

# サブピコ分解能シングルショット光記録が ナノ秒長に広げる

ライアン・ミューア、ジョン・ヒーブナー

相互相関エンコーダ記録用の傾斜光利用(SLICER)は、ポンププローブ型アーキテクチャを使って、記録的な長さで、超高速シングルショット事象を記録する。

高速事象計測問題は、歴史の中で絶え間なく続くイノベーションとなった。利用可能な計測機器が実験者のニーズに合わないときは、時間の制限を克服するために頻繁に新しい実験法が開発された。

有名な例はウィーン氏 (Wien) で、同氏は1919年に高速粒子ビームからの放射を写真撮影することで蛍光減衰時間を計測した。ビームの軌跡に沿って蛍光粒子の位置を時間・空間マッピングにより、蛍光が20nsの寿命で急激に減衰することが観察できる、驚くべき微細時間分解能を達成した。これにより同氏は、自身の結果をアインシュタインの励起状態寿命と比較することができた。アインシュタインの予測は、ちょうど2年前に提案されていた。

エレクトロニクスが登場したことで、今ではオシロスコープやフォトダイオードは、通常、優にナノ秒以下の分解能で計測することができる。しかし、これらの電子計測器は、現状、10psを下回る分解能の事象を計測することはない。アナログデジタル変換器で電子ビット深度と時間分解能の間の技術的トレードオフがあるというウォルデン氏 (Walden) の観察から、この技術を拡張してピコ秒分解能で単一の事象を記録しようとする、この技術は忠実度が極めて低いことが予測される<sup>(1)</sup>。この制約は、大がかりな信号アベレー

ジング、あるいはほかの多重測定アプローチによって回避できるかもしれないが、まれな事象、非反復的事象は、このような技術では観察できない。シングルショットで情報を計測できる技術が必要とされることは頻繁にある。

ピコ秒領域の計測で、アナログエレクトロニクスと光デバイスが、アナログ・デジタル技術を凌駕することを実証した(図1)。ストリークカメラが市販されており、科学のカメラにピコ秒領域の分解能で時間情報を記録する。またシングルショットオートコリレータは、超高速レーザショット自体を計測するために、非線形光学結晶を使い、パルス形状を推測する。

それぞれの時間領域では強力である

が、ストリークカメラは、時間分解能とダイナミックレンジを結びつける空間電荷効果に悩まされ、オートコリレータは一般に記録時間が限られる。ピコ秒分解能で長期記録に簡単に拡張でき、また同時に動作波長の多様性を持つ技術が一般に欠如している<sup>(2)</sup>。

エレクトロニクス法を拡張して分解能を微細化することは難しいので、その代わりに、長期間記録できるように光学的方法を拡張することを目標にしている。1ps分解能と長時間記録を達成した実証ずみの光記録法は、時間情報を減速するタイムスケージング法か、あるいはウィーン氏のように、時間・空間マッピングのいずれかを使う。目的は、高速事象を従来のカメラで捉えるためである。

これらの光記録法は、非線形光学結晶で情報と参照ビームの混合を利用する。情報を時間(引き延ばし、拡張)ま

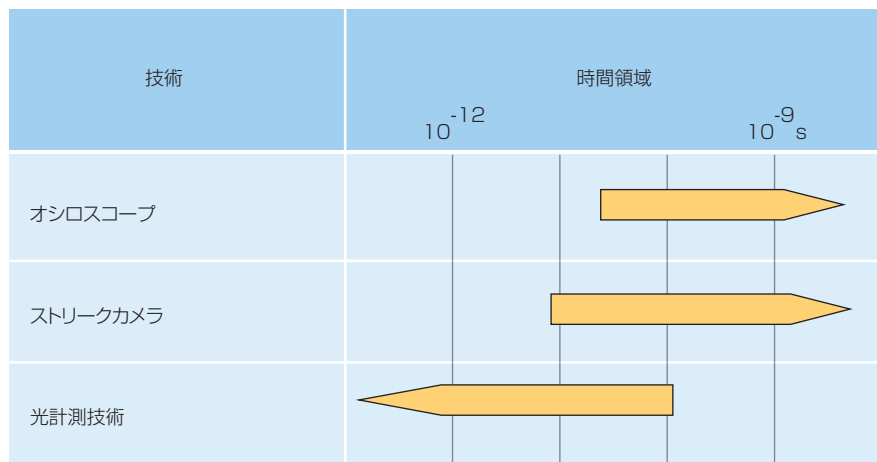


図1 オシロスコープとストリークカメラは長期記録を達成しているが、分解能は相対的に粗い。一方、光計測技術は、極微細分解能を達成しているが、一般に、長期記録に合わせて調整することが簡単にはできない。

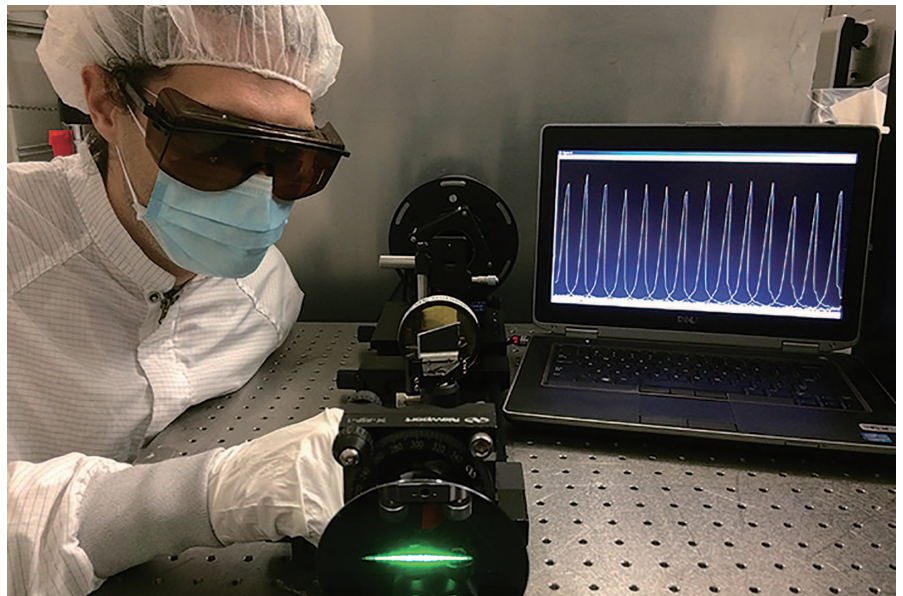
たは空間（イメージングのため）に書き込むためである。これらの技術を、すでに実証されていることを超える記録に直接拡張することは難しい。これらの材料の弱い非線形利得、小さなアパチャ、それに厳しいアラインメントと位相整合要件のためである。

## オブティクスとしての半導体

半導体ベースで、励起キャリアによる屈折率変化に起因する非線形性は、非線形メカニズムの中でも最も強力である。また、光波混合結晶の非線形力を大きく凌駕することがあり得る。たとえば、 $100\text{mJ}/\text{cm}^2$  のポンプフルエンスを吸収すると、ガリウム砒素 (GaAs) などの多くの III-V 半導体では、0.02 の屈折率変化が生じ、わずか  $30\mu\text{m}$  プロープを通過させるだけで半波長位相シフトを誘発することが可能である。この効果は、ポンプ制御としてプロープを光学的にスイッチする光変調器の実現に使える。

対照的に、光波混合プロセスに基づいて同等のフルエンスで同じデバイスを作るには、 $1\text{ps}$  パルスなら、厚さが少なくとも 2 ケタ大きな材料が必要になる。この強力な非線形利得で、半導体非線形性をベースにしたシングルショット光レコーダなら、潜在的に現在の光レコーダよりも数ケタ長い記録が可能になる。

半導体材料は、サブピコ秒のタイムスケールで伝導帯まで励起できるが、大半の半導体材料は、 $0.1\text{ns}$  ～ 約  $10\text{ns}$  のタイムスケールで低エネルギー状態に減衰する。これは、積算的な動き、あるいはフルエンス依存の屈折率を引き起こし、それが持続するので、これらの材料は利用するのが一段と難しくなる。従って、安価な市販の半導体ウエハや薄膜は比較的豊富であるが、光ダイテクタを別にすれば、それらが光学



相互相関エンコーダ記録用傾斜光利用 (SLICER) は、超高速シングルショット事象を記録する半導体ベースの光技術。(提供: LLNL)

素子として利用されることはほとんどない。

現在の超高速レーザにおける半導体可飽和吸収体ミラー (SESAM) 技術は、半導体バルク材料に意図的に高欠陥密度を造ることで、まさにキャリアの長寿命問題に直面する。これらの欠陥のために、キャリアは、数ケタ速く不伝導状態に戻る。これは増加する光散乱および材料全体でのキャリア寿命の分

散とのトレードオフである。

対称型マッハツェンダ干渉計 (SMZI) とテラヘルツ光非対称分離器 (TOAD) は、両方とも光半導体スイッチである<sup>(3)</sup>。両技術とも、材料エンジニアリングの代わりに光学設計によって長い統合型応答を緩和する、すなわち、それらは長い統合型レスポンスを光学的に分化する。先進的で、比較的ニッチな一連の活性化半導体材料と対照的に、この

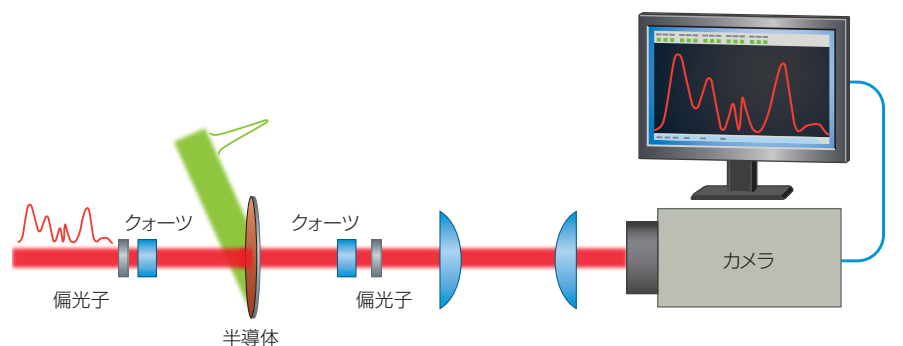


図2 SLICER光レコーダでは、信号の偏光は、ポンプ誘発位相シフトによって一時的に回転させられる。これは偏光子と組み合わせて超高速カメラシャッタを形成している。シャッタ長は、ポンプ長とコーティング複屈折遅延によって決まる。時間・空間マッピングは、ウエハ面でポンプビームの斜め入射角によるもので、この点はカメラに撮像されている。

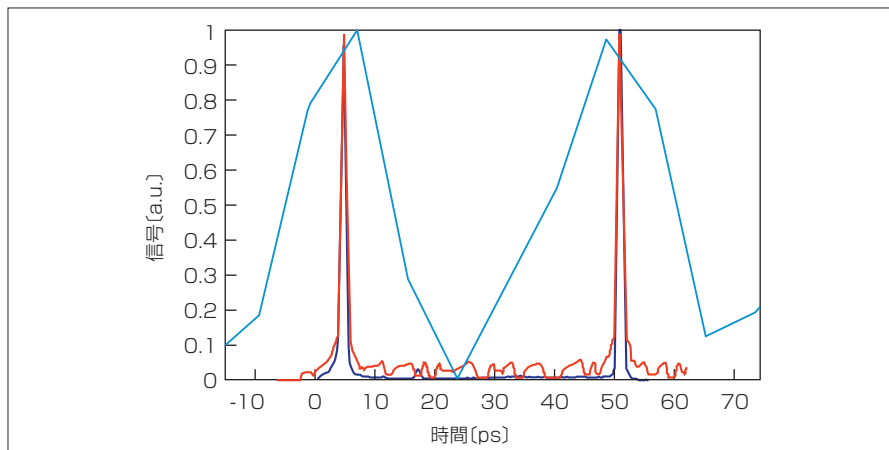


図3 SLICER光レコーダデモンストレーションは、0.4ps分解能でシングルショット50psの記録だった(黒)。広帯域オシロスコープ(青)とスキャンングロス・コリレータ(赤)でもデータ取得された。SLICERは、オシロスコープのようにシングル事象を取得するが、スキャンングロス・コリレータの分解能である。

光学的分化技術は、入手できる半導体材料と膜のすべてを利用できるようにするので、そのアプリケーションのための適切な半導体を選択することができる。

### 光レコーダのための半導体

偏光符号化記録用鋸歯状光照射(SLIDER)オールオプティカルストリークカメラは、その設計的特徴として長い統合型レスポンスを使用する<sup>(4)</sup>。励起された屈折率変化を使ってカメラ表面に光を走らせることができ、その結果、時間・空間マッピングが得られる。実証されている1ps分解能シングルショット50ps記録は、この分解能で記録をさらに延ばすことはできない、自由キャリア吸収によって信号が減衰するからである。

しかしSLICERは、記録を著しく長くすることができる半導体ベースの光記録技術である(P.37図参照)<sup>(5)(6)</sup>。TOADやSMZI光スイッチのように、半導体は、持続的応答を緩和する目的で干渉計内に置かれている(図2)。2つの光学的入力偏光の複屈折遅延のために、ポンプ誘発位相シフトは信号偏光を、逆

回転複屈折出力で、一時的に回転させる。偏光子と組み合わせると、これは一時的なカメラシャッタとなる。シャッタ時間はポンプ時間と複屈折遅延時間によって決まる。最終的に、時間・空間マッピングが、ポンプビームの斜め入力角度によってウエハ面に作成され、カメラに撮像される細に超高速回転シャッタとなる。

SLICERの影響力の大きなデモンストレーションにおいて、0.4ps分解能で50psレコード記録した(図3)。

### 拡張性と多様性

SLICERメカニズムは高感度である

#### 謝辞

ローレンスリバモ国立研究所は、ローレンスリバモ国立安全保障、LLCが運用している。協定 Contract DE-AC52-07NA27344. 下、米国エネルギー省、国家核安全保障局(NISA)。

#### 参考文献

- (1) R. H. Walden, IEEE J. Sel. Areas Commun., 17, 4, 539-550 (1999).
- (2) I. A. Walmsley and C. Dorrer, Adv. Opt. Photonics, 1, 2, 308-437 (2009).
- (3) P. Toliver et al., Opt. Commun., 175, 4, 365-373 (2000).
- (4) C. H. Sarantos and J. E. Heebner, Opt. Lett., 35, 9, 1389-1391 (2010).
- (5) R. Muir and J. Heebner, Opt. Lett., 42, 21, 4414-4417 (2017).
- (6) See <https://ipo.llnl.gov/technologies/slicer>

#### 著者紹介

ライアン・ミュアはフォトニクスエンジニア、ジョン・ヒーブナーは、超高速光&エレクトロニクスシステムグループリーダー。両者ともLLNL所属。e-mail: muir3@llnl.gov URL: www.llnl.gov

ので、潜在的に、この分解能でナノ秒以上に拡張可能である。すべてのオプティクスのサイズとアパチャを拡張することは、この目標への1つの方途である。しかし、グレーティングからのポンプにパルスフロントチルトを課し、それを利用して、オプティクスをコンパクトにし、扱いやすいサイズにすることができる。150mmグレーティングの画像を近斜入射リトロ角で、半導体に縮小すると、1ns記録ができる。信号とポンプ波長を近赤外から紫外波長領域まで広げるために、利用できる市販半導体オプションは多い。

カメラの未使用ピクセル列は、いくつかの方法で利用が可能である。追加のポンプストライプなら多重サブ記録を取得できる、またそうではなく、多重情報チャンネルを取得することもできる。SLICERデバイス先端のカメラをイメージング分光計にアップグレードすると、オールオプティカルレコーダをオールオプティカルスペクトログラフにアップグレードすることができ、信号パルスの光分散の情報を、再構成アルゴリズムなしで、直接取得できる。これらの強化とここでは取り上げないが、ほかにもある多くのことは、SLICERアーキテクチャの多様性と力量を証明している。