

SBS パルス圧縮による高輝度レーザーコンプトンガンマ線源

大東 出, 神門正城, 静岡俊行, 早川岳人, ANGELL Christopher, 羽島良一, 大垣英明¹⁾

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門, ¹⁾京都大学エネルギー理工学研究所

(原稿受付: 2012年8月20日 / 原稿受理: 2012年9月26日)

レーザーコンプトン散乱ガンマ線を用いた核物質非破壊検知システムにおいて必要とされる高輝度ガンマ線源開発を行っている。市販の Nd:YAG レーザーのパルス幅を圧縮し、電子ビームとの衝突点でのレーザー光子密度を上げるによりガンマ線発生量を2桁増加させた。

Keywords:

laser-Compton backscattering gamma-ray, nuclear resonance fluorescence, Stimulated Brillouin Scattering, non-destructive inspection

2001年の米国同時多発テロ以降、テロを未然に防ぐためのセキュリティ装置開発の要求が高まっている。そのため、レーザーコンプトン散乱 (Laser Compton Scattering: LCS) ガンマ線による核共鳴蛍光 (Nuclear Resonance Fluorescence: NRF) を用いた、コンテナ等に隠ぺいされた核物質の非破壊検知装置を提案している[1, 2]。本装置では MeV ガンマ線をプローブとして用いるため、物質に対する透過力が高く、数～数十 mm の金属、コンクリート等で遮蔽された核種の検知が可能である[3, 4]。

本研究は、核物質非破壊検知に必要と見積もられる LCS ガンマ線量、 10^5 個/秒を実現するために行われた。2009年までの研究では、市販のジュール級 Nd:YAG レーザー (パルス幅 8 ns) を用いて LCS ガンマ線を発生し[5]、 2.2×10^3 個/秒の強度のガンマ線を生成した。しかし、目標とする線量まで2桁ほど足りない。ガンマ線強度を高めるには電流やレーザー出力を上げる他に、レーザーと電子の交差時間内に含まれるレーザー光子密度を上げることが挙げられる。レーザーパルスと電子ビームの交差時間は、電子ビーム、レーザーの集光スポット径、交差角に依存するが、交差角 1.5° においては高々数百 ps である。このため、パルスに含まれる光子のLSCガンマ線への変換効率を上げるにはパルス幅を交差時間程度に圧縮することが有効な手法である。

Nd:YAG レーザーのパルス圧縮には、実用を考慮して簡便な誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering: SBS) 法を用いる[6]。SBS 散乱は入射光、散乱光とフォノンとの干渉により生じる。フォノンの寿命はSBS媒質により決まり、フォノンが減衰すると後方散乱光への変換も減衰していく。このため、得られる圧縮パルス幅はフォノンの寿命により決定される。今回我々の目標とするパルス幅 200–300 ps を達成するために媒質としてフッリナート FC-40 (3M 社製) を用いた[7]。SBS パルス圧縮装置のレイア

ウトを図1に示す。使用した Nd:YAG レーザーは Continuum 社製 Power Lite 9010, パルス幅は波長 1064 nm において 8 ns (FWHM) である。SBS 媒質は内部にパイレックスガラスを挿入したステンレスパイプと AR (Anti-Reflection) コートを施した窓により構成される SBS セル内に充填される。パルス圧縮に際して SBS セルは長さ 1.5 m のセルを二本用い、2つのセルの間に集光用平凸レンズを設置、二本目のセル内で入射光強度が SBS 閾値を超え、後方散乱光が生じるようにする。後方散乱光は二本目のセルを出るころには十分成長し、一本目のセルではビーム径を絞らなくても十分な強度となりさらに増幅していく。SBS 後方散乱光は厳密に 180° 散乱であるため、入射光と圧縮光の分離のため、直線偏光である Nd:YAG レーザーからの光を $1/4$ 波長板 (QWP) で円偏光に変換、SBS 後方散乱光は再度 QWP を通過することにより、入射光とは直交する偏光面を持つ直線偏光に変換され、偏光子 (TFP) のより入射光から分離される。その後、電子ビームとの相互作用点に集光、あるいは時間波形、空間プロファイル等の計測を行う。時間波形の測定には 12 GHz Photo-Diode (New Focus 社製 1567A), 反射率測定には Ophir 社製パワーメータ (Model: 50ABF-DIF-18) を用いた。

図1に圧縮後のパルスの時間波形とSBSセルによる反射率の入射エネルギー依存性の測定結果を示す。反射率はパルスエネルギー 50 mJ を超えるあたりから約80%の一定値を取り、パルス幅も短くなっていき 100 mJ を超えるあたりから 200–300 ps 程度の値が得られた。ジッターは 200–250 ps (r.m.s.) 程度で、これは Nd:YAG レーザーの外部トリガー - 出力パルス間のジッターに相当し、パルス圧縮を行うことによるジッターの増加はみられない。圧縮光の集光点での空間プロファイルは非圧縮のそれに対し、若干の悪化 (ピーク含有率の悪化) がみられるが、集光点での強

High Flux Laser-Compton Scattered Gamma-Ray Source by SBS Pulse Compressed Laser

DAITO Izuru, KANDO Masaki, SHIZUMA Toshiyuki, HAYAKAWA Takehito, ANGELL Christopher, HAJIMA Ryoichi and OHGAKI Hideaki

corresponding author's e-mail: daito.izuru@jaea.go.jp

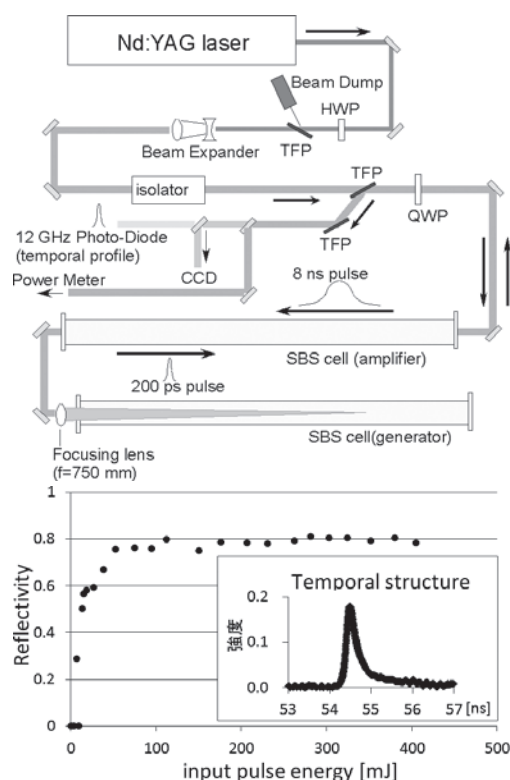


図1 (上図)SBSパルス圧縮器模式図。(下図)SBSパルス圧縮器の反射率のパルスエネルギー依存性と圧縮パルスの時間波形(下挿入図)。

度増加による利得と比較すると問題にはならない。

圧縮パルスによるLCSガンマ線発生実験は日本原子力機構関西光科学研究所にあるマイクロtron電子加速器[8]を用いて行った。U-235, Pu-239の検知に必要とされるガンマ線エネルギーは1.7~2.5 MeVであるが、マイクロtronの電子ビームのエネルギーが150 MeVという制約のため、波長1064 nmのレーザーを用いて最大LCSガンマ線エネルギー400 keVを生成した。マイクロtronからの電子ビームは繰り返し10 Hz、バンチあたりの電荷は48 pCである。Nd:YAGレーザーは電子ビームバンチと同期した信号をもとに分周し5 Hzで駆動、1ショットごとにレーザー+電子ビーム、電子ビームのみの測定を行った。この方法で、電子ビームからの制動放射ガンマ線の影響を評価する。マイクロtronからの電子ビームは真空槽内で集束、一方圧縮されたレーザー光は焦点距離2.3 mの平凸レンズにより集光、電子ビームとの相互作用点(電子ビーム集束点)に交差角 1.5° で対向入射される。相互作用点下流には電子ビーム偏向電磁石が設置され、電子ビームとLCSガンマ線との分離を行う。

LCSガンマ線量の測定は、LCSガンマ線を直接測定する方法と、ビーム軸上に設置されたAl板からの散乱ガンマ線の計測によって行われた。直接測定法では、ビーム軸0度方向に設置したLYSOシンチレータ($20 \times 20 \text{ mm}^2$, 厚さ5 mm)で計測された。LYSOシンチレータは、結晶と光電子増倍管(PMT)との間にNeutral Density (ND) フィルターを挿入することによりシンチレーション光を減光し、ショットあたりのガンマ線によるエネルギー損失が最大

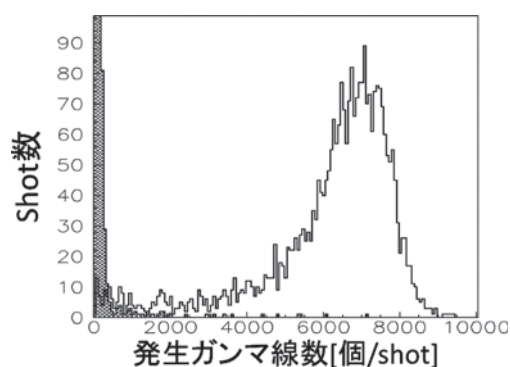


図2 0度方向に設置したLYSOシンチレータによるショットあたりのガンマ線収量分布。ガンマ線量0近傍の網掛け部分は電子ビームのみの測定における線量分布。

3.7 GeVまで測定が可能となるよう調整した。LYSO検出器はガンマ線源による光量-エネルギー校正、NDフィルターでの減光率、検出器の立体角、検出効率、Al板での減衰、および発生ガンマ線スペクトルを考慮し、PMTからの信号強度をもとにショットあたりのガンマ線量を見積もった(図2)。一方、散乱ガンマ線計測法では、ビーム軸上に設置したAl板(厚さ3 mm, 回転角 45°)からの散乱ガンマ線を、GSO検出器($20 \times 20 \times 50 \text{ mm}$, 設置角は 90° と 135°)で測定した。測定されたガンマ線数を、Al板の厚さ、立体角、およびGSO結晶サイズ等をもとにモンテカルロシミュレーション(EGS5)により見積もった検出確率で除することにより、発生ガンマ線量を導出した。

レーザーパルスエネルギー178 mJにおいて3000ショットの実験におけるガンマ線量は、直接測定では $(6.3 \pm 1.5) \times 10^3$ 個/shotであり、散乱ガンマ線数測定では $(5.58 \pm 0.24) \times 10^3$ 個/shotであり、誤差の範囲で一致した。直接測定の結果は、パルスエネルギー1 Jあたり、繰り返し周波数10 Hzに換算すると 3.5×10^5 個/秒に相当する。

今回、パルスエネルギー1 JのNd:YAGレーザーを300 ps程度にパルス幅を圧縮することで、核物質の非破壊検知装置に必要な毎秒 10^5 個のLCSガンマ線が発生可能なことを実証した。今後電子ビーム源、ガンマ線検出器を含む総合的な検知装置開発を行っていく。

本研究は科学技術戦略推進費、「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム“ガンマ線による核物質非破壊検知システム”」の支援により行われた。

参考文献

- [1] H. Ohgaki *et al.*, Proc. 2010 IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security 525 (2010).
- [2] R. Hajima *et al.*, THPS098, Proc. IPAC2011.
- [3] R. Hajima *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 45, 441 (2008).
- [4] N. Kikuzawa *et al.*, Appl. Phys. Express 2, 036502 (2009).
- [5] K. Kawase *et al.*, Nucl. Instrum. Methods. A637, S141 (2011).
- [6] C. Brent Dane *et al.*, IEEE J. Quantum. Electron. 30, 1907 (1994).
- [7] H. Yoshida *et al.*, Opt. Exp. 17, 13655 (2009).
- [8] M. Kando *et al.*, Proc. PAC-1999, 3702 (1999).