

キャビティリングダウン分光に向けた 光スイッチング機構の開発

岩國研究室 橘川 太一

1 背景・目的

キャビティリングダウン分光法 (CRDS) は、高反射率ミラーで構成される共振器を用いた分光法で、分子の吸収測定に用いられる。遷移強度が弱い遷移の観測に適し、また吸収強度が小さい微量ガス検出にも用いられる。

CRDS により精度の高い分光データを得るには、信号ノイズ比 (S/N) の高いリングダウン信号を取得する必要がある。これまで本研究室での研究では反射率 99.996 % のミラーを用いてファブリー・ペロー共振器を開発してきた。その際は PZT で共振器長を掃引することで共振器の透過光信号を得ていたが、PZT ドライバーのノイズによりリングダウン信号の信号ノイズ比 (S/N) が低下することが確認された。そこで本研究では、PZT 掃引せずに、AOM で共振器に入射するレーザーを ON/OFF してリングダウン信号を取得するシステムの開発を目指した。

2 キャビティリングダウン分光法

キャビティリングダウン分光法 (CRDS) は、分子を封入した共振器にレーザー光を入射し、十分に時間が経った後に光を OFF にする。このとき図 1 の右図に示すように共振器の透過光の強度が指数関数的に減衰するので、その時定

数から分子の吸収定数 α を求める。

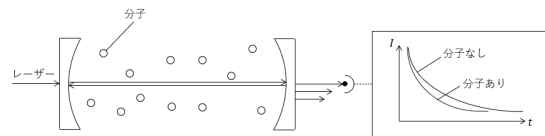


図 1 分子を封入した共振器

リングダウン信号の時定数 τ_0 は、透過光の強度が $1/e$ になるまでの時間で

$$\tau_0 = \frac{L}{c(1-R)} \quad (1)$$

と表される。ここで、 L は共振器長、 R は反射率、 c は光速である。本実験で使用した共振器は $R = 99.996 \%$ 、 $L = 10 \text{ cm}$ で $\tau_0 = \text{約 } 4.2 \mu\text{s}$ となる。

共振器内に分子を封入した場合の時定数 τ は

$$\tau = \frac{L}{c(1-R+\alpha L)} \quad (2)$$

と表される。共振器内の分子の吸収の大きさによって時定数 τ は異なるため分子封入前後の時定数 τ の変化量から、入射したレーザーの周波数における分子の吸収定数 α が求められる。共振器に入射するレーザー光の周波数を変化させてその都度 τ を測定することで吸収スペクトルが得られる。

3 本研究の実験系

本研究で用いた光学系を図 2 に示す。ECLD から出射した光は AOM に入射し、その 1 次

回折光はモードマッチングレンズやアイリス、 $\lambda/2$ 板を通る。その後、偏光ビームスプリッタを透過して共振器に入射し、その透過光をPD1で検出する。また、共振器で反射した光は $\lambda/4$ 板を2回通ることで横偏光から縦偏光に変わり、偏光ビームスプリッタで反射されてPD2で検出する。図2の右図はPD1,PD2それぞれで検出される透過光と反射光を示す。

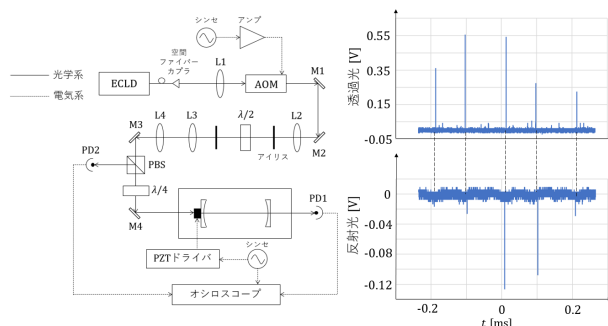


図2 光共振器の光学系とその受光器の検出信号

図2の右図は共振器の片方のミラーについているPZTに振幅1V、周波数5Hzの三角波信号を印加して共振器長を掃引した。透過光についてピーク1本に着目し、共振器長をゆっくり掃引した場合と掃引しない場合とでS/Nを比較したところ、PZTを共振器長に掃引した場合よりもしなかった場合の方がノイズが少なかった。これはPZTドライバに起因する雑音の原因と推測される。そこでPZT掃引せずにCRD信号を得る方法としてAOMでレーザーをON/OFFするシステムの開発を目指した。本研究ではまずAOMスイッチングに必要な素子の応答評価を行った。

4 リングダウン信号取得のシステム開発

図3はスイッチの応答時間評価の実験セットアップを示す。スイッチのTTLポートに振幅5Vの矩形波の信号を入力すると、0Vのとき

はONになり、スイッチのRFINに印加されたRF信号がRF2から出力される。5VのときはOFFでRF信号がブロックされる。

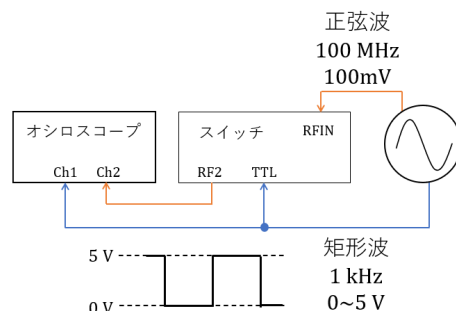


図3 スwitchの応答評価セットアップ

スイッチの応答評価の結果を図4に示す。スイッチに印加する矩形波が0Vから5Vに切り替わってからRF信号の出力が0Vになるまでの時間から応答時間は30 nsとわかった。

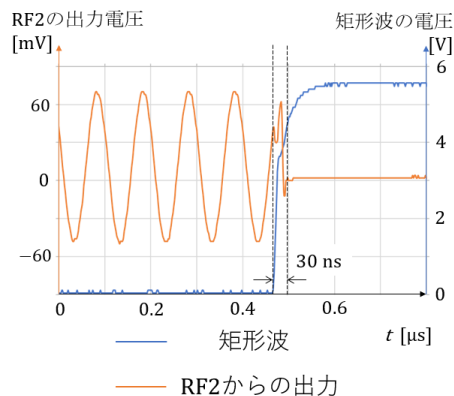


図4 スwitch応答評価の結果

次にAOMの応答を評価した。図5は実験セットアップを示す。ここで図2のPD2で検出される共振器の反射光を用いた。

AOMの応答評価の結果を図6に示す。PD2で検出される信号が0Vから増加し始めてから7割に達するまでの時間から応答時間は0.3 μ sとわかった。

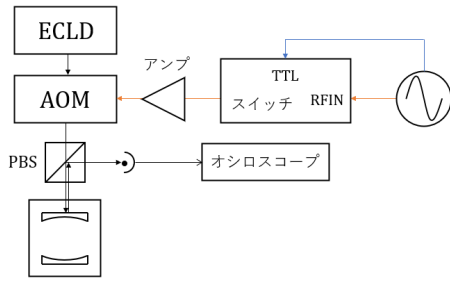


図5 AOM 応答評価セットアップ

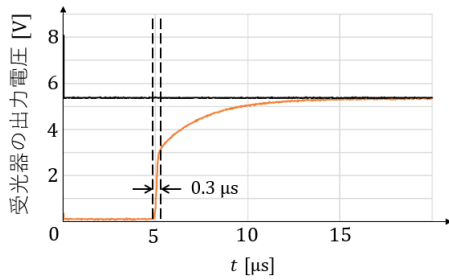


図6 AOM の応答評価の結果

以上より、スイッチおよび AOM の応答時間はリングダウン時間 $\tau_0 = 4.2 \mu\text{s}$ より十分短いため CRDS に適用できる。

CRDS のためには AOM のスイッチングをリングダウン信号と連動させる必要がある。そこで、共振器の透過がある一定レベル以上になったらレーザー光を OFF にし、ある一定レベル以下になったら再びレーザー光を ON にするようにコンパレータ回路による制御方法を導入した。

コンパレータ回路とは、+ 端子と - 端子にそれぞれ入力した 2 つの電圧を比較してその大小によって異なる電圧を出力する回路である。図 7 に非反転型コンパレータ回路を示す。+ 端子に入力される電圧が閾値となり、- 端子に入力される電圧が閾値を下回ると V_+ が、上回ると $V_-(0\text{V})$ が出力される。

出力電圧が High のときの閾値 V_{TH1} は、 R_1, R_3, R_L の合成抵抗を R_a としたとき R_a と R_2 からなる分圧回路の電圧なので

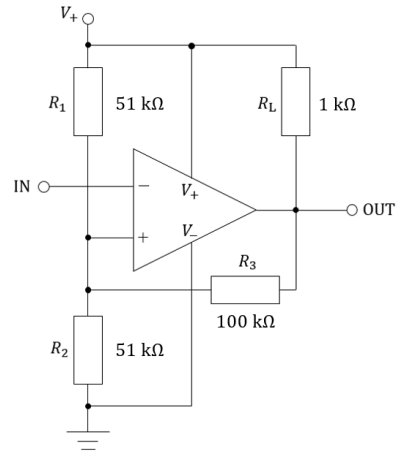


図7 非反転型コンパレータ回路

$$V_{\text{TH1}} = \frac{R_2}{R_a + R_2} V_+ \quad (3)$$

となる。ここで

$$R_a = \frac{R_1(R_3 + R_L)}{R_1 + R_3 + R_L} \quad (4)$$

である。

出力電圧が Low のときの閾値 V_{TH2} は、 R_2, R_3 の並列合成抵抗を R_b としたとき R_b と R_1 からなる分圧回路の電圧なので

$$V_{\text{TH1}} = \frac{R_b}{R_b + R_1} V_+ \quad (5)$$

となる。ここで

$$R_b = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (6)$$

である。

式 (3),(5) より $R_1 \sim R_3, R_L$ で閾値が決まる。図 8 は R_2 を変化させて閾値を計算した結果を示す。本研究では R_2 を $51 \text{ k}\Omega$ に設定したため、立ち下がり と立ち上がりの閾値はそれぞれ $3 \text{ V}, 2 \text{ V}$ となる。

開発したコンパレータ回路の動作確認を行った。図 9 はセットアップを示す。シンセサイザから正弦波をコンパレータに入力し、コンパレータの出力信号をオシロスコープで観測し

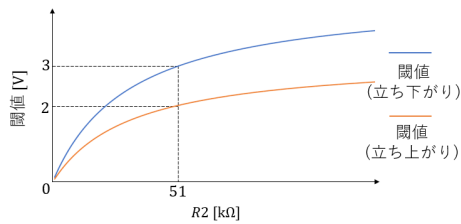


図 8 閾値変化の計算結果

た。図 10 はオシロスコープで観測した信号を示す。図 8 で設計した通りに 2 V と 3 V でコンパレータの出力が切り替わっていることがわかる。

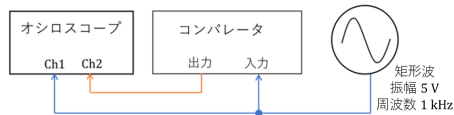


図 9 コンパレータ動作確認セットアップ

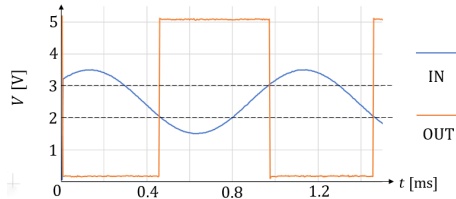


図 10 コンパレータ動作確認結果

以上で動作確認した素子を組み合わせて、スイッチ機構全体として動作確認および応答評価を行った。図 11 はそのスイッチ機構全体のセットアップを示す。

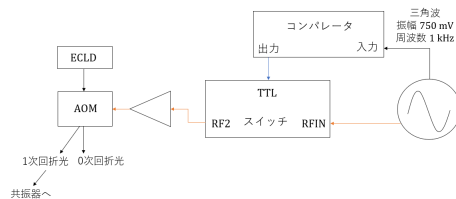


図 11 スイッチ機構全体のセットアップ

AOM の応答評価と同様に共振器の反射光で動作確認を行った結果を図 12 示す。動作確認にあたりコンパレータの閾値を約 250 mV と約 650 mV にしたため、スイッチ機構は正しく動作していることが確認できた。また、図 13 は

その立ち下がり部分の拡大図である。応答時間は $0.5 \mu\text{s}$ となり、リングダウン時間 $\tau_0 = 4.2 \mu\text{s}$ より十分短いため分光実験に適用できる。

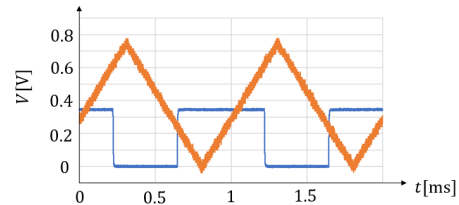


図 12 スイッチ機構全体の動作確認

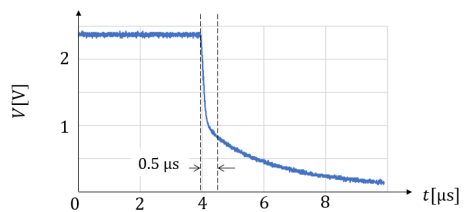


図 13 スイッチ機構全体の応答評価

5 まとめと今後の展望

本研究では AOM をスイッチで ON/OFF してリングダウン信号を取得する機構の開発を目指した。この機構では光の ON/OFF が共振器の時定数より十分早い必要があるため、各素子の応答時間を測定した。AOM とスイッチの応答時間がリングダウン時間より十分短いことから CRDS に適用できることが示された。また、コンパレータは入力信号に応じて正しく動作することを確認した。

今後は、コンパレータ回路をリングダウン信号で動作させることでスイッチング機構を完成させる。そして、リングダウン信号を読み取り、時定数 τ を自動で計算するプログラムを完成させ、共振器内に分子を封入して CRDS を行う。