

高性能 AWG による、冷却原子、光ピンセットの実現

任意波形発生器(AWG)は、量子研究に利用できる最も強力な柔軟な信号源の1つです。AWGは、発生器の帯域幅と波形メモリの長さの範囲内で、ほぼ無限の数の波形を生成できます。AWGで波形を出力するには、有用な波形で埋めたデータを準備する必要があります。従来、その波形はデジタイザで記録するか、アプリケーションソフトウェアで生成してAWGに送信されていましたが、新しいDDSオプションはこの概念を変えます。

Spectrum社は、16ビットAWGのシリーズに新しいダイレクトデジタルシンセサイザ(DDS)オプションを導入しました。DDSは単一の固定周波数リファレンスクロックから周期的な波形を生成する方法です。

Spectrum社のAWG用DDSオプションは、複数の「DDSコア」を使用して各キャリアの周波数、振幅、位相が明確に定義されたマルチキャリア(マルチトーン)信号を生成します。DDSオプションにより、1つの出力チャンネルで1つまたは複数の正弦波を生成するために必要な複雑さと生成データが大幅に削減されます。DDSオプションは、現代の量子研究のニーズに合わせて多数

の量子研究者特に Rymax One コンソーシアム(<https://rymax.one>)のチームと協力して開発されました。ここでは、量子研究プロジェクトでの新しいオプションの使用について説明します。



AWG+DDSオプションにより生成されたマルチキャリアアナログRF信号

音響光学偏向器/変調器(AOD/AOM)の駆動

音響光学変調器(AOM)または偏向器(AOD)は、レーザー光の周波数(波長)、振幅、角度(位置)を動的に制御するために広く使用されています。これらは通常、圧電トランスデューサ(アクチュエータ)と吸収体と接触している結晶で構成されています。圧電トランスデューサは、通常 10MHz から 1GHz の範囲の増幅された無線周波数信号(RF)によって駆動されます。アクチュエータは結晶内に圧力波を誘導し結晶の局所屈折率を定期的に変化させます。

【偏向】

光源(通常はレーザー)から発せられる光は、ブラッグ偏向により結晶格子上で偏向します。これにより多数の偏向次数つまり光線が生じます。これらの光線はそれぞれ、ブラッグ条件を満たす角度 θ_B で偏向します:

$$\sin \theta_B = m \frac{\lambda}{2\Lambda}$$

ここで、 $m = \dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots$ は偏向次数、 λ は真空中の光の波長、 Λ は音波の波長です。 $m = 0$ 次数は偏向されず同じ方向に続くことに注意してください。

【周波数】

結晶内の音波はアクチュエータから吸収体へと移動するため、音波から偏向された光はドップラーシフトを経験し(または1つ以上のフォノンを吸収し)、その最終周波数(f_m)は次のように表されます:

$$f_m = f_0 + mF$$

ここで、 f_0 は入射光の周波数(通常は数百THz)で、 F は結合されたRF信号の周波数に対応する音波の周波数です。

【強度】

偏向の効率(入射光量(I_0)に対する1次偏向次数(I_1)の光の割合)によって特徴付けられ、次のように表されます:

$$\frac{I_1}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0}} \right)$$

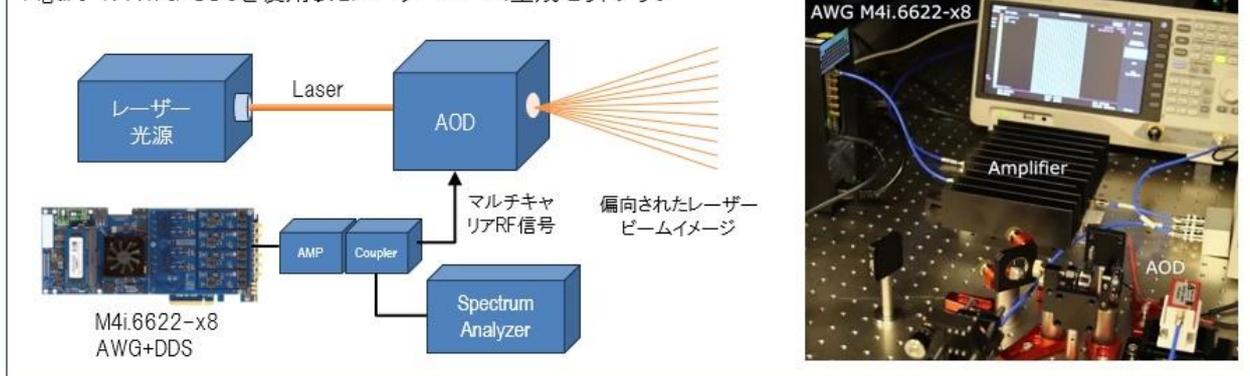
ここで、 P は RF 信号の強さ、 P_0 は RF 信号のパワーが結晶にどの程度結合され(最終的に光る)かによって決まる効率パラメータです。

レーザー光の完全な制御

たとえば 1 次偏向ビームについて考えると、上記から RF 信号がレーザービームの角度と光の周波数および強度を制御することは明らかです。これらの機能により、RF 信号の制御はレーザー光を制御する上で重要な部分になります。ここで、Spectrum 製の AWG(M4i.6622-x8)が役立ちます。特に、新しい DDS オプションと組み合わせると、AWG は AOM/AOD を制御するために必要な RF 信号を生成するための理想的なツールになります。



Figure 1. AWG+DDSを使用したレーザービーム生成セットアップ

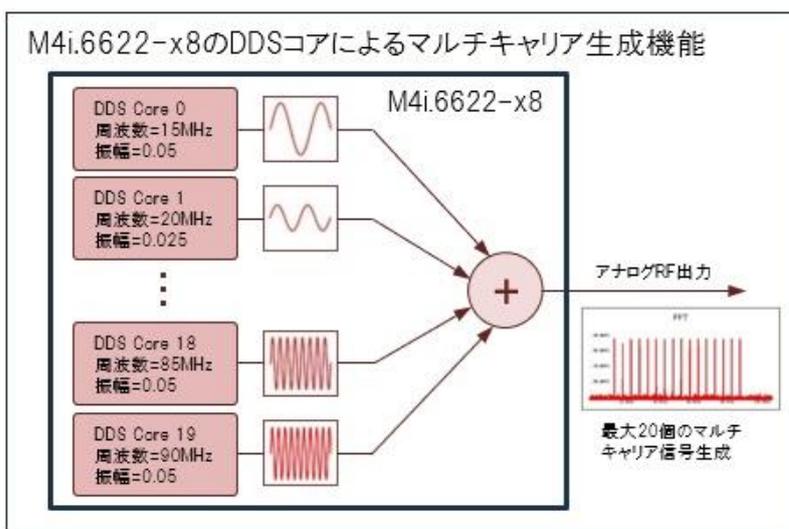


AWG を使用した AOD の光学セットアップ

Figure1 に、Spectrum 製 AWG を AOD と併用する場合のセットアップ例を示します。AWG から送られる RF 信号 (100MHz 程度) は、MiniCircuit 製の 5W アンプ(ZHL-5W-1)を介して RF カプラ(ZDC-20-1+)に送られ、信号の一部 (約 20dB 抑制) がスペクトラムアナライザ(Siglent SSA3075X-R)に送られ、メイン出力が AOD に送られます。光ファイバーから送られるクリーンアップされた低出力レーザービームは、偏光ビームスプリッターキューブ(PBS)を通過し AOD に送られます。AOD から送られる偏向された 1 次ビームは、カメラまたは画像用のホワイトスクリーンに送られます。

マルチキャリア信号

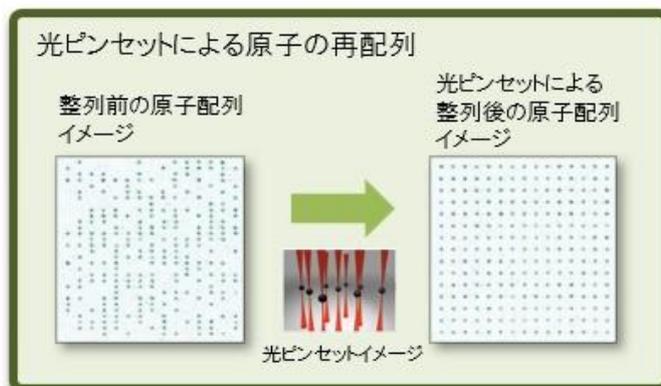
AOD に特に役立つのは、DDS ファームウェアのマルチキャリア生成機能 (右図) です。現在のファームウェアでは、ユーザーは 1 つのチャンネルで最大 20 個



のキャリアを定義できます。これらの正弦波はそれぞれ AOD 結晶内で特定の波長の連続密度波を作成します。連続波はそれぞれ光の偏向格子として機能し、複数の偏向パターンを作成します。1 次偏向パターンに焦点を合わせると、AOD は角度と強度が異なる 20 本のビームを作成します。それぞれのビームはプログラム上で定義されます。したがって、それぞれのキャリア信号の周波数と振幅を制御するとそれらのレーザービームの位置（角度）と強度を完全に制御できます。

原子の再配列

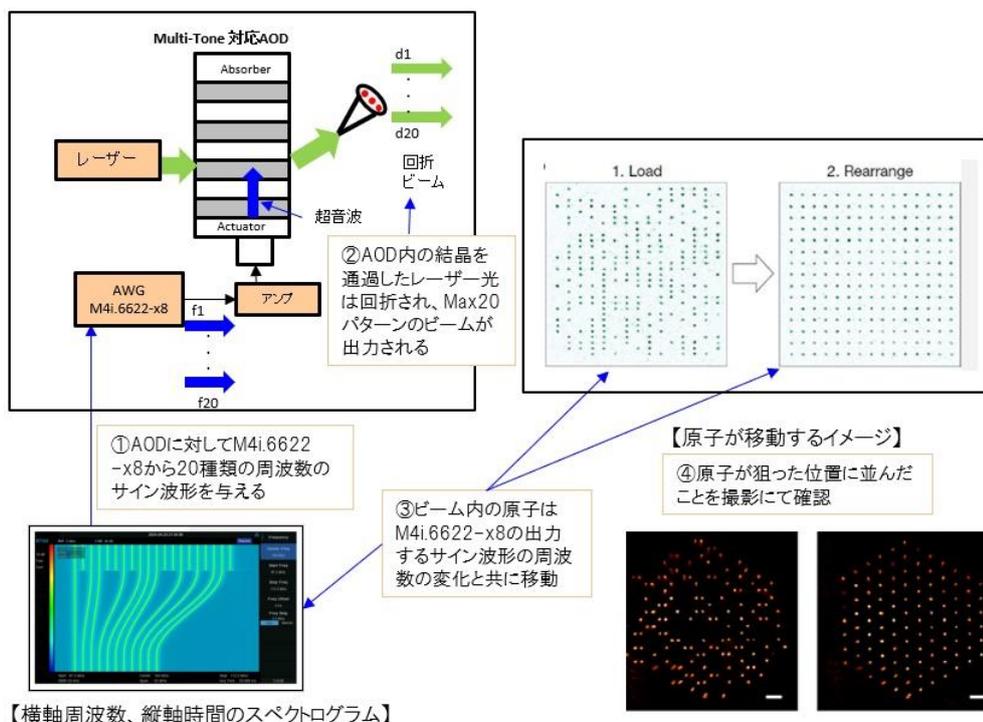
AOD から出力された 20 本の偏向ビームを使用して原子を冷却し、光ピンセットによって原子を再配列することが可能になります。この手法は冷却原子方式（Cold Atom 方式）の量子コンピュータの開発に利用されています。



まとめ

DDS オプションは、量子研究の分野に限定されることなく量子研究の分野における一般的な用途に合わせて調整されています。DDS オプションを使用すると、RF 信号キャリアと偏向レーザービームを直接接続してレーザービームの数、位置、強度を完全に制御できます。さらに、DDS オプションには線形動的動作が組み込まれているため、ユーザーは周波数と振幅の非常に正確な変更をプログラムできます。DDS オプションは現代の量子研究者に最適なツールです。

下図は量子コンピュータ(Cold Atom タイプ)研究用に SPECTRUM 社 M4i.6622-x8 と DDS オプションを用いるイメージです





Spectrum Instrumentation 社について

Spectrum 社は、Spectrum Systementwicklung Microelectronic GmbH として 1989 年に設立され、2017 年に Spectrum Instrumentation GmbH に改名されました。最も一般的な業界標準（PCIe、LXI、PXIe）で 500 を超える デジタイザおよびジェネレータ製品を作成するモジュール設計のパイオニアです。これら高性能の PC ベースのテスト&メジャーメントデザインは、電子信号の取得・生成および解析に使用されます。同社はドイツの Grosshansdorf に本社を置き、幅広い販売ネットワークを通じて世界中に製品を販売し、設計エンジニアによる優れたサポートを提供しています。Spectrum 社の詳細については、www.spectrum-instrumentation.com を参照してください。