

数値解析によるモードロック共振器実現の条件

長島圭吾(B4) 鈴木智生サムエル(M2) 今村陸(M1) 石田蘭丸(M2)

微小光共振器は光を微小領域に閉じ込めることができる。本研究では、微小光共振器にエルビウムを添加することで自励発振を可能にし、CNTの可飽和吸収特性を用いてパルス化することを目標としている。そこで非線形シュレディンガー方程式を用いて数値解析を行い、最適なパラメータを見つけることが本研究の目的である。

キーワード：微小光共振器，モード同期，CNT，エルビウム添加デバイス

1. 背景

モード同期レーザは多くの応用先が考えられており、通信や加工、センシングなど多岐にわたる。それらのモード同期を実現させる方法にはいくつかの手法が存在し、これまでは固体レーザであるTi-sapphireを用いたもの[1]や、ファイバーレーザを用いたもの[2]が存在する。これらのモード同期レーザの欠点としては、繰り返し周波数が数 100 MHz 程度と低いことが挙げられる。繰り返し周波数は共振器サイズに反比例することから、光を微小領域に閉じ込めることのできる微小光共振器を用いたモード同期レーザを開発することで、数 10 GHz を超えるような非常に高い繰り返し周波数を得られるのではと考えた。

そこで本研究では利得媒質にエルビウムを添加し、980 nm または 1480 nm のポンプ光によって 1550 nm での自励発振を可能にし、カーボンナノチューブ (CNT) の強度の強い光を透過し、強度の低い光は吸収するという可飽和吸収特性によって受動的なモード同期を達成することが目標である (Fig.1)。本研究では、実際にエルビウムを添加した共振器に 1480 nm のポンプ光を入れることで、1550 nm 付近での励起を観測している。また、CNT をティップ状にし、ファイバーに近づけることで CNT の可飽和吸収特性も観測できている。しかし、それらを合わせて実際にモード同期までには至っていない。そこで各パラメータに対して適切な値を見つけることが必要であり、そのために数値解析を行った。

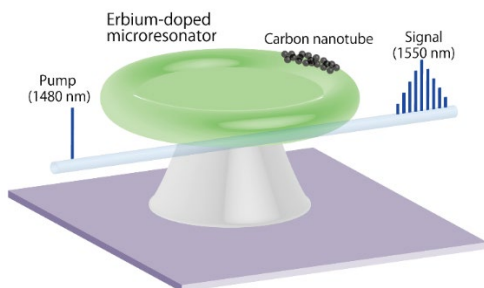


Fig.1. エルビウム添加微小光共振器と CNT によるモード同期レーザのイメージ図。

2. 計算モデル

本研究では、微小光共振器における数値解析モデルを非線形シュレディンガー方程式をもとに構築し、モード同期に必要な条件の数値解析を行った[3]。

$$\frac{\partial}{\partial T} A(t, T) = \left(-D \frac{\partial}{\partial t^2} + i\gamma |A|^2 \right) A(t, T) + (g - (l + \alpha(t, T))) A(t, T) \quad (1)$$

ここで右辺の第 1 項目から順に共振器の群速度分散、非線形光学効果であるカー効果、共振器に添加した利得、共振器に固有の損失、可飽和吸収による吸収を表している。

式(1)をスプリットステップフーリエ法を用いて解析することで、共振器の条件に応じた波形の状態をシミュレーションすることができる。

実際にある条件でシミュレーションを行った例を Fig.2 および Fig.3 に示す。Fig.2 は共振器内部の波形の状態がどのパラメータ依存しているかを示すものであり、黒の縦軸が共振器のロスと利得を示し、赤の縦軸が自己位相変調と分散の影響を示す。これらのつり合いが取れたときに共振器内部にパルスが存在する。Fig.2 の緑のラインはそれらのつり合いが取れ、パルスが存在することを示す。Fig.3 は実際にその時の波形を表したものであり、上のグラフが周波数軸で見たときの各周波数の強度を表し、下のグラフが時間軸で観測した際のパルスの形状である。

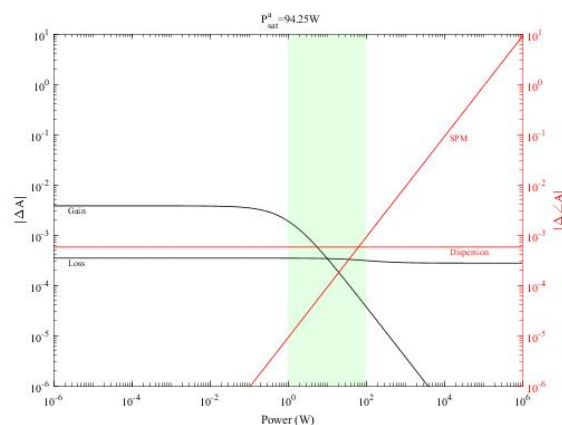


Fig.2 共振器内部のパラメータのつり合いを可視化したもの。

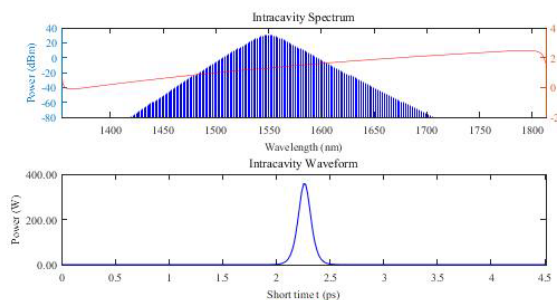


Fig.3 共振器内部の波形の状態. 上のグラフは横軸を周波数, 下のグラフは横軸を時間軸でとったもの.

3. 計算結果

Fig.3 のように共振器の各パラメータに対してシミュレーションを行い, マッピングを行ったのが Fig.4 や Fig.5 の例である. Fig.4, 5 はどちらも共振器サイズを直径 300 μm , エルビウム濃度を $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で計算したものである. ただし, 共振器の Q 値を Fig.4 では 1.0×10^7 , Fig.5 では 1.0×10^8 で計算した.

これらのグラフは横軸に変調深さ, すなわち CNT の性能指標をとり, 縦軸にエルビウムの利得をとっている. これらの横軸と縦軸は共振器一周当たりの値で表記している. また, スケールバーによる色は共振器内部の平均パワーに対するパルスのピークパワーを示している. マップ内の記号はそれぞれ, CW が連続波, ML がモード同期状態, MP が共振器内部を複数のパルスがある状態, CP が共振器内部にパルスが複数あり, それらの数が時間によって変化する状態を表している. これらのマップを比較すると, Q 値が高いほうが同じ変調深さに対して低い利得でモード同期することが分かり, Q 値の高さがモード同期の鍵になることが分かる.

また, 共振器の分散について着目すると, 自己位相変調との釣り合いをとるために弱い異常分散が望ましいことが Fig.6 より分かる. また弱い異常分散になるためには, 共振器サイズが直径 120 μm 程度と小さくする必要があることが計算より分かっている. しかし, 共振器 1 周当たりの利得を稼ぐためには共振器サイズをできるだけ大きくした方がよい. それらの分散の面から考えた場合と, 一周当たりの利得から考えた場合の共振器のサイズのトレードオフの関係について考えるために, 共振器のサイズを変化させてシミュレーションを行った. それらの結果より, 現状の Er 濃度 (10^{18} cm^{-3} 程度) では, 直径 600 μm 程度の共振器が最適であることが分かった.

参考文献

[1] U. Keller, G. W. 'tHooft, W. H. Knox, and J. E. Cunningham, Opt. Lett. **16**, 1022–1024 (1991).
 [2] F. Wang, A. G. Rozhin, V. Scardaci, Z. Sun, F. Hennrich, I. H. White, W. I. Milne, and A. C. Ferrari, Nature Nanotechnology **3**, 738–742 (2008).
 [3] F.X.Kärtner, J.Aus der Au, U.Keller, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, **4**, 159-168 (1998)

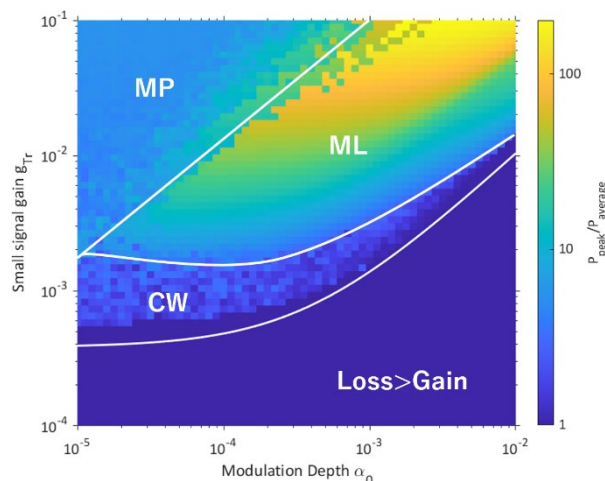


Fig.4 共振器の Q 値を 1.0×10^7 としたときのシミュレーション結果.

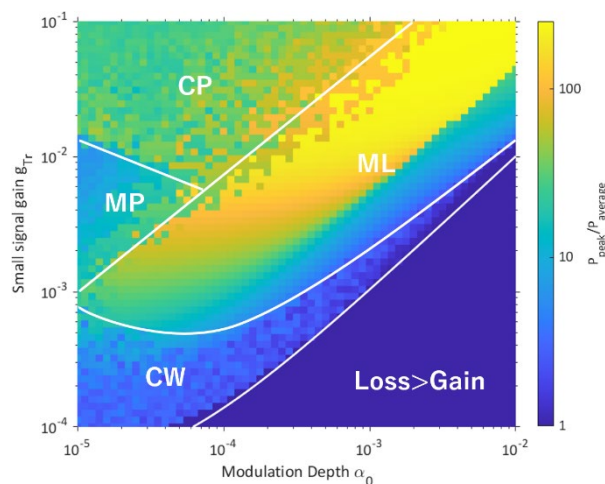


Fig.5 共振器の Q 値を 1.0×10^8 としたときのシミュレーション結果.

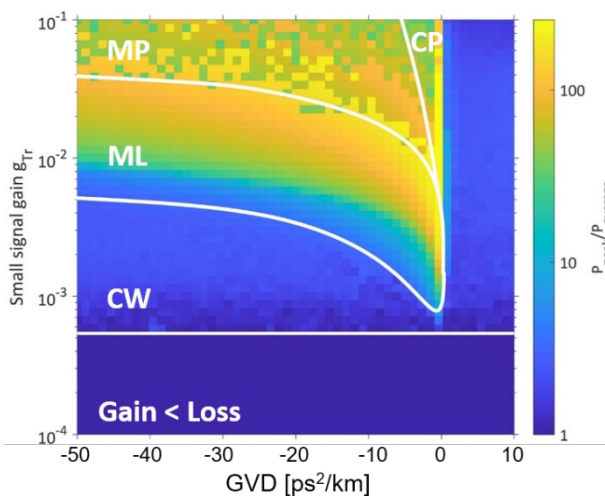


Fig.6 共振器の分散を変化させたときのシミュレーション結果.