

コンパクト ERL における中赤外自由電子レーザー運転のための入射器の最適化 INJECTOR OPTIMIZATION FOR THE IR-FEL OPERATION AT THE COMPACT ERL

田中織雅[#], 宮島司, 東直

Olga Tanaka [#], Tsukasa Miyajima, Nao Higashi

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

KEK's Compact (cERL) is a test accelerator for developing ERL technology and operating with high average beam current and high beam quality. The cERL consists of an injector using a photocathode electron gun, a superconducting accelerating cavity (main linac) for energy recovery, a recirculation loop, and a beam dump. As one of the industrial applications of cERL, the upgrade to cERL mid-infrared free electron laser (IR-FEL) was carried out, but new conditions required for FEL oscillation were imposed on the injector. The beam conditions of the injector required for FEL oscillation are to minimize the longitudinal RMS emittance for a beam with a bunch charge of 60 pC, and to have an RMS bunch length of 2 ps or less and a transverse RMS emittance of 3π mm mrad. The beam transport conditions from the electron gun to the main cavity were optimized using the particle tracking code GPT including the space charge effect. In this paper, we report on the strategies and results of injector optimization to improve the performance of cERL-FEL.

1. はじめに

KEK の Compact Energy Recovery Linac は、もともと ERL 技術を開発し、高い平均ビーム電流と高いビーム品質で運転するためのテスト用の加速器として構築された[1]。2017 年に高平均電流 FEL に向けたビーム運転を再開し、2017 年 3 月[2]と 2018 年 3 月[3]にビーム調整方法を開発するための高電荷パルスモード運転を行った。その後、2018 年 6 月に、平均電流 1mA およびエネルギー回収条件において CW 運転に成功した[4]。500kV 光陰極 DC 電子銃の安定した性能[5]により、この運転を 2 時間に亘って継続することができた。

2019 年に cERL IR-FEL プロジェクトが開始された。このプロジェクトは、高効率レーザー加工用の高出力中赤外レーザーの開発を目的としている[6]。2020 年 3 月に最初のアンジュレータがビームラインに設置された後、調整手順の開発とともに FEL 発振試験を開始した。cERL IR-FEL の建設は、COVID-19 にもかかわらず、2020 年 5 月に完了した[7]。2021 年 2 月と 3 月に 1 番目のアンジュレータ U1 のみがインストールされた状態での試験運転を行い、6 月に 2 番目のアンジュレータ U2 がインストールされた状態での FEL 発振試験を実施した[8]。これらの試験により、FEL 光製造の調整手順を開発した。cERL IR-FEL プロジェクトの結果、世界初の ERL ベースのシングルパス FEL を実現した(詳細は阪井寛志氏の発表[9]を参照)。

cERL IR-FEL におけるビーム条件の最適化では、まず主空洞出口 (Fig. 1 の A2 点を参照) において、FEL 発振に適した短バンチ長かつ低エミッタンスビームを生成するために、入射器の運転条件を最適化することが目的となる。FEL 運転では入射器のビームエネルギーは 5 MeV であり、主空洞で 17 MeV まで加速される。5 MeV の領域では空間電荷効果が支配的であり、電子銃から 17 MeV まで加速が完了する A2 点までの区間を一体と

して取り扱い、入射器を最適化している。次の段階では、A2 点からアンジュレータの入口 (Fig. 1 の U 点を参照) まで、ビームの性能を維持しながら輸送することが重要な課題となる。この区間では、アーク部においてバンチ圧縮を実施することと、エミッタンスを悪化させないことが重要となり、空間電荷効果だけでなく CSR の影響も取り入れる必要がある。また、A2 点においては、入射器と周回部で横方向の輸送条件を接続するために、入射ビームに対してオプティクスマッチングの条件が課される。

本研究は、IR-FEL 発振に向けた、入射器の最適化に関する研究である。入射器最適化の詳細と結果については、次のセクションで説明する。設計された入射部の性能と測定結果の比較およびその説明は、原稿の残りの部分に記載される。

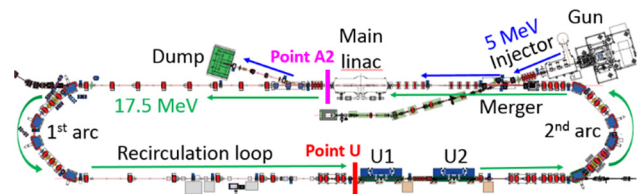


Figure 1: Layout of the cERL.

2. 入射器の最適化

はじめにで述べたように、FEL 光を生成するには、適切なビームをアンジュレータの出口に送る必要がある。アンジュレータ入口 (Fig. 1、U 点) でのビーム性能の要求は: 60 pC のバンチ電荷と 0.5 - 1 ps のバンチ長、0.1 % のエネルギー拡がり、および約 3π mm mrad の規格化 rms 横方向エミッタンスである。そして、主空洞出口 (A2 点) でのビーム性能の要求は: 60 pC のバンチ電荷、2 ps (rms) のバンチ長、0.1 % のエネルギー拡がり、および 3π mm mrad 未満の規格化 rms 横方向エミッタンスである。

[#] olga@post.kek.jp

2.1 電子銃電圧の影響

電子銃近傍では空間電荷効果が支配的なため、低エミッタンスかつ短バンチ長を実現するには、DC 電子銃の安定した高加速電圧印加が重要となる。残念ながら、2020 年 11 月の電子銃作業中にトラブルが発生し、電子銃が損傷を受けた。これらの対処を行った後に、電子銃のコンディショニングを実施したが、これまでビーム運転で使用してきた 500 kV での運転はできず、480 kV に加速電圧を下げて運転することになった。これまでの入射器最適化では 500 kV の電子銃電圧を仮定していたが、480 kV に下げたときに要求ビーム性能を達成することができるかどうかについて調査することになった。また、さらに電子銃の加速電圧が低下した場合を想定し、500 kV から 375 kV の範囲で、電子銃の加速電圧とビーム性能の関係についての調査を行った。これらの調査では電子銃の加速電圧毎に入射器の最適化を行い、バンチ長、横方向エミッタンス、縦方向エミッタンスの比較を行うことで、加速電圧の影響を評価した。

入射器の最適化は、多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA、[10]) を使用して General Particle Tracer (GPT、[11]) で行われた。この最適化では、主空洞の出口でバンチ長と横方向エミッタンスを同時に最小化するように設定した (Fig. 1)。電子銃の電圧を 25 kV ステップで 500 kV から 375 kV までスキャンしている。Figure 2 は、主空洞の出口での rms バンチ長と横方向エミッタンス (Fig. 2(a)) および rms バンチ長と縦方向エミッタンス (Fig. 2(b)) の最適化結果を示している。最適化結果より、450~500 kV の範囲の電子銃電圧では、ビーム性能に大きな変化が見られなかった。一方、425 kV 以下の電圧では、空間電荷効果がより強くなった影響により、短いバンチ長を維持できなくなっている。rms バンチ長についてのビーム要求性能は 2 ps 以下であり、480 kV の電圧ならばこの要求を満たせる。この結果より、FEL に向けたビーム運転では電子銃の加速電圧を 480 kV に決定した。

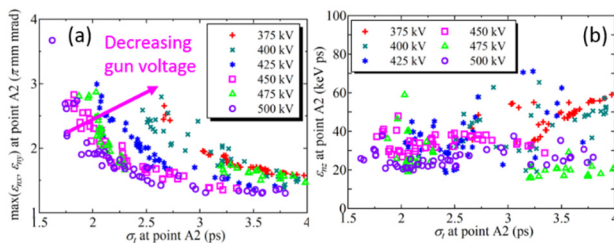


Figure 2: Gun voltage scan results at the exit of ML: (a) transverse emittance; (b) longitudinal emittance.

2.2 初期レーザー時間分布の影響

空間電荷効果が支配的なバンチ電荷では、光陰極に照射する励起レーザーの時間分布が、下流のビーム性能に与える影響が大きくなる。以前のビーム運転では FWHM 40 ps のガウス分布が使用されており、モデル計算でもこの分布を使用していた。今回の運転では、励起レーザーシステムを 81.25 MHz 繰り返しのシステムから、1.3 GHz 繰り返しのシステムに変更し、同時に時間方向分布もガウス分布をスタックしたフラット分布を使用することとなった。パルススタッキングを行った場合、調整条件によってはフラット分布の中央に凹みが生じる場合があ

る。これらのレーザー時間分布がビーム性能に与える影響を調査するために、40 ps FWHM ガウス分布、40 ps FWHM フラット分布、40 ps FWHM で 20% の凹みをもつフラット分布の 3 つについて、主空洞出口における位相空間分布の比較を行った。

この比較計算では、ガウス分布に対して最適化したビーム輸送条件を使用し、励起レーザー分布のみを変更し、その他の条件は同じとしている。フラット分布と 20 % 凹み付き分布の結果の違いはごくわずかであったので、ここではガウス分布とフラット分布の比較のみを行う。横方向位相空間分布を比較すると、ガウス分布ではビームコアの周りにいくつかの粒子が存在するが (Fig. 3 (a))、フラット分布ではコアから外れた粒子は少なく、位相空間の面積 (射影エミッタンス) が小さく見える (Fig. 3 (b))。これは時間方向分布がガウス分布の場合、バンチ中央とバンチ前後で電荷密度が大きく変化し、空間電荷効果によってスライス毎に位相空間上の傾きが変化し、エミッタンスが悪化する。一方、フラット分布の場合には時間方向に電荷密度が一定であり、空間電荷効果によるスライス毎の変化が小さく、横方向エミッタンスの悪化が小さく抑えられる。また、縦方向位相空間分布を比較すると (Fig. 3 (c) と (d))、ガウス分布では裾部分が長い、フラット分布では裾部分が短くなっていて、バンチ圧縮時に有利となる。裾部分を除くと、フラット分布の方が位相空間分布の湾曲 (縦方向エミッタンス) が大きく見えるが、これはガウス分布に対して縦方向エミッタンス (湾曲) を最小化するビーム輸送条件を使用しているからであり、フラット分布に対しても同様の最適化を行えば、分布の湾曲を小さくすることができる。以上の結果より、フラット分布が横方向、縦方向位相空間分布の両方に対して有利であることが確認された。

2.3 ビームパラメータの最小化

次に、入射器最適化の全体的な戦略について説明する。以前の入射器最適化では、バンチ長と横方向エミッタンスの同時最小化を行っていた [12]。アンジュレータまでのシミュレーションを実施した結果、横方向エミッタンスよりも縦方向エミッタンスを小さくした方が、アーク部においてよりバンチ圧縮を効率的に行うことができ、FEL 発振に向けて有利になることが明らかとなった。そこで、今回はバンチ長と縦方向を同時最小化する方針とした。横方向エミッタンスについては、 $3 \pi \text{ mm mrad}$ 以下とする拘束条件を課している。MOGA 最適化の拘束条件を Table 1 に示す。最初の 2 つの条件は、FEL 光生成の要求によって決まる。最後の 2 つの条件は、オブディックスマッチング用である。MOGA には 13 個の最適化パラメータがある。これらには、ソレノイド #1 の電流値 (ソレノイド #2 の電流値は通常ゼロである)、バンチャーの電圧、インジェクターキャビティの加速フィールド、インジェクターキャビティ #1 の位相オフセット、および選択された四極電磁石の K 値が含まれる。

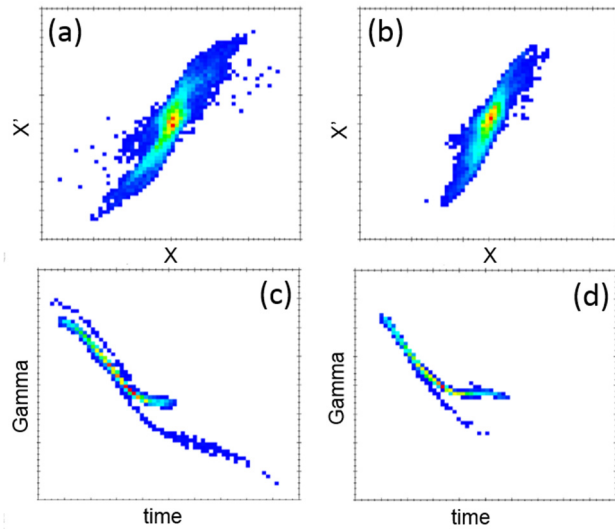


Figure 3: Comparison of the phase space at the exit of ML: XX' (a) and energy distribution (c) for single a Gaussian; XX' (b) and energy distribution (d) for a flat-top.

Table 1: Constrains of the MOGA Optimization

RMS bunch length	$< 1.8 \text{ ps}$
Transverse rms emittance	$< 2.4 \pi \text{ mm mrad}$
Betatron function	$\beta_x < 8.0 \text{ m}, \beta_y < 20.0 \text{ m}$
Hor. alpha function	$-2.0 < \alpha_x < 0.0$
Vert. alpha function	$-0.5 < \alpha_y < 0.5$

電子銃電圧 480kV でのバンチ長と縦方向エミッタンスの同時最小化の結果を Fig. 4 に示す。Figure 4 は、最適化された 50 個の入射器設定について計算した、A2 点におけるビーム性能(バンチ長、横方向エミッタンス、および縦方向エミッタンスの 3 つの値)を示す。Figure 4(b) に示すバンチ長対縦方向エミッタンスの図では、右肩下がりになっているが、これはバンチ長と縦方向エミッタンスを同時に最小化する最適化戦略によるものである。バンチ長に対するビーム性能要求は、2 ps 以下であり、今回の運転では最適な候補として、バンチ長の要求をみたしなおかつ縦方向エミッタンスの小さい 1.8 ps の青い四角でマークされた設定を選択した。

この最適化結果より、運転用の入射器のパラメータを決定した。電子銃の電圧は 480 kV、入射エネルギーは 5.1 MeV、バンチ電荷は 60 pC、レーザーの時間構造はフラット分布で、FWHM は 40 ps である。このとき、主空洞の出口における設計ビーム性能は、横方向エミッタンスが 1.74、1.92 $\pi \text{ mm mrad}$ 、縦方向のエミッタンスが 8.4 keV ps、横方向ビームサイズが 0.69、0.35 mm、バンチ長が 1.8 ps、およびエネルギー拡がりが 0.25 %となる。

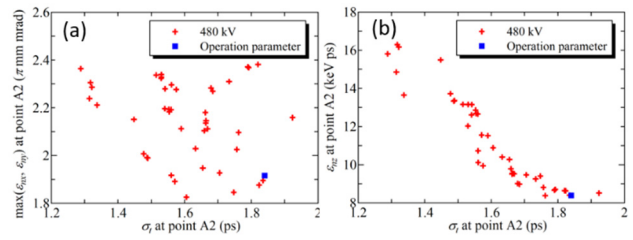


Figure 4: Optimization results at the ML exit: (a) transverse emittance; (b) longitudinal emittance.

3. 測定との比較

ビーム運転では、最適化した入射器設計条件に向けて調整を行った。調整方針としては、まず軌道調整と加速位相調整を単粒子の運動と近似できる条件で調整を行い、そのあとにバンチ電荷を上げて空間電荷効果を含めた調整を行うこととした。

まず、加速空洞の位相調整について紹介する。空間電荷効果なしで単一粒子の運動として近似可能な条件で調整するために、1 pC のバンチ電荷で調整を行った。バンチャーオフの条件で入射加速空洞の最大加速位相を探索したのちに、設計で定めた位相差を追加し、最後にエネルギーが設計値と一致するように加速電圧の微調整を行っている。そのあとに、バンチャーを立ち上げ、位相調整を行う。縦方向のダイナミクス(バンチャー位相に対するエネルギー応答)を測定することで、設計と測定の縦方向ダイナミクスを比較し、バンチャー位相を決める。ビームエネルギーは、合流部にあるスクリーンで測定された(Fig. 5 (a)を参照)。加速電圧と位相を微調整した後は、測定された応答は設計応答とほぼ一致していることが確認された(Fig. 5 (b)を参照)。

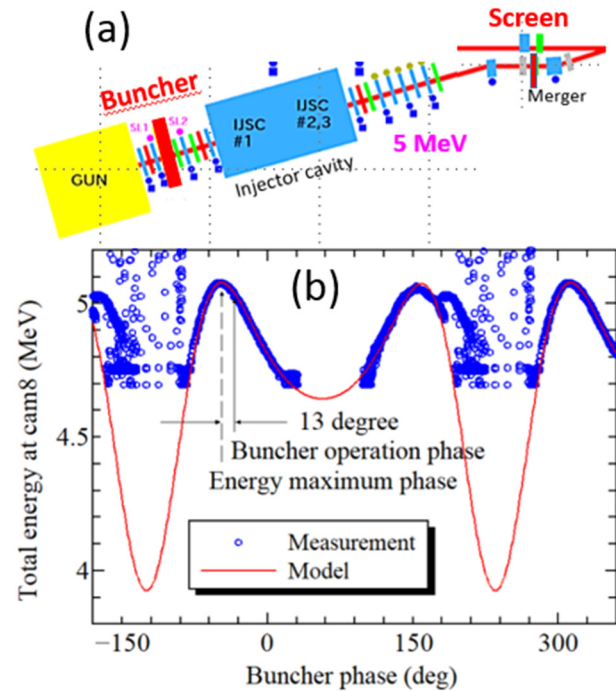


Figure 5: Buncher tuning: (a) injector layout; (b) buncher phase energy response.

次に、バンチ電荷を 60 pC に設定し、空間電荷効果を含めたオプティクスマッチングを行った。空間電荷効果は粒子分布に対して影響を与えるため、四極電磁石スキャンしたときのビームサイズの応答を測定することで評価を行っている。四極電磁石の調整により、ビームサイズ応答の差異は初期状態よりもはるかに小さくなった。各マッチングポイントで四極電磁石スキャン応答を補正した後、主空洞の出口まで入射部各スクリーンにおけるビームサイズを測定した (Fig. 6)。測定されたビームサイズは、入射部の出口 (Cam3) を除いて、設計ビームサイズとよく一致した。Cam3 のビームサイズは入射空洞の影響を強く受けるため、モデル計算にはカプラーの非線形な影響を取り込み再現性の向上を図っているが、まだ垂直ビームサイズの偏差が残っており、今後調査が必要である。この偏差はバンチ電荷が大きいときに生じるため、励起レーザーの時間構造を含む空間電荷効果による影響を調べる必要がある。これらは次の研究課題である。確認された最後のパラメータは主空洞出口 (A2 点) におけるエミッタンスである。エミッタンスは、主空洞出口に設置された四極電磁石スキャンによって測定された。設計値は $\varepsilon_{nx} = 1.74 \pi \text{ mm mrad}$ 、 $\varepsilon_{ny} = 1.92 \pi \text{ mmmrad}$ に対して、測定値は $\varepsilon_{nx} = 2.87 \pm 0.03 \pi \text{ mm mrad}$ および $\varepsilon_{ny} = 1.57 \pm 0.02 \pi \text{ mm mrad}$ であった。測定された垂直エミッタンスは設計値とよく一致していることが確認された。しかし、水平エミッタンスの違いは残っており、合流部における空間電荷効果やエミッタンス補償条件等の調査が必要である。

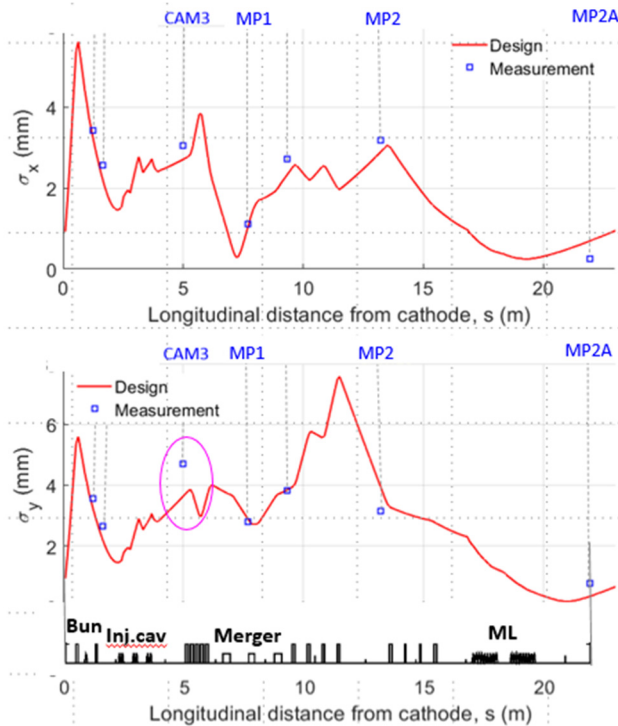


Figure 6: Designed and measured horizontal (top) and vertical (bottom) beam sizes after optics matching.

4. まとめ

cERL IR-FEL のビーム運転に向けて、入射器の最適化を行い、主空洞の出口で適切なビーム性能を達成す

ることができた。今回の運転における条件は、

- 電子銃の電圧 480 kV
- レーザーの初期時間分布 40 ps FWHM フラットトップ
- 主空洞クライオモジュールの出口でのバンチ長と縦方向エミッタンスの同時最小化

である。設計性能とビーム運転によって得られた測定結果を比較すると、横方向の運動はよく一致していることの確認が出来た。一方、周回部のアーク部で測定した縦方向の運動は、モデル計算からのずれが残っている。その原因を調べる研究を行っている[13]。ほぼ設計通りに入射部のビーム調整が出来たおかげで、2021 年 2~3 月に、最終的に 1 電子バンチあたり約 5.8 nJ の FEL パルスエネルギーを達成することができた[14]。

謝辞

本発表は、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の成果に基づいている。本研究の一部は科研費(18H03473)のサポートを受けている。

参考文献

- [1] M. Akemoto, D. Arakawa, S. Asaoka, E. Cenni, M. Egi, K. Enami, K. Endo, S. Fukuda, T. Furuya and K. Haga, et al. "Construction and commissioning of the compact energy recovery linac at KEK", Nucl. Instrum. Meth. A 877 (2018), 197-219 doi:10.1016/j.nima.2017.08.051
- [2] T. Miyajima, R. Hajima, K. Harada, Y. Honda, T. Hotei, E. Kako, R. Kato, T. Miura, R. Nagai and N. Nakamura, et al. "60 pC Bunch Charge Operation of the Compact ERL at KEK", doi:10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPVA019
- [3] T. Hotei, R. Kato, and T. Miyajima, "Evaluation of 60pC Beam Performance at cERL Injector for ERL Based EUV-FEL", in Proc. 29th Linear Accelerator Conf. (LINAC'18), Beijing, China, Sep. 2018, pp. 699-701. doi:10.18429/JACoW-LINAC2018-THPO009
- [4] T. Obina *et al.*, "1 mA Stable Energy Recovery Beam Operation with Small Beam Emittance", in Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia, May 2019, pp. 1482-1485. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPGW036
- [5] N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima and T. Uchiyama, "Operational experience of a 500 kV photoemission gun", Phys. Rev. Accel. Beams 22 (2019) no.5, 053402 doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.22.053402
- [6] H. Sakai, "Industrial Applications of cERL", presented at ERL'19, Berlin, Germany, Sep. 2019, paper MOCOZBS02, unpublished.
- [7] R.Kato *et al.*, "Development of mid-infrared free-electron laser based on cERL and its lasing experiment", presented at PASJ2020, Online, Sep. 2020, paper THOT07, unpublished.
- [8] K.Tsuchiya *et al.*, "Magnetic adjustment of the tandem undulators for the cERL-FEL", in Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2020), Online, Sep. 2020, pp. 850-852.
- [9] R. Kato *et al.*, "Construction of an Infrared FEL at the Compact ERL", presented at the 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21), Campinas, Brazil, May 2021, paper TUPAB099.
- [10] B. van der Geer and M. de Loos, "Multi-objective Genetic Optimization with the General Particle Tracer (GPT) Code", doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPJE076

PASJ2021 THOB03

- [11] General Particle Tracer; <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [12] O. Tanaka *et al.*, “High bunch charge injector operation of cERL for infrared free electron laser test”, in Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019), Kyoto, Japan, Jul. - Aug. 2019, pp. 1086–1090.
- [13] O. Tanaka *et al.*, TUP023, these proceedings.
- [14] H. Sakai *et al.*, MOPOA04, these proceedings.