

True Color可視化3D光干渉計で フレキシブルエレクトロニクスを理解向上

カート・A・ルービン、レイナー・シェルワルト、ディミトリス・バームパコス、
アポストロス・セグコス、クリストス・ツァミス、グリゴリス・カルタス

白色光干渉計(WLI)、位相シフト干渉計(PSI)、True Colorイメージングとスティッチングを1つの光学プロファイラに組み合わせることで、フレキシブルエレクトロニクスデバイス、材料及び製造を特性評価する。

3D光学プロファイリングは、非接触高分解能計測、可視化技術であり、デバイスや材料のトポグラフィ及び形状を計測するために使われる⁽¹⁾、⁽²⁾。市販の3D干渉計システムの能力は着実に向上してきた。今日、それらは長さスケールでオングストロームから数ミリメートルの範囲で垂直ナノ及びマイクロトポグラフィを計測できる。米KLA社が開発したTrue Colorイメージングは、トポグラフィを補完する追加的理解を可能にする。オプトメカニカルハードウェア、オプティクス、エレクトロニクスやソフトウェアの進歩により、経済的な高精度3D干渉計測システムの構築が可能になっており、3Dプロファイリングは、広範な産業アプリケーション及び科学アプリケーションに有用になっている。

本稿では、この新しい世代の3D光学計測がプリントド及びフレキシブルエレクトロニクス分野へどのように適用されるかの例を紹介する。フレキシブルエレクトロニクスの特徴は、豊富で多様な一連の機能、デバイストポグラフィ、製造技術とさまざまな材料(導電、絶縁、誘電他など)である。これらは、多様な光学特性を持つ複雑な表面構造となっている。フレキシブル基板上的マルチパラメータプリントアレイは、湿度、温度、機械ひずみのセンシング、熱電ジェネレ

ータ及び多くの他の目的のために利用できる。これらのすべての性能は、形状及び製造工程に依存する⁽³⁾。

実験法と結果

図1aは、経済的な統合3D干渉光学プロファイラプラットフォームの例である。これには、白色光干渉計(WLI)、位相シフト干渉計(PSI)、True Colorイメージング、及びスティッチングを組み込んでいる。図1bは、干渉計システムの概略レイアウトである。それには、広帯域白色光源とMirau干渉対物レンズが搭載されていて、WLI、PSI、複合WLI+PSIを実行する。サンプルと内部Mirau参照ミラーからの反射光の干渉によりトポグラフィ依存干渉縞が生ずる。これを高分解能カメ

ラで撮り、3Dトポグラフィックデータに変換する。サンプル着色についてのTrue Color情報も、トポグラフィックハイトの関数として取得される。

図2は、プロトタイプフレキシブル電子デバイスの計測例。これは、フレキシブルポリイミド基板上に2つの異なる材料の多層インクジェットプリンティングを用いて作製された⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。この記事の3D画像は、Profilm解析環境内で解析されており、読者は利用できる⁽⁷⁾。デバイスは、多層インクジェットプリンティングで全面的に構築された3D複合構造。電気コンタクトは、インクジェットプリンティングで作製された。これは、濃縮された約100nm径の銀(Ag)ナノ粒子で満たされた80 μ m径ドロップとわずかにオーバーラップしている。導体トレースは、インクジェットプリンティング有機PEDOT:PSSによって形成された。これにはさまざまなwt%カーボン量子ドット(CQD)が混ざってお

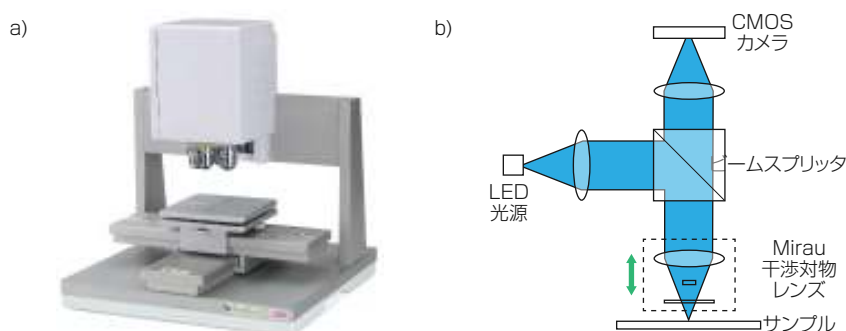


図1 コンパクトな3D干渉光学プロファイラを(a)⁽⁴⁾に示した。干渉計測のために、XYステージがサンプルの位置を合わせ、二方向にチルトして、サンプルを対物レンズ軸に合わせる。簡素化された光学設計も(b)示した。対物レンズの焦点は測定距離により垂直に走査される。低コヒーレンス長白色LED光源を各トポグラフィ干渉計測に使う。干渉計で決まる各トポグラフィックハイトで、サンプル表面をWLI、PSI、True Color計測する。

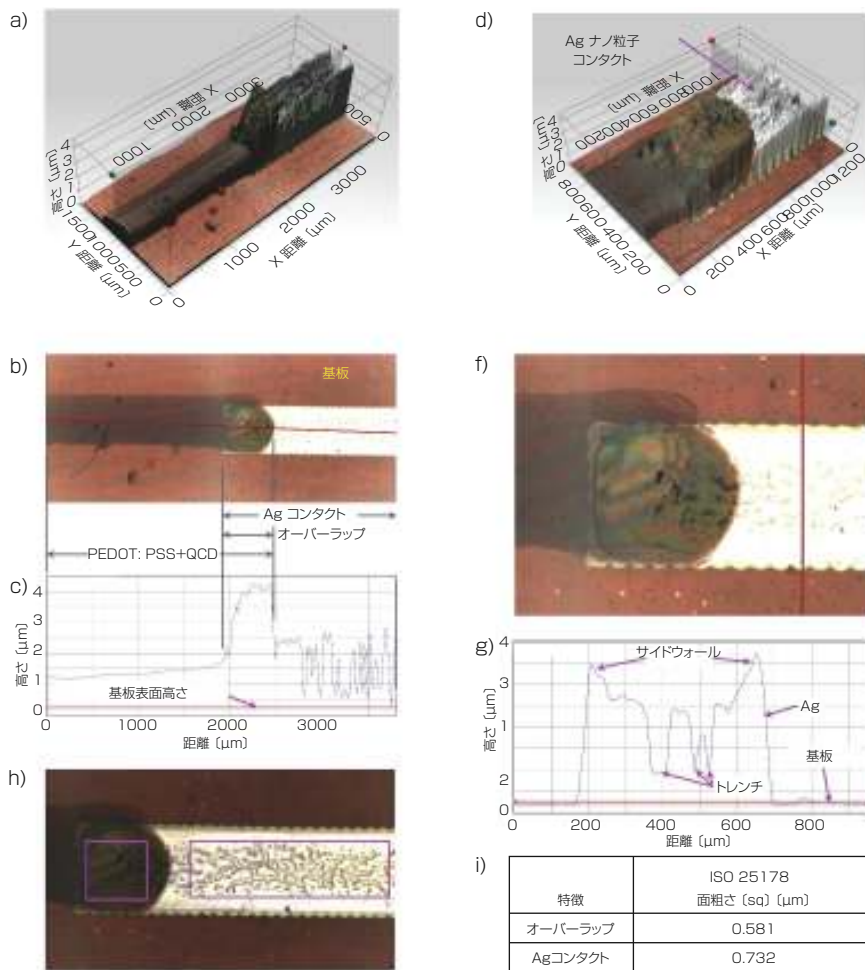


図2 2つのプリントされたパスPEDOT:PSS+10wt% QCDのWLI、トポグラフィの3Dビュー(a)とトップダウンビュー(b)を示している。プロットされた強度領域は、銀(Ag)コンタクト強度を満たすように調整されている。狙いは、導体の色とオーバーラップ領域をもっと明確に示すこと。導体の中央に沿った高さプロファイル、オーバーラップ領域、Agナノ粒子コンタクトも示されている(c)。水平な赤線は基板高さ。オーバーラップ領域Agコンタクトのクローズアップ(d)、Agナノ粒子コンタクトの横断面(e)、トップダウンビュー(f)は高さプロファイル(g)が計測されるところ、またオーバーラップのズームインビューとコンタクト領域はすべて示している。プロットされた強度領域は、Agコンタクト形態を可視化するように調整されている。マゼンタ長方形は、粗さ計測(h)の位置を示しており、(h)における粗さの表も示している(i)。

り、部分的に前のインクジェットプリントされたAgナノ粒子コンタクトとオーバーラップしている。PEDOT:PSSは、一種の電気伝導性ポリマーの半透明材料であり、導電ウエアラブルフレキシブルファブリック、センシング、機能性エレクトロニクスに使用されている。CQDは、PEDOT:PSSの電気伝導性の可調性と光応答性を強化し、可能にする。インクジェット堆積材料のトポグラフィは、蒸発する溶媒の影響を受け

る。従って、トポグラフィ計測とTrue Color計測により、プリントされたデバイス形状の迅速評価ができ、光カラーを製造工程に関係させることができる。

最新の干渉計は、幅広い範囲の横方向の物理的、上下方向サイズでサンプルのトポグラフィを計測できる。図2a~gは、デバイスの3DトポグラフィとTrue Colorを説明している。そこでは、10倍対物で撮った別々の多くの視界データがまとめられて、デバイス

エリア全体を取り囲む単一の合成画像を形成している。その3Dプロットは、高さとTrue Colorを一緒にプロットしている。図2a~cは、2パスインクジェットプリントされた導体トレースの3DトポグラフィとTrue Colorが部分的にAg電気コンタクトにオーバーラップしていることを示している。Agナノ粒子のプリンティング層から作られたコンタクトは、マクロスケール粗さを示しており、これには、堆積プロセスからの溶剤が蒸発した後のディープトレンチと急峻なサイドウォールが含まれる。WLIはトレンチの底の深さを計測でき、サイドウォール形状の高さを特性評価できる。図2cと2hは、PEDOT:PSS材料が、Agコンタクトを上塗りすることでどのように電気コンタクトを作り、デバイスのオーバーラップ領域を部分的に平坦化することで、表面粗さを約20%減らすかを説明している。True Colorにより、多様な材料と領域が明確に区別される。トポグラフィック、幾何学的、及び色情報は、製造工程とモデリングを改善し、デバイス形状と性能を向上させる。

複合WLI+PSI技術は、WLIよりも10倍以上高い垂直解像度を可能にし、基板など滑らかな表面の特性評価に有用である。図3は、基板と導体のトポグラフィとTrue Colorを示している。導体トレースで表された位置依存のカラーバリエーションは、PEDOT:PSS+QCDの厚さ変化から、また半透明PEDOT:PSS層と基板からの光学干渉に起因する。段差は、PEDOT:PSS層の境界エッジ自動検出(赤白の波線)によって特徴づけられる。PEDOT:PSS粗さは、これらの製造条件で厚さにより増加傾向にある。

導体層のインクジェットプリンティングは、PEDOT:PSSと混ぜてQCD濃度

を変えることで調整可能である。溶媒濃度、インクジェットプリンティング条件、プリントパス数を利用して、導体層の厚さを仕上げる。図4は、2プロセスを示しており、結果的にPEDOT:PSS厚さの3.6倍差が出ている。オーバーラップ領域は、True Color画像で直ちに色変化を示している。図4bのオーバーラップ領域のカラーバリエーションは4eよりも強いが、これはAg表面のPEDOT:PSSの厚さ変調に誘発される光干渉に起因する。薄いほうのPEDOT:PSSは平坦化が少なく、厚いほうの層は光吸収が多いので図4eでは光学干渉が低減されている。

展望

ここで議論したプリントフレキシブルエレクトロニクス向けのTrue Colorとトポグラフィ計測例は、他の分野にも適用できる。トポグラフィや形状とプロセス開発、製造、材料及びパフォーマンスとの相互作用を理解する必要があるような分野である。最近の技術進歩により3D光干渉計は、より経済的になっているが、小さな段差の正確な計測能力は維持している。干渉計光プロファイラは、白色光源と位相シフト干渉計を利用して、ミリメートルがオンストローム高さまでのトポグラフィを計測する。トポグラフィとTrue Colorデータは、形状と材料について補完的な情報を提供する。3D光干渉計は、産業及び科学アプリケーションにおける確立された、また新しいデバイスや材料の特性評価に使われる。これには、オプティクス、ソーラ、LED、レーザ加工、半導体、マイクロ流体、MEMS、3Dプリンティング、エッチングや堆積が含まれている。3D光プロファイリングは、検査、不良解析、計測、欠陥解析、粗さと段差計測に通常使われている。

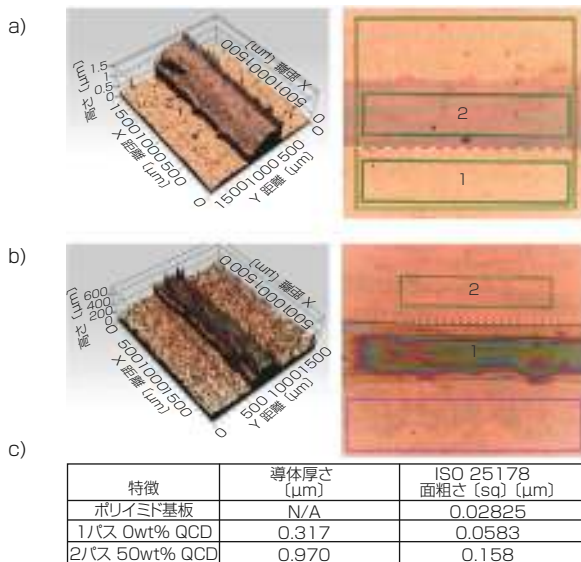


図3 10倍対物レンズによるPEDOT:PSSトレースの複合PSI+WLIトポグラフィとTrue Color計測を示している。ここではエリア平均粗さがマゼンタ長方形で計測されている。2パス50wt% QCD(a)、1パス0wt% QCD(b)、及び PEDOT:PSS+QCDインクジェットプリント厚さと表面粗さ(c)も示している。

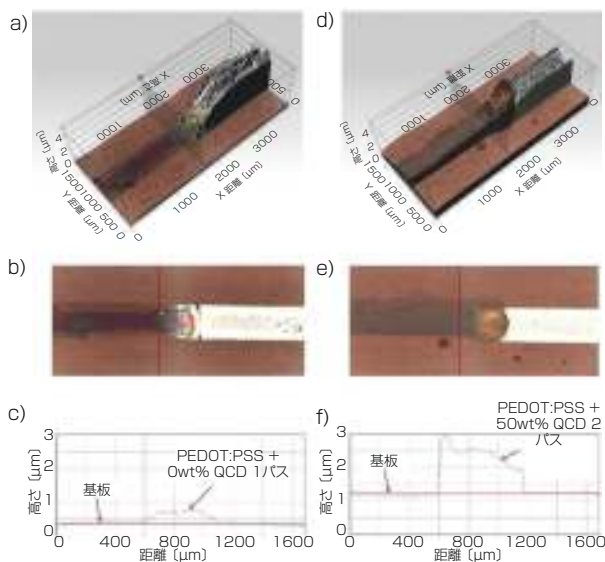


図4 10倍対物レンズを用いたWLIで計測された3Dトポグラフィ。単層プリントPEDOT:PSS+0wt% QCDは、結果的に0.355μm厚PEDOT:PSS(a-c)になり、2パスプリントPEDOT:PSS+50wt% QCDは1.29μm厚である(d-f)。

謝辞

KLAとFilmetricsは、KLA社の登録商標。

参考文献

- (1) M. Quinten, A Practical Guide to Surface Metrology, Springer (2019).
- (2) T. Yoshizawa, Handbook of Optical Metrology, Principles and Applications, second edition, CRC Press (2017).
- (3) S. Khan et al., IEEE Sens. J., 15, 3164-3185 (Jun. 2015).
- (4) See <http://bit.ly/KLARef4>.
- (5) D. Barmpakos et al., Microelectron. Eng., vol.225, C, 111266 (2020).
- (6) D. Barmpakos et al., Transducers 2019 - EuroSensors XXXIII, 2515 (2019).
- (7) See <http://bit.ly/KLARef7>.

著者紹介

カート・A・ルービンは、米KLA社に所属。レイナー・シェルワルトは、KLA子会社である独フィルメトリックス社(Filmetrics)、デミトリス・バームパコスとグリゴリス・カルタスは、ギリシャのウエストアティカ大(University of West Attica)のmicroSENSES研究所所属。デミトリス・バーセチコス、アポトロス・セグコス、及びクリストス・ツァミスは、ギリシャの「デモクリトス」国立科学研究センター、ナノサイエンス及びナノテクノロジー研究所所属。
e-mail: kurt.rubin@kla.com URL:kla.com