タンネットダイオードの開発と テラヘルツイメージングへの応用

倉 林 徹*
ピョートル・プロトカ*

1. はじめに

タンネット (TUNNETT) ダイオードは、トンネル注入走行時間効果 (Tunnel injection Transit Time) を利用した負性抵抗ダイオードであり、テラヘルツ帯で室温連続発振可能な小型電子デバイスである。半導体中のキャリアの走行時間効果を用いた負性抵抗ダイオードは、西澤が1953年に初めて提案し⁽¹⁾、1968年に GaAs p+n 構造によりパルス発振を実現した⁽²⁾。近年、分子層エピタキシャル成長方法⁽³⁾⁽⁴⁾ (MLE: Molecular Layer Epitaxy) を取り入れ各層の厚さを分子層レベルで制御した薄膜構造を実現し、テラヘルツ領域での高周波発振が可能になった⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。基本波による連続発振素子は、変調可能なワイヤレス通信用発振素子、さらにはテラヘルツを用いた検査装置としてより小型の電子デバイスが最終応用形態と考えられ、その開発動向は世界中で注目されている。タンネットダイオードはミリ波側からの電子デバイスによる室温テラヘルツ発振可能な素子の最有力候補であ

る。本報告では、タンネットダイオードの開発状況とコンパクトなコヒーレント光源としての非破壊検査等への適用例、およびその将来性を紹介する。

2. テラヘルツデバイスの開発状況

テラヘルツ帯は図1に示すように、光波帯と電波帯の境界に位置し、これまで発生法の存在しない未踏波領域と呼ばれてきた。エネルギー的な観点からは、物質構成分子の電子スペクトルが、可視・紫外からX線領域に存在するのに対し、テラヘルツ帯は分子の振動および回転スペクトルのエネルギー帯に相当する。言い換えれば、テラヘルツ帯はこれまで赤外分光分析で見過ごされてきた生体関連分子を含む高分子材料の骨格振動の固有振動に相当するので、これら分子の識別や検出に利用できる。またテラヘルツ波は光波としての直進性と電波としての透過性を兼ね備えており、光波にはない優れた物質透過能を有することから、X線に代わる安全な非破壊検査用光源としての有効性が認識されつつある。

図1 テラヘルツ領域.

* 財団法人半導体研究振興会主任研究員 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉519-1176)

Development of TUNNETT Diode and Its Application for Terahertz Imaging; Toru Kurabayashi, Piotr Płotka (Semiconductor Research Institute, Sendai)

Keywords: electronic device, tunnel injection transit time (TUNNETT) diode, sub-terahertz oscillation, fundamental continuous-wave oscillation, transmission imaging, reflection imaging, nondestructive inspection, molecular layer epitaxy

2006年5月30日受理

テラヘルツ波の発生法に関しては、1963年に化合物の分子振動あるいはフォノンを励起してコヒーレントなテラヘルツ電磁波を発生する提案が西澤によってなされている⁽⁸⁾。1979年には半導体ラマンレーザ発振を実現し、1983年には周波数12.1 THzのテラヘルツ電磁波発生に成功している⁽⁹⁾。他に、テラヘルツ光源として自由電子レーザやp-Geレーザがあるが、巨大な設備や極低温を必要とするため、基礎研究における用途に限られている。西澤等はさらに、テラヘルツ周波数で振動する半導体中の光学フォノン(格子振動)を活用してテラヘルツ電磁波を発生させる研究を進め、半導体GaP結晶を用いて、フォノン-ポラリトンを励起することによって、0.5 THzから7 THzに達する広い範囲において高出力(高輝度)のテラヘルツ波を発生する周波数掃引型光源の開発に成功し、テラヘルツ分子スペクトル計測装置を開発した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

半導体GaP結晶の代わりに誘電体LiNbO₃結晶を用いたパラメトリック発振(0.3-2.5 THz)が開発され実用化に向けた研究が行われている⁽¹²⁾。また有機結晶であるジメチルアミノスチルバゾリウムトシレイト(DAST)を用いた差周波混合(2-20 THz)のテラヘルツ波発生が報告されている⁽¹³⁾、実用化に関しては課題が残されている。

電子デバイスは軽量・小型化・低価格化が可能であるためにテラヘルツ波応用技術における実用化レベルあるいは製品レベルで真価を発揮するものと考えられる。タンネットダイオードは基本波による室温連続発振の最高周波数が700 GHzを越え、テラヘルツ波発振可能な電子デバイスの最有力候補である。一方、最近開発された共鳴トンネルダイオード(Resonant Tunneling Diode; RTD)でも最高発振周波数712 GHzに達し⁽¹⁴⁾、コンパクトなコヒーレント光源として開発が進められている⁽¹⁵⁾。また、最近になって、光デバイス側からの低周波化が急速に進められ、量子カスケードレーザのテラヘルツ帯発振が実現され⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、ミリ波からの電子デバイス開発状況を合わせると、ここ数年のうちに半導体素子による未踏破のテラヘルツ帯ギャップが埋まるものと思われる。

3. タンネットダイオードの開発

図2にタンネットダイオードの構造、電界分布および電流成分を模式的に示した。タンネットダイオードはGaAsなどを材料としたp⁺n⁺n⁻n⁺構造によって構成される。タンネット内部の電界強度は、急峻なp⁺n⁺接合による電子の高効率トンネル注入に加え、電子が走行するn⁻走行層に分布している。タンネットにおけるトンネリングによる注入電子は位相が $\pi/2$ の最大高周波電圧時に注入され、この電子が走行層を走る際の走行時間効果によって生じる誘導電流により、位相角が $(3/2)\pi$ の時にダイオード外部に発生する高周波電圧と誘導電流は逆位相になるため、負性抵抗が最大となる。バイアス条件を選択することによりダイオードの負性抵抗特性を用い、適した共振器構造内に設置することによって基本波による室温連続発振を生じさせることができる。走行

図2 タンネットダイオードの構造、電界分布、および電流成分を表す模式図。

層内をドリフトする電子の速度を V_t 、走行領域の長さを W_{tr} とすると、発振周波数 f_{osc} は

$$f_{osc} = 3V_t / 4W_{tr} \quad (1)$$

となる。ここで、 V_t を 8×10^6 cm/s、 W_{tr} を75 nmとすると、 $f_{osc} = 0.8$ THzとなるので、 W_{tr} を結晶成長における厚みで精密制御すれば、1 THz以上の発振特性を制御性良く得ることが可能になる。このため、タンネットダイオードの作製においては、急峻なp⁺n⁺接合を持ち、逆バイアス時にn⁺層が空乏化するように分子層レベルで膜厚制御されるとともに、走行層 W_{tr} がナノメートル精度で制御された多層成長層が必要不可欠となる。我々は、タンネットダイオード多層構造をGaAsの分子層エピタキシー(MLE)により、1 nm以下の精度で形成する技術を開発した。

GaAsのMLEは、図3に示すように、原料としてトリメチルガリウム(TMG)やトリエチルガリウム(TEG)を所定の基板温度の基板結晶上に供給し、Ga化合物の単分子吸着層を形成した後、Ga化合物ガス排気の後AsH₃を供給し、単分子層GaAs成長層を自律的に1層ずつ形成するという究極の膜厚制御性を実現した完全結晶成長法である。さらに同方法における不純物添加法では不純物の化合物ガスを表面化学反応制御によって、After AsH₃モードによりAs面上に選択的に生じさせたり、あるいはAfter TEGモードによりGa面上に選択的に生じさせ、あるいはそれぞれノンストイキオメトリの割合を制御した成長表面での吸着反応を行わせる方法により、従来法よりはるかに低温でありながら(265°C)、高濃度不純物添加する手法を実現している。この方法によれば、不純物プロファイルの急峻な高濃度不純物添加によるトンネル注入層と、ナノメートルオーダーの走行層を、制御性よく作製できるためテラヘルツ発振可能なタンネット素子構造を形成できる。

図4にMLEにより試作したタンネットダイオードのエピ構造を示した。このダイオードチップはダイシング、さらにはサイドエッチングにより、 $0.1 \times 0.1 \times 0.01$ (単位 mm)以下の微小ダイオードに仕上げている。タンネット発振器キャビティ内部の走査型電子顕微鏡による観察結果を同図に示した。微小チップ化されたエピ構造は、メタライズ工程を経てダイヤモンドヒートシンク上にマウントされる。共振器は、ダイオードをマウントするステム、駆動電流を供給するバイアスピン、共振調整用のチューナブルショートから構成され

図3 GaAsの分子層エピタキシャル成長技術.

図4 タンネットダイオードエピ構造と共振器内部構造.

る.

タンネットダイオードの発振特性は、300 GHz までの測定はハーモニクミキサとスペクトラムアナライザの組み合わせによって測定されるが、サブテラヘルツ帯のタンネットダイオード発振は、図5に示すように検波器にシリコンポロメータ(4.2 K 冷却)を用いた測定システムを構築し測定を行った。タンネットダイオード発振器からの発振波はホーンアンテナによって空中に伝搬され、2枚の樹脂製レンズで集光しシリコンポロメータで出力検出される。発振周波数は、2枚の樹脂製レンズ間にファブリペロー干渉計設置し、片方のメッシュミラーを走査し、ポロメータ出力の peak to peak 間隔を測定することにより周波数を求めた。この測定系により、テラヘルツ帯までのタンネット発振周波数測定が可能になった。WR2.2(268–500 GHz, 導波管 0.559 × 0.279 mm)の共振器構造を用いたタンネットダイオード発振器の外観図

図5 サブ THz タンネットダイオードの発振周波数測定.

を同図に示した。30 mm × 80 mm 程度の大きさの単一 DC 電源による、室温連続発振する小型発振器の試作が実現された。

図6に WR1.5(393–750 GHz, 導波管 0.381 × 0.191 mm) および WR1.0(590–1100 GHz, 導波管 0.254 × 0.127 mm)の共振器構造を用いた場合の発振スペクトラムである。同一のタンネットダイオードエピ構造を用い、それぞれ 510 GHz, および 706 GHz の基本波連続発振を確認している。また、それぞれの発振において発振周波数がバイアス電流値によって変化することを確認しており、所定の発振周波数を選択することが可能となる。

これまでに試作・実現したタンネットダイオードの出力と周波数の関係を図7に示した。これらはすべて室温下において連続発振しており、最高発振周波数は 708 GHz である。出力に関しては、100 GHz までは 10 dBm (10 mW), 200 GHz では 0 dBm (1 mW) 程度、600 GHz までは −44 dBm を実現している。タンネットダイオードにより超小型・高出力の発振器が実現でき、広い周波数範囲で所望の周波数を選択

図6 タンネットダイオードからの発振スペクトラム。

図7 試作・実現したタンネットダイオードの出力と周波数の関係。

的に作製する技術が整備されつつある。図中に示したように、タンネット発振器は軽量・小型・量産可能な素子であり、また使用環境温度変化の影響を受けにくい電子デバイスとしての性質を兼ね備えている。

タンネットダイオード発振器(WR-3)のフリーランニング時の発振特性の実測においては、タンネットバイアス条件8 V, 350 mA 印加において、出力0 dBm(1 mW)、発振周波数安定性 ± 1 MHz/hr、出力安定性 $\pm 1\%$ /hrであった。

4. 小型イメージングシステムの構築

タンネットダイオード発振器の単一電源による簡便な制御性、広帯域性、発振器のコンパクト性、および優れた周波数と出力の安定性を生かし、小型イメージングシステムを構築した。図8に示したのは構築した透過および反射イメージングシステムの概略図である⁽¹⁸⁾。ロックイン検出を行うため、タンネットダイオードは4 kHzでパルス駆動した。テフロンまたはポリエチレン製のレンズを用い光学系を構成した。光源としてのタンネット発振器を用いること、および検出器としてショットキーバリアダイオード検出器を用いることにより光学系システム全体を大幅に縮小し、従来のデスクトップサイズからA4サイズまで小型化を実現した。また高解像度を実現するためにアパーチャを設置し、ビーム径を波長以下まで微小化し、高分解能を実現している。測定試料はX-Zスキャンされ各点ごとの透過および反射強度をコンピュータに取り込み画像を得た。このシステムを用い、200

図8 透過および反射イメージングシステムの概略図。

GHz 付近の電磁波を用いた際の空間分解能を測定した。図9に、透過および反射イメージングにおけるアルミニウムをパターンニングした高抵抗シリコンウェハのナイフエッジ測定で得られた空間分解能の実測結果を示す。高抵抗シリコンウェハはこの周波数の電磁波透過性に優れ、アルミニウム蒸着薄膜は電磁波を反射する。アパーチャの開口径を変えた際の、透過および反射イメージングシステムで解像度を得た。アパーチャ開口径が1 mmの時、透過光学系における空間分解能は440 μm 程度、反射光学系では350 μm 程度となっている。アパーチャ径を1 mm以下とすることにより、反射測定では分解能が300 μm にまで達し、分解能は $5/\lambda$ 程度が得られていることから、波長 λ よりも十分に小さいサイズのアパーチャによる近接場光を利用したイメージングの可能性が示唆されている。一方、アパーチャ径の減少に伴い顕著に透過強度が低下し、アパーチャ2 mm ϕ のサブテラヘルツ波透過強度を1とすると、1 mm ϕ で透過強度0.12, 0.7 mm ϕ では透過強度0.006まで低下する。このことから、使用する発振器の強度、必要とされる分解能、および検出器の種類によって光学系の構成要素が決定される。

イメージングの実施に先立ち、各種物質の透過特性を測定し、各媒質によりイメージング時の透過強度が確保されるかどうかの測定を行った。測定では図8の透過イメージングシステムを用い、試料位置を2つのレンズ間に置き、透過強度を測定した。図10に示したのは開封後2ヶ月程度室内放置したコピー用紙と開封直後のコピー用紙の196 GHz電磁波を用いた吸光度依存性を表している。これより、200 GHz付近の電磁波はコピー用紙100枚以上を透過し、開封後時間の経過したもので顕著に吸光度が大きくなることから、紙類の含水率変化に高感度である。同様の優れた透過性は紙類の他に、木材、セラミックス、およびコンクリート材料で確認され、媒質を透過する周波数を用いることにより各媒質内部に存在する構造欠陥や異物の混入などに対する非破壊検査への適用の可能性が高まった。

図11に示したのは、タンネットダイオードによるICカード(Suica)の透過および反射イメージング画像を示している。透過および反射イメージのどちらも196 GHzの電磁波を用いた測定となっているが両者とも波長(1.5 mm)よりも高い分解能が実現されている。特に反射イメージではループ状アンテナ細線やICチップの形状などが高分解能で画

像化されている。この例のように、タンネットを用いたイメージングにより、軽量・小型のシステムで未開封による物体内部の画像情報を得ることができ、物質内部の詳細情報が得られるものと考えられる。金属などの分布状況に関しては、透過イメージと反射イメージは画像的にネガとポジの関係にあるが、物質表面付近の情報は反射イメージングが適しており、表面から深い物質内部の情報は透過イメージングが適している。このように種々の物質に関し、透過画像と反射画像を組み合わせ、詳細な内部構造イメージングが可能となる。

図12に示したのは、封筒中の梱包物に関する透過および反射イメージング画像の周波数依存性を表している。4枚の印刷された紙をステープラーやクリップで束ね、表面にはペーパーカッターの刃、裏面には直径0.5 mmの鉛筆芯を透明テープなどで固定しこれを厚手の封筒中に封じた。タンネットダイオードからの発振周波数として、62, 189, および466 GHzを用い、図8に示したイメージングシステムにて透過および反射イメージング画像を得た。62 GHz(波長4.8 mm)では優れた透過性はあるものの、空間分解能が劣化し、梱包物の形がぼやけている。189 GHz(波長1.6 mm)では透過性能と有しつつ分解能が改善されており、1 mm以下の梱包物の形が精度よく画像化されていることがわかった。また透過画像では、内部梱包物に貼り付けた薄手のテープ(スコッチテープ)が高いコントラストで画像化されることを確認した。このような透過性物質のイメージングに関しては特定波長を選択することで、赤外～X線領域で観察が難しい特定物質に関して、テラヘルツ帯の特定波長を用いることで分光学的イメージングが有効である。466 GHz(波長0.64 mm)を用いた透過イメージングでは空間分解能の向上は顕著であるが、束ねた紙間の干渉が現れ、たわみの状況が画像化されている。また、反射画像では梱包物の表面付近の状況が優先的に画像化され、裏面付近は画像化がなされておらず、高い周波数では電磁波が梱包物で顕著に減衰することを表している。

図9 透過および反射イメージングにおける空間分解能の測定結果。

図10 紙類の透過特性。

5. 非破壊検査への応用

図13に示したのは、189 GHzの電磁波を用いた場合の木材の透過イメージング画像である。同図に示したように木材

図11 ICカード(Suica)の透過および反射イメージング。

図12 封筒中梱包物の透過および反射イメージング。

(厚さ 25 mm)の節部付近は強い吸収特性を示し、このため透過画像上で節の形状が白くパターン化されている。また各種木材に関して、木目付近で透過率の変化が生じ、内部構造を反映した透過画像が得られている。

この技術に応用すれば、木材中に存在する割れ、空洞、死節などの構造欠陥の画像化と、含水率や密度分布の画像化が 1 mm 精度で可能となる。本来、製材は大きな力を受ける構造用材として使われ、JAS 規格による等級格付けはマクロ的な機械等級区分が採用され、高級木材に限って X 線等を用いたミクロ的な内部構造検査と、インピーダンス測定やマイクロ波を用いた含水率のマクロ的な測定が実施されている。タンネットによる最適波長を用いたイメージングはこれまでに実現不可能であった、死節やひび割れ箇所の特特定と含水率・密度分布を同時に測定可能なミクロ的検査法として有望である。

異物入りコンクリート材料に関し、透過イメージングにより非破壊検査を試みた結果を図14に示した。厚さ 25 mm のコンクリート材料を設打する際に鉄板、ダンボール、およびベニア板を混入させ固化し、乾燥後に透過イメージングにて内部非破壊検査を行った。金属板では電磁波の透過が生じないため、形状が高コントラストで画像化され、ダンボールではコンクリートとほぼ同様の透過強度であるが、ダンボールの輪郭が明確化された。またベニア板では明確な形状と共に、中間的な透過特性が観察されている。

木材に関しては、60～200 GHz の範囲で透過能に顕著な違いはなく、スギ材などで 10 cm 程度までの透過特性を確認しており、JAS 規格の一つである 15 cm 厚みの木材に適用できる可能性が高い。一方、コンクリート材料に関しては、電磁波の侵入深さは周波数に大きく依存し、高分解能の得られる 200 GHz 付近では 20 mm 程度、60 GHz 付近では 100 mm 程度が観測されており、実用化のためには侵入深さをさらに深くできる周波数の探索と発振器出力の高出力化が課題となっている。

図13 木材の透過イメージング。

図14 コンクリート材料の透過イメージング。