

高強度遠赤外コヒーレント放射光源による吸収分光

高仲 信^{1,A)}、奥田修一^{A)}、加藤龍好^{A)}、高橋俊晴^{B)}、S.Nam^{C)}

^{A)} 大阪大学産業科学研究所

〒567-0047 大阪府美穂が丘 8-1

^{B)} 京都大学原子炉実験所

〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町野田

^{C)} Department of Physics, Kangwon National University
Chunchon, 200-701, Korea

概要

我々は、阪大産研 38MeV Lバンド電子ライナックからのマルチバンチビームの条件を最適化し、コヒーレント遷移放射を利用した光源による液体の吸収分光測定を行い、光の透過率から屈折率、消衰係数を求めた。また、銀杏の葉などを試料として用い、サブミリ・ミリ波領域での透過光によるイメージングを試みた。

1. はじめに

高エネルギー電子バンチからのコヒーレント放射は高強度であり、ミリ波・サブミリ波領域で連続スペクトルをもつ光源としての利用が期待され、その基礎研究も行われている^[1,2]。コヒーレント放射は、分光器を用いて波長を選択することができ、また高強度であるため、吸収の比較的大きい物質に対しても透過率の測定が可能である。阪大産研では、38 MeV Lバンド電子ライナック^[3]からのマルチバンチビームの条件を最適化し、コヒーレント遷移放射を利用した光源を確立した。遠赤外領域の光の水による吸収はきわめて大きい。我々は水などの液体の吸収分光測定を開始した。また、液体での分子間の衝突や振動による光の吸収は、ミリ波・サブミリ波領域にあるため、このような現象について新しい知見が得られるであろう。

2. コヒーレント放射の原理と特徴

遷移放射、シンクロトロン放射のように連続スペクトルを持つ放射過程において、電子バンチからの放射強度は、次式のように与えられる。

$$P(\lambda) = p(\lambda) N [1 + N f(\lambda)] \quad (1)$$

$p(\lambda)$: 1 電子からのインコヒーレントな放射の強度
 N : バンチ内の電子の個数
 λ : 放射の波長

ここで、 $f(\lambda)$ はバンチ形状因子と呼ばれ、次に示すようにバンチ内の電子の分布関数であらわされる。

$$f(x) = \left| \int S(x) \exp i \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) dx \right|^2 \quad (2)$$

(1)式よりバンチ形状因子が 1 に近いと、すなわち波長がバンチ長より十分大きいと、放射の強度はバンチ内の電子数の二乗に比例する。このコヒーレント放射は、ライナックによって加速された電子バンチの長さと同程度、あるいはそれ以上の長波長領域では、極めて高強度である。

今回の実験では、金属の境界面を荷電粒子が通過するときに生じる遷移放射を利用した。放射過程に遷移放射を利用する利点として、シンクロトロン放射のように電磁石で電子ビームの軌道を変化させる必要がないため、直進のビームを利用でき放射のスペクトルが比較的安定である点があげられる。コヒーレント放射の特徴としては高強度であること、ミリ波・サブミリ波領域で連続スペクトルを持つこと、短パルスであること、通常のインコヒーレントな放射と同様の偏光をもつという点があげられる。また、パルスレーザーと光伝導スイッチを用いたテラヘルツ波の放射強度^[4,5]と比べても、コヒーレント放射は高強度であるため、従来は不可能であったミリ波・サブミリ波領域での物質の励起などが行える可能性がある。

3. 実験条件

3.1 電子ビーム及び吸収分光測定系の条件

吸収分光測定で用いた産研ライナック（周波数：1300MHz）のビーム条件は、ビームモード：マルチバンチビーム、エネルギー：20-27 MeV、パルス幅：8 ns -15 μ s、パルスの繰り返し：10 p p s である。最も放射強度が安定するように、加速器のバンチャーと加速管のマイクロ波の条件を変化させた。安定な光を得るために、バンチ間隔 770 ps のマルチバンチビームを利用した。光源に比較的安定なコヒーレント遷移放射を用いた。

¹ E-mail : takana03@sanken.osaka-u.ac.jp

測定の実験配置を図1に示す。金属板から後方に放射されるコヒーレント遷移放射を光源として利用した。従来用いていた金属板を SUS から Al に交換しビームの散乱を抑えた。また裏面にビームプロファイルをモニタするためのセラミック板を設置した。コヒーレント放射を反射鏡で室外に輸送した。光輸送路を短く変更し、この部分での光の吸収を少なくした。ビームスプリッターで分割した光をビームの変動を補正するため利用した。回折格子の分解能は1%で、電子バンチ間での光の干渉の影響は無視できる。光源として利用するコヒーレント遷移放射の安定性を測定した(図2)。ビーム条件はエネルギー: 20MeV、パルス幅: 8 ns、マルチバンチビーム繰り返し: 10 pps、測定条件は、波長 985 μm 、積算回数 30 回で行った。光の強度の変動は $\pm 2.3\%$ であった。光源として利用するための、比較的安定なコヒーレント遷移放射が得られた。また、試料の厚さはスペーサーを挿入することによって調節し、試料の温度はシリコンラバーヒーターと冷室素ガスを用いることにより 0°C から 100°C まで調節できるホルダーを用いた。ホルダーの窓板の条件として、①遠赤外領域での透過率が高い。②弾性率が大きく試料の厚みを一定に保てる。③試料と反応しない、などの条件を満たす材料を用いる。今回の実験では、上の条件を満たす、無水石英を窓板として用いた。検出器は液体ヘリウム冷却シリコンポロメーターを用いた。このように回折格子を用いて、比較的高い波長分解能で直接水の吸収分光が行われたのは初めてである。

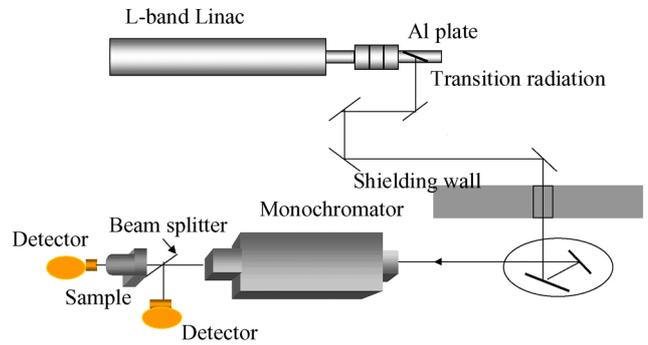


図1：測定配置図

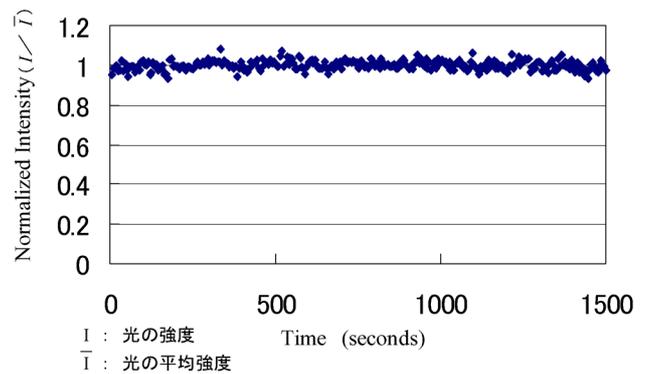


図2：放射強度の安定性

3.2 ミリ波分光によるイメージング測定系の条件

測定配置を図3に示す。回折格子分光器を通した光を絞って試料を透過させた。ビームスプリッターで分割した光をビームの変動を補正するため利用した。コンピュータで制御できる X-Y 軸ステージ、ステージコントローラーを用いて試料を移動させ、透過光強度を検出器で測定してイメージングを行う。

4. 実験結果および考察

4.1 液体の吸収分光測定

波数領域 5-24 cm^{-1} で水、重水の吸収分光測定を行った。ホルダーとして使用している無水石英板の表面からの反射光による干渉の結果、透過光スペクトルに振動が認められる(図4)。水の温度を変化させると、温度の上昇にともない光の透過率の減少が観測された(図5)。原因として水の温度上昇に伴い、1自由度あたりの運動エネルギーが増加することが考えられる^[6]。また、水、重水の試料に対する光の透過率から、Kramers-Kronig の関係式^[7]を用いて解析を行い、屈折率、消衰係数を求めた。1996年の J.T.Kindt らの論文^[6,8,9] のデータとほぼ一致した結果が得られた。ただし、この測定の際、検出器のノイズが大きかったので、現在再度測定を行っている。

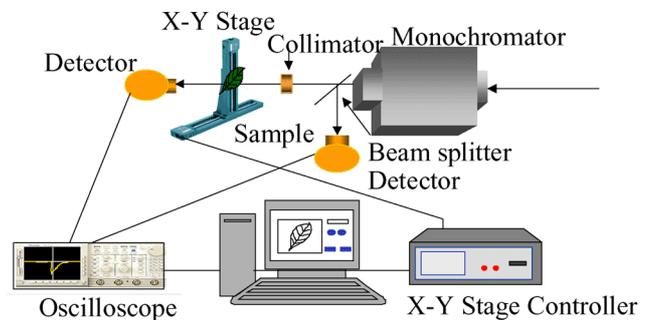


図3：イメージングのための測定配置の概念図

4.2 ミリ波分光によるイメージング測定

ミリ波分光によるイメージング測定の予備実験として、波数領域 $5\text{--}24\text{ cm}^{-1}$ で試料がない時、銀杏の生葉、電子レンジで水分を蒸発させた銀杏の葉（枯葉）で吸収分光測定を行って比較した（図6）。試料がない時と枯葉との、光の透過率の波長依存性は、ほぼ同じ傾向を示した。また、銀杏の生葉の透過高強度は、水の透過高強度とほぼ同じ傾向を示すことから銀杏の生葉による光の吸収は、主に水による吸収と考えることができる。現在、生きた葉、枯葉などの試料を異なる波数で測定し、イメージングを行っている。

5. 結言

マルチバンチビームからのコヒーレント遷移放射を光源として、ミリ波・サブミリ波領域で水、重水の吸収分光測定を行った。メタノール、エタノール、葉などの試料について屈折率、消衰係数を求めた結果について報告する。また、コヒーレント遷移放射を光源として、ミリ波・サブミリ波領域で水、銀杏の葉に対する光の透過率を求めて比較した。枯葉、その他の試料についての透過光によるイメージングの結果についても報告する。

参考文献

- [1] T. Tkahashi, T. Matsuyama, K. Kobayashi, Y. Fujita, Y. Shibata, K. Ishi, and M. Ikezawa, Rev. Sci. Instr. 69 (1998) 3770.
- [2] S. Okuda, M. Nakamura, K. Yokoyama, R. Kato, T. Takahashi, Nucl. Instrum. Meth. A (in press).
- [3] S. Okuda, Y. Honda, N. Kimura, J. Ohkuma, T. Yamamoto, S. Suemine, T. Okada, S. Takeda, K. Tsumori and T. Hori, Nucl. Instrum. Meth. A358 (1995) 290.
- [4] H. Ohtake, S. Ono, M. Sakai, et al., Appl. Phys. Lett. 76 (2000) 1398.
- [5] H. Sarukura, H. Ohtake, S. Izumida, et al., J. Appl. Phys. 84 (1998) 654.
- [6] M. N. Afsar and J. B. Hasted, J. Opt. Soc. Am. 67 (1977) 90.
- [7] T. G. Goplen, D. G. Cameron, and R. N. Jones, Applied Spectroscopy 34 (1980) 652.
- [8] J. T. Kindt and C. A. Schmuttenmaer, J. Phys. Chem. 100 (1996) 10373.
- [9] W. J. Ellison, et al., J. Mol. Liq. 68 (1996) 171.

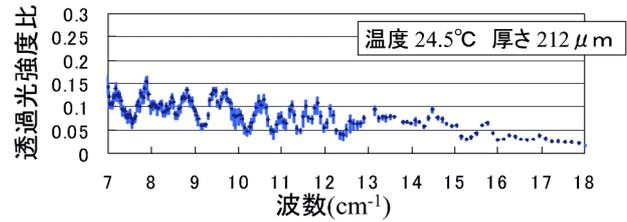


図4：重水の測定結果

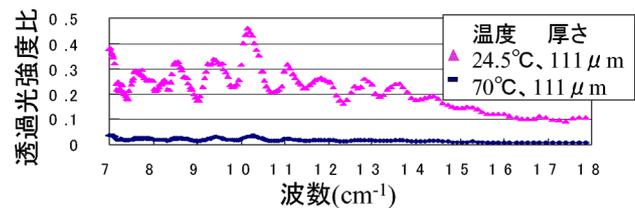


図5：水の温度を変化させた場合の測定結果

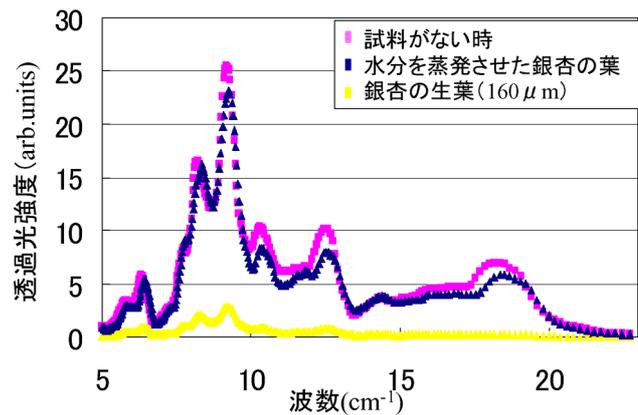


図6：銀杏の葉の透過光強度