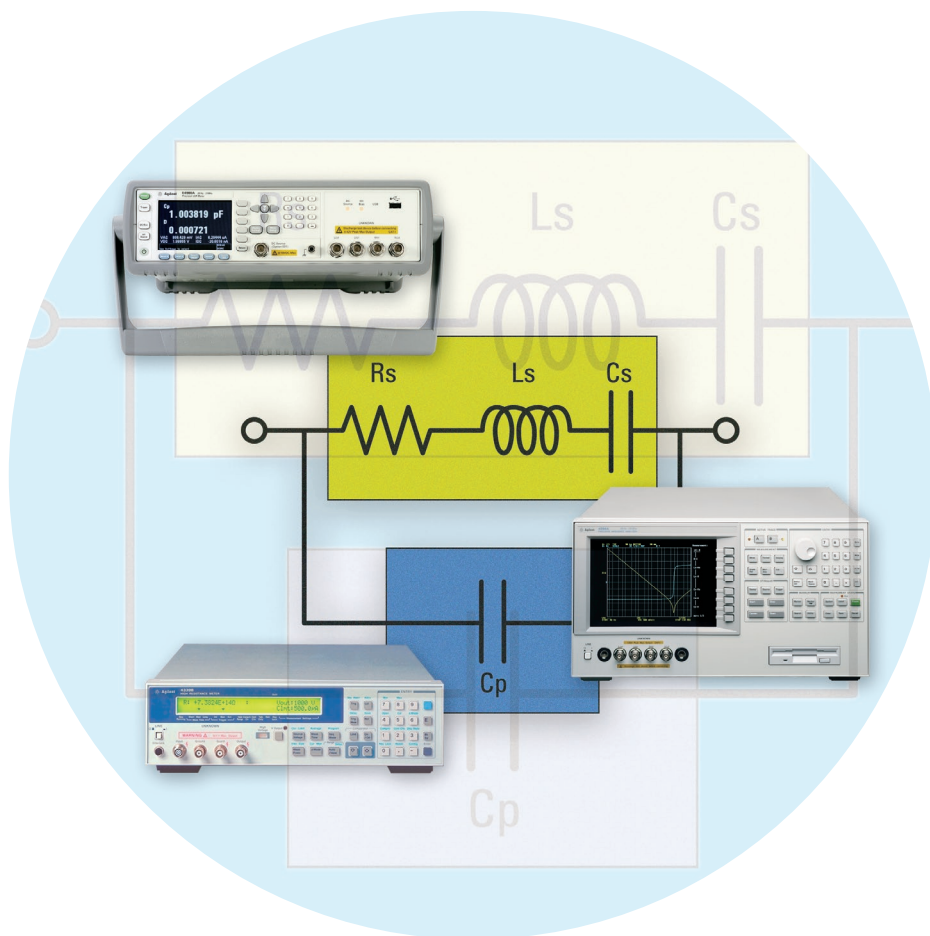
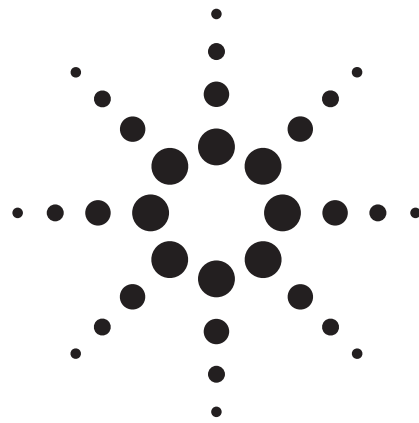


# 量産における MEMS の オンウェーハ評価

コスト削減の鍵となる  
初期段階でのテスト

Application Note



最近では、圧力センサ、加速度計、RF MEMS など、MEMS テクノロジーを使用した各種デバイスが製品化されています。それに加えて、シリコン・マイクなどの新しいデバイスも急速な進化をとげています。自動車産業で拡大してきた MEMS 市場は、携帯電話などの消費者製品へと発展を続けています。

この MEMS 市場の拡大により、メーカーは 1 台あたりのコスト削減の必要に迫られています。しかし、以下のような課題を抱えています。

- 精密プロセスのため歩留まりが低い
- 物理的なステイミュラスを印加するためスループットが低い

最近の調査(付録 1 参照)によると、総生産費の 80% をデバイスのパッケージング・プロセスが占めるため、欠陥チップのパッケージング・プロセスへの流入がコスト上昇の一因となっています。本書では、総生産コストの削減に向けた、オンウェーハ・ステージでの MEMS 素子の評価方法について説明します。

## 量産における費用の削減

製造プロセスの最も初期の段階で MEMS 素子をテストすることにより、以下のような効果があります。

- 高速のプロセス・フィードバックによる品質の改善
- パッケージ統合の前に欠陥チップを除去することによる費用の削減

特に、オンウェーハまたはダイ・レベルでの MEMS のテストは、量産コストの削減にとって重要です。MEMS の可動部品をウェーハやダイ・レベルでテストする場合、MEMS デバイスの入力と出力を考慮する必要があります。

## 入力

MEMS デバイスをドライブするには、2 つの入力方法があります。1 つは、圧力、加速などの物理的な実信号を印加する方法です。もう 1 つは、電気信号を印加する方法です。センサの可動部品も、印加されたバイアス電圧によってドライブされます。試験用入力信号として電気信号を印加する方法は、速度、再現性、精度、ユーザビリティの点で優れていますが、デバイス動作の再現には、物理的な実信号印可の方が有効です。

## 出力

MEMS デバイスの出力を測定する方法も 2 つあります。1 つは、レーザ・インタフェロメータによる直接変位測定です。もう 1 つは、テスト信号を使った電気的測定です。電気的測定は、静電容量や圧電抵抗に使用できます。レーザ・インタフェロメータによる直接測定は簡単ですが、再現性、精度、ユーザビリティの点では電気的測定のほうが優れています。

使用する測定器の測定速度と再現性のようにより、量産プロセスではテスト・スループットと歩留まりが重要です。機器の操作性はテスト・システムの保守のしやすさに影響するため、テスト機器の操作性も考慮する必要があります。これにより、生産ラインのアップタイムが決まります。このように生産費の削減には、電気的テストを使って MEMS ウェーハまたはダイを特性評価する方が、物理的な実信号印可テストよりも適しています(図 1)。

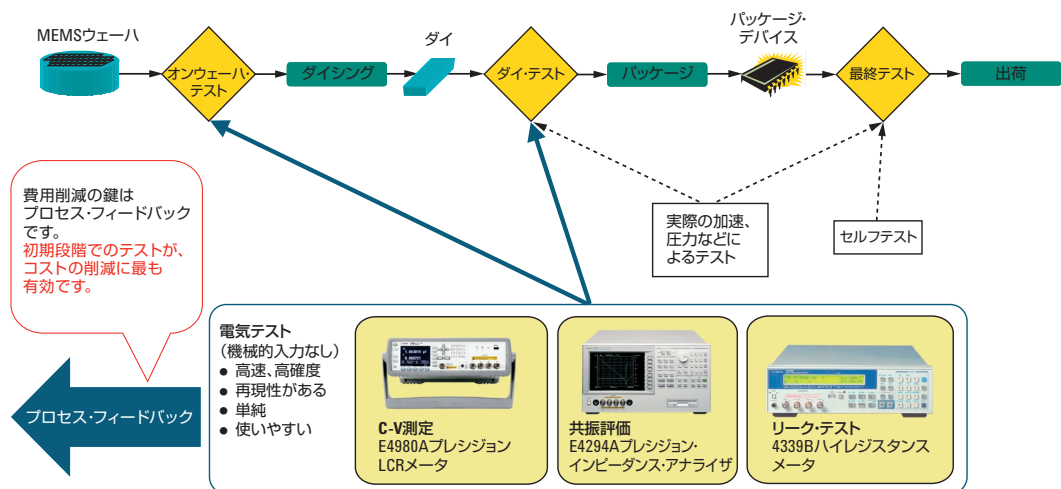


図 1. MEMS ウェーハの評価試験プロセス

## 静電容量センサ

圧力センサ、加速度計、シリコン・マイクなどの MEMS センサの変位を検出する方法として、圧電技術や容量性技術があります。例として、静電容量センサの電気的テストについて調べます。

静電容量センサは、図2のようにモデリングできます。電極間の距離が、圧力、加速、音波などによって変化します。距離の変化は、静電容量の変化として電気的に読み取ることができます。

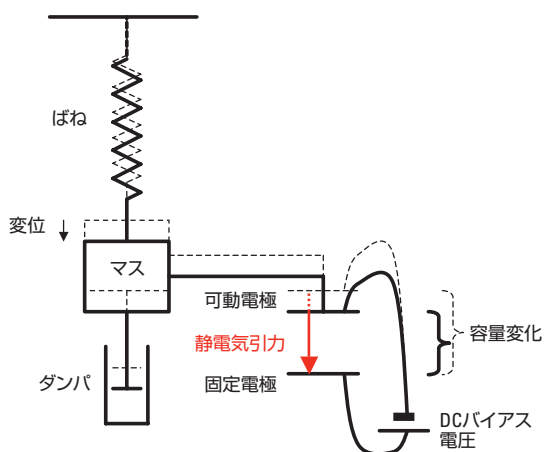


図2. 静電容量センサの図

静電容量センサには、静的応答（静的特性）と動的応答（動的性能）の2つの機械的特性があります。静的応答は、静的な物理的変位に対する静電容量センサの変位として定義され、動的性能は、動的な物理的変位に対する応答として定義されています。動的性能は、振幅と位相の周波数応答として表現され、しばしば共振周波数、Q 値、3 dB 帯域幅などのパラメータによって表されます。

## 電気的測定による評価

前述のように、物理的な変位は、電気的な変化に置き換えることができます。次にそれを調べます。

### 静的性能

静的な物理的変位は、DC 電圧バイアスの印加によって置き換えることができます。このため静的特性は、DC バイアス電圧を掃引し、そのときの静電容量を測定することにより評価できます。この測定は通常、キャパシタンス-電圧 (C-V) 測定と呼ばれます。測定器の重要な仕様および機能として、インピーダンス・レンジ、測定精度、周波数レンジ、測定速度、再現性、DC バイアス電圧レンジがあります。

ほとんどの静電容量センサの容量は、ニュートラル・ポジションで約 0.5 ~ 1 pF です。したがって、テスト機器には、静電容量を 0.1 pF のオーダで正確に測定する能力が必要です。そのためインピーダンス測定には、4 端子対法をお勧めします。

インピーダンス測定には、AC テスト信号を使用します。テスト周波数をデバイスの電極と同じ値に設定した場合、テスト信号の電圧によって電極が作動する可能性があります。電極が移動しているときには、静電容量を正しく測定できません。このため、テスト周波数を、被試験デバイスの機械的動作周波数よりもはるかに高い値に設定する必要があります。通常、MEMS デバイスの動作周波数は kHz の低レンジにあるので、1 MHz のテスト周波数で十分です。

インピーダンス測定の再現性が優れていると、テスト・プロセスのガード・バンドを狭めることができ、歩留まりの向上に役立ちます。測定の再現性は、デバイスの処理精度のように、小さい機械的な変位を特性評価する場合に重要です。1 pF の容量を持つ静電容量センサの場合、測定再現性は 0.1% 未満である必要があります。推奨する再現性は 1 fF 以下です。

DC 電圧バイアス掃引測定を実行するときには注意が必要です。静電容量センサは、電極に入る電荷の量に基づいたヒステリシス特性を持ちます。このヒステリシスは、C-V 測定によって評価されるパラメータの1つです。

上記の要件に適合する測定器の1つが、Agilent E4980A プレシジョン LCR メータです。最大測定周波数は 2 MHz で、測定の再現性は  $\sigma < 1$  fF です。E4980A オプション 001 は、DC 電圧バイアス・レンジを 40 V まで拡大し、DC 電圧バイアス掃引による正確な静電容量測定を可能にします。40 V は、大部分の MEMS 静電容量センサにとって十分な値です。

## 動的性能

動的な物理的変位は、電気的測定では AC 電圧と置き換えることができます。図 3 に示すように、可動部品の特性を電極の一部としてモデリングできます。可動部品の機械的特性は、機械的動作周波数よりも低いテスト周波数で測定されたインピーダンスに反映されます。したがって、デバイスのインピーダンスを測定すると、可動部品の周波数応答が明らかになります。インピーダンス測定には、高精度測定が可能な 4 端子対法をお勧めします。

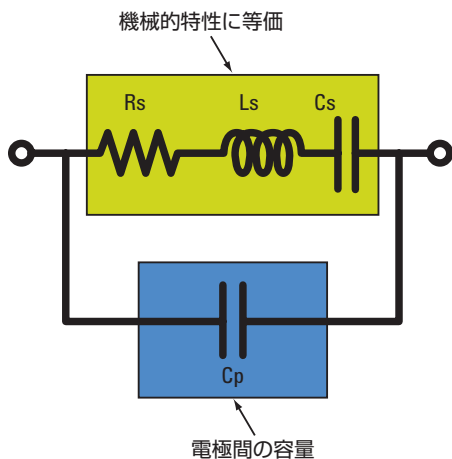


図 3. 電極の可動部品の特性

可動部品が AC 電圧によってドライブされると、電極間に静電気引力が生じます。静電気引力は、AC 電圧の二乗に比例するので、電極に流れる電流に対して第 2 の歪みが生じます。インピーダンス・アナライザは、電流と電圧のベクトル値からインピーダンスを計算するため、第 2 の歪みにより測定誤差が生じる可能性があります。この問題を解決するには、DC バイアス電圧を AC テスト信号に印加します。AC 電圧の振幅が DC バイアス電圧の振幅よりも十分に小さい場合、電流の 2 番目の歪みを無視できるため、有効な測定が可能です。この方法により、電極がそのニュートラル・ポジションにある場合を除いて、デバイスの周波数応答をすばやく簡単に評価できます。

インピーダンスと周波数の関係は、デバイスの動的性能を表し、インピーダンス・アナライザで測定できます。測定されるデバイスの動的性能は、印加した DC バイアス電圧によってドライブされた電極の位置における性能を表し、DC バイアス電圧を変化させることによって任意の位置の動的性能を得ることができます。AC テスト電圧は、DC バイアス電圧よりも十分に小さい値に設定する必要があります。

測定されたインピーダンスのプロファイルには、動的性能を表すインピーダンスと、電極変位を表す静電容量の両方が含まれます。そのためデバイス自体の動的性能を評価するには、静電容量の影響を取り除きます。静電容量は、デバイスの動作周波数よりも高いテスト周波数で測定されたインピーダンスから得ることができます。Agilent 4294A プレシジョン・インピーダンス・アナライザは、動的性能評価に最適なテスト測定器です。4294A は、110 MHz までの周波数レンジ、0.08% の優れた測定精度、最大 40 V の DC バイアス電圧機能を備えています。特に、4294A の等価回路解析機能を使用すれば、動的性能と静電容量の評価が簡単に行えます。

## リーケージ

品質管理の有効なテストとして、MEMS デバイスの静的性能と動的性能の評価以外にリーケージ測定もあります。電極間のリーケージ測定により、デバイスの不具合を初期の段階で検出できます。

通常、リーケージ測定には半導体デバイス・アナライザ、ハイレジスタンスメータなどのピコ電流計が使用されます。1 つのチップ内に (例えば、ダイ・レベルで) トランジスタと MEMS 素子を含み、パラメトリック・テストが必要な場合は、半導体テスト・システムも使用できます。コストの点で、ハイレジスタンスメータで十分な場合もあります。

Agilent 4339B ハイレジスタンスメータは、最大  $1.6 \times 10^7$  GΩ の抵抗測定と最小 60 fA の電流を測定でき、このアプリケーションに最適です。

## セットアップ

オンウェーハ測定では、プローブ・ステーション/プローブ・カードとテスト測定器の構成も考慮する必要があります。プローブ・カードの形状は、被試験デバイスによって異なりますが、4 端子対法測定の場合、デバイスからプローブへの配線、およびカード・デザインも重要になります。

インピーダンス測定には、ケーブルとプローブ・カードの寄生インピーダンスによって生じる測定誤差を測定データから補正する機能が必要です。補正は、プローブ・ステーション・ベンダから供給されるインピーダンス標準基板を使用し、プローブ端で実行する必要があります。

上記の注意事項と補正手順は、FET ゲート酸化膜容量測定の場合と同じです。詳細については、付録の 2 と 3 を参照してください。

## まとめ

これまで説明したように、製造プロセスの初期の段階でオンウェーハ・インピーダンス測定を実行することは、MEMSデバイスの費用の削減に有効です。小さい機械的な変位の特性評価には、正確なインピーダンス測定技術を備えた高性能テスト測定器が必要です。Agilent E4980A、4294A、4339Bは、こうしたタイプの測定に適しています。

## 付録

1. MEMS Test Community :  
[http://www.memunity.org/on-wafer\\_testing.htm](http://www.memunity.org/on-wafer_testing.htm)
2. Application Note : 『Agilent Evaluation of MOS Capacitor Oxide C-V Characteristics Using the Agilent 4294A』、カタログ番号 5988-5102JA
3. Application note : 『インピーダンス測定ハンドブック』、カタログ番号 5950-3000JA
4. このアプリケーション・ノートでは、『電子材料』(2007年11月号)を一部参照しています。  
<http://www.kocho-net.com/magazine/denshi1.php>
5. MEMS/NEMS Device Measurement Solution :  
<http://www.agilent.co.jp/find/mems>

メモとしてお使いください

メモとしてお使いください

## Remove all doubt

アジレント・テクノロジーでは、柔軟性の高い高品質な校正サービスと、お客様のニーズに応じた修理サービスを提供することで、お使いの測定機器を最高標準に保つお手伝いをしています。お預かりした機器をお約束どりのパフォーマンスにすることはもちろん、そのサービスをお約束した期日までに確実にお届けします。熟練した技術者、最新の校正試験プログラム、自動化された故障診断、純正部品によるサポートなど、アジレント・テクノロジーの校正・修理サービスは、いつも安心して信頼できる測定結果をお客様に提供します。

また、お客様それぞれの技術的なご要望やビジネスのご要望に応じて、

- アプリケーション・サポート
- システム・インテグレーション
- 導入時のスタート・アップ・サービス
- 教育サービス

など、専門的なテストおよび測定サービスも提供しております。

世界各地の経験豊富なアジレント・テクノロジーのエンジニアが、お客様の生産性の向上、設備投資の回収率の最大化、測定器のメンテナンスをサポートいたします。詳しくは：

[www.agilent.co.jp/find/removealldoubt](http://www.agilent.co.jp/find/removealldoubt)

## アジレント・テクノロジー株式会社

本社 〒192-8510 東京都八王子市高倉町 9-1

## 計測お客様窓口

受付時間 9:00-19:00 (土・日・祭日を除く)

**FAX、E-mail、Web** は **24** 時間受け付けています。

TEL ■■■ 0120-421-345  
(042-656-7832)

FAX ■■■ 0120-421-678  
(042-656-7840)

Email [contact\\_japan@agilent.com](mailto:contact_japan@agilent.com)

電子計測ホームページ

[www.agilent.co.jp](http://www.agilent.co.jp)

- 記載事項は変更になる場合があります。  
ご発注の際はご確認ください。

Copyright 2008

アジレント・テクノロジー株式会社



### 電子計測UPDATE

[www.agilent.co.jp/find/emailupdates-Japan](http://www.agilent.co.jp/find/emailupdates-Japan)

Agilent からの最新情報を記載した電子メールを無料でお送りします。



### Agilent Direct

[www.agilent.co.jp/find/agilentdirect](http://www.agilent.co.jp/find/agilentdirect)

測定器ソリューションを迅速に選択して、使用できます。



[www.agilent.co.jp/find/open](http://www.agilent.co.jp/find/open)

Agilent は、テスト・システムの接続とプログラミングのプロセスを簡素化することにより、電子製品の設計、検証、製造に携わるエンジニアを支援します。Agilent の広範囲のシステム対応測定器、オープン・インダストリソフトウェア、PC 標準 I/O、ワールドワイドのサポートは、テスト・システムの開発を加速します。

Windows is a U.S. registered trademark of Microsoft Corporation.



Agilent Technologies

May 16, 2008  
5989-7691JAJP  
0000-00DEP