

Fiber Laser Development for Dielectric Laser Accelerator

Yosuke Matsumura ^{A)}, Mitsuhiro Yoshida ^{B)}, Zhou Xiangyu ^{B)},
Kazuyoshi Koyama ^{A)}, Aimidula Aimierding ^{A)}, Mitsuru Uesaka ^{A)}

^{A)} Department of Nuclear Engineering and Management School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-city, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We are aiming for developing a compact micro-diameter electron beam accelerator, which accelerate electrons by light from fiber lasers. To realize this compact accelerator, the output stability and the phase control will be necessary. In this research, we are making a ultra-short pulse fiber laser for Ti:Sapphire TW laser amplifier, aiming at the realization of the compact micro-diameter electron beam accelerator as a final goal. We succeeded in getting ultra-short pulses (central wavelength: 1060 nm, pulse duration: 860 fs, repetition rate: 60 MHz, average output: 6.9 W) from Yb fiber laser oscillator and Yb fiber laser amplifier. And, supercontinuum light was generated by highly nonlinear fiber. Its wavelength ranges from 920 nm to 1190 nm.

レーザー誘電体加速に向けたファイバーレーザーの開発

1. 背景

本研究室では直径マイクロサイズ電子ビーム小型加速器の開発を目指している。この小型加速器はレーザー誘電体加速によって電子を加速する。レーザー光の電場による加速では、数 100MV/m の加速電場が可能となり^[1]、加速管長が数 mm 程度とできる。これによって取り出された電子ビームは直径マイクロサイズであり、生物の細胞ごとに照射することが可能となる^[2]。これにより生物の放射線被ばくに関する基礎的メカニズムの解明が期待できる。既にマイクロサイズの電子ビームは大型の加速器から加速された電子ビームを数 μm の穴の開いた板に通すことにより得られている。しかし、実験室規模に収まる装置でマイクロサイズの電子ビームを実現することは、放射線生物などの分野に大きなブレークスルーをもたらす可能性を持っている。本研究室ではレーザー誘電体加速の実現に向け、誘電体内の電場分布の計算を行い、電子加速に最適な加速管のパラメーターおよび加速に必要なレーザーのエネル

ギーを求めている^[6]。

このレーザー誘電体加速器にはレーザーの出力の安定化と位相制御が重要な技術となる。そのため誘電体加速用レーザーにはファイバーレーザーの採用が検討されている。本研究では、誘電体加速用ファイバーレーザーを最終目標に開発している。現在は再生増幅器まで視野に含めて、チタン・サファイア TW レーザー増幅器用超短パルスファイバーレーザーの開発を行っている。表 1 に誘電体加速用のレーザー^[3]と本研究で製作目標とするチタン・サファイア TW レーザー共振器の仕様をまとめた。誘電体加速用レーザーは 1MeV の電子加速に必要なパラメーターであり、片側からの入射レーザー光を 5 つに分割した際のものを記してある。誘電体加速用レーザーはチタン・サファイアレーザーの共振器と比較して高出力およびその安定性が要求される。さらに、電子の加速に合わせてレーザー光を入射しなければならないため、レーザー光の位相制御において高い精度も必要となってくる。

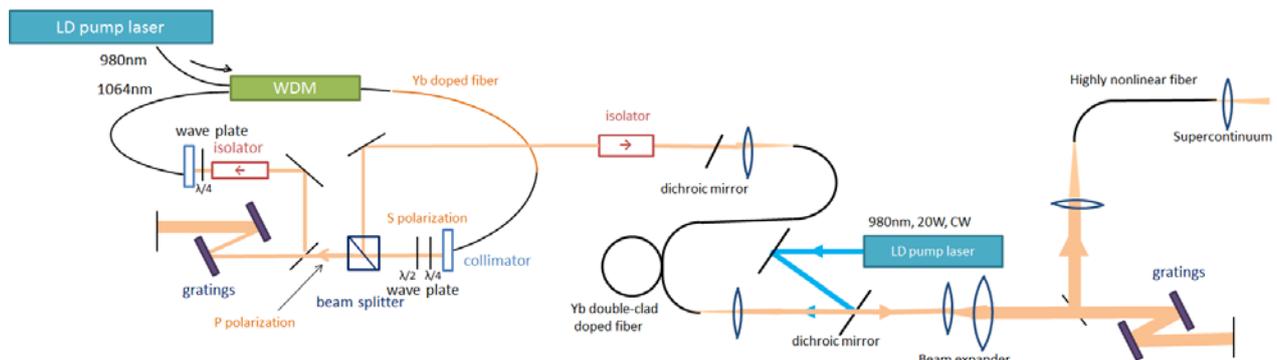


図 1: 製作した Yb ファイバーレーザーの模式図。

表 1：誘電体加速用レーザーとチタン・サファイアレーザーの共振器の仕様

	Laser for Dielectric Acc.	Oscillator for Ti:Sapphire laser
Central Wavelength	1000 nm	790 nm
Pulse Duration	400 fs	30 fs
Bandwidth	-	52 nm
Pulse Energy	0.38 mJ/fiber	>5.3 nJ
Average Power	-	>400 mW
Repetition Rate	-	76MHz

2. ファイバーレーザーの製作と結果

ファイバーレーザーには主に利得媒質として Er と Yb がしばしば用いられている。Er は通信用レーザーとして使用されているが、本研究では高出力化が容易な Yb^[4]を使用した。Yb の発振波長が 1060nm 付近である。一方、チタン・サファイアの中心発振波長は 800nm である。よって、チタン・サファイア増幅用レーザーとして使用するために波長変換を行い、波長を 800nm に近づける必要がある。本研究では波長変換を非線形フォトニッククリスタルファイバー(Highly Nonlinear photonic crystal Fiber: HNF)によるスーパーコンティニューム(SuperContinuum: SC)光で波長変換を行っている。SC 光の帯域は非常に広く、超短パルスの生成に使用されている^[5]。製作したファイバーレーザーは共振器・増幅器・SC 光の発生装置であり、装置の模式図を図 1 に示す。

2.1 Yb ファイバーレーザー共振器

ファイバーからパルスが出射された後の $\lambda/4$ 波長板と $\lambda/2$ 波長板、ポラライザビームスプリッターによって非線形偏波回転モードロックをかけた。分散補償はポラライザビームスプリッター後の回折格子対によって行っている。使用したファイバーは Yb 添加ファイバーが約 50cm、シングルモードファイバーが約 2m である。得られたパルスは、中心波長が 1060nm、スペクトル幅(FWHM)が 49nm、繰り返し周波数が 60MHz、平均出力が 95mW であった。

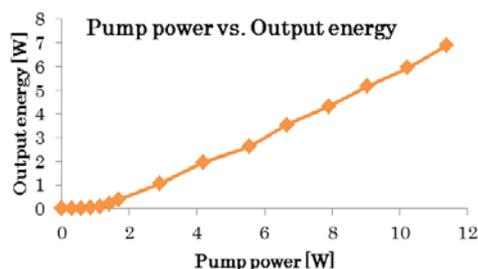


図 2: Yb ファイバーレーザー増幅器からの出力。

2.2 Yb ファイバーレーザー増幅器

共振器から得られたパルスは Yb ファイバーレーザー増幅器によって増幅された。増幅にはコア径 10 μ m の高濃度 Yb 添加偏波保持ファイバーを使用し、励起用レーザーは後方からファイバーへ入射した。励起光のエネルギーに対する出射光のエネルギーを図 2 に示す。得られたエネルギーは最大で 6.9W であった。

2.3 SC 光の発生

増幅器から得られたパルスは HNF 入射前に一旦回折格子対によって分散補償を行った。回折格子は反射型の物を使用した。増幅器からのパルスの出力が強すぎて、回折格子にコーティングされた金属が熱で変形しているようであった。そのため回折格子対の前にビームエキスパンダーを設置し、レーザーの断面積を大きくした。オートコリレーターの計測によると HNF 入射前のパルス幅は 860fs であった。使用した HNF の長さは初め 1m であったが、徐々にファイバーを切り詰め短くすることで、波長 900nm~1050nm の領域のスペクトルを平坦にした。現在の HNF の長さは約 55cm である。HNF によって発生させた SC 光のスペクトルを図 3 に示す。スペクトル波長が 920nm ぐらいから立ち上がり、1090nm ほどまで広がっている。得られた SC 光の出力はおよそ 70mW であった。

3. まとめと今後の課題

本研究で製作したファイバーレーザーを図 4 に示す。本研究における開発によってパルスの中心波長が 1060nm、繰り返し周波数が 60MHz、パルス幅が 860fs、最大 6.9W の平均出力のパルスが得られた。また、920nm ぐらいから立ち上がり 1090nm ほどまで広がったスペクトルを持つ SC 光が得られた。

繰り返し周波数を 76MHz に調整する必要があるが、ファイバーを切り詰めて共振器長を短くすることで実現可能である。Yb ファイバー増幅器後の平均出力ではチタン・サファイアレーザーの共振器に必要な出力を超えている。しかし、現在正確な原因は不明だが、増幅器の出力を上げて、SC 光の出力は 70mW しか得られていない。今後 1050nm 以上の波長成分をある程度カットしてスペクトル全体を平坦にしていく。その際パルスのエネルギーがさらに小さくなることを考えると、より大きな出力の SC 光を発生させることが必要となってくる。

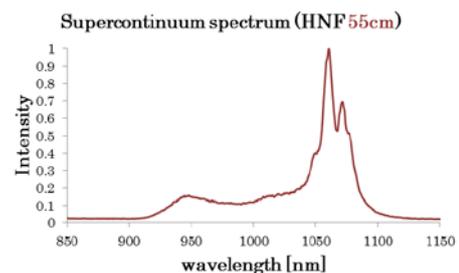


図 3: SC 光のスペクトル分布。

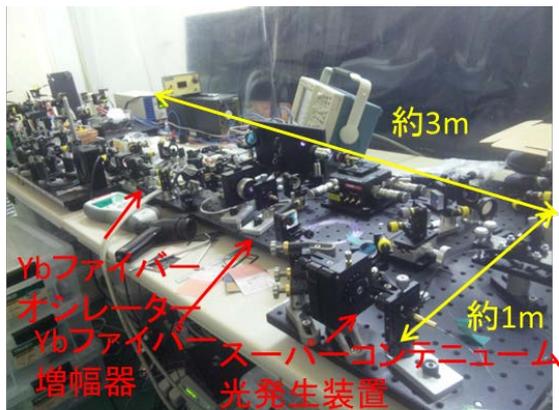


図4:製作したファイバーレーザー

また、現在発生させた SC 光を圧縮できるか確認するため、分散補償を行ってパルス幅の計測を進めている。SC 光の圧縮ができることを確認した後、光パラメトリック増幅 (Optical Parametric Amplification: OPA)によって SC 光の増幅を行う予定である。OPA は入射パルスの広い帯域を損なうことなく増幅できる利点を持っている。また、Ybファイバーレーザー共振器と増幅器との間にパルス

ストレッチャーと強度変調器を置いて、余分なパルスを省き、チャープする。これにより、Ybファイバーレーザー増幅器での増幅において、効率よく、余計な非線形効果を受けずにパルスの増幅が出来ると考えられる。

今後これらの課題を克服し、更にファイバーレーザーの開発を行うことでチタン・サファイア TW レーザー共振器として使用できるファイバーレーザーを製作し、さらにレーザー誘電体加速の実現に向けた開発を行ってゆく。

この研究の一部は、科研費基盤研究(C)24510120によって行われた。

参考文献

- [1] T. Plettner, et al, PRST-AB, 9, 111301(2006)
- [2] T. Funayama, et al., J. Rad. Res. 49(2008)71-82
- [3] K. Koyama, et al., 本 proceedings ス. FRLR16(大阪豊中, 2012).
- [4] J. Limpert, et al., Optics Express, 10,14(2002)628-638
- [5] G. Krauss, et al., Nat. Photonics, 4(2010)33-36
- [6] K. Koyama, et al., Proceedings of IPAC2012 (New Orleans), WEPPP019 , 2763 (2012)