

はじめに

プラズマが初めてウェーハ処理に使われた時から、高周波電力測定は半導体処理の重要な要素でした。高周波エネルギーはプラズマの励起に使用され、プラズマの特性は励起エネルギーに大きく左右されるため、電力測定は昔も今も重要です。この記事では、高周波電力を測定するさまざまな手段とその限界について説明します。また、高周波電力測定器の最適な校正方法についても紹介します。

ビギニング

半導体業界でRFパワー測定の必要性が高まり、最初に使用されたのは、もともと通信用に開発された大電力RFワットメーターでした。



MCS Standard

殆どの場合、これらの製品は伝送路と、伝送路のエネルギーをサンプリングするための集中素子の方向性結合器／検出器システムで構成されています。この機器の指向性は、伝送線路の特性インピーダンス（通常は50Ω）に対する負荷インピーダンスのざっくりとした指標を提供するために使用されていました。これらの電力計に使用されている検出器は単一のダイオード設計で、検出器はその動的特性曲線の平方法則、遷移、および線形領域で動作します。ダイオードがその特性曲線の平方法則と線形領域の両方で動作していたことから、計器が示すスケール値の精度の仕様化(%)へと繋げることが可能となりました。尚、殆どの場合、精度はフルスケールの±5%と規定されていました。このタイプの測定器の誤差の大部分は、動的特性におけるダイオード間の変化と、すべてのダイオード検出器に単一のアナログメータスケールを使用したことに関連しています。

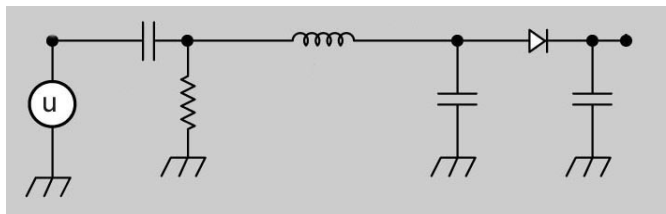
これらのパワーメーターの校正に使用された標準器は、方向性結合器とパワーメーターの組み合わせ、または方向性結合器の代わりにアッテネーターを使用した同様の組み合わせでした。多くの場合、標準器は、以下の点を除いて、校正される機器と同じタイプの機器に基づいていました。

これらの標準器には、リファレンスの安定性を向上させるための温度安定化素子や、視差による誤差や動的直線性を低減するために直線性を向上させたミラースケールのアナログメーターなどが含まれていました。これらの標準器は、その全体的な精度の限界を考慮すると、これらの第一世代の機器の校正には十分すぎるほどでした。

前述したように、ダイオード検出器の動特性がパワーメータの大きな誤差の原因となっています。動的誤差に加えて、伝送線路のサンプルを提供するために使用される方向性結合器回路に関連する周波数応答誤差も重要な誤差の原因でした。



Bird Directional Power Meter



Lumped Element Directional Coupler

他の方向性結合器と同様に、パッシブな周波数補償ネットワークは、指向性などの他の重要な方向性結合器の性能パラメータに影響を与えることなく、非常に広い周波数範囲にわたって補償を提供する形で実現することは困難です。この2つの重要な電力測定誤差要因に対処する試みとして、4421高精度パワーメータと、それに関連する4020シリーズの方向性パワーセンサが開発されました。

4421 / 4020シリーズ 高精度パワーメータ

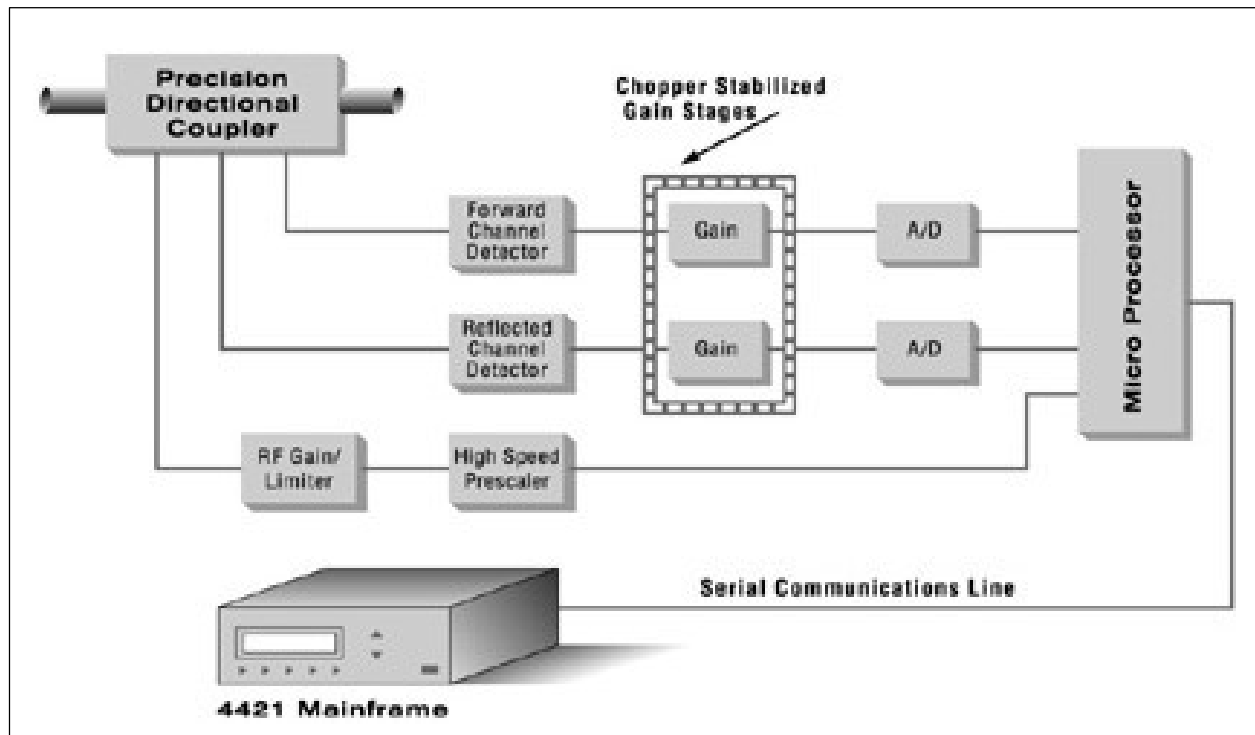
電力測定器の4421ファミリーは、従来の終端測定と比較して、指向性のある電力測定が必要なアプリケーションで使用するために、一般目的のラボ用電力計製品として導入されました。



4421パワーメータ及び4027F高精度センサ

4421の主な利点

- 方向性のある測定を必要とするアプリケーションにおいて、優れた精度を発揮します。これは、方向性結合器、ディテクター、アナログゲインステージとシグナルコンディショニング、A/D機能を統合し、これらの機能をシステムとして校正するというパワーセンサーの設計手法によって実現されています。4421と関連する4020シリーズのパワーセンサーとの間のインターフェースは、差動シリアル通信リンクです。完成した電力測定値は、パワーセンサから4421のディスプレイに転送され、表示前の処理を必要としません。
- 4020シリーズに採用されている検出器システムは、ダイオード方式で、固有の温度補正を行い、30dB以上の極めてリニアなダイナミックレスポンスを実現しています。
- 方向性結合器の周波数応答特性を自動補正。センサーが動作周波数を測定し、メモリに保存された値に応じて電力測定値を補正します。
- 特に、従来の終端型ラボラトリー・パワーメータと比較して、非常に使いやすい機器です。
- 大規模なフィールドテストとラボテストにより、システムの測定値と測定値の再現性が0.3%以下であることが確認されました。



これらの特徴と利点を考慮して、4421システムは半導体プロセスアプリケーションで選ばれる機器となりました。近年、4421/4020シリーズの改良が続けられ、4027シリーズのパワーセンサが導入されました。4027パワー・センサーは、前世代のセンサーとほぼ同様に動作しますが、校正点での精度が $\pm 1\%$ と向上しています(1シグマ)。これは、4027の周波数範囲を、特定の半導体加工点を含む、あるいはそれに隣接する狭い周波数帯に限定することで実現されています。さらに、4027シリーズは、後述する直接熱量測定(ダイレクトカロリメトリ・キャリブレーション)技術を用いて校正されています。

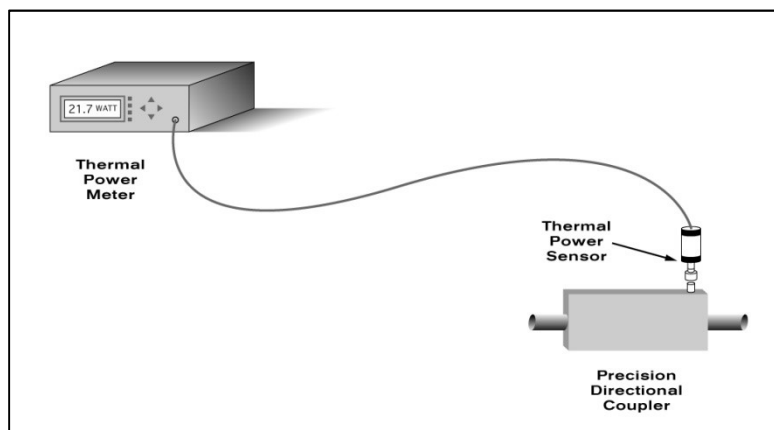
ダイレクトカロリメトリ・キャリブレーション

前述のように、4020シリーズのパワーセンサには、精度に応じて2種類あります。以下の表は、4020シリーズのパワーセンサの種類と、その精度をまとめたものです。

パワーセンサーモデル	周波数帯域	精度 (1 σ)
4021	1.8~32MHz	+/-3%
4022	25-1000MHz	+/-3%
4024	1.5~32MHz	+/-3%
4025	100~2500kHz	+/-3%
4027A12M	10-15MHz	+/-1%
4027A250K	250-400kHz	+/-1%
4027A400K	400~550kHz	+/-1%
4027A800K	800~950kHz	+/-1%
4027A2M	1.5~2.5MHz	+/-1%
4027A4M	3-5 MHz	+/-1%
4027A10M	10-15MHz	+/-1%
4027A25M	25-30MHz	+/-1%
4027A35M	35-45MHz	+/-1%
4027A60M	45~65MHz	+/-1%
4027A100M	95~105MHz	+/-1%
4027A150M	150~170MHz	+/-1%

この表から、4021~4025型は広帯域のセンサーであるのに対し、4027型は狭い周波数帯で動作するように設計されていることがわかります。4027センサーの精度向上は、センサーの周波数範囲を狭くしたことで、**電力センサーを熱量標準に直接校正した**ことで実現しました。

4020シリーズの+/-3%(1シグマ)の精度仕様のパワー・センサーは、広帯域のRF電源を使用して校正されており、非常に安定した、スペクトル・ピュアな校正信号を生成します。校正に使用されるリファレンス・パワー・メーター・システムは、精密な方向性のあるカプラーと、カプラーのサイドアームに接続された校正済みの終端型パワー・メーターで構成されています。(図参照)



このタイプの電力基準器が選ばれていたのは、固有の広いダイナミックレンジと、方向性結合器の周波数応答および終端電力計の応答特性によって確立される広い周波数範囲という特性からです。電力基準器の校正は、まず精密測定用受信機を用いて方向性結合器に関連する結合値を非常に正確に決定することによって行われます。結合値が決まると、校正されたネットワーク・アナライザを用いて、主アームと結合アームのリターン・ロス特性を決定します。また、ネットワーク・アナライザを使って、パワー・センサーの入力ターン・ロス特性も測定します。これらの測定値を合わせて、方向性結合器とパワーセンサーの組み合わせに関連するミスマッチの不確かさを決定します。



カロメトリックパワー測定システム

熱量計校正

現在利用可能な最良のRF校正方法は、RFエネルギーの測定に熱量測定技術を用いることです。この技術では、高調波や非高調波関連の周波数成分の影響を含めて、信号の総電力を非常に正確に測定することができます。つまり、カロリメーターは、特定の波形の真のパワーを表す測定値を提供するのです。このアプローチの魅力は、非常に高い電力レベルで精密な測定を直接行うことができる点にあります。

RFエネルギーの測定用に設計された熱量計は、次ページのブロック図に従って構成されています。

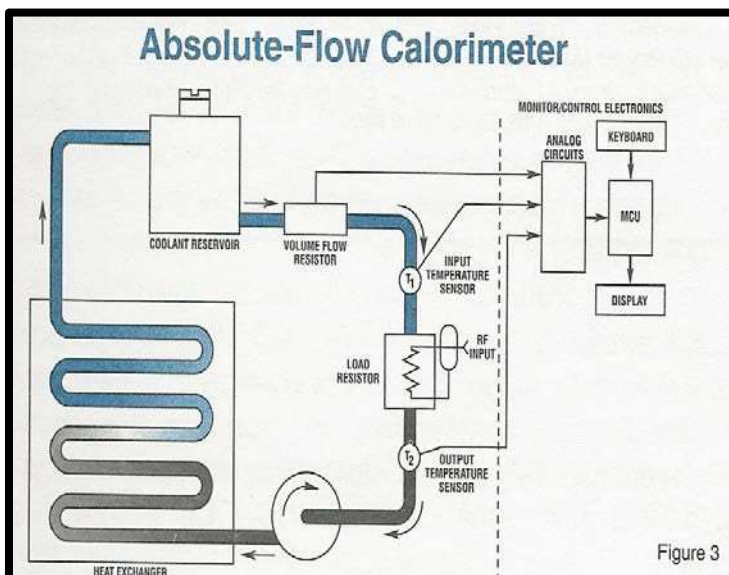
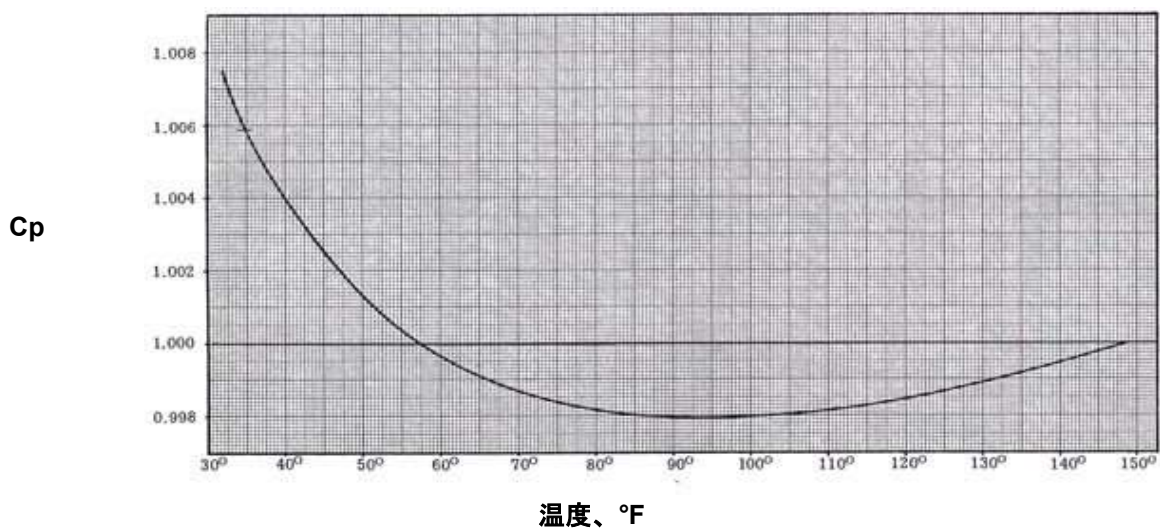


Figure 3

熱量測定システムの心臓部は、水冷式のRF負荷抵抗器です。この負荷抵抗器は、試験中の伝送システムに高リターンロスの終端を提供するだけでなく、高周波エネルギーを熱に高効率で変換することもできます。RF負荷の冷却水入口および出口ポートの近くには、精密な温度測定センサーが設置されており、これらを使用して負荷全体の温度差を測定します。また、冷却水の経路には精密な液体流量測定センサーが設置されており、システム内の冷却水の質量流量を測定するために使用されます。これらの3つのパラメータ（入力温度、出力温度、冷却水の流量）は、RF負荷で消費されるエネルギーを決定するために使用することができます。

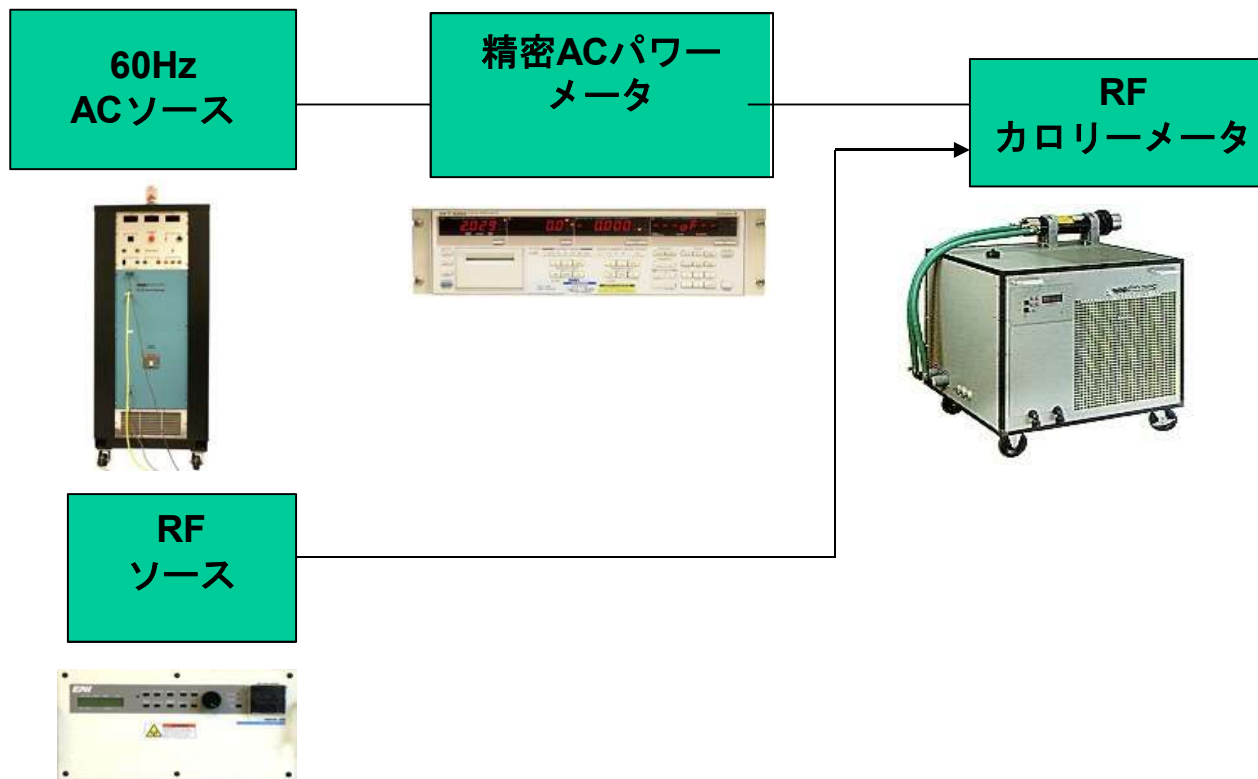
$$P(W)=0.2626 \times T(C) \times F(GPM)$$

このプロセスは簡単に聞こえるかもしれませんが、良い結果を期待するためには、この原理を適用するには細部にまで注意を払う必要があります。その一例が、冷却水の流量パラメータの扱いです。液体の流量を測定するのは簡単なことのように思えますが、冷却水の温度が変化すると、比熱や比重などの冷却水の物理的特性を考慮しなければなりません。純水以外のクーラントを使用する場合は、混合物の物理的特性を考慮しなければならないため、混合物を正確に把握する必要があります。その一例として、純水の比熱の温度変化をグラフにしたものがあります。



水の比熱、Cpと温度の関係

以上のことを説明すると、精密な高周波測定器としての役割を果たすためには、熱量測定システムをどのように校正するかという問題が残ります。現在利用できる最良の方法は、DCまたは60Hzの代替品を使用することです。この方法は、熱量計が本質的に熱のエネルギーを測定する装置であり、直流または低周波の波形に対しても、高周波のエネルギーに対しても同じ反応を示すという前提に基づいています。これは正確な意味での真実ではありませんが、低周波エネルギーと高周波エネルギーを測定する際の熱量計の性能の違いは、正確な電力測定を行う目的では無視できるほど小さいものです。下の図は、置換法の基本を説明したものです。



ブロックダイアグラム、60Hz代用法

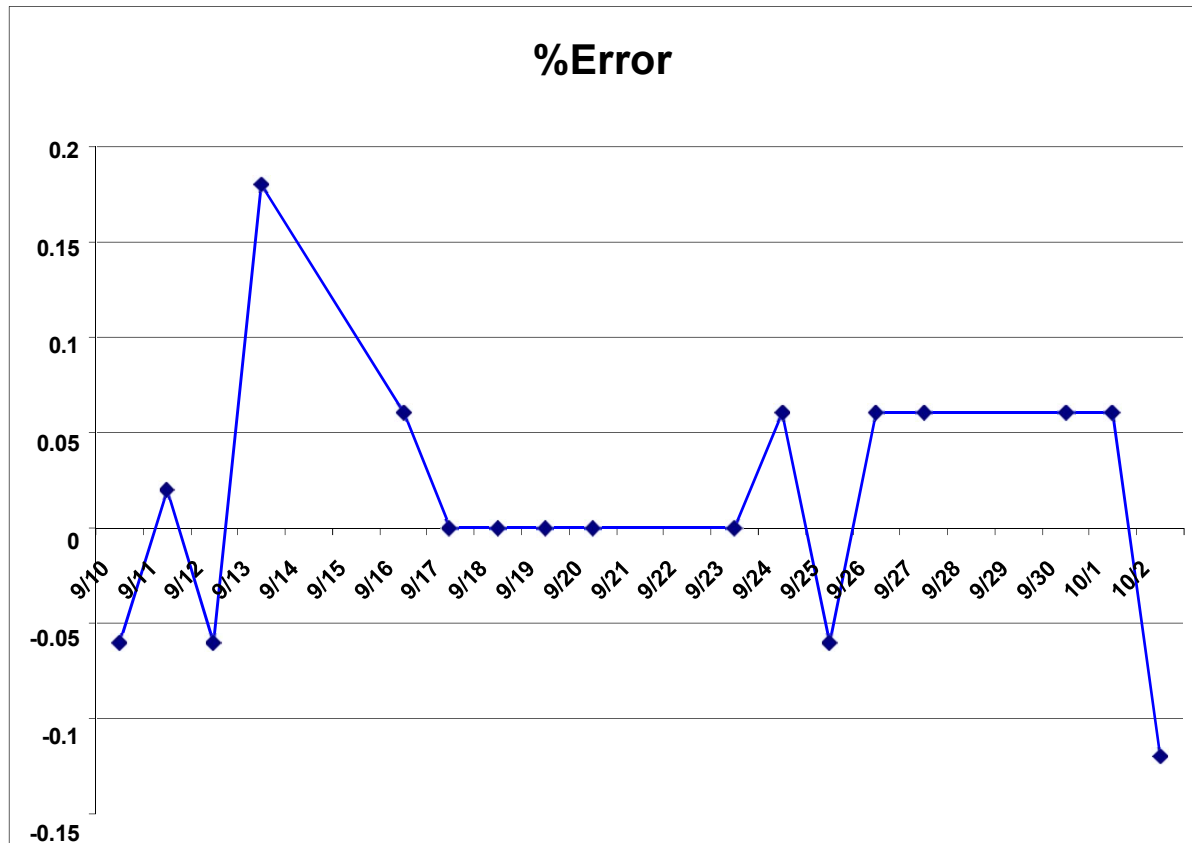
プロセスは以下の通りです。

- 熱量計は、目的とする出力レベルまたはその付近のDCまたは60Hzのエネルギー源に接続されます。
- 熱量計を接続すると同時に、精密な電圧・電流計もソースに接続します。
- 熱量計に電源が入っている状態で、熱量計の負荷にかかる電圧と電流を読み取ります。電圧と電流を掛け合わせて、熱量計に印加された電力を求めます。ACエネルギー（60Hz）を使用する場合は、電圧と電流の間の位相角を決定し、計算に含める必要があります。

$$P(W) = (V \times I) \cos \theta$$

- 電圧値と電流値から得られた電力の読み取り値と同じになるように、熱量計を校正します。
- これで熱量計の校正が完了し、校正された電力レベルでのRF測定の準備が整いました。

上記の手法を用いれば、全体的な不確かさが1%未満の校正を行うことが可能です(2シグマ)。以下の表は、熱量パワーメーターの性能を60Hzの基準と毎日比較したときの長期データとなります。



熱量計の誤差 vs 時間

上記のデータから明らかなように、適切に校正・維持された熱量測定技術は、非常に精密で安定したRFパワーの校正の基礎として使用することができます。

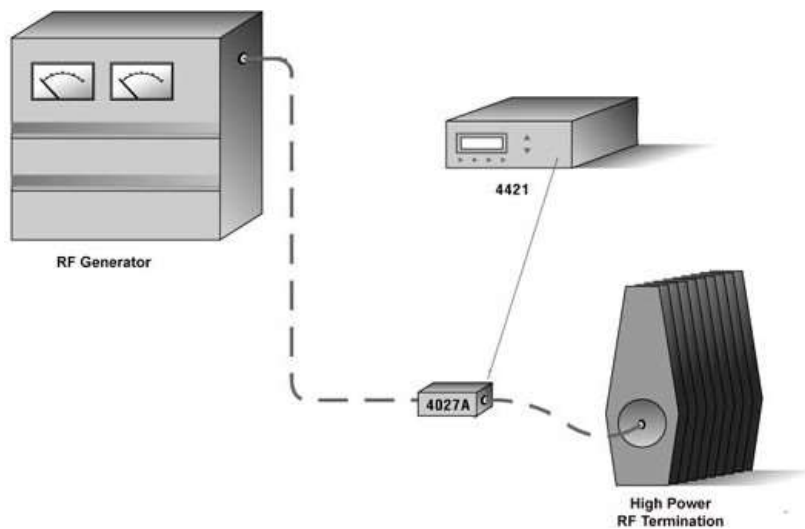
パワー計測における一般的な誤差要因

上述したように、4421パワーメーターと4020シリーズのパワーセンサは、長年にわたって高精度の無線周波数パワー測定に使用されてきました。オリジナルの4421および4020シリーズのセンサの精度は $\pm 3\%$ (1シグマ)とされていますが、ほとんどのユーザーの典型的な経験では、精度はこれよりもはるかに良く、通常は $\pm 1.5\%$ のオーダーです(1シグマ)。

ほとんどの場合、4421パワーメーターは、高調波成分が少なく、振幅変調がほとんどない、基本的に連続波(CW)信号を測定する環境で使用されます。すべての4020シリーズ製品の校正では、信号の高調波成分が基本周波数のパワーレベルよりも少なくとも50 dB低くなるように、校正テストソースを維持しています。

さらに、このソースには基本的に振幅変調がありません。(旧世代の4020シリーズのパワーセンサは、ディテクタ方式を採用しています。ディテクタは非常に広いダイナミックレンジで動作し、その一部はダイオードの動作曲線の平方則領域に存在し、ダイナミックレンジの残りの部分は動作の遷移および線形領域に存在します。これらの検出器では、測定する信号が振幅変調されている場合、検出器が変調エンベロープのピークに追従する傾向があるため、さらなるエラーが発生する可能性があります。振幅変調は、半導体デバイスの処理に使用されるRFジェネレータで生成される信号の一般的な特性であり、ほとんどの場合、スイッチングタイプの電源を使用しているため、振幅変調は伝送ラインに関連しています。

上記のような潜在的な測定誤差の原因は、以下の理由から重要です。



- a) ほとんどの場合、4020センサーは、高品質の50Ω負荷で終端されたRFジェネレーターの出力に直接使用されています。これらのケースでは、RFジェネレーターの高調波成分が少なく、振幅変調が最小限であれば、非常に信頼性の高い、正確な測定が可能です。しかし、場合によっては、センサーがRF供給システムのある場所に設置されていて、プロセスリアクターから反射されたエネルギーにさらされることがあります。このようなケースでは、センサーに大きな誤差が生じる可能性があります。
- b) ここ数年の傾向として、RFジェネレーターの小型化が進んでいます。多くの場合、ジェネレーターを小型化するためにジェネレーターの設計で犠牲になるのは、ジェネレーターの出力に設置されているローパスフィルターです。このローパスフィルターの性能を犠牲にすると、発電機の出力の高調波レベルが高くなります。

より汎用性の高い製品を提供し、上記の問題に対処するために、Birdでは4027A / 4027Fセンサを開発しました。これらの製品は、既存の4421パワーメータと併用することを目的としており、RFジェネレータの出力に存在する高調波レベルの影響を本質的に受けないという付加的な利点があります。さらに、このパワーセンサは、平均応答検出器方式を採用しており、パワーセンサの全ダイナミックレンジが検出器の平方法則動作範囲内に収まります。このようにして、センサーはサーマルデバイスに似た動作をし、測定される信号の加熱パワーに反応します。上述したように、この新しいパワーセンサは、RF伝送システム内でより普遍的なアプリケーションを提供し、高調波エネルギーが存在するかどうかにかかわらず、RFジェネレータの出力で正確で信頼性の高いパワー測定を提供する能力の点で、より寛容なものとなります。

結論

このノートの目的は、半導体プロセス環境での高周波電力測定に関連する、より重要で一般的な問題のいくつかについて、簡単な背景を提示することである。ここに掲載された情報に関するご質問や、このテーマに関するその他のご質問がありましたら、お問い合わせください。

1 Bird
0 866.695.4569
Birdrf.com
30303 Aurora Rd. Solon, OH 44139