

Study of storage ring free electron lasers in the infrared region at the AIST

N. Sei, K. Yamada, H. Ogawa, M. Yasumoto

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

Abstract

Studies of broad-band free electron lasers (FELs) have been progressed with the compact storage ring NIJI-IV at the AIST. A new optical klystron for developing infrared FELs has been installed in the north straight section of the NIJI-IV. The 3.55-m optical klystron ETLOK-III has two undulator section of 7 periods of 20 cm and one 72-cm dispersive section. Fundamental and higher harmonic spontaneous emissions from the ETLOK-III were observed in the visible and near-infrared regions. The estimated FEL gain is over 2%, so that FEL oscillations in the wavelength regions will be achieved in the future.

産総研における赤外蓄積リング自由電子レーザーの研究

1. はじめに

自由電子レーザーが現状で最も利用されている波長帯はどこであろうか。それは、中赤外から遠赤外までの波長帯であろう。自由電子レーザーの発振原理上、高い利得を得やすく、電子ビームエネルギーも100MeV以下で充分であるため、比較的コンパクトな加速器施設でよい。遠赤外域に対してはマイクロトロンや静電加速器も使用されているが、中赤外域ではリニアックが使用されており、典型的な平均出力も数Wクラスである[1]。リニアック電子ビームのパルス特性のため、自由電子レーザーのマイクロパルスはサブピコ秒程度であり、この短パルス特性に着目した応用も数多く提案されている。しかしながら、短パルスであるが故にその線幅は 10^{-3} 程度であり、応用によっては十分に狭いとはいえない。中赤外域では自由電子レーザー以外でも、固体レーザーを基にした波長可変な差周波発生器なども研究されているが、広い波長可変性を実現しつつ十分に狭い線幅を実現することはなお難しいようである。この点において、蓄積リングを使用した自由電子レーザーは典型的な線幅が 10^{-4} のオーダーであり[2]、分光後の放射光と同様に利用できる。波長 $10\mu\text{m}$ では出力が1mWであっても、光子数が毎秒 10^{17} 程度の収量になるため、既存の蓄積リングにおける赤外ビームラインよりもはるかに強力である。

だが、通常の蓄積リング電子ビームのエネルギーが数百MeV以上と高く、蓄積リング自由電子レーザーの開発はこれまで可視から真空紫外までの波長帯で行われており、赤外域では計画はあるものの実現に至っていない。そこで産総研では、電子ビームエネルギーの比較的低い自由電子レーザー専用蓄積リングNIJI-IVを用いて、1-12 μm の波長域で数mW程度の自由電子レーザー発振とその利用を目指す研究を進めている[3]。既に北側の長い直線部に3.55mの光クライストロンETLOK-IIIを設置し、これから放射される自発放出光の基本波や高次高調波を観測し

ている[4]。ここではまず、挿入光源であるETLOK-IIIの詳細について説明し、観測された自発放出光による電子ビーム特性とETLOK-IIIの性能の診断を示し、最後に期待される赤外自由電子レーザーについて評価を行う。

2. 光クライストロンETLOK-III

赤外用光クライストロンETLOK-IIIは、既存の3m アンジュレータを改造して製作された[3]。磁石の大部分を流用したため周期長は改造前と同じく20cmである。磁石はSEREM-N38Hで、その残留磁束密度は1.24Tである。光クライストロンには分散部を挟む2つのアンジュレータ部が存在するが、アンジュレータ部の周期は7とした。アンジュレータ部の磁石間隙は36mmから150mmの間で調整できる。磁場測定から評価した最大K値は10.4であった。アンジュレータ周期数が小さいために十分な自由電子レーザー利得を得るには、分散部の磁力・長さの大きさを示す N_d を大きく取らなければならない。さらに、波長帯が赤外であることを考慮すると、分散部にはかなり大きなスペースがあることになる。なぜならば、 N_d の定義は分散部にて電子パンチが自由電子レーザーに追い越された時の波長数であるからである。設計当時のNIJI-IV電子パンチのエネルギー拡がりを考慮し、 N_d は90程度が適切であったため、分散部の長さを72cmとした。その両端には1.5cmの自由空間がある。分散部とアンジュレータ部は間隙を独立に動かすことができるが、分散部間隙はアンジュレータ部間隙よりも38mmを超えて拡げることにはできない。図1にETLOK-IIIの写真を示す。

分散部長が大きくNIJI-IV電子ビームエネルギーも比較的低いために、電子ビームは分散部内で15mm以上蛇行することがある。分散部磁石の幅は88mmしかないため、分散部内での蛇行が大きいと分散部磁石の水平方向の磁場分布の影響を受け、電子ビー

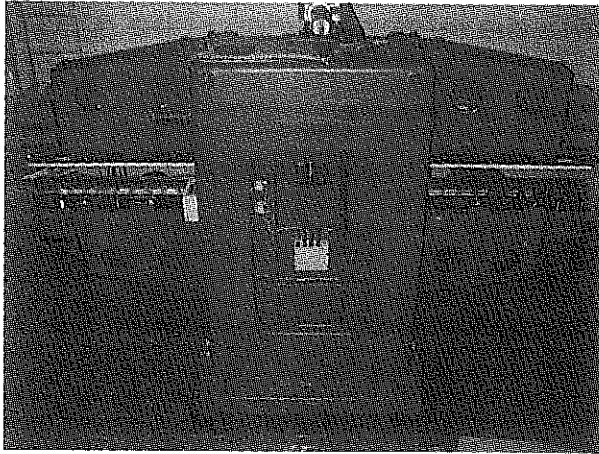


図1 赤外用光クライストロンETLOK-III。

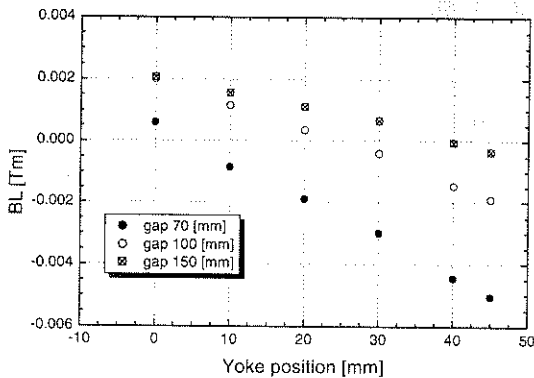


図2 分散部間隙と電子ビームが受けるBL積との関係。

ムが偏向してしまう。そこで、分散部における電子ビームの偏向を防ぐために、分散部磁石の両端に磁気回路ショート用の鉄板をつけ、分散部間隙の変動に対応できるようにスライド機構を設けた。図2が示すように、ショートヨークを移動することで70-150mmの磁石間隙でBL積を相殺できる。しかし、70mm以下の磁石間隙ではなお電子ビームは偏向力を受けてしまうので、分散部真空チャンバーに厚みが3mmのステアリングコイルを取り付け、BL積を相殺できるように改造した。このため、分散部の最小間隙は42mmとなったが、共振波長 $10\mu\text{m}$ に対して N_d を90以上にすることは可能である。

3. ETLOK-IIIからの自発放出光

光クライストロンETLOK-IIIを長直線部に挿入することで、その磁石間隙によって鉛直方向のベータトロンチューンが変動するため、4重極磁石のダブルレットの電流を調整することでベータトロンチューンが一定になるように電子蓄積を行っている。ただし、磁石間隙が狭まってくるとETLOK-IIIの前後の4重極磁石の所でベータトロン関数が大きくなるので、

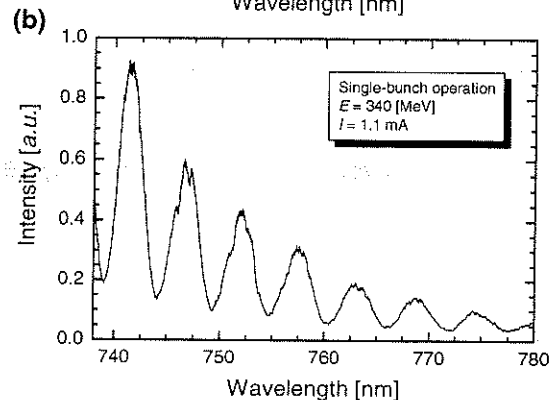
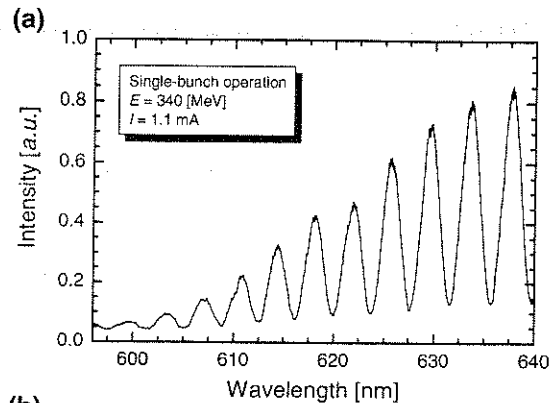


図3 ETLOK-IIIから放射される基本波の自発放出光スペクトルの一例。アンジュレータ間隙が125mm、分散部間隙が160mmの時、スペクトルの短波長側(a)と長波長側(b)を示した。

4重極磁石を個別に調整できる機構を今後設置する予定である。アンジュレータ部の間隙が125mmの時には、340MeVの電子エネルギーで200mA以上の蓄積を実現している。アンジュレータ部においても、水平方向に対して磁場が均一である領域は数mm以内と狭いため、軸対称なアンジュレータ光を得るためにポジションモニターを利用して、電子ビームがアンジュレータ軸と平行になるように調整している。

ETLOK-IIIから放射される自発放出光の測定には空間分解能0.2nmの分光器を使用した。この分光器までは大気中を10mほど飛ばしており、分光器に取り付けた半導体アレイ検出器の最長検出限界波長が $1\mu\text{m}$ であったため、それ以下の波長の基本波及び高次高調波を観測した。自発放出光の基本波スペクトルについて観測した一例を図3に示す。この例ではアンジュレータ間隙と分散部間隙がそれぞれ125mmと160mmで、共振波長は約690nmであり、ETLOK-IIIの磁場測定から計算された値に一致していた。一方で N_d については計算値の150に対して、観測値は約140であり、分散部内で中心軸よりもやや弱い磁場を電子ビームが受けているということがわかる。観測した f 値が約0.74であり、測定系の影響を取り除いて評価したエネルギー拡がり、 $2.7 \pm 0.2 \times 10^{-4}$ であった[5]。この値はラティスから計算されたエネルギー拡がりの値 2.6×10^{-4} と良い一致をしている。

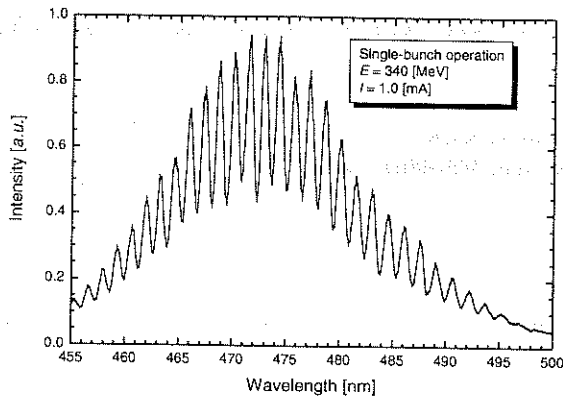


図4 ETLOK-IIIから放射される3次高調波の自発放出光スペクトルの一例。アンジュレータ間隔は100mm、分散部間隔は130mmである。

アンジュレータ間隔が105mm以下になると3次高調波は可視域になる。図4はアンジュレータ間隔が100mm、分散部間隔が130mmの時の3次高調波スペクトルである。このスペクトルから評価した3次高調波の相対幅は約22で、理論値の21とほぼ一致している[6]。またモジュレーションの微細構造の間隔も、理論値の1.38nmに対して観測値は1.40nmであり、良い一致をしていた。微細構造の幅が狭いために、良いのであるが電子パンチのエネルギー拡がりを経験すると、 3.1×10^{-4} で基本波からの評価よりもかなり大きくなった。高次高調波スペクトルを用いてエネルギー拡がりを正確に評価するには、さらにアンジュレータ間隔を狭める必要がある。

4. 期待されるFEL特性

FEL発振の可否を決める重要な要素は有効利得、つまり自由電子レーザー利得と共振器損失との差である。利得を求めるには電子ビーム特性だけではなく光共振器についても設計しなければならないが、ここでは共振器長をNIJI-IVの周長の半分である14.8mとし、共振器ミラーの曲率半径を8mと仮定する[3]。挿入光源に光クライストロンを用いる場合、FEL利得は N_d に依存する。ETLOK-IIIでは基本波に対しては N_d を大きめに、高次高調波に対しては N_d を小さめにした方が利得が高くなる傾向がある。観測した自発放出光スペクトルを用いて、アンジュレータ間隔が90-150mmの時に分散部間隔との差を固定して評価した利得を図5に示す。この図からは、シングルバンチ電流が15mAと高ければ、近紫外-近赤外域で2%以上のFEL利得を期待できることがわかる。この波長域では99.8%以上の反射率を持つ誘電体多層膜ミラーを入手できるため、自由電子レーザー発振を実現できるであろう。

図5では基本波の利得が高次高調波のそれに比べて低いように見えるが、これは分散部間隔をアンジュレータ間隔に等しいと仮定し、より大きな N_d を採用しなかったためである。分散部改良を終えたの

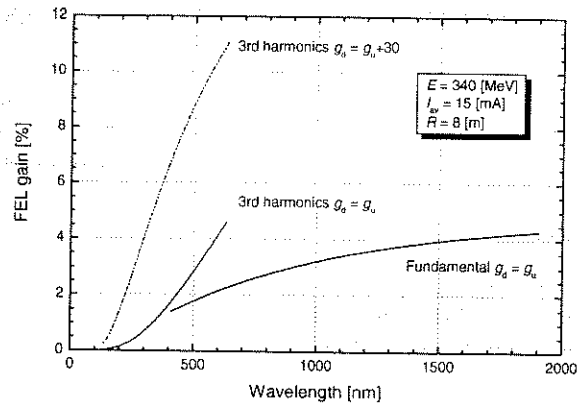


図5 ETLOK-IIIを用いた場合の計算による最大自由電子レーザー利得と波長の関係。

で、今後はより小さな分散部間隔での自発放出光スペクトル観測を目指す。

5. まとめ

産総研で取り組んでいる自由電子レーザー専用蓄積リングNIJI-IVを用いた赤外自由電子レーザー開発の現状を記した。赤外用光クライストロンETLOK-IIIを用いて自発放出光の基本波及び高次高調波の観測を行っており、近紫外から近赤外の波長域では自由電子レーザー発振に十分な利得が得られることがわかった。今後は本計画の中核的な目的である中赤外域の設定で自発放出光の観測を行うと共に、可視や近赤外域で自由電子レーザー発振に取り組むことになるだろう。

参考文献

- [1] R. Prazeres *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A445** (2000) 204. T. Tomimasu *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A407** (1998) 494.
- [2] K. Yamada *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A483** (2002) 162.
- [3] N. Sei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1595.
- [4] N. Sei *et al.*, Proc. of FEL2004, Trieste, 2004, pp. 307-309.
- [5] M. Billardon *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. **21** (1985) 805.
- [6] M. Billardon *et al.*, J. Phys., **44** (1983) C1-29.