

FEL ビームのための補償光学システム

橋本英子^{1, A)}、藤岡 一雅^{A)}、村上 琢哉^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、
佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、佐藤 和男^{B)}、
中澤 裕之^{A)}、横山 和枝^{A)}、菅野 浩一^{A)}、境 武志^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、猪川 弘康^{A)}、中村 吉宏^{A)}

^{A)} 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274 -8501 千葉県船橋市習志野台 7- 24 -1 日本大学理工学部船橋校舎

^{B)} 日本大学原子力研究所

〒274 -8501 千葉県船橋市習志野台 7- 24 -1 日本大学理工学部船橋校舎

概要

FEL を平行ビームとして装置室より各実験室まで光の偏光性や干渉性をたもったまま導光するため、FEL のビーム径を一定にする光学系を設計した。光学的収差を考慮し、軸対称非球面を用いて、ミラーの条件などを考慮し、出力光の品質維持と、光の減衰を防ぐビーム輸送システムになっている。また、計算機から理論値を求めシミュレーションした。

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設では、2001 年 5 月に自由電子レーザー (FEL) 発振に成功した。当施設では光利用実験に使えるよう安定レーザーの開発に取り組んでいる。また、この光源を使って、理学、工学、医学の学術分野を包含する多彩な利用研究の成果が期待されている。出力光の品質を維持し、光の減衰を少なくして、収差による像の歪み、ぼけを小さくする方法について考察する。そこで、高分解結像に適した非球面レンズについて述べる。光学系で用いられる非球面は特殊な例を除き、軸対称回転非球面である。軸対称非球面の場合、面頂 (光軸との交点) の近傍では球面とみなされ、近軸領域での光線の屈折、反射は、球面の場合と変わらない。球面との差異が生ずるのは、近軸領域外であり、この差異を利用して収差補正を行うのが非球面の目的である。

2. 原理

2.1 軸対称非球面

軸対称な非球面の表示は、対称軸を光軸とし、光軸を含む面の切口の曲線 (子午面内の曲線) を用いればよい。一般的な表示としては、2 次曲線をベースにこれに非球面を付加した式がある。

2.2 一般的な表示

軸対称回転非球面は、 z 面から曲面上の点 A までの距離を ρ として次式に示される。

$$z = a_1 \rho^2 + a_2 \rho^4 + \dots + a_m \rho^{2m} \quad (1)$$

$$\rho^2 = x^2 + y^2 \quad (2)$$

2.3 回転 2 次曲面

回転 2 次曲面は、次の式で表される。

$$z = c \frac{\rho^2}{1 + \sqrt{1 - Kc\rho^2}} \quad (3)$$

c は曲率、 K は $K = \frac{b^2}{a^2}$ 主軸が $(2a, 2b)$ 中心が $(a, 0)$

K は回転楕円面の時 $K > 0$ 、回転放物面の時 $K = 0$ となる。

2.4 2 次曲面を基本にした非球面

回転二次曲面をベースにし、高次の非球面量を付加すると

$$z = c \frac{\rho^2}{1 + \sqrt{1 - Kc^2\rho^2}} + a^2 \rho^4 + \dots + a_m \rho^{2m} \quad (4)$$

これは、回転非球面を表している。上式の第 1 項は回転 2 次曲面 (楕円面、放物面) を表し、第 2 項以下は高次非球面を表す。これらの 2 曲面を用いた反射鏡は、球面レンズとは異なり、共役点では近軸光線以外でも無収差となっているのが特徴である。

2.5 ミラー設計条件

良質な集光に必要な条件は、物点から像点までの光路差の絶対値が、波長の 1/4 以下であること、つまり、アッペの正弦条件を満足することである。これは、1 点から出た光が、異なる光路を経た後、像面で光の位相が互いに強めあう条件としている。光軸に垂直な物体面上の物点の結像が光路によって変わらないことが条件で、物点から光学系を見込む角を α' としたとき

¹ E-mail: 82wani82@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = \text{const} \quad (5)$$

を満足することがもう1つの条件である^[1]。

2.6 反射光学系

反射光学系では、タイプの異なるレンズを組み合わせ、個々の収差を相殺する工夫がなされている。我々は、一つの焦点を共有する回転放物面と回転楕円面を組み合わせた。これらのミラーは、2方向同時に集光する場合に用いる。楕円面の一方の焦点を物点として出たビームは、最初に楕円面で反射し、共有焦点を実物点として放物面に入射し、他の焦点で、ビームを集光する。この経路は、反射面のどこに入射しても一定の距離になる。このミラーの組み合わせだと収差がきわめて少なく、理論的には数 nm の分解能が期待できる^[2]。

3. ビーム輸送

図1にレーザー発生装置の配置図、図2にレーザービームラインとレーザー発生装置から実験室までのレーザー照射実験室の照射装置を示す。アンジュレーター(U)から出力されたFELは、平面ミラーで、反射させ、図3に示すような平行化装置(BE)内の回転楕円ミラー、回転放物ミラーによって平行ビームに整形された後、輸送部、光配装置を通して増築棟の各実験室に導光される。ただし、ACCは加速器、BDはビームダンプを表す。

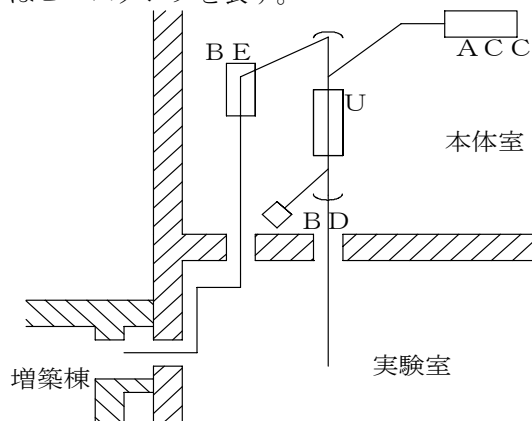


図1：実験室の配置図

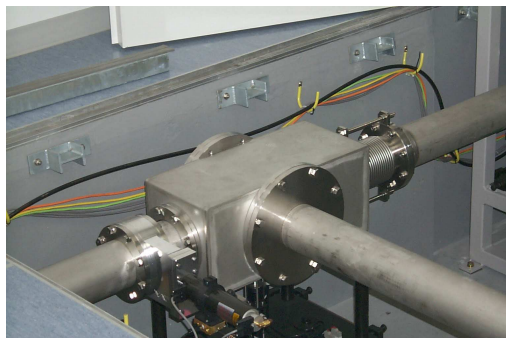


図2-1：レーザービームラインの分岐点



図2-2：医用レーザー照射装置

4. 平行化装置

FELの光共振器(反射鏡M0)に0.5mmΦの穴を開けて、これを光源とし、21cm離れたところに平面鏡M1を置き、光源を楕円反射鏡M2の焦点からの光路に仮想的に一致させ、M2の他の焦点にフォーカスさせる。M2の焦点を放物面鏡M3の焦点と一致させ、焦点を通った光はM3の面で平行光線になり、平面鏡M4で、光共振器の光軸と平行になるように偏向される。この平行光軸と光共振器の光軸とは建物の制約から155.0cm離れていなければならない。M2、M3は半固定で、光軸合わせは主にM1とM4とで行う。したがって、M2とM4の光軸は遠隔操作にする。特にM1とM4は移動軸とθ、Φの3軸が最低必要となる。M2の調整は非常に微妙で一度固定したら動かさない。M2とM3の距離を少し変えることでM3からの像の大きさが変わる。

5. シミュレーション

計算機で数値計算を使ってこれらの条件を満たす数値を求めた。最終ビームの直径は3.0cmφに設定されていることと、コンパクトな装置が要求されている観点から表1のdata1が、最適値となる。図4にこのdata1のシミュレーションの結果を示す。data2とdata3は、最終ビームの直径が3.0cmφ以上になってしまった。

表 1 : 数値計算の結果

| | data1 | data2 | data3 |
|--------------|--------|--------|--------|
| 楕円の長軸(cm) | 125 | 150 | 80 |
| 楕円の短軸(cm) | 85 | 100 | 55 |
| 放物線の定数 | 0.0056 | 0.0056 | 0.0067 |
| M1 の傾き(rad) | 2.18 | 1.88 | 2.18 |
| M4 の傾き(rad) | 0.52 | 0.19 | 0.52 |
| ホールの直径(mm) | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| 波長(mm) | 0.005 | 0.003 | 0.005 |
| 最終ビームの直径(cm) | 2.94 | 3.14 | 3.97 |
| 発散角(rad) | 0.005 | 0.005 | 0.0083 |

し口でのビーム径の測定を行う。FELの出口におけるビーム径と平行化装置を通った後のビーム径などを測り、平行化されたビームがシミュレーション通りの径変化をしているかどうか測定し、中距離輸送後にその径を維持できているか、また、その間の変化について検証する。次に、ビーム出力の測定などが挙げられる。ビームの性能、中距離輸送によるビームの質の変形があるかどうか考察する。そして、これらの実験を通して、FEL平行化装置と、ビーム輸送に関する総合的な評価をおこなう。

参考文献

- [1] 大柳宏之 “シンクロトロン放射光の基礎”
- [2] 波岡武、山下広順共編 “X線結像光学”

6. 今後の課題

装置を設置する、シミュレーションの結果を考慮して平行化、レーザー照射共同実験室でビーム取出

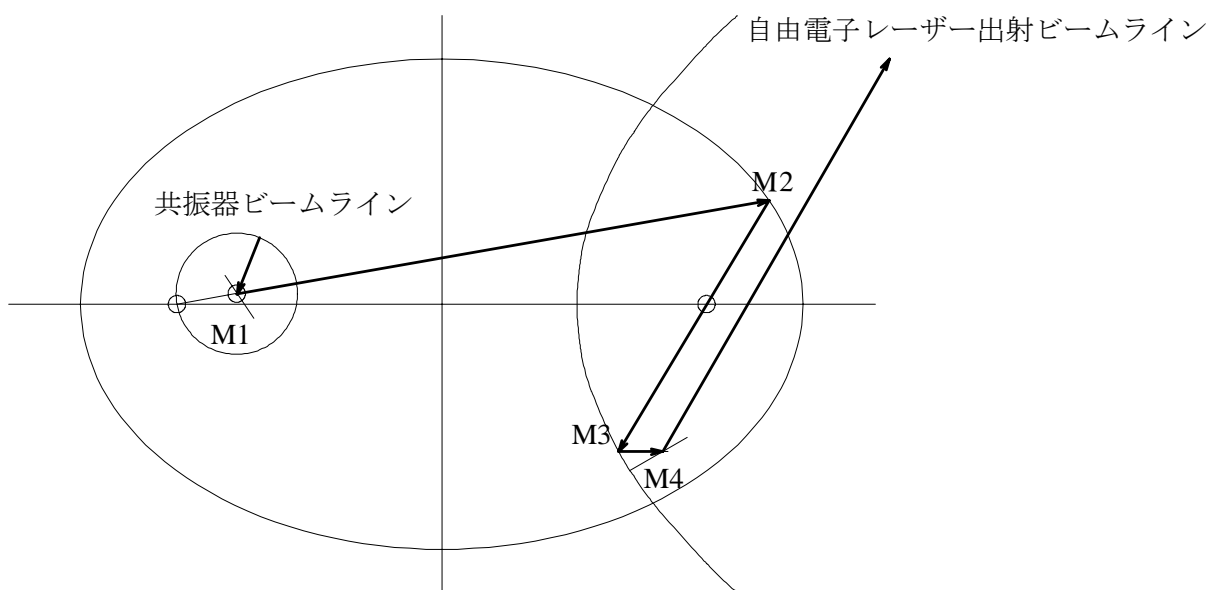


図 3 : data1 のシミュレーションの結果