

次々世代超高速微細加工に向けたフェムト秒レーザーの 完全自動コヒーレント結合に関する研究

量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 先端レーザー科学研究グループ
グループリーダー 桐山 博光
(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019226-B3)

キーワード：フェムト秒レーザー，コヒーレント結合，微細加工

1. 研究の目的と背景

これまでのレーザーパワー拡大の原動力は大口径増幅器の開発であった。レーザー損傷を避けるために、パワー増大に応じて増幅器口径は大きくなり、核融合研究用レーザーでは40 cm角にも達する¹⁾。これ以上の大口径化は、レーザー媒質内の寄生発振等によりレーザー増幅効率が低下するため、この最も単純で確実な技術は限界にきている。従って、レーザーパワーを桁違いに高く、且つ、小型装置において極限まで高めるには、既往の技術の延長線上にないパラダイムの転換が求められる。

ビーム数に比例した出力を生むコヒーレントビーム結合は1960年以来、夢のレーザー技術であるが、ビーム径拡大によるパワー増大は限界に達しつつある現状を踏まえ、いよいよこの結合法によるハイパワーレーザー開発に本格的に取り組む時期が来たと言える。

本研究では、技術的に未開拓な時間空間分割された高出力レーザーの受動コヒーレント結合の実証を行い、現状のペタワット ($PW=10^{15}$ W) 級²⁾を超える極限的レーザー出力を実現できる基盤技術を確立する。

これまで各研究機関においてコヒーレントビーム結合が研究されてきたが、レーザー増幅媒質が小口径のファイバーに限られ^{3,4)}、且つ空間的にビームを分割するだけであるため、パワースケーリングが難しい。また、空間的に分割した複数のビームのレーザーの光路長、即ち、位相を揃えるための高精度・高速能動制御が必要なため、高繰り返しレーザー発振が前提でシングルショット等の高エネルギー・低繰り返しレーザーや干渉性の低い高ピークパワー・極短パルスレーザーには不向きであり、この手法の適応は限定的なものであった。また、各ビーム光路を能動的に超精密に合わせたとしても、各ビーム波面は同じにならない。そのため、波面合成後も時間空間強度変調の影響は残留し、ビーム結合効率の大きな低下をもたらす。

この問題を解決するため、本研究では各ビームの波面、即ち位相が受動的に一致するコヒーレント結合系を開発する。入力レーザー光を時間空間的に分割することにより、各ビーム出力を低減させる。時間的にも分割することで従来に比して劇的なパワースケーリングが可能となる。更に、分割ビームは各々の固体レーザー増幅器を用いることにより、光学損傷無しに驚異的なパワー増幅を得た後に1ビームに結合され、極高パワーレーザーを発生させること

ができる。現在、1-10 PW出力が寄生発振のため限界であるが、本光学系で、各分割パルスを10 PW出力まで増幅・結合することで、寄生発振の制限を超えたエキサワット ($EW=10^{18}$ W) パワーを実現できる。

超高強度レーザー開発において、結晶や回折格子等光学素子の製造可能な大きさの技術的制限、光学系のレーザー損傷や寄生発振からの物理的制限があり、大口径化による飛躍的なパワー増大は限界域に達している。今回提案する技術は、現状の出力を飛躍的に高めうる可能性を秘めている。

2. 研究・実験方法

2.1 研究方法の概要

本研究の特徴的な点は、時間的空間的にレーザービームを巧みに分割し、それら複数のビームが同じ光路を伝搬するように工夫するとともに、固体レーザー増幅器で大幅に出力を増幅させることである(図1)。

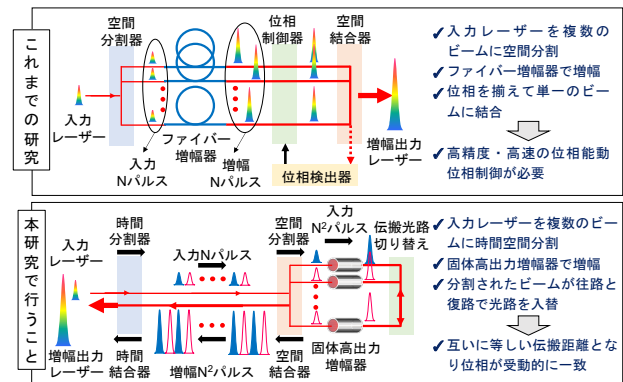


図1 本研究の概念的な説明

これまでの研究では、図2に示すように入力レーザーパルスを空間的に偏光ビームスプリッター (PBS) で2つのパルスに分割し、マッハツェンダー干渉計に配置されたファイバーレーザー増幅器により増幅する。その後、位相検出部から位相制御部にフィードバックを行うことにより、各レーザーパルスの光路長、即ち位相を精密に揃えて結合する方法が用いられてきた。この従来法では、ファイバーレーザーは小口径であり、空間的に分割するだけであるため、高エネルギー動作に不向きでパワースケーリングが難しい。

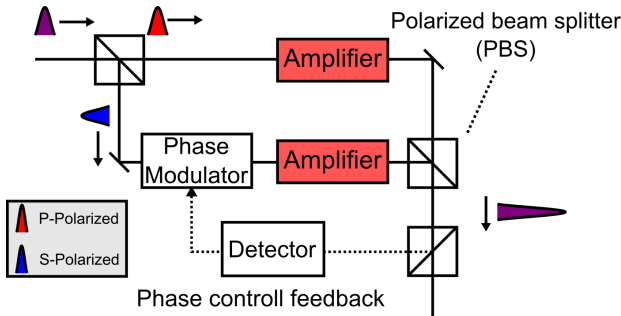


図2 位相能動整合コヒーレントビーム結合

本研究では、位相受動整合コヒーレントビーム結合のためにサニャック干渉計を用いる(図3)。PBSより分けられたP偏光とS偏光のビームをそれぞれ増幅後、ふたたびPBSにより合波される。それぞれのレーザーパルスが同じ光路を通ることになるため、位相が自動的に一致する。そのため位相制御装置が不要となり、位相能動整合では不可能な低い繰り返し周波数のレーザーにも適用できる。

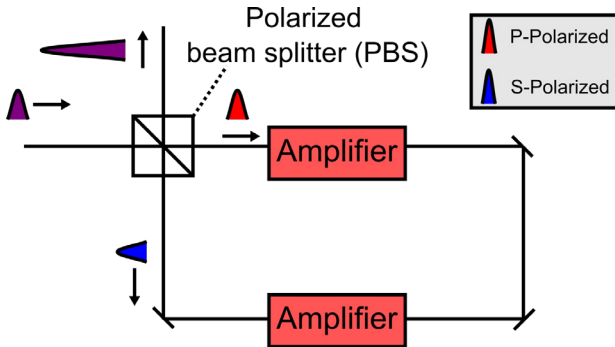


図3 位相受動整合コヒーレントビーム結合

2・2 実験系の概要

本研究では、PBSとミラーから構成されるサニャック干渉計2つを用いてビームを4分割する完全受動コヒーレント結合を行う。実験系の構成を図4に示す。レーザーパルスは図面左上から下に向かって入射した後、1/2波長板によってP偏光となり、2枚のミラーを用いてアパーチャーA1、A3を結ぶ光路を伝搬する。この光路をメインラインと定義する。この直線光路を実験系の調整基準とする。レーザーパルスはA1透過後PBSを通過し1/2波長板によって偏光が45°回転させられる。この偏光状態の操作によって1つ目のサニャック干渉計でレーザーパルスは2パルスに等分される。S偏光のパルスはM3、M4によって反射した後メインラインへと戻る。メインラインへのパルスの復帰はM3、M4の角度を光がアパーチャーA2、A3を通るように調整することで担保される。復帰の後、S偏光のパルスはP偏光のパルスよりも長い光路長を伝搬しているため2つのレーザーパルスの時間位置にずれが生じ、レーザーパルスの時間的な分割が可能となる。

2つのレーザーパルスの偏光をファラデーローテータで90°、波長板で45°、それぞれ同じ方向に回転させた

後、2つ目のサニャック干渉計に入射する。ここで用いたファラデーローテータはファラデー効果で45°、内蔵する旋光子で45°させるものである。この時2つのレーザーパルスはそれぞれP偏光成分とS偏光成分を等しくもっているために2つ目のサニャック干渉計で等分され、合計で4つのレーザーパルスが干渉計内を伝搬することとなる。2つ目のサニャック干渉計で空間的に分割された各レーザーパルスは、干渉計内を右回り、左回りの2つのパルスは共に1/2波長板で90°偏光を回転させる。これによって再びPBSに入射した際にパルスが4つから2つへと結合するだけでなく、それぞれ光学系を戻るように伝搬することとなる。2つ目の干渉計透過後、ファラデーローテータを通過する光は偏光角が変化しない。これはファラデーローテータ内での偏光操作が打ち消されるためである。そのため、1つ目の干渉計に入射する時は往路とは90度ずれた偏光状態であることになる。そのため往路で時間位置が先行していたパルスに時間遅延が加わり、2パルス間の時間遅延が補償され時間的に結合し単一パルスが生成される。便宜上、2つのサニャック干渉計のうち、時間的な分割を担うものを1stサニャック、空間的な分割を担うものを2ndサニャックと呼ぶこととする。

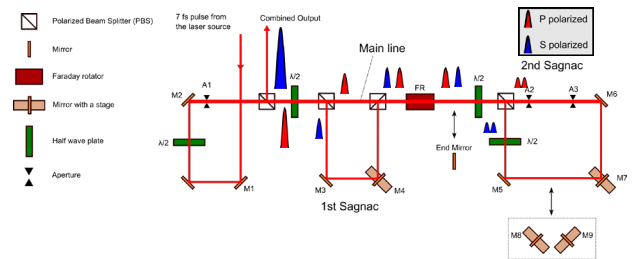


図4 デュアルサニャック干渉計を用いた位相受動整合コヒーレント結合光学系

図5に本研究でCBC固体レーザー増幅の実証に用いた多重パス光学系の概略図を示す。

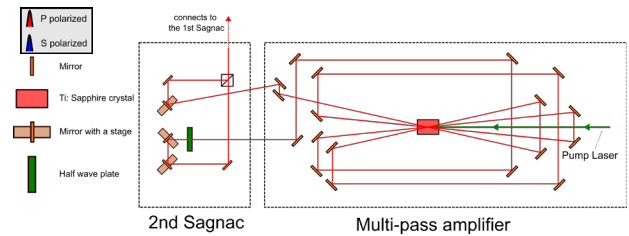


図5 多重パス増幅器

この増幅光学系では前段のデュアルサニャック光学系で4分割したパルスをそれぞれ4回ずつ、励起されたチタンサファイア結晶に入射させることによって増幅を行う。2ndサニャック干渉計とは図4右下のフリップミラー(M8、M9)を用いることで接続できる。

励起レーザーには、波長532nm、パルス幅0.3ns、繰

り返し周波数 10 Hz の Nd:YAG レーザーを用いた。フォトニック結晶ファイバーを用いて、チタンサファイアレーザー発振器の出力光から中心波長 1064 nm を含むスーパーコンティニウム光を生成する。これをファイバーアンプで増幅し、ポッケルスセルとビームスプリッタを用いることで 80 MHz から 10 Hz へと分周した後、Nd:YAG 固体増幅器で増幅する。次に LBO 結晶を用いて波長を 532 nm へと変換することで上記の励起用レーザーパルスを発生させた。本研究ではこの励起レーザーを結晶の片側から入射させる、片面励起での増幅実験を行った。レーザー増幅の媒質には直径 20 mm、結晶厚 15 mm、吸収効率 92.3% の GT ADVANCED 製チタンサファイア結晶を用いた。結晶に入射する 4 つのパスは結晶に対して 2.5°、5° のいずれかの角度で入射するよう設計されている。

本研究で用いる光学系は伝播に伴うビーム系の拡大を抑制するためにレンズ対を用いた像転送光学系を組み込んでいる。2対4枚の焦点距離 2000 mm の平凸シングレットレンズを多重パス増幅器の光学系に組み込み 18 m の距離の伝搬によるビーム径拡大を抑制した。

3. 研究・実験方法

3・1 結合効率とビームプロファイルの測定

結合効率を評価するため、図 6 のような光学系を用いて結合効率 $\eta_c = P_{\text{combined}} / (P_{\text{combined}} + P_{\text{uncombined}})$ を定義する。

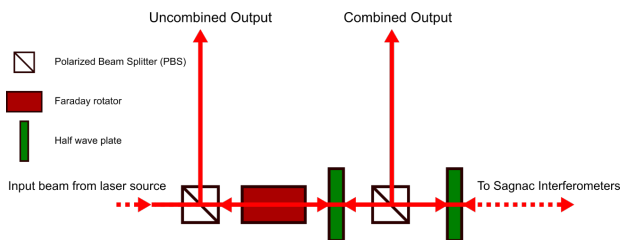


図 6 結合効率計測光学系

ここで P_{combined} は結合出力光強度、 $P_{\text{uncombined}}$ は非結合光強度を指す。素子の持つ旋光角波長依存性や不十分な調整等が原因で設計通りに結合しなかったレーザーパルスは結合したレーザーパルスとは異なる偏光角を持つ。これらは出力光を取り出す PBS を直進し、非結合出力を取り出す PBS から出力される。これは上図のように CBC 光学系の上流にファラデーアイソレータを導入することで評価できる。ファラデーローテータと 1/2 波長板の偏光回転方向を入力光に対してそれぞれ相殺し合うように調整することで、出力光のみ偏光角を 90° 回転させる作りが可能である。図 7 に CBC 光学系を多重パス光学系に接続した時の結合出力、非結合出力のスペクトル比較を示す。2つのスペクトルを波長 734.4~877.0 nm の範囲で積分し結合効率の計算を行ったところ 94 % の値が得られた。

この結合効率 η_c による光学系の動作評価はコヒーレント結合の先行研究でも行われている。F. Guichard らに

よるファイバーアンプを用いたパルス幅 300 fs、エネルギー 1.1 mJ の出力を得る 2 分割受動コヒーレント結合では $\eta_c \approx 94\%$ である⁵⁾。また、L. Daniault らによる時間的に 4 分割、空間的に 2 分割の計 8 分割の受動コヒーレント結合を用いたファイバーアンプによる 200 fs、200 nJ の増幅を行った研究では $\eta_c \approx 96\%$ を達成している⁶⁾。本研究はそれらよりも調整が困難になる固体レーザーでの時空間 4 分割コヒーレント結合でありながら先行研究とほぼ同じ値が得られており、我々はコヒーレント結合が本実験系で十分動作していると判断した。

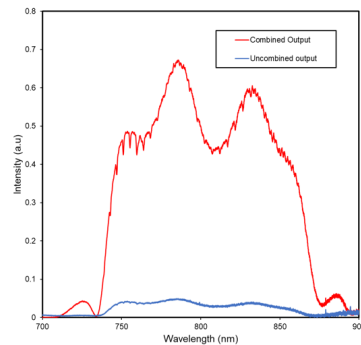


図 7 結合光と非結合光におけるスペクトルの比較

図 8 に多重パス増幅器に接続したデュアルサニャック干渉計光学系の入出力ビームプロファイルを示す。良好なシングルビーム出力を確認した。

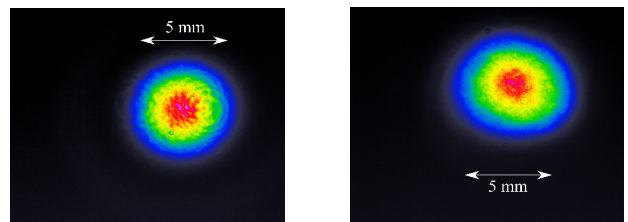


図 8 光学系入射 (a) と出射 (b) ビームプロファイル

3・2 分割パルス増幅動作の評価

図 9 に励起エネルギーに対する増幅利得特性を示す。ここでは、オシロスコープとフォトダイオードで増幅前後のレーザーパルス列のピークを比較することで増幅利得を評価した。得られた利得の最大値は 29 であった。実線は Frantz-Nodvik の式⁷⁾で求めた理論特性曲線であり、測定された利得は概ね理論値と一致している。ここから、別々に増幅された 4 つのパルスがそれぞれエネルギーを大きく失うことなく再結合しており、これは分割を行わずに同エネルギーの単一パルスを増幅した場合と得られる利得が遜色ないと判断できる。原理実証を目的とした小型増幅器により、分割フェムト秒極短パルスを増幅・再結合することに成功し、理論限界の増幅利得を実現した。この結果より、我々の提案するコヒーレント結合法が増幅フェムト秒レーザー光に対して有効な手法であることが示された。

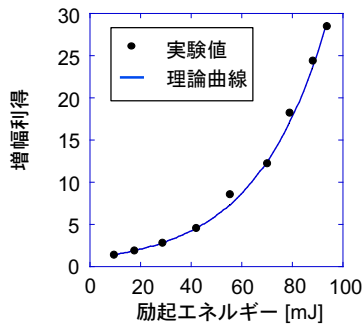


図9 励起エネルギーに対する増幅利得特性

3・3 テラワット級出力の実現性

本研究において、新たに考案したコヒーレント結合系を用いて、増幅フェムト秒レーザーパルスの受動コヒーレント結合に初めて成功した。この成功を受けて、本光学系にCPA (Chirped-Pulse Amplification)⁹⁾を併用することで、コヒーレント結合で得られている最先端領域のギガワット (=GW=10⁹ W) 出力よりも3桁高い、未踏のテラワット (=TW=10¹² W) 出力の実現が可能であると考えられる。図10にTW出力を想定した受動コヒーレントビーム結合光学系の概略図を示す。

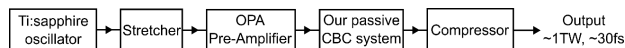


図10 TW級受動コヒーレント結合システムのブロック図

ここでは、OPA出力を~4mJとし、提案するCBC光学系内で4つのパルス(各パルス~1mJ)に分割され、CBC光学系内に配置されたディスク型チタンサファイアレーザー増幅器で増幅する。励起レーザー(532nm)は直径5mm、出力400mJとし、チタンサファイアレーザー媒質を各面1J/cm²で励起するものとする(両面で2J/cm²)。4つのパルスに対して、2つずつパルスを同時に対向して4回パスさせることで先の2パルスと後の2パルスのエネルギーを一致させ結合効率が向上するように設計する。この場合、出力エネルギーは、34、34、18.5、18.5mJとなり、出力は~100mJとなる。非線形効果がない場合(B積分値¹⁰⁾がゼロの場合)、最初の2パルスと次の2パルスが理想的な直線変更に戻る。ただし、これらの直線偏光は振幅が違うので理想的な方位の直線変更に戻らないが、理想的な方位からのズレを考慮に入れると~96%の結合効率が期待できる。非線形効果をできるだけ低減するためにビーム径と出力を最適化することで、非線形効果による結合効率の低下を数%まで低減できることが計算より予測されている。加えて、増幅スペクトル幅やパルス圧縮器のスループットを考慮すると、TW(30mJ/30fs)出力が期待できる。

4. まとめ

次々世代超高速微細加工に向けたフェムト秒レーザー

の完全自動コヒーレント結合光学系を考案した。すなわち、全ての分割レーザーが同じ光路を伝搬でき、位相ズレをゼロとできる(自動で空間破面整合できる)光学系を提案した。本手法は固体増幅器を用いることができるので、大口径化が容易でハイパワー化で期待できる。多次元(時空間)分割による高いパワースケーリングが可能で、原理的に位相ズレがゼロとできるのでフェムト秒極短パルスレーザーの高効率結合が期待できる。本光学系に対して、3次元波動光学解析による理論限界の結合効率を得るための調整方法を確立するとともに、像転送光学系を組み込んだレーザー増幅器の整備と増幅利得評価を行った。これらにより、時空間分割増幅フェムト秒レーザーパルスの受動コヒーレント結合をに世界で初めて成功した。

謝辞

本研究は、量子科学研究開発機構の宮坂泰弘主任研究員、笹尾一主幹技術員、鈴木健治氏、田上学氏、岡本征洋氏、有泉高志氏、同志社大学の戸田裕之教授、鈴木将之教授、渡邊謙斗氏、水野遥介氏、小田哲秀氏、赤井仁氏、上野雄平氏、仲井紀香女史、高津憩氏、勝常也氏の協力があって初めて可能となったものである。これらの関係者各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) N. C. Danson, C. Haefner, J. Bromage, T. Butcher, F. C. J. Chanteloup, A. E. Chowdhury, A. Galvanauskas, A. L. Gizzi, J. Hein, I. D. Hillier, W. N. Hopps, Y. Kato, A. E. Khazanov, R. Kodama, G. Korn, R. Li, Y. Li, J. Limpert, J. Ma, H. C. Nam, D. Neely, D. Papadopoulos, R. R. Penman, L. Qian, J. J. Rocca, A. A. Shaykin, W. C. Siders, C. Spindloe, S. Szatmari, M. G. M. R. Trines, J. Zhu, P. Zhu, and D. J. Zuegel, High Power Laser Sci. Eng. 7, e54 (2019).
- 2) H. Kiriya, A. S. Pirozhkov, M. Nishiuchi, Y. Fukuda, K. Ogura, A. Sagisaka, Y. Miyasaka, M. Mori, H. Sakaki, N. P. Dover, Ko. Kondo, J. K. Koga, T. ZH. Esirkepov, M. Kando, and Ki Kondo, Opt. Lett. 43, 2595 (2018).
- 3) M. Hanna, F. Guichard, Y. Zaouter, D. N Papadopoulos, F. Druon and P. Georges, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 49, 062004 (2016).
- 4) H. Fathi, M. Närhi and R. Gumenyuk, Photonics 8, 566 (2021).
- 5) F. Guichard, Y. Zaouter, M. Hanna, K. Mai, F. Morin, C. Hönninger, E. Mottay, and P. Georges, Opt. Lett., Vol. 40, 89 (2015).
- 6) L. Daniault, M. Hanna, D. N. Papadopoulos, Y. Zaouter, E. Mottay, and F. Druon, Opt. Express, 20, 21627 (2012).
- 7) L. M. Frantz and J. S. Nodvik, J. Appl. Phys. 34, 2346 (1963).

- 8) H. Kiriya, M. Mori, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, A. Sagisaka, A. Kon, T. Z. Esirkepov, Y. Hayashi, H. Kotaki, M. Kanasaki, H. Sakaki, Y. Fukuda, J. Koga, M. Nishiuchi, M. Kando, S. V. Bulanov, K. Kondo, P. R. Bolton, O. Slezak, D. Vojna, M. Sawicka-Chyla, V. Jambunathan, A. Lucianetti, and T. Mocek, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 21, 1601118 (2015).
- 9) D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.* 56, 219 (1985).
- 10) A. E. Siegman: *Lasers*, 386 (1990).