

ERL-FEL をベースにした大強度 EUV 光源開発の検討

河田 洋

高エネルギー加速器研究機構・先端加速器推進部・ERL 計画推進室

1. はじめに

半導体リソグラフィーの微細加工に関して更なる微細加工を求めるためには、多層膜ミラーをベースにした縮小光学系による転写方式の EUV 光源 (波長 13.5 nm) が有力候補であるということは周知の事実であろう。一方、その光源に関してレーザープラズマ光源が有力視されて長年開発され、一部実用化にまで至っているものの、更なる大強度の光源の実現には、更なる飛躍が求められているように理解している。そのような中に、近年、日本国内では SACLA を代表とするように加速器を用いた自由電子レーザー (FEL) 光源が現実のものとして稼働を開始し、EUV 光源に関しても、FEL 光源を用いて 10kW クラスの光源開発の可能性が世界的に注目されてきている¹⁾。

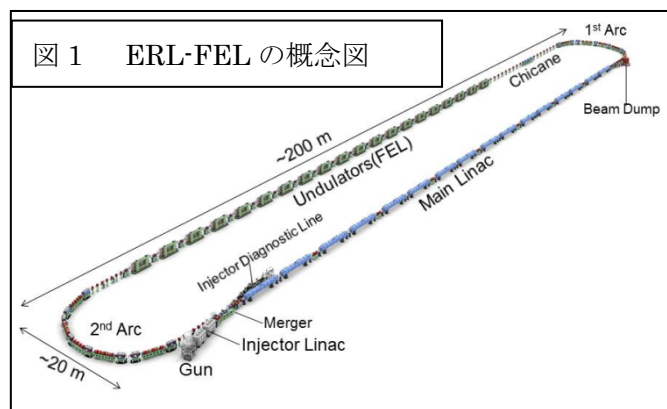
実は、このような大強度光源の可能性の指摘は JAEA の羽島氏をはじめとして、約 10 年前に既に行われていたが、加速器技術の大規模化もあり、近年に至るまで盛り上がりはなかった。しかし、近年、加速器技術の根幹となる FEL 技術とエネルギー回収型ライナック (ERL) 技術向上から、その可能性の再検討が期待されて来ている。その ERL-FEL をベースにした大強度 EUV 光源開発の検討を KEK, JAEA, そして国内の総合電機メーカーの研究者を中心に進めているが、その検討状況に関して本講演で述べる。

2. 大強度 EUV 光源の概要

10kW クラスの EUV 光源を FEL で取り出すためには ERL-FEL の加速器構造をとることが必須である。図 1 に ERL-FEL の概念図を示す²⁾。

ERL は高輝度電子銃から取り出した電子を超伝導・前段加速空洞で約 10MeV まで加速し、その後、1.3 GHz で共振している超伝導・主加速空洞で約 800MeV まで加速する。この電子ビームは 162, 5MHz の連続的な繰り返し (CW) であるため、ライナックではあるが、約 10mA の平均大電流運転が可能である。この電子ビームを周回部で電子バンチを圧縮 (約 40 フェムト秒) し、バンチにおける電流密度を上げることによってその次に用意されている長尺アンジュレーターによって FEL 発振を可能とする。上記の条件で FEL 発振の強度を見積もると、十分に 13.5nm 波長の FEL で 10kW 出力が期待される。発振した後の電子ビームは、次の周回部でバンチ圧縮を解いて (約 1 ピコ秒)、再び超伝導空洞に導かれる。今度は、この超伝導空洞に減速モードのタイミングで電子ビームが導入させる。その結果、電子ビームのエネルギーは空洞内の電磁波の形で回収され、回収されたエネルギーは次の電子ビーム加速に使用される。最終的に 10MeV まで減速されビームダンプに導入され、ビームダンプのエネルギーは、約 100kW であり、このパワーは十分に安全に電子ビームをダンプすることが出来る。

さて、近年 FEL 技術は十分にその実力を実証し、基本的にその技術的な課題は解決されて



いるといってよいであろう。しかし、現在稼働している FEL 光源は常伝導の加速器によるもので、そのため繰り返しは 100Hz 程度のパルス運転に限定されている。そのために、たとえ FEL 光源としても繰り返しは少なくその平均パワーは数 W 程度である。ドイツの DESY で稼働している超伝導ライナックをベースにした FEL はロングパルス運転を行っており、1kW 程度の EUV 光源となり得るが、まだ半導体産業が求める 10kW には及ばない。また、エネルギー回収をしない場合にも、10mA、800MeV の超伝導加速器を用いて FEL 発振は可能であるが、その電子ビームをダンプする際に 8MW のパワーを捨てることとなり、現実的には不可能である。以上のように、大強度の EUV 光源を実現するには、ERL-FEL の加速器構造を用いることは必須であることが判る。

一方、ERL 技術に関しては、KEK では次世代放射光光源開発の立場から、ERL 計画の検討が開始され、2006 年から「ERL 計画推進室」を立ち上げて具体的な加速器開発を進めてきている。その加速器技術を確認すべく、コンパクト ERL(cERL)の試験加速器を建設し、2013 年度末に加速エネルギー 20MeV でのエネルギー回収運転に成功している³⁾。図 2 は cERL の内部の写真である。その後、昨年度には電流を 80 μ A にまで増強し、今年度には 1mA、次年度には 10

mA までの電流増強を行う予定で技術開発を進めている。また、光源としての安定性を示すために、具体的な利用研究として「レーザー・コンプトン散乱 X 線」の発生を行い、十分な安定度と微小光源による X 線のイメージングの可能性を示している⁴⁾。この開発に関しても、JAEA の羽島氏の研究グループの協力の元、進めてきている。

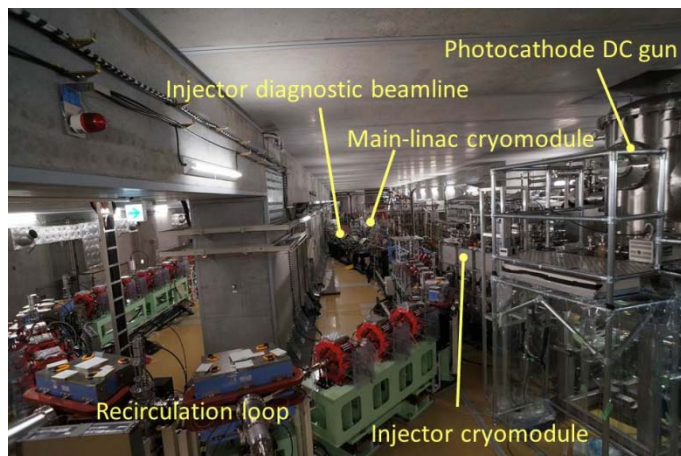


図 2 cERL 加速器シールド内の写真

3. まとめ

以上のように、ERL-FEL によって 10kW クラスの EUV 光源の概要を説明した。今後、800MeV までのエネルギー増強には数多くの超伝導・主加速空洞の導入が必須であり、より安定運転を実現する超伝導空洞の試作とその実証試験が必要であるが、大強度 EUV 光源の実現は現在の技術開発で十分に射程の中に入ってきている。この大強度 FEL 光源は半導体リソグラフィへの応用に留まらず、基礎科学のための研究ツールとしても大いに期待できる。

参考文献

- 1) 例えば、“2014 International Workshop on EUV and Soft X-Ray “
<http://www.euvlitho.com/2014/2014%20Source%20Workshop%20Proceedings.pdf>
- 2) N. Nakamura: “The 56th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs” <http://www0.bnl.gov/erl2015/>
- 3) <http://www2.kek.jp/imss/news/2014/topics/0312cERL/>
- 4) <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20150427150000/>