

氏名	川瀬晃道
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成8年3月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電子工学専攻
学位論文題目	非線形光学効果を用いたコヒーレントテラヘルツ波発生の研究
指導教官	東北大学教授 伊藤 弘昌
論文審査委員	東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 宮城 光信

論文内容要旨

本研究は、広帯域波長可変かつコヒーレントなテラヘルツ波（ここでの定義は周波数 0.3~3THz, 波長 100~1000 μm ）光源を、非線形光学効果を用いたパラメトリック発振によって実現したものである。近年、フェムト秒光パルスを用いた非線形光学効果によるテラヘルツ波の発生が活発に試みられているが、パルス幅の短さに起因するコヒーレンシーの低さが共通した特質である。他方、1970年代に Stanford 大学を中心に行われた LiNbO₃ 結晶のフォノンポラリトンを用いたパラメトリック発振によるテラヘルツ波 (0.3~3THz) の発生では、広帯域波長可変かつコヒーレントなテラヘルツ波の発生が報告されている。この方法において、結晶中で Manley-Rowe 限界に近い変換効率が達成されているものの、テラヘルツ波の大部分は LiNbO₃ 結晶中を数百 μm 進む間に吸収されてしまう。さらには、LiNbO₃ 結晶のテラヘルツ波に対する屈折率が大きく ($n \approx 5.2$), 外界 ($n=1$) との間で全反射が起こるので、テラヘルツ波を結晶外に取り出すためには結晶端面に何らかの加工を施す必要がある。Stanford 大における研究では、テラヘルツ波の発生方向に対してほぼ垂直に結晶端を切り落とす (cut exit) ことで全反射の問題を解消していた。その後、1970年代後半に入り、世界的にサブミリ波気体レーザーが隆盛となり、このような非線形光学的テラヘルツ波発生の研究は、その高い変換効率、広い波長可変性、優れたコヒーレンシーおよび簡便性にもかかわらず顧みられない存在となっていた。本研究では、この手法が実用性の高いコヒーレントテラヘルツ波源として今後発展する見込みがあると考え、現在の発展したレーザー技術に基づき再構成するとともに種々の基礎特性を新たに確認し (第2, 3), さらにテラヘルツ波の取り出しにモノリシックな構造のグレーティングカップラを導入することによって出射特性の大幅な改善を見た (第4, 5)。

以下では、本研究で行った主要な実験に関して述べる。実験系の概要を図1に示す。ポンプ波 (近赤外光) によって生じたアイドラ波 (近赤外光) およびシグナル波 (テラヘルツ波) は、アイドラ波方向に共振器を形成することによって、図中に示すノンコリニアな位相整合条件を満たす方向に発生する。 k_p , k_i , k_s はそれぞれ LiNbO₃ 結晶中でのポンプ波、アイドラ波、シグナル波の波数ベクトルを表している。実験に供した LiNbO₃ 結晶は厚さ 3.5mm の Z 板から長さ 50mm (X 軸方向), 幅 10mm (Y 軸方向) に切り出し、両端の X 面を鏡面研磨し、さらにアイドラ波長に対して無反射コーティングを施した。アイドラ波は高反射コーティングを施したミラー M1 ($f=10\text{m}$) から成る共振器中で増幅される。実際のミラーは、半円に相当する部分のみ HR コーティングを施し、残りの半円部はガラス基板のみでコーティングは施さず、その部分をポンプ波が通過するようにした。これによりポンプ波とアイドラ波をミラー端における散乱なく極めて接近させることが可能となった。ミラーおよび結晶はコンピュータ制御された回転ステージの上にセットした。テラヘルツ波の波長選択は、回転ステージを僅かに回してポンプ波に対する共振器の角度を変えて行う。ポンプ波

はQスイッチ Nb:YAG レーザで、実験における波長、強度、ビーム径、パワー密度、パルス幅、繰り返しは各々1.064 μm , 30mJ/pulse, 1mm ϕ , 130MW/cm², 25nsec および 16.7Hz である。なお、実験に供した LiNbO₃ 結晶の損傷しい値はおよそ 180MW/cm²であった。ポンプ波はX面から入射し、結晶中ではY面近傍を通過し cut exit の近くから出射する。グレーティングカプラは、LiNbO₃ 結晶のY面に DISCO ダイシングソーを用いて作成した。グレーティングのピッチ、深さ、本数は各々125 μm , 60 μm および 80 本で、全長10mmである。グレーティングカプラから発生したテラヘルツ波は必要に応じてホワイトポリエチレンのレンズにて集光され、液体ヘリウム温度に冷却されたシリコンボロメータによって測定した。ボロメータ位置は、RS232-C 制御の X-Z ステージによりシフトされた。アイドラ波強度はジュール計でモニターされ、ボロメータ出力とともに BOXCAR 積分器に入り、AD 変換器を通してコンピュータで記録した。

以下、実験結果を述べる。ポンプ波の結晶への入射角を1~2度の間で変えると、結晶中でのポンプ波とアイドラ波とのなす角 ϕ は、およそ1~0.5度の間で変化する。すると、シグナル波とアイドラ波のなす角度 δ は66~65度の間で変化する。位相整合条件が変化するので、アイドラ波は1.072~1.068 μm 、シグナル波は140~290 μm の間で波長可変となる。

次に、グレーティング面からの回折角の測定は、300mm離れた位置でボロメータを横方向にシフトさせて、最も強度が強くなる位置で行なった。グレーティングカプラからのテラヘルツ波の放射角 θ は、テラヘルツ波長とグレーティングピッチ125 μm との関係で決まる。図2に、回折角 θ と、テラヘルツ波長 λ_{THz} との関係の計算値(実線)と測定値(点)を示す。測定されたグレーティングカプラからの放射は1次回折であり、波長 λ_{THz} が短くなるにつれて、回折角 θ は小さくなることがわかる。

テラヘルツ波放射の指向性は3mm幅のスリットを入口に設置したシリコンボロメータの位置を、RS-232Cで制御されたモーター駆動一次元ステージでシフトすることで測定した。図3に、グレーティングカプラとシリコンボロメータ入口の距離 d が150mmと300mmの位置で測定した水平方向の指向性を示す。テラヘルツ波の波長184 μm 、回折角47°の場合で、FWHMのサイズは $d=150\text{mm}$ で8mm、 $d=300\text{mm}$ で12mmである。10mmの長さの回折格子は、47°の回折方向に対しては7.3mmのビーム径に対応している。この際のフラウンホーファ領域は、回折格子部から約150mm以上であることから、ビーム拡がり角は1.5°(全角)であることが判る。なお、紙面に垂直な方向の指向性は3°(全角)と測定された。これはポンプ波のビーム径(1mm ϕ)から決定される値に等しい。これら回折角と指向性の測定結果から、発生したテラヘルツ波の空間的コヒーレンシーの高さが示された。

テラヘルツ波の波長は、二枚のノンドープ GaAs ウェハー (2.5" ϕ , 515 μm 厚) でスキャンニングファブリーペロエタロンを構成し測定した。2枚のウェハーの平行度を He-Ne レーザ光の反射で確認した上で、一方のウェハーを RS232-C 制御の一軸ステージでスキャンニングした。測定結果の一例を図4に示す。横軸はウェハーのシフト量、縦軸はエタロンを透過するテラヘルツ波強度である。テラヘルツ波に対する GaAs の屈折率 n , 反射率 R , およびそれから決まるエタロンのフィネス F は、各々 $n \approx 3.6$, $R \approx 0.3$ および $F \approx 2.5$ である。二つのピーク間の距離 d 対して、 $\lambda_{\text{THz}} = 2d$ の関係式から波長が決定される。また、明瞭な干渉波形が得られたことから、テラヘルツ波の時間的コヒーレンシーの高さが示された。

全長10mmのグレーティングカプラからのテラヘルツ波出力は1.2mWであった。したがって、結晶のY面全面(50m長)にグレーティングを作成すれば、6mWのテラヘルツ波出力が得られる。同時に、テラヘルツ波の発生方向に対してはほぼ垂直に結晶端を切り落とし(cut exit)、同条件でテラヘルツ波出力を測定した結果5 μW を得た。これと比較して、グレーティングカプラはおよそ1000倍高い効率でテラヘルツ波を放射することが判明した。

以上、LiNbO₃ 結晶のポラリトンを用いたパラメトリック発振によるテラヘルツ波発生に、グレーティングカプラを導入することによって、放射特性の大幅な改善が見られた。優れた効率、コヒーレンシー、指向性、および波長可変性は、今後の幅広い応用の可能性を示唆する。

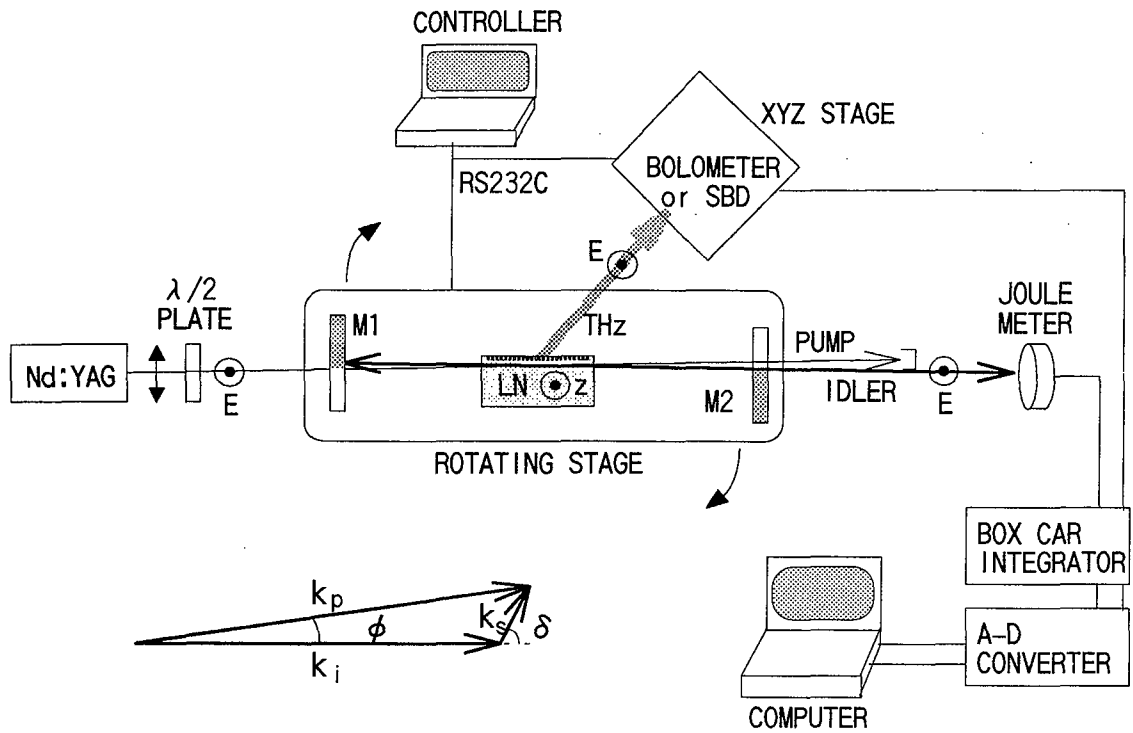


図1 グレーティングカップラからのテラヘルツ波放射特性の測定系

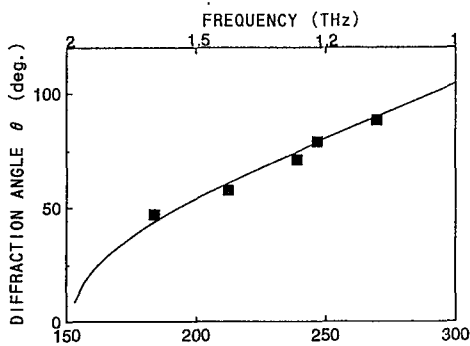


図2 グレーティングカップラからのテラヘルツ波の回折角

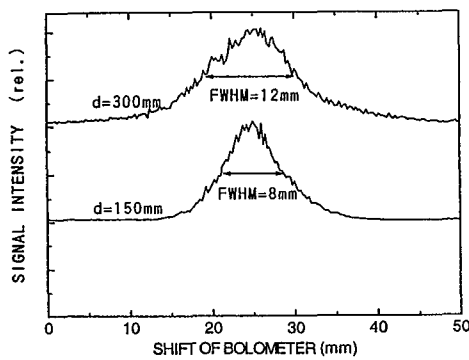


図3 グレーティングカップラからのテラヘルツ波指向性

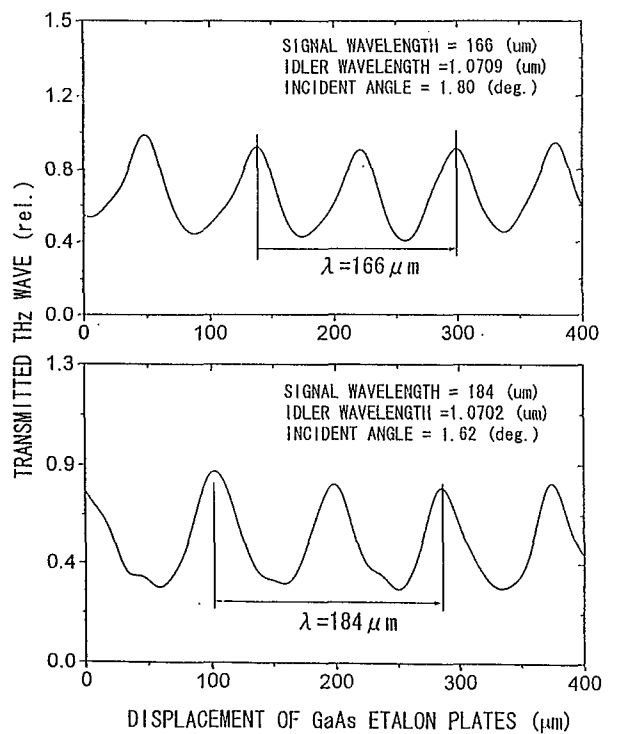


図4 スキャンニングファブリーペローを用いたテラヘルツ波長の測定例

審査結果の要旨

レーザの発明によって、それまでのマイクロ波帯から一挙に周波数が数百テラヘルツ (THz) という光波帯にコヒーレント波の領域は飛躍し、その後コヒーレント光波の開拓は活発に行われた。しかし、光波と電磁波の間の波長帯であるテラヘルツ領域は未開拓なまま残されてきた。著者は、この未開拓なテラヘルツ波を、光波を源として光パラメトリック効果により発生させる研究に取り組み、1~2テラヘルツの周波数域で、波長可変なコヒーレント電磁波の発生法とその動作特性を明らかにした。本論文は、これらの成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は総論である。第2章では、光波とテラヘルツ波にまたがるパラメトリック相互作用を検討し、強誘電体のポラリトンの関与するパラメトリック発振の有用性を検討している。

第3章は、LiNbO₃結晶を用いたテラヘルツ波のパラメトリック発生の基礎実験の結果をまとめている。共振器中のLiNbO₃結晶をNd:YAGレーザで励起して得られるテラヘルツ波の、波長可変特性、偏波特性、指向性などの基本特性を検証している。発生した電磁波は励起光の入射角度を変化させることにより、ほぼ1~2テラヘルツ(波長150~300 μ m)の範囲で可変である。またテラヘルツ波帯での材料の吸収係数を、発振状態で測定する方法を考案し測定を行った。その結果、約50cm⁻¹という大きな吸収を示すことを明らかにし、テラヘルツ波の有効な取り出しが本方式の高効率化に不可欠であることを明らかにした。これらは重要な知見である。

第4章では、テラヘルツ波の高効率な取り出しのために新たにグレーティングカプラを提案し、その設計理論を明らかにした。第5章では、この設計理論に基づき結晶表面にグレーティングカプラを精度良く機械加工により製作し、その動作実験の結果をまとめている。まず発生するテラヘルツ波の波長可変領域は第3章の結果と等しく、この波長範囲でテラヘルツ波のグレーティングによる回折角が設計通りであることを確認した。指向性の測定からは開口に依存したビーム広がり角1.5°が得られ、空間的なコヒーレンスの優れていることも明らかにしている。また、テラヘルツ波の出力は第3章のグレーティングを用いない場合に比べて2桁以上の増大が得られている。これらは新しい知見であるとともに、優れた成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、強誘電体の非線形光学特性を利用して、光波レーザを源としテラヘルツ帯のコヒーレント波を波長可変で効率良く発生できることを示したもので、実用上有用であり、量子電子光学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。