

SASE 高調波の特性測定

大西 徹¹⁾、井合哲也、古川真一、猪坂 智、三原彰仁、
加藤龍好、末峰昌二、磯山悟朗
大阪大学産業科学研究所
〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

概要

阪大産研の L バンドリナックと赤外自由電子レーザー (FEL) 用アンジュレータを用いて、自発放射光増幅型 FEL (Self-Amplified Spontaneous Emission, SASE) の原理検証実験を遠赤外線領域で行っている^[1]。この実験中、SASE の基本波の成長に伴って高次高調波が生ずる非線形高調波発生による 2 次と 3 次の高調波を観測した。基本波やこれら高次高調波の特性を調べるために、アンジュレータ前方の光軸上に水平角・垂直角を遠隔操作で調節できる平面鏡を設置し、基本波と 2 次高調波、3 次高調波を分光しながらそれぞれの放射パワー・角度分布を測定した。その結果、SASE の放射角度分布はシンクロトロン放射のそれと比較して指向性が良いことが示され、さらに SASE の高次高調波の次数が高くなるにつれて指向性が高くなることがわかった。

1. はじめに

相対論的電子が磁場の作用のもとで円運動を行うとき、強力な指向性の高い放射光即ちシンクロトロン放射が発生する^[2]。一方、アンジュレータ放射はシンクロトロン放射と異なる特徴を持つ光で、その一つにシンクロトロン放射より指向性が高いことが挙げられる。以上の 2 つの放射光と発生メカニズムの異なる SASE において放射パワーの角度分布の測定実験を行った。この測定実験を行うためにアンジュレータ前方に遠隔操作できる平面ミラーを設置し、その平面鏡の角度を変えることにより、SASE の放射パワー・角度分布を測定した。その測定結果をシンクロトロン放射、アンジュレータ放射の角度広がりと比較し、SASE の指向性の高さを評価してみた。さらに、SASE の理論によると基本波の光強度の増大に伴う電子ビームの密度変調には基本波成分以外に高調波成分が含まれる。この高調波成分と密度変調の相互作用により増幅される高調波を非線形高調波と呼ぶ。我々の実験では非線形高調波の発生による 2 次と 3 次高調波を観測した。基本波とこれらの高次高調波の特性を調べるために、それぞれの放射角度分布を測定した。今回はこれまでに得られた実験結果について報告する。

2. 理論

シンクロトロン放射は、 $\sim 1/\gamma$ 程度の角度広がりをもつ。ここで $\gamma = E/mc^2$ は相対論的エネルギーである。電子ビームから放射された光には、光子ビームの太さ σ と角度発散 σ' (共に標準偏差) との積で表される次の関係がある^[3]。

$$\sigma \cdot \sigma' \geq \frac{\lambda}{4\pi} \quad (1)$$

アンジュレータの放射光は、自然角度発散 σ' を放射光の角度分布を Gauss 分布として近似することで n 次の放射に対して

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sqrt{\frac{\lambda_n}{L}} = \sqrt{\frac{1 + K^2}{2n\gamma^2 N}} = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{1 + K^2}{2nN}} \\ &\equiv \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{1}{nN}} \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことができる^[4]。ここで、N はアンジュレータ周期数であり、 $L = N \lambda_u$ はアンジュレータの長さを表す。以上の式により、シンクロトロン放射、アンジュレータ放射の角度広がり計算し、実験より得られた SASE の放射角度分布の測定結果と比較する。

3. 実験配置

実験配置を Fig.1 に示す。アンジュレータは周期長 6 cm、周期数 32 の Halbach 型アンジュレータで K 値は磁極間隔を変えることにより 0.013 から 1.472 ま

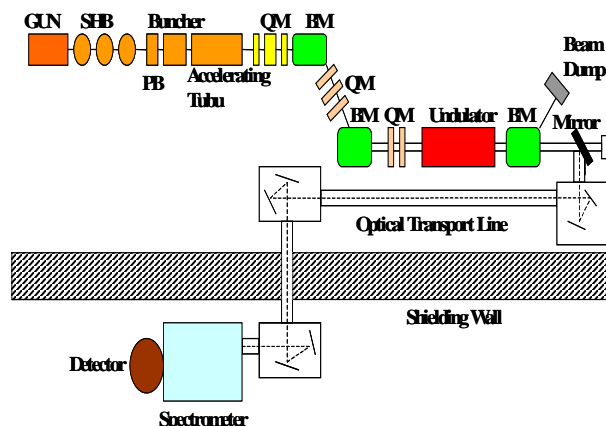


Fig.1: Schematic diagram of the linac and the FEL system

¹⁾ E-mail: onishi25@sanken.osaka-u.ac.jp

で変えることが可能である。今回、SASEの放射パワー角度分布を測定するために新しくアンジュレータ前方の光軸上に平面ミラーを設置した。このミラーは、水平角、垂直角を遠隔操作で任意の角度に調節できる。水平角、垂直角はそれぞれ-34mrad~34mradの範囲で測定でき、このミラーを実験で使用する前にHe-Neレーザーをミラーに反射させ十分に長い距離をとった場所でスポットの位置の変化を測定し、水平、垂直角それぞれ最低で13mradずつ正確に動くことを確認した。このミラーの角度を変えることによりSASEの放射パワー角度分布を測定する。このミラーで反射した光はこのミラーの設置に伴って新しく構築した光輸送路を通して分光器に導かれる。分光器には格子定数0.126の平面回折格子が設置しており、そのブレイズ波長は112 μm である。分光器によって単色化された光は液体ヘリウムで冷却されたGe:Ga検出器により検出される。

4. 実験結果

4.1 SASEの分光スペクトル

Fig.2に電子エネルギー11.7MeVにおいてSASEの分光実験で観測した波長スペクトルを示す。SASEの光強度は時間変動が大きいので連続する30個のデータを測定し、そのうち上位5個の値の平均値と標準偏差を各々の測定値と誤差棒とした。Fig.2にはピークは3つある。一番右のピークをSASEの基本波と仮定すると、その左に見えるピークは基本波のほぼ半分の波長位置に現れているので2次高調波であると考えることができ、そして一番左にあるピークは基本波の3分の1であることから3次高調波であると推測できる。この測定波長について考察してみると、電子エネルギーと産研のアンジュレータのパラメータより予想される基本波の波長は約180 μm となり、実験結果とは一致しない。この理由としてエネルギースペクトルを測定するためのホール素子の劣化により正確な電子エネルギーが測定できていない等が考えられるが、このことは現在検討中である。

4.2 SASEの放射角度分布測定

このSASE分光測定をしたときのピーク位置につ

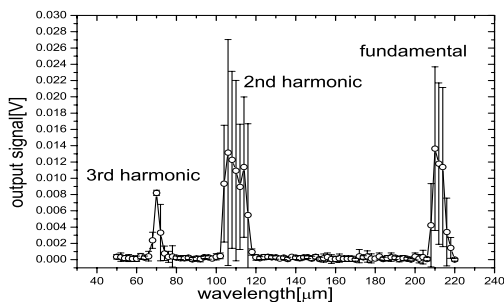
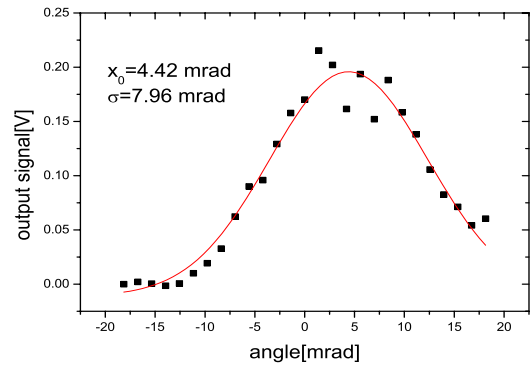
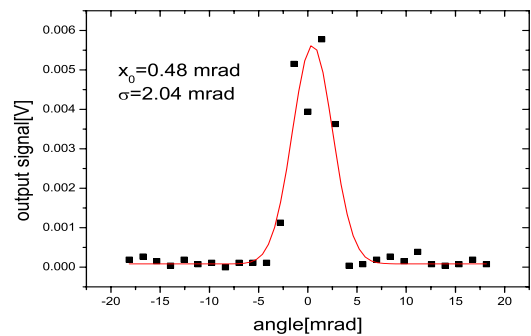
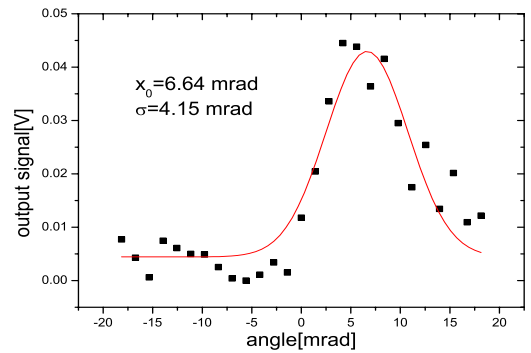


Fig.2:wavelength spectra of fundamental and higher harmonics of SASE



(a):fundamental



(c) :3rd harmonic

Fig.3:horizontal output profile of SASE

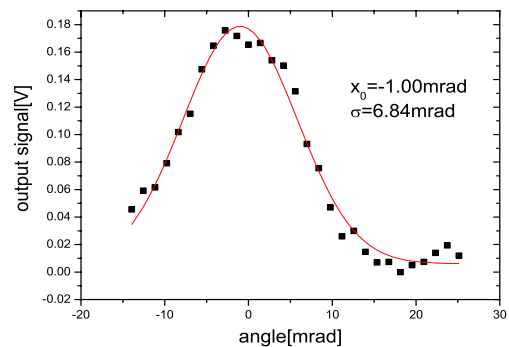


Fig.4:vertical fundamental output profile of SASE

いて放射パワー角度分布の測定を行った。Fig.3(a)~(c)に垂直方向を光軸上に固定し水平方向の基本波、2次高調波、3次高調波の放射角度分布の測定結果をそれぞれ示す。横軸の0 mrad の位置が水平方向の光軸上を表している。さらに Fig.4 には水平方向を光軸に固定した垂直方向の基本波の放射角度分布を測定した結果を示す。同様に横軸の0mrad が光軸上を表す。この測定実験では、SASE の分光測定の際と同じ理由で連続する50個のデータのピーク値を測定し、そのうち上位5個のデータの平均値を各々の測定値とした。Fig.3、4にはそれぞれ測定値を点で表し、これらのピークに対して当てはめた Gauss 分布とその中心位置 x_0 、標準偏差 σ が示した。

5 . 実験結果の解析と考察

5.1 電子ビーム軌道の光軸上とのずれ

Fig.3(a)、Fig.4 で示されている基本波の放射角度分布の測定結果より、ピークの位置が光軸上からずれていることがわかる。これは、アンジュレータに入射した電子ビームが光軸上を走っていないことを表している。通常、アンジュレータ内の光軸上を走っている電子ビームからのアンジュレータ放射を光軸上で観測すると、偶数次の光の位相は軸の左右逆になるため、偶数次の高調波は現れず、奇数次の高調波のみが観測できるはずである。しかし、電子ビームが光軸上からずれているために偶数次の高調波が確認できるようになり、2次の高調波を観測することができた。

5.2 高次高調波の指向性

式(2)より電子エネルギー11.7MeVでのアンジュレータ放射の角度広がり計算結果と実験結果から得た SASE 放射角度分布の標準偏差の値を表1に示す。基本波についてはほぼ同じ値となったが、高調波成分では計算値より小さい値が得られた。高調波の次数が高くなるにつれて角度分布の値が小さくなっていくことより、指向性が高くなっていくことが確認できる。

| | アンジュレータ放射[mrad] | SASE 実験値[mrad] |
|-------|-----------------|----------------|
| 基本波 | 7.71 | 7.96 |
| 2次高調波 | 5.45 | 4.15 |
| 3次高調波 | 4.45 | 2.04 |

表1:実験値と計算値の比較

5.3 SASE とシンクロトロン放射の指向性の比較

実験で得られた SASE の放射角度分布の結果をシンクロトロン放射の放射角度広がりと比較してみる。シンクロトロン放射の放射パワーの角度広がり、電子エネルギーが11.7MeV のとき43.6mradとなる。この値と SASE の基本波成分における放射角度の実験値と比較してみると、SASE のほうが数分の1程度に放射角度が小さいことがわかる。従って、SASE はシンクロトロン放射よりも高い指向性をもつことが確認できた。

6 . まとめ

SASE の分光スペクトルを測定し、基本波と2次、3次高調波を確認した。そして、それぞれのピークの放射角度分布の測定を行った。その結果、高次高調波になるにつれて指向性が高くなっていくことが確認できた。SASE の放射角度分布のより正確な値を得るためには、計算コード GENESIS を用いたシミュレーションの結果が必要となる。その結果と比較し、検討しなければならない。このことについては、今後の課題である。そして、SASE の指向性はシンクロトロン放射のそれよりも高いことが示された。今後、SASE の絶対強度を評価するために、標準光源として黒体炉を用いて今回新しく構築した FEL 測定系の感度校正実験を行う予定である。

参考文献

- [1]R.Kato, et al.,Nucl.Instr.and Meth. A 475 (2001) 334
- [2]J.D.Jacson ,Classical Electrodynamics
- [3]David Attwood,Klaus Halbach,Kwang-Je Kim, Sciece 228 1265 (1985)
- [4]大柳 宏之.シンクロトロン放射の基礎