

# アセチレン安定化半導体レーザー光源の開発

植田研究室 佐藤洋平

## 1. はじめに

光通信で使用される  $1.5 \mu\text{m}$  帯の周波数標準として、アセチレンを用いる方法が長年の研究により確立されてきた。それがアセチレン安定化半導体レーザー光源である。この光源には、光通信で使用される波長帯の周波数標準という特長から、様々な応用が期待されている。その応用の1つが、ALMA計画と呼ばれる世界最大の電波天文台を建設する国際プロジェクトへの応用である。現在当研究室は、このALMA計画の基礎研究に参加している。この基礎研究の1つに、ファイバー長制御技術の開発がある。このファイバー長制御のための光干渉計測には、積分時間数十秒の領域での長期周波数安定性  $3 \times 10^{-10}$  以下・線幅  $10\text{kHz}$  以下の両方の性能を併せ持った波長  $1.5 \mu\text{m}$  帯の光源が必要とされる。当研究の目的は、以前開発されたアセチレン安定化半導体を基に、このALMA計画の要請を満たす新たなアセチレン安定化光源の開発を行う事である。

## 2. 原理

### 2.1 飽和吸収

アセチレン安定化半導体レーザー光源とは、外部共振器型レーザーダイオード(ECD)の発振周波数をアセチレンの飽和吸収線に安定化するものである。飽和吸収線は、分子からの信号がドップラーフリーの状態で見えるため、非常に線幅が細い。この信号を使う事で、より高度な安定化を実現する事が出来る。

### 2.2 アセチレン

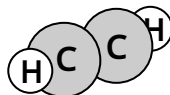
アセチレンには、 $1.5 \mu\text{m}$  帯の波長帯にほぼ等間隔で多数の吸収線が存在するため、周波数標準として選ばれた。しかし、アセチレンの吸収は非常に弱いため、その飽和吸収信号を得るには、長い光路長と強い光強度の2つが必要となる。以前開発された光源はFP共振器を用いてこれを実現していたが、この方法では原理的に出力に変調が乗ってしまい、今回のように細い線幅が必要な用途には直接使えないという問題点があった。最終的な目標である線幅  $10\text{kHz}$  を実現するためには、この問題を解決しなければならない。本研究では、まず光源の線幅をそのまま変調無しの状態でお出し出来る光源を開発する事を第一目標とする。そこで、必要な長い光路長と強い光強度を、以前のものと比べ長いアセチレン・セルとエルビウム添加型ファイバーアンプ(EDFA)を使用することで実現を図る。

$1.5 \mu\text{m}$  帯にほぼ等間隔で  
多数の吸収線が存在

アセチレン

吸収が非常に弱い

$1.5 \mu\text{m}$  帯の周波数標準



飽和吸収信号の検出には、  
長い光路長と強い光強度が必要

表 2.1 飽和吸収を得る方法と特徴

	強い光強度・長い光路長	特長
以前の光源	FP共振器を使って実現	原理的に出力に変調が乗ってしまう
今回作成した光源	ファイバーアンプと長いアセチレン・セルを使って実現	変調無しの出力が得られる。

### 3 . アセチレン安定化半導体レーザー光源の製作

#### 3 . 1 アセチレン安定化半導体レーザー光源の構成

アセチレン安定化半導体レーザー光源の構成を図3.1に示す。ファイバーアンプから出力された光は、偏光ビームスプリッタ(PBS)で2つに分割される。このPBSで分割された2つのビームの内、上に向いファラデーローテータ(FR)等を通してアセチレン・セルに入る方がポンプ光である。もう一方、電気光学素子(EOM)で5 MHzの位相変調を与えられ、アセチレン・セルで飽和吸収信号を得て光検出器(PD)に向かうビームがプローブ光である。PDで得られた信号はダブル・バランスド・ミキサ(DBM)で復調され、飽和吸収信号が得られる。制御回路は、この信号を用いてECLDの発振周波数を制御する。この方法により、これまでFP共振器を使わなければ見るのがやっとだったアセチレンの飽和吸収線に、レーザーの発振周波数を始めて安定化することに成功した。

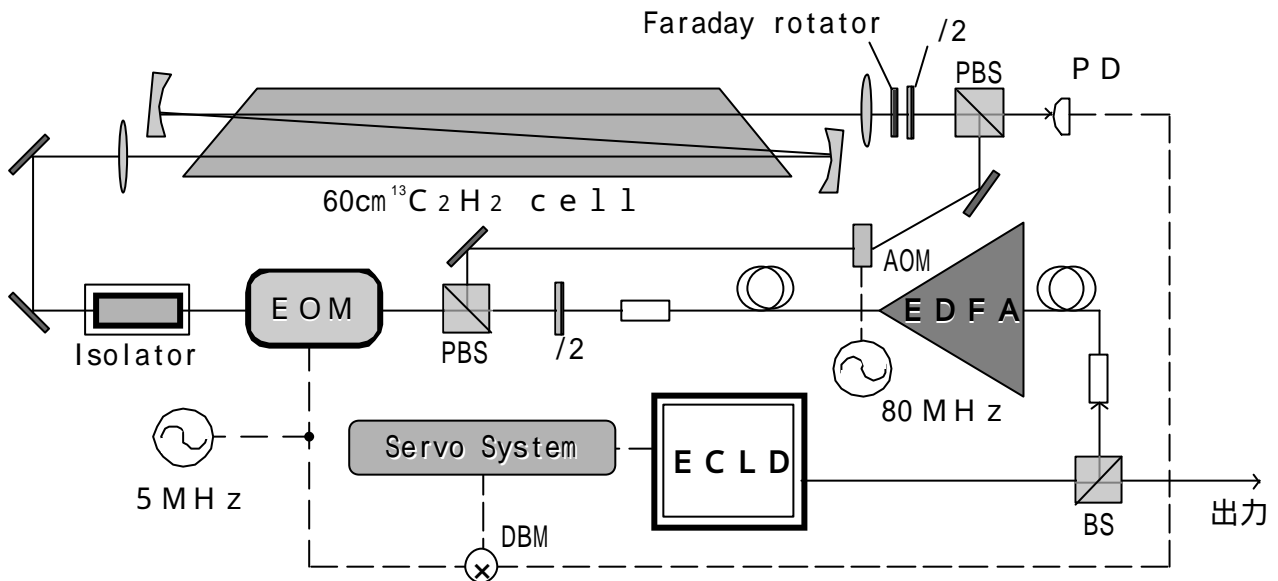


図3.1 アセチレン安定化半導体レーザー光源の構成

#### 3 . 2 飽和吸収信号

この実験装置を用いて、ECLDの発振周波数を掃引して得られたアセチレンの飽和吸収信号を、図3.2に示す。以前のFP共振器を用いた方法で得られた信号と同程度のS/Nで飽和吸収信号を得る事が出来た。

図3.1のポンプ光の光路上には、音響光学素子(AOM)が設置してあり、ポンプ光の周波数を80MHzシフトしている。これは、ポンプ光の戻り光による干渉ノイズ対策として導入したものである。この為に、吸収線の位置は本来の位置から、AOMの駆動周波数の半分である40MHzだけずれた点に現れており、この影響で最終的な出力も本来の吸収線の位置から40MHzシフトしている。

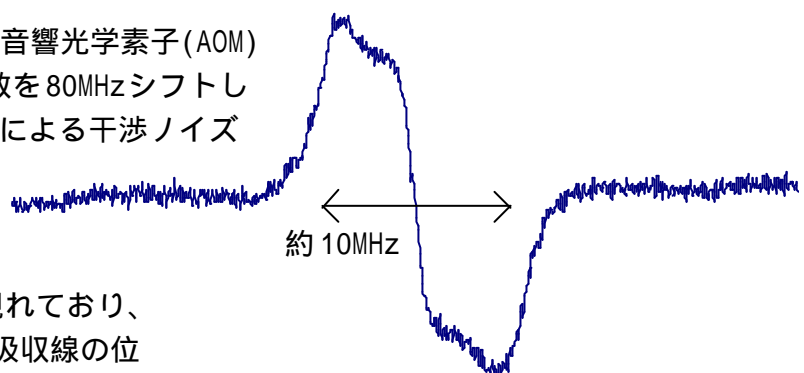


図3.2 飽和吸収信号

### 4 . 性能評価実験

#### 4 . 1 実験方法

得られた制御信号を用いて実際にECLDの発振周波数の安定化を行い、この光源の性能評価実験を行った。その実験方法を図4.1に示す。

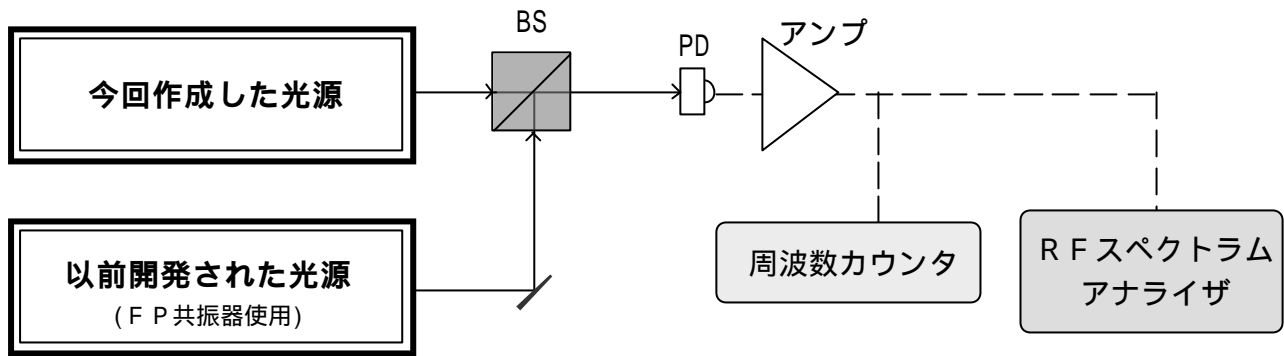


図 4.1 性能評価実験・実験装置

今回開発を行ったアセチレン安定化半導体レーザー光源と、以前開発されたFP共振器を使用する方法の光源の2つの光源から来た光の光軸を合わせ、光検出器(PD)に入射する。今回開発した光源は、本来の吸収線の位置から発振周波数が40MHzだけシフトしている。よって、PDからは40MHzのビート信号が出力される。このビート信号の時間変動を周波数カウンタで測定し、長期安定性の評価を行った。同時に、このビート信号のスペクトルをFRスペクトラムアナライザを用いて測定し、短期安定度の評価を行った。

#### 4.2 実験結果(長期安定性)

ビート信号の時間変動を1000秒間測定し、アラン分散を計算した。そのデータを図4.2に示す。

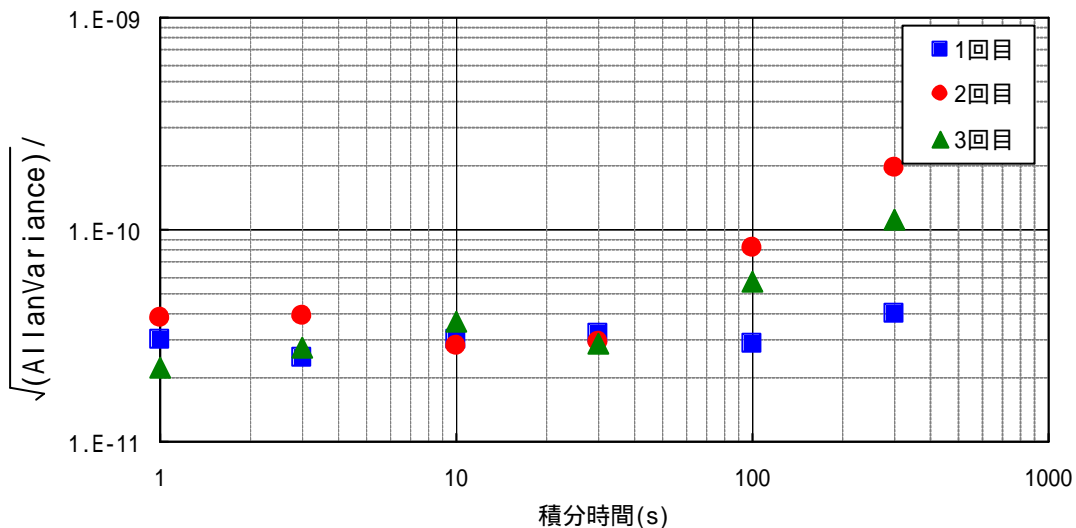


図 4.2 アラン分散

この測定は、3回繰り返して行われた。以前の光源の性能(積分時間10秒で $10^{-13}$ )には及ばないものの、当初の目標であった積分時間数十秒の領域で $3 \times 10^{-10}$ の安定度は十分満たしている事が分かる。また、以前のものと同程度のS/Nの信号が得られたにも関わらず、同程度の安定度が得られなかった理由として、まず制御回路の利得が足りなかった事が考えられる。また、分子の吸収線に安定化しているにも関わらず積分時間とともにデータが単調減少せず、更に積分時間100秒以上の領域でデータがばらつく理由としては、復調信号のオフセットが再現性無く大きく変動しているのが原因である。このオフセット変動が生じる理由については様々な原因が考えられるが、確証に至るものが無いのが現状である。

#### 4.3 実験結果(短期安定性)

次に、ビート線幅を用いた線幅測定の結果を図4.3に示す。図中2つのデータは、共に以前開発されたFP共振器使用の光源と今回開発を行った光源のビート信号である。

2つのデータの違いは、以前開発された光源の方をアセチレンを用いて安定化しているか、アセ

チレンは使わず F P 共振器のみで安定化しているかという点である。A で示したデータはアセチレン安定化時のデータ、B で示したデータは F P 共振器のみで安定化して得られたデータである。使用している E C L D は、どちらの光源も同タイプのものである。つまり、以前開発された光源をアセチレンを用いず F P 共振器のみで安定化した時の線幅は、今回開発したアセチレン安定化光源と同程度の線幅であると考えられる。ビート信号のスペクトルは、より線幅の太い光源の線幅を反映するという性質がある。つまり、以前開発された F P 共振器を使用するアセチレン安定化半導体レーザー光源の線幅は A のデータに反映されており、今回開発したアセチレン安定化半導体レーザー光源の線幅は B のデータと同じ、若しくはより細いという事になる。

F P 共振器を使用した光源が、その変調の為に線幅が約 1 MHz に広がっているのに対し、今回開発された光源の線幅は約 100kHz 程度になっていることが確認できる。当初の目標である線幅 10kHz には届かないものの、第一目標である光源の線幅をそのまま出力することについては成功したといえるだろう。

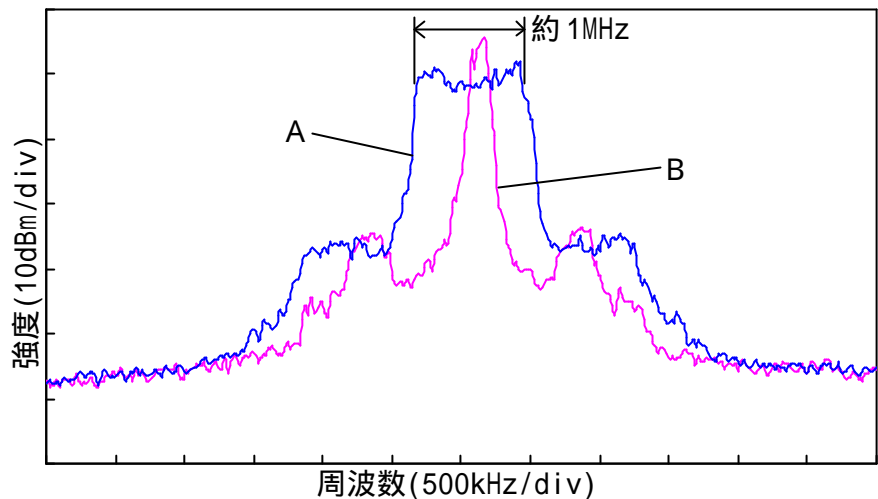


図 4.3 線幅測定・測定結果

## 5 . まとめ

### 5 . 1 F P 共振器を用いずに安定化を実現

これまでは F P 共振器を用いなければ見のがやとだったアセチレンの飽和吸収信号にレーザーの発振周波数を直接安定化することに成功した。これは世界初の実験結果である。

### 5 . 2 長期安定性

以前開発された F P 共振器を使用する光源の性能には及ばないものの、当初の目標を上回る  $3.5 \times 10^{-11}$  (積分時間 30 秒) の安定度を実現した。

### 5 . 3 短期安定性

第一目標である、変調無し of の出力が得られる光源の開発に成功した。

## 6 . 課題

### 6 . 1 制御回路の改善

1 ~ 100 秒の領域で安定性が伸び悩む理由として、制御回路の利得が足りないという問題がある。この利得をより高くすることで、長期安定性の向上を図る。

### 6 . 2 オフセット変動対策

10 ~ 1000 秒の領域で長期安定性が伸び悩む理由として、復調信号のオフセット変動がある。この原因は様々考えられるが、現在のところ最も有力視されているのが、電気光学素子 (EOM) による位相変調が強度変調とカップルしている可能性である。そこで、まず現在プローブ光側に設置されている E O M をポンプ光側に設置するモジュレーショントランスファー法という方法を試してみようと考えている。

### 6 . 3 短期安定性の向上

まず、制御回路の最適化を行い、利得を上げると発振気味になるという問題点の解決を図る。また、より線幅の細い光源に切り替える事で、目標の達成に近づきたい。