OCT画質を向上させる無動の全半導体掃引レーザ

光コヒーレンストモグラフィー（OCT）の画質は検出システムの進歩と波長可変垂直共振器形面発光レーザ（VCSEL）などの改善された光源のおかげで向上を続けている。しかし、VCSELや外部共振器レーザの機械的チューニングを排除した、1つの別の光源が急速に勢いを増している。それは、優れたOCT画質と潜在的な低コスト製造を提供する、米インサイト社（Insight）の無動全半導体掃引レーザ光源である[1]。

ほとんど全ての波長掃引光源は機械的手段で光フィルタ素子またはマイクロエレクトロメカニカルシステム（MEMS）ミラーを動かして出力波長を調整している。残念ながら、これらの機械的構成部品はヒステリシスを示し、共振器不安定性を引き起こし、あるいは雑音を発生する不要な反射を導入して、掃引光源OCT（SS-OCT）システムにおけるOCTイメージング品質を制限する。無動とは「運動の消滅」を意味し、無動全半導体レーザは電気的にチューニングされ、運動するパーツはフォトンと電子だけである。

OCTにおいて、長いコヒーレンス長は、大きな作動距離を容易にし、より大きな組織特徴の体積イメージングとプローブ光出力 - 組織間距離の大きな変動を許容する（**図1**）。インサイト社の無動レーザ（2mm長さの半導体レーザ共振器使用）のバーニア同調分布ブラッグ反射体（VT-DBR）設計は非常に狭帯域の出力を発生し、小型サイズが共振器長変動を低く抑えるので、この共振器は高いフィネスと最小化された中心波長の時間シフトをもち、数百キロヘルツの掃引反復率においてさえ220mm台の長いコヒーレンス長を可能にする。

OCTシステムによっては、多重反射による画像劣化が起こりうる。インサイト社では、OCT画像における好ましくない信号を低減するために、「ユーザー調節コヒーレンス長」を実施している。

100nm範囲を掃引する1310nmの無動レーザは、掃引速度を毎秒4000～400,000掃引の範囲でプログラムすることができる。無動チューニング技術は、運動によるブラーを減らし、測定解像度を高くするために毎秒100万掃引の掃引速度も試験された。さらに、無動レーザは、掃引速度またはチューニング範囲を問わず、光周波数範囲全体の掃引を自動的に線形化する。

軸方向の点像分布関数（PSF）はレーザ掃引の直線性を定量化し、SS-OCTシステムの画質に寄与する重要因子である。PSFは単一の参照反射体をもつOCT干渉計によって生成されたインターフェログラムのパワースペクトルと定義される。低いサイドローブとこれに対応する低い暗雑音をもつPSFは優れたコントラストで詳細な画像を創出する。干渉計配置にも依るが、無動レーザの典型的なPSF値はバックグラウンド信号のノイズフロアに対して55～70dB、サイドローブに対して45～60dBであり、約95dBの感度値が可能になる。

無動レーザのモードホップなしの0.5pm波長反復率はMEMS掃引レーザや掃引VCSELの典型的な数百ピコメートルの値と極めて対照的であり、外部参照と関連データ処理なしでショット雑音制限の位相敏感OCTを容易にする。そして、無動レーザのサイドモード抑制比は機械的に調整されたレーザでの約30dBに比べて約45dBである。

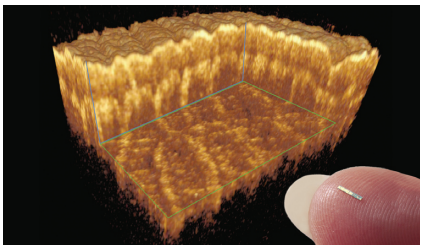

図1　20μmの等方性解像度での生体内OCTヒト皮膚測定は1550nmの無動レーザを使って実施された。データセットの3D再構成は皮膚の内部構造を明らかにするために部分的にデータを除去して示されている。（主要画像の著作権：ウィーン医科大学；挿入画像著作権：インサイト社）

最終的に、無動レーザは、全半導体であるがゆえに量産の恩恵も得られるので、コストは次の数年間の半導体の価格低下に合わせて2000～3000ドルになるであろう。この技術の欠点は、波長範囲が標準的でポピュラーな半導体の領域1310nm～1550nmに制限され（1060nmレーザが眼科OCT用に開発中であるが）、掃引速度の上限が毎秒約100万掃引であり、コヒーレンス長の限界が約2mであるということだけだ。

インサイト社のCEO、マイケル・ミンネマン氏（Michael Minneman）は、「より優れた画像は、より強い線形性、より低い雑音、より高速な可動部のない掃引レーザの直接的結果である」という。ウィーン医科大学のウォルフガング・ドレクサー（Wolfgang Drexler）教授は、「インサイト社の掃引光源技術は、特に、使いやすさ、柔軟性、ユニークなOCT性能などの点で、将来、OCT革命を起こす原動力を秘めている」と付け加えた。　（Gail Overton）

参考文献

(1) M. Bonesi et al., "Akinetic swept-source with centimeters coherence length for high speed OCT," European Conferences on Biomedical Optics 2013, Hot Topics Postdeadline Session, Munich, Germany (May 14, 2013).

LFWJ