

マイケルソン干渉計と検波器を用いた コヒーレント遷移放射光 FT-THz 分光法の開発

DEVELOPMENT OF THE COHERENT TRANSITION RADIATION FT-THz SPECTROSCOPY BASED ON MICHELON INTERFEROMETER WITH RF DETECTOR

立花充章^{1#}, 熊木雅史¹, 坂上和之¹, 鷲尾方一¹,
黒田隆之助², 平義隆², 豊川弘之², 山田家和勝²

Mitsuaki Tacibana^{1#}, Masafumi Kumaki¹, Kazuyuki Sakaue¹, Masakazu Washio¹
Ryunosuke Kuroda², Yoshitaka Taira², Hiroyuki Toyokawa², Kawakatsu Yamada²,

¹Waseda University 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

Abstract

The high-power terahertz radiation sources and the terahertz imaging system have been developed using an S-band compact electron linac at AIST. The linac consists of a Ce-Te photocathode RF-gun, two acceleration tubes and a magnetic bunch compressor. The linac generates the electron beam with the energy of 30 MeV, the bunch charge of 1 nC, and the bunch length of less than 1 ps. In this study, the THz radiation is generated by coherent transition radiation (CTR). We have constructed the Michelson interferometer on THz frequency range. The interferogram has been measured by changing the optical delay, frequency spectrum has been derived from it by Fourier Transform (FT). The absorption spectrum of the sample in the THz region can be obtained from the spectrum deference between w/ and w/o sample. In this paper, we will describe results of the FT-THz spectroscopy using Michelson interferometer with the THz-CTR and an RF detector.

1. はじめに

THz 波は、電波と光波の間、すなわち、ミリ波と赤外線の上に位置し、電波と光波の両方の性質を兼ね備えている特殊な光/電磁波である。この周波数領域はテラヘルツギャップまたは未踏光学領域とも呼ばれている。

THz 波は、電波のように紙・プラスチック・ビニール・セラミック・木材・脂肪・粉体・乾燥食品など、様々な物質を透過するとともに、光波のようにレンズやミラーを用いて光路を自在に取り回すことが容易であるため、新たなイメージング光源としての期待も大きい。ビタミン・糖・医薬品・農薬・禁止薬物など、様々な試薬類に固有の吸収スペクトル（指紋スペクトル）が THz 帯でも存在するため、さらなる応用の可能性が広がりつつある。

本研究の目的は、電子加速器を用いて高出力の THz 波を発生させ、マイケルソン干渉計を用いた分光法を確立することである^[1]。

2. 実験装置

本研究は、独立行政法人産業技術総合研究所（以下産総研）と共同研究で行っている。実験装置である産総研の S バンド小型リニアック施設（Figure 1）は、フォトカソード RF 電子銃を電子源とした電子加速器であり、レーザーコンプトン散乱 X 線発生や、

コヒーレント THz 波の発生、及びそれらを用いた応用研究を行っている。ここで、本研究における電子ビームのパラメータを Table 1 に示す^[2]。

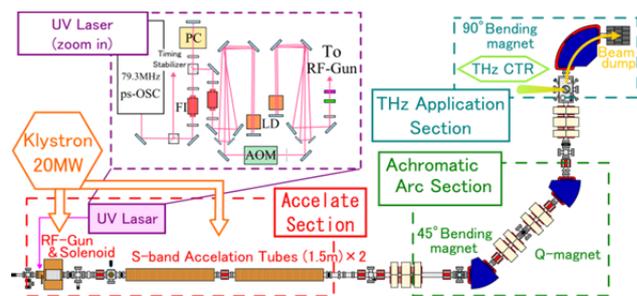


Figure 1: S-band compact electron linac at AIST.

Table 1: Parameters of electron beam.

| Energy | 30 MeV |
|-----------------|------------------------------|
| Energy spread | < 5 % |
| Bunch length | < 1 ps |
| Bunch charge | 1 nC |
| Repetition rate | 10 Hz |
| Beam size | 50 μm × 50 μm @ CTR point |

#s092842261@suou.waseda.jp

3. コヒーレント遷移放射

本研究では THz 波の発生にコヒーレント遷移放射 (CTR) を用いている。電子ビームが金属などの境界を通過し、その電場により金属境界面を分極させることで電磁波が放射される現象を遷移放射と呼ぶ。特に、放射波長より電子ビームのパルス幅が短いとき、その放射はコヒーレントとなる。したがって、電子ビームのパルス幅を THz 波の周期である 1 ps 以下にすることで、THz 領域のコヒーレント遷移放射が発生する。遷移放射は電子ビームが金属境界に入るときその反対向きに、そして金属境界を出るとき同方向に放射される。金属境界をビーム進行に対して 45°傾けると 90°方向に放射が起こり、光を容易に引き出す事が可能である (Figure 2)。

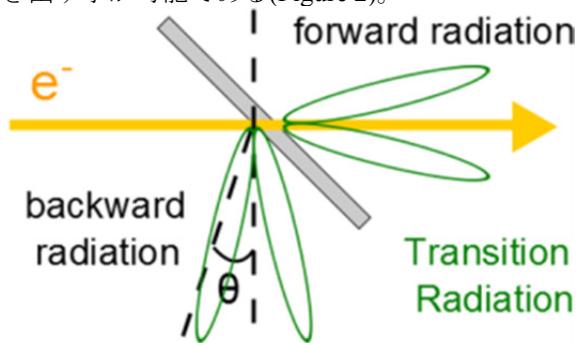


Figure 2: Conceptual diagram of transition radiation.

4. マイケルソン干渉計と検波器による分光実験

本実験ではアルミニウム板を用いて、コヒーレント遷移放射を発生させている。そのコヒーレント THz 遷移放射光を穴あきの軸外放物面鏡により取り出し、2つのレンズを用いて平行光にした後、マイケルソン干渉計に入射している。入射した放射光をシリコンのビームスプリッターで反射光と透過光の2つに分割し、それぞれの THz 波を銀ミラーで反射させている。片方の銀ミラーは駆動ステージに乗せ、光学遅延を行うことで、干渉の変化を検波器により観測している。検波器には、ゼロバイアスのショットキーダイオードを用いている。本実験では、W-band帯 (0.1 THz 帯) の検波器を用いており、カットオフ周波数は 0.075 THz であるが、高周波側は 0.2 THz 付近まで感度のあるものを用いている。また、スペクトル測定の評価を行うため、検波器の前方に 0.2 THz 帯の Band Pass Filter (BPF) を設置した。ここで、上記マイケルソン干渉計の概要を Figure 3 に示す。さらに、コヒーレント THz 波は非常に緩衝性の高い電磁波であるため、乱反射・多重反射防止用の遮蔽 (水) を設置し、S/N 比の向上、バックグラウンドの低減をはかった。これは THz 波の水への吸収が非常に大きいことを利用している。尚、厚さ 100 μm の水に対する周波数 1.0 THz の電磁波の透過率は 0.1 % 以下である^[3]。Figure 3 の上図は遮蔽 (水) を設置しない場合、下図は遮蔽を設置した場合の概要図である。

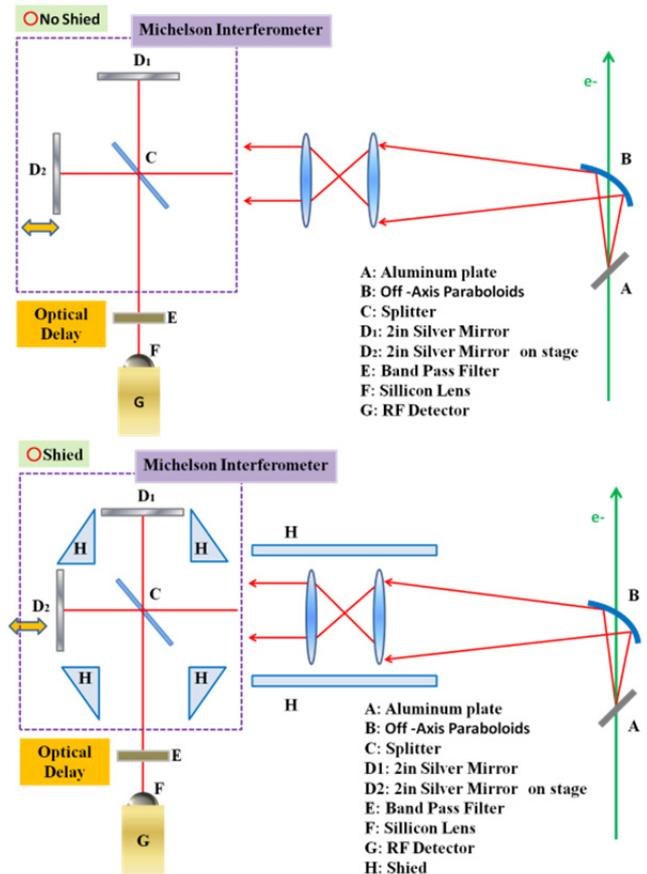


Figure 3: Schematic illustration of michelson interferometer without (upper figure) and with (lower figure) water shield.

実験では、光学遅延によりインターフェログラムを測定する。インターフェログラムは、THz 波の干渉の変化を表したものである。検波器への入射は準光学的にシリコンレンズと W-band 導波管を一体化させたものを用いている。0.1 THz 帯の検波器を用い、光学遅延 0.04mm/step にて測定した際のインターフェログラムを Figure 4 に示す。Figure 4 の上図は水の遮蔽なし、下図は遮蔽ありのインターフェログラムである。さらに、測定されたインターフェログラムをフーリエ変換 (FT) することで周波数スペクトルが得られる。得られた周波数スペクトルのうち、0.1 THz 帯のスペクトルを Figure 5 に、0.2 THz 帯のスペクトルを Figure 6 に示す。フーリエ変換された図を見ると、0.1 THz と 0.2 THz にピークが確認できた。これは、バンド幅が 0.1 THz 帯のショットキーダイオードと 0.2 THz の BPF を用いている為である。予測した周波数にピークが検出できたため、THz 帯でのマイケルソン干渉計の原理実証に成功したと言える。また、乱反射・多重反射防止用の遮蔽体を設置することで、バックグラウンドとして観測されるカットオフ周波数 0.075 THz 以下のうち、0.04 THz 以下のバックグラウンドを低減できていることがわかる。また、遮蔽の有無により、シグナル強度は 0.1 THz では約 2 倍、0.2 THz では約 4 倍になり、S/N 比を向上することに成功した。

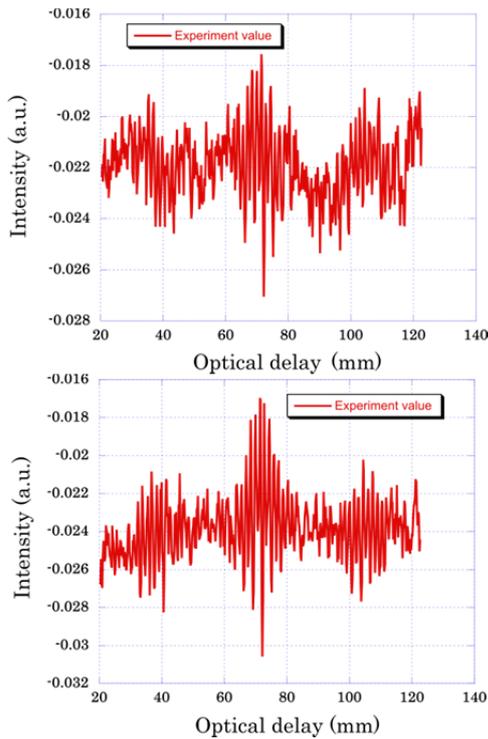


Figure 4: Interferogram without (upper figure) and with (lower figure) water shield.

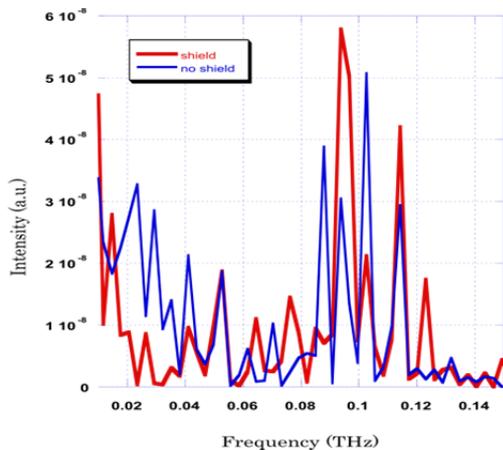


Figure 5: Frequency spectra around 0.1 THz with (red line) and without (blue line) water shielded.

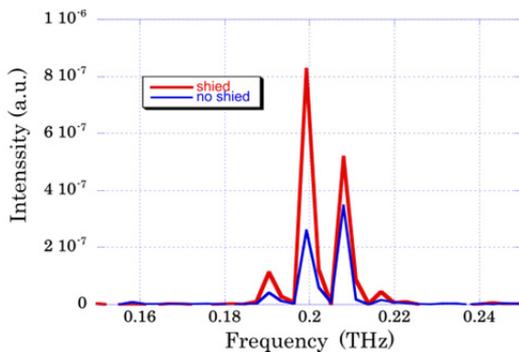


Figure 6: Frequency spectra around 0.2 THz with (red line) and without (blue line) water shielded.

5. 広帯域の分光実験

バンド幅が 0.1 ~ 2.0 THz の広帯域の準光学的検波器(QOD; Quasi-Optical schottky Diode detector)を用いて、実際にサンプルの有無が周波数スペクトルにどう影響するのかを実験した。サンプルには蒸留水(1 mm)を用い、サンプルセルの窓材は SiO₂ である。Figure 6 にセル単体(緑線)とセルに蒸留水を入れたもの(赤線)を測定し、フーリエ変換して得られた周波数スペクトルを示す。

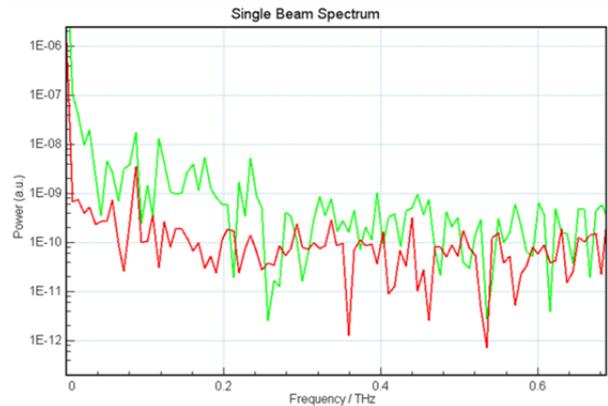


Figure 7: Frequency spectra when the water (red line) and the SiO₂ cell (green line) sample were measured.

6. まとめと今後の展望

以上のように、S バンド小型リニアック施設において、コヒーレント THz 遷移放射光 (THz-CTR) とマイケルソン干渉計及び検波器を用いた FT-THz 分光法の開発を行ってきた。0.1THz 帯の検波器と BPF を用いた実験では、想定された BPF によるピークが得られ、マイケル干渉計の原理実証に成功した。また、水の遮蔽体を設置することでカットオフ周波数以下のバックグラウンドが低減し、シグナル強度についても倍増することが分かり、S/N 比の向上を行うことができた。広帯域検波器を用いた実験では、蒸留水サンプル 1 mm であってもスペクトル測定が可能であり、特に 0.1 ~ 0.2 THz 帯における水の THz 波吸収を観測できている。しかしながら、測定精度については今後の向上が必要であり、例えば Figure 6 では測定ピークが 3 つに分裂しており、今後はビームスプリッター厚との関係調査する予定である。広帯域検波器を用いた場合においても、より広帯域の周波数における測定や、測定精度の向上のためには、光学遅延の精度向上と THz 強度の安定化を行う必要がある。

上記のような改善を行うことで、FT-THz 分光システムを完成させ、様々な指紋スペクトルをもつ物質の測定を目指して行く。

参考文献

- [1] Junicji Nishizawa et al “テラヘルツ波の基礎と応用” 工業調査会, 2005/04/01
- [2] R. Kuroda et al., *Infra. Phys. Tech.* 51 390-393 (2008)
- [3] http://www.photal.co.jp/book/thz_05_02.html