

高強度テラヘルツ波発生素子の開発

服 部 利 明 筑波大学大学院数理物質科学研究科電子物理工学専攻助教授

要旨

大出力テラヘルツ波の発生素子として、10マイクロメートルの間隔・幅をもつ電極からなる櫛型電極構造を持つ大口径光伝導アンテナを作製した。1素子は、1センチメートル角のユニット7つからなり、半導体微細加工技術を用いて作製した。フェムト秒レーザーを用いてテラヘルツ波を発生させ、特性評価をおこなったところ、従来の大口径アンテナの2分の1程度の出力が得られ、また、その飽和特性や、高電場印加時の不安定性などが明らかとなった。それぞれのユニットを別々に動作させて得られたテラヘルツ波波形の和は、全てのユニットを同時に動作させたとき得られるテラヘルツ波波形とよく一致し、別々のテラヘルツ波エミッターからのコヒーレントな足し合わせが、実験的に確認された。絶縁層の材料を SiO_2 からポリイミドに替えることにより絶縁性が増し、大幅な電気的特性の向上が得られた。素子構造の改良等により、より低電圧動作可能・簡便な高強度テラヘルツ波光源の実現が見込まれる。

1 まえがき

およそ 0.1THz から 10THz の周波数領域の電磁波は、いわゆる「電波」の領域といわれる「光」の領域の境界にあり、その発生・制御・検出が技術的に困難であったことから、これまでほとんどその利用・研究がなされてこなかった。しかし最近の光技術、電子技術の進歩により、この周波数領域の電磁波の利用技術が発展するとともに、さまざまな応用が提案され、現在さかんに研究がなされている。「テラヘルツ電磁波」または「テラヘルツ波」と一般に呼ばれるようになったこの周波数領域の電磁波は、1) 紙や布などの多くの素材をよく透過する。2) 波長が適度に長いために散乱されにくい。3) 水分や金属を透過しない。4) 多くの物質がこの周波数領域に特徴的なスペクトルを持つため、スペクトル情報から物質の特定が可能。といった特徴を持ち、空港などでのセキュリティ・チェック、郵便物の内容物の安全検査、工場での各種製品検査などの応用が注目されている。このような日常的な場面でのテラヘルツ・イメージングの実用化のためには、テラヘルツ画像の実時間での取得が必要になる。現在行われている多くの方法では、用いるテラヘルツ波の強度が十分でないために、ひとつの画像の取得に数10分を費やすこともまれではない。これでは、幅広い場面でのテラヘルツ波の実用化は図れない。現在我々の手に入るテラヘルツ波発生装置では、強度が十分でない、または、装置が非常に大掛かりになる、という問題があり、簡便かつ強力なテラヘルツ波光源の開発が望まれている。

従来から、大口径光伝導アンテナが、実験室レベルで強力なテラヘルツ波を発生できる素子として用いられている。これは、GaAs などの半導体基板に 3cm 程度の間隔で2つの電極を取り付け、高電圧を印加し、そこに強力なフェムト秒レーザーパルス照射することにより、急激に光電流を発生させ、強出力のテラヘルツ波パルスを発生させるものである。しかし、光伝導アンテナ素子は、入射光強度を大きくしたときに、発生するテラヘルツ波強度が容易に飽和してしまうことがよく知られている。これは光電流により発生するテラヘルツ波の電場が、もともと素子に印加されているバイアス電場を打ち消してしまうことによるもので、この種の素子における本質的な制限である。したがって、出力強度を大きくするためには、バイアス電場を大きくすることが必要であり、また、飽和を避けて素子を大面積にする必要がある。そのような目的で、従来型の大口径光伝導アンテナが広く用いられてきた。我々の研究グループではこれまでに、この型のテラヘルツ波発生素子を用いて、実時間テラヘルツ・イメージングや、毎秒1000フレームの高速テラヘルツ・ビデオの取得を実現してきた。また、テラヘルツ波発生に関与する半導体材料中の電子ダイナミクスの研究などもおこなってきた。しかし、従来の大口径光伝導アンテナには、10kV 程度の高電圧が必要であること、印加電場の大きさが空中での絶縁破壊によって制限されること、絶縁破壊を避けて高電圧をかけるためにパルス電源を用いると大きな電磁ノイズが発生し、測定に

大きな悪影響を与えること、などの欠点がある。

それらを解決するために、楕形電極構造を持つ新しい大口径光伝導アンテナを半導体微細加工技術を用いて作製し、その電気的特性およびテラヘルツ波発生素子としての特性を評価することを目的として、研究をおこなった。電極を楕形構造にすることにより、大面積を保ちながら、電極間隔を狭くし、低電圧で高いバイアス電場を得ることができる。

2 素子の作製と測定

半導体微細加工の手法により、楕形電極構造を持つ大口径光伝導アンテナを作製した。図1にその構造の概略図を示す。図1(a)には、全体の配置を示した。作製したテラヘルツ波発生素子は、サイズ $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のユニット7つからなり、半絶縁性 GaAs 基板上に作製されている。GaAs 基板は、直径 50mm で、厚さは $350\mu\text{m}$ である。それぞれのユニットに“A”から“G”までのラベルを振ってある。各ユニットの微細構造を図1(b)に示す。また、各ユニットの構造を断面方向から示したものが図2である。各ユニットの構造は、次のようである。GaAs 基板上に間隔・幅が $10\mu\text{m}$ の楕型金属電極を $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のサイズで形成する。電極パターンの作製には、金属マスクによるコンタクト露光を用い、リフトオフ法とエッチング法の2種類の方法を用いた。電極の材料は Ti で、厚さは約 200nm である。電極の上に SiO_2 からなる絶縁層をスパッタリングによって形成する。絶縁層の厚さは、約 500nm である。さらにその上に、間隔・幅が $20\mu\text{m}$ の金属シャドーマスクを形成することにより、一つおきの電極ギャップにだけ入射光が照射されるようにする。それにより、照射光により誘起される光電流の向きをそろえ、それぞれの電極ギャップから発生するテラヘルツ波が打ち消しあわないようにする。シャドーマスクの材料と厚さは Ti(20 nm)/Au(180 nm) である。

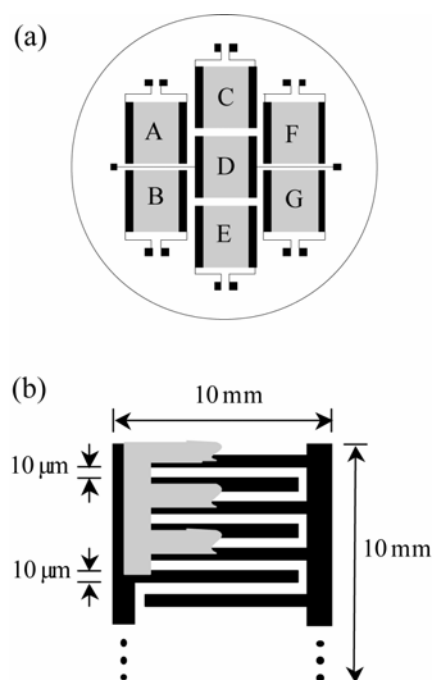


図1 作成したテラヘルツ波発生素子の構造模式図。(a)全体図。(b)微細構造

各ユニットには、独立に電圧を印加することができるようになっており、7つのうち一つだけを使用したり、ユニットごとにバイアス電圧を逆転させたりすることができる。このような微細構造を、これほどの大面積で無欠陥で作成することは、容易ではないので、素子全体を一つのユニットとせず、7つに分けることで、一部に欠陥があっても、その他の部分だけを用いることができるようにした。また、7つのユニットを独立に動作できるようにしたことで、可動鏡なしの干渉測定などの新しい応用が開けることとなる。図3に、作製された素子の写真を示す。半導体プロセスによる実際の素子の作成においては、金属の除去が完全でないために導通が起きてしまう問題が生じたが、プロセス条件の最適化を行うことで、無欠陥の素子を作成することができるようになった。

テラヘルツ波発生に関する性能評価のため、素子に最大 30V の直流電圧（バイアス電場にして、最大

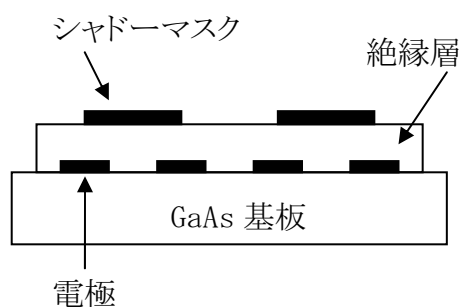


図2 作成したテラヘルツ波発生素子の断面図

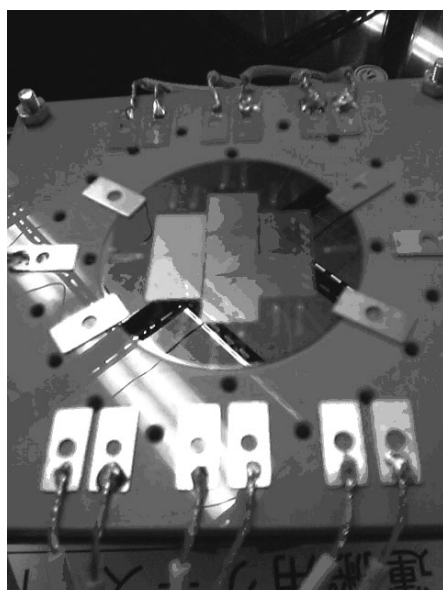


図3 作成したテラヘルツ波発生素子の写真

30kV/cm)を印加し、増幅したフェムト秒チタンサファイアレーザーからの光パルス(波長800ナノメートル、パルス幅150フェムト秒)を素子全体に照射してテラヘルツ波パルスを発生させ、発生したテラヘルツ波をTPX(ポリマー材料の一種)レンズによって集光し、その電場波形を電気光学(EO)サンプリング法によって測定した。EOサンプリング法とは、電気光学効果を示す結晶にテラヘルツ波を照射し、その電場により結晶内に誘起される複屈折性を、同時に結晶を透過させたフェムト秒光パルス(プローブ・パルス)の偏光状態の変化を観測することにより、測定する方法であり、感度よく高い時間分解能で、テラヘルツ波の時間波形を測定することができる。プローブ・パルスは、テラヘルツ波発生素子に照射したフェムト秒レーザーの出力の一部を分けて可変時間遅延路を通したものをを用いた。EO結晶としては、厚さ1mmのZnTeを用いた。TPXレンズの焦点距離は、98.3mmであった。図4にテラヘルツ波の発生とテラヘルツ波波形の測定にもちいた装置の概略図を示す。

また、電気的な特性を評価するために、電流-電圧(I-V)特性を測定した。テラヘルツ波出力と素子を通る平均電流の印加電圧依存性、照射光フルーエンス依存性を測定し、また、2種類の作製試料と従来の大口径光伝導アンテナ素子の3つを比較した。従来型の大口径アンテナ素子の電極間隔は3cmである。リフトオフ法によるものとエッチング法によるものでは、テラヘルツ波発生に関する特性に大きな変化が見られなかったため、以下では、エッチング法による結果を示す。

さらに、電気的特性を改善するために、絶縁層の材料としてSiO₂ではなくポリイミドを用いて新たに素子を作成し、そのI-V特性を測定した。

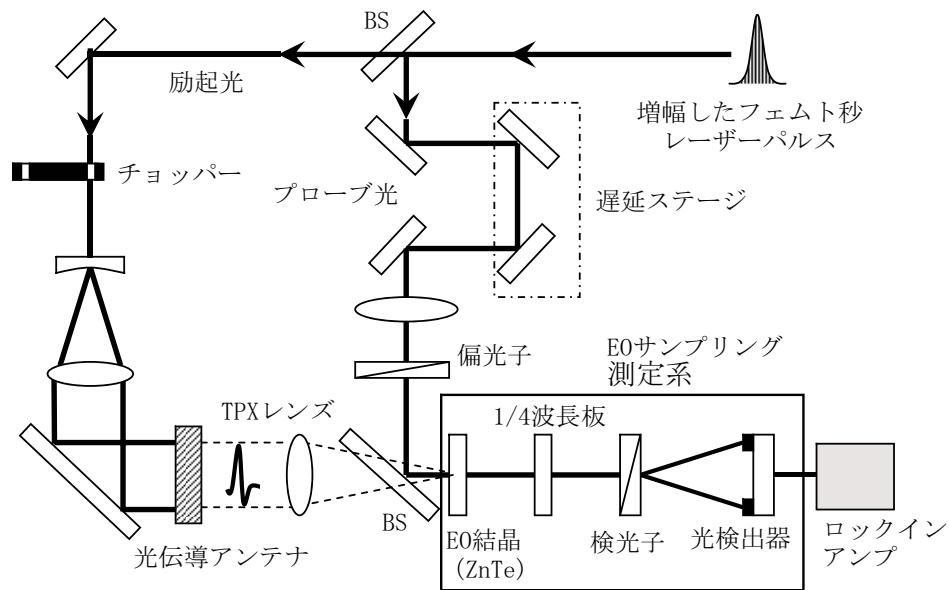


図4 テラヘルツ波発生・測定装置の概略図

3 テラヘルツ波の測定結果

櫛型電極素子から得られたテラヘルツ波のピーク電場は、バイアス電圧にはほぼ比例していた。バイアス電圧が30Vを超えると動作が不安定になる現象が観測された。時間波形は、バイアス電圧によりわずかに変化しており、高電場下における電子のドリフト速度のオーバーシュートの影響と思われる。これについては、ここではこれ以上述べない。典型的な条件における、従来型の大口径アンテナから得られたテラヘルツ波の時間波形と、新しい櫛型電極構造を持つ素子から得られたテラヘルツ波の時間波形とを、図5に示す。太線は、従来型の素子によるもので、バイアス電圧は6kV、照射光の強さは、フルエンス（単位面積当たりの光パルス・エネルギー）で測って $76 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ であった。細線は、櫛型電極素子によるもので、バイアス電圧は30V、照射フルエンスは $7.6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ であった。どちらの場合も、照射フルエンスは飽和レベルを超えている。従来型素子では、出力が飽和する照射フルエンスはおおよそ $5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ であった。この値は、光伝導アンテナの動作を記述する標準的なモデルである電流サージ模型の結果とよく合う。それに対して、櫛型電極素子では、おおよそ $0.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ から上で徐々に出力の飽和が起きることが観測され、これは標準的な電流サージ模型では説明できない。おそらく素子中に分布したCR時定数により、強励起下で電流の供給が不足するために、飽和が起きるのではないかと考えられる。図5から分かるように、これらの条件において、櫛型電極素子の出力のピーク値は、従来型素子の

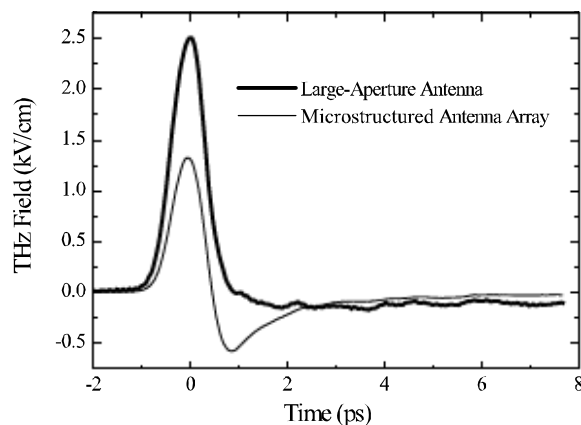


図5 従来型の大口径テラヘルツ波発生素子（太線）と、新たに作成した櫛型電極素子（細線）から発生したテラヘルツ波の波形

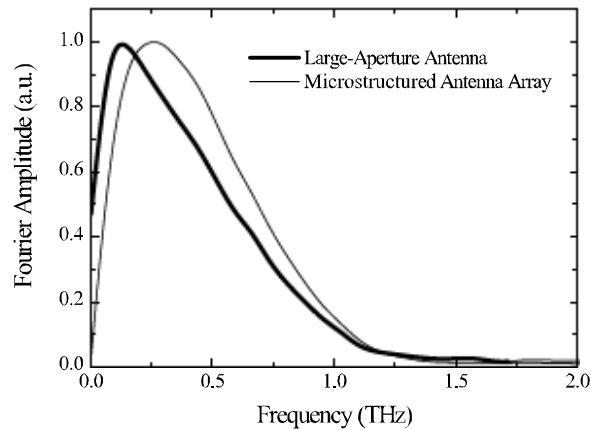


図6 従来型の大口要素（太線）と、新たに作成した素子（細線）から発生したテラヘルツ波のスペクトル振幅

ものの約2分の1であった。単純のスケーリング則によると、光伝導アンテナから発生するテラヘルツ波の電場は、素子の有効面積とバイアス電場に比例すると考えられる。測定によって得られた結果は、このスケーリング則と比較して、7分の1ほどであった。櫛型電極素子において、予想よりも出力が小さかった理由としては、上に述べた飽和の原因と同じものが考えられる。

図6に、図5の時間波形それぞれに対応したスペクトル振幅を示した。これらは、図5の時間波形をフーリエ変換することによって得られる。従来型の素子からは、ほぼハーフサイクルの時間波形に対応して周波数ゼロから約1.5THz程度に及ぶスペクトルが得られたのに対し、櫛型電極素子からは、直流成分がほとんどないスペクトルが得られた。これは、ほぼモノサイクルの時間波形とよく対応している。基板に用いている半絶縁性GaAsのキャリア寿命は数100ピコ秒程度と、観測している時間スケールと比較して非常に長い。照射光パルスによって誘起された光電流は、時間的に急激に立ち上がり、その後、キャリア寿命程度の時間でゆっくりと減衰するはずである。観測されるテラヘルツ波の電場は、光電流の時間依存性を時間微分したものに比例すると考えられるので、このような考察からはハーフサイクルの時間波形が得られ、従来型素子の結果をよく説明する。それに対し、櫛型電極素子からは、図5に示すとおり、ほぼモノサイクルのテラヘルツ波波形が得られている。この原因としては、微細加工に伴う半導体表面の改質などにより光電流が1psほどで急激に減衰しているか、または発生したテラヘルツ波のうちのおよそ0.3THz以下の低周波成分が櫛型電極の影響により伝搬の途中で減衰しているか、のどちらかではないかと考えられる。よりはっきりとした結論を出すためには、より低励起の条件で測定を行うなど、より詳しい測定が必要である。

次に、素子が7つのユニットに分かれていることの利点をはっきりさせるため、それぞれのユニットを別々に動作させて、発生するテラヘルツ波の時間波形を測定した。励起光は、直径約20mmのガウス型のプロファイ

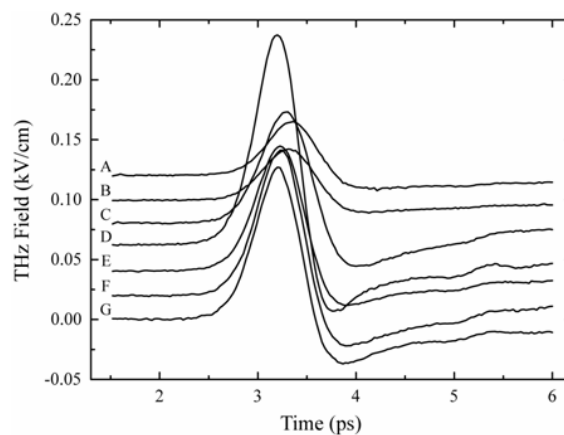


図7 それぞれのユニットから発生したテラヘルツ波の波形

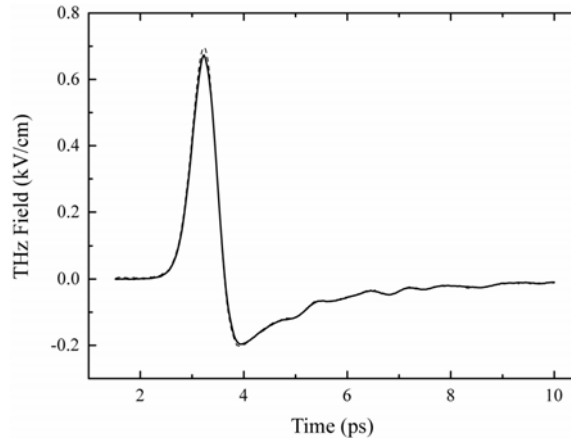


図8 全ユニットを同時に動作させて得られたテラヘルツ波の波形（実線）と、それぞれのユニットからの出力を加算したもの（破線）

ルで素子全体に照射した。バイアス電圧を7つのユニットのうちの1つだけに印加して得られたテラヘルツ波形を図7に示す。図中の“A”から“G”は、図1の各ユニットにつけられたラベルに対応している。それぞれの波形が異なることは、各ユニットに照射される励起光の強さが異なること、各ユニットとEO結晶との位置関係がそれぞれ異なること、また、各ユニットの特性にばらつきがあることによるものと思われる。次に、同じ測定装置の配置で、すべてのユニットに電圧を同時に印加し、発生するテラヘルツ波の時間波形を測定した。その結果を、図8に実線で示す。図にはそれとともに、図7の各ユニットから発生したテラヘルツ波の波形をすべて加算した波形を、破線で示した。両者はほぼ一致していることが図から分かる。このことは、各ユニットから発生したテラヘルツ波が、波形として足し合わされて測定されることを示している。このように、独立に動作する複数の発生源からのテラヘルツ波の波形がコヒーレントに足し合わされることを実験的に示したのは、これが初めてだと思われる。このことを使うことにより、テラヘルツ波の位相敏感測定や、超解像テラヘルツイメージングなどの、新しい応用が開けるのではないかと期待される。

4 絶縁層材料と電気特性

今後の素子の改良のための指針を得るため、素子の電氣的な特性について調べた。図9には、半絶縁性GaAs基板上に櫛型電極を形成した状態での、素子のI-V特性を示す。図から、素子の抵抗値としては、およそ6MΩと、比較的高い値が得られる。それに対して、電極の上に絶縁層のSiO₂膜を形成したもののI-V特性を測定したところ、図10のような結果が得られた。抵抗値に換算すると、およそ10kΩとなり、絶縁層の形成により、絶縁性が非常に悪化していることが分かる。これは、SiO₂膜自体の内部の伝導や、GaAsとSiO₂との界面にお

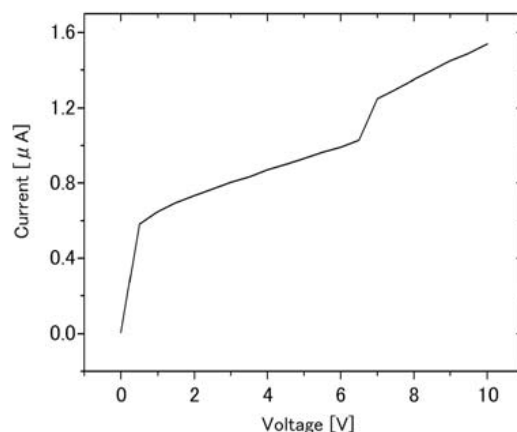


図9 GaAs基板上に電極を形成した状態の電流－電圧特性

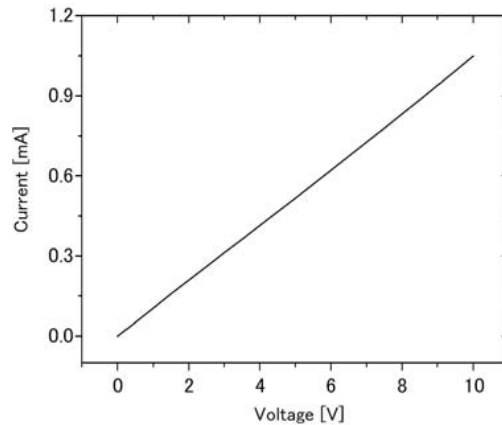


図10 絶縁層の SiO_2 膜を形成した後の電流－電圧特性

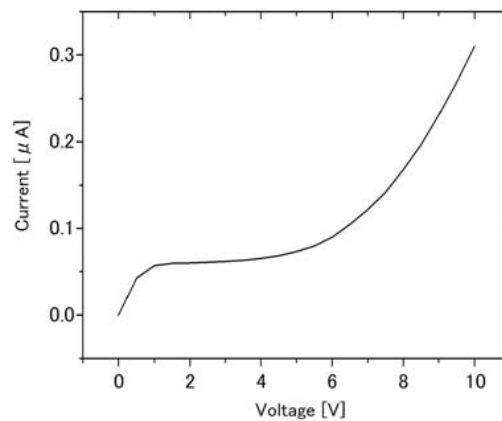


図11 絶縁層としてポリイミド膜を形成した後の電流－電圧特性

ける伝導によるものと考えられ、おもに材料自体の特性によると思われるので、作成法の変更による特性の大幅な改善は期待できない。そこで、あらたに絶縁層材料として、有機ポリマーであるポリイミドを用いることを試みた。図11に、絶縁層としてポリイミド膜を形成した後の素子の I-V 特性を示す。この結果からは、素子の抵抗値としては、およそ $30\text{M}\Omega$ が得られ、絶縁層を形成する前よりもむしろ抵抗値が増している。これより、絶縁層形成前の素子を流れる電流はおもに GaAs と空気との界面で生じていること、また、ポリイミド層を形成することにより、表面電流が抑制されることが分かる。このように素子の電気的な特性が改善されたことにより、発生するテラヘルツ波の強度が増加したり、印加できる電圧の最大値が増加することが期待できる。今後、ポリイミドを用いた素子のテラヘルツ波発生に関する特性を詳細に調べ、他の素子との比較を行うことで、それらを明らかにしていく予定である。

5 まとめ

比較的簡便で高強度のテラヘルツ波を発生できる装置を開発する目的で、櫛型電極構造を持つ大口径光伝導アンテナ素子を作成し、そのテラヘルツ波発生特性と電気的特性の評価をおこなった。電極幅・電極間隔がともに $10\mu\text{m}$ でサイズが $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ のユニットを半絶縁性 GaAs 基板上に7つ集積した素子を作製した。強力フェムト秒レーザーパルス照射して発生したテラヘルツ波の強度は、従来型のものとはほぼ遜色ないものであり、これまで 10kV 程度の高電圧が必要であったのに対し、本研究で試作した素子では、 30V と極めて低電圧で動作する。素子の電気的特性の評価から、絶縁層の SiO_2 により素子の絶縁性が大幅に悪化していることが推測された。絶縁層材料としてポリイミドを用いた素子を試作しその電気的特性を評価したところ、絶縁性に改善が得られた。

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
Intense terahertz pulses from large-aperture antenna with interdigitated electrodes	Jpn. J. Appl. Phys. 45(15), L422-L424 (2006).	2006年 4 月
大口径櫛型電極光伝導アンテナからのテラヘルツ波発生	応用物理学会	2005年 9 月
Large-aperture THz emitter with interdigitated electrodes	The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics	2005年 9 月
Intense THz pulse generation from a large-aperture microstructured emitter	International workshop on terahertz technology 2005	2005年11月
大口径光伝導アンテナによる高強度テラヘルツ波発生	応用物理学会	2006年 2 月