

Development of coherent THz source using AIST S-band compact linac and its applications

Ryunosuke Kuroda^{#A)}, Hiroyuki Toyokawa^{A)}, Masafumi Kumaki^{A,B)}, Yoshitaka Taira^{A)}, Masahito Tanaka^{A)}, Norihiro Sei^{A)}, Kawakatsu Yamada^{A)}, Mitsuaki Tachibana^{B)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Koichi Kan^{C)}, Takuya Natsui^{D)}, Mitsuhiro Yoshida^{D)}

^{A)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

^{B)} RISE, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan

^{C)} ISIR, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK) 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

The high power coherent terahertz (THz) radiation sources have been developed on the basis of a compact S-band electron linac at AIST. The linac consists of a Cs-Te photocathode rf gun, two 1.5 m-long acceleration tubes and a magnetic bunch compressor. The linac generates about 40 MeV, 1 nC electron bunch and compresses it into less than 1 ps (rms). The THz radiation is generated in three methods with the ultra-short electron bunch. One is THz coherent synchrotron radiation (THz-CSR) for the imaging applications and we have been obtained some THz images of various samples with the scanning transmission imaging system. Second is THz coherent transition radiation (THz-CTR) for the THz time-domain spectroscopy system (THz-TDS) and we have successfully demonstrated THz-TDS with some samples using the EO sampling method. Third is THz coherent cherenkov radiation (THz-CCR) for the novel high power THz radiation source and the THz-CCR have been observed with the zero-bias Schottky diode in the preliminary experiment. In this conference, we will describe details of our coherent THz sources and its applications.

産総研 S バンド小型リニアックを用いた コヒーレント・テラヘルツ光源の開発と利用

1. はじめに

独立行政法人産業技術総合研究所（産総研：AIST）では、Sバンド小型リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱X線源^[1]、及びコヒーレント・テラヘルツ光源の開発と利用研究^[2]を行っている。ここでは約10m×10mの1つの中規模実験室に、電子源、加速管、電磁石、マイクロ波源、光源レーザー装置等全てのコンポーネントを設置している。コヒーレント・テラヘルツ放射光生成のための電子ビームは、まずCs-TeレーザーフォトカソードRF電子銃^[3-4]とUVレーザーによって、1nC、約4MeVの電子ビームを生成し、1.5mの $\pi/2$ モード定在波加速管（APS型）2本で最大42MeVまで加速する。加速した電子ビームは、アхроマティックアーク部（2個の偏向電磁石と4個の四極電磁石）によって、磁気パルス圧縮により1ps以下の超短パルス電子ビームに圧縮している。テラヘルツ領域のコヒーレント放射光の生成は、この超短パルス電子ビームを用いた3つの手法で行っている。まず1つめの手法として、コヒーレント・シンクロトロン放射光（CSR）では、下流の90度偏向磁石により生成しており、0度のビームラインと、20度の2つのビームラインを設置し、主にイメージング応用を行っている^[5]。2つめの手法としては、レーザーコンプトン散乱を行っているチャンバー部に、アルミ板等の金属ターゲットを挿入し、コヒーレント遷移放射光（CTR）を生成

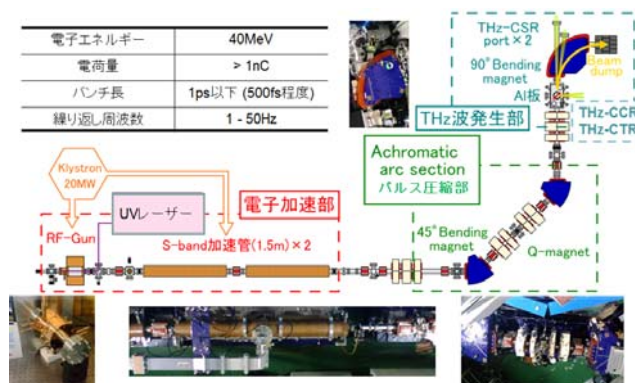


図1：Sバンド小型リニアックを用いた
コヒーレント・テラヘルツ放射光源

している。ターゲットを45度傾けることで、放射をビーム軸から垂直方向に取り出し、テラヘルツ光学系を用いたテラヘルツ時間領域分光（THz-TDS）への適用を行っている^[6]。三つ目の手法としては、前述と同様のチャンバーにて、金属ターゲットのかわりに金属コーティングを施した誘電体チューブを挿入し、電子ビームを通過させることによりコヒーレント・チェレンコフ放射光（CCR）を生成している。これらの高出力コヒーレント・テラヘル放射光パルスは、低損失の単結晶水晶窓（z-cut）によって大気中に取り出し、テラヘルツ利用研究に使用している。

[#] ryu-kuroda@aist.go.jp

2. コヒーレント・テラヘルツ光源

2.1 THz-CSR光源

上述のように産総研Sバンド小型リニアックでは、テラヘルツCSRのビームラインを、偏向電磁石の0度（直線部）と、20度の2本設定している。0度のラインでは、これまでその放射パワーを測定するため、Virginia Diodes, Inc.(VDI)社のテラヘルツパワーメータ(Model: PM4)を用いたパワー測定を行っている。このパワーメータはカロリメータの検出方式をとることで最小分解能10 nW、RMSノイズレベル10 nWの高感度を示し、波長域も0.075~2 THzまで測定可能である。同時に、ピコ秒レベルのテラヘルツパルスにも感度があることが特徴である。しかしながら、電子ビームからのCSRは、

$$\langle \theta_{rad}^2 \rangle^{1/2} \sim \frac{1}{\gamma} \left(\frac{2\omega_c}{\omega} \right)^{1/3}$$

で示される広がり角をもっており^[7]、40MeV電子ビームによるテラヘルツ領域のCSRでは約142 mradとなり、取り出し窓付近（光源から約1.4m）では約20 cmのビーム半径になってしまう。この窓の有効径は直径30 mm程度のため、パワー測定では中心付近のみ(1 mm×2 mmの範囲)を測定した。その結果、1パルスあたりのエネルギーでは、1~2 nJ/pulse/ (1 mm×2 mm)であった。テラヘルツ強度のピーク出力としては、パルス幅1 psと仮定すると、光源から約1.4 m地点で約1 kW/mm²となる。なお、電子ビームから放射された全エネルギーを積算すると、ビーム径をσ = 20 mmのガウス分布と仮定して0.5 μJ/pulseとなる（減衰等は考慮していない）。

上記の0度のラインでは広がり角が大きいので、20度のビームラインでは、図2のようにCSRパルスの集積を行った。このビームラインではテラヘルツ光源から約680 mmの地点に取り出し窓が設置されているが、それより手前でテラヘルツ光を集積させるため、真空チャンバー内にホーンアンテナ（長さ5 cm）とWR-10 導波管（長さ25 cm）を設置した。真空中で一度集積させたテラヘルツパルスは導波管開放端（1 mm（水平H）×2mm（垂直V））とその直後の取り出し窓を経由して、大気中のサンプルに照射される。サンプルは取り出し窓直後に配置し、透過率測定等を行うことができる。また、テラヘルツイメージングでは、ショットキーダイオード等のテラヘルツ検波器と併用した走査型イメージングの手法を用いており、これまでに生体組織の透過イメージング、植物の

水分分布の経時変化など、従来光源では透過測定が難しい材料を比較的短時間でイメージングすることに成功している。

産総研では、昨年度からこの高出力テラヘルツ光源を用いて、郵便物等に隠蔽された爆発物や麻薬などの不正禁止薬物を、実環境で検出するテラヘルツ検査装置の開発を開始した。これまでに、財務省関税中央分析所からの受託で“高出力テラヘルツ光源を用いた不正薬物・爆発物探知に係る調査研究”を実施しており、封筒内サンプルに対し、テラヘルツ領域でのイメージングに成功している。

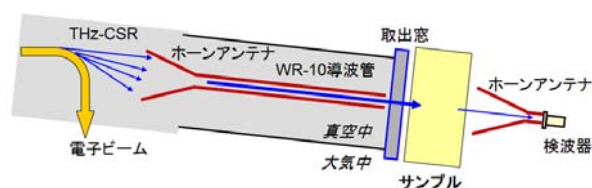


図2：偏向電磁石 20度における THz-CSR ビームラインのセットアップ

2.2 THz-CTR光源

コヒーレント遷移放射光（CTR）では、光源点が電子ビーム集光点となることから、数10 μmの点光源と見なすことができ、テラヘルツ光学系を構築しやすいことが利点である。産総研Sバンド小型リニアックでは生成したエネルギー約40 MeVの超短パルス電子ビームをアルミターゲットに集光照射し、THz-CTRを発生させ、テラヘルツ時間領域分光システム（THz-TDS）の開発を行っている。本研究の詳細は今年会ポスター発表^[6]で報告するが、簡単にここでも触れておく。THz-TDSでは、THz-CTRをテラヘルツレンズによって平行光にし、z-cut結晶水晶窓から平行ビームとして大気中に取り出している。そして、取り出した平行ビームのテラヘルツパルスを、サンプル透過後に、再度レンズによってEO結晶に集光する。

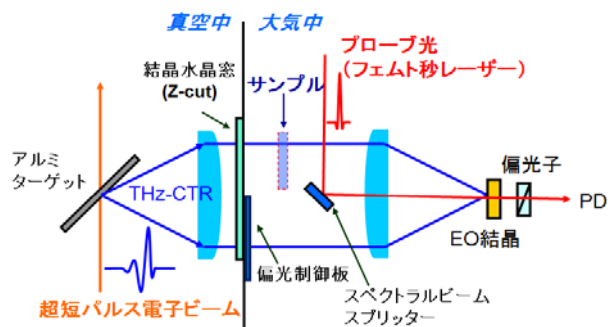


図3：超短パルス電子ビームを用いた EO サンプルング法による THz-CTR-TDS システム

同時に、プローブ光をEO結晶に集光させ、EOサンプリング法によりテラヘルツパルスの時間波形を取得するシステムである。このEOサンプリング法によりテラヘルツパルスの時間波形を計測し、フーリエ変換によりスペクトルが得られるが、サンプルの有無によってその差分を取ることで、サンプルのTHz領域の吸収スペクトルが測定できる。これまでに、実環境においてサブテラヘルツ領域までのスペクトル測定に成功している。しかし、装置公開の信頼性のある利用を開始するには、テラヘルツスペクトルの広帯域化と、測定精度の向上が求められる。

2.3 THz-CCR光源

産総研で行っているテラヘルツ領域のコヒーレント・チェレンコフ放射光 (CCR) は、チューブのような構造をもつ誘電体内を電子ビームが通過する際、発生したチェレンコフ放射が多モードのテラヘルツ波を発生し、チューブの外側をメタライズすることで放射光を管の中に閉じ込め、高強度のテラヘルツ波を発生する方法である^[8-9]。図3に、電磁場シミュレーションコード (OOPIC) を用いて得られた結果を示す。図右下は、誘電体管の中心の穴を電子ビームが通過するとき得られる軸方向電場分布である。この電場分布は、電子ビームのパルス幅、管の内径と外径に依存するが、誘電体は遅波構造として機能し、電子ビームの位相速度と同じ位相速度を持つTM (Transverse Magnetic)モードとして解析解を得ることが出来る。ここでは、誘電体チューブの内径 $200\ \mu\text{m}$ 、外径 $300\ \mu\text{m}$ 、長さ 3cm 、材質を石英 (誘電率 3.8)、電子ビームの電荷量 0.75nC 、ビーム径 $50\ \mu\text{m}(\text{rms})$ 、バンチ長 $500\text{fs}(\text{rms})$ とし、電子ビームが 1cm 進んだ時の結果である。左上図がチューブ断面を示し、

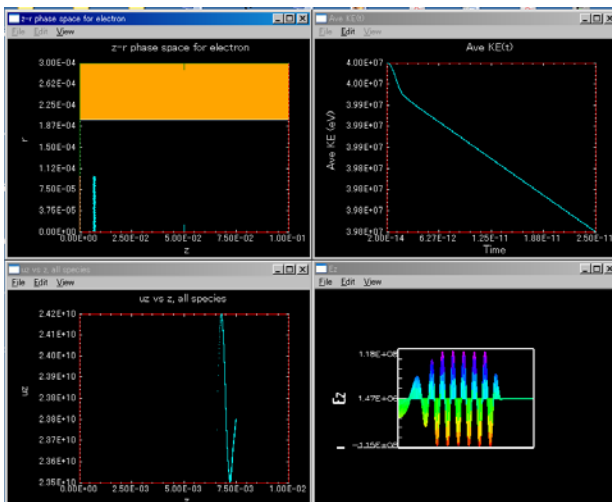


図4：OOPICを用いたTHz-CCR生成計算

右上図は、電子ビーム自身のエネルギー減衰、すなわちテラヘルツ放射へのエネルギー変換量を示す。この計算では、電場分布からフーリエ変換により図4のような放射スペクトルとなり、中心周波数 $0.45\ \text{THz}$ と解析解と一致し、数 μJ のエネルギーの放射が得られることが計算できる。実際の実験では、軸外し放物面鏡によってビーム軸から取出し、THz-CCRの観測を行っている。これまでに、ショットキーダイオードによる放射の確認は行っているが、スペクトル測定のためマイケルソン干渉計を設置し現在実験結果を解析中である。

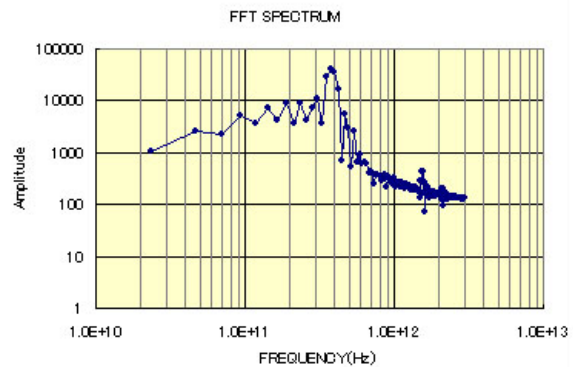


図5：THz-CCRのスペクトル分布(計算)

3. まとめ

産総研Sバンド小型リニアックでは、コヒーレント・テラヘルツ光源の開発と利用研究を行っている。特徴に応じてCSRとCTRを使い分けた利用研究を行い、THz-CSRでは、これまでに走査型イメージングによる様々なサンプルの透過イメージングに成功している。THz-CTRでは、サブテラヘルツ領域ではあるが、EOサンプリング法による時間領域分光に成功している。最近ではTHz-CCR実験を開始し、新たな高強度テラヘルツ光源として実験・検討を行っている。加速器ベースの高出力テラヘルツ光源は、これまで測定が困難であった吸収の多い生体材料や、封筒内部の実環境分析など、ライフサイエンス分野や安全安心技術の分野などにおいて、広範囲での展開が期待され、その強度の強さから、学術領域だけでなく、産業ニーズにおいても高いと言える。

参考文献

- [1] 黒田隆之助 他, 加速器, 5巻2号, 137, 2008
- [2] 黒田隆之助 他, 本年会, THPS007
- [3] N. Terunuma et al., Nucl. Instr. Meth. A, 613, 1, 2009
- [4] R. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth. A 593, 91, 2008
- [5] R. Kuroda et al., Rad. Phys. Chem. 77, 1131, 2011
- [6] 熊木雅史 他, 本年会, THPS061
- [7] 島田 美帆, OHO'08テキスト, 5-3, 2008
- [8] K. Kan et al., APL 99, 231503, 2011
- [9] A. M. Cook et al., PRL 103, 095003, 2009