

共振器型 X 線自由電子レーザーの解析

羽島良一、○西森信行

日本原子力研究開発機構

サファイア等の完全結晶を直入射反射鏡に用いた硬 X 線領域で動作可能な共振器型自由電子レーザーの発振特性を解析した。現在計画中の次世代 ERL 光源 (5-7GeV 級) の電子ビームで、FEL 発振に必要な 20-30% 以上のゲインが得られ、飽和後の X 線パルスは良好な時間コヒーレンスを有することがわかった。

1. 緒言

エネルギー回収型リニアック (ERL) による次世代 X 線放射光源において、共振器型 X 線自由電子レーザー (X-FELO) を実現するアイデアが K-J. Kim らによって提案された [1]。X-FELO は、サファイア等の完全結晶がオングストローム領域の X 線に対して、直入射条件で高い反射率をもつことを利用し、X 線の光共振器を構成し、この中で電子ビームと X 線パルスを多数回にわたり相互作用させて FEL 発振を得るものである (図 1)。現在、日米欧でそれぞれ建設中の X 線自由電子レーザー (SASE-FEL) とは異なり、ほぼ完全な時間コヒーレンスを備えた X 線パルスが発生できる点が大きな特長である。

次世代 X 線放射施設として計画されている ERL 光源の代表的な電子ビームパラメータで、1Å の FEL 発振が可能であることから、ERL 光源の魅力を増すオプションとしても有望である [2]。

[1] K-J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 244802. [2] R. Hajima et al., Proc. FEL-2008.

2. 時間依存シミュレーションコードによる FEL 発振特性の解析

われわれは、時間依存 1 次元コードを使って X-FELO のシミュレーションを行った。この計算コードは、JAEA-FEL の発振実験 (スパイク型発振や超短パルス発生など) をよく再現することが確かめられている。単結晶における X 線の反射は、X 線パルス (時間領域で計算) を FFT で周波数領域に変換した後、理想的なダーウィン曲線 (完全結晶による X 線の Bragg 反射) のモデルを使って求めた。反射による狭帯域化に加えて、K-J. Kim の論文 [1] では考慮されていない位相シフト (波長分散) の効果も含んでいる。

電荷量 20 pC, バンチ長 2 ps, 規格化エミッタンス 0.1 mm-mrad, アンジュレータ周期 1.88cm, アンジュレータ周期数 3000 などの条件化で波長 1Å の X-FELO の発振特性を計算した。FEL ゲインは 27%、共振器損失は 10% である。FEL 出力飽和後の X 線パルスの時間波形は、図 2 に示したように、ほぼ Gaussian 波形に近いことがわかった。X 線のエネルギー幅は 2.5meV (rms) であり、SASE-FEL の一般的な発振条件に比べると 10^{-3} 倍の値である。共振器のアウトカップルを 4% とした時、パルスあたりの光子数は 10^9 個である。Bragg 反射における波長分散の効果は、主に X 線パルスの群遅延であり、光共振器長の調整で補償できる。

3. 結言

共振器型 X 線自由電子レーザー (X-FELO) の発振特性を解析し、良好な時間コヒーレンスが得られることを確認した。X-FELO は、ERL 型次世代 X 線放射光源にオプションとして組み込み可能であり、他の手法では不可能なユニークな光源=時間コヒーレンス、空間コヒーレンスを備えた硬 X 線レーザーを実現する。

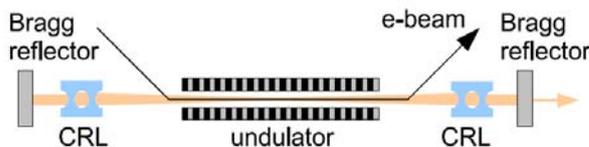


図 1. 共振器型 X 線自由電子レーザー

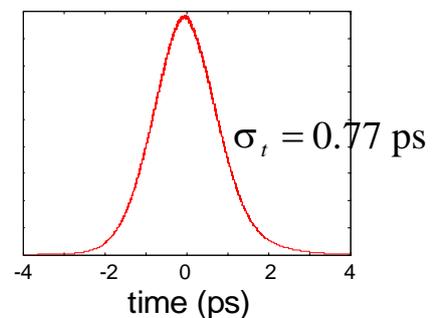


図 2. 出力飽和後の X 線レーザー波形