

# ARB RIDER AT-AWG-7000 シリーズ

高エネルギー・レーザーのための AWG

アプリケーションノート

## ARB RIDER AWG-7000 SERIES



### 任意信号発生器

#### はじめに

今日、レーザーの強度はレーザー物質相互作用において相対論的効果が支配的となるレベルに達しました。

高エネルギー・レーザーは比較的高いパルス・エネルギーを持つ、光パルスを放射するパルス・レーザーです。

パルス・エネルギーがどの程度高くなければならないかについて決まった定義はありませんが、通常は、ほとんどが固体レーザーである通常の Q-スイッチ・レーザーと比較し、100mJ 以上のパルス・エネルギーを高エネルギー・レーザーと見なします。

高パルス・エネルギー・レーザーの新しい用途は、基礎物理学から材料研究、生命科学、航空宇宙および防衛に至るまで、さまざまな分野で生まれています。

高エネルギー・レーザーは、世界最大かつ最もエネルギーの高いレーザーである NIF のようなシステムを用いた核融合エネルギーなどの研究にも使用されます。

Arb Rider AWG-7000 は、高速な立ち上がり時間、高振幅、低ジッタ信号を必要とする最先端の実験に最適なツールです。



#### 課題：

- 高エネルギー・レーザー・アプリケーションのためのパルス生成

#### 解決策：

- AWG-5000 および 7000 シリーズ任意信号発生器

#### 結果：

- 高エネルギー・レーザー・システムの開発および試験を加速させます
- レーザー、電気光学変調器、音響光学変調器のパルスと制御信号を生成する時間を短縮します。



Active Technologies

## 高エネルギー・レーザー

高エネルギー・レーザーにおける高エネルギー・パルスの定義は 100mJ またはそれ以上のパワーで表されません。

しかし、一部のデバイス（多くの場合、単純なレーザーではなく、増幅された光源）は、数ジュール、数キロジュール、さらにはメガジュールというはるかに高いエネルギーを放射します。

ナノ秒のパルス持続時間と組み合わせた場合、高いパルス・エネルギーはかなり高い光ピーク電力を意味します。たとえば、10ns 以内に供給されるわずか 1 ジュールでも、ピーク電力は  $1\text{J} / 10\text{ns} = 100\text{MW}$  程度になります。

また、一部の高エネルギー・レーザーは比較的長いパルスを放射しますが、それに応じてピーク・パワーは低くなることも事実です。

高エネルギー・レーザーのパルス繰り返し周期は通常は比較的低く、そうすることで最高のパルス・エネルギーを達成できますが、これは、多くのアプリケーションでは高いパルス繰り返し周期を必要としないか、または利用することができないためです。

### 高エネルギー・レーザーの種類

#### Q-スイッチ・レーザー

ほとんどの場合、これらはレーザー結晶またはレーザーガラスをベースにした Q-スイッチ固体レーザーであり、パルス持続時間はナノ秒単位です。

光ポンピングは、原理的にはレーザー・ダイオード（ダイオード・ポンピング・レーザー）で行うことができますが、必要なポンピング・エネルギーは、レーザー・ゲイン媒体の上位状態の寿命によってほぼ制限される時間内に供給する必要があるため、非常に高いパルス・エネルギーの場合においては実用的ではないことがよくあります。この寿命は、ほとんどの場合、数百マイクロ秒から数ミリ秒の間です。

例えば、1J のパルス・エネルギーは約 2J のポンピング・エネルギーを必要とし、 $\approx 100\mu$  以内に供給されなければならない場合、ポンピング・パワーは  $2\text{J} / 100\mu\text{s} = 20\text{kW}$  が必要となる計算になります。レーザー・ダイオードは、パルス・ポンピング用の準連続波動作で使用でき、（ダイオードが連続波で供給できる以上の）出力増幅が可能です。その増幅は通常非常に限られています。

必要なポンプ電力が高くなると、レーザー・ダイオードのコストが高くなり、また、多数のレーザー・ダイオードからの放射をレーザー・ゲイン媒体に結合することも難しくなります。これらの理由から、フラッシュランプ（パルス・ガス放電ランプ）を備えたランプ励起レーザーがよく使用され、このレーザーは、比較的 low コストで高いパルス・エネルギーを提供できますが、この方法では、主に無指向性で広帯域のランプ放射が原因で、レーザーの電力変換効率が非常に低くなります。

図 1 では、**Arb Rider AWG-4000 シリーズ** を使用して、最大 12Vpp の高精度で高振幅かつ高速にスイッチングする無線周波数（RF）信号を AOM（Acousto-Optic Modulator; 音響光学変調器）の圧電トランスデューサに提供し、レーザー実験での Q-スイッチング用の AOM を駆動しています。

この信号は AOM 内で高出力の音波を生成し、レーザー光を回折させ、エネルギーの制御された蓄積と放出を可能にし、Q-スイッチングの高エネルギーの短いパルス特性をもたらします。

これらの実験では、AWG は AOM の迅速な制御に必要な高速デジタルオン/オフスイッチング、AOM を駆動するために必要な高振幅パルス、効率的な Q-スイッチングに必要なとされる十分な RF 電力を提供します。AWG の「任意」の特徴により、レーザーの Q-スイッチング動作を正確に制御するための複雑なパターンを生成することができます。さらに、AWG は実験装置内の他のコンポーネントに同期信号を提供することができますが、これはレーザー動作の調整には不可欠です。

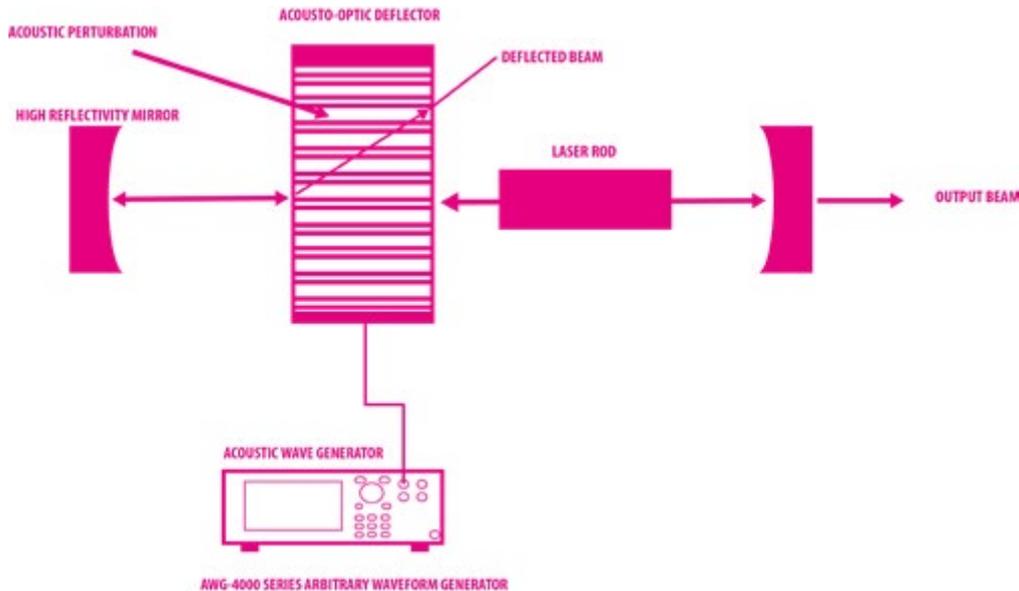


図 1：Q-スイッチ・レーザー | 音響工学変調器（AOM）用信号を生成する AWG-4000

### フリー・ランニング・レーザー

Q-スイッチはパルス生成に最も頻繁に用いられる技術であり、一般的にはナノ秒単位のパルス幅を実現します。しかし、一部の高エネルギー・レーザーは、レーザー共振器に Q-スイッチを設置せずに、フリー・ランニング・モードで動作します。

これにより、パルス幅が大幅に長くなり、その持続時間はポンプ・パルス幅とほぼ同程度になります。ポンプ・パルス幅は、例えば使用するフラッシュ・ランプと駆動回路の組み合わせによって決定されます。レーザー出力のピーク・パワーはそれに応じて低下します。

### 増幅源（MOPAs）

大型のレーザー・デバイスは、大きな電力入力、光学的損傷の問題、機械的振動、冷却および放熱の問題、音響ノイズなどに関連する深刻な安定性の問題に直面することがよくあります。

高いレーザー出力を得ると同時に、良好なビーム品質、短いパルス幅、優れた周波数安定性、そして良好なビーム制御を実現する一般的な方法の一つは、小型ながらも適切に制御されたレーザー発振器から安定した入力レーザー信号を生成することです。この信号は、マスター・オシレータ・パワー・アンプ（MOPA）システムと呼ばれる一連のレーザー増幅器を通して増幅されます。

### ビーム結合

最高のパルス・エネルギーを得るために、ビーム結合技術が用いられる場合があります：

- スペクトル・ビーム結合は、光波長が多少異なる複数のレーザー光源を用いて行われます。一つは、例えば、回折格子を使用することです。しかしながら、多くの高エネルギー・レーザーは、ゲイン媒質の発光帯域幅が比較的狭いため、異なる出力波長で容易に実現することができません。注目すべき例外はファイバー・レーザーですが、その出力ピーク・パワーは固体バルク・レーザーより

もはるかに制限されています。

- コヒーレント・ビーム結合には、複数のレーザーの光場の相互コヒーレンスが必要です。これは高エネルギー・レーザーでは容易に実現できません。一般的に、最適なビーム品質を備えた回折限界のビームが必要です。

## COHERENT BEAM COMBINING

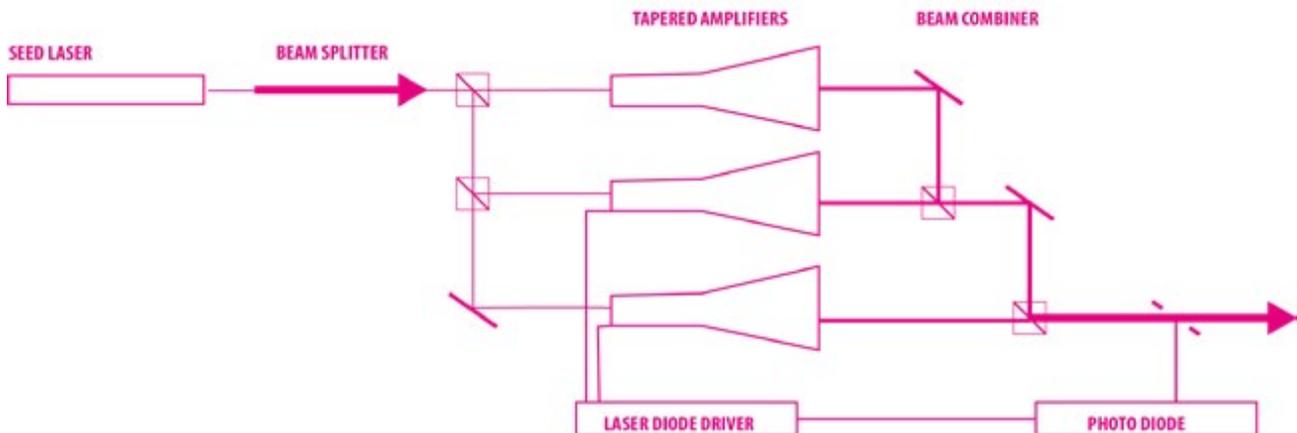


図 2：コヒーレント・ビーム結合

## パルス長

パルス長は可能な限り短くすることが望まれることが多いですが、これは主にピーク・パワーを高めるためです。しかし、高エネルギー・レーザーの場合、特にそれを実現するのは様々な理由から困難です。

- 共振器内のピーク・パワーが高いと、光学的損傷のリスクが高まります。
- Q-スイッチ・レーザーでは、短パルスを実現するために、レーザー共振器の往復時間を短く抑える必要があります。しかし、ランプ励起レーザー（または多数のレーザー・ダイオードで励起されるレーザー）では、かなり長いゲイン媒質が必要となり、したがってレーザー共振器も長くなります。
- 短いパルスには、Q-スイッチの比較的高速な動作が必要です。もし Q-スイッチが音響光学変調器である場合、使用される音波の材料中における速度が限られているため、デバイス内でレーザー光を比較的狭く集束させることしかできません。しかし、これはレーザー誘起損傷の問題につながります。電気光学変調器（ポッケルス・セル）の場合、通常は結晶サイズが大きいため生じる大きな電気容量が問題となります。
- 最高のパルス・エネルギーは Q-スイッチなしでできますが、この場合パルス持続時間は大幅に長くなります。

## 高エネルギー・レーザーのアプリケーション

### 核融合

核融合を駆動するには極めて高い光強度が必要であり、短時間に極めて高い温度と圧力の組み合わせを作り出します(慣性閉じ込め核融合)。この原理を実験的に検証するために、巨大な固定装置が建設されています。最も注目すべきは、カリフォルニア州リバモアにあるローレンス・リバモア国立研究所の国立点火施設(NIF)が1997年から建設されており、長年の開発を経て、数ピコ秒の持続時間を持つマルチメガジュールのレーザーパルスを適用することでメガジュールの核融合収量を生成することに成功したことです。

これは巨大な増幅器チェーンを基盤としており、多数の光源からのレーザー・ビームを、核燃料を含む単一の小さな標的に集中させます。

主な目的は、レーザー点火に基づく核融合炉の研究です。

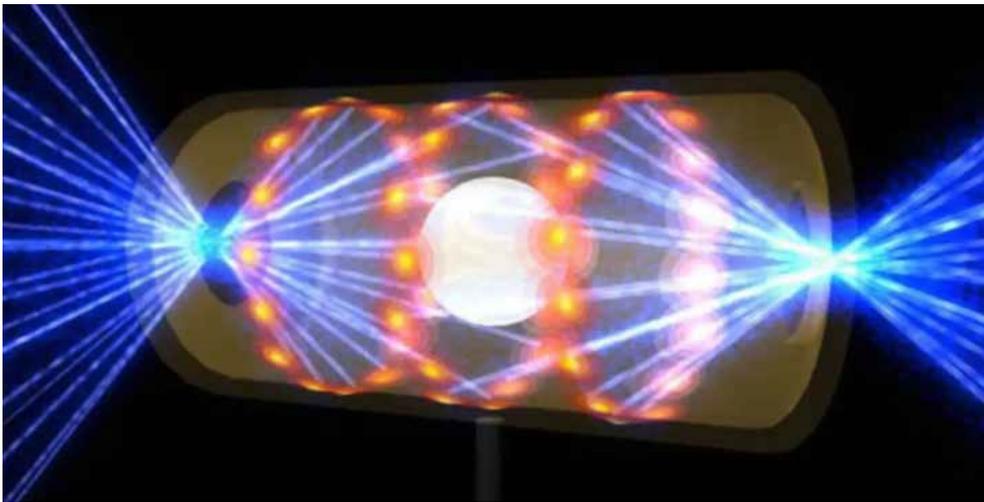


図 3：高エネルギー・レーザーと核融合

## レーザー材料加工

ガラスの材料加工では、フェムト秒レーザー微細加工技術により、複雑な透明構造を加工できるようになりました。

現在では、ガラスのボトムアップ・ミリング、薄ガラスの切断、レーザー・ベースのベッセル・ビーム・スクライビング技術、およびガラスを貫通するピアの製造を、穴あけ、切断、ミリングによって材料を選択的に除去することで正確に製造できます。

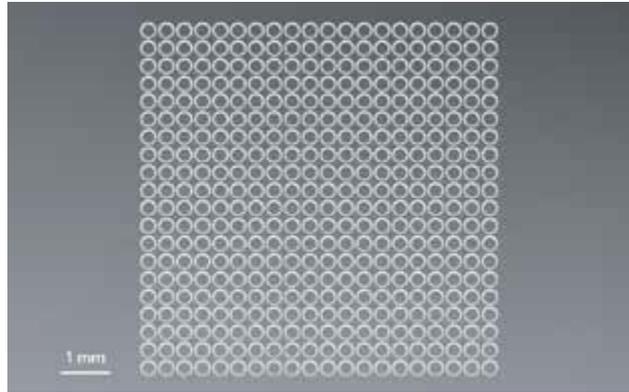


図 4：レーザー材料加工 — 300um の穴あけ

金属加工においては、フェムト秒レーザーは複雑な形状や特徴の製造を可能にする一方で、化学添加物を必要とせずに白黒のマーキングや着色を行う機能も付与します。

ポリマーは自動車、医療、民生用電子機器など様々な用途で広く使用されています。しかし、熱伝導率が低いという固有の性質のため、ポリマーは熱に非常に敏感です。高い熱負荷は、大きな熱影響部、反り、および炭化を引き起こす可能性があります。フェムト秒レーザーは、その極めて短いパルス幅により、プロセス品質を維持しながらポリマーの精密加工を可能にし、この問題に対する解決策を提供します。



図 5：レーザー材料加工

## リモートセンシング

十分に高いパルス・エネルギーが利用可能であれば、様々なリモートセンシング手法を比較的長距離に適用できます。例としては、レーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）に基づく化学分析や、様々な LiDAR 手法が挙げられます。

高出力レーザー・ダイオードは、LiDAR の仕組みに不可欠な要素です。これらのダイオードは、短い電流駆動時間（パルス幅とも呼ばれます）内で高い光出力を発する必要があります。

高出力レーザー・ダイオードは、物体を照射するために集光した光線を放射します。LiDAR システムは、反射光が戻ってくるまでの時間を計測することで、物体までの距離と形状を特定します。このプロセスにおいて、レーザー・ダイオードの出力は非常に重要です。より強力で集光された光線は、より長距離の検出と高解像度の画像撮影を可能にします。

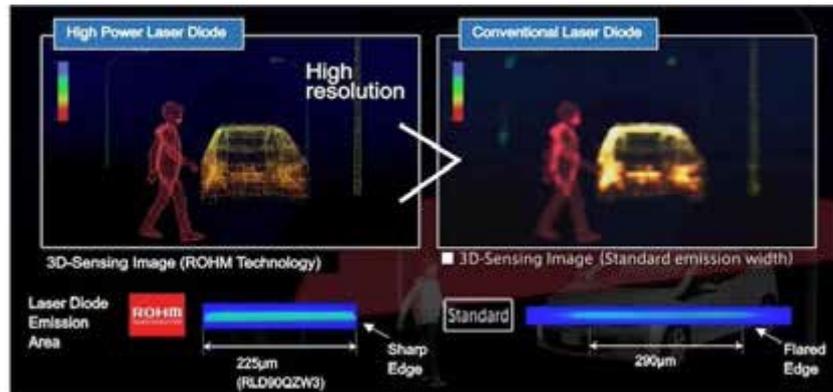


図 6：LiDAR アプリケーションの高出力レーザー・ダイオード

## 医療用アプリケーション

皮膚科などの特定の医療処置では、比較的高いエネルギーのレーザーパルスが必要とされます。これにより、照射を皮膚の比較的広い領域に当てることができ、適切な処理速度を実現できます。

## 科学研究

物理学の様々な分野では、かなり高エネルギーのレーザーパルスが必要とされます。パルス・エネルギーだけでなく、パルス幅、波長、その他のパラメータに関する要求も、用途によって大きく異なります。例を挙げると：

- 高調波発生によるハード紫外線や X 線の生成には、極めて高い出力と優れたビーム品質を備えたフェムト秒パルスが必要になります。
- 高強度場物理学における他の応用分野でも同様の要求があり、ピーク出力は数テラワット、さらにはペタワットに達します。
- レーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）に基づく化学分析は、十分な高パルス・エネルギーが利用可能であれば、比較的長距離でも実施できる。



図 7：医療用アプリケーションの高出力ダイオード

## バーストモード・レーザー

バーストモード・レーザーは、低い繰り返し周波数で短いパルス列を連続的に発生させ、高い繰り返し周波数と高いピーク・パワーを同時に実現します。

高エネルギー・高ピーク・パワーのバーストモード・レーザーの用途としては、材料加工、精密手術、高解像度検出、高出力マイクロ波発生、航空宇宙・防衛用途などが挙げられます。

近年、バーストモード・レーザーの新しい用途として、高出力パルス・可変マイクロ波生成が挙げられます。マイクロ波の周波数スペクトルとピーク・パワーは、レーザーパルスの周波数スペクトルとピーク・パワーに依存します。

特に、バーストモードで動作するレーザーは、高周波（GHz レベル以上）、高出力、かつ周波数可変のマイクロ波バースト信号を生成するのに有利ですが、そのためにはいくつかの出力特性を考慮する必要があります。例えば、バーストエンベロップの均一な分布は、実効的なマイクロ波バースト持続時間に影響を与えます。また、周波数調整可能なマイクロ波信号を生成するには、バースト内の繰り返し周波数を柔軟に調整する必要があります。

したがって、バーストモード・レーザーには、ほぼ均一なエンベロップと可変周波数が求められます。

さらに、バーストモード・レーザーを他の様々なアプリケーション要件に適合させるためには、バーストエネルギーとピーク・パワーの向上に加えて、バースト内パルスの繰り返し周波数や持続時間など、時間領域におけるチューニング性能を向上させる必要があります。

4 番目の方法は、電気光変調器（EOM）を用いて非常に高速に変調する方法であり、理論上は ps～ns のパルス幅という最も広い調整範囲と GHz を超える繰り返し周波数を実現できます。

しかし、挿入損失が高く、シングルモード・ファイバ入力であるため、EOM からの微弱な信号を増幅しながらエンベロップの均一性を維持することは困難です。

最近の研究と応用では、バースト内パルスの繰り返し周波数と持続時間を調整可能な、高パルス・エネルギーと高ピーク・パワーの全ファイバー・バーストモード・レーザーシステムが用いられています。

7 段のファイバ増幅器において、ほぼ均一なバーストエンベロップを得るために使用できる様々な方式があります。

この例では、任意波形レーザー・ダイオード（LD）ドライバ、AOM、EOM、3 つのシングルモード増幅器、および 4 段のマルチモード増幅器で構成される二重前置補償構造を解析します。

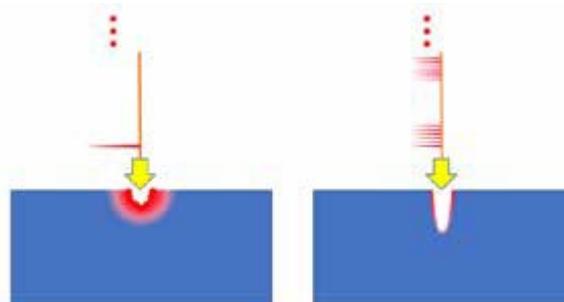


図 8：シングルモードレーザーとバーストモード・レーザーの金属ドリル加工

### シングルパルスモード

- ・高い熱影響
- ・粗い表面
- ・低い切断効率

### バーストモード・レーザー

- ・低い熱影響
- ・滑らかな表面
- ・高い切断効率

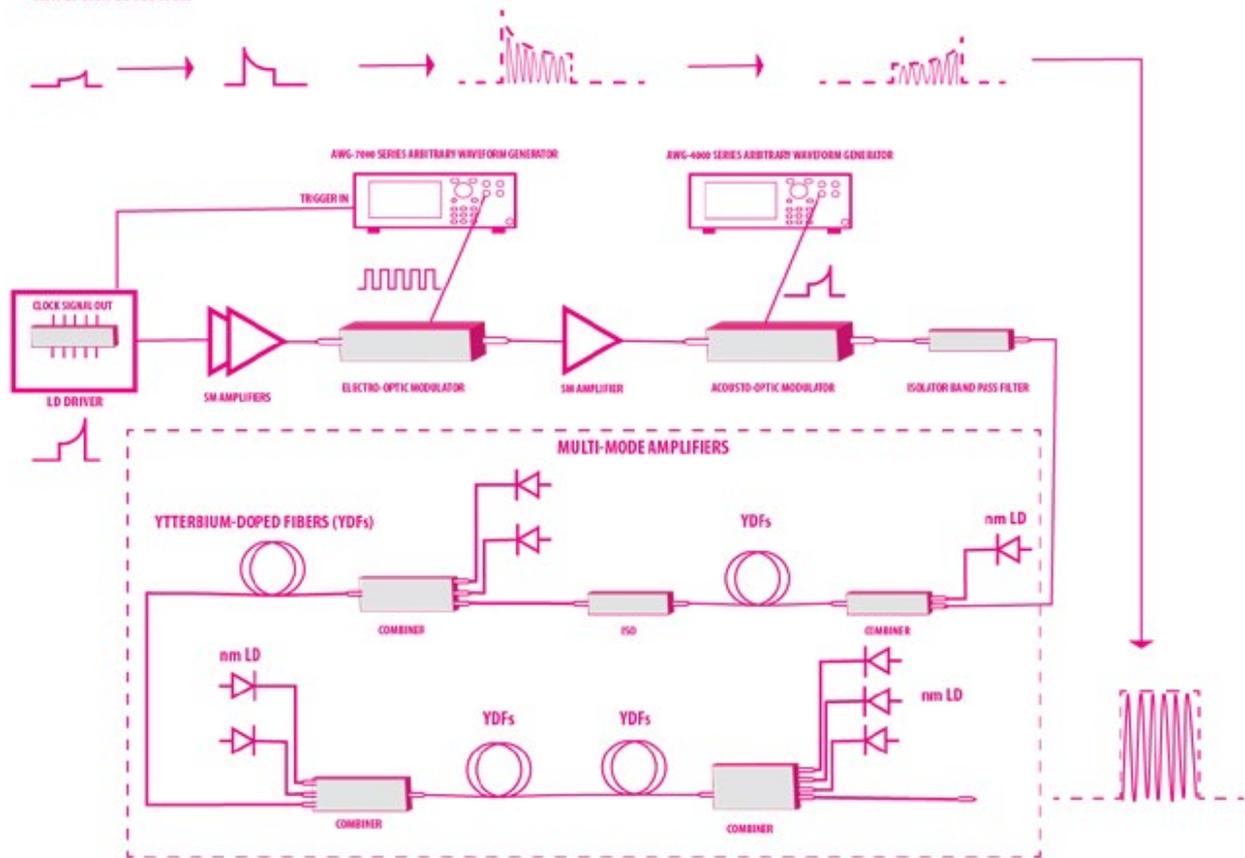


図 9：バースト・レーザー・システム

レーザー・システムの概略図を図 10 に示します。

レーザー・システムは主に 5 つの部分に分かれています：パルスシード、3 段のシングルモード・プリアンプ、高繰り返し変調部、二次前置補償変調部、そして 4 段のマルチモードアンプです。

1 つの任意波形 LD ドライバを使用して、シード LD を 100Hz の繰り返しレートで事前補償された波形に直接変調します。

シングルモード・プリアンプは 3 段構成で、その利得媒体はすべて、976nm での吸収係数が 250dB/m の高濃度ドープ・シングルモード Yb<sup>3+</sup>ドープ・ファイバ (YDF) であり、ポンプ光源はシングルモード 976nm LD です。

このアプリケーションにおいて、任意信号発生器は主に次の三つの目的で使用されます：

1. レーザー・ドライバは、AWG が電気光学変調器を駆動する波形信号をレーザーパルスと同期させるためのトリガ信号を生成します。AWG-7000 および AWG-5000 シリーズ任意信号発生器は、数ピコ秒単位の極めて低いジッタでアナログ信号をトリガできます。
2. 高繰り返し変調部には、5~10GHz の帯域幅を持つ EOM が含まれており、高速電気信号を生成する AWG によって制御される必要があります。

AWG-7000 と AWG-5000 は、外部アンプを使用せずに EOM を直接駆動でき、最大 5Vpp の高電圧振幅パルスをも最大 50ps の高速立ち上がり/立ち下がり時間で出力できます。さらに、最大 10GHz の信号を生成することができます。

3. 二次前置補償変調部には、帯域幅が 200MHz 以下の AOM が含まれており、これを制御するには別の AWG が必要になります。

AOM は、パルス波形を前置補償波形に整形するだけでなく、時間領域においてプリアンプからの増幅自然放光（ASE）ペDESTALを遮断します。

**AWG-5000** および **AWG-4000** シリーズは、通常 200MHz 程度の低周波数帯域を必要とする AOM 用の信号を生成できます。

シングルモード・プリアンプの第 3 段は、EOM の後段、AOM の前段に配置されていることに注目してください。この段は、EOM の挿入損失と変調を補正し、AOM の二次前置補償に比較的高い初期エネルギーを提供します。

AOM の後段には、3dB 帯域幅 2nm のアイソレータ／バンドパスフィルタ（IBP）が配置されています。システム内のマルチモード増幅器は、4 段目の増幅器から 7 段目の増幅器まで、4 段の全光ファイバ型ダブルクラッド増幅器で構成されています。

4 段のマルチモード増幅器はパルス・エネルギーを約 mJ レベルまで増幅し、出力バースト波形はほぼ均一に分布します。

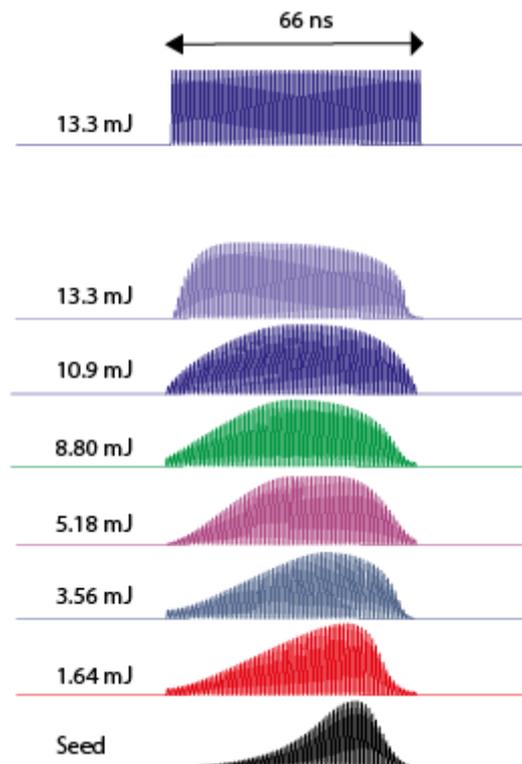


図 10：バーストモード・パルスの波形

図 12 の青線と赤線は、それぞれ AWG 信号からの補償前波形と AOM 変調後のバーストモード・パルス波形を示しています。バーストモード・パルスの包絡線は、概ね補償前波形に似ています。ここでは、バースト持続時間が約 60ns の補償前バーストモード・シード信号を得ています。

バーストモード・シードは、マルチモード増幅器の 4 段に導入され、パルス・エネルギーを増強します。最大パルス・エネルギーは 13.3mJ に達し、これは当社が知る限り、全ファイバ GHz バーストモード・パルスとしては最高値です。また、計算上の最大ピーク・パワーは約 0.53MW に達します。

最大エネルギー時の抽出効率は 31.4%です。主増幅器通過後のバーストモード・パルスの時間的形狀変化を 図 11 に示します。バーストエンベロープの前半部分は、利得飽和効果によりポンプパワーの増加とともに上昇し、最大出力エネルギーではほぼ均一なエンベロープが達成されます。これは、二次前置補償によって利得飽和効果がうまく緩和されていることを示しています。AOM 変調の立ち上がり時間と立ち下がり時間は比較的遅いため（約 10ns）、エンベロープの両端で急速なエッジを実現することはできません。



図 11：高エネルギー・バーストモード・レーザー

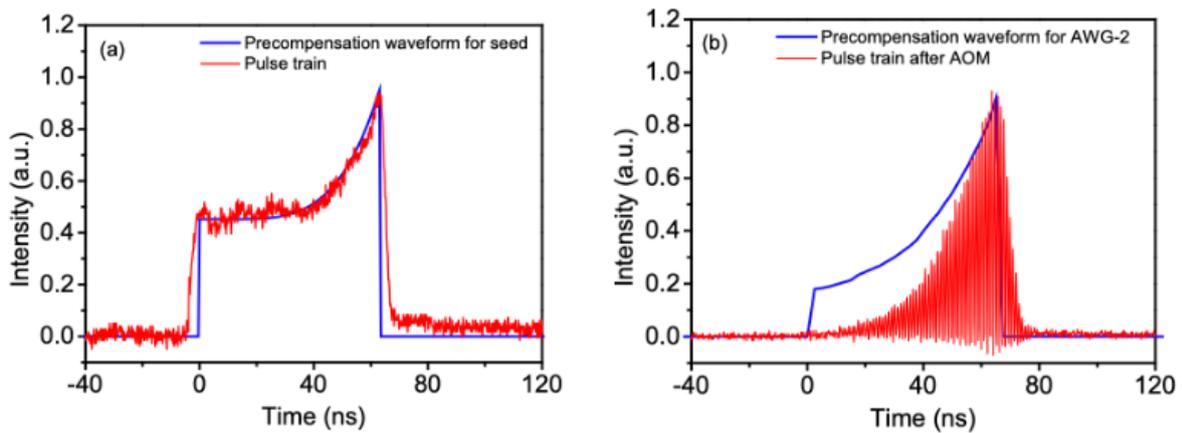


図 12：前置補償プロセスでのパルス波形

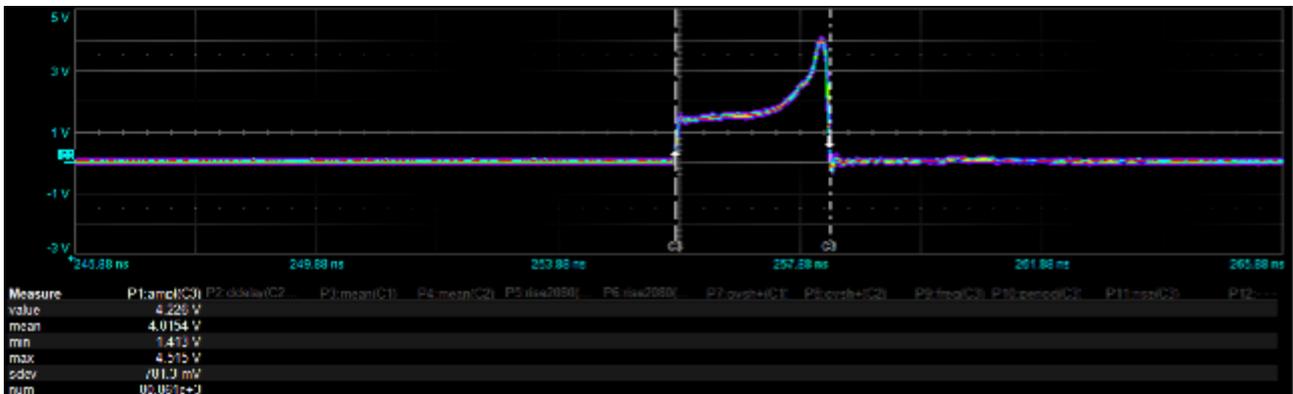


図 13：Active Technologies AWG-7000 シリーズでのパルス生成

## ANL AWG レーザー・システム

ANL AWG レーザー・システムは、任意波形発生器（AWG）を用いて出力パルスを時間的に整形する高エネルギーNd:YAG レーザーです。これらのレーザーは、OPCPA ポンピング、プラズマ物理学、衝撃物理学など、パルス幅と波形の精密制御を必要とする用途向けに設計されています。

レーザーの主な特徴は、出力パルスを時間的に整形する能力であり、これはプログラマブル任意波形発生器（AWG）によって駆動される電気光学変調器によって実現されます。

ANL AWG レーザー・システムのフロントエンドは、シングルモード CW レーザーで構成されており、これは次のステップで、ファイバ増幅器で増幅されます。その後、AWG 駆動変調器は必要な時間的形状と持続時間を持つパルスを送信し、ダイオード励起再生増幅器またはオールインファイバー増幅器でさらに増幅され、シングルパス・ダイオードおよびフラッシュ・ランプ励起増幅器で増幅するのに十分なエネルギーに達します。パルス整形分解能は 125ps、最大パルス長は 500ns です。

ANL シリーズ・リニア増幅器は、フラッシュ・ランプ励起増幅ユニットのチェーンでパルスを必要なエネルギーまで増幅する高エネルギーナノ秒システムに適したソリューションです。増幅中は空間ビーム・シェーピングが行われ、システム出力にホット・スポットのないフラット・トップ形状のビーム・プロファイルが得られます。

温度安定化ヒーターに搭載された角度調整型非線形結晶高調波発生器は、第 2、第 3、第 4 高調波発生に使用されます。高調波分離システムは、放射の高いスペクトル純度を確保し、出力ポートに導くように設計されています。

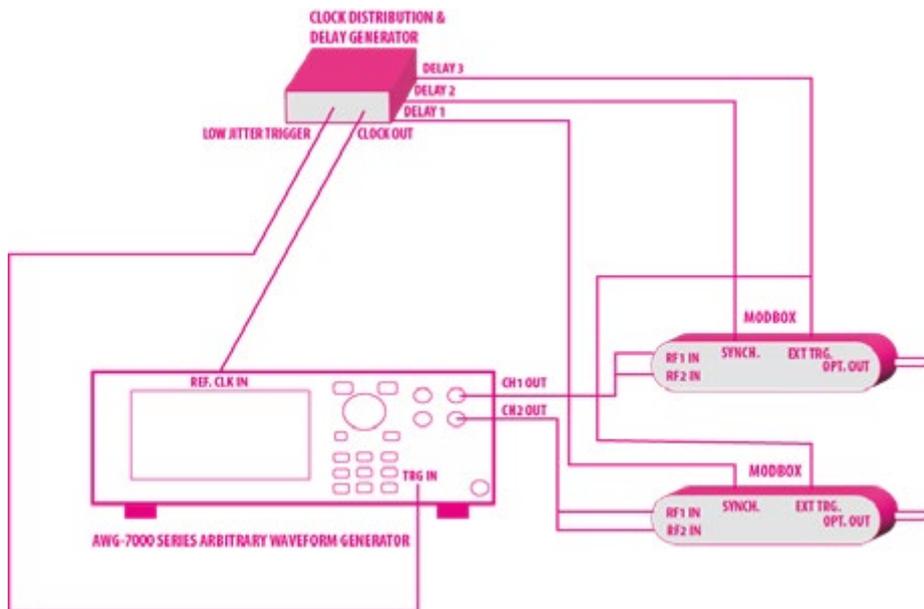


図 14 : ANL AWG レーザー・システム用 低ジッタ・モードの AWG-7000

こうしたあらゆるアプリケーションにおいて不可欠な要件は、外部トリガに対するジッタが非常に低いことです。トリガ信号とリファレンス・クロックはレーザー・システムから供給され、トリガはリファレンス・クロックにロックされます。

ジッタに関する一般的な要求は、外部トリガと出力波形間のジッタが 10ps RMS 未満であることです。

**AWG-5000** および **AWG-7000** シリーズには、外部トリガがリファレンス・クロック信号と同期しているときにジッタを最小限に抑える (5ps 未満) ことができる**低ジッタ・トリガ・モード**という特別な機能があります。

※ 製品を廃棄する場合には、地方自治体の条例・規則に従って廃棄してください。

●製品改良等により、外観および性能の一部を予告なく変更することがあります。

※ 社名、商品名等は各社の商標または登録商標です。

●お問い合わせは、下記当社営業部および営業所または取次店へお問い合わせください。

●価格は変更の可能性があります。ご注文の際にはご確認を頂きますようお願い申し上げます。

**IWATSU**  
岩崎通信機株式会社

技術的なお問い合わせ フリーダイヤル：

☎0120-102-389 E-mail:info-tme@iwatsu.co.jp

受付時間 土日祝日を除く営業日の 9:00 ~ 12:00/13:00 ~ 17:00

T&Mカンパニー T&M営業部 URL: <https://www.iwatsu.co.jp/tme>

■計測営業課 〒168-8501 東京都杉並区久我山1-7-41 TEL 03-5370-5474 FAX 03-5370-5492

■アカウント営業課 〒168-8501 東京都杉並区久我山1-7-41 TEL 03-5370-5474 FAX 03-5370-5492

■国際営業課 〒168-8501 東京都杉並区久我山1-7-41 TEL 03-5370-5483 FAX 03-5370-5492

■西日本営業所 〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町2-3-6山岡ビル1F TEL 06-6535-9200 FAX 06-6535-9215

■中日本営業所 〒460-0002 愛知県名古屋市中区丸の内3-7-33(アモンビル) TEL 052-228-3834 FAX 052-951-3576