

フェムト秒時間尺度で測る 超高速光サンプリングスコープ

アルブレヒト・バーテルス、トマス・デコージ

非同期光サンプリング (ASOPS) と呼ばれる超高速光学時間領域分光に対するアプローチの改善により、オプトメカニカル時間遅延がマスター / スレーブ構成と組み合わさった非同期パルスに置き換わる。

技術の進歩によって、日常生活を支配する多くの機能オブジェクトの規模が時間とともに微小化している。結果的に、研究者やエンジニアがマイクロな、果てはナノスケールの長さで物理過程の動力学の理解を高めることが肝要になる。このことは、コンピュータチップのトランジスタレベルでの伝熱や放熱、また、太陽電池、フレキシブルスクリーン向けの有機半導体などのプロセスについての知識を含む。さらには、新しい光原子時計で使用される原子雲などの電磁場に浮遊しているメゾスコピック物体における動力学についての知識も含まれる。

関連する時間スケールは、10fs から数100ps までの範囲となることがよくあり、カメラ、オシロスコープなど要求時間分解能がサブピコ秒の測定器では簡単にアクセスできない。研究者は、これまでは代わりに、光相関技術を用いて超高速時間領域分光 (TDS) に役立てていた。その技術は、極短レーザーパルスを使って対象に非平衡状態を作り、さらに第2の時間遅延パルスを使って、所定の励起後に励起に対するサンプルの反応の瞬間画像を記録する。この方式が、繰り返し、しかも時間遅延を変えながら適用されると、データをステッチしてサンプルの反応「映像」(ムービー) を作成することができる。

従来のアプローチ

超高速光 TDS への古典的アプローチでは、1 個のパルスレーザーとビームスプリッターを使って、空間的に分離したビームでポンパルスとプローブパルスを作る。1つのパルスが、相対的な飛行時間 (TOF) 調整ができる可変長のパスを進み、次に両方のパルスがサンプルに到達する。ほとんどの場合、タイミングは、移動範囲が数センチから 1m までの機械的平行移動ステージのレトロリフレクタでコントロールされる。

これらのステージには問題があり、扱いにくい。と言うのは、これらのステージは大きな時間軸調整誤差、残留調整不良、また移動中のピッチやヨーによるビームウォークオフが生ずる傾向があるからだ。300 μ rad ミスアライメントあるいはピッチ、これは最先端のステージで非常に現実的な値であるが、これは1/1000程度のタイミング(その結果、周波数)エラーとなり、サンプルにおいてハーフビーム径でポンプとプローブビームのウォークオフが生じ、大きな画像の乱れとなる。

さらに、データを急いで(つまり、動作中に)採ると遅延段階ではノイズが加わり、データポイント間で音響雑音を避けるために増速、減速する必要があるならば、それは時間の無駄になる。このデッドタイムは、ステージの大き

な物理量を思い通りに速く動かせないという事実とともに、基本的にその計測速度を制限する。したがって、急激に変化する環境あるいは物理的条件(例えば、パルス磁場、あるいは急激な温度または圧力変化)、あるいは動的現象の探求下での計測は不可能であり、超高速光学 TDS は、不当に長いアキュジションタイムを必要とする。

ASOPS

非同期光サンプリング (ASOPS) は、上記の問題を回避する超高速光 TDS へのアプローチである。これは、1987 年にピコ秒レーザー⁽¹⁾を用いて開発され、繰り返しレート f_r 1GHz のフェムト秒レーザー2台を利用してフェムト秒の世界にもたらされた。これは、わずかなオフセット Δf_r があるマスター / スレーブ構成としっかり組み合わせられている⁽²⁾。このオフセットは、通常は1~10kHzの間であり、これがレーザーからのパルスペア間の遅延の原因となる。したがって、個々のショット、例えば10fs at $\Delta f_r = 10$ kHz で、 $\Delta \tau = \Delta f_r / f_r^2$ だけ増加する。

そのレーザーが次にポンプやプローブレーザーとして使用されると、時間遅延が自動的に生じ、ポンプとプローブパルスペア間の遅延 T は、リアルタイム t の関数として、リニアランプ $\tau = t \times \Delta f_r / f_r$ を経験し、 Δf_r によって与えられるレートで自らを複製する。図1は、テラヘルツ TDS セットアップの原理を説明している。レーザーは今度は、移動ステージが不要であるということを除いては、古典的なセットアップで使われる。

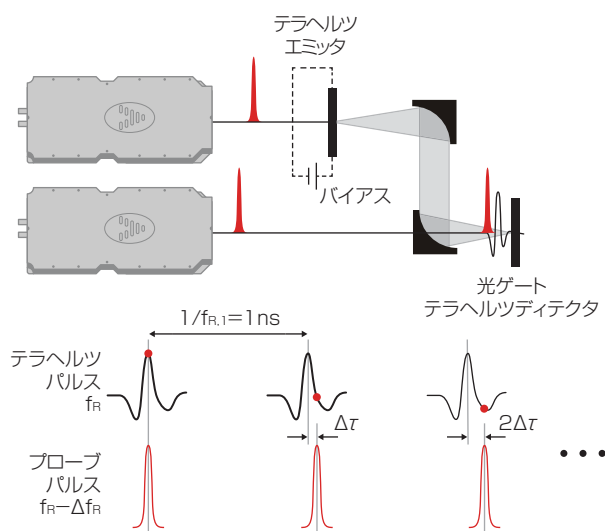


図1 ASOPSベースのテラヘルツ-TDS実験の光学的レイアウトでは、1つのレーザーパルスがテラヘルツ照射のエミッタを励起し、二番目がテラヘルツパルスを光ゲートディテクタでプローブする(サンプルとの相互作用後)。繰り返しレートオフセットの結果、各パルスペアの信号の様々に進むデータポイントをプローブレーザーがサンプリングする。

時間精度はここでは、繰り返しレートオフセットを計測し安定化させる能力によって決まる。10万分のいくつかのレベルの不確かさが達成されるが、これは一般には機械的な遅延生成器よりも数ケタ優れている。

ASOPSアプローチの重要な特徴はスピードであり、これによって機械的な遅延生成器では不可能なアプリケーションが可能になる。典型的なシステムは、1-ns長TDSトレースをサブ100-fs分解能でスキャンする、アキュイジションタイムは100 μ sと短い。比較すると、同じ結果を得るには、移動ステージは平均速度1500m/sで5cm移動しなければならない。このことは、ユーザーが自由にシングルショットでデータを高速に連続取得できること、また任意の数のスキャンをアベレーシングして信号対雑音比(SNR)を強化できることである。ASOPSのさらに良い点は、古典的のセットアップでは非常に時間のかかる作業、経時ゼロ点を探す必要がないことである。

ASOPSがその利点を示すアプリケーションは、過渡的差分反射データに基づくウエハマッピング、テラヘルツ分光、過渡的マルチテラ磁場の分光である。

ウエハマッピング

ウエハ計測あるいは多層ナノ構造の成長モニタリングの一般的な方法は、レーザー誘起ピコ秒超音波の利用である。この場合、強いレーザーパルスが熱線(即ち、高周波超音波)をサンプルに送り込むが、通常は金属トランスデューサを介して行う。すると、埋め込みインタフェースから戻るエコーがサンプル面の反射率変化により検出される⁽³⁾。この技術を用いて、製造後の成長の均一性を調べるためにX線ブラッグミラーをマッピングした。ミラーは、シリコンウエハにスパッタリングした60のシリコン/モリブデン(Si/Mo)層で構成されている。名目的なレイヤ周期は6.8nm、スタック全体の厚さは408nmである。

このサンプルの反射特性は図2aに示している。最初のピークは時間ゼロでの励起パルス。それに続くリングは、内部スタック界面からの多重反射の干渉特性であり、多層周期は振動数から計算できる。

130ps遅れ付近のエコーは、ミラーと基板の界面から来るもので、スタック全体の厚さを示している。ウエハエッジでは、50 \times 50ピクセルエリアを200 μ m間隔でスキャンした。結果として得られるミラー周期分布は図2bに示した。詳細な分析から、スタック中央の変動は0.1nm以下であることが分かっている。また、エッジ方向への成長の不均一のために、大幅な周期縮小も明らかになっている。この2500ピクセル画像に必要なアキュイジション時間は4時間程度(6秒/ピクセル)だった。これは長いように見えるが、比較すると、移動ステージでの計測なら総アキュイジション時間は2日程度となっていたはずだ。多量マッピングアプリケーションには4時間は不十分かも知れないが、それでもASOPSはピコ秒超音波に基づくウエハマッピングへの実際の適用では差をつけている。システムを最適化し、計測精度を一部犠牲にすることで、単一ポイントの計測時間を数十ミリ秒に減らすことは比較的簡単であると考えており、画像アキュイ

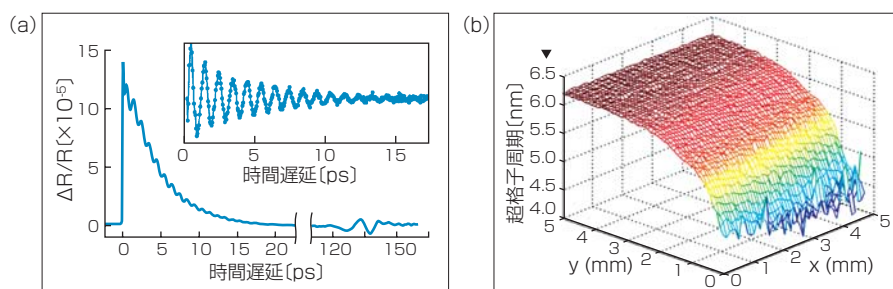


図2 X線ミラーの反射率変化は、次の光学的励起の後にプロットされている(a)。高速振動の周波数(挿入図)は、ミラーの構造周期を示している。130ps付近のエコーの位置は、スタック全体の厚さを示している。ウエハエッジ近傍のX線ミラー周期のマップは均一性および成長プロセスにおけるエッジ効果を示している(b)。


pco.

on the cutting edge

pco.edge family
now with advanced sCMOS
image sensor

up to
82%
quantum
efficiency

1.1
GByte/s
image data
bandwidth



CAMERA **LinkHS**
available

www.pco.de
www.pco-tech.com

◆ feature テスト装置の進歩

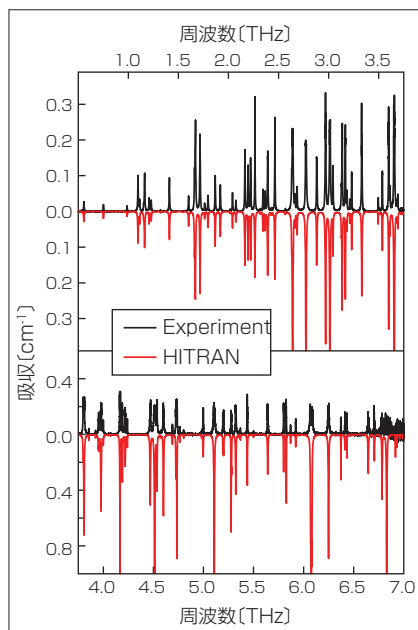


図3 水蒸気のテラヘルツ吸収をHITRANデータベースからの作成されたデータと比較している。約2.5THz以下の一致が優れている、ダイナミックレンジはより高周波ではピーク高に制限がある。総計測時間は1分だった。

ション時間全体も数分にできると見ている。そのような能力は移動ステージにはない。移動ステージなら、平均速度を1~2m/sに維持しながら、1分に100万回増速、減速しなければならないからである⁽⁴⁾。

電磁スペクトル0.1~10THzレンジの分光は、超高速光TDSを利用する別の領域であり、アプリケーションには精度とスピードが重要要素となる。テラヘルツ分光は、潜在的に大きな用途があり、気体分光やセンシング、爆発物や薬剤検出およびモニタリング、インラインペーパー、箔厚計測、太陽電池検査などである⁽⁵⁾。また、基礎物理学でもアプリケーションは幅広い。

テラヘルツ分光

ASOPSベースのシステムを評価するために、0.5~6.5THz、1GHz分解能、相対湿度28%で計測された大気吸収スペクトルとHITRANデータベースに集

められたデータとを比較する。HITRANは、分光分析データに幅広く参照されている⁽⁶⁾。総計測時間は60秒だった(図3)。スペクトル間の質的一致は、最も小さく弱いものでも優れている。吸収値の差は、2.5THz付近の周波数で1%レベルであり、周波数が高くなると増える。これは、システムのダイナミックレンジの限界によるものであり、アベレージング時間を長くすれば克服可能である。

HITRANリファレンスと比較したわれわれのデータの周波数精度の評価は、平均誤差わずか140MHz、すなわち 9×10^{-5} 相対ユニットであり、これは前述の期待値に一致している。このような値は、同等の計測時間および帯域をもつとわれわれが認識している古典的なシステムの報告よりも、少なくとも一桁低い。アキュイジション時間が1秒でも、平均周波数誤差は、わずかに劣化して160MHzとなる。このレベルの精度は、フィッティングとリファレンスデータの引き算によって、高い吸収バックグラウンドにおける混合気体の弱い濃度成分の正確な分光を可能にするものである⁽⁷⁾。

過渡磁場における分光測定

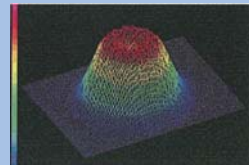
最後の紹介は、古典的な機械的遅延生成器では全く不可能なテラヘルツTDSのアプリケーション、過渡的磁場における分光測定である。そのような計測に関心があるのは、例えば、電子移動度の非接触測定、テラヘルツサイクロトロン共鳴周波数の計測を介した半導体の有効質量。これはAlGaInベースパワートランジスタの研究で使われる。

要求磁場強度は多くの場合、>10Tとなり、10msレベルの時間幅でパルスを提供する磁石でしか利用できない。パルスは不均一であるので、意味のあるデータを取得するには、システムは利用可能な10ms計測ウィンドウ

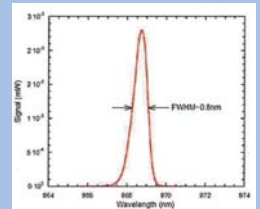
これが 高出力 VCSEL です

この高出力半導体レーザーは
エッジエミッター方式に比べ
数々の特徴があります！

◆ビームの質がよい



Far-field beam profile

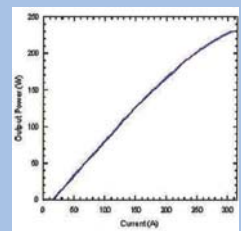


Emission spectrum
5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

◆高スケールビリティ



100W CW single mode VCSEL array mounted on a micro cooler



その他の特徴

- ◆ 温度依存性が低い
- ◆ 製品間のはらつきが小さい
- ◆ バックトークが少ない
- ◆ 波長の安定度が高い
- ◆ FIT<10

AUTEX オーテックス株式会社
URL <http://www.autex-inc.co.jp>
E-mail Sales11@autex-inc.co.jp

東京本社 〒162-0067 東京都新宿区富久町16-5 新宿高砂ビル
TEL. 03 (3226) 6321 FAX. 03 (3226) 6290
大阪支社 〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29
TEL. 06 (6344) 6328 FAX. 06 (6344) 6342

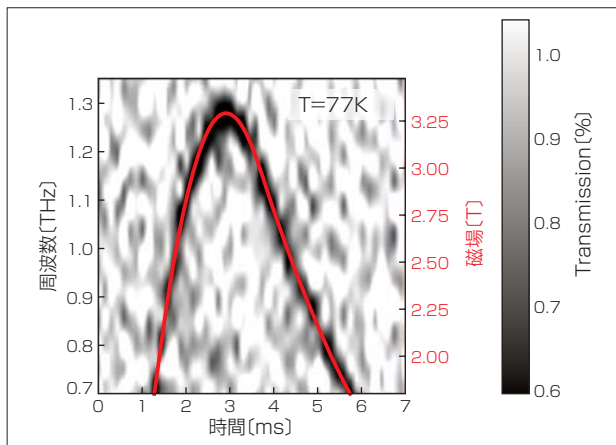


図4 2D電子ガスを持つGaAs/AlGaAsヘテロ構造のテラヘルツ透過スペクトルを時間の関数で示している。サンプルに対して磁場をかけた後(左スケール)、計測された磁場の関数として(右スケール)。

を磁場のパルス下でスライスして十分に小さくし、同時に各時間ごとに完全テラヘルツスペクトル計測ができなければならない。

われわれは、オフセット周波数7kHzでASOPSシステムを使用した。すなわちアキュジション時間はテラヘルツスペクトルあたり143 μ sとなる。シナリオとしては、パルス下で100トレースをとり、磁場の展開にともなうGaAs/AlGaAsヘテロ構造における2D電子ガスのサイクロトロン共鳴の漸進的変化を解明する。図4はサンプルの透過と計測された磁場を時間の関数で示しており、サイクロトロン共鳴と磁場との相関性の明確な特徴がわかる⁽⁸⁾。電子移動度と有効値は、この計測から直接計算できる。このことは、急速に変わる実験条件、過渡的現象の研究というシナリオで、ASOPSが超高速光TDSに

有効な技術であることを示している。パルス磁場以外では、他のシナリオが文献に示されている。例えば、タンパク質の折り畳みのような過渡的生物学的現象、稼働中の燃焼モータにおける分光などだ。

ここにまとめた実験は、繰り返しレートオフセット安定化ユニットTL-1000-ASOPSとともに、繰り返し周波数1GHzのタコア (taccor) レーザを用いて行った。いずれも、レーザーカンタム社の製品。1台ではなく2台のレーザを要することは、確かに費用負担となるが、アプリケーションによっては、移動ステージがなくなることの恩恵によって簡単に凌駕される。そのようなアプリケーションでは、ステージからASOPSへの移行は、アナログデータプロッタからデジタルサンプリングオシロスコープへの移行に高い確率で匹敵する。

参考文献

- (1) P. A. Elzinga et al., Appl. Opt., 26, 4303(1987).
- (2) C. Janke et al., Opt. Lett., 30, 2357(2005).
- (3) C. Thomsen et al., Phys. Rev. B, 34, 4129(1986).
- (4) N. Krauss et al., Opt. Express, 23, 2145(2015).
- (5) M. Tonouchi, Nature Photon., 1, 97(2007).
- (6) L.S. Rothman et al., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 110, 533(2009).
- (7) G. Klatt et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 17, 159(2011).
- (8) B.F. Spencer et al., Appl. Phys. Lett., in preparation(2016).

著者紹介

アルブレヒト・バーテルスは、独レーザーカンタム社の最高経営責任者、トマス・デコージは、独コンスタンツ大物理学教授。

e-mail: abartels@laserquantum.com URL: www.laserquantum.com

LFWJ