

## Soft X-ray generation via inverse Compton scattering and its application

Shuichi Minamiguchi<sup>1,A)</sup>, Kentaro Hidume<sup>A)</sup>, Taku Saito<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>,  
Ryunosuke Kuroda<sup>B)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>C)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>D)</sup>, Junji Urakawa<sup>D)</sup>, Kiminori Ushida<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup>RISE Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555

<sup>B)</sup>AIST, 1-1-1 Umezono, Tsukubashi, Ibaraki 305-8568

<sup>C)</sup>ISIR Osaka University, 8-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

<sup>D)</sup>KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

<sup>E)</sup>RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

### Abstract

Soft X-ray source using photo cathode RF-gun has been developed at Waseda University. We have succeeded to generate the 8.4ps (rms) X-ray at 370 eV via Inverse Compton scattering between 1047 nm Nd:YLF laser and 4.6 MeV electron beam. The energy of the X-ray is included in the range of "water window (250-500eV)" so that the X-ray is useful for the biological observation. For the application, we are developing X-ray profile measurement techniques using a photo resist film or X-ray CCD. In this paper, we show the experimental results and some future plans.

## 逆コンプトン散乱を用いた軟X線生成とその応用

### 1. はじめに

現在高輝度短パルスX線は物理、化学のみならず医療、産業等様々な分野で求められている。この発生方法についても多くの研究が行われており、中でも逆コンプトン散乱によるX線発生方法は、高輝度、短パルス性、エネルギー可変性などの有用な特徴を兼ね備えたものとして注目されている<sup>[1]</sup>。この発生方法は今まではレーザーや電子ビームの性能という点で実現が困難であったが近年の電子ビームの高品質化、レーザー制御技術の発展により実現が可能なものとなってきた。早稲田大学ではRF-gunシステムを用いたテーブルトップサイズの高輝度軟X線発生装置の構築と生体観測用の軟X線顕微鏡への応用を目指して研究を進めている<sup>[2]</sup>。

### 2. 逆コンプトン散乱

逆コンプトン散乱とは、高エネルギーの電子が低エネルギーの光子を高エネルギーの光子として弾性散乱させる現象であり、電子の静止系で見れば、通常のコンプトン散乱に他ならない。

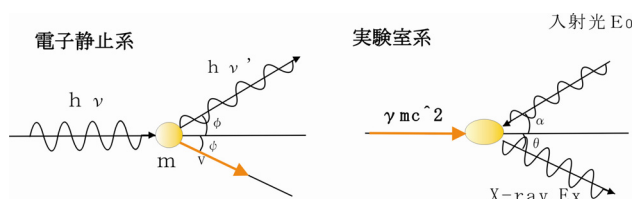


図1 コンプトン散乱概念図

ここで実験室系での散乱光子のエネルギーは次式で与えられる。

$$E_x = \frac{mc^2 \gamma^2 (1 + \beta \cos \theta)(1 + \beta \cos \alpha) E_0}{mc^2 + \gamma(1 + \cos \theta)(1 + \beta \cos \alpha) E_0} \quad (1)$$

ここで $\gamma$ はローレンツ因子、 $\beta = v/c$ 、 $m_0$ は電子の静止質量、 $c$ は光速である。上式よりX線のエネルギーは、電子のエネルギー、レーザーの波長、衝突角、散乱角を変えることで変化することがわかる。

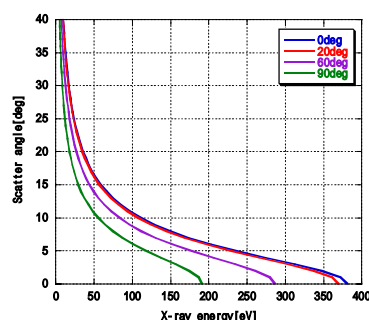


図2 散乱角とエネルギーの関係

図2は電子のエネルギーが約4.6MeV、レーザー波長1047nmの時のX線エネルギーの散乱角分布である。今回の実験では衝突角20度での衝突を行っており、散乱X線の最大エネルギーは約370eVであることが計算される。また、微小散乱角を切り出すことによって、エネルギー幅0.1%未満の準単色なX線が得られる。このエネルギーのX線は、たんぱく質や核酸の吸収係数に対し水の吸収係数が一桁程度小さい領域である「水の窓」(250-500eV:波長2.5-5nm)領域に含まれている。この領域には生体を主に構成している、炭素(284eV:4.4nm)、窒素(400eV:

<sup>1</sup> E-mail:s.m-rikou@asagi.waseda.jp

3.1nm)、酸素(532eV : 2.3nm)のK殻吸収端が存在し、この領域のX線を生体に照射し、吸収率の差によるコントラストをとれば試料を脱水することなく生きた状態で細胞内の炭素、窒素、酸素の分布を観察することが可能である<sup>[3]</sup>。これらの特徴は、光学顕微鏡や電子顕微鏡にはない特徴である。

また、X線発生光子数  $N_x$  は実験室系での散乱断面積  $\sigma$  とルミノシティー  $L$  から次のように求められる。

$$N_x = \sigma \times L \quad (2)$$

本システムで生成される光子数は上式より20度衝突の場合、およそ  $1.9 \times 10^4$  photons/pulse と計算される。

### 3. 衝突実験

#### 3.1 実験装置

図3に早稲田大学での逆コンプトン衝突実験セットアップ図、表に実験時の電子ビームとレーザーのパラメーターを示す。

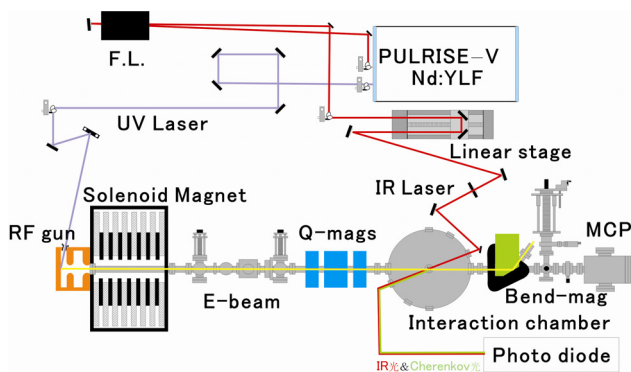


図3 実験セットアップ

波長	1047nm
エネルギー	10mJ/pulse
ビームサイズ x	80μm
ビームサイズ y	80μm
パルス幅	10ps (FWHM)
繰り返し周波数	5Hz

表1 レーザーパラメーター

ビームエネルギー	4.6MeV
電荷量	600pC
ビームサイズ x	280μm
ビームサイズ y	250μm
バンチ長	10ps (FWHM)
繰り返し周波数	5Hz

表2 電子ビームパラメーター

レーザーシステムから発振されたIRレーザー (Nd:YLF, 1047nm) はフラッシュランプ励起によるアンプシステムを2度増幅させ、ディレイステージを通過した後、光学レンズを用いて集光し、衝突チャンバーに20度の角度で入射した。一方、電子

ビームはUVレーザー (Nd:YLF, 4倍高調波262nm) を用いたフォトカソードRF-gunシステムにより得た。このIRレーザーとUVレーザーは同じレーザーの基本波と4倍波を用いているため、電子ビームとIR光は高い精度で同期がとれているという特徴がある。RF-gunにより発生させた電子ビームはソレノイド電磁石と4極電磁石によって集束し、衝突チャンバーに入射した。衝突後、発生したX線と電子ビームをアナライザーマグネットにより分離した。またX線の検出にはMCP (Micro Channel Plate) を用いた。MCPは衝突点から84cm下流に設置し、MCPの有効面積から、検出有効散乱角は約8.5mradであった。

#### 3.2 タイミング調整

電子ビームとレーザーのタイミング調整については、衝突点にガラスとAlミラーから成る板を挿入して、電子ビームはチェレンコフ光に変換しミラーによってレーザーの光軸に沿って反射させ、レーザーはガラス板に開けたピンホールを通した。この二つの光をフォトダイオードを用いてタイミングを観察しながらリニアステージで光路長の調整を行った。このように同一の検出器を用いることにより、時間応答性を考慮せずに幾何学的な距離のみによってタイミング調整を行えるようにした。

#### 3.3 実験結果

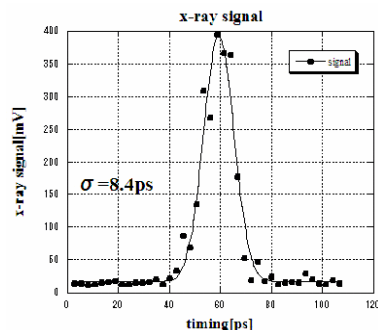


図4 MCPによって得られたX線シグナル

図4にディレイラインを操作して電子ビームとレーザー光のタイミングを変化させたときのMCPで得られた散乱X線の強度と光学ディレイの関係を示す。X線のシグナルはピークで約400mV、時間プロファイル8.4psであり、MCPのゲインが  $5 \times 10^6$ 、MCPの表面の量子効率が10%とすると全発生光子数  $1.6 \times 10^4$  photons/pulse であることがわかった。またこの発生光子数は実験パラメーターでの全発生光子数の理論値 ( $1.9 \times 10^4$  photons/pulse) とほぼ一致した。

### 4. 生体顕微鏡への応用

現在生体顕微鏡への応用の第一段階としてレジストへの密着露光によるX線像の記録方法を検討している。この方法は試料を透過したX線の強度分布をレジストにより記録し、そのX線像の読み出しに原

子間力顕微鏡 (AFM) を用いる。このため、十分な光量が得られれば数nmの分解能が期待できる。

#### 4.1 レジスト材特性評価

X線像記録用に化学増幅型ポジフォトレジスト (東京応化製; deep-UV用、PMMAベース) を採用し、その特性評価を行った。まずシリコンウエハ上にレジスト材をスピコートし薄膜を作成した。作成したレジスト薄膜にNiマスク (100 $\mu$ mメッシュ) を装着し、放射光 (住友重機械工業製; AURORA-2S) により露光を行い、感光波長帯の評価を行った。その際100 $\mu$ mポリエチレン膜や12 $\mu$ mアルミ膜などを挿入して放射光の強度分布を調整した。この結果、本レジスト材は約1.5keV以上のX線には感度がないことはわかった。図5に放射光を露光、現像後のレジスト表面のAFM画像を示す。また早稲田大学のX線発生システムでバックグラウンドに感光しないかを確認するために電子ビームを出しながらのバックグラウンドX線露光も行った。約90分間行ったが感光は観察されなかった。

以上の結果より、本レジスト材は水の窓領域の軟X線に感度を持つことが期待でき、バックグラウンドによる影響を考慮しなくてもよいことがわかった。

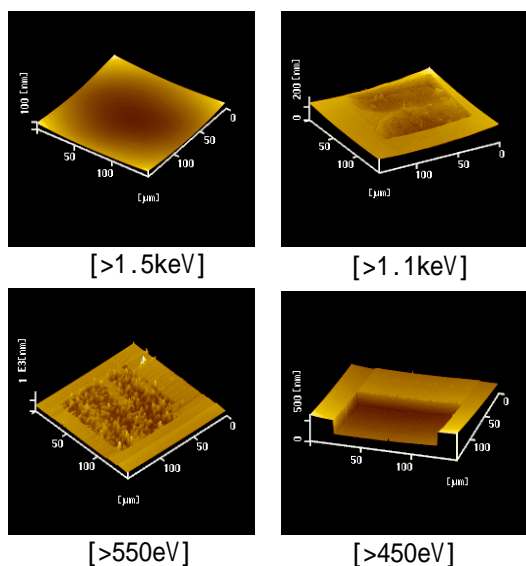


図5 レジスト表面のAFM像  
( [ ]内は照射SRのエネルギー)

#### 4.2 UVプレ照射法の評価

本レジスト材は図6のように照射量が少ない場合は全く感光せず、感光閾値以上の照射量で感光がみられるという感度特性を示す。この感光閾値は逆コンプトン散乱で発生させた軟X線光量に比べ大変大きいものであり、生体顕微鏡の実現への問題となっている。そこで軟X線での照射量を減少させるため、X線照射を行う前にあらかじめ感光閾値付近まで必要な光量をUVランプにより照射する「プレ照射法」を考案した。プレ照射により感光閾値までの光量が蓄積されるため、X線照射 (ポスト照射) では少ない光量で感光が期待できる。

プレ照射法の評価をプレ照射およびポスト照射共にUVランプ光源 (波長; 248nm) を用いて行った。図7はそれぞれ230 $\mu$ J/cm<sup>2</sup>、250 $\mu$ J/cm<sup>2</sup>プレ照射後のポスト照射のみでの感度特性である。従来の単純露光に比べ、それぞれ約1/5、1/13倍の照射量での感光が確認された。

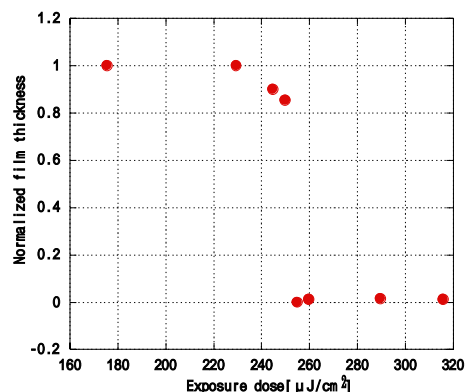


図6 レジスト感度特性

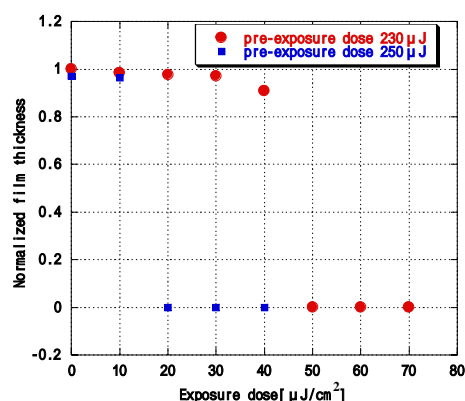


図7 プレ照射を用いた感度特性

## 5. まとめと今後の予定

早稲田大学では逆コンプトン散乱により、370eV、 $1.6 \times 10^{11}$  photons/pulseの軟X線の生成に成功した。現在は生体顕微鏡への応用を目指し、像記録用のレジスト材の高感度露光法を研究しており、従来の単純露光法に比べ、約1/13の光量での感光が期待できる「プレ照射法」を考案した。

今後は生体顕微鏡の実現に向け、ゾーンプレートを導入する。生成X線を集光することによりこれまでに比べ4~6桁程度の高輝度化が期待され、さらにエネルギー幅0.1%未満の単色X線によって数秒程度の露光時間での像記録が可能であると思われる。また、同時にX線CCDによるX線プロファイル測定も検討していく。

## 参考文献

- [1] M.Yorozu et al., Jpn.J.Appl.Phys. Vol.40(2001) pp.4228-4232 Part1, No.6A, June 20
- [2] R. Moriyama et al. Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan
- [3] 篠原邦夫 レーザー研究、18,944(1990)