

## エンジン同時3点点火用高輝度Nd:YAG/Cr:YAG セラミックマイクロレーザー

常包 正樹<sup>1</sup>, ニコライ・パベル<sup>1,2</sup>, 平等 拓範<sup>1</sup>

<sup>1</sup>自然科学研究機構 分子科学研究所 分子制御レーザー開発研究センター (〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38)

<sup>2</sup>レーザー・プラズマ・放射物理国立研究所 固体量子エレクトロニクス研究室

(Atomistilor Street 409, Magurele, Bucharest R-077125, Romania)

### Simultaneously 3-Point Ignitable, Nd:YAG/Cr:YAG Ceramic Micro-Lasers

Masaki TSUNEKANE,<sup>1</sup> Nicolaie PAVEL,<sup>1,2</sup> and Takunori TAIRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Institutes of Natural Sciences, Institute for Molecular Science, Laser Research Center for Molecular Science  
38 Nishigo-Naka, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585, Japan

<sup>2</sup>National Institute for Lasers, Plasma and Radiation Physics Laboratory of Solid-State Quantum Electronics  
Atomistilor Street 409, Magurele, Bucharest R-077125, Romania

(Received July 30, 2012)

An actual spark plug-sized laser with ignitable, three beam output was successfully demonstrated for simultaneous multi-point ignition of automobile engines. The closed parallel laser array consisted of a single active source of a composite, 10-mm long all-ceramics Nd:YAG/Cr:YAG monolithic laser cavity and three independent pump and focus optics lines. Laser pulses with energy of 3.2 mJ and a duration of 500 ps (> 6 MW peak power) were obtained from each laser at 20-Hz repetitions.

**Key Words:** Diode pumped solid-state laser, Passively Q-switched laser, High brightness, Laser ignition, Breakdown

#### 1. はじめに

自動車用エンジンを代表とする内燃機関の高効率化を実現できる新しい点火方式として、高輝度固体レーザーを用いたレーザー点火の研究を進めている。我々は2006年より科学技術振興機構(JST)の地域イノベーション創出総合支援事業「光波反応制御内燃機関をめざしたマイクロレーザーの研究開発」に於いて、平等の提唱する「ジャイアントマイクロフォトニクス」の設計思想を基にLD励起のNd:YAG/Cr:YAG受動Qスイッチレーザーの小型化、高輝度化最適設計を行い、点火が可能な高輝度レーザーをプラグサイズまで小型することに成功した<sup>1)</sup>。さらに2008年からのJST産学官共同シーズイノベーション事業「車載型マイクロレーザー点火エンジンの研究」では実用化と高性能化を進め、共同研究を行っている日本自動車部品総合研究所において、最終目標であった世界初となる市販車両のガソリンエンジンにレーザープラグを搭載しての走行実験にも成功している。本稿ではシーズイノベーション事業の中で高性能化の一環として行った、内燃機関のさらなる高効率化を可能にする次世代の同時多点点火レーザーモジュールの開発研究の結果について報告する。

#### 2. レーザーによる同時多点点火の利点

現在普及しているスパークプラグによる電気火花点火(Fig. 1 (a))では、電極による冷却効果により火炎核形成時の燃焼エネルギーの消失が50%以上と大きい。また、電極の温度上昇による溶解から燃焼室中央で点火することは困難であり、さらに電極が燃焼室内部に突き出した異物として、シリンダー内の火炎伝搬を妨げる障害物となっている。このためスパークプラグを用いて、シリンダー内で理想的な高効率燃焼状態を作り出すことには限界がある。さらに燃料の利用効率低下と不完全燃焼が原因となって発生する一酸化炭素や窒素酸化物の排出量を低減することも困難である。

これに対しレーザー光による光電離点火<sup>2,3)</sup>は、電極が不要であるため空間的に自由度の高い光の特性を利用して燃焼室中央で点火することが可能であり、火炎が冷たい燃焼室壁から受ける損失が小さく、高効率な燃焼を促進できる。またレーザー点火の大きな特長として、プラズマ生成メカニズムの違いからスパークプラグでは点火が難しい高圧の燃料ガスに対しても点火が可能である点も上げられる。燃焼効率の改善から、高圧縮化は新型エンジン開発の必然的な流れであり、レーザー点火の重

要性はますます高まるものと予測される。また車用ではないが、既に高圧縮下で稼働しているコージェネレーション(発電)用のガスエンジンでは、点火プラグの電極の摩耗が速く頻繁な交換が必要であることから、レーザー点火実用化に寄せる期待が高い。しかしながらこれまでスパークプラグと同じエンジンの実働環境でテストできるレーザー光源がなかったため、レーザー点火による燃費改善の割合については世界でも明確な報告はなかった。これについては我々が推進した先のJSTプロジェクトの中で、昨年、日本自動車部品総合研究所がオールレーザー点火のガソリンエンジンを搭載した実走行可能な車両の試作に世界で初めて成功し、その評価結果として初めて4%という燃費改善の実測値を得ることができた。この数値はあまり大きいという印象はないかもしれないが、日本国内での全石油消費(LPガス、原油含む)に占める自動車用燃料の割合は約40%と最も高く、そのうちの4%にあたる石油(原油)量は莫大で、一般家電の省エネ効果による原油削減量とは桁違いに大きく、効果は絶大である。なお、この実車走行実験は、現行市販車両のスパークプラグをレーザーに置き換えただけの初期的なものであり、レーザーの点火位置の最適化や燃料の高圧縮化などはまだ行っていないため、今後さらなる燃費の改善が期待できる。

さらに、レーザー点火においては、電極がない自由度をさらに活かし、Fig. 1 (b)の示す同時多点点火の有効性も古くから研究されてきた<sup>4,5)</sup>。さらなる燃焼時間の

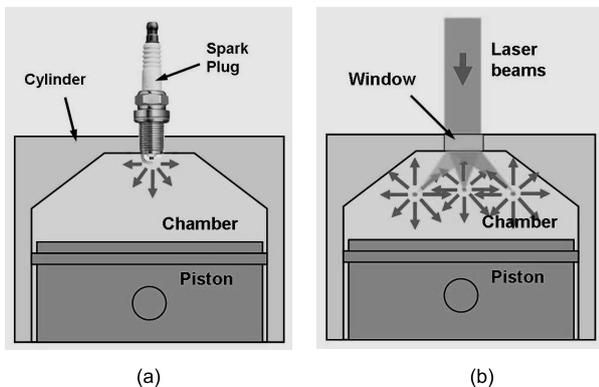


Fig. 1 Configurations of ignitions using a spark plug (a) and a laser (b). (b) shows multipoint ignition.

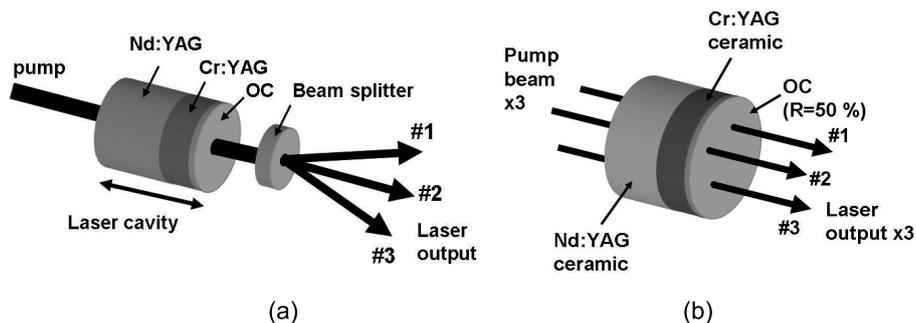


Fig. 2 Schematics of three beam laser systems. (a) one laser oscillation beam, and (b) three beam laser array.

短縮と燃焼効率の大幅な改善が可能である。特に1点では燃焼に時間のかかる燃焼室口径の大きなエンジンへの効果が高い。燃焼効率の改善は単に現行のエンジンの出力向上だけではなく、燃費の低減、より希薄な燃料ガスへの点火の可能性を意味している。

### 3. 同時3点点火用高輝度マイクロレーザーの試作

#### 3.1 同時3点点火レーザーの構成

Fig. 2 (a) (b)に、検討した多点(3点)点火レーザーの構成概念の例を示す。(a)は一つのレーザーからの出力をビームスプリッター等で分岐する方式で、(b)は単純に3つの独立したレーザーをアレイ状に近接させたものである。(a)は部品点数の少なさから最もシンプルで小型化も容易だが、点火のためには1ビーム当たりMWを超える高い光エネルギーが必要であるため、レーザー発振器には1つのレーザーでそのビーム倍の光エネルギーを発生させる必要がある。しかし実際にはビーム内で光強度がコーティングのダメージしきい値を超えてしまう可能性が高く、信頼性上大きな問題となる。またビーム面積を広げ光強度を下げて出力を上げようとしても、プラグサイズに収まる10 mm程度の短いマイクロレーザー共振器ではレーザービームの品質が急激に低下するため、逆に集光時の光強度が下がり点火できなくなる。この点、(b)の構成は部品点数が3倍に増えるものの、ダメージなど信頼性の面では不安が少なく、これまでに1点点火で確立しているレーザー設計が適用可能である。さらにこの図のように、一体化した受動Qスイッチレーザー共振器を大口径化し、その異なる3カ所を端面励起すれば、同じ共振器から発生する3つのレーザービームは必ず平行になるため、その後の点火光学系のレンズアライメントが容易になる。そこで今回(b)の構成にて多点レーザーの研究試作を進めた。なお今回、現行のプラグサイズのモジュールに収めることが可能なビームの数として3を選択した<sup>6)</sup>。

#### 3.2 共振器一体型受動QスイッチNd:YAG/Cr:YAGセラミックの発振特性

今回の同時多点点火レーザー発振実験では、受動Qスイッチレーザーのゲイン媒質Nd:YAGおよび光スイッチ素子として可飽和吸収体のCr:YAGに、新たにセラミック

ク材料を採用した。近年国産の独自技術として実用化された透光性レーザーセラミック材料<sup>7,8)</sup>は単結晶に比べ多くの利点を有すが、ここで我々が注目したのは、大口径の材料が高均一に作成可能であること、Nd:YAGとCr:YAGを接着剤を使用せず、製造の過程で強固に一体化したコンポジット構造が容易に製作できるという点である。加えてNd:YAGセラミックスの特長として、Ndの添加濃度を1.1at.%以上にも濃度消光によるレーザー特性の劣化が単結晶にくらべ小さいことが挙げられる。Ndを高濃度添加すれば短いレーザー媒質長で励起光が吸収できるので、一体型レーザーの共振器長を短くすることができる。共振器長を短くできれば、Qスイッチパルスのパルス幅を短くでき、ピーク強度を向上することができる。そこで今回、Table 1に示すNd濃度の異なる3種類の口径一体型Nd:YAG/Cr:YAGセラミック共振器を製作し、発振特性を比較した。Nd濃度はそれぞれ1.1, 1.5, 2.0at.%で、Nd:YAGの厚みは励起光の吸収率がほぼ同じになるように、それぞれ7, 5, 3.5 mmとした。一体化したCr:YAGセラミックはいずれも初期透過率30%で同じで、厚みが約3 mmである。Cr:YAGの端面には出力鏡として反射率50%の誘電体コーティングを行っている。Table 1の右端はLDからの励起光のワンパス吸収率の実測データで、一体化していないNd:YAGセラミックを用いて測定した結果である。いずれも95%程度の吸収が確認できた。一体型の場合Nd:YAGで吸収されなかった励起光はそのままCr:YAGに吸収され、光スイッチ動作に不具合を起こす可能性があるが、今回、最も薄いNd2.0at.%でもワンパスで90%以上の吸収が確認できた。Fig. 3に試作した3種類のセラミック共振器の外観写真を示す。一体型共振器の外径は直径9 mmである。なお、セラミックスはすべて神島化学工業製である。

Fig. 4は3種類の一体型共振器におけるレーザー光の入出力特性を測定した結果である。励起にはイエナオプティク製ファイバー出力型QCW LD(JOLD-120-QPXF-2P 808 0.6iTEC)を用いた。ファイバーのコア直径は0.6 mm, NAは0.22。励起波長808 nm, 励起光のピークエネルギーはLDの最大定格である120 Wで一定とし、横軸の励起エネルギーはパルス幅(時間)を変えて可変した。最大のパルス幅は500  $\mu$ s, 繰り返しは20 Hzである。励起光はレーザー媒質内ではほぼコリメート状態で入射し、励起ビーム直径は0.8 mmである。図よりA~Cで受動Qスイッチ特有の発振パルスの数に比例する階段状の出力特性が得られているが、階段の位置はズれている。

Table 1 Parameters of composite Nd:YAG/Cr:YAG ceramic laser cavities.

	Nd:YAG	Cr:YAG	Output coupling	Cavity length	Pump absorption
A	Nd 1.1at.%, 7mm	T=30%	R=50%	9.5mm	95.1%
B	Nd 1.5at.%, 5mm	T=30%	R=50%	7.5mm	94.9%
C	Nd 2.0at.%, 3.5mm	T=30%	R=50%	5.9mm	93.5%

ものの階段の高さ(パルスエネルギー)は、どの共振器でも1.7 mJではほぼ同じであることがわかる。Cr:YAGの初期透過率はいずれも30%で同じであるため、得られるパルスエネルギーが同じであることは各Nd濃度が異なっても誘導放出断面積は同じであることを示している。一方でパルスの立ち上がり(しきい値)は1.1at.%が11 mJで最も低く、Nd濃度が上がるほどしきい値は上昇し、Nd 1.5at.%では12 mJ, Nd 2.0at.%では15 mJと大幅に上昇している。これは高濃度のNd:YAGセラミックに於いて報告されている蛍光量子効率の低下によるものと考えられる<sup>9,10)</sup>。レーザー上準位に励起されたNd原子のうち、発光に寄与する原子の割合である蛍光量子効率は、Nd 1.1at.%では0.8, Nd 2.0at.%では、0.6まで低下すると報告されている。このためNd 2.0at.%では、1.1at.%に比べ20%程度、しきい値が上昇することが予測されるが、今回の結果はこれを反映したものになっている。

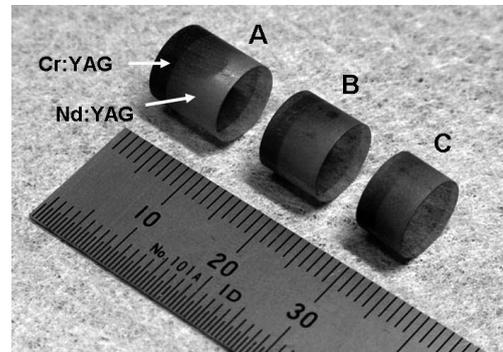


Fig. 3 Photograph of the composite Nd:YAG/Cr:YAG ceramic, monolithic laser cavities.

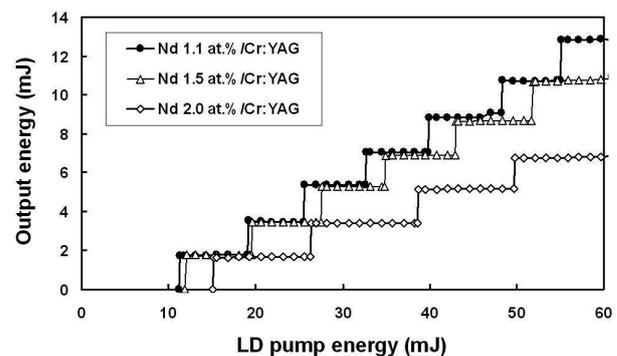


Fig. 4 Input pump energy versus laser output energy of passively Q-switched, composite ceramic lasers with different Nd concentration.

Fig. 5はA～Cそれぞれの発振器からのパルス光の時間幅を計測した結果で、横軸を共振器長、縦軸をパルス時間幅で示した。受動Qスイッチレーザーのレート方程式によるシミュレーション結果を実線で示す。この図のようにレーザー光のパルス幅はピコ秒のいわゆる「パルスギャップ」領域で動作し共振器長が短くなるほど狭くなり、6 mmと最も短いNd 2.0at.%の一体型共振器Cにおいて313 psが観測された。シミュレーション結果とも良く一致している。Fig. 4の結果のように各共振器からのパルスエネルギーは同じであるため、パルスのピークパワーはパルス幅の短いNd 2.0at.%で最大の5 MWが得られた。

さて、エンジンへの点火を考えた場合、エネルギーが同じであればパルス幅が短く、ピークパワーの高い光の方が、多光子吸収によるブレイクダウンが容易で有利であるが、一方でしきい値が低く、エネルギー変換効率が高いと言うことも実用上重要なポイントである。例えばFig. 4の特性において、18 mJの入力励起エネルギーで1パルスのみで点火するのであれば、ピークの高いCが最も優れているが、点火の確実性やより燃焼効率の改善が可能な多パルス点火が実用的である<sup>11)</sup>。その場合励起エネルギーを上げて、より多くのパルスを発生させた方が有利である。例えばFig. 4において60 mJで励起した場合、Nd 1.1at.%のAでは7パルス、合計13 mJの光エネルギーが点火に投入できるが、Nd 1.5at.%のBでは1パルス少ない10.7 mJ、Nd 2.0at.%のCではわずか4パルスの6.7 mJしか発生できない。先ほど述べたようにAのパルス幅は500 psとCより少し長いものの、3 MWはブレイクダウンに十分なピーク強度であるため、エンジンに搭載した場合、効率改善により有利である。加えて実際の自動車エンジンに搭載した場合、レーザーの周囲温度は100℃以上に上昇するため、レーザー発振しきい値が室温での値より約1.5倍に上がることが、我々のこれまでの研究で判明している<sup>12)</sup>。その場合、室温でのしきい値が高いCは高温でよりパルス数と出力エネルギーが減少するため、さらに不利である。そこで本実験結果から、3種類のNd濃度の共振器を比較してNd 1.1at.%のAがエンジン点火用として現状、最も適していると判断した。以下では主にこの共振器を用いて多点点火レーザーの開発を進めた。

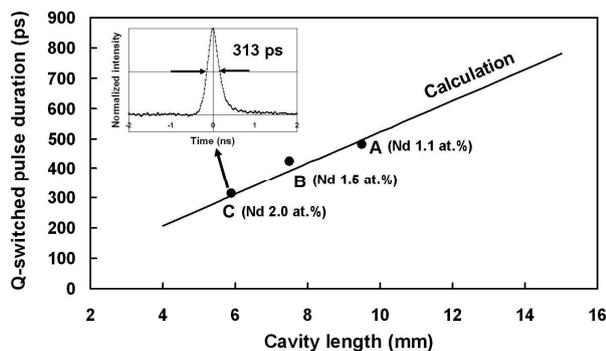


Fig. 5 Q-switched pulse durations of composite ceramic lasers as a function of cavity length.

なお、点火に必要な点火系の全エネルギー消費量をレーザー点火とスパークプラグによる火花点火とを比べた場合、プラグは電気効率約35%で、1点火当たり35 mJ程度の放電エネルギーを出力すると言われており、従って約100 mJの電気エネルギーを消費する。これに対してレーザーの場合、光-光変換効率は20%、LDの電気-光変換効率は50%程度であるので全体のエネルギー効率は10%程度とプラグよりかなり低い。しかし、燃焼条件により2 mJの光出力から点火が可能であるので、1点火当たり必要なエネルギー消費量としては、プラグと遜色がない。ただし、LDの温度調節機構などが付帯的に必要になる場合には、レーザーの方がエネルギー消費量が格段に大きくなる。従って今後は実用化に際し、レーザー点火系全体のエネルギー効率改善が一つの重要なテーマである。同時多点点火を採用する場合には、なおさら改善が必要になるであろう。

### 3.3 各レーザーの特性の均一性

今回の構成では同一の共振器の異なる領域を用いて複数のレーザー光を発振させる。その際、それぞれのレーザー特性、しきい値、パルスエネルギーなどが揃っていることが望ましい。先ほども述べたように、レーザー媒質、光スイッチ媒質にYAGセラミックを用いた一つの理由は、セラミックが大面積でもNd添加濃度が均一で、脈理等がなく均質であると報告されているためであるが、今回試作した大口径一体型共振器でそれを実験的に評価した。

Fig. 6, Fig. 7はそれぞれNd1.1at.%のNd:YAG/Cr:YAGセラミック一体型共振器Aを端面励起し、励起位置をφ9 mmの口径内で0.5 mm刻みで全面走査したときに出力面から得られた最初の1パルスのレーザー出力の面内分布と、中心部分φ5 mm面内のヒストグラムを示す。励起ビーム径はφ0.8 mmである。平均で1.6 mJ、標準偏差0.025 mJ、面内のばらつきは±0.1 mJ未満に収まっており、多点点火用として実用的に問題のない良好な面内均一性が確認できた。特にこの出力のばらつきは、Nd:YAGセラミックだけでなく、一体化したCr:YAGセラ

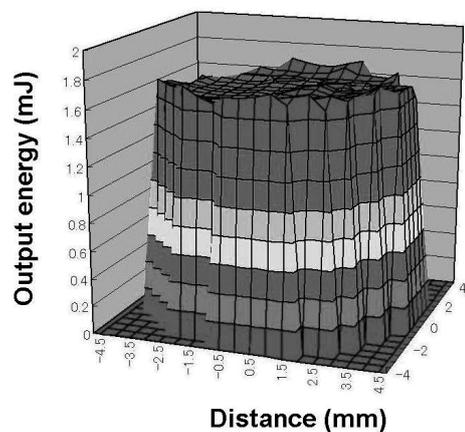


Fig. 6 Distribution of Q-switched output energy in the Nd:YAG/Cr:YAG ceramic laser with Nd:1.1at.%.

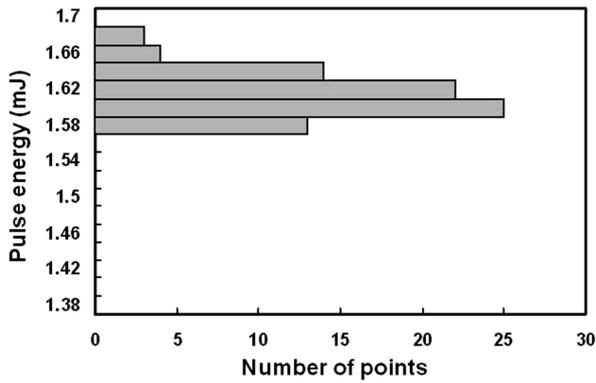


Fig. 7 Histogram of the output energy.

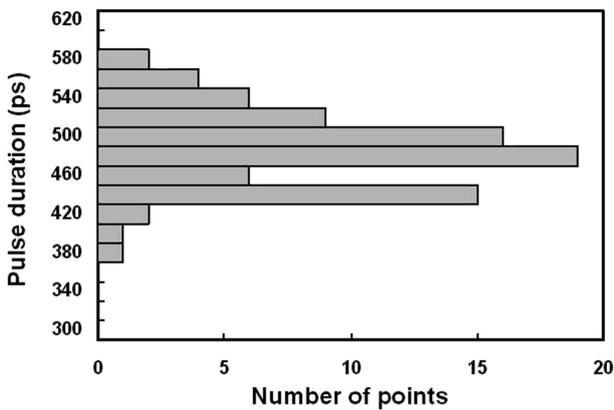


Fig. 8 Histogram of the pulse duration.

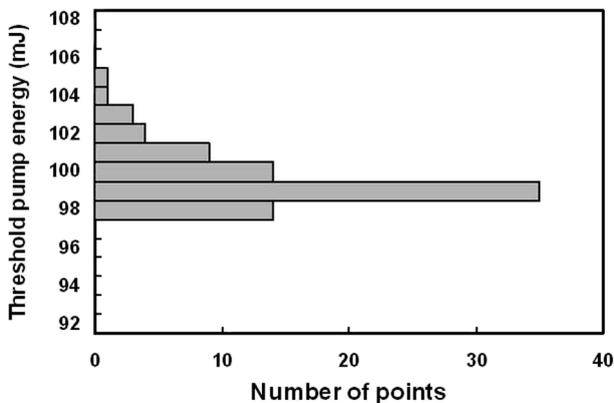


Fig. 9 Histogram of the threshold pump energy.

ミックやその接合界面の品質の均一性を含んでおり、改めてYAGセラミックの均一性の高さを確認できた。さらにFig. 8, Fig. 9はそれぞれ同じくパルス幅、パルスを発振するしきい値のばらつきを測定したヒストグラムである。パルス幅は平均476 ps、標準偏差は40 ps、しきい値は99 mJ、標準偏差1.5 mJと同様にばらつきは小さい。この結果より面内の、どの3カ所を励起してもほぼ同じ特性が得られることが予測される。

### 3.4 小型同時3点点火レーザーモジュールの製作

Fig. 10右は今回試作した同時3点点火可能な超小型モ

ジュールであり、左のM14ロングリーチ点火プラグに対し、最外径は $\phi 19$  mmで同一、長さは78 mmと逆に少し短くすることができた。励起並びにブレイクダウンのレンズ光学系の設計は基本的に先の1点点火レーザーと同一で、レンズの口径だけを小さく加工して組み込んだ。モジュール中央には、先の外径 $\phi 9$  mm、長さ9.5 mmのNd:1.1at.%のNd:YAG/Cr:YAGセラミック一体型共振器Aを搭載し、図のように一方より3本の光ファイバーとそれぞれ個別の励起光学系を用いて異なる3カ所を端面励起し、発生したレーザーパルスを同様に個別のレンズで1旦ビーム径を拡大した後、それぞれプリズムによりモジュールの中心軸に対して光路に角度を加え、互いのビームが少し外に広がるようにした後、最後にレンズで集光している。図のように3点で安定した大気中ブレイクダウンが観測できた。集光点とレンズとの距離は10 mm、かつ各集光点の距離も約10 mmである。3つの独立したレーザーを近接させた構成ではあるが、レーザー共振器が一体で、且つ3つのレーザーで共通であるため、モジュール内部のレンズの取り付け位置を機械精度の範囲で加工することで、組み立て後、光軸のアライメントの調整の必要なく、モジュールをプラグサイズまで小型にすることができた。

Fig. 11は試作したモジュールにおける3点点火各レーザーの入出力特性を示す。ただし一体型共振器からの出力を直接測定した結果である。励起はLDの波長のばら



Fig. 10 Photograph of oscillating actual plug-sized three beam laser.

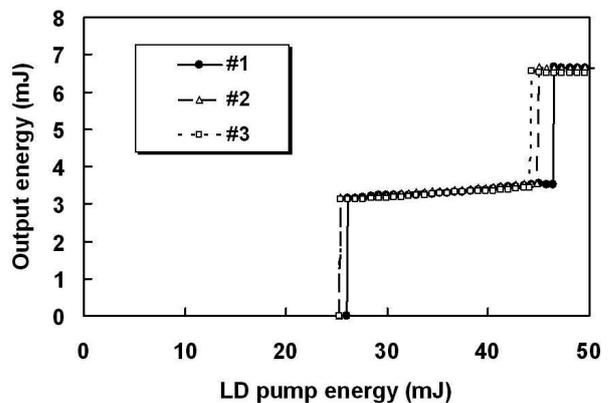


Fig. 11 Input-output characteristics of each laser.

つきの影響を考慮し、同じLDからのファイバーを3カ所に差し替えながら測定した。発振しきい値、パルスエネルギーともほとんど重なるほどの均一性の高さを示している。このモジュールでは励起ビーム径をこれまでの単結晶での点火実験と同様、 $\phi 1.1\text{ mm}$ まで拡大している。これによりパルスエネルギーは3.2 mJまで上昇、パルス幅は500 psで変わらないため、ピークエネルギーは6 MW以上となった。この値は既に報告している単結晶のNd:YAG/Cr:YAGレーザーと同等であり、YAGセラミックにおいても単結晶と同等の高出力レーザー発振特性が得られることが分かった。点火にはレーザー光の偏光方向は関係ないため、媒質はセラミックでまったく支障がなく、量産性やストレスに対する耐力も高いことから、エンジン点火には理想的なレーザー材料であるといえる。

なお3点それぞれ別々のLDで励起を行った場合、一般には各LDの波長が異なりNd:YAGへの吸収係数が変化し、その結果、同じ励起エネルギーでも各ビームの発振しきい値及び発振のタイミングにずれが生じる。実際に測定したところ、同じ励起エネルギーの場合各ビーム間最大で30  $\mu\text{s}$ のずれが観測された。点火タイミングのずれとして許される時間は、エンジンのクランク角換算で最大1°の時間と言われている。例えば6000 rpmのエンジン回転数においては、1秒当たり100回転なので1回転当たり10 ms、これを360で割ってクランク角1°では28  $\mu\text{s}$ と見積もられる。従って今回測定されたずれは、ほぼ許容される最大であった。さらに、各LDの電流値(ピークエネルギー)を5%以下の範囲で調整すれば、3点の発振タイミングを完全に一致させることが可能である<sup>6)</sup>。また逆に、それぞれのビームの発振タイミングを意図的に大きくずらすことも可能である。

#### 4. まとめ

今回エンジン点火用レーザーの高性能化を目指し、同時3点点火レーザーの試作研究を行った。レーザーの構成として信頼性上問題の少ない3つのレーザーをアレイ状に近接する構成とし、アライメントのやりやすさ、均

一性の高さから、Nd:YAG/Cr:YAGセラミック一体型共振器を適用し特性を評価した。その結果Nd1.1at.%の共振器を選択し、小型モジュールを試作した。3点点火でありながら現行のプラグと同サイズまで小型化に成功し、各レーザー光からエネルギー3.2 mJ、ピーク強度6 MWを超える高輝度光パルスを得ることに成功した。今後今回試作した多点点火レーザーによるエンジン燃焼効率の改善の検証を行う予定である。

#### 謝 辞

本報告は科学技術振興機構、JST産学官共同シーズイノベーション事業 育成ステージの研究成果の一部であり、研究の円滑な遂行に尽力いただいたJST並びに共同研究企業である日本自動車部品総合研究所、デンソー関係各位に感謝する。またレーザーモジュールの機構設計を行って頂いた自然科学研究機構 分子科学研究所、装置開発グループの水谷信雄係長に感謝する。

#### 参考文献

- 1) 常包 正樹, 猪原 孝之, 安藤 彰浩, 木戸 直樹, 金原 賢治, 平等 拓範: レーザー研究 **37** (2009) 283.
- 2) R. Hickling and W. R. Smith: SAE Paper **740114** (1974) 555.
- 3) J. D. Dale, M. D. Checkel, and P. R. Smy: Prog. Energy Combust. Sci. **23** (1997) 379.
- 4) T. X. Phuoc: Combustion and Flame **122** (2000) 508.
- 5) M. H. Morsy, Y. S. Ko, S. H. Chung, and P. Cho: Combustion and Flame **125** (2001) 724.
- 6) N. Pavel, M. Tsunekane and T. Taira: Opt. Express **19** (2011) 9378.
- 7) G. A. Kuma, J. Lu, A. A. Kaminskii, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, and N. V. Unnikrishnan: IEEE J. Quantum Electron. **40** (2004) 747.
- 8) T. Taira: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **13** (2007) 798.
- 9) V. Lupei, T. Taira, A. Lupei, N. Pavel, I. Shoji, and A. Ikesue: Opt. Commun. **195** (2001) 225.
- 10) A. Benayas, D. Jaque, C. Jacinto, and A. A. Kaminskii: IEEE J. Quantum Electron. **46** (2010) 1870.
- 11) M. Tsunekane, T. Inohara, A. Ando, N. Kido, K. Kanehara, and T. Taira: IEEE J. Quantum Electron. **46** (2010) 277.
- 12) M. Tsunekane and T. Taira: CLEO/Europe 2009, CA. (2009) p. 30.