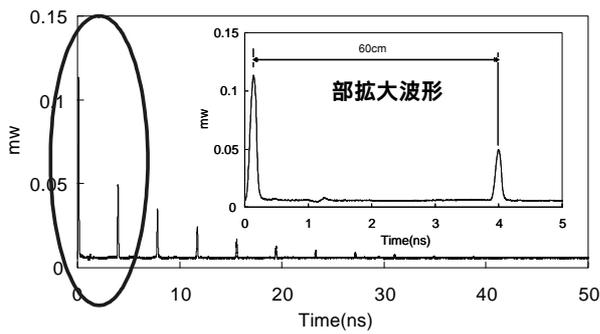


図6 キャビティ長60cmのリングダウン波形  
(部拡大図)

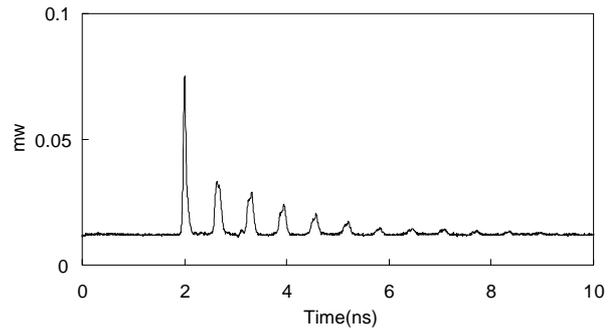


図7 キャビティ長 L : 10cm

この構成にて、図6より60cmのキャビティに入射した光パルスが11回程度往復していることが確認された。部拡大図よりおよそ4nsの間隔があることから、光の伝播距離にして約120cmとなり、2枚のミラー間を光パルスが往復していることが確認できる。同様に図7においても10cmのキャビティに入射した光パルスが12回程度往復しており、間隔が0.66ns(660ps)であることからミラー間20cmを往復したリングダウン波形であることが確認できる。

#### 4 試作

本研究開発の実験結果により、高速光パルスを用いることで、CRDSのキャビティ長を短尺化可能であることを見出したことから、図8に示すような小型CRDS構成のための試作を実施した。空間光学系は、光学調整のための機構が複雑で、アライメントに大変労力を要することから、U字型ベンチの両側にコリメータレンズを配置し、低損失伝送路を固定化して行った。本研究開発に用いた光源は、近赤外光であるため、IRカードにより可視化は可能であるが、アライメントには可視

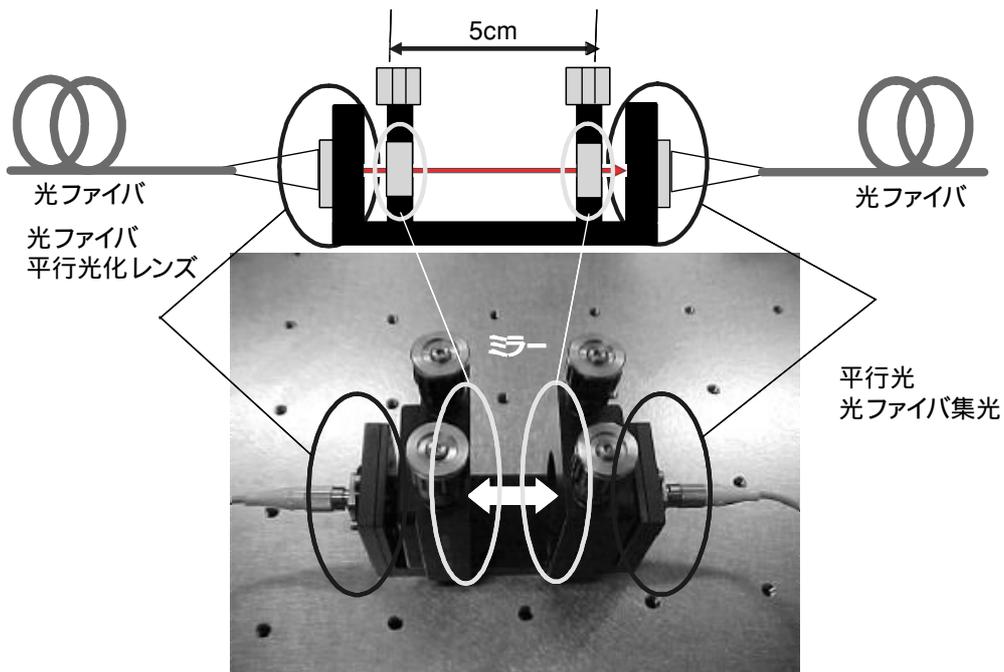


図8 試作した小型リングダウンキャビティ

光と合波して行わなければ、CRDSのような高精度な光学系を実現することは非常に困難である。このように光軸を合わせた光学系を用いることで、ミラーのみのアライメントとなり、作業性が非常に良いことがわかる。またアライメントされたコリメータレンズへは、光ファイバを用いて光を伝送できるようカップリングコネクタで容易に接続

可能とし、U字ベンチ上にミラーを配置するだけで、容易にCRDSを実現可能である。対向するミラーは、別のフラット平板で事前にアライメントを行い、U字ベンチに置くだけの光学調整フリーの構成を実現可能である。キャビティ長は光源のパルス幅の限界に近い5 cmで試作を実施したところ図9に示す結果が得られた

図9において、5 cmのキャビティに入射した光パルスは、ミラー間を往復したリングダウン波形のように減衰しているかに見えるが、伝送距離が200nsを超えており、99%反射率ミラーの理論的な往復回数以上となり、リングダウン波形とは言い難い。また図6、図7で示される波形と比較して、光強度が高く、減衰するはずの光パルスが同レベルで並んでいるところもあることから、共振が起こっていることが予想できる。本研究開発に用いた光パルスはFWHM100ps程度であり、距離換算すると3 cm程度であるが、光パルスの裾野にあたる部分の時間的な広がりが300ps程度存在することから、往復する光パルスが重なり合うキャビティ長となっていることも理解できる。

## 5 まとめ

本研究開発においては、気体中の微量成分モニ

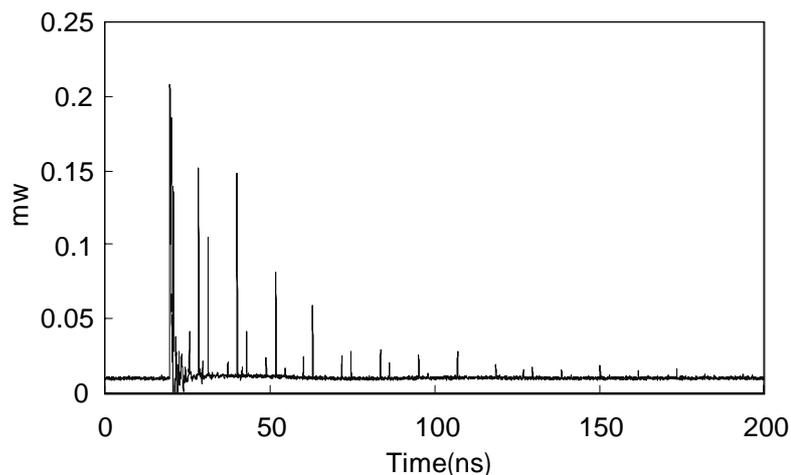


図9 試作品評価（キャビティ長5 cm）

タリングが可能な光を用いた検出法であるキャビティリングダウン分光法への高速光パルスの適用について検討を行った。半導体レーザーのゲインスイッチング光パルスを適用することでキャビティ長10cm程度までダウンサイジングを図れることを示すことができた。また光学調整が容易な小型キャビティリングダウン分光光学系の試作を行い、環境負荷物質等大気中ガス成分の定量化に有用なハンディモニタリング装置の原型を示した。

## 参考文献

- [1] A.O'keefe and D.Deacon, Rev.Sci. Instruments, 59, 2544(1988)
- [2] Y.Nakano, M.Goto, S.Hashimoto, M.Kawasaki, T.J.Wallington, J.Phys. Chem. A2001, 11045
- [3] Eric R. Crosson et al, Anal.Chem.74, 2003-2007(2002)
- [4] 齋藤 富士郎, “超高速光デバイス,” 共立出版株式会社 (1998)