

GENERATION OF X-RAYS BY LASER-COMPTON SCATTERING AND IMAGING

Fumio Sakai^{1,A)}, Terunobu Nakajyo^{A)}, Tatsuya Yanagida^{A)}, Ltd, Shinji Ito^{B)*}

^{A)}Sumitomo Heavy Industries,

2-1-1 Yatocho, Nishitokyo, Tokyo, 188-8585

^{B)}The Femtosecond Technology Research Association(FESTA)

Abstract

We have developed a high-brightness X-ray source by Laser-Compton scattering. Energy of electrons is 38MeV with 0.2% bandwidth (rms). A laser for scattering is a Ti:sapphire laser with 200mJ/pulse and 100fs (FWHM) pulse width. The generated X-rays are 33keV at maximum in a 165-degree interaction configuration and 1×10^6 photons/pulse. And the X-ray pulse in a 90-degree interaction configuration has 1×10^5 photons/pulse with 150fs pulse width estimated with electron and laser pulse parameters. X-ray imaging based on refraction-enhanced contrast has been obtained with 17keV x-ray energy.

レーザーコンプトン散乱X線の発生とX線によるイメージング

1. はじめに

我々は相対論的電子線による短パルスレーザーのフォトン散乱による高輝度X線発生装置の開発を行っている[1]。3年前に300フェムト秒短パルスX線の安定発生の実証を行った後[2]、発生X線の利用を念頭に、発生X線のエネルギー増加のための電子線エネルギー増加等の電子線システム改造、発生X線量の増大を目指したレーザー出力の増加、更により安定的なX線の発生を目指した同期系を含んだシステムの安定化、等の開発を進めてきた。その結果、正面衝突(165°)で最大33keVのX線の安定発生に成功した。また、発生X線を用いた吸収像や屈折コントラスト像などのイメージング利用も進めてきた。

ここでは、発生X線の特徴、および発生X線を用いた屈折コントラスト像などのイメージング結果について報告する。

2. 実験装置

電子線のシステム(図1)に関しては前回報告した通りであり[4]、最大38MeV(エネルギー分散:2%)、パルス電荷は0.5nCから1nC/pulseであり、規格化エミッタンスは約 $3\text{mm} \cdot \text{mrad} @ 0.8\text{nC}$ である。衝突用のレーザーはTi:sapphireレーザーで、改良により最大200mJ/pulseまで増強された。パルス幅は100fs(FWHM)である。

今回は、FESTAで開発された同期系のうち、レーザー出力の高調波を用いて2856MHzで直接比較・フィードバックする回路をガン用および衝突用レーザーに導入した。これにより同期系によるジッターは基準信号のシンセサイザーが持つ100fsに対して

無視できるレベルまで抑えることができた。環境等の変化による長時間での位相のドリフトに関しては、RFの安定化回路の導入により比較的安定しているが、利用の観点からは更に低く抑える必要があり、電子ビームの発生に起因した信号をフィードバックする方式も検討を行っている。

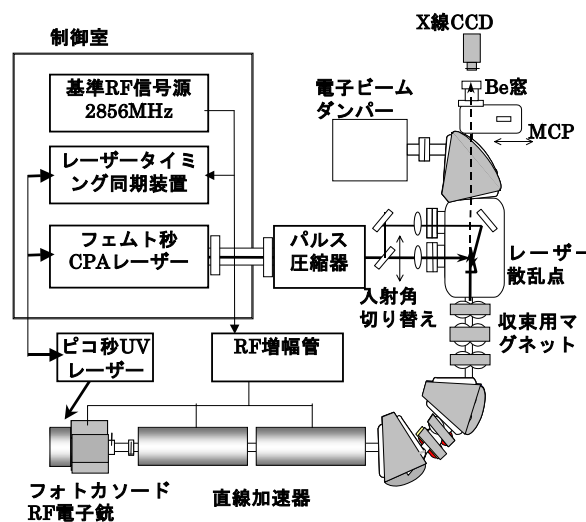


図1 電子線システム図

3. X線の発生結果

3.1 X線強度および安定性

X線の発生に関しては参考文献[5]に詳しく記述されている。図2に165°と垂直入射でのX線強度の

¹ E-mail: fmo_sakai@shi.co.jp

*現在、Laserfront Technologies, Inc. 所属

レーザーエネルギー依存性を示す。

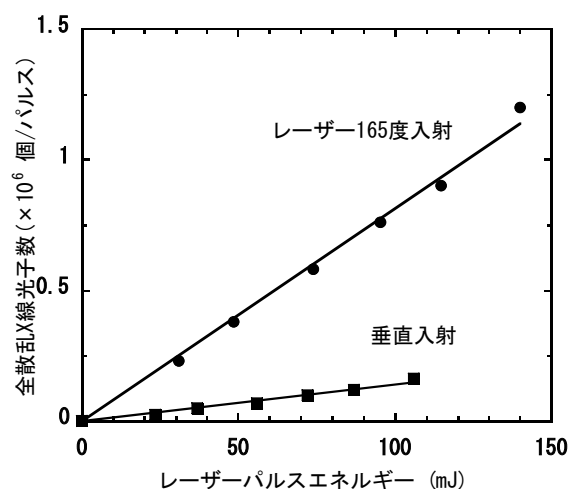


図2 X線強度のレーザーエネルギー依存

発生点で 1×10^6 photons/pulse の光子が 150mJ/pulse で得られている。これは、電子線装置の改造前の 14MeV でのシステムの一桁上であり、電子線のエネルギー増加によるビーム径の収束、レーザー光学系の改造によるレーザービーム径の収束が向上したことに起因している。また、15分間での安定度も 6% (rms) であった。この時の、レーザーの出力安定度が 4% (rms)、電子の電荷の揺らぎが 1.7% (rms) であり、主にこれらの揺らぎに起因していると考えられる。しかし、長期的には主に衝突のタイミングのドリフトと考えられる変動が生じるが、可動式の検出器を用いて実験の前後で微調整を行うことにより、同じ条件での実験（数時間程度の一連の実験）では、ほぼ同条件（ビーム中心、光子数）で実験が行われている。

また、90度衝突では発生点で 1×10^5 photons/pulse の光子が 100mJ/pulse で得られており、強度揺らぎは 11% であった。また、この時ビームパラメータの測定から、X線のパルス幅は 150fs (rms) と推定されている。

3.2 K-edge吸収端をもちいたエネルギー分布

レーザーコンプトンで発生するX線は発散角によりエネルギーが決まり、中心付近が高く、角度が大きくなるにつれエネルギーが下がることが知られている。これを確認するために、In (k-edge吸収端: 27.9keV) 及びSn (K-edge吸収端: 29.2keV) の薄膜を通してビームプロファイルを測定した。尚、165°での衝突の結果で、ビームの中心では 33.7keV である。

衝突点から 2.6m 離れた所のBe膜を通過した後（通過部分は ϕ 30mm）に蛍光板付の CCD カメラ

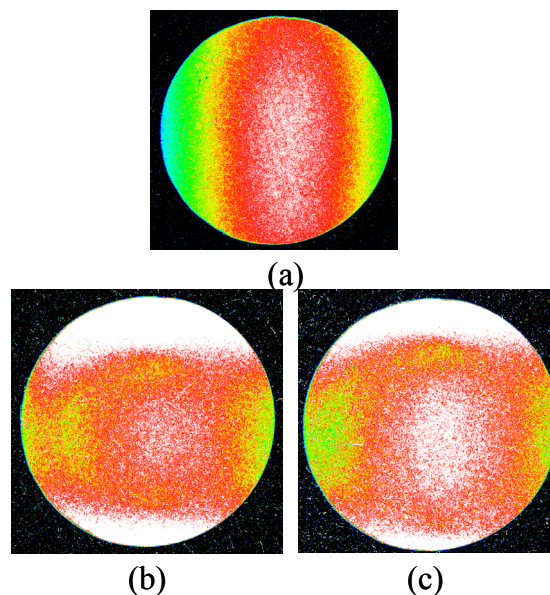


図3 X線のプロファイル

(a) 基のX線プロファイル、(b) Sn膜 ($50 \mu\text{m}$) を通した後のプロファイル、(c) In膜 ($50 \mu\text{m}$) を通した後のプロファイル

(Princeton Inst. 社製、PI-SCX1300, 分解能 $80 \mu\text{m}$) でX線のプロファイルを測定した結果を図3 (a) に示す。(b), (c) はそれぞれSn, Inの厚さ $50 \mu\text{m}$ の膜を通したもので、同じコントラストで表示したものであるが、吸収端の位置の違いから同心円状に発散角でエネルギーが変わっているのが分かる。

4. X線を利用したイメージング

4.1 屈折コントラストの原理

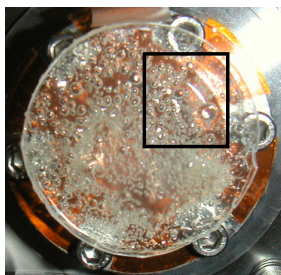
X線を用いたイメージとしては通常物質の吸収量の差を利用して行うが、吸収係数に極わずかしき差が見られない低分子で構成されている（生体）では、明瞭な差が見られないことが多くある。そこで、物質の屈折率の差（位相差）を測定することにより高感度に測定しようとする試みがなされている^{[6],[7]}。

物質のX線に対する屈折率 n は通常複素数で $n=1-\delta-i\beta$ で表され、 δ がX線の位相変化の量、 β が吸収量を表す。生体の軟部組織では、数十keVでは β が 10^{-8} のオーダーに対し、 δ が 10^{-6} のオーダーであることから 2-3桁の感度の向上が図れる。このような屈折率の差を検出する方法のひとつとして、屈折率の差のある物質の境界で起こるX線の屈折を利用して、物質の境界が強調された像をとる方法が屈折コントラスト法と呼ばれている。しかし、屈折角はたかだか数十 μrad でしかないので、小さな点光源（平行度の高い）でかつ単色で無ければ検出することは困難で、放射光やマイクロフォーカスのX線管でしか測定されていなかった。レーザーコ

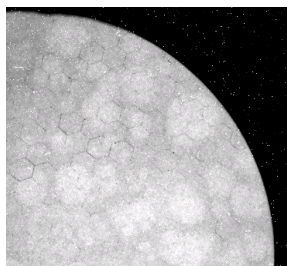
ンプトンによるX線は、点光源であり、かつ角度によってX線のエネルギーが決まる単色性を併せ持つことから、光源として有望と考えられてきた。

4.2 気泡の屈折コントラスト像

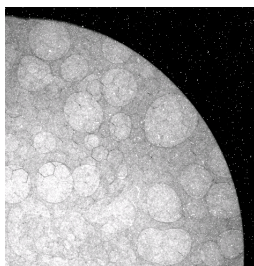
我々は、接着剤の中に気泡を入れて測定を行った。図4(a)にサンプルの写真、(b)、(c)に物質と検出器の距離10cmにした吸収像、及び距離を1.2m離れたときの像を示す。(b)、(c)は(a)の四角で囲った部分を拡大したものであり、(b)では気泡の輪郭がはっきりしないのに比べて、(c)ではより境界が鮮明になり、屈折によるコントラストの強調が見られる。尚、像では六角形の模様が見えているが、これは蛍光板とCCDカメラを結ぶファイバーの像である。また、このときに使用したX線のエネルギーは中心付近で17keVになるように電子線のエネルギーを27MeVまで下げて165°衝突で実験を行った。



(a)



(b)



(c)

図4 接着剤中の屈折コントラスト像
(a)サンプル写真、(b)吸収像、(c)屈折コントラスト像

4.3 生体の屈折コントラスト像

また、生体としてダンゴ虫と同様に撮った像を図5に示す。(a)はサンプルと検出器の間が1cm、(b)は1.2mの場合である。サンプルの全長は約1cmで、(b)の方が触覚部、足の部分の境界が鮮明に見える。

まだ、放射光等で撮影した場合に比べて鮮明な像が得られていないが、光源に問題があるのか、検出器の分解能の問題なのか、それ以外に原因があるのか検討中である。

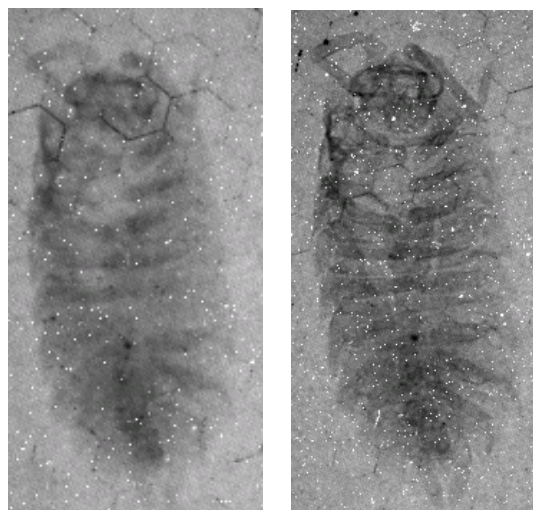


図5 ダンゴ虫屈折コントラスト
(a)吸収像、(b)屈折コントラスト像

5. おわりに

最大エネルギー33keVのX線発生が可能なレーザーコンプトン散乱X線源の開発を行った。また、発生するX線を用いて、金属片中の欠陥測定、屈折コントラスト測定などのイメージングテストを実施し、その性能を実証した。今後は、産業技術総合研究所と共同で、利用実験を進めるとともに、平均強度の増強などの装置改造を進めていく予定である。

尚、本研究開発は、NEDOの委託を受けてフェムト秒テクノロジー研究機構で実施したものである。

参考文献

- [1] 遠藤彰 “フェムト秒高輝度X線発生技術” 応用物理学誌、71, 200-203(2002)
- [2] F. Sakai, and et al. "Short Pulse X-ray Generation by Laser-Thomson Scattering", Proceeding of the 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, 2696-2697(2001)
- [3] F. Sakai, and et al., "Status of Laser-Compton X-ray Generation project for FESTA", Proceeding of SPIE 48th Annual Meeting, San Diego, (2003)
- [4] F.Sakai, et al., "Development of High Brightness Electron Source for Laser-Compton Scattering" "Proceedings of the 1th Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2004
- [5] 柳田達哉 “フェムト秒高輝度X線源の開発”、応用物理学誌、74, 482-486(2005).
- [6] 籠島靖、他、"X線屈折コントラストイメージング”、日本写真学会誌、64, 2, 119-125 (2001)
- [7] 百生 敦、他、"位相コントラストによる欠陥イメージング”、放射光、14, 2, 107-111 (2001)

