

半導体レーザーアレイを用いたレーザーコンプトン γ 線源の検討

STUDY OF LASER COMPTON GAMMA-RAY SOURCE USING LASER DIODE ARRAY

天野壮[#], 吉川大久, 宮本修治
Sho Amano[#], Taku Yoshikawa, Shuji Miyamoto
University of Hyogo

Abstract

We propose a new scheme with a “side-on-collision” between an electron-beam and laser beams emitted from high-power laser diode arrays in order to obtain high power laser Compton gamma-ray. To calculate a gamma-ray flux in NewSUBARU, we measured powers, spectra and spatial characteristics of a typical GaAlAs laser diode array. Using the measured results and the data of electron beam at BL01 in NewSUBARU, we calculated a laser gamma-ray luminosity to be 9 photons/mA/W/sec with the “side-on-collision”. This indicates that a laser cavity to enhance Compton backscattering is required in this scheme. We conclude that the “side-on-collision” scheme with the cavity is expected to generate gamma-ray flux more than 10^8 photons/sec.

1. はじめに

兵庫県立大学ニュースバルでは、楕円形の電子蓄積リングの長直線部の一つ (NS-BL1) を用いて、レーザーコンプトンガンマ線を供してきた。これは、電子とレーザー光子との相互作用距離を長くとって、できるだけ多くのガンマ線量を得るという思想に基づく。現在、主に用いているレーザーは波長 $1.06 \mu\text{m}$ の Nd:YVO₄ レーザーと波長 $10.6 \mu\text{m}$ の CO₂ レーザーであり、それぞれに対してガンマ線ルミノシティ $6000 \text{ photons/mA/W/sec}$ [1]、 $7300 \text{ photons/mA/W/sec}$ [2]を得ている。またガンマ線最大フラックスは $\sim 10^7 \text{ photons/sec}$ となり、多くの応用実験に用いられている。

応用実験上、より多くのガンマ線量が望まれる。そこで今回、新規の衝突法を提案してニュースバルレーザーコンプトンガンマ線の高出力化が出来ないか検討した。レーザーコンプトンガンマ線は従来、多く施設でも、相対論的電子ビームに逆方向からレーザーを入射して正面衝突 (A、B 点) で光子を散乱させて発生させていた (Fig. 1)。この方式だと配置できるレーザーは一台に限定されるので、発生ガンマ線の高出力化には、この一台のレーザーを、高ビーム品質を保ったまま高出力化するしかなかった。しかし、これには限界がある。そこで本研究において、Fig. 2 のように電子ビームの進行方向の真横から複数個のレーザーを配置して生成ガンマ線の出カスケールアップ則が確立できないか検討した。

尚、本稿では今後、Fig. 1 の正面衝突の形態を「ヘッドオン衝突」、Fig. 2 の 90 度衝突を「サイドオン衝突」と記す。90 度衝突によるレーザーコンプトンとしては、f-sec の短パルスガンマ線生成[3]や電子ビームのバンチ構造評価[4]に使われた例があるが、本研究のようにガンマ線高出力化のために行われた例は他に知らない。

本研究では先ず、ガンマ線量を予測するためサイド衝突の計算コードを開発した。用いるレーザーは小型で高出力な GaAlAs 半導体レーザーアレイ (LDA) とし、計算に必要な LDA の出力、波長スペクトル、空間特性を実測した。この測定結果を使ってニュースバルでの実験 (BL1 中央部、電子エネルギー 1GeV) を想定してシミュレーションした。

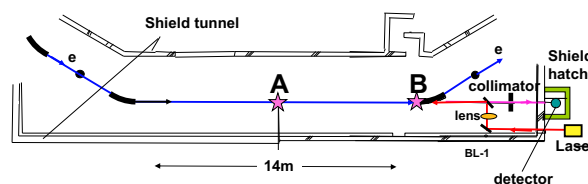


Figure 1: Head-on-collision at NS-BL01 for laser Compton gamma-ray generation (present status).

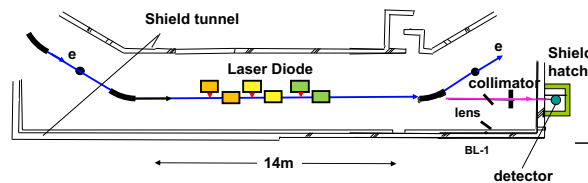


Figure 2: Side-on-collision at NS-BL01 for laser Compton gamma-ray generation (proposal).

2. コンプトンガンマ線計算式

レーザーコンプトンガンマ線のフラックス n_γ (photons/sec)は Eq. (1)で表される。

$$n_\gamma = c(1 - \beta \cos \theta_1) \sigma \int U_e U_l dV \quad (1)$$

ここで、 U_e , U_l はそれぞれ電子ビームとレーザーの空間分布を表す。

[#] sho@lasti.u-hyogo.ac.jp

衝突断面積 σ はクライン仁科の公式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 2 \left[\frac{r_0 k_2}{x_1 \mu} \right]^2 \left[4 \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} \right)^2 - 2 \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} \right) - \left(\frac{x_1 + x_2}{x_2 x_1} + \frac{1}{E} \right) \right] \quad (2)$$

の微分断面積より求められて、

$$k_2 = \frac{k_1 (1 - \beta \cos \theta_1)}{\left[1 + k_1/E - \beta \cos \theta_2 - k_1 \cos(\theta_2 - \theta_1)/E \right]} \quad (3)$$

ここで

$$x_1 = -\frac{2\gamma k_1}{\mu} (1 - \beta \cos \theta_1) \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{2\gamma k_2}{\mu} (1 - \beta \cos \theta_2)$$

である。 k_1, k_2 はそれぞれレーザーとガンマ線エネルギー、 θ_1, θ_2 はそれぞれ衝突と散乱角度を表す。または r_0 古典電子半径、 μ は電子静止エネルギーである。上式でヘッドオン衝突の時は $\theta_1 = \pi$ 、サイドオン衝突の時は $\theta_1 = \pi/2$ 、また後方散乱を考慮するので $\theta_2 = 0$ とする。

Equation (1)よりガンマ線フラックスを計算するには、電子とレーザーの空間分布 U_e, U_l が判らないといけないが、この内 U_e についてはニュースバル BL1 での値は判っている[2]。そこで次に U_l について実測した。

3. 半導体レーザーアレイ特性

本方式で想定しているレーザーは小型で高出力な一次元 GaAlAs 半導体レーザーアレイ (LDA) である。測定に用いた LDA は発光エリアが $1 \text{ cm} \times 1 \text{ }\mu\text{m}$ であり、そこから cw 20 W のレーザー出力が得られた。発光スペクトル波長は 804 nm である。

ピンホールスキャン法により測定した発光空間パターンを Fig. 3 に示す。水平・垂直方向共ガウシアンで近似して、その空間伝搬特性を示したのが Fig. 4 である。これからビームウエスト (水平: 6.8 mm、垂直: 0.48 μm)、 M^2 因子 (水平: 1.54、垂直: 1.1) が求められ U_l が決定できた。

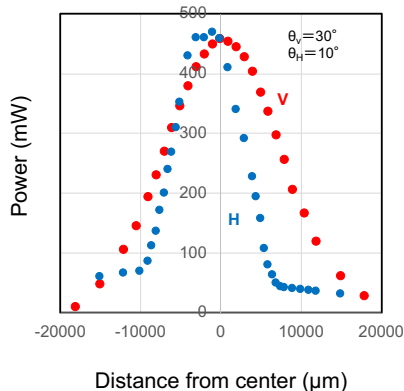


Figure 3: Spatial patterns of the LDA.

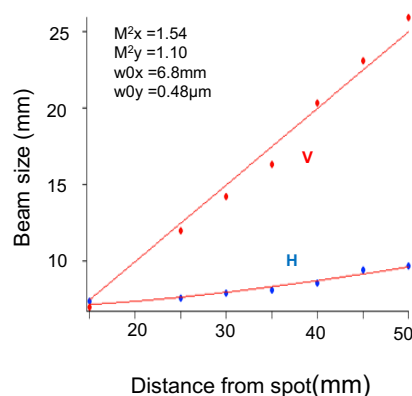


Figure 4: Beam sizes of the LDA.

4. 結果と考察

LDA 測定結果を使ってニュースバルでの実験 (BL1 中央部、電子エネルギー1GeV) を想定して、サイドオン衝突をシミュレーションした結果、エネルギーが 11MeV のガンマ線がルミノシティ 9 photons/mA/W/sec で得られ事が判った。これはヘッドオン衝突時の ~ 7000 photons/mA/W/sec に比べ3桁ほど小さい値である。この違いはレーザーと電子ビームの相互作用長に起因する。ニュースバル直線部を使ったヘッドオン衝突実験では作用長が ~ 10 m であるのに対して、サイドオン衝突では作用長はレーザービーム水平直径の 1 cm 程度にしかならない。従って、単純なレーザー1パスのサイドオン衝突ではガンマ線フラックスが稼げない。

そこで作用長を伸ばすためにレーザー光を閉じ込める共振器の導入を提案する。これは著者らによって、かつてヘッドオン衝突実験用に提案された共焦点を持つマルチパス共振器[5]の応用である。ケーススタディとして、この共振器で 30 倍の衝突回数 (作用長) が得られ、電子ビーム電流 300mA、LDA 単体の出力 200W (市販品) である時、LDA を 6 個以上並べれば、現状のニュースバルガンマ線量を一桁上回る 10^8 photons/sec のフラックスが得られる。また、そのガンマ線量は LDA 個数に比例してさらに増加でき、出力スケールアップ則が成り立つ。

謝辞

本研究は平成 29 年度兵庫県立大学特別研究助成 (先導研究 A 個人) を受けたものである。

参考文献

- [1] K. Horikawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A618, 2010, pp.209-215.
- [2] S. Amano *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A602, 2009, pp.337-341.
- [3] Y. Taira *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A637, 2011, pp.S116-S119.
- [4] W. P. Leemans *et al.*, Phys. rev. lett. 77, 1996, pp.4182 - 4185.
- [5] S. Amano *et al.*, Jpn. J. App. Phys. 40, 2001, pp.654-655.