

DEVELOPMENT OF A HIGH AVERAGE POWER LASER GENERATING ELECTRON BEAM IN ILC FORMAT FOR KEK-STF*

M. Kuriki[†], H. Iijima, Hiroshima U., Higashi-hiroshima, Japan

H. Hayano, Y. Honda, H. Sugiyama, J. Urakawa, KEK, Tsukuba, Japan

G. Isoyama, S. Kashiwagi[‡], R. Kato, Osaka U., Suita, Japan

E.Katin, E. Khazanov, V.Lozhkarev, G.Luchinin, A.Poteomkin, IAP/RAS, Nizhny-novgorod, Russia

G.Shirkov, G. Trubnikov, JINR, Dubna, Russia

Abstract

Aim of Super-conducting Test Facility (STF) at KEK is demonstrating technologies for International Linear Collider(ILC). In STF, beam acceleration test is one of the most important goals, since precise RF control in the beam acceleration is essential for super-conducting accelerator. To provide ILC format beam for STF, we develop an electron source based on photo-cathode L-band RF gun. In this article, the laser system is described. The laser system consists from Yb fiber oscillator, macro-pulse profiler, Nd:YLF amplifier and Harmonic Generations. The laser system is initially developed at Institute for Applied Physics(IAP), Nizhny-Novgorod, Russia and moved to KEK-STF, Japan for the experiment. The laser system meets the basic ILC requirements; One macro-pulse contains 2439 micro pulses; The micro-pulse energy is $1.9\mu\text{J}$, which corresponds to 4.3nC assuming 1.0% quantum efficiency. We report the basic performance of the laser system.

KEK-STFにおける ILC 形式ビーム生成のための高平均出力レーザーの開発

1. ILC と STF

ILC は線形加速器による電子・陽電子衝突型加速器であり、超対称性粒子や Higgs 粒子の発見と研究等を目指した将来計画である。重心系エネルギーは 200-500GeV、将来的には 1.0TeV まで拡張可能とし、ルミノシティ $2.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指している^[1]。20 世紀末から各国の多くの研究所で同様の計画が推進されてきたが、ICFA(International Committee for Future Accelerator) は多くの計画を統合し、世界統一の計画として推進することを提唱した。加速技術の統一をはかるべく ITRP (International Technology Recommendation Panel)^[2] による評価を行い、その答申をもとに超電導加速による世界統一プロジェクト、ILC が発足した。

ILC はふたつの超電導線形加速器からなり、各々は 31.5MV/m の加速勾配で電子と陽電子を高エネルギーまで加速する。超電導加速器は 5Hz で運転され、その有効パルス長はおよそ 0.97ms である。このひとつの RF パルスで 2625 バンチが加速される。これをマクロパルスと呼ぶ。マクロパルスに対してバンチのことをマイクロパルスと呼ぶこともある。バンチ間隔は 369ns、2.71MHz 繰り返しである。これは超電導空洞の加速周波数 1.3GHz の 1/480 に相当する。ひとつのバンチは 3.2nC の電荷を持ち、マクロパルス内での平均ビーム電流は 8.7mA である。

STF の目的は ILC の超電導加速ユニットの実証である。超電導加速器ではビーム負荷と入力 RF が完全に平衡状態にしなければならないので、そのための RF 制御が課題であり、実際のビーム加速試験が不可欠である。ILC の電子ビームは 80% 以上のスピン偏極ビームであり、GaAs/GaAsP 歪み超格子が光電陰極として使用され

る^{[3][4]}。他方、STF ではスピン偏極は必ずしも必要ないので、光電陰極として CsTe^[5] を採用することとした。CsTe は量子効率の高さと比較的丈夫であることから現在ひろく使用されている。CsTe 陰極は 1.0% 程度の量子効率を一ヶ月以上という長期の運転期間にわたり維持することができる^[6]。

CsTe 光電陰極は光電効果による電子発生に紫外光を必要とする。STF においては相対値で 3% 以内という高い安定性が要求されるため、Yb fibre laser を発振器として使用することにした^[7]。Yb fibre laser の出力を Nd:YLF レーザーで増幅し、その四倍高調波を非線型結晶によって生成し、紫外光のパルス列をつくる。ILC で必要となる 3.2nC というビームバンチ電荷を作るには、量子効率 1% を仮定して $1.5\mu\text{J}$ というエネルギーがマイクロパルスあたりに必要となる。レーザーシステムの詳細については次節で述べる。

STF の電子銃は L-band の RF 電子銃である。RF 電子銃は FEL のための電子源として開発されたが、現在では様々な用途に広く使用されている^{[8][9]}。STF では超電導加速器と同期をとるために、DESY で FEL 用に開発された 1.3GHz L-band RF 電子銃^[10] を採用した。およそ 3.0MW の RF 入力で $E_0 = 40.0\text{MV/m}$ を発生する。本空洞は米国のフェルミ国立研究所 FNAL で製作されたものである。陰極には既述したように CsTe を使用している。CsTe カソードは脱着可能な Mo のプラグ上に別容器内で蒸着生成され、真空容器内を輸送機構により大気に暴露されることなく電子銃に装填される。

2. LASER SYSTEM

本節では STF 電子銃用のレーザーシステムについて説明する。本システムは大きくわけて四つの部分からなる。Yb fibre oscillator(Pico-Second Master Oscillator, PMO), Macro-Pulse Profiler (MPP), Nd:YLF amplifier(YLFA), そ

* Work supported by MEXT Quantum Beam Technology Program

[†] corresponding author:mkuriki@hiroshima-u.ac.jp

[‡] current address: Tohoku Univ., Sendai, Japan

して Harmonic Generators (HG) である。

PMOは受動モードロックレーザーであり、その繰り返し周波数は40.625 MHz、マイクロパルス長はおよそ10psである。PMOはYb fibre laserと共振器構造からなり、Yb fibre laserは100mWの半導体レーザーでポンプされている。共振器構造をなす鏡のうち一枚にはモードロックによるパルス列生成のためにSESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror) が使用されている。このSESAMは線形移動ステージ上に置かれており、モードロック周期のおおまかな調整に使われ、その調整幅は63kHzである。周期の微調整にはピエゾシリンダーが使用される。ピエゾシリンダーとはピエゾ素子への印加電圧によりファイバー光路長が変化する素子であり、これによる調整幅は600Hzである。PMOで発生したパルス列はファイバー出力カプラーにより取り出され、MPPへファイバー伝送される。PMOからの出力はマイクロパルスが40.625MHzで繰り返される準連続波であり、波長は1050nm、平均出力は2.0mW、マイクロパルスあたりのエネルギーは50pJである。PMO出力での安定度は数時間に0.5%程度で、PLL(Phase Lock Loop) をかけない状態での繰り返し周波数の安定度は120 Hz/hourである。現在PLLはまだ実装されていないが、この変動幅はピエゾシリンダーによる調整幅よりも小さく、PLLによる同期が可能である。PLLは今年中の実装を予定している。

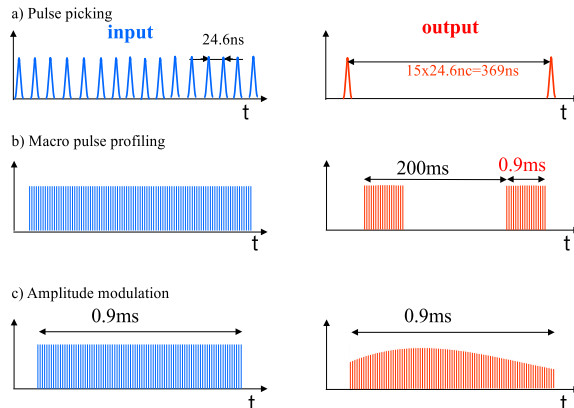


図1: MPP(Macro Pulse Profiler)の機能。(a) パルスの間引き、(b) マクロパルス形成、そして (c) 振幅変調。各々の図の左右がMPPの入力と出力を概念的に表している。

MPP(Macro Pulse Profiler)の機能を図1に概念的に示す。同図の(a)に示されているように機能の第一はマイクロパルスの繰り返しをPMOのそれである40.628MHzから、STFでのバンチ繰り返しである2.71MHzに変えることにある。第二の機能は同図の(b)で示されているように0.9msというマクロパルス構造をつくり出すことにある。PMOの出力は準連続パルスであるが、その一部を長さ0.9msで切り出すことでマクロパルス構造がつくり出される。そして第三の機能は同図の(c)で示されているように、マクロパルス構造内で振幅変調を行うことである。これは次段のYLFAにおいて生じてしまうマクロパルス内の振幅の変動をあらかじめ逆の変調をかけることにより抑制するためである。以上がMPPの

機能である。図1では説明のために各々の機能が別々に働くかのように説明しているが、実際にはMPPは一組のAO変調素子とドライバーからなり、一つの変調素子によりこの三つの機能を実現している。MPP出力でのマイクロパルスエネルギーは10nJ程度である。

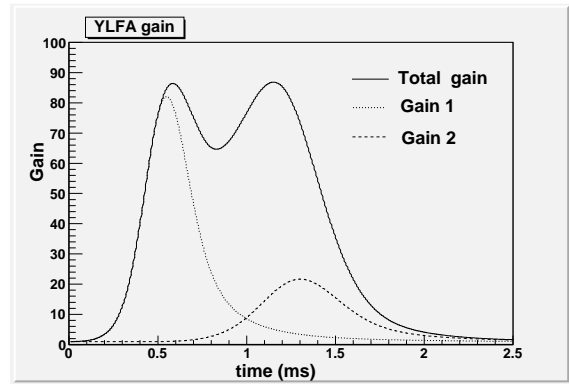


図2: 二つのNd:YLFの増幅率曲線。点線と破線が各々のアンプの増幅率をあらわしており、実線がその積である。設計値である30の増幅率が0.9msにわたり得られている。

YLFA (YLF Amplifiers)の役割は5Hzで繰り返される長さ0.9msという長いマクロパルスにわたり、均一な増幅率を行うことである。最終的に四倍高調波が必要とされるマイクロパルスエネルギーは1.5μJであるから、基本波から四倍波への変換効率を15%程度と仮定するとYLFA出力において~10μJ程度のマイクロパルスエネルギーを実現しなくてはならない。MPP出力が10nJ程度であるから、YLFAの増幅率は10³以上でなくてはならない。YLFAはフラッシュランプによりポンプされるNd:YLFレーザーを二台用いることとした。Nd:YLFの径は5mmで、IAP/RAS製作によるものである。十分な増幅率を得るために、この二台のNd:YLFレーザーを各々二回通過するようなtwo-pass配置とした。図2はYLFAの増幅率の時間依存性、すなわちマクロパルス内における変化をあらわしたものである。Nd:YLFの反転準位の寿命は500μsであり、マクロパルス長である0.9msよりも小さい。そのため反転準位の緩和による増幅率の減少がマクロパルス内において生じてしまい、均一な増幅が困難となる。その問題を解決するために、図2で示されているようにYLFAでは二台のアンプのタイミングとゲインを調整し、マクロパルスにわたる増幅率をなるべく一定とするようにした。これにより必要な増幅率である一段あたり30の増幅率を実現しているが、それでも増幅率は大きな変動が残っている。この残った変動を抑制するために前段のMPPにおいてマクロパルス全体にわたる振幅変調を行い、YLFA出力で平坦なマクロパルスが得られるように最適化を行っている。図3は観測されたマクロパルス全体の振幅を表している(四倍高調波)。Nd:YLFが持つ増幅率変動が抑制され、結果として均一なマクロパルスが得られていることがわかる。均一度はrmsで2.5%、マイクロパルスあたりのエネルギーは11μJ(基本波)である。

YLFAの出力は基本波である1050nmの赤外光であるから、CsTeでの光電効果による電子発生のためにUV光

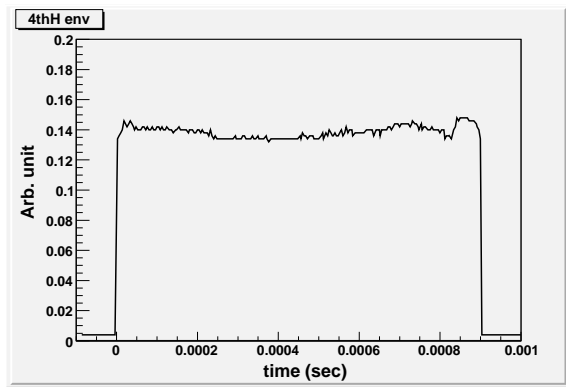


図3: 四倍高調波におけるマクロパルス全体の振幅を横軸に時間軸をとり表示したもの. 均一度は rms で 2.5% である.

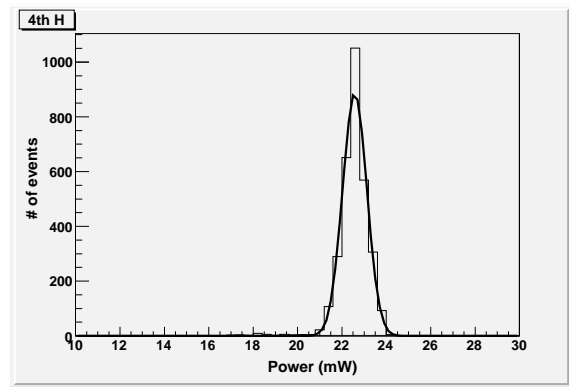


図5: 四倍高調波のパワーをプロットしたもの. 10 分間にわたり蓄積されたデータを用いており, 22.57 ± 0.54 (2.4%) の安定度を示している.

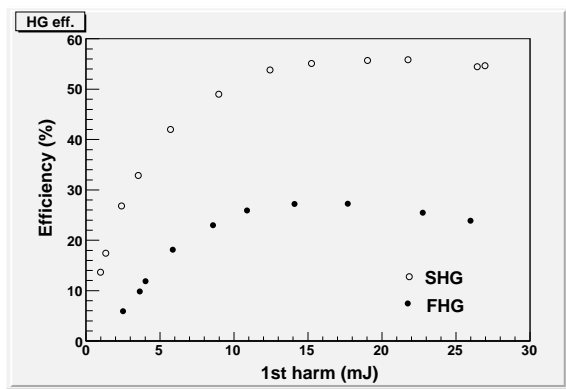


図4: 基本波から二倍波(白丸)と四倍波(黒丸) 各高調波への変換効率を%であらわしたもの. 横軸は基本波のマクロパルスエネルギーである.

に変換する必要がある. そのために非線型結晶による倍波生成を二段用いている. 様々な複屈折非線型結晶を比較した結果^[11], KTP を SHG(Second Harmonic Generation) に, BBO を FHG(Fourth Harmonic Generation) に使用することとした. 使用した KTP と BBO の結晶は各々厚み 7.5mm および 10. mm で, type II および type I の位相整合である. 図4は二倍波(白丸)および四倍波(黒丸)への変換効率を基本波のマクロパルスエネルギーの関数として表したものである. 全体の変換効率は最大で 30% 程度と予測されたが, 25% という近い値が実験的に得られた. この時の四倍波でのマイクロパルスエネルギーは $1.9 \mu\text{J}$ であり, STF で必要な $1.5 \mu\text{J}$ を上回る値が実現された. 図5は四倍波のパワーをヒストグラムであらわしたもので, 10 分間にわたるデータを蓄積したものである. これより 10 分程度の時間にわたり rms で 2.4% 程度の安定度を持っていることがわかる. パワーの安定度は 3% 以下が要求であるから, 短時間における安定度は要求を満たしていることが確認された. 基本波および二倍波について同様のデータを取得したところ, 各々の安定度は 1.3% および 2.8% であった. 二倍波のマイクロパルス長は 8.5ps であった.

本システムはグループによる仕様決定の後, 主にロシアのニジノブゴロドにあるロシア科学アカデミー応用

物理研究所 (IAP/RAS) において開発が進められた. 2009 年の 12 月に日本およびモスクワ-ドブナの原子核共同研究所 (JINR) の共同研究者立ち合いのもと基本性能の確認が行われ, 2010 年 3 月につくばの KEK-STF へと輸送され, STF トンネル内のレーザーハット内に設置された. KEK-STF においてもロシアで得られたものと同じ性能が再現されている.

3. まとめ

KEK-STF のために ILC 形式のビームを発生させるレーザーシステムが, IAP/RAS, JINR, KEK, 大阪大学そして広島大学の共同研究の成果として完成した. 開発されたシステムは STF 入射器用レーザーとしての要求基本性能を全て満たしていることが確認された. 現在, システムは外部と非同期であるが, PMO の信号と外部信号との位相差をもとにピエゾシリンダーをドライブすることで外部参照信号との同期をとることができる. この同期システムを今年中に実装することを予定している. STF は 2012 年にビームテストを予定しており, 本システムの開発がほぼ予定通りに進んでいることを報告する.

参考文献

- [1] Reference Design Report, ILC-Report-2007-1 (2007)
- [2] ITRP recommendation (2004)
- [3] T. Nishitani et al., J. Appl. Phys. 97, 094907 (2005)
- [4] T. Maruyama et al., Appl. Phys. Lett. 85, 2640(2004)
- [5] E. Chevallay, et al., NIM A 340, 146-156 (1994)
- [6] N. Terunuma et al., NIM A 613, 1-8 (2010)
- [7] J. Limpert, Encyclopaedia of laser phy. and tech. (2010)
- [8] S. Kashiwagi et al., NIM A 455, 36-46 (2000)
- [9] K. Hirano et al. NIM A 560, 233-239 (2006)
- [10] B. Dwersteg, et al., NIM A 393, 93-95 (1997)
- [11] E.A.Khazanov and A.K.Poteomkin, "Laser system project", an internal memo (unpublished)