

テラヘルツ FEL の開発

大阪大学産業科学研究所

磯山悟朗

我々は、大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設のエネルギー40 MeV Lバンド電子ライナックを用いてテラヘルツ領域の自由電子レーザーの開発研究を行っている。Lバンドライナックは、熱陰極電子銃と、3 段のサブハーモニックバンチャーシステム、RF 周波数が 1.3 GHz の独立した進行波型のプレバンチャーとバンチャー、加速管を持ち、大強度単バンチ電子ビームを加速してピコ秒領域のパルスラジオリシスによる放射線化学反応の初期過程の研究に最適化されている。Lバンド電子ライナックの電子バンチは、赤外 FEL に多く用いられる S バンド電子ライナックのそれより長いので、長波長領域の動作に適している。我々は、1989 年に FEL の開発研究を開始し、1994 年に波長 32~40 ミクロンで最初の FEL 発振に成功して以来、動作波長を長波長側に拡大するために、ウイグラーを磁極ギャップ可変型に改造すると共に、長波長動作で障害になる回折損失を低減するための FEL システムの改造を順次行った。電子ビームエネルギーを下げて長波長側に波長領域を拡大する実験を行い、1998 年には当時 RF ライナックを用いた FEL としては最も長い波長である 150 ミクロンでの発振を実現した。しかし、Lバンドライナックは 30 年以上前に建設された加速器であり、安定性が十分でないことに加えて、電子パルスの長さが 2 マイクロ秒と短く、増幅回数が約 50 回に制限されるためにパワー飽和に達することが出来ず、FEL 物理の定量的な研究や利用実験に使用することはできなかった。

2002 年に Lバンド電子ライナックを大規模に改造する予算が認められ、ライナックの運転状態の安定性と再現性を向上すると同時に、FEL 用の長パルス運転を可能にした。ライナックの FEL 用運転モードのコミッショニングで、長パルス運転に伴うパルストランスや導波管での放電現象の解決に手間取ったが、最終的に残った問題は、RF パワーの位相と振幅がパルス内で変化する原因不明の問題である。この問題を解消するために、RF パワーの位相・振幅変化をフィードフォワード法により打消してエネルギーのそろった電子ビームを発生する新しい手法を開発した。これらの活動と並行して、ビーム集束のためウイグラー磁場に横方向の磁場勾配を重ね合わせるエッジ集束ウイグラーの開発研究を行い、これを基に FEL 用ウイグラーを、電子ビームを縦横同時に集束して FEL の増幅率を上げることが出来る強集束ウイグラーに改造した。フィードフォワード法を用いた RF 位相と振幅の安定化によるビームコンディショニングと強集束ウイグラーを用いて、2007 年にパワー飽和に達する高出力発振を波長 70 ミクロンで実現して、FEL の再立ち上げに成功した。

発振波長領域の拡大と出力パワーの増大の実験を進めると共に、FEL の特性測定を行い、波長 150 ミクロン、あるいは 2 THz での発振を得た。これらの FEL 開発研究に関して報告する。