

# 超高速電子回路技術評価ラボ ( Ultrahigh Speed Electronics Lab. )

研究項目：超高速電子回路技術の開発評価  
研究期間：平成9年度～16年度

## 1. 研究の背景

高度情報化社会においては膨大な情報の高速伝送や信号処理に必要な超高速光エレクトロニクス技術が必要となる。このため、フェムト秒領域での光パルスの発生、伝送、分配、制御に関する超高速光エレクトロニクス技術や材料・プロセス技術などの開発を目指した国家プロジェクト「フェムト秒テクノロジーの研究開発」が平成5年度からの産技制度の先導研究の中で検討され、引き続き、平成7年度から本プロジェクトが開始された。本プロジェクトの中では、光通信技術の研究開発に加えてフェムト秒光パルスを用いた高輝度X線パルス発生と利用の研究開発も並行して行われてきた。これらの開発には正確なフェムト秒タイミング制御を伴う超高速光エレクトロニクスが必要となるため、本研究ではフェムト秒レーザーを利用した電気パルスの発生・制御を通じて超高速電子回路技術の研究開発を行っている。

## 2. 研究経過と現状

### 2.1 オーストンスイッチによる310フェムト秒電気パルスの発生

半導体上に断線部を含む金属ストリップ線路を作り、その断線部の半導体にレーザー光を照射すると電子および正孔の生成に伴う電気パルスが発生し、外部から加えた印加電界方向に電気パルスが伝搬する。Auston が発明したオーストン素子は高速の光導電スイッチとして働くことが期待されるため、電極ギャップが100nmの光導電スイッチを試作して特性解析を行ったところ、半値全幅が380fsの超高速電気パルスの発生に成功した<sup>1)</sup>。光学特性を調べた電気光学サンプリングシステムの構成を図1に、光導電スイッチを含む検出素子の構成およびその主要部の写真をそれぞれ図2および図3に示す。

オーストンスイッチの短パルス化には電極間隔距離を小さくすることが有効であると言われており、走

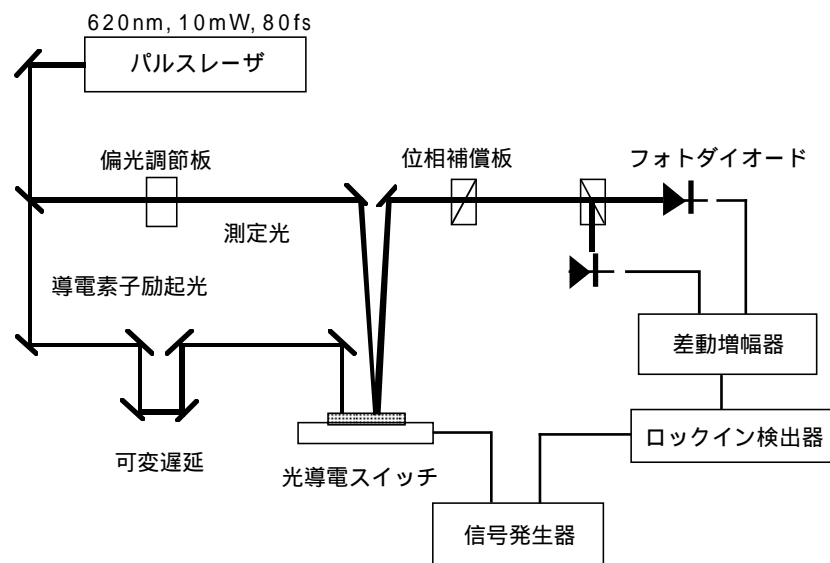


図1 電気光学サンプリングシステム構成図

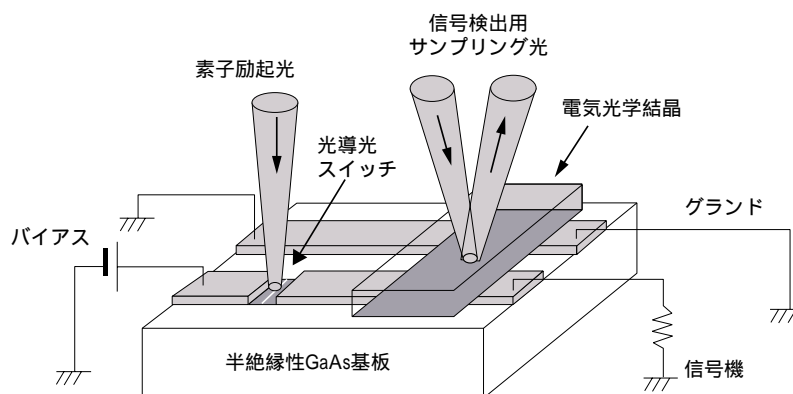


図2 光導電スイッチ素子を含む電気光学サンプリング検出器の概観図

査型トンネル顕微鏡 (STM) によるプローブ加工法を用いて半導体基板上に形成した金属薄膜を局部的に陽極酸化することによって微小な光導電スイッチの作成を行った。図4に光導電スイッチの作製プロセスを示す。この加工法では、STM プローブを試料表面から

数nmの距離に近接させ、試料とプローブ間に正電圧を加えると試料表面に吸着している水分子を媒介して電気化学的な反応が起こり局部的に陽極酸化を行うことができる。試作した素子では半導体基板上に4nmの金属チタン膜ストリップ線路を形成して局部的に酸化し、高絶縁性のTiO<sub>x</sub>微小ギャップを形成した。これは光の透過性があるため半導体基板を直接光励起できると同時に、沿面放電防止の効果があるから高耐圧化に適した素子構造といえる。

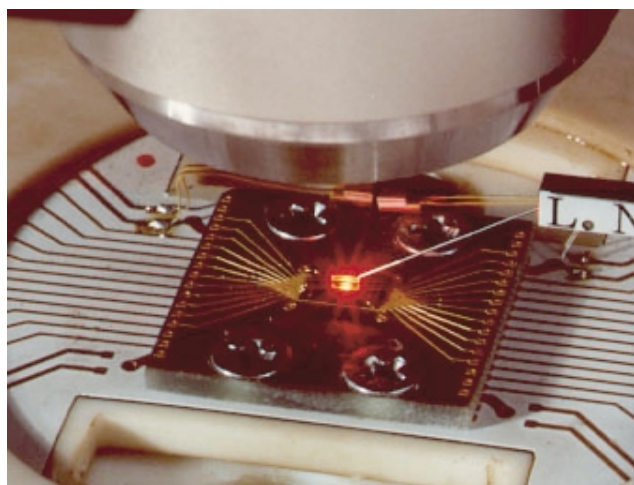


図3 電気光学サンプリング検出器を含む測定試料台

素子構造の検討を行って短パルス化を行ってきたが、特に、パルス特性は緩和時間の長いす引き成分のあるパルス立ち下がりに問題があった。このような低周波成分が現れる原因としては電極から遠方の位置で光励起されたキャリア輸送などによる長時間緩和が考えられる。そこで、低周波成分を生じる原因となっている電流パスの低減を図るため、分子線エピタキシャル成長法(MBE)を用いて半絶縁性GaAs基板上に励起光を透過する絶縁性の電磁波反射層としてAl<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As (1μm)を挿入し、その上に光吸収層として

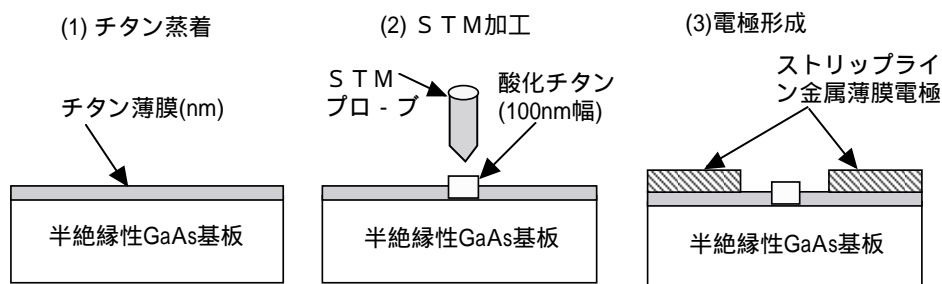


図4 走査型トンネルプローブによるナノ加工を利用した光導電スイッチの作製プロセス  
STM微細加工技術を利用して電極間ギャップと絶縁膜形成を同時に行うことができる。

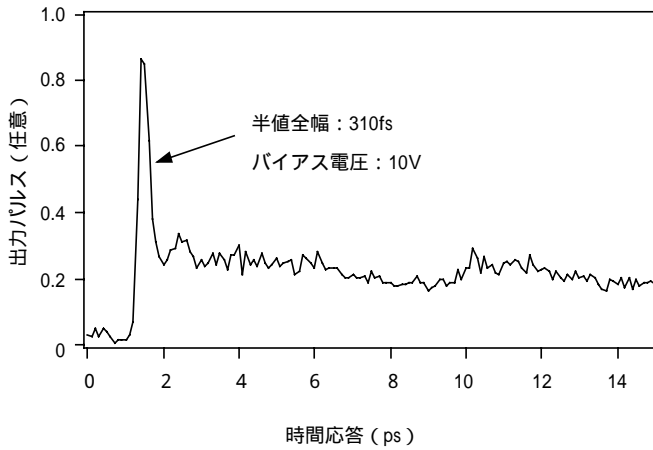


図5 薄膜光吸収層を導入した光導電スイッチのインパルス応答（酸化チタン細線が2本の時）

GaAs ( $2\mu\text{m}$ ) を積層した素子を試作した。この素子では、 $20\text{V}$  以上の高い降伏電圧が得られ、電気パルスの長い緩和成分は  $4\text{V}$  の時で  $6\text{ps}$  というパルス特性が得られ、動作電圧の高耐圧化およびパルス応答の高速化に成功した<sup>2)</sup>。さらに、電磁波反射層を有し、かつ GaAs 薄膜を光吸収層とした試料についてインパルス応答特性を調べたところ、バイアス電圧が  $10\text{V}$  のときパルス半値幅が  $310\text{fs}$  の今までに最高速のパルス特性が得られ、図5に示すように高速応答と大出力化が実現された<sup>3)</sup>。

## 2.2 電界ベクトル測定法による超高速電気パルスの精密計測

超高速電気パルスの精密測定を行うため、電界ベクトルの各成分を高精度に分離して計測する方法を考案し、各成分を分離して評価する手法を開発した<sup>4,5)</sup>。従来の方法では、屈折率の電界による変化が光学軸ごとに異なることを利用していたのに対して、新手法では、光学軸そのものが電界によってわずかに変化する性質を利用して入射光の偏光状態を変化させるだけで電気光学結晶の位置と方向を変化させることなく測定が可能になることを見出し、その計測方法の有効性を実証した。

伝送線路上の電気パルスの横方向と縦方向の電界成分をそれぞれ分離して測定することにより、超高速電気パルスの伝播では低速域には存在しない縦方向電界成分がかなり大きな割合で存在することをつきとめた。伝送線路には信号線と接地線の対、もしくは接地線・信号線・接地線が3並列に並んだものを使用し

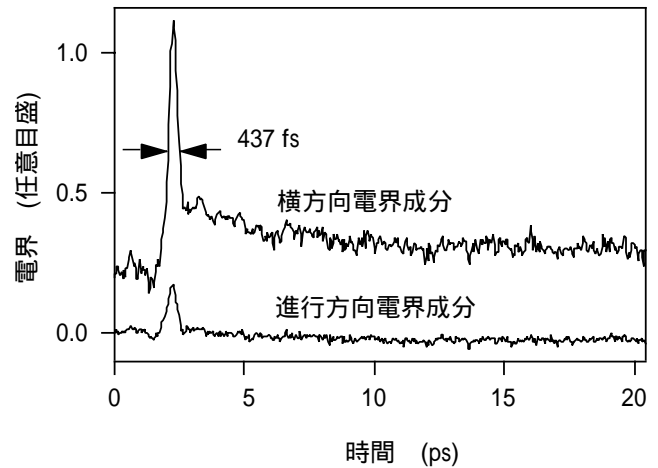


図6 伝送線路中の伝播パルスにおける進行方向電界成分と横方向電界成分

ているが、従来は伝送線路上を伝播する電気パルスによって生じる横方向電界、すなわち伝送線路の敷設方向に垂直な電界のみを検出した。この理由としては、伝送線路上を伝播する電気信号の周波数が低く、伝送線路の間隔距離に比べて電磁波の波長が十分に大きいためであった。

本研究で開発した電気光学ベクトルサンプリング法を利用して伝送線路上を伝播する半値幅  $300 \sim 500\text{fs}$  の超高速電気パルスについて、縦方向電界と横方向電界を分離して測定することに成功した。その結果、図6に示すように、超高速電気パルスの立ち上がり部分には横方向電界成分の  $20\%$  以上に達する縦方向電界成分が存在することを見出し、縦方向電界が横方向電界に比べて極めて速い立ち下がりを示し長時間緩和成分がないことを明らかにした。本実験で取り扱う周波数領域は  $1\text{THz}$  前後であり、伝送線路の間隔  $10\mu\text{m}$  に比べて十分に長い波長領域であるが縦方向電界成分が無視できない大きさであるため、このような電界ベクトル解析を通して正確なパルス測定を行っている。

## 2.3 フェムト秒電気パルスの伝播特性と電磁放射

周波数成分が  $1\text{THz}$  を越える超高速電気パルスが従来の伝送線路上を伝播すると急激な減衰が起こることが問題となる。超高速電気パルス伝播によるパルス幅の増大について光導電スイッチからの距離依存性を図7に示し、パルス出力の伝播特性を図8に示す<sup>6)</sup>。半値幅増大の原因としては伝送線路の分散特性によると考えられる。この周波数領域では各種材料の屈折

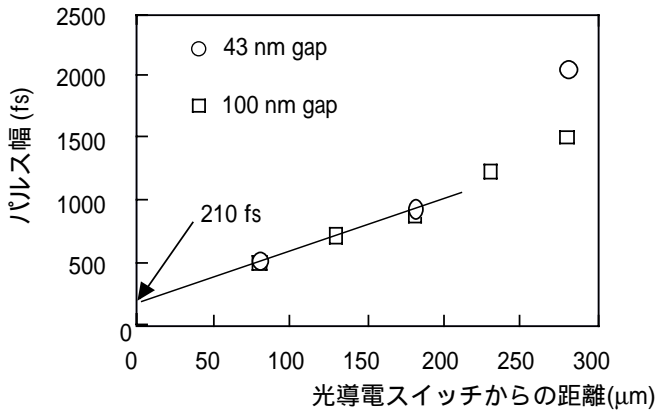


図7 伝送損失等によるパルス幅の増加を伴う伝播特性  
光導電スイッチのギャップ長は43nmおよび100nm

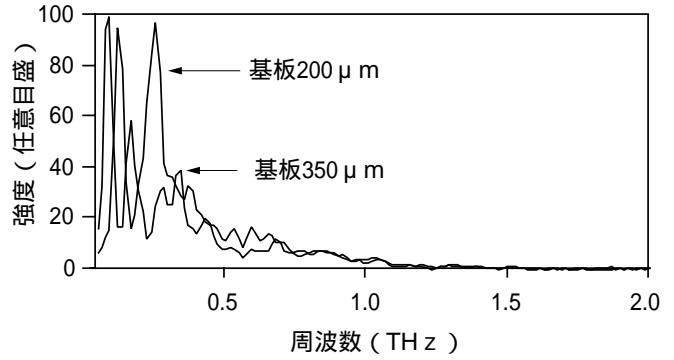


図9 半導体基板の厚さが異なる光導電スイッチ  
素子からのTHz放射スペクトル

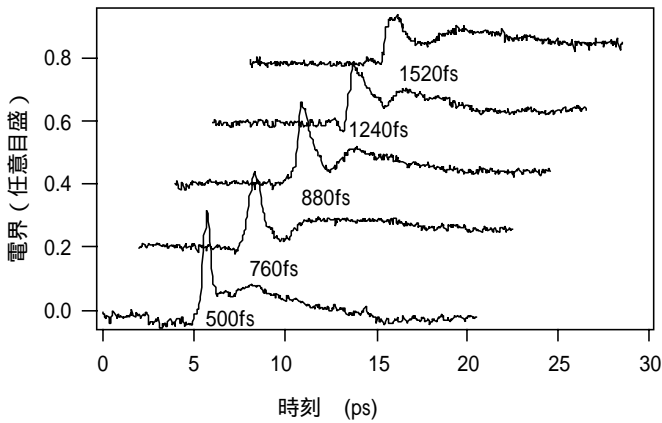


図8 伝送線路上の超高速電気パルスの伝播特性

率に大きな変化がないため、分散の主要因は伝送線路金属の表皮効果と放射損失の存在による。表皮効果に起因する減衰に関しては理論的な検討が既に行われているが、その結果と比べてもはるかに大きな減衰が確認されたため、パルス形状の劣化と減衰の要因として放射損失が大きいことが明らかとなった。数百μmのパルス伝播の結果、パルス幅が数倍に広がるので、従来型の三線式伝送線路ではフェムト秒電気パルスを1mm以上伝播させるのは困難であることが予測される。長距離パルス伝播を行うには放射損失の解明と抑制が不可欠であることが明らかとなった。

フェムト秒電気パルスの伝播に伴う電磁放射損失について定量的な測定を行ってどのような原因で発生するのかを調べた<sup>7,8)</sup>。放射損失を強調するために2線式コプラナ型伝送線路中に線路をショートするように配置した超高速光導電性スイッチを形成した回

路素子で実験を行った。この光導電性スイッチに光パルスを照射すると伝送線路がショートして電気信号が流れるが、その電流成分は遠方での電磁界を互いに相殺するので放射損失には余り寄与しない。伝送線路の2線間を短絡すると、伝送線路と垂直な電流成分は打ち消すものがないので大きな放射損失源となる。従って、素子から発生するTHz電磁波のスペクトルを計測することにより放射損失について調べることが出来る。伝送線路はスイッチ部分から両方に1.5mmの距離にあるからここで問題にしている時間領域では無限長の伝送線路と見なしてよい。

パルス計測実験の結果、0.3THz以下に等間隔の大きな出力ピークが観測された。この周波数は基板の表面と裏面を両端とする共振器の共振周波数に相当し、基板内で起こる電磁波の共振現象の結果、大きなピーク強度の周波数スペクトルを示すものと考えられる。これを確認するために基板の厚さを変えた試料で同様の実験を行ったところ予想通りの結果が得られ、基板の厚さに反比例して周波数ピークがシフトすることが判った。これらの結果を図9に示す。また、半導体の屈折率が3~4であることを考えると、4次以上の高調波に関しては横モードの存在が無視できず、そのために単調な共鳴ピークの形状が崩れることが予想されるし、実験結果もこれを証明している。

伝送線路上の信号伝播速度は真空中の電磁波の伝播速度より遅く、半導体基板中の電磁波の伝播速度より速いことが一般に知られている。これから推測すると、信号伝播時には伝送線路から空気中に電磁放射される漏れ成分は小さく、半導体基板側から電磁放射される漏れ成分の方が大きいと考えられる。この実験結果から、伝送線路の損失が極めて大きく上記の近似的

な理論が成り立たない領域でも、半導体内を反射しながら走行するTHz電磁波は主な放射損失源となり、パルス伝播特性を劣化させることを明らかにした。放射損失は表皮効果に起因する場合と異なり伝送線路の設計形状などに大きく依存するため、このような点を考慮して研究開発を進める必要がある。

### 3. 期待される波及効果

高度な情報通信ネットワーク社会では大容量の情報処理や高速通信が必要となるため、現在の情報技術の何倍もの能力が必要となる。このため、現在のシリコンLSIによるエレクトロニクス技術インフラに基づいた情報社会がさらに高度に発展するもののシリコンLSIデバイスだけでは十分対応できるとはいえない。ここで進めている研究開発は光技術を基盤とした超高速光エレクトロニクス技術であり、21世紀初頭に到来すると言われている情報ビッグバンに対して先導的かつパイオニア的な役割を果たすものと期待される。

### 4. 今後の研究展開の方向

300 fs級の電気パルスを発生する超高速光エレクトロニクスの開発に成功した初期の段階であるが、今後は歩留まりのよいサブ100nm光導電スイッチ素子技術の開拓を図ると共に、誘電体装荷による非線形伝送路の検討を進め、超高速トランジスタなど半導体における電子機能の限界に挑戦しつつ、超高速性や並列処理性など光特有の機能を取り入れた光電子融合の超高速回路素子技術の実現を目指し、有用性の高いシステムデバイス技術の研究開発を行う。

### 参考文献

- 1) T. Itatani, K. Segawa, K. Matsumoto, M. Ishii, T. Nakagawa, Y. Sugiyama, and K. Ohta : "380 fs electrical pulse generation from 100 nm insulator-gap photoconductive switches fabricated by an atomic force microscope", SSDM'95, p.980 (1995).
- 2) H. Kikawa, T. Itatani, Y. Tanuma, T. Sugaya, K. Matsumoto, T. Nakagawa, Y. Sugiyama, and K. Yonei : "Fabrication of ultrafast photoconductive switches on a thin absorption layer",

FST'99, p.88 (1999).

- 3) T. Itatani, H. Kikkawa, T. Sugaya, K. Matsumoto, T. Nakagawa, K. Yonei, and Y. Sugiyama : "Ultrafast photoconductive switches with current block layers fabricated by nano-anodization process", FST'00, TC-10 (2000).
- 4) T. Itatani, T. Nakagawa, F. Kano, K. Ohta, and Y. Sugiyama : "Electrooptic vector sampling", IEICE Trans. Electron., vol. E78-C, p.73 (1995).
- 5) 板谷太郎, 中川格 : "電気光学サンプリングによる電界成分の測定", 応用物理, vol.65, no.5, p.564(1997).
- 6) T. Itatani, Y. Kotaki, T. Nakagawa, K. Matsumoto, Y. Sugiyama, and H. Uchiki : "Ultrafast photoconductive switches with a 43 nm gap fabricated using an atomic force microscope", Jpn. J. Appl. Phys., vol.36, p.1900 (1997).
- 7) T. Itatani and T. Nakagawa : "Ultrafast Photoconductive switches with nanometer-size structures", CLEO/Pacific Rim'97, p.76 (1997).
- 8) T. Itatani, K. Matsumoto, and T. Nakagawa : "THz generation from photoconductive switches with nanostructures", J. Surf. Sci., vol.4, p.232 (1998).

### 当該研究担当者等

ラボ構成員(総数4名)

職員(4名) 杉山佳延\*, 中川 格, 板谷太郎, 菅谷武芳  
(電子デバイス部)

\*ラボリーダー