

DEVELOPMENT OF HIGH BRIGHTNESS SOFT X-RAY SOURCE BASED ON INVERSE COMPTON SCATTERING

Ryo Moriyama^{1,A)}, Yoshio Kamiya^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}, Tomoko Gowa^{A)}, Akihiko Masuda^{A)}, Masakazu Washio^{A)},
 Ryunosuke Kuroda^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{C)}, Hitoshi Hayano^{D)}, Junji Urakawa^{D)}, Kiminori Ushida^{E)}

A) Advanced Research Institute for Science Engineering Waseda Univ,
 3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

B) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

C) Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,
 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

D) High Energy Accelerator Research Organization,
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

E) RIKEN,
 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

Abstract

Compact soft x-ray source based on inverse Compton scattering have been developed at Waseda University. Using 1047nm laser light from Nd:YLF laser scattered off 4.2MeV electron beam generated from a photo-cathode rf-gun, we have already succeeded to generate the soft x-ray. The energy of this x-ray is included in the part of water window, in which absorption by water is much less than that of moleculars that organize a living body. Furthermore, this x-ray source has other features such as short pulse, proportional mono-energy and energy variableness. Because of these features, the application to the biological microscope has been expected. However, the flux of x-ray is not satisfied for the biological microscope application. Therefore, to multiply a soft x-ray flux, we utilized multi-pass amplifier for the laser light and improved a collision chamber. In this conference, we will report the experimental results and future plans.

レーザーコンプトン散乱を用いた軟X線の生成

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^{[1][2]}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。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。これまでの実験で水の窓領域における軟X線の生成に成功しており、生体顕微鏡の実現に向けて更なる軟X線の高輝度化が期待されている。

2. 水の窓領域の軟X線

2.1 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。また、逆コン

トンス散乱における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、散乱角により決定される。

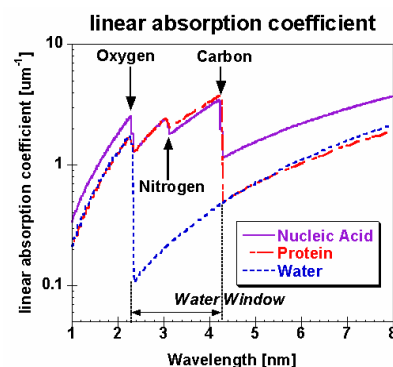


図1 散乱角と生成X線エネルギー

図1は電子のエネルギーが約4.6 MeV、レーザーの波長1047 nmの時のX線エネルギーである。衝突角を20度とした時の散乱X線のエネルギーは最大約370 eVであることがわかる。また、超前方微小散乱角を切り出すことによって、エネルギー幅0.1%未満の準単色のX線が得られる。

¹ r_wood331@moegi.waseda.jp

2.2 水の窓領域

我々の施設で生成する事のできるX線のエネルギーは水の窓領域と呼ばれるエネルギー領域に含まれている。このエネルギー領域のX線は、水による吸収が少ないにもかかわらず炭素、酸素、窒素などの生体構成分子による吸収が大きい。このため「水の窓」^[3]と呼ばれる。このエネルギー領域の軟X線を用いると、水による軟X線吸収の影響を抑え、X線の吸収差によるコントラストをとることで炭素、窒素の密度分布によるができるため、生体の観測に適している。

3 . 軟X線生成

3.1 軟X線生成方法

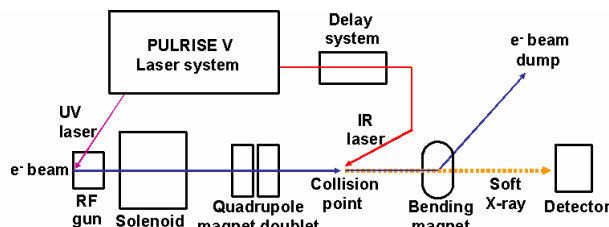


図2 軟X線生成システム

軟X線生成システムの概要図を図2 に示す。衝突用レーザーにはフラッシュランプを用いた増幅器によりアンプされたIRレーザー(Nd:YLF, 1047 nm)を、ビーム源にはフォトカソードRF-GUNを用い、プロファイルを最適化したUVレーザー(262 nm)を入射することによって高品質の電子ビームを生成している。これらを衝突角20度で衝突させることによる逆コンプトン散乱により軟X線生成を行った。このIRレーザーとUVレーザーとは同じレーザーシステムの基本波と4倍波を用いている為、非常に高い精度で同期しているのが本システムの特徴である。軟X線生成時の衝突点での電子ビームとIRレーザーのパラメータについては表1の通りである。

また、軟X線の検出にはMCP (Micro Channel Plate)を用いた。さらに、現在軟X線のプロファイル測定用に軟X線用CCDによる測定も行っている。

表 1 衝突点におけるビームパラメータ

| IR laser parameters | | Electron beam parameters | |
|----------------------|------------------|--------------------------|-------------------|
| Wavelength | 1047 nm | Beam energy | 4.6 MeV |
| Pulse energy | 10 mJ/pulse | Bunch charge | 600 pC |
| Beam size σ_x | 80 μm | Beam size σ_x | 280 μm |
| Beam size σ_y | 80 μm | Beam size σ_y | 250 μm |
| Pulse width | 10 ps (FWHM) | Bunch length | 10 ps (FWHM) |
| Repetition rate | 5 Hz | Repetition rate | 5 Hz |

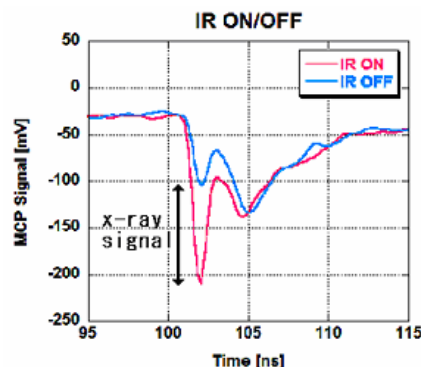


図3 軟X線シグナル (MCP)

図3にこれまでにMCPにより検出された軟X線のシグナルをしめす。これにより計算される軟X線の検出光子数は 1.9×10^2 photons/pulse^[4]、衝突点での総発生光子数は 1.6×10^4 photons/pulse^[5]である。

3.2 従来のシステムの問題点

以上のように軟X線の生成に成功しているが、更なる応用実験の実現の為に以下のような問題点があげられる。

1. 軟X線CCDを用いたプロファイル測定のために10²倍の光子数が必要となる。
2. 軟X線CCDにおいてチャンバー内で乱反射した衝突用IRレーザーの揺れが軟X線の検出予定カウント数以上に検出され、生成軟X線の検出が困難である。
3. 電子ビームハローのビームライン内での制動放射光によるバックグラウンドが多く検出されており、MCPによる測定の妨げとなっている。

4 . 衝突部チャンバーの改造

4.1 チャンバー改造内容と目的

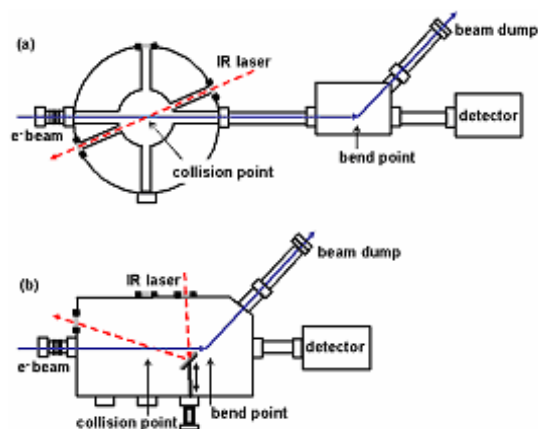


図4 チャンバー概要図

(a)旧チャンバー (b)改造衝突部チャンバー

高輝度軟X線の生成、及びバックグラウンドの削減

を目指し、図4のような新しい衝突部チャンバーを設計し、製作した。この新しいチャンバーにおける改善点は以下の通りである。

改善点1 衝突部チャンバーと電子ビーム分離部チャンバーの一体化

これにより、制動放射光によるバックグラウンドが大幅に減少することが見込まれる。これに付随して、電子ビームをより効果的に絞ることが出来るようになり、衝突点におけるスポットサイズ縮小による総発生光子数の増加も期待される。

改善点2 チャンバー内のIRレーザーガイド管の排除、及び内部の中空化

このことにより軟X線CCDにおけるバックグラウンドの原因であったチャンバー内でのIRレーザーの乱反射を防ぐことができる。また、チャンバーのビューポートに対してIRレーザーの光路に角度をつけることにより、検出器に到達する散乱光が削減されることを見込まれる。

改善点3 チャンバー内にミラーを設置

このミラーを用いてIRレーザーを衝突点に誘導する。このシステムにより、衝突角をこれまで(15 deg)よりも鋭角にとることが出来るようになり、ルミノシティの向上が見込まれる。また、ミラーの位置と角度を変えることにより、ある程度任意のエネルギーで軟X線を生成することが可能となる。

4.2 チャンバー改造による制動放射光バックグラウンドの減少

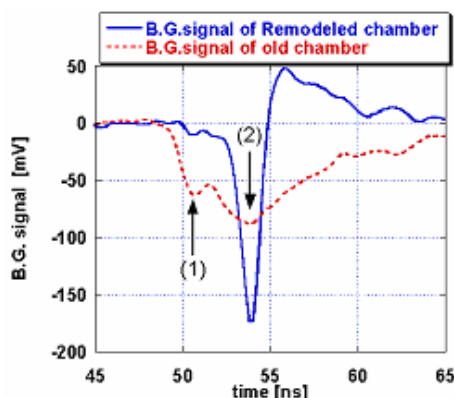


図5 バックグラウンドシグナル(MCP)
RF位相40 deg、電荷190 pC

図5に改造衝突部チャンバー導入後のMCPによる制動放射バックグラウンドの測定結果を示す。軟X線のシグナルは図中の(1)のピーク上に現れるため、チャンバーの改造によりバックグラウンドを約1/6にまで削減することに成功したといえる。(2)のピークは検出ラインから分離された電子ビームがビームラインの最下流でダンプされた際のシグナルである。さらに改造チャンバーでは旧チャンバーよりも電子ビームを強収束させてもバックグラウンドが増加し

ないことが確認された。このことにより今までよりも衝突点での電子ビームのスポットサイズを小さく、またルミノシティの高い条件で衝突実験を行うことができる。

4.3 チャンバー改造によるIRレーザーバックグラウンドの減少

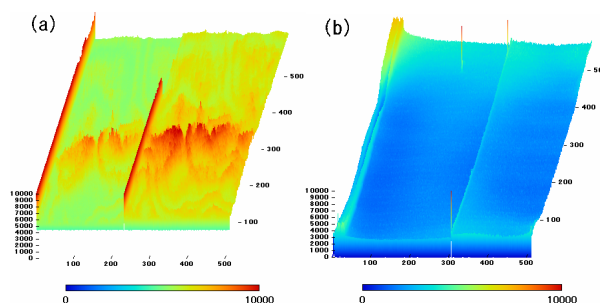


図6 IRレーザーバックグラウンド(CCD)
(a)旧チャンバー (b)改造衝突部チャンバー

図6に改造衝突部チャンバー導入後の軟X線CCDによるIRレーザー光バックグラウンドの測定結果を示す。なお、IRレーザー以外の要因によるバックグラウンドは引いた結果である。データは10秒間50パルス(5 Hz)の積算であり、IRレーザー以外の要因によるバックグラウンドを引いた結果である。図6より検出強度、強度分布幅、共に大きく減少していることがわかる。また軟X線プロファイルを測定する際に非常に重要となる、ショットごとの揺れについても予定軟X線検出強度を下回ることも確認された。

5. まとめ

早稲田大学では逆コンプトン散乱を用いた軟X線の生成に成功している。しかし、軟X線CCDによる軟X線プロファイルを観測する為にはX線光子数を現在の 10^2 倍程度まで増やし各種バックグラウンドを削減する必要がある。そのために新しい衝突部チャンバーの設計、作成を行った。その結果MCPにおける制動放射バックグラウンドを従来の約1/6に削減し、電子ビームをより効率的に収束させることが出来るようになった。さらに、軟X線CCDにおけるIRレーザーによるバックグラウンドにおいても大幅な改善が確認された。今後は、これらのシステムを用いることによって更なる生成X線の高輝度化を目指す。

参考文献

- [1] W. Leemans et al., Proc. of PAC'95, p.174 (1995).
- [2] S. Kashiwagi et al., NIM A455, 36 (2000).
- [3] B. L. Henke et al., Atomic Data and Nuclear Data Table27(1982).
- [4] R. Kuroda et al., Proc. of EPAC'04, p.2684 (2004).
- [5] R. Kuroda et al., Proc. of FEL'04, p.468 (2004).