超高速光導電スイッチの作製とテラヘルツ電磁波

板谷 太郎, 中川 格

電子技術総合研究所 電子デバイス部 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-4)

Terahertz Radiation from Ultrafast Photoconductive Switches

Taro ITATANI and Tadashi NAKAGAWA

Electron Devices Division, Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

(Received May 8, 1998)

We describe fabrication of insulator-gap photoconductive switches forming by an atomic force microscope (AFM). The insulator-gap structure prevents discharge in a photoconductive gap, realizing strong electric field in photo-absorbing region. We made 43 nm, 100 nm and multi-gap photoconductive switches which generates strong THz signals. We have measured the transmission modes and the radiation modes. The transmission modes were measured by the electro-optic sampling which can measure the vector components of the electric field for the photoconductive switches with coplanar transmission lines. We have observed clearly the longitudinal components of electric field which can not be ignored in femtosecond region. The radiation modes from the switches with antenna structure were also measured by a Fourier transform polarizing interferometer. The radiation from the switch exceeds more than 1 THz and rather strong compared to the switch made by normal lift-off process.

Key Words: Ultrafast, Electro-optic sampling, Photoconductive switch, Atomic force microscope

1. はじめに

テラヘルツ (THz) 電磁波とは、波長1mmから30 μ m, 周波数にして300GHzから10THzに至る領域の電磁波に対して一般に使用されている。THz電磁波は、光学の分野では遠赤外光(波長100 μ mから10 μ m)と呼称され、電子工学の分野ではサブミリ波(波長1mm以下)と呼称される。1THzに対応する光子のエネルギーは4meVであり、ガスの振動モード・固体中のフォノンの振動モード・半導体中のドナー・アクセプター準位に相当する。振動モードの吸収測定により、大気中のオゾン濃度が計測されている¹⁾。

一方、半導体デバイスの分野においては、微細化を中心としたデバイス作製技術の進展により、単体デバイスとしてはFET構造で300GHz以上²⁾のものが実現され、また回路レベルでも、MUX・DMUXといった集積回路では40GHz以上³⁾の高速動作が実現されている。これらの高速電子回路を評価するための高周波電気信号発生技術と測定技術が求められている。純電気的な方法では、テラヘルツ領域にまで達する電気信号の発生は非常に難しいことから、超短光パルスを用いたテラヘルツ電気信号発生に関する研究が行われている⁴⁾。テラヘルツ電気信号発生には、超伝導体を利用したもの⁵⁾、光による半導体の導電率の変化を利用した光導電スイッチを用いる方法⁶⁾等が用いられている。光導電スイッチは、評価用半導体電子素子との集積化

が可能であること、室温でのTHz電気信号発生が可能であるという利点がある。THz電気信号は、回路上の伝送線路を伝搬する伝送モードと、空間に放射される放射モードと分けて考えることができる。

回路上の伝送モードの計測技術としては、電気的サンプリング技術⁷⁾・電子ビームサンプリング技術⁸⁾・電気光学(Electro-Optic: EO)サンプリング技術⁹⁾を中心として研究が行われている。電気的サンプリング技術では、2ps以下の時間分解能¹⁰⁾が、電子ビームサンプリング技術では、5ps以下の時間分解能¹¹⁾が得られている。後者は高い空間分解能を利用して高密度集積回路の評価技術として応用されている⁸⁾。EOサンプリング法を他の測定法と比較すると、測定対象が金属電極の電位ではなく、電界計測という点に特徴がある。また、超短光パルスを用いる事により、フェムト秒領域の高時間分解能が得られている。また、放射モードを測定する方法としては、光導電スイッチで光パルスとミキシングする方法⁴⁾、EOサンプリングで測定する方法¹¹⁾、フーリエ分光器で直接測定する方法¹²⁾がある。

本稿では、THz電気信号発生のための超高速光導電スイッチの作製法と、EOサンプリング法によるTHz電磁波の伝送モードの測定結果とフーリエ分光器による放射モードの測定結果について解説する。

2. 走査プローブ加工法による 超高速光導電素子の作製

2.1 光導電スイッチとは？

光導電スイッチとは、光照射による半導体の導電率の変化を利用する光電変換素子である。光導電スイッチは、面型でアンテナ構造と集積可能という特徴を持っている。光導電スイッチの基本構造は、Fig.1 (a)に示すように、光を吸収する半導体部と金属電極からなる。光導電スイッチを高速動作させるには、低温成長基板を使用することにより、光吸収層のキャリアの再結合時間を短くする方法と、電極間を小さくすることによりキャリア走行時間を短くする方法に大別できる。低温成長基板を用いることにより1ps秒以下のキャリア寿命¹³⁾が実現されているが、光励起されたキャリアの大半が再結合することから、電気-光変換効率が低くなる。キャリア走行時間を短くするには、金属電極の間隔を狭くして光励起キャリアの走行距離を短くすることと、金属電極間に印加する電圧を大きくして光励起キャリアの走行速度を増大させる方法が有効である。これまでに、電子ビーム露光技術を利用した狭電極間隔の光導電スイッチが試作されている。電極幅300nmの光導電スイッチにおいて、870fs(帯域幅510GHz)のインパルス応答¹⁴⁾が得られている。印加電圧に関しては、電極間の絶縁破壊または沿面放電により制限される。大気中の絶縁破壊電界強度は10kV/mm程度であり、GaAs自身の絶縁破壊電界強度は100kV/mmである。電極間隔100nmに対応する絶縁破壊電圧は10Vとなる。これまでに試作された光導電スイッチでは、電極間の気中放電により、GaAs自身の絶縁破壊に近いところまで印加電圧を大きく取ることができなかった。印加電圧の増大を図るには、Fig.1 (b)に示すようにギャップ間に絶縁破壊を防ぐ透明絶縁体を挿入するこ

Fig.1 (a) Schematic view of a photoconductive switch. (b) Schematic view of an insulator-gap photoconductive switch.

とが有効である。電極間のキャパシタンスの増大を抑えるためには、絶縁体はギャップ間にのみあることが望ましい。このような構造を実現するために、走査プローブによる陽極酸化法を我々は適用してきた¹⁵⁾。

2.2 走査プローブ加工法

走査プローブ加工法とは、トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡等を用いて試料表面に微細加工を施す技術である。走査プローブの先端と試料間での局所陽極酸化¹⁶⁾を利用することにより、100nm以下の微細加工が可能となっている。GaAs上のチタン薄膜を陽極酸化することにより、18nm幅の酸化チタン細線が実現されている¹⁷⁾。Fig.2に示すように、走査プローブに適当な電圧をかけて走査することにより、チタン薄膜上に酸化チタンの細線パターンを形成することができる。

局所陽極酸化法により形成された幅100nmの酸化チタン細線の原子間力顕微鏡によるイメージ図をFig.3に示す。酸化チタン細線は周囲のチタン薄膜の領域より5nm高くなっている。このようにして作製された酸化チタンは透明な絶縁体である。素子の作製プロセスをFig.4に示す。まず、半絶縁性の(100) GaAs基板の上にチタンを4nm蒸着する。次いで走査プローブ加工法により酸化チタンの細線を形成する。プローブ加工後、チタンと金を蒸着することにより、信号線・バイアス線・グランド線を形成する。各伝送線路の幅と間隔は5μmである。最後に、反応性イオ

Fig.2 Micro-anodization process by using an atomic force microscope.

Fig.3 AFM image of the photoconductive gap of titanium oxide. The width of the titanium oxide wire is 100 nm.

Fig.4 Fabrication process for photoconductive switch.

ンエッチングにより、各線間を短絡している不要なチタン薄膜を除去する。これまでのリフトオフプロセスと比較すると、走査プローブ加工法の特徴は、電極間隔の作製と透明絶縁体の作製を1プロセスで実現するという点にある。電極間絶縁層の存在により、エアギャップの場合に比べて大きな電圧がかけられるようになる。試作した素子は、43nmギャップ、100nmギャップ、マルチギャップの3種類である。マルチギャップ光導電スイッチは、細線幅300nm、細線間隔200nm、細線10本を直列に並べたものである。いずれの素子も細線の長さは、伝送線路のライン幅と

Fig.5 Current-voltage characteristics of insulator-gap photoconductive switches.

Fig.6 Schematic view of the device under test in the EO sampling system used in our system.

同じ5μmである。試作した光導電スイッチの暗電流－電圧特性をFig.5に示す。2Vにおける抵抗値は、43nmギャップのもので880kΩ、100nmギャップのもので10MΩ、マルチギャップのもので250MΩである。43nmギャップのもの以外は5V以上の電圧をかけることが可能である。高い電圧領域では、金属電極と半導体界面のショットキー障壁の高さが小さくなることにより暗電流が増大すると考えられる。また、マルチギャップ光導電スイッチにおいては、2Vにおいて暗電流8nAと100nmギャップ光導電素子と比較しても1/25の値に抑えることができた。

3. 電気光学サンプリングによる伝送モードの測定

3.1 電気光学効果

EOサンプリングとは、被測定回路 (Fig.6) からEO結晶中へのしみだし電界によるEO結晶の屈折率変化(電気光学効果)を光学的に検出することにより、被測定回路中の電気信号を間接的に計測する手法である。代表的なEO結晶とその特性をTable 1に示す。すぐれたEOプローブ材としては、ポッケルス係数が大きく、回路への擾乱の小さい低誘電率のものが望ましい。電界のベクトル成分の計測という観点からは、2つの大きなEO係数を持つLiNbO₃やLiTaO₃が有利である¹⁸⁾。

サンプリング光がLiTaO₃のx軸方向から入射した場合、yz平面内での屈折率楕円体(断面)は次式のようにあらわされる¹⁹⁾。

$$\left(\frac{1}{n_0^2} + r_{22}E_y + r_{13}E_z\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E_z\right)z^2 + 2r_{51}E_y yz = 1 \quad (1)$$

対角成分である r_{33} は、結晶のz軸方向の電界成分と結びつき、z軸方向の屈折率を変化させる。また、非対角成分である r_{51} は、結晶のy軸方向の電界成分と結びつき楕円の主軸方向の変化をもたらす。サンプリング光の偏光状態を適当に選ぶことにより、EOプローブと被測定回路との相対

Table 1 Electro-optic coefficients for typical EO crystals.

Material	Type	Electro-optic coefficients (pm/V)	Refractive index
LiNbO ₃	C _{3v}	$r_{13} = 8.6, r_{22} = 3.4, r_{33} = 30.8, r_{51} = 28$	43
LiTaO ₃	C _{3v}	$r_{13} = 7.9, r_{22} = 1, r_{33} = 35.8, r_{51} = 20$	43
ZnS	C _{6v}	$r_{13} = 0.92, r_{33} = 1.85$	12.5
GaAs	T _d	$r_{41} = 1.2$	12
ZnTe	T _d	$r_{41} = 4.3$	10

Fig. 7 The configuration of the EO sampling system.

的な位置関係を変えることなく、基板面内の2方向の電界ベクトル成分の計測が可能となる¹⁸⁾。

3.2 電気光学サンプリングシステム

測定に用いたEOサンプリングシステムの構成をFig. 7に示す。サンプリングビームは、半波長板と偏光子を用いる事により、EOプローブへ入射するサンプリング光の偏光方向を制御することができる。レーザー光のパルス幅は60fs、平均出力は10mWであり、素子励起光とサンプリング光に9:1で分岐される。EOプローブとしては、薄く研磨した板状のLiTaO₃結晶を用いた。結晶の裏面には誘電体多層膜による反射コーティングが施されている。EO結晶の厚さは50μmである。結晶のy軸方向を伝送線路の長手方向に設定する事により、伝送線路に対する横方向電界成分と進行方向成分を計測できる。Table 1に示すように、LiTaO₃は、 r_{33} と r_{51} のポッケルス係数が同程度の大きな値であるので、2つの電界成分を同程度に感度良く測定できる。EO結晶中で位相変調を受けたサンプリングビームは、ソレイユ・バビネ位相補償板により位相補償されたのち、検光子を通して、強度変調に置き換えられて受光され、その出力は差動増幅されて出力される。EOサンプリングの時間分解能は、光パルスの時間幅、しみだし電界の光学厚さ、電気信号が光スポットを通過する時間により制限される。これまでに10-90%立ち上がり時間として200fs以下の時間分解能が得られている¹⁵⁾。

3.3 電気光学サンプリングによる伝送モードの測定

光導電スイッチで得られた高速電気信号をデバイスの評価に用いるには、光導電スイッチと被測定デバイスを伝送線路で結合する必要がある。伝送線路の損失と分散に関しては、これまで様々な解析がなされてきている^{20, 21)}。100GHz以上の高周波領域において顕在化する現象としては、非TEMの進行方向電界成分の存在と放射損失である。我々は、光導電スイッチからの出力電気信号の進行方向電界成分と横方向電界成分をEOサンプリング法により評価した。

100nmギャップ光導電スイッチに対する測定結果をFig. 8に示す。放射モードを含まないように、測定位置は光伝導スイッチから70μmの点で行った。測定された電気信号のパルス幅は、430fsであった。EO結晶のカット及び配置の不完全性により、測定信号は横方向電界成分と進行方向電界成分を含んでいる。横方向電界成分と進行方向電界成分

Fig. 8 (a) The measured signal by the EO sampling system. (b) (c) The longitudinal and the transverse component of the electric field which were estimated from the results measured by the EO sampling system.

分を分離して求めた結果を併せて示す。進行方向電界成分は、パルス部のみ認められ、パルスの後縁部では無視できるようになる。ピーク強度は横方向電界成分の4分の1であり、非TEMモードに起因する進行方向電界成分が顕著に認められる。横方向電界成分に関しては、パルス幅は440fsであり、ピーク値は測定値に比べて10%小さな値となっている。このパルス半値全幅は、GaAs中の高電界領域における電子の飽和速度から計算される走行時間の1.5psよりも小さな値となっている。これは光励起キャリアが飽和した一定速度で運動するのではなく、速度オーバーシュートと呼ばれる飽和速度に達する前の過渡的なキャリアの高速走行現象によるものと考えられる。

4. 偏光フーリエ分光器によるテラヘルツ電磁波の放射モードの測定

光導電スイッチからの放射モードに関しては、これまで盛んに研究がなされている⁴⁾。光導電スイッチは、面型の構造を持つことから、アンテナ構造と集積し易いという利点を持つ。THz電磁波と光パルスを光導電スイッチでミキシングして検出する手法では、光導電スイッチの応答関数を考慮する必要がある。一般にその応答関数を求めることは容易ではない。マルチンパレット型フーリエ分光器(日本分光製)を用いた測定システムをFig. 9に示す。基板内の影響を避けるために、光導電スイッチからの放射電磁波のスペクトルを45°入射の反射配置で測定を行った。素

Fig. 9 Measurement for THz radiation by Fourier transform polarizing interferometer.

Fig.10 The radiation from the 100-nm-gap photoconductive switch with antenna structure.

子の実装に関しては、通常のデバイスと同じように裏面をグラウンドに接地している。測定に用いた光導電素子は100nmギャップのものであり、10 μ m長のダイポールアンテナと集積されている。100nmギャップ光導電スイッチからの放射スペクトルをFig.10に示す。アンテナからの放射スペクトルを見ると500GHz以下の低波数の領域で大きな振幅を持つ。200 μ mの薄い基板を用いたときに、これらのモードが高波数側にシフトしていることが観測されている²²⁾ことから、アンテナの給電線と裏のグラウンド面の間の電界の変化に起因する基板モードと考えられる。また、1THzから2THzまで伸びている成分は光導電スイッチからの放射と考えられる。また、アンテナ給電線を走る高周波成分も放射損失として放射モードに結合していると考えられる。光導電スイッチを回路内に実装した使用する場合、基板モードを始めとする他の金属電極の影響を考慮することが必要である。

5. まとめ

走査プローブ加工技術を利用して絶縁ギャップを有する光導電スイッチを作製した。絶縁ギャップの存在によりGaAs自身の絶縁破壊電圧に近い電圧を印加することができるように、高輝度THz電磁波発生素子としての応用の可能性が示された。光導電スイッチのマルチギャップ化とアンテナ構造の最適化により、更なる高輝度THz発生も可能と考えられる。測定に関しては、電界のベクトル成分を分離して測定可能なEOサンプリングシステムを構築し、高速光導電スイッチの評価に適用してきた。電界のベクトル成分の計測を行う事により、金属電極の電位測定

だけでは得られない、進行方向電界成分を含めた信号解析を行う事ができた。フェムト秒領域にまで達する高速電気信号の計測には、電界のベクトル成分の計測を行う事が今後ますます重要になると考えられる。

また、光導電スイッチからの放射モードの測定をマルチンパレット型フーリエ分光器により測定した。裏面をグラウンドに実装した場合、500GHz以下に強い基板モードの放射が観測された。また、光導電スイッチ自身からの放射モードは2THzまで伸びていることが観測された。近年、電気信号と光信号の速度整合を取る事により、自由空間中での放射モードに対して37THz¹¹⁾までの測定が実現されるなど新しい技術の進展もみられている。

参考文献

- 1) 上瀧 實編：ミリ波技術の手引きと展開（リアライズ社、1993年）p.149.
- 2) P. R. Smith, S. M. Liu, M. Y. Kao, P. Ho, S. C. Wang, K. H. G. Duh, S. T. Fu, and P. C. Chao: IEEE Microwave Guided Waves Lett. **5** (1995) 230.
- 3) A. Felder, M. Moller, J. Popp, J. Rock, and H.-M. Rein: IEEE J. Solid-State Circuits **31** (1996) 481.
- 4) N. Katzenellenbogen and D. Grischkowsky: Ultrawideband, Short pulse Electromagnetics (Plenum Press, 1993) p.7.
- 5) 斗内 政吉：応用物理 **66** (1997) 988.
- 6) 板谷 太郎：応用物理 **66** (1997) 986.
- 7) R. Y. Yu, M. Reddy, J. Pusi, S. Allen, M. Case, and M. J. W. Rodwell: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **43** (1995) 721.
- 8) 藤岡 弘, 中前 幸治：応用物理 **63** (1994) 608.
- 9) 神谷 武志, 高橋 亮：応用物理 **61** (1992) 30.
- 10) J. R. Hwang, H. J. Cheng, and J. F. Whitaker: Optical and Quantum Electron. **28** (1996) 961.
- 11) Q. Wu and X.-C. Zhang: Appl Phys. Lett. **68** (1996) 1604.
- 12) 大竹 秀幸, 猿倉 信彦：応用物理 **66** (1997) 984.
- 13) S. Gupta, M. Y. Frankel, J. A. Valdmanis, J. F. Whitaker, and G. A. Mourou: Appl. Phys. Lett. **59** (1991) 3276.
- 14) S. Y. Chou, Y. Liu, W. Khali, T. Y. Hsiang, and A. Alexandrou: Appl. Phys. Lett. **61** (1992) 819.
- 15) T. Itatani, K. Segawa, K. Matsumoto, M. Ishii, T. Nakagawa, K. Ohta, and Y. Sugiyama: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 1387.
- 16) H. Sugimura, T. Uchida, N. Kitamura, and H. Matsuhara: Appl. Phys. Lett. **63** (1993) 1288.
- 17) K. Matsumoto, S. Takahashi, M. Ishii, M. Hoshi, A. Kurokawa, S. Ichimura, and A. Ando: Extended Abstract of SSDM (1994) 46.
- 18) T. Itatani, T. Nakagawa, F. Kano, K. Ohta, and Y. Sugiyama: IEICE **78-C** (1995) 73.
- 19) A. Yariv: Optical electronics in Modern Communications (Oxford Press, 1996) p. 12.
- 20) R. Mittra and T. Itoh: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **19** (1971) 47.
- 21) J. F. Whitaker, R. Sobolewski, D. R. Dykaar, T. Y. Hsiang, and G. Mourou: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **36** (1988) 277.
- 22) T. Itatani and T. Nakagawa: to be published in SPIE Proceedings **133** (1998).

レーザーワード

光導電スイッチ(photoconductive switch)

光導電スイッチとは、光照射による半導体の導電率の変化を利用する光電変換素子である。光導電スイッチの構造は、光を吸収する半導体部(semiconductor)と電圧を印加する金属電極(metal)から成る(MSM構造)。pinダイオード等の接合型光電変換素子と比較した場合、面型で他のデバイスと集積化が容易であるという点と、素子容量が小さいという特徴を有する。光導電スイッチを高速動作させる

には、金属電極の間隔を狭くして光励起キャリアの走行距離を短くすることと、金属電極間隔間に印加する電圧を大きくして光励起キャリアの走行速度を増大させる方法が有効である。これまでに、電子ビーム露光技術・操作プローブ加工法により、100nm以下の狭ギャップ光導電素子が試作されており、フェムト秒領域の高速応答が観測されている。(板谷 太郎)