

# STRANGE LIGHT EMISSION FROM THE NONLINEAR OPTICAL CRYSTAL BY FEL IRRADIATION

Ken Hayakawa<sup>#</sup>, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Keisuke Nakao, Kyouko Nogami, Manabu Inagaki  
LEBRA, Institute of Quantum Science of Nihon University  
7-24-1 Narashino-dai Funabashi, 274-8501

## Abstract

During a tuning to generate second-harmonics from the FEL with wave-length of 1640nm by using the nonlinear optical crystal BBO at LEBRA, we observed non-harmonic visible light emission with large dispersion angle. The emission appears when the crystal is set detuned angle. The color changes depending on the crystal angle and the FEL intensity. By irradiation of the enhanced FEL by means of the burst-mode operation of the linac, bright arcs appeared around the emission.

## FEL 照射による非線形光学結晶の奇妙な発光現象

### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設において自由電子レーザーの非線形光学結晶 BBO を使った高調波発生の調整<sup>[1]</sup> (基本波 1620nm) を行っていたところ、奇妙な発光現象を観測した。第 2 高調波発生の位相整合角から少しずれた角度で、比較的発散角の大きな光が出ているのに気付いた。この現象はたまたま可視光による発光現象であったため注意を引いたものである。基本波のエネルギー密度に強く依存して発光量が増減し、閾値が存在するようである。また、結晶の角度を少し変えると色の分布が変わり、放射角によっても波長が異なるようである。図 1 にその例を示す。左の図は発光量が少ない時の画像で、このカメラでは赤く発色して見える。スポット上端の青く見える点は FEL の 3 次の非線形高調波で、FEL の光軸に一致している。すなわち、この発光は光軸の下側に偏って現れている。図 1 (b) は比較的発光量が多い場合の画像で、さまざまな色が現れている。主な成分は緑と赤 (橙) で、その重なった部分が黄色に見えるように思われる。スポットが楕円形に見えるのは、スクリーンに投射された像を水平方向斜めから見ているせいもあるが、正面から見ても、

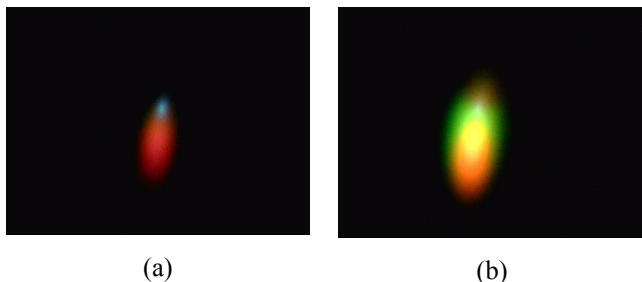


図 1 : CMOS カメラで捕らえた FEL による可視光の発光(a)FEL が比較的弱場合、(b)比較的強い場合。他の条件が同じでも FEL の強度によって発色が異なる。

<sup>#</sup> hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp

縦長の楕円形である。スポットの大きさは、結晶から 150mm 程度後方で、10~20mm 程度、広がり角度にすると 2~4 度となる。この実験を行った部屋の FEL 出力ポートからは偏光面が水平な光が取り出される。BBO による 2 次の高調波発生では Type I の位相整合条件を使うことになるため、光軸に垂直な水平方向の軸の周りの回転によってチューニングを行う。ここで使用した結晶はこの波長帯域の基本波の垂直入射に対して SHG の位相整合条件がほぼ満足されるよう  $\theta=20^\circ$  となるようにカットされている。従って、この光学系は上下方向に対しては対称ではない。この発光現象が現れる理由は定かではないが、いくつかの条件を変えた測定により、興味深い結果が得られたので、報告する。

### 2. 光学系

光学系の概略を図 2 に示す。ポートから取り出した FEL を焦点距離 500mm の凸レンズにより BBO に収束させ、発生した光を 150mm 下流のスクリーンに投射し、その像を CMOS ビデオカメラで撮り、USB を介してパソコンに保存した。分光する場合は、スクリーンを取り去り、適当な位置に凸レンズを置いて集光し、プリズムあるいはモノクロメーターに入射した。使用した BBO の結晶は、厚さ 5mm である。

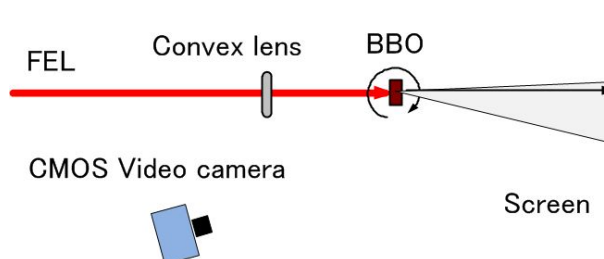


図 2 : FEL を凸レンズで集め、BBO に入射し、BBO から放出された光がスクリーンに投影された像を CMOS カメラで撮影し、パソコンに記録する。

### 3. 結晶の角度と発色

位相整合条件が満足される角度では可視光の発光は見られない。結晶を回転させて、位相整合角から離調させると、図 3(a)に示すように先ず赤色が現れ、次にこれにかぶさるように緑色が現れる。図 1(b)はこの状態に対応し、赤と緑が重なった部分は黄色に発色している。緑と赤で同時に発光する場合も、緑の方が基本波が強い必要があるらしく、同じ結晶の角度でも図 1(a)のように赤のみ見える場合もある。図 3(a)の明るいスポットは位相整合角近傍のため、カメラに装着の IR カットフィルターにもかかわらず 2 次の高調波( $\lambda = 810\text{nm}$ )が見えている。離調角をさらに大きくしてゆくと図 3(b)のように、緑のみ見える場合もある。基本波を 1600nm に調整して分光を試みた。発生した光をレンズで集光し、プリズムで分光した。入射光線を平行化していないため、正確なスペクトルの測定にはならないが、およその波

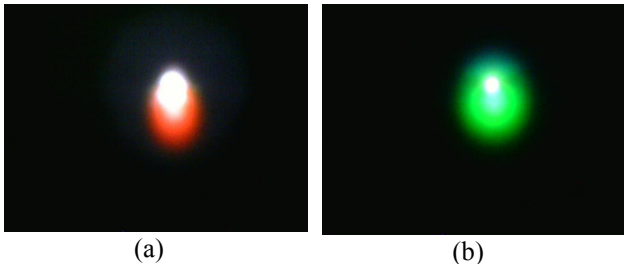


図 3 : 結晶の角度による色の違い。(a)位相性格付近。(b)位相整合角から 4 度離調。

長の分布を知ることにはできる。分光した光をスクリーンに投影し、その像をカメラで撮影した。一例を図 4 に示す。基本波は、IR 検出ターゲットと呼ばれる素子を使って可視化している。この図は位相整合角から 2 度程度離調した状態である。図 5 に、後に述べる電子ビームの間引き運転をした場合の発光のスペクトルをモノクロメータにより測定した発光の一例を示す。この場合は、波長 700~750nm あたりにピークを持つ非常にバンド幅の広いスペクトルを示し、カメラで見た赤から緑にかけての発色に対応しているようである。

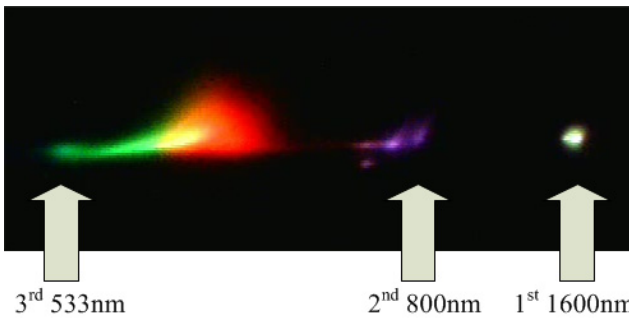


図 4 : プリズムによる分散。矢印は基本波及び高調波の位置を示す。

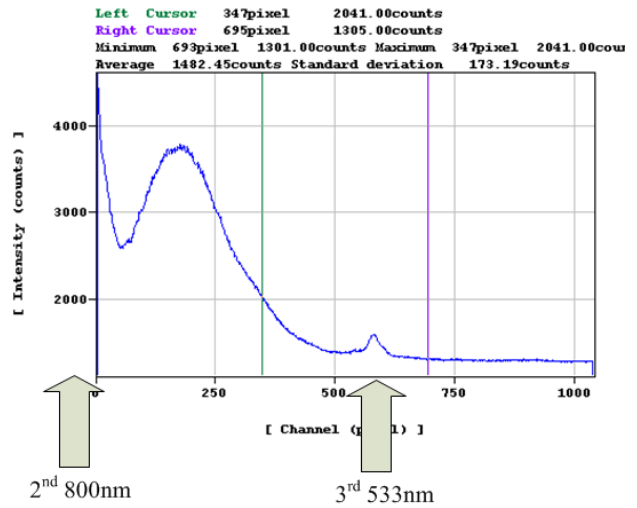


図 5: モノクロメータにより測定したスペクトル

### 4. 間引き運転と FEL

電子銃グリッドパルス系の改良により、バンチを間引き、バンチあたりの電荷量を数倍から数十倍に増加させることが可能になった<sup>[2,3]</sup>。また、通常のバンチ構造に間引いたバンチを重畳させるような運転モードも可能になり、どの場合も FEL の発信に成功している。未だバンチ構造に関する詳細な測定は行われていないが、間引かれたバンチは電荷量が多く、電流密度も大きくなると考えられる。従って、FEL のゲインが大きくなり、発振した場合のバンチ当たりの光子数も増加すると期待できる。このような間引いた電子ビームを使って発振させた FEL について同様の測定を行った。

#### 4.1 弧状輝線の発現

予想通り、マイクロパルス当たりの光子数が増加し、安定に前記の発光現象が観測されるようになった。おそらく、このとき、前述の発光とともに、図 6 に示すように、そのスポットを囲むように弧状の輝線が現れるようになった。この弧状の輝線は上下にあり、ほぼ左右対称であるが、その対称軸近傍では、途切れるか、暗くなっている。またこれらは同心ではない。下側の弧ははっきりしないが、上側の弧は内側から外側に向かって赤から緑に色が変化している。同じく下側の弧ははっきりしないが、上側の弧は結晶の回転に従って光軸に対して位置を変える。また、離調角が大きくなると図 6 (b)のように中央付近にあったスポットが消え、非線形高調波の輝点と弧状の輝線のみ見えるようになる。

弧状の輝線に類似した現象として Conical Color Emission(CCE)と呼ばれる現象がある。これは短パルス強力なレーザーを BBO に入射した時に現れる現象であるが、実験例<sup>[4,5]</sup>があるのは、波長 800nm のチタンサファイアレーザーを利用したもので、円錐の広がり角度、色の組み合わせなどは似ているが、この場合は、光軸が中心になるように円環

状の輝線が現れる。さらに、これが2重になる場合も同心である等、異なる点も多く、同じ現象であるかどうかは明らかではない。

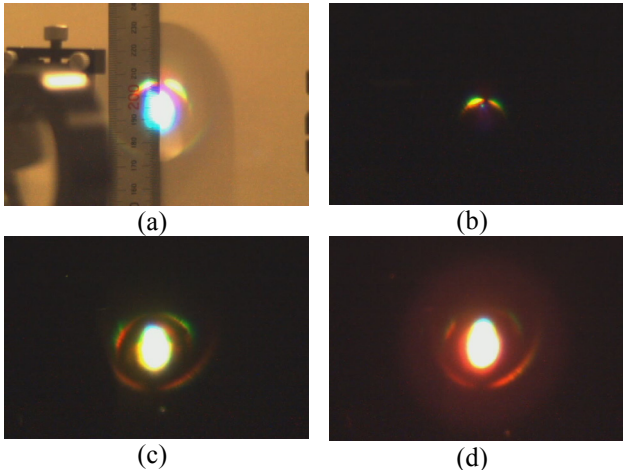


図6：間引いた電子ビームによって発振させた波長 1600nm の FEL による発光、弧状の輝線が現れている。

#### 4.2 長波長 FEL による発光

バンチを間引いた状態で波長 2160nm の FEL を発振させ同様の実験を行った。波長 1600nm の場合に比べ、長波長側にシフトした像が現れるかと思われたが、それだけではなかった。図 7 (b) に示すように中央付近のスポットの輝度が低下し、弧状の輝線が2重あるいは3重に現れるようになった。この画像では暗くて見えていないが、下側にも2重の少し半径の大きな弧状の輝線が現れている。色彩の変化に乏しいのは、カメラの特性によるのかもしれない。また、中心付近に明るいスポットが見えないのは IR カットフィルターの影響かもしれない。

結晶を垂直軸の周りに回転させても、この結晶では位相整合条件に影響しないが、可視光の発光には

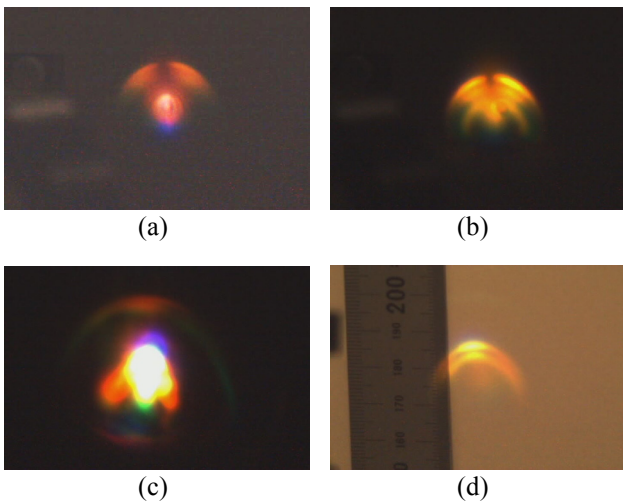


図7：間引いた電子ビームによって発振させた波長 2160nm の FEL による発光、弧状の輝線が複数現れている。(c),(d)は垂直軸の周りに回転させた場合の像。

大いに影響するようである。図 7 (c) は、5 度程度垂直軸の周りに回転させた状態であるが、中央付近に明るい可視光のスポットが出現し、弧状の輝線も上下に見えるようになっている。図 7 (d) は別の角度の組み合わせで、2 重の弧状の輝線が現れている。なお、垂直軸の周りの回転に対しては、輝線の位置は変わらず、周に沿ってパターンが移動するようである。このため、図 7 (a), (b) で見えていたような弧の切れ目(暗部)が無い。

#### 4. まとめと考察

非線形結晶 BBO による波長 1640nm の FEL の第 2 高調は発生の調整中に偶然、発散角の大きな可視光の発光現象を見出した。位相整合条件を満足する角度とは異なる角度で起き、基本波のエネルギー密度については閾値を持つようである。また、光軸に対する結晶の角度によって色合いが変化し、位相整合角に近いほど長波長の赤みがかかった光となり、離調角が大きいほど短波長で青に近い色となった。位相整合条件が満足された状態では見られなかった。赤外 FEL が可視光に変換されるのであるから、多光子過程であることは間違いないが、それが、基本波の 3 あるいは 4 光子が関与する現象か、あるいは基本波から作られた 2 倍の高調波と基本波の結合によるのか、あるいはもっと別の過程なのかは今の段階では明らかではない。スペクトルの測定からは非常に広帯域の発光であることが示唆されている。

たまたま、電子銃グリッドバルサー改良の時期と重なり、フォトン数の多いマイクロバンチを含む FEL を使って実験することができた。この場合、上記の発光現象と共にそのスポットを取り囲むような弧状の輝線が観測された。これは大強度レーザーの非線形結晶による 2 次の高調波発生過程において、基本波と 2 次の高調波の結合から生成される CCE と似ている。しかし、異なる点も多く、同じ現象であるかどうかは現段階ではなんともいえない。FEL の波長が 2160nm でも同様な、しかもやや複雑な現象が起きることが見出された。

#### 参考文献

- [1] K.Hayakawa, et al., "VISIBLE LASER GENERATION BY USING NLO CRYSTAL AT LEBRA", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 1-3, 2010, pp784-787  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj7/proceedings/P\\_5PM/P\\_EH\\_5PM/THPS008.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/P_5PM/P_EH_5PM/THPS008.pdf)
- [2] T.Tanaka, et al., "Burst-mode Operating Property of LEBRA Linac", these proceedings.
- [3] K.Nakao, et al., "Lasing of FEL with the Burst-Mode Beam at LEBRA, Nihon University", these proceedings.
- [4] Jie Bi, et al., "Colored conical emission in BBO crystal induced by intense femtosecond pulses", Optics Communications 284(2011) 670-674  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401810010217>
- [5] BI Jie, et al., "Coloured Conical Emission in BBO Crystal Pumped by Second Harmonic Femtosecond Pulses", CHIN. PHYS. LETT. Vol. 26, No. 1 (2009) 014207