

高速通信アプリ向け銅箔表面粗さの測定

John A. Marshall

MacDermid Inc.

245 Freight Street

Waterbury CT, USA

要約

この論文は、光干渉法の利用とOxide Alternative（酸化代替処理）前後の銅箔表面粗化を測定するために使用される関連パラメータ（Rz, Rzなどの）の内容について。また、銅表面粗さが与える導体損失への影響、シグナルインテグリティの特性評価、プロセス制御に利用する従来の測定パラメータが持ついくつかの制約と欠点についての説明です。

具体的には、レジスト側で使用しても内層側で使用しても、「リバース処理銅箔」または「一般銅箔」の非常に大まか粗化処理は、レジスト側のOxide Alternative（酸化代替処理）結合促進処理によって追加される微細粗化処理よりも損失への影響力が高くなります。そのため銅箔メーカーは、高速信号損失を減らしてシグナルインテグリティを保つために、銅箔両面の表面粗化処理を大幅に少なくした銅箔を開発するようになりました。

従来の「リバース処理」または「ダブル処理」銅箔は、銅箔の片面または両面において、1.0から1.2のRSAR値（Roughness Surface Area Ratio: 粗さ表面積比）、0.7から0.8 μm のRa値、8から10 μm のRz値の表面粗化値を持ちます。「スタンダード」銅箔は、一般的には内層側で同様の粗化値を有し、0.3から0.4のRSAR値、0.3から0.4 μm のRa値、3から4 μm のRz値を持ち、レジスト側は平滑面となります。今、Rz値 3~4 μm のVLP（Very Low Profile）銅箔と、両面がRz値2~3 μm のHVLP（Hyper Very Low Profile）銅箔を使って。シグナルインテグリティへの影響をよりよく理解し、工場内での測定法を確立するために、Oxide Alternative（酸化代替処理）プロセス、またはボンディング処理後の「レジスト側」銅箔表面の微細粗化処理の測定法を調査しています。

序論と背景

スタイラス接触測定法を使用する従来の技術は、一般的に粗化処理の大きく出っ張った山の（Macro）頂上部だけを測定し、粗さはRz値とするか、または10点平均法で、合計5つの山頂部と5つの谷底部を利用した値で表します。

PV (peak to valley: 山頂から谷底まで)、またはaverage tooth height (高さの平均) 法も一般的に使用されています。数社の銅箔メーカーによってまだ使用されていますが、年々伝送信号の高速化が進み重要視されるシグナルインテグリティのために必要となるRz値<3.0 μm によって、年々微細化される銅表面の粗化処理状況をより正確に判定・測定するためにスタイラス接触測定法は非接触方式に置き換えられてきています。

本稿では、製品への白色光干渉走査光学プロファイラ(white light interferometric scanning optical profiler)を使用して、サンプル表面の微細な粗化構造を50倍の倍率、0.001 μm の分解能で3次元処理画像にする銅表面粗化測定について説明します。

対物レンズは、光を2つの経路に分割することによって干渉を引き起こし、一方の光を内部リファレンス面に向かって、もう一方の光をテスト面に向けます。

表面の凹凸（粗さ）により、測定波形は基準波形とは異なる距離を移動したものとなります。2つの波形が再結合されると、それぞれの波は位相がずれて「フリンジ」と呼ばれる干渉縞を形成します。「フリンジ」データは分析され、個々の粗さを画素に変換します。また、微細粗化処理前後の銅箔表面粗化をOxide Alternative（酸化代替処理）後と比較して内層結合を促進するために使用してきたRz, Ra, RSARを含む測定パラメータについても論じています。最初の目標は、RTF, DTF, HVLP, Rolled Annealedを含むすべてのタイプの銅表面の追加された粗化処理を測定するための最良のパラメータを特定することでした。

測定方法

今まで、Oxide Alternative（酸化代替処理）後の測定を行なう時、RzとRaという一般的なパラメータは平滑な銅表面に追加されたマイクロメーターレベルの粗さを測定するのには十分であると考えられていました。しかしすでに粗化処理されたRTF（背面処理）銅箔へOxide Alternative（酸化代替処理）マイクロエッチング追加処理した粗化を示すことが出来ません。

SEM後での検証で視覚的に明らかでありますが、Ra、Rzでの測定値では、Oxide Alternative（酸化代替処理）によって加えられる微細粗化処理の状態を正確に表示・反映できないと判断されています。しかしRSARでは、非常に粗いRTF（背面処理）銅箔と非常に滑らかなHVLP銅の両方を使用した場合においても、Oxide Alternative（酸化代替処理）工程後の銅表面の微細な粗化を測定できることがわかりました。

試験データのデジタルフィルタリング加工で、被試験部品の表面特性をうねり・粗さ・高周波の結果に分類することができます（図1）。適切なフィルタ設定を選択すること重要です、特に酸化代替（Oxide Alternative（酸化代替処理））工程からの微細粗化を測定するとき結果に大きな違いが出ます。低周波フィルタは、ガラスクロスの影響やサンプルの曲率による表面のうねりを除去するのに非常に有効であることが示されていますが、高周波フィルタを使用することでは、SEM検査による目視によるとかなりの量の微細な粗さが除去されることがわかります。最近、我々はOxide Alternative（酸化代替処理）プロセスからの可能な限り多くの微小粗さを保存するために50設定の最小低周波フィルタ、および0設定の高周波フィルタを使用してきました。低周波フィルタ設定は、Rz、Ra、RSARにはほとんど影響しません。

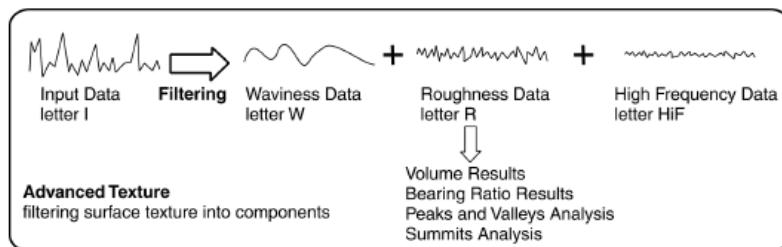


図 1 - データフィルタリング

粗さの測定法は多くの中から選択できるため、最初はRz、Ra、RSARの3つの基本的な測定方法に焦点を当てるにします。

Rzは、十点平均粗さとも呼ばれ、 μm 単位で測定された5つの最も高い頂上と5つの最も低い谷の平均絶対値です。 $Rz = (P1 + P2 + \dots + P5) - (V1 + V2 + \dots + V5) / 5$ 。 (図2) Rzデータは通常、これらのパラメータの中で最も変動が大きく、表面の傷や非均一表面の影響を受けています。Rzは、全体的な最大の大まかな表面粗さ、大きな凹凸を測定するのに有用である。完全に均一な表面では、RzはRaの10倍になり、Rz : Raが大きいほど不均一性が増すことを示します。

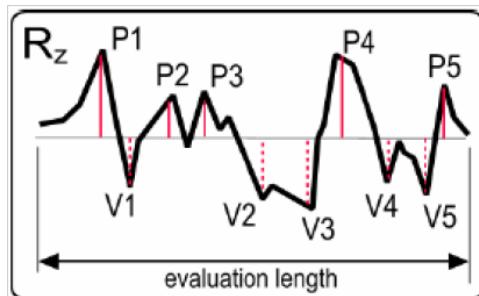


図 2 - Rz

Raは、 μm の単位での測定で、表面粗化の平均値、または表面粗化の平均偏差、平面線からの全ポイントの平均

表面粗さ、として定義されます。完全に均一な表面では、山の一番高いところから谷底までの距離の平均はRaの2倍になります。（図3）

IPCの議事録発表より。

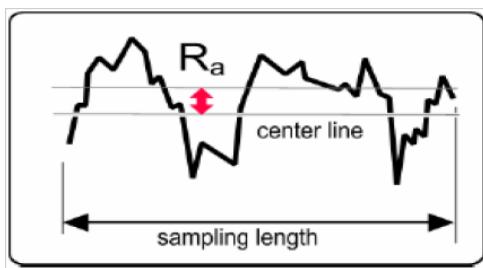


図 3 - Ra

RzとRaはどちらも、酸化代替マイクロエッチング工程の前後の大きな粗さの変化を測定するのに役立ちます。

（図4）

RSARは、下図に示すように、データによる平面面積に対する粗さによって増加する表面積との比率です。

（図5）

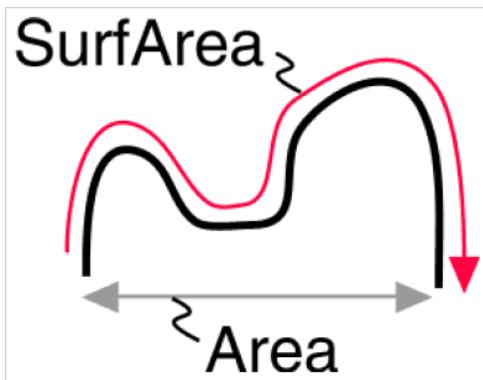


図 5.

RSARは、2次元の面積（平坦だった場合の表面積）に対する3次元の粗さによる表面積の増加を測定し、酸化代替プロセス、特にRTF（背面処理）銅箔を含有する前に粗化処理された表面のような微小な粗さの測定に最も有用であることが証明されました。（図6）

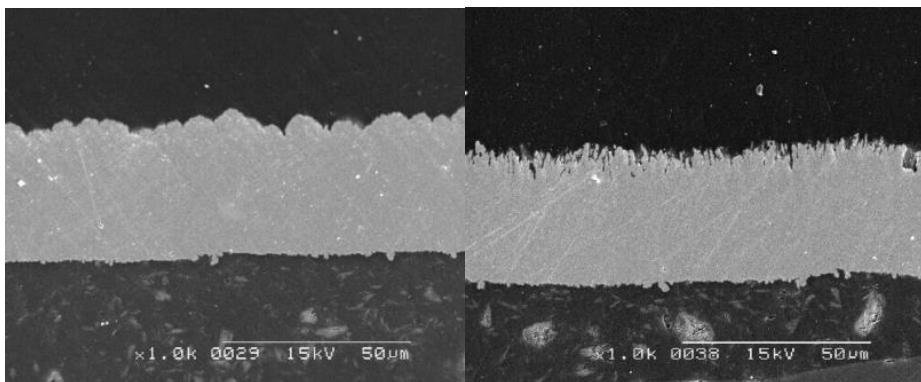


図 4 - 微細粗化処理

図 6 - 微細粗化処理

粗化箔（VLP）平滑箔では、使用された4つのパラメータすべてが、Oxide Alternative（酸化代替処理）による微小な粗さの増加を正確に測定できることが確認できました。ただし、RTF（背面処理）銅箔では、RSAR測定のみが微小な粗さの増加（緑色で表示）を示しました。興味深いことに、RTFの粗銅では、Ra、Rz、Rqの値が減少し、Oxide Alternative（酸化代替処理）のプロセスによるピークの「平滑化」が示されました。これらの結果は、Rzが最大の変化を示し、測定されたパラメータに対する最小フィルタ設定を無視できることを表しています。（表1）

表 1 - RTF and VLP Copper

	No Filters					Filter – High 0.6/ Low 500			
	RTF Cu	Ra	RSAR	Rq	Rz	Ra	RSAR	Rq	Rz
Start	1.45	1.56	1.78	11.28		1.48	1.59	1.78	11.07
After OA	1.35	2.15	1.69	11.62		1.37	1.97	1.69	10.82
VLP Cu	Ra	RSAR	Rq	Rz		Ra	RSAR	Rq	Rz
Start	0.29	0.30	0.38	3.77		0.29	0.30	0.37	3.1
After OA	0.49	1.35	0.62	8.26		0.48	1.15	0.6	6.74

銅の表面粗さを表す2および3バンドマップ（図9および図10）は、左下と右下のスキャンマップの低域フィルタによって除去されたうねりと、左上のスキャンマップで示される高域フィルタによって除去された高周波「ノイズ」を示します。これに対して、2バンドマップ（図10）は、基材のうねりを除去するだけで、他のすべてのデータをSEMで観察した実際の粗さとよく比較し「マイクロ」粗さとして保存します。（図11および図12）

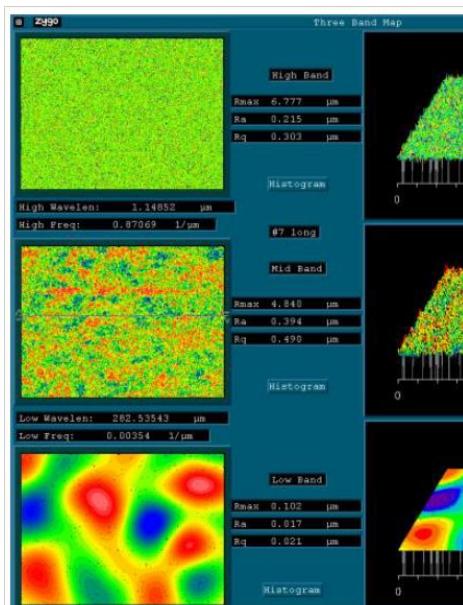


図 9 - Three Band Map

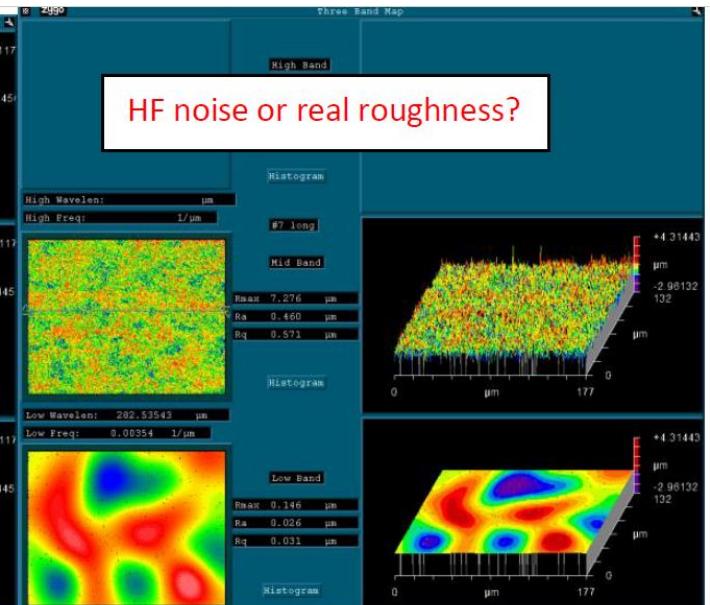


図 10 - Two Band Map

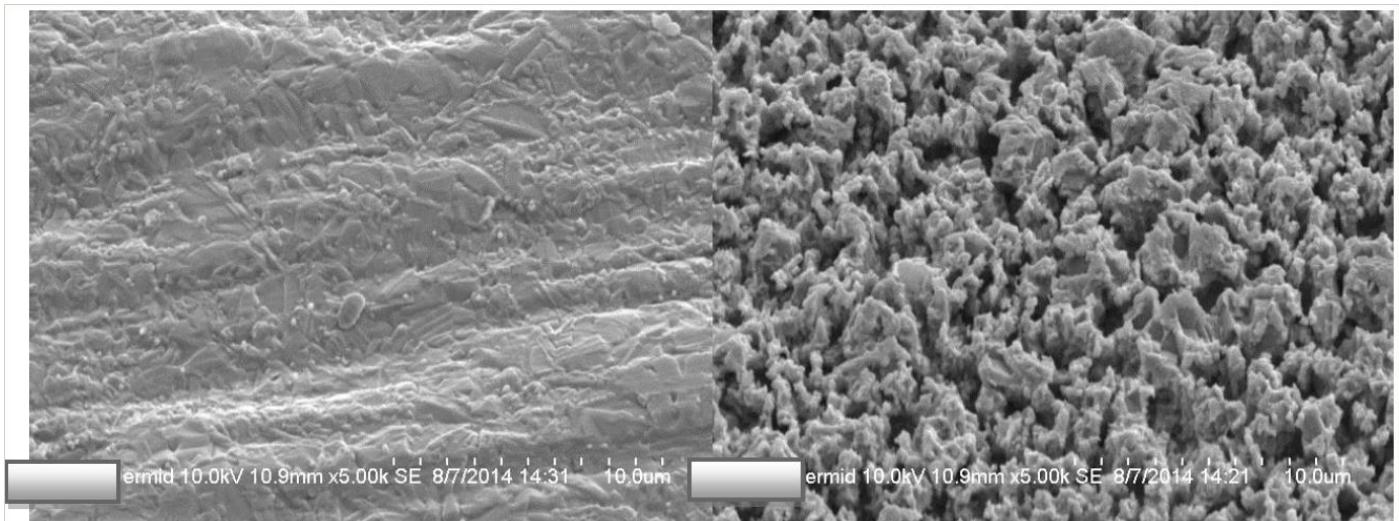


図 11 - Oxide Alternative (酸化代替処理) 前

図 12 - Oxide Alternative (酸化代替処理) 後

6つの異なる材料のサンプルを、露光処理、エッティング処理、剥離処理、Oxide Alternative (酸化代替処理) 処理の後、光干渉法によって測定します。比較のために、各材料のサンプルのうち1つは、Oxide Alternative (酸化代替処理) 処理の前に露光処理、エッティング処理、剥離処理を行なっていません。DES (露光処理、エッチ

ング処理、剥離処理)後の結果は、6つの材料のうち2つ (#2と#4) に端から端までに粗さのばらつきがあることを示しています。平滑な銅では、酸化物の代替マイクロエッティングによってほとんどのばらつきが除去され、両端は同程度の粗さとなっていました。ただし、RTF (背面処理) 銅箔に関しては、Oxide Alternative (酸化代替処理) 後でも、両端に大幅なばらつきがありました。

Alternative oxide(酸化物代替)による酸化後の粗さの平均ゲインを計算しました。HTEおよびHVLP平滑銅サンプルでも同様の結果が得られました。RTF (背面処理) 銅箔サンプル#3はわずかに低かったが、RTF#4は、左右のばらつきが大きく、測定されたすべてのサンプルの中で最も増加が大きいことが観察されました。(表 2)

表 2 - Roughness Gain after Oxide Alternative (酸化代替処理)

		Rz	Ra	Rq	RSAR
1	HTE - A	3.04	0.186	0.23	0.824
2	HTE - B	3.22	0.214	0.22	0.848
3	RTF - A	1.52	0.127	0.075	0.697
4	RTF - B	1.464	0.036	-0.03	1.2
5	HVLP - A	3.25	0.212	0.266	0.866
6	HVLP - B	2.99	0.174	0.219	0.865

**ゲイン 【gain】入力信号対出力信号のレベルの比、一般的にはその比をデシベル (dB) で表す。

過去5年間に、RTF (背面処理) 銅箔または「一般的」な銅箔の非常に高レベルな粗化処理が高速信号伝送損失の最も重要な要因であり、内層側の粗化処理が10GHzを超える高速伝送信号には重大な影響を及ぼしているという認識が広がってきました。歴史的に、RTF (背面処理) 銅箔またはDSTF (ドラム面処理) 銅箔は粗さのばらつきが大きく、銅箔の厚みが大きいほど粗さが大きくなります。

全体的に、シグナルインテグリティの結果が、「鉛フリー」実装条件への変換に続いてRTF銅箔のボンディングインテグリティを高める方向へのトレンドを逆転させました。それらを理解することによって、両面の粗化処理が大幅に低減された新しい銅箔製品が導入されることになりました。(表 3)

銅箔の両側の“一般的な” RTF処理を廃止する傾向があります。多数のユーザーは、最適な材料を選択し、薄型銅箔とOxide Alternative (酸化代替処理) エッティング速度を落すことにより、13 GHz以上対応のPCBの製造に成功しています。

また、酸化物のOxide Alternative (酸化代替処理) プロセスでエッティング速度と化学薬液の条件をコントロールすることは、導体プロファイルを最大化し、導体の粗化を低減してシグナルインテグリティを最適化する上で重要であることもわかつてきました。PCB製造業者は、Oxide Alternative (酸化代替処理) ボンディング促進処理後の「レジスト側」の銅の初期粗化処理、インプロセスマイクロエッティング、導体粗化の「微調整」により注力するようになってきています。

表 3 - Typical Inner Layer Resist Side Roughness

Resist Side	Ra	RSAR	Rq	Rz
STD (RTF)	0.6 - 1.5	0.7 - 1.5	1.0 - 2.0	7.0 - 12.0
VLP (HTE)	0.3 - 0.35	0.3 - 0.4	0.3 - 0.4	3.0 - 4.0
HVLP	0.25 - 0.3	0.2 - 0.3	0.25 - 0.35	2.0 - 3.0
After Alt. Oxide	Ra	RSAR	Rq	Rz
STD (RTF)	0.7 - 1.4	1.2 - 2.2	1.0 - 2.0	7.0 - 12.0
VLP (HTE)	0.45 - 0.6	0.8 - 1.5	0.6 - 1.0	6.0 - 8.0
HVLP	0.4 - 0.5	0.7 - 1.3	0.5 - 0.7	4.0 - 6.0

測定パラメータの表現できる限界

導体の表面粗化測定に利用できるパラメータに幅広い選択肢がある場合、最も効果的なものは次のとおりです：Rzは粗さの最大値を定義し、Raは全体的な平均マクロな粗さを定義し、RSARはOxide Alternative（酸化代替処理）プロセスからの微細な粗化処理を定義できます。

ただし、最初から粗化されていた銅箔をさらに微細な粗化処理をしたもの測定するときに見たように、特に不均一な粗化表面の場合、これらの測定パラメータの一部を信号損失シミュレーションに利用することには限界があるようです。

Raは均一的な表面の平均粗さを表すのに良い説明となります。以下に示すようにいくつかの制限があります。以下のこれらの2つの例は、同じRa値で表現されますが、同じ導体長さと同じRSAR値にはなりません。信号の周波数と回路寸法によって、信号損失の値が同じRaでも異なる場合があります。（図. 13）

As originally published in the IPC proceedings.

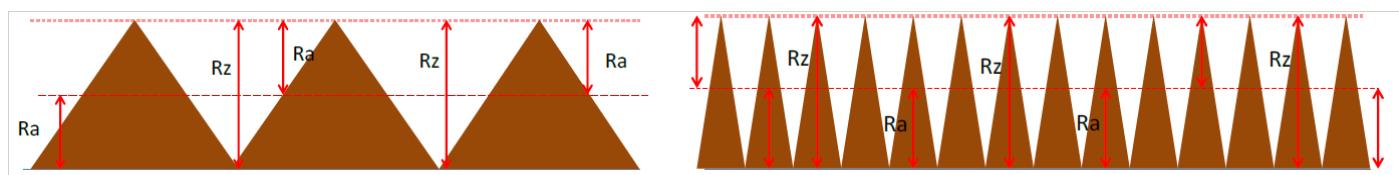


図. 13 – These Surfaces have the same Ra and the same Rz

Rzの測定値は通常、他のパラメーターよりも変動が大きくなる傾向があります。理由は最大5つの頂上と5つの谷底のみを測定していることに起因します。Rzの測定値は表面の傷の影響を受けるため、通常は変動が激しくなります。以下に表示されている表面処理は同じRz値となります。同じサーフェス長（沿面距離）にはなりません。（図. 14）

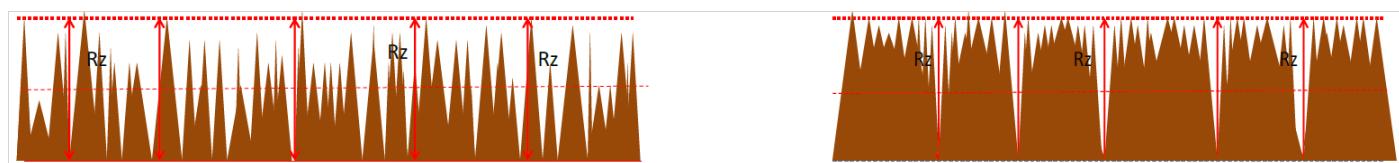


図. 14 - These surfaces have the same Rz

結論

光干渉法による表面粗化測定を使用すると、ラミネーション工程前に内層の銅の粗化処理を制御するRa法、RSAR法、Rz法の測定が出来、事前に導体損失の大きさをシミュレーションできます。RSAR法は、Oxide Alternative（酸化代替処理）工程や、他の化学的表面粗化工程によって構成される微細粗化処理（マイクロラフネス）の正確なデータを測定するのに最適で、Ra測定法は大きい粗化処理（マクロラフネス）の正確なデータを得るのに最適です。

Rz測定法は、粗化処理の最大値のみを示すため、多少の誤解を招く可能性があり、傷や表面の瑕疵に影響を受

けやすい欠点があります。しかし、RzはRaとの関係によって全体的な不均一性を評価するのに向いていて。さらに、銅箔の内層側の断面をRz法で測定すると、ラミネート処理前の銅箔側の「粗化処理前の」データを得ることができます。

精度の高いマクロ的粗化のRz値を得るには、断面の正しい処理（研削と研磨）が重要です。積層前のOxide Alternative（酸化代替処理）工程による表面粗化の増加の影響は、プロセス全体を通して製造工程の制御データを与えてくれます。

さらに、プログラムによってSPCの標準偏差と変動係数%データを得られます。高周波フィルタリングと最小限の低フィルタリングによる微細な粗化処理の減少なしに生の測定データを分析することにより、銅表面の正確な測定を行えます。RSARとRaを併用することで、Oxide Alternative（酸化代替処理）工程に続く微細表面粗化処理の高精度な測定値を得られるため、プロセス制御に適しています。

参考資料

1. Effect of Conductor Surface Roughness upon Measured Loss and Extracted Values of PCB Laminate Dissipation factor. Scott Hinaga, Cisco Systems Feb 2, 2010.
2. Insertion Loss Reduction through Non-Roughening Inner layer Surface Treatment. Scott Hinaga, Cisco Systems, March 25, 2014.
3. Signal Transmission Loss due to Copper Surface Roughness in High Frequency Region. Elaine Lew, Mitsui Copper Foil Malaysia.

As originally published in the IPC proceedings.