

超短パルスの電場位相をそろえてみよう

（電場位相同期レーザー）

最近モード同期レーザーにおいて、パルスのエンベロープの繰り返し周波数の安定化だけでなくパルスのエンベロープキャリア位相の安定化も試みられるようになり、光領域とマイクロ波領域での周波数標準やキャリアエンベロープ位相に依存すると考えられている現象の実験的な検証などが期待されています。

図1にモード同期レーザーからのパルス列とそのスペクトルの模式図を示します。アミ線で示したのがパルスのエンベロープで、実線がキャリア（電場）です。一般にエンベロープのピークとキャリアのピークは常に一致しているわけではなく、図1に示すように時間的にシフトしていき、その変化も一定ではないのが普通です。エンベロープのピーク間の時間幅を τ_{rep} とし、隣り合うパルスのエンベロープのピークとキャリアのピークのずれの位相を $\Delta\phi$ とすると、スペクトルのモード間隔 f_{rep} と τ_{rep} には $f_{\text{rep}} = 1/\tau_{\text{rep}}$ という関係があり、各スペクトルの周波数 f_n は $f_n = nf_{\text{rep}} + \delta$ と表すことができます。ここで δ は $\delta = (\Delta\phi/2\pi) f_{\text{rep}}$ です。

もし、モード同期パルス列の繰り返し周波数である f_{rep} と隣り合うパルスのエンベロープのピークとキャリアのピークのずれ δ が固定されれば、各スペクトルの周波数は完全に固定されるので、標準周波数源として使用できることとなります¹⁾。また、長時間各スペクトルの周波数が固定されるということは、コヒーレンス長が長くなるので、互いに遠く（例えば各スペクトル成分の周波数ゆらぎが互いに 1 mHz 以内ならば時間で 1000 秒、長さで例えば 3×10^{11} m）離れたパルス同士でも干渉することになります。パルスの時間波形に注目した場合には、ピークのずれ $\Delta\phi$ が既知の一定の値になるので、パルスのエンベロープのピークとキャリアのピークの関係のわかるパルスが生成できることになります。例えば図1において左から1番目のパルスはエンベロープとキャリアのピークが一致したパ

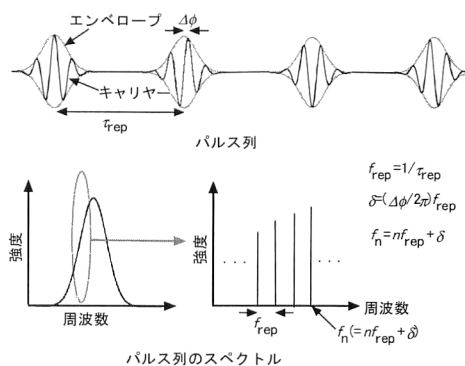


図1 超短パルス列とそのスペクトルとの関係。

ルスで、2番目のパルスはエンベロープがピークとなるとときにキャリアが最小になるパルスですが、このようなパルスはある一定の周期間隔、あるいは、長期にわたって作り出すことができます。このようなパルスを基本波として発生させた高次高調波で、基本波のエンベロープのピークとキャリアのピークを一致させた場合には、高調波がアト秒シングルパルスになりうるということが理論的に予測されており²⁾、その実現が期待できます。

このような f_{rep} と δ が一定となるパルス、あるいはエンベロープのピークとキャリアのピークをある一定の関係に保ったパルスを生成するにはどのようにすればよいのでしょうか。現在主に用いられているのは以下に示すような方法です（図2）。

まず発振器のスペクトルをフォトニッククリスタルファイバーなどで生じる自己位相変調（self phase modulation: SPM）を用いてオクターブ以上の帯域をもつ白色光を発生させます。そしてそのスペクトルの周波数が低い成分（周波数 $f_{\text{SPM1}} = nf_{\text{rep}} + \delta$ ）の2倍波を発生させたとき、その周波数は $f_{\text{SHG}} = 2(nf_{\text{rep}} + \delta)$ となります。白色光の周波数の高い成分でさきほどの2倍波とほぼ同じ周波数にある成分は $f_{\text{SPM2}} = 2nf_{\text{rep}} + \delta$ と記述されます。図2をみるとわかるように、これらの成分では各縦モードの周波数に δ の差があることがわかります。

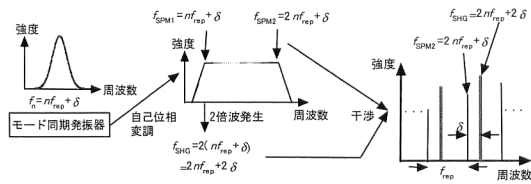


図2 エンベロープキャリア位相の検出.

この2つの光を干渉させてフォトダイオードなどで検出し、その出力信号をスペクトルアナライザで観測すると図3に示すようになり、 f_{rep} に相当する成分と、 δ 、 $f_{rep} - \delta$ 、 $f_{rep} + \delta$ などに相当する成分があるのがわかります。この δ 成分だけを取り出し、これが、 f_{rep} と一定の関係になるように制御すればエンベロープとキャリアをある一定の関係に保つことが可能となります。例えば、 δ が f_{rep} の4分の1になるようにすれば、 $\Delta\phi$ は $\pi/2$ となるので、4個おきのパルス同士が同じエンベロープとキャリアの関係をもつこととなります。この δ をゼロにすればすべてのパルスについてエンベロープとキャリアの関係が同じになりますが、上記のようなビート検出では δ がゼロになった場合、 δ と f_{rep} が重なってしまうので δ の成分だけ取り出すことは難しく、 δ をゼロになるように制御することは困難です。このような場合には、例えば2倍波をAO (acoustooptic) モジュレーターなどで縦モード周波数全体を f_a だけシフトさせると、各縦モード周波数は $2n f_{rep} + 2\delta + f_a$ となり、白色光と干渉させたときに発生する f_{rep} 成分以外のビート信号は $\delta + f_a$ です。この成分が f_a になるように制御すれば δ はゼロになり、すべてのパルスについてエンベロープとキャリアの関係を固定できます。

このような制御を施したモード同期レーザー発振器の例を図4に示します。モード同期チタンサファイア発振器からの ~ 10 fsパルス列の一部をマイクロストラクチャーファイバーに入射して白色光発生を行います。残りの出力の一部で1 mm厚のBBO

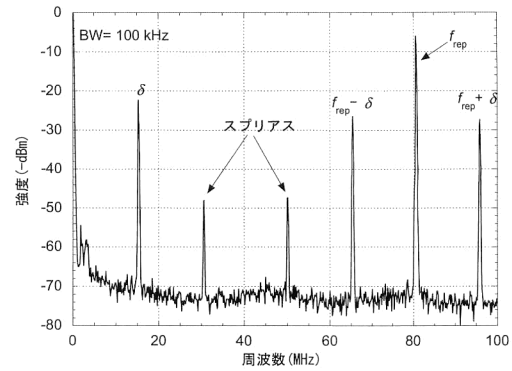


図3 エンベロープキャリア位相に対応するビート信号の例.

結晶を用いて ~ 900 nmのSHG (second harmonic generation) を行い、このSHG光と誘電体多層膜フィルターで ~ 450 nm付近だけを取り出した白色光の干渉でキャリアエンベロープ位相に対応するビート信号の検出をアバランシェフォトダイオードを用いて行います。図3は、この出力のスペクトルを示しています。このスペクトルで $f_{rep} + \delta$ に相当する部分を拡大したものを図5に示します。周波数の半値全幅で約10 kHzであることがわかります。これは短期的(約60 ms)に見た場合で、長期的(例えば1時間)に観測した場合にはメガヘルツオーダーで変化します。通常に δ のゆらぎに比べ、 f_{rep} のゆらぎは十分小さい(約60 msの間なら1 Hz以下)なのでこの幅は δ のゆらぎ幅を示しているといえます。モード同期発振器からのパルスの可干渉時間は、そのスペクトルの周波数幅を $\Delta\nu$ 、繰り返し周波数 f_{rep} のゆらぎ幅を Δf_{rep} 、 δ のゆらぎ幅を $\Delta\delta$ とすると $1/(\Delta f_{rep} \times \Delta\nu / f_{rep} + \Delta\delta)$ となります。この場合には Δf_{rep} がゼロだとしても可干渉時間は $1/10^4 = 0.1$ msです。この $f_{rep} + \delta$ を100 MHzにロックする、すなわち、 δ をこのレーザーの繰り返し周波数80 MHzの1/4である20 MHzにロックすると、さきほどのスペクトルは図6のようになります(図5との横軸のスケールの違いに注意)、周波

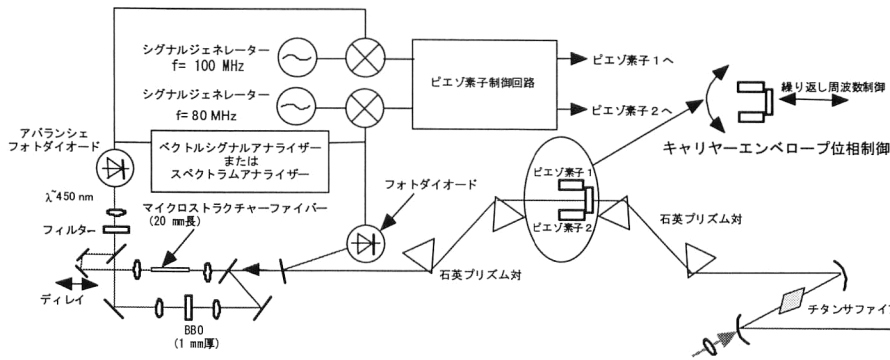


図4 電場位同期レーザーの構成例。

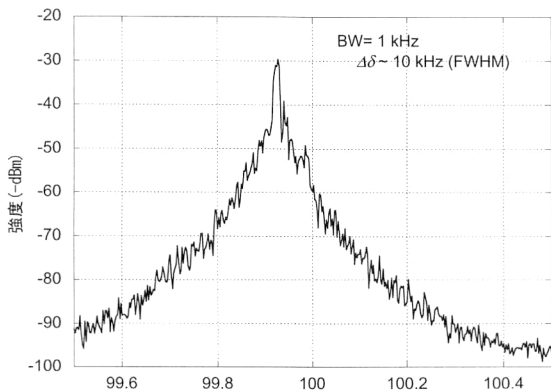


図5 図3における $f_{rep} + \delta$ の周波数幅を拡大して示した例。

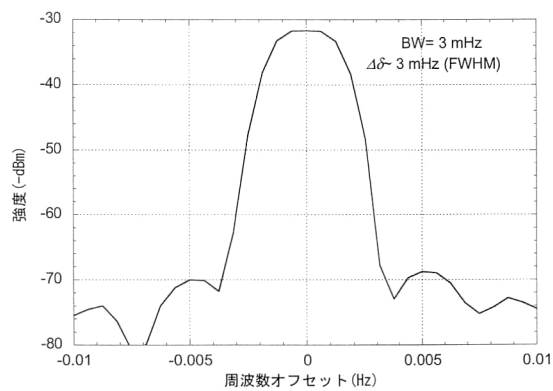


図6 $f_{rep} + \delta$ を 100 MHz にロックしたときのスペクトル。

数の半値全幅 $\Delta\delta$ は約 3 mHz であることがわかります。このとき用いたベクトルシグナルアナライザの周波数分解能は 3 mHz なので、実際の半値幅はもっと狭いと考えられます。もし、繰り返し周波数の半値全幅 Δf_{rep} も 3 mHz ならば、モード同期発振器のスペクトル幅が 800 nm 中心で 100 nm の場合には、周波数幅 $\Delta\nu$ は 47 THz になり、可干渉時間は 0.567 ms, コヒーレンス長は $0.567 \text{ ms} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.703 \times 10^5 \text{ m}$ となります。 δ をロックすることによりコヒーレンス長がきわめて長くなっているのがわかります。

この記事に関するお問い合わせは kato@optsun.riken.go.jp もしくは tanida@ist.osaka-u.ac.jp までお寄せください。

(産業技術総合研究所 高田英行)

文 献

- 1) 杉山和彦: “モード同期レーザーによる光周波数計測”, 光学, **31** (2002) 870-876.
- 2) A. Bohan, P. Antoine, D. B. Milosevic and B. Piraux: “Phase-dependent harmonic emission with ultrashort laser pulses,” Phys. Rev. Lett, **81** (1998) 1837-1840.