

卓上マイクロビーム源のためのファイバーレーザーおよび電子源の研究 STUDY ON FIBER LASER AND ELECTRON BEAM SOURCE FOR TABLE-TOP MICRO BEAM SOURCE

岡元勇人 ^{*A)}、吉田光宏 ^{B)}、上坂充 ^{A)}、大槻祥平 ^{A)}、佐藤大輔 ^{C)}、
Hayato Okamoto ^{*A)}、Mitsuhiro Yoshida ^{B)}、Mitsuru Uesaka ^{A)}、Shohei Otsuki ^{A)}、Daisuke Sato ^{C)}

^{A)}The University of Tokyo

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization

^{C)}Tokyo Institute of Technology

Abstract

Most of radiobiology experiments are done in the limited conditions, such that machine time is limited and that the area is treated as radiation controlled area. Our laboratory is aiming for developing a table-top electron micro beam source for radiation biology, whose beam size is micrometer order so that we can irradiate just the nuclei of cells ($\sim 1\mu\text{m}$) and observe the behavior in real time. This beam source will be realized by dielectric laser accelerators (DLAs), which is expected to produce acceleration gradients of $\sim\text{GV/m}$. To drive these accelerators, femtosecond pulse laser ($\sim\text{GW}$) has to be incident to the structure. For this laser, we chose Ytterbium(Yb) laser, which has high quantum efficiency and high thermal conductivity, and is proper to produce ultra short pulse because it has wide range spectrum of oscillation band. We succeeded in getting ultra short pulse (central wavelength: 1030nm, average output: 10W, pulse width: 100fs, repetition rate: 84MHz) from Yb fiber laser system. Also in order to make electron beam source by making ultraviolet laser incident into photocathode, we then converted the obtained infrared laser (1030nm) to 258nm (4ω) using BBO and LBO non-linear crystals.

1. 序論

現在 X 線治療はがん治療の方法の一つとして使われているが、DNA 損傷の複雑なメカニズムは未だ体系的には明らかにはなっておらず研究途上である。これらの実験は巨大な施設で行われ、マシンタイムも夜に限られ、ビームのエネルギーレンジも限定されている。我々の研究室ではこれらの問題を解決するために、マイクロオーダーのビームを細胞の核に照射し、その応答をリアルタイムでモニタリングするシステムを開発し、放射線生物学への寄与を目指している^[1]。このためには小型の加速器と電子発生源が必要となるが、その加速器として誘電体加速 (DLA) を用いるつもりである。これは Fig 1 のように回折格子のような誘電体からなる構造体の両側から高エネルギーの超パルスレーザーを打ち込むことで、空洞内に加速電場が形成され電子が常に加速電場で加速されるようにした加速方法であり、加速器の小型化が見込める。DLA 加速では入射電子バンチと加速場が同期している必要があるため、電子銃と加速電場用入射レーザーは同期してあるか、もしくは同様のレーザーシステムを用いる必要がある。これを踏まえ今回は、DLA 加速のための小型高出力レーザー、及びそのフォトカソード電子源生成のための紫外レーザーの製作を行い、当研究室では卓上用マイクロビーム源実現を目指す (Fig 2)。

2. YB ファイバーレーザー製作

2.1 Yb ファイバーレーザーの特徴

上坂研では上記放射線生物学研究のためのレーザー開発に関して松村らによる先行研究がある^[2]。本研究ではその研究の改善・改良を行うとともにさらなる進歩を図った。

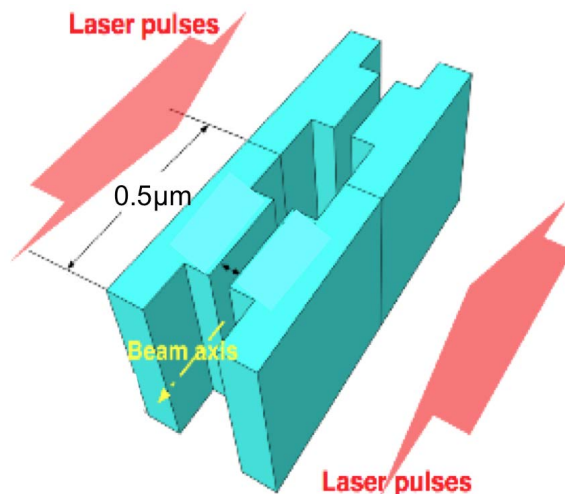


Figure 1: Schema of DLA accelerator.^[1]

卓上用マイクロビーム源のレーザーに求められている性能は、オペレーション面から見て、小型であること、メンテナンスが容易であること、安定であることなどが挙げられる。

ファイバーレーザーはその利得媒質をファイバーに添加させ、コア内にポンプ光を入射することで励起しシード光を増幅する。光路とあるファイバーは巻くことができるため空間を節約出来るだけでなく、表面積/体積率が他の媒体に比べて大きいため、熱除去も空冷で可能であり大きな冷却装置を必要とせず、小型化が可能であるため今回の用途に適している。また固体レーザーに比べ安定性も高く、メンテナンスの頻度も少なく済む特徴を持つ。しかし、コア径はおよそ直径数 μm 程度であり、レーザー光をファイバーに入射させるためにはレン

* hayato.okamoto@nuclear.jp

Table 1: Required Laser Spec for DLA and Photo Cathode

	for DLA(1MeV)	fiber laser target	for photo cathode
Central wavelength	1 μ m	1030nm	258nm
Pulse energy	0.1mJ	2 μ J	/
Peak power	500MW	20W	/
Pulse width (FWHM)	200fs	100fs	/
Repetition frequency	50kHz	10MHz	/
Average power	5W	20W	100mW

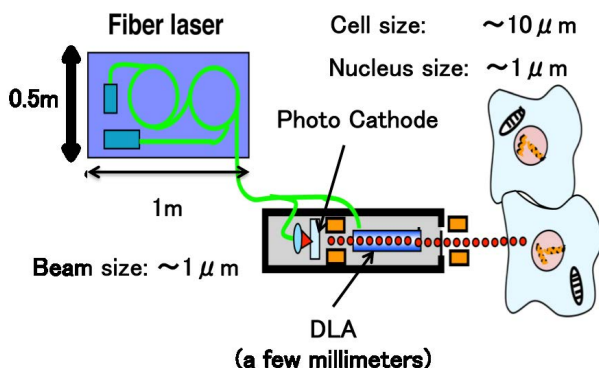


Figure 2: Schema of cell irradiation.

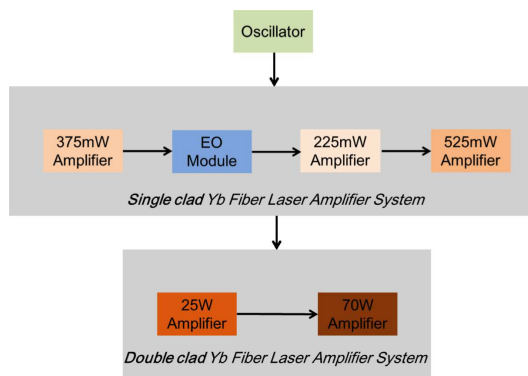


Figure 3: Outline of fiber laser system.

ズ等を用いて集光する必要があり、レーザー光の出力が大きくなると増幅は難しくなる。またファイバーの端面では入射角度の調整が難しく、集光率が悪いと端面がすぐ傷ついてしまうため、高出力には注意しなければならない。したがって本研究では松村らと同様に、超短パルス生成と初期の増幅はファイバーを用いて mJ レベルまで行い、その後の増幅は固体媒体で増幅を行う予定である。

ファイバーの利得媒質としてエルビウム (Er) やイットリウム (Yb) が挙げられる。Yb の特徴として

- 量子効率が良い
- 半導体レーザー (LD) 励起が可能
- 熱伝導率が良い

が挙げられる。したがって本レーザーに適していると判断し Yb を利得媒質として採用した。ファイバーレーザーの媒質を Yb 添加ファイバーとし、その後 Yb:YAG を用いて固体増幅を行う。

2.2 Yb ファイバーレーザーの製作

本研究でのファイバーレーザーの全体像を Fig 3 に載せる。始めに超短パルス生成のために非線形偏波回転モードロック (NPR) を用いた発振器を製作した。NPR を用いた超短パルス生成は、Yb 添加ファイバー長によって得られるスペクトルは変化する。今回は後の Yb:YAG 固体増幅が 1030nm 帯域に利得を持つため、1030nm を中心に発振するようにファイバー長を調整した。また全体の共振器長を調整することで繰り返し周波数を 84MHz に調整した。ここで得られた波形は Fig 4 の通りであり、

中心波長 1030nm、周波数 84MHz、パルスエネルギー 0.19nJ、平均出力 10mW の仕様が得られている。

続く増幅器では、5 段に分けて増幅することで自然放光 (ASE) の発生を抑えるように工夫した。ファイバーではその長さを調整することでレーザー媒質とシード光の相互作用長を変化させることができるが、一度に長くとり過ぎると ASE が増えてしまう。したがって ASE が増え、パルスが効率よく増幅されず尖頭出力が下がるのを防ぐために、段階的に増幅する方法をとった。増幅器によって入射エネルギーの 1000 倍である 10W 以上の連続出力を達成した。

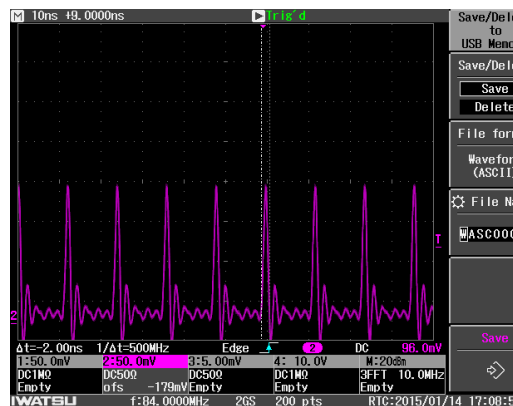


Figure 4: Signal from Yb fiber laser oscillator.

3. 波長変換

3.1 フォトカソード実験に求められる仕様

本レーザーシステムを用いたフォトカソードの実験では、LaB₆ に BaF₂ にスパッタリングして陰極にすることを想定している。LaB₆ の仕事関数は 2~3eV 程度 (=414~621nm) であり、このエネルギーを持つ波長である 4 倍波 (=258nm) の紫外領域に変換する必要がある。求めるスペックは Table1 の通りである。

3.2 セットアップと結果

まず LBO 結晶を用いて 2 倍波へ変換し (SHG)、さらに BBO 結晶を用いて 4 倍波への変換を行った。LBO 結晶では温度で位相整合を取り (170°)、BBO 結晶では入射角で位相整合をとっている。2 倍波の出力結果は Fig 5 の通りである。赤線が出力パワー、緑線がその変換効率を表している。2 倍波の変換は効率 6% を達成したが、4 倍波発生に至る出力を得ることは出来なかった。

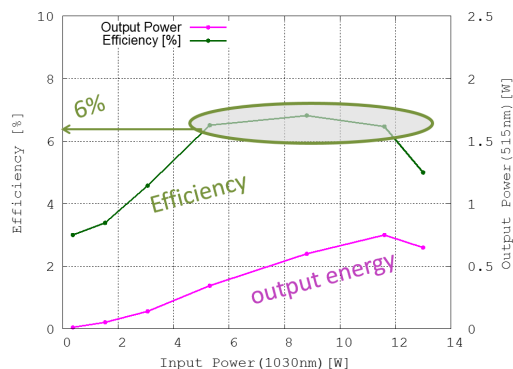


Figure 5: Result of the first SHG(2 ω).

4. 結論と今後の課題

4.1 結論

我々は、松村らによるレーザーの改良を図り卓上用マイクロビーム源のためのファイバーレーザー製作途中である。その途中段階として発振器の安定発振、増幅器において 10W 以上の連続出力を達成した (Table 2)。またこれを用いて紫外線への変換を試みたが、緑光への効率が 6% とあまり上がらず、紫外線の発生は確認されなかった。また今回増幅器で使用した Yb ダブルクラッドファイバーは実は 1060nm 帯域に利得を持つため、1030nm 帯域は増幅されないということがわかった (Fig 6)。したがって出力の多くは ASE であることが予想される。しかし目指すレーザーシステムの基盤を製作出来た。これまで製作したレーザーの外観は Fig 7 の通りである。

Table 2: Result and Target of Yb Fiber Laser System

	Result	Target
Central wavelength	1030nm	1030nm
Pulse energy	0.15 μ J	2 μ J
Repetition frequency	84MHz	10MHz
Average power	13W	20W

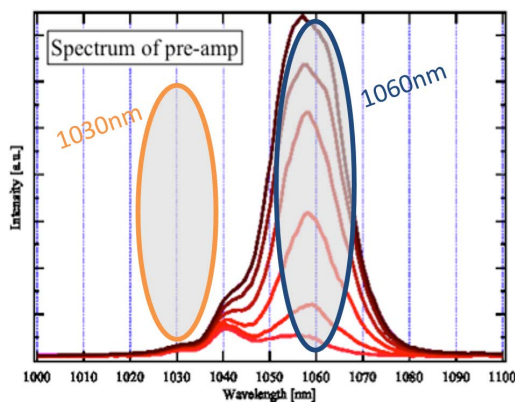


Figure 6: 1060nm amplification by Yb double clad fiber.^[4]

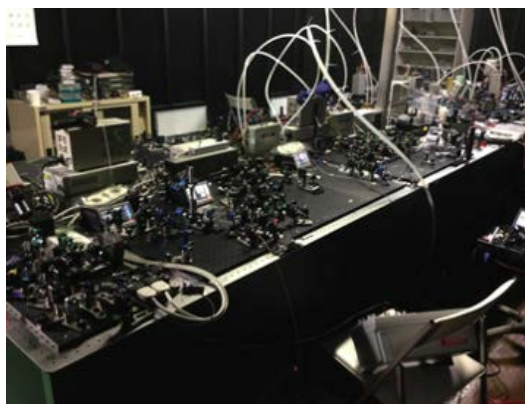


Figure 7: Photograph of Yb fiber laser system.

4.2 今後の課題

今回の波長変換で高効率で変換されなかったのは、前項の通りダブルクラッドファイバーの性質に起因するものだと判断した。したがって今後はこのファイバーをフォトニック結晶ファイバー (PCF) に取り替えて、増幅器を改善している最中である。フォトニック結晶ファイバーはフォトニック結晶の性質を持ったファイバーであり、1030nm 帯域での増幅と、ASE の抑制が図れる。また発振器においてもピエゾ素子を用いて発振の繰り返し周波数を 84MHz に同期し、別途繰り返し周波数の低減を行う予定である。今後これらの改善を踏まえた後、Yb:YAG を用いた固体増幅を行い、将来的に DLA の実験へ応用する予定である。

参考文献

- [1] Kazuyoshi Koyama, + et al., "Parameter study of a laser-driven dielectric accelerator for radiobiology research", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 47 (2014), 234005 (7pp).
- [2] Yosuke Matsumura, et al., "Fiber Laser Development for Dielectric Laser Accelerator", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012.
- [3] Shohei Otsuki, + et al., "Development on On-Chip Radiation Source Using Dielectric Laser Accelerator", Proceedings of IPAC2014, pp 1434-1436(2014).
- [4] Xiangyu Zhou, et al., "Fiber laser development of DAW RF gun for SuperKEKB(2)", FRLR13, 2011.