

早稲田大学 RF 電子銃システムを用いた高輝度 X 線発生

大島 崇^{A)}、石川 裕記^{A)}、柏木 茂^{A)}、黒田 隆之助^{A)}、濱 義昌^{A)}
矢田 明^{A)}、鷲尾 方一^{A)}、浦川 順治^{B)}、早野 仁司^{B)}

^{A)} 早稲田大学理工学総合研究センター

〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

1.6 セル BNL タイプの RF 電子銃システムが早稲田大学理工学総合研究センターに設置された。これにより高品質電子ビームの生成が可能となった。このシステムを用いて、2001 年度中に電子ビームとレーザーパルスを用いた逆コンプトン散乱による高輝度 X 線発生実験を行う。RF 電子銃システム及び逆コンプトン散乱実験において必要不可欠なタイミング同期系の確立を行った。また、発生 X 線の特性について理論的に調べ、200-450 eV の軟 X 線が 10^4 - 10^5 個程の光子数で発生することが分かった。

1 はじめに

近年、高品質電子ビーム生成に有用であるフォトカソード RF 電子銃が注目を集めている。RF 電子銃には、(i) レーザーシステムによってビームの時間構造が制御可能、(ii) バンチャーシステムが必要ない、(iii) 高い加速勾配による低エミッタンスビームが生成可能、といった利点がある。高品質電子ビームは、物理、化学をはじめ、産業利用や医療分野での利用もできるため、あらゆる分野への応用が可能である。

1.6 セル BNL タイプの RF 電子銃システムが早稲田大学理工学総合研究センター喜久井町キャンパスに設置された。これにより、高電荷、短パルス、低エミッタンス電子ビームの生成が可能となった。早稲田大学 RF 電子銃システムは、高品質レーザーシステム、高安定 RF 源と Mg カソード RF 空洞から構成されている。RF 電子銃入射用レーザーとして全固体ピコ秒 Nd:YLF レーザー(住友重機:PULRISE V)を用いることで、時間的、強度的に非常に安定したレーザーを得ることができる。RF 源として 10 MW S-band クライストロン(Tomson:TV2019B6)と小型パルスモジュレータ(日新電機)を用いており、出力パルスの高安定化に成功している。更に、高加速勾配における暗電流の減少のために、空洞及びカソードをダイヤモンド加工した。この RF 電子銃システムを用いた応用実験のひとつとして、レーザーパルスと電子ビームとの逆コンプトン散乱による短パルス X 線発生実験を行う。

逆コンプトン散乱実験においては、電子ビーム、レーザー、RF などの時間的な同期が不可欠である。我々は電子ビームとレーザーとの衝突角をいくつか選択することによって、異なる波長の X 線の発生を考えている。逆コンプトン散乱のための同期系の確立と、衝突角の違いによる発生 X 線についてのシミュレーション結果について報告する。

2 早稲田大学 RF 電子銃システム

1.6 セル BNL タイプの RF 電子銃を早稲田大学理工学総合研究センター喜久井町キャンパス内の実験室に設置した。カソードとして Mg を使用しており、高電荷電子ビームを達成する。更に、カソード、RF 空洞共にダイヤモンド加工を施しており、高加速勾配における暗電流の減少も達成される。

ビームラインとしては、電子源として RF 電子銃、エミッタンス補正のためのソレノイド電磁石、ビーム特性測定のためのビームポジションモニタ、ビームプロファイルモニタ、ファラデーカップなどを設置した。また、エネルギー測定及び逆コンプトン散乱 X 線との分離のための偏向電磁石、電子ビーム収束用の四極電磁石の設置を予定している。RF 電子銃以外に加速管を用いないため、非常にコンパクトなビームラインとなっている。また、RF 源として用いる 10 MW S-band クライストロン(Tomson:TV2019B6)と、小型パルスモジュレータ(日新電機)は強度ジッターが 0.38% 以下、フラットトップ 1.5 μ s 以下のパルスに対して平坦度 0.25% 以下を実現している。このため、RF 空洞内に 100 MV/m 以上の安定した高加速勾配を実現できる。早稲田大学 RF 電子銃システムの配置図を図 1 に示す。

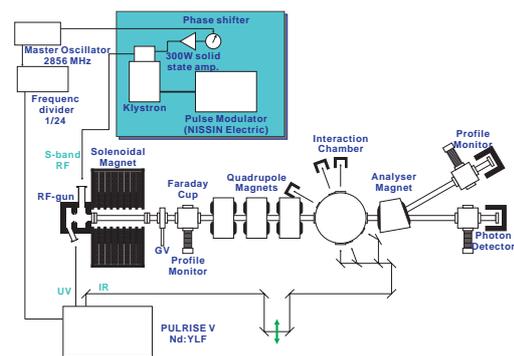


図 1: 早稲田大学 RF 電子銃システム配置図

RF 電子銃入射用レーザー^[1]として、全固体ピコ秒 Nd:YLF レーザーシステム(住友重機:PULRISE V)を用いている。このシステムは、発振器部、繰返増幅部、波長変換部から構成されている。2856 MHz の基準 RF 信号と同期した 119 MHz で発振した受動モードロックレーザーを繰返増幅し、最大 25 Hz (これも 2856 MHz の基準 RF 信号と同期している)の増幅されたレーザーを得る。波長は 1047 nm で、パルスあたり 4 mJ の強度まで増幅される。二つの BBO (BaB₂O₄) 結晶で高調

波発生を行い、基本波 (以下 IR) を波長 524 nm の第二高調波 (green)、262 nm の第四高調波 (UV) へと変換する。パルスあたりの強度はそれぞれ 2.5 mJ、0.6 mJ である。フォトカソード照射用レーザーとしては UV を用いる。表 1 にレーザーの特性を示す。このレーザーシステムは時間安定化装置、強度安定化装置を備えており、時間ジッター 0.26 ps、強度ジッター 0.11 % を実現している^[2]。

表 1: レーザーの特性

種類	Nd:YLF
発振方法	受動モード ロック
パルス幅 (FWHM)	~10 [ps]
波長 IR	1047 [nm]
green	524 [nm]
UV	262 [nm]
最大出力 IR	4 [mJ/pulse]
green	2.5 [mJ/pulse]
UV	0.6 [mJ/pulse]
繰返周期	1-25 [Hz]

これらの RF 信号、レーザーへの参照 RF 信号、レーザーの繰返は全て同期が取れている。図 2 に同期系の概略図を示す。

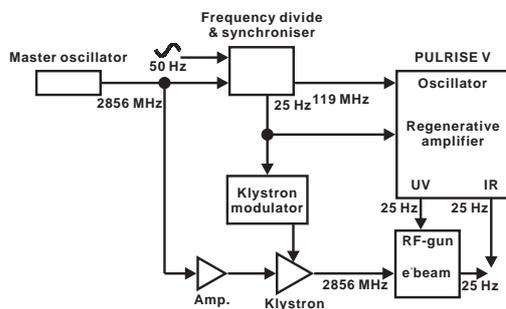


図 2: 同期系概略図：全ての信号が基準 2856 MHz 信号と同期している。

このような RF 空洞と良く同期した、RF 信号、レーザーシステムを用いることで、安定した電子ビームが得られる。レーザーの繰返周期 (最大 25 Hz) と同じ繰返周期で、エネルギー 5 MeV、電荷量 3 nC、パルス長 ~ 10 ps (FWHM) の電子ビームが生成される。

3 X 線発生

安定したレーザーパルスと電子ビームとの逆コンプトン散乱^[3] による X 線発生実験を 2001 年度中に早稲田大学で開始する。電子ビームとレーザーのパラメータを表 2 に示す。

散乱 X 線のエネルギーは散乱の前後での電子と光子の運動量とエネルギーが保存することから次式で与えられる。即ち、

$$E_X = \frac{E_l E_e (1 - \beta \cos(\varphi))}{E_l (1 + \cos(\varphi - \theta)) + E_e (1 - \beta \cos(\theta))} \quad (1)$$

表 2: 電子ビームとレーザーのパラメータ

電子ビーム	
ビームエネルギー	3.0-5.0 [MeV]
電荷量	3 [nC/bunch]
パルス長 (FWHM)	10 [ps]
ビームサイズ (σ_x/σ_y)	100/100 [μm]
レーザー	
波長 (IR)	1047 [nm]
波長 (UV)	524 [nm]
強度 (IR)	4 [mJ/pulse]
強度 (UV)	2.5 [mJ/pulse]
パルス幅 (FWHM)	10 [ps]
スポットサイズ (σ_x/σ_y)	30/30 [μm]

但し、 E_l 、 E_e はレーザーの光子エネルギーと電子のエネルギー、 φ は電子ビームとレーザーとの衝突角、 θ は X 線光子の散乱角である。図 3 にそれぞれのパラメータの関係を示す。

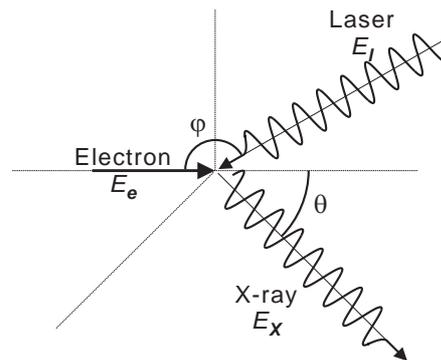


図 3: 逆コンプトン散乱概略図

発生する X 線は、所謂「水の窓」と呼ばれるエネルギー領域の軟 X 線で、生体観察に非常に有益である。生体を主に構成しているのは、水素、酸素、炭素、窒素であり、「水の窓」領域の X 線は酸素の K 吸収端よりもエネルギーが低いために水にはほとんど吸収されず、窒素、炭素はこの領域に K 吸収端を持つ^[4]。このため、生体内の多くを占める水を透過し、かつ窒素や炭素を成分とする核酸や蛋白質に良く吸収される。電子顕微鏡などでは、生体を観察する際、脱水が必要となるが、「水の窓」領域の X 線を用いることで生体を生きたまま観察することができる。早稲田大学 RF 電子銃システムにおける応用のひとつとして、この生体観察軟 X 線顕微鏡としての活用を目指す。

式 (1) から、異なるエネルギーの X 線を発生させる要素として、レーザーの種類 (レーザーの波長)、電子ビームのエネルギー、衝突角、そして散乱角の 4 つのパラメータがあることが分かる。それぞれのパラメータを変化させた時の発生 X 線の特性を調べてみた。

図 4、5 はそれぞれ、電子ビームのエネルギーの違いによる発生 X 線の最大エネルギー、レーザーの波長、衝突角の違いによる発生 X 線の最大エネルギーを示している。電子ビームのエネルギーを変化させることは、

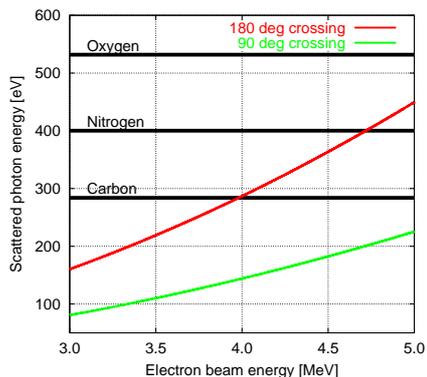


図 4: IR レーザーを用いて衝突角 180 度、90 度の時の電子ビームのエネルギーを違いによる発生 X 線の光子エネルギーと酸素、窒素、炭素の K 吸収端

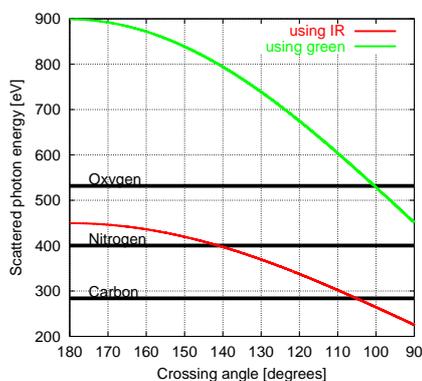


図 5: IR、green レーザー、5 MeV の電子ビームを用いた時の衝突角の違いによる発生 X 線の光子エネルギーと酸素、窒素、炭素の K 吸収端

電子ビームの不安定化につながる。また、レーザーも green レーザーでは、「水の窓」領域の X 線が発生しない。そこで我々は、衝突角を変えることで異なるエネルギーの X 線が発生させる。表 3 に衝突角と X 線の特性の関係を示す。発生 X 線の光子数は、Klein-仁科の公式から求めた実験室系での散乱断面積と、電子ビームとレーザーの形状などを考慮したルミノシティから計算したものである。表における光子数は、全方向に散乱する光子で、検出数としては 1 桁程少なくなる。また、発生する X 線のエネルギー分布は、散乱角の関数として表すことができる。図 6 に幾つかの衝突角での発生 X 線の散乱角とエネルギーの関係を示す。

表 3: 異なる衝突角における発生 X 線の最大エネルギーと光子数

衝突角 ϕ [degrees]	X 線の最大エネルギー [eV]	X 線の光子数 [photons/pulse]
180	450	3.8×10^5
160	436	1.2×10^5
120	337	3.7×10^4
90	225	2.1×10^4

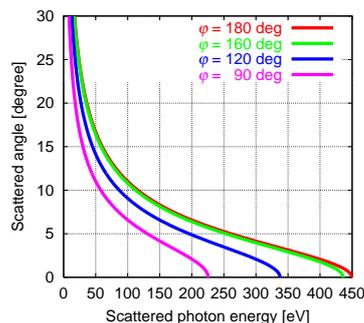


図 6: 異なる衝突角における発生 X 線の散乱角とエネルギーの関係

4 まとめ

高加速勾配における暗電流低減のためにダイヤモンド加工された Mg カソードと RF 空洞、非常に安定な RF 源、レーザーシステムによって、高電荷、短パルス、低エミッタンスで、安定な電子ビームが生成される。これと良く同期したレーザーを用いた逆コンプトン散乱によって、光子数として 10^4 - 10^5 個程、エネルギー領域としては、生体観察に適した「水の窓」領域の軟 X 線が得られる。生体観察として使用するには、光子数が少ないため、光子数をより多く獲得するため、電子ビーム、レーザーそれぞれを更に絞る、強度をあげる、などしていく必要がある。

2001 年度に早稲田大学 RF 電子銃システムの運転の開始、電子ビームの正確な特性の測定を開始し、更に逆コンプトン散乱実験を行う。

5 謝辞

RF 電子銃について、BNL の I. Ben-Zvi 教授、X. J. Wang 博士に大変お世話になりました。レーザーについては、フェムト秒テクノロジー研究機構の遠藤 彰博士、高砂 一弥博士に多大な助けをしていただきました。ここに感謝の意を申し上げます。また、本研究の一部は早稲田大学特定課題研究助成 99B-C29 の補助によって実施されています。

参考文献

- [1] A. Endo, "Highly stabilized femtosecond Ti:sapphire laser designed for beam interaction experiment", Nucl. Inst. and Meth. A, vol. 455 (2000) No.1 p.228
- [2] T. Oshima et al., "All-solid-state picosecond laser system for photo cathode rf gun and X-ray generation at Waseda University", PAC2001, Chicago, June 2001.
- [3] S. Kashiwagi et al., "Observation of high-intensity X-rays in inverse Compton scattering experiment", Nucl. Inst. and Meth. A, vol. 455 (2000) No.1 p.36
- [4] B. L. Henke et al., Atomic Data and Nuclear Data Table 27 (1982)