エネルギー回収型リニアック(ERL) を用いた高出力EUV光源の開発

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設 小林幸則

高エネルギー加速器科学研究奨励会・特別講演会 2015年10月16日@アルカディア市ヶ谷(私学会館)

講演内容

(1)はじめに

(2)エネルギー回収型リニアック(ERL)

• 加速器構成の簡単な紹介

(3) KEKにおけるERL開発の現状

・次世代放射光源ERLの実証器としてのコンパクトERL開発

(4)高出力EUV光源に向けて

ERLとFELの技術の利用

(5)おわりに

(1)はじめに

EUV-FEL光源検討の背景(2014年2月頃)

- ・半導体微細加工のためリソグラフィ用光源の短波長化が望まれている。
- 次世代光源には、波長 13.5nm(135Å)、EUV(Extreme Ultraviolet: 極端紫外線)領域の高出力(10kW以上)光源 が必要とされている。
- •現状、LPP(レーザー励起型プラズマ)光源が開発されている ものの、高出力化が困難な状況が続いている。
- そのため、加速器をベースにした高出力光源ができないかとの期待が高まってきている。
 - 2005年頃提案されていたERLをベースにした自由電子レーザ (FEL)光源が見直されはじめた。
- この加速器が技術的に実現可能なのか、実現するとすれば
 その実現可能な時期等についてKEKにおいて検討を行ってきた。



G. Dattoli et al., NIM-A (2001)

13.5 nm, 50 W, 2% BW の光源を検討

羽島良一、「半導体リソグラフィのためのEUV-FELの提案」、第21回FELとHigh-Power Radiation 研究会



蓄積リング放射光

バンド内のパワーが足りない
 バンド外のパワーが強すぎる
 → 利用不可
 1Wにも届かない。



常伝導リニアック FEL

500 MeV, 30 µA のリニアックで FEL を動作 → 仕様を満たす (ただし、50 W)

10kWにするには平均電流を200倍 にあげる必要がある。

ERLの特徴

- Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収 型線形加速器)の名の通り、線形加速器
- 線形加速器:電子源から電子を生成し加速、電子ビームを利用したのちに、ダンプに捨てる



- 線形加速器の特徴:
 - ビームは一度きりの使い捨て(ビーム品 質は電子源によって決まる)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_n}{\gamma \beta} \Rightarrow \frac{\pi}{0}$$
加速すればするほど幾
何学エミッタンスは減少

 でも、出力は「電流×加速エネルギー」 なので、大電流化するとどんどん必要な 電力が増加(ついでに捨てる時の放射 線も増大)



Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収型 線形加速器):加速した電子ビームをもう一度 加速空洞に通して減速。そのエネルギーを次の ビームに与える(回収する)。



- **メリット** - エネルギーを回収するため、省エネ
 - 低いエネルギーでビームを捨てるため、放射化が低減
 - 大電流ビームを扱うことが可能



(2)エネルギー回収型リニアック(ERL)

加速器構成の簡単な紹介

ERLの構成



入射部

役割(cERLを例に)

- 電子銃+励起レーザー --- 大電流・低エミッタンスビームの生成
- ・ソレノイド電磁石 空間電荷効果の補正
- バンチャー空洞 バンチ長の調整 ___
- ビームの加速 • 入射加速空洞
- 四極電磁石 との整合

【磁石





cERL入射部・入射診断ラインの配置構成

周回部

役割:

- 主加速空洞 ---- ビーム加速と減速
- ・偏向、四極電磁石 ---- ビーム輸送、バンチ圧縮・伸長
- ・周長補正シケイン ----- エネノ
- エネルギー回収調整
- 各種モニター ---- ビーム診断(位置、サイズ測定)



取出部・ダンプライン

役割:減速ビームを周回部から取出してビームダンプに捨てる。

• 周回部とダンプラインの干渉 ・ ダンプ前でのビームロス抑制 考慮すべき事項 ・周回ビームへの影響抑制(分散、軌道) ・ビームダンプの発熱(冷却、ラスタリング等) cERL取出部・ダンプライン 400 350 偏向電磁石 加速ビーム軌道 φ⁴⁵ φ90 φ110 - ビーム 加速ビーム 水冷管 吸収体 ICF203FH (GridCop) ol2 減速ビーム 減速ビーム軌道 cERL取出部(ダンプシケイン) cERLビームダンプ

RFシステム

役割:空洞に高周波電力を供給する装置。すべて1.3GHz CWで動作

<u>cERLの例</u>



入射空洞#1用30kW クライストロン



入射空洞#2,3用300kW クライストロン





主空洞用8,16kW半導体增幅器



ビームロス・放射線関連

役割:放射線遮蔽、ビームロス·放射線の監視、マシン防護。

- ・加速器室(放射線遮蔽壁):放射線の遮蔽
- 放射線モニタ:加速器室外での放射線監視
- 加速器室内モニタ:加速器室内でのビームロス・放射線監視
- 高速モニタ:ビームロスの高速検知とマシン防護
- ・コリメータ:ビームロスの局在化



(3)KEKにおけるERL開発の現状

次世代放射光源ERLの実証器としての コンパクトERL開発

実証機としてのコンパクト ERL (cERL)



コンパクト ERLの目的

- ・主要な装置のR&Dと安定な運転の実証
- 超低エミッタンスビームの生成・加速
- ・エネルギー回収の実証
- 加速器総合性能の確認



Parameters of the Compact ERL

	Parameters		
Beam energy (upgradability)	35 MeV 125 MeV (single loop) 245 MeV (double loops)		
Injection energy	5 MeV		
Average current	10 mA (100 mA in future)		
Acc. gradient (main linac)	15 MV/m		
Normalized emittance	0.1 mm mrad (7.7 pC) 1 mm mrad (77 pC)		
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual) ~ 100 fs (with B.C.)		
RF frequency	1.3 GHz		

コンパクトERLの解説動画



cERLを構成する装置(電子銃・入射器)

- <u>光陰極DC電子銃 (JAEAで開発): 500 kV, 10 mA</u>
 - 高電圧印加試験を経て、390 kVで運転
- 入射器超伝導空洞
 - 2-cell 空洞3台
 - 大電力試験を経て、最大 7 MV/m で運転

st Arc Section

入射器診断ライン



2nd Arc Se THz CSR



Path-Length Contro







cERLを構成する装置(主空洞、周回部)

- 主空洞(周回部超伝導空洞) エネルギー回収する部分 、
 - 9-cell空洞2台(性能評価試験では、16 MVに到達)
 - He lossの増大、およびfield emissionによる放射線増大を 考慮し、1台あたり8.57MVで運転
 - 加速後のエネルギー: 19.4 MeV
- <u>周回部</u>
 - 加速されたビームをもう一度主空洞まで輸送する
 - LCS光源やTHz光源の発光点が配置される
- ・ <u>主ダンプライン</u>
 - 減速ビームを捨てる









コンパクトERLの建設と立ち上げ



完成したコンパクトERL



コンパクトERLのビーム運転の経過

各機器の性能試験結果を元にビーム運転計画を定めた

- 段階的に試験を実施(上流から性能検証を実施、電流も段階的に上げていく)
- 電流増強の度に、放射線申請変更と施設検査が必要 ⇒ これまで、着実に合格してきている
 - ― 短い運転時間で、着実に放射線施設検査を合格できるような運転計画を作る
 - ― 残された時間で、効率的に機器の性能検証、ビーム調整法の確立を行う

2013年 1月~6月	7月~12月	2014年 1月~6月	7月~12月	2015年 1月~6月	7月~12月	2016年 1月~6月	7月~12月
	入射器単体記 電子生成・加 7.7 pC(平均常	<mark>试験 (4月~6月</mark> 速 (5.6 MeV)に 電流10 mA相当) <mark>、最大1 μA</mark> ニ成功)で0.8 mm mr	ad以下の規格	化エミッタンス		
		CERL紙 主空派 エネル	<mark>8合運転(12月</mark> 同での加速に成 レギー回収に成	~3月) 、最大 (、 功(19.4 MeV) 、 功	10 μA)		
			c <mark>ERL総合運</mark> 車 ビーム光学の 7.7 pCで5.8 r	<mark>伝(5月~6月)、</mark> D基本情報の耶 nm mrad(周回	<mark>最大 10 μA</mark> α得 部)		
				LCS-) LCS月 LCS-)	×線生成試験(flビーム光学調 x線の観測	1月~3月)、最 整	大100 µA
	低エミック 空間電荷 LCS-X線	<mark>タンス調整(5月</mark> 苛補償のための 生成試験の続き	<mark>~6月)、最大</mark>)基礎データを き	100 μA 📃 取得			





cERLを用いた平均ビーム電流の実証経過

・今のところ、1年に10倍のペースで電流を増強

S. Sakanaka, IPAC15, TUBC1



高輝度電子ビームの輸送(低バンチ電荷)

空間電荷効果の効かない低バンチ電荷の輸送試験(加速器の基本性能の評価)



高輝度電子ビームの輸送(高バンチ電荷)

空間電荷効果が支配的な高バンチ電荷(7.7 pC/bunch, 10 mAピーク)の輸送試験(これまで3回実施)



今後も高バンチ電荷での基礎情報の測定・調整法の確立を目指す

(4)高出力EUV光源に向けて

ERLとFELの技術を利用

高出力EUV-FEL発振に重要なパラメータ

- 最適なビームエネルギー (γ)
- 最適なアンジュレータの周期長(λυ)、磁場(Bu)、長さ(Lu)
- ・高いピーク電流 (Ipeak)~ 短いバンチ長(σt) ← バンチ圧縮
- 低エミッタンス(ϵ),低エネルギー分散(σ_ϵ)かつ 高い平均電流(I) \leftarrow ERL

FEL共鳴条件

$$\lambda_{ph} = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad K = e\lambda_U B_U / 2\pi mc^2$$

FEL関連パラメータ(ゲイン長LG、FELパラメータ ρ)

$$L_{G} = \frac{\lambda_{u}}{4\sqrt{3}\pi\rho}, \ \rho = \left(\frac{1}{16} \frac{I_{peak}}{I_{A}} \frac{K^{2} [JJ]^{2} \lambda_{u}^{2}}{\gamma^{3} \sigma_{x} \sigma_{y} (2\pi)^{2}}\right)^{1/3}, \ I_{peak} = Q_{b} / \sqrt{2\pi\sigma_{t}}, I_{A} = 17kA$$

FEL出力の飽和に至るアンジュレータの長さ(ゲイン長)を短くするため、ρを 大きくしたい → ピーク電流が高くかつ高品質のビームが必要。

これまでに検討された EUV-FEL光源加速器の設計仕様

項目	設計仕様		
波長	13.5 nm		
出力	10 kW		
バンチ電荷	60 pC		
ビームエネルギー	800 MeV		
超伝導空洞の加速勾配	12.5 MV/m		
超伝導空洞の数	9-cell 空洞×64		
ビーム繰り返し周波数	162.5 MHz		
平均ビーム電流	9.75 mA		

コンパクトERLで実証してきた性能をベースに設計

ERLを用いたEUV-FEL光源の概要



EUV-FEL 光源用の入射器 要求:平均電流 10 mAの高輝度ビームの生成・加速



60pC/bunch

1 ps : 0.30 mm mrad, 0.25 % $\rightarrow \varepsilon_n = 0.60$ mm·mrad, $\sigma_p/p = 0.25$ % @ merger exit 2 ps : 0.25 mm mrad, 0.25 % $\rightarrow \varepsilon_n = 0.55$ mm mrad, $\sigma_p/p = 0.25$ % @ merger exit

このビーム条件を初期値として、バンチ圧縮シミュレーションを実施

N. Nakamura et al., ``Design Work of the ERL-FEL as the High Intense EUV Light Source'', ERL2015, MOPCTH010. 32



E_p/E_{acc}の低減によって、12.5 MV/m での安定な運転が目標

N. Nakamura et al., ``Design Work of the ERL-FEL as the High Intense EUV Light Source'', ERL2015, MOPCTH010. 33

バンチ圧縮と復元(伸長)

要求: FEL発振のためにピーク電流を高める(50 fs以下)
 エネルギー回収のために、バンチ長を復元(伸長)する



N. Nakamura et al., ``Design Work of the ERL-FEL as the High Intense EUV Light Source'', ERL2015, MOPCTH010.

FELの性能

• 要求: 10 kW のFEL出力

加藤龍好氏による計算



N. Nakamura et al., ``Design Work of the ERL-FEL as the High Intense EU Light Source'', ERL2015, MOPCTH010. 35

(5) おわりに

高出力EUV光源について

- 10kWクラスのEUV-ERL-FEL光源は、KEKで行ってきた加速 器要素技術開発およびコンパクトERLのコミッショニングの 経験から、実現可能であり、概念検討段階では大きな問題 はないと予想しているが、出力の十分なマージンを確保す るために、今後も最適化のシミュレーションが重要である。
- 加速器については、2015年度(今年度)から主要コンポーネント(EUV用の電子銃、主超伝導空洞)のR&Dを開始し、2016年度から建設予算が付けば、3~4年間で建設・設置を行って、2019年度内にビームコミッションニングを経て、最初の10kWの高出力EUV光を得ることが、ぎりぎり可能と考えている。

ERL Development Team in Japan

(3)High Energy Accelerator Research Organization (KEK) S. Adachi, M. Adachi, M. Akemoto, D. Arakawa, S. Asaoka, K. Enami, K. Endo, S. Fukuda, T. Furuya, K. Haga, K. Hara, K. Harada, T. Honda, Y. Honda, H. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, K. Hozumi, A. Ishii, E. Kako, Y. Kamiya, H. Katagiri, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, Y. Kondou, O. Konstantinova, T. Kume, T. Matsumoto, H. Matsumura, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, S. Nagahashi, H. Nakai, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nakao, K. Nigorikawa, T. Nogami, S. Noguchi, S. Nozawa, T. Obina, T. Ozak i, F. Qiu, H. Sakai, S. Sakanaka, S. Sasaki, H. Sagehashi, K. Satoh, M. Satoh, T. Shidara, M. Shimada, K. Shinoe, T. Shioya, T. Shishido, M. Tadano, T. Takahashi, R. Takai, T. Takenaka, Y. Tanimoto, M. Tobiyama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, K. Watanabe, M. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Yano, M. Yoshida (JAEA) Japan Atomic Energy Agency (JAEA) R. Hajima, S. Matsuba, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura, T. Shizuma ÷ The Graduate University of Advanced Studies (Sokendai) E. Cenni Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo H. Takaki NSORI **UVSOR, Institute for Molecular Science** M. Katoh h **Hiroshima University** M. Kuriki, Y. Seimiya **E**m) Nagoya University Y. Takeda, Xiuguang Jin, M. Kuwahara, T. Ujihara, M. Okumi National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) D. Yoshitomi, K. Torizuka SPring 8 **JASRI/SPring-8** Yamaquchi University

H. Kurisu

H. Hanaki

• 謝辞 ~運転を支えて頂いた方へ~



コンパクトERLのコミッショニング運転では、建設・コミッショニングチームだけでなく、機器を安定に運転するために多くの方の協力がなければ進めることができませんでした。

大前提として、冷凍機の安定な運転が欠かせませんでした。冷凍機運転員の方に感謝します。 また、コミッショニング運転では機器の迅速な立ち上げ・立ち下げ、そして運転に必要なソフトウェア の迅速なサポートが欠かせませんでした。支援していただいた東日本技術研究所やNATの方々に感 謝します。

高エネルギー加速器セミナー

OHO'15

エネルギー回収型リニアックの加速器基盤技術と応用

2015 9.1 Tue. ~ 9.4 Fri. 高エネルギー加速器研究機構3号館セミナーホール

参加者墓集

詳しくは WEB をご覧下さい。 http://www.heas.jp http://accwww2.kek.jp/oho/

讃義に関するお問い合わせ

小林幸即 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 TEL: 029-864-5632 E-mail: oho15@milk.kek.jp

共催

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 KEK:高エネルギー加速器研究機構 TEL / FAX : 029-879-0471 E-mail : info@heas.jp

〒305-0801 つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構内 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科

高エネルギー加速器セミナー **OHO '08** ビームエネルギー回収型高輝度

次世代加速器技術としての可能性を秘めたERL その原理と応用を学ぶ



2008年 9月2日(火)-9月5日(金) 高エネルギー加速器研究機構:3号館セミナーホール

参加者募集

ttp://www.heas.jp, http://accwww2.kek.jp/oho/index.htm

申込書送付先 8月10日 (金) 必着 〒305-0801 つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構気付 (財) 高エネルギー加速器科学研究奨励会 Tel/fax: 029-879-0471 E-mail: info@heas.jp

講義内容に関するお問い合わせ

古屋 告音 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 Tel 029-864-5234 E-mail: oho08@milk.kek.jp

共 催 (財)高エネルギー加速器科学研究奨励会 KEK:高エネルギー加速器研究機構 総合研究大学院大学・高エネルギー加速器科学研究科

OHO セミナーのテキスト

加速器の勉強には大変有用なテキスト(教科書)です。 ぜひ購入またはダウンロードして勉強してみてください!

- ERL関連
 - 2015年、2008年
- FEL関連
 - 2013年、1998年
- ILC(超伝導空洞開発)関連
 - 2014年、2006年

ホームページ

http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt1~4.html

ご清聴ありがとうございました。