

光学パワーメータ

Optical Power Measurement

パワーメータ/ デテクタ

フォトダイオードの基礎

1個のフォトンがフォトダイオード材料に当たった時、デバイスの量子効率にもよるものの、1個の電子-正孔の対を生成します。量子効率は多くの要因に影響を受けますが、一般に、フォトンのエネルギー $E=h\nu$ がデバイスのエネルギーギャップより大きい場合には、フォトン は、再結合率が高い非常に表面に近い領域で吸収され、光電流には寄与しません。これが、フォトダイオードの波長応答の波長依存性を示す量子効率です。Si (シリコン) や InGaAs (インジウムガリウムヒ素) のような半導体材料はそれぞれ異なったエネルギーギャップを持ち、そのために、それらは特定の材料に特有な波長応答特性を持ち、異なった波長で異なった量子効率を持つようになります。

半導体ダイオードは、高い検出感度と低いノイズ特性のため、低レベルの光の測定に理想的です。ほとんどのフォトダイオードの製造業者は、それぞれ長所と短所の両方を持つ光伝導型 (逆バイアス) と光起電力型 (バイアスなし) のいずれかのダイオードに基づき設計しています。Newport のローパワー **818 および 918D シリーズ** フォトダイオードには、低ノイズ性を持つ光起電力型が使用されています。

ダイオードだけからの2つの主な雑音源には、熱雑音とショット雑音があります。光がフォトダイオードの表面に当たらない状態の光起電力型の場合、フォトダイオードが熱平衡でジョンソン (Johnson) 電流ノイズとして知られるランダムな熱雑音を引き起こしており、それは、以下の式で与えられます。

$$I_{\text{Johnson}} = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{\text{sh}}}} \quad [\text{A}]$$

ここで、 k はボルツマン (Boltzman) 定数、 T はケルビン温度、 B はディテクタ/アンプのバンド幅、 R_{sh} はフォトダイオードの分路抵抗です。この式から、高い分路抵抗を持つフォトダイオードのジョンソンノイズ、すなわち、熱雑音を低減することが望まれていることが分かります。

ショット雑音は、ダイオードの中の電流の流れによって引き起こされるノイズであり、次式で与えられます。

$$I_{\text{shot}} = \sqrt{2qB(I_{\text{dark}} + I_{\text{photo}})} \quad [\text{A}]$$

ここで、 q は電子のチャージ、 I_{dark} は暗電流、 I_{photo} は光電流です。フォトダイオードが光起電力モードで使用される時、ダイオードにかかる電圧はゼロボルトに保たれます。従って、暗電流はほとんどありません。また、無視できるほどの暗電流があるため、暗電流によって生み出されるショット雑音も、同じく無視できます。これらの効果を全体的な視野で見るために、もしディテクタが光伝導モードのようにバイアスがかけられていたなら、暗電流は、バイアスのないディテクタのノイズ等価電流より約30倍おおきくなります。

フォトダイオードによって生成された光電流は、トランスインピーダンスアンプとして知られる演算増幅器回路を使用して、パワーメータで直接測定されます。一般的な測定では、室温においてさえ優れた再現精度で、サブピコアンペアの形にダウンさせられます。この規則に例外があるのは、フォトダイオードの分路抵抗が Ge (ゲルマニウム) フォトダイオード (818-IR, 918D-IR) と同じように小さい時です。その低い分路抵抗 (代表値: 50k Ω) のため、せいぜい数10ピコアンペアの分解能です。

サーモパイル(熱電対)ディテクタの基礎

基本的な高出力レーザー (>1W) ディテクタは本質的にはサーモパイルです。サーモパイルのより身近なアプリケーションは事実上一般的な名前をサーモエレクトリッククーラーという電圧をかけた時、サーモパイルが接着された半面を冷却するものです。しかしレーザーパワーを測定する場合のサーモパイルは反対の方法で使われます。すなわち、温度差は電圧を発生させるのに使われます。片面にレーザーによって加熱された材料があり、もう片面にヒートシンクがあります。レーザーエネルギーはその材料が温まることによって吸収されます。熱い吸収体が片面にあり、冷たいヒートシンクがもう片面にある状態になり、その温度差は熱の伝達としてサーモエレクトロデバイスを流れる。この温度差でサーモパイルは電圧を発生させます。その電圧はレーザーパワーに比例している温度差に比例しています。モニターはレーザーパワーをWと表示するためにこの電圧を測定しています。

吸収装置

光学吸収材料はディテクタで最も重要な部品の一つです。それはディテクタの性能の多く、特にパルスによるダメージを定義するからです。この材料はレーザーから光エネルギーの大部分を吸収して熱に変換します。材料やアプリケーションに依存して、光パワー全体の数%から50%まで変化でき、少量でも反映されます。材料による波長吸収レスポンス曲線が特性を示します。

ボリューム吸収装置

狭い面積で少ない時間にきわめて高い集中のパワーとエネルギーを必要とするアプリケーションによっては短波長でボリュームのある吸収体が必要になるでしょう。エネルギー光を表面で吸収する広いバンド幅の材料とは違って、そのエネルギーは材料の厚みを通して吸収されます。波長に依存して、エネルギー密度は3 J/cm²を超え、ピークパワー密度は100,000 MW/cm²を超えて扱うことが出来ます。

ディスクサーモパイル

レーザーパワー測定には2種類のサーモパイルが使われます。1つはウェハタイプでもう1つはディスクタイプのサーモパイルです。多くの平均パワーが吸収または小さなギャップを含むサーモカップラを通して流れるとき、サーモカップラの接点が破損するほど熱くなります。その場合はディスクサーモパイルが役に立ちます。ディスクは放射状に広げられた2つの接点によって出来ています。交互のセットが大きくてがっしりしたヒートシンクに接触しているディスクの縁近くにある間、1セットの接点が開口の下に整列します。レーザーパワーはセンターで吸収体を加熱し、センターと縁の間に温度差を作り出します。そしてサーモカップラはこの差に対応して電圧を発生します。これがウェハサーモパイルです。第1の違いは熱がディスクを通して放射状に流れ、特にウォータークーリングやエアブローより多くの平均パワーを扱えることが出来ることです。ディスクサーモパイルは早い応答時間を持っています。

パイロエレクトリックの基礎

パイロディテクタは、ディテクタのデザインにもよりますが、**最大**パルス幅が、5 μsから400 μsの短い光パルスのエネルギーを測定するために設計されています。これらのディテクタは、永久双極子モーメントを持つ強誘電体結晶から作られています。光パルスを受けると、結晶は熱せられて双極子モーメントを変化させます。この双極子モーメントの変化で電流が流れ、それを光パワーメータまたはオシロスコープで測定できるディテクタヘッドが電圧に変換しているのです。

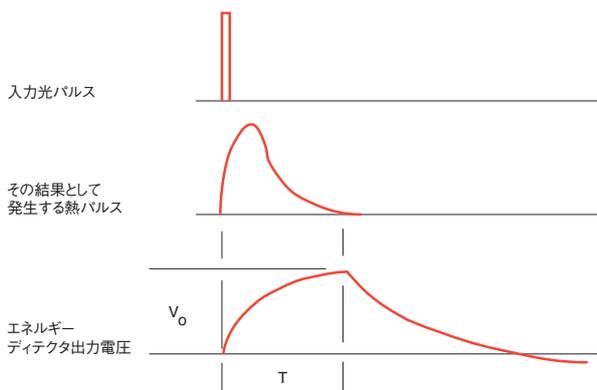


図1：上は、パイロディテクタの代表的な信号を示した図です。

図1に示されるように、結果として生じる熱パルスは、短い光パルスに比べて広がっています。この熱パルスの中に、電流は振幅が増加した電圧を形成し、強誘電体結晶を通じて流れます。光パワーメータは、出力電圧がちょうど増加し始める時と出力電圧がそのピーク振幅に達するまでの時間の電圧差を測る回路を持っています。この電圧の差は、ジュール/ボルト単位のディテクタ感度で数値的に積算され、最終的にジュール単位のパルスエネルギーに変換されます。

パイロディテクタを使用する時は、最大パルス幅又は最大繰り返し周波数を超えないよう注意する必要があります。これらの仕様のいずれかを超えた場合は、ディテクタの電氣的バンド幅の制限により、測定精度が低下することになります。

フォトダイオードのスペクトル校正

校正は、特に紫外領域において、時折発生する光ノイズを最小に抑えるため、ダブルモノクロメータを使用して行われます。200 nm～2550 nmの波長帯域で信号対雑音比が最大になるように、モノクロメータには3つの回折格子と2つの光源が使用されています。310 nmまでの紫外領域では重水素ランプが使用され、タングステンランプがそれに続く可視および近赤外領域で使用されています。

Newportでは、毎年、NIST準拠で校正された2つの校正済みディテクタを標準器として使用しています。標準ディテクタはそれぞれ、200～1100 nm、400～1600 nm、780～1800 nm、1200～2550 nm帯域用です。NISTの標準ディテクタの絶対感度の精度は、不確か率 (k=2) を絶対SI単位の0.2%に相対的に拡張したクライロジェニックラジオメータに基づいています。

ディテクタの製造ロットを校正する前に、モノクロメータからの光束は、まず、試験対象ディテクタ (DUT) について校正すべき波長範囲全体にわたって、NIST準拠の標準ディテクタを使用して10 nmごとに測定されます。NISTから、標準ディテクタの感度が分かっているため、次式からモノクロメータの光束を計算します。

$$\text{Fluxmono (W)} = \text{imeasured (A)} / \text{ResponsivityStd Det (AW)}$$

ここで、imeasured は、標準ディテクタの感度測定電流です。

モノクロメータから得られる光束を知り、10 nmステップでDUTの光電流を測り、AW単位でディテクタの分光を得るために、この電流をモノクロメータの光束で割ります。

フォトダイオードの感度は、特に応答波長限界の近似では温度に敏感であるため、Newportでは、NISTが標準ディテクタを校正した温度となるように標準ディテクタとDUTの温度を維持しています。この温度制御は、正確な校正には不可欠です。例えば、シリコンの温度依存性は、室温付近での5℃の変化が、1100 nmで約10%の感度変化を誘発するものです。

パワーメータの基礎

ほとんどの人は、dBmまたはワットの単位での測定をご希望されますが、光パワーメータは、単に光ディテクタで生成された電流または電圧を測定することができるだけです。

フォトダイオードとインターフェイスする時、測定しなければならない数値は電流です。この電流を測定するためには多数の技術がありますが、半導体フォトダイオードからは期待される検出感度、信号対雑音比、および、精度が得られるだけです。フォトダイオードを使用する時は、トランスインピーダンスアンプとして知られている回路が有効な回路です。(図2)

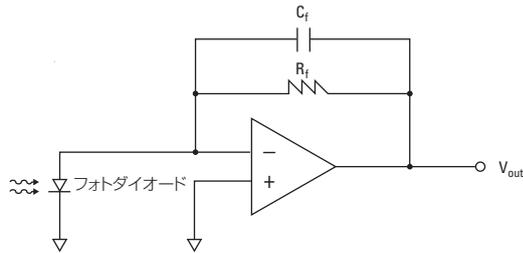


図2：トランスインピーダンスアンプ

トランスインピーダンスアンプが他の増幅器に対して持っている長所は、電流がフォトダイオードから流れ出すような電圧を持つフォトダイオードのバイアスが不要だということです。一般的に、フォトダイオードのリード線の1本はしっかりと接地し、他のリード線はトランスインピーダンスアンプのマイナス入力的手段によって、仮定の接地に保持されます。フォトダイオードのバイアスは、事実上、ゼロボルトに保持され、暗電流とノイズは最小状態となり、リニア特性と検出感度を強化します。

このトランスインピーダンスアンプは、光電流を効率的に生成し、アンプの出力において、 $V=iR$ となる電圧を発生するフィードバック抵抗を通じて流れます。パワーメータは、厳密なフィードバック抵抗の値を知っているため、電流は非常に高い精度で計算することができます。

サーモパイルやパイロディテクタをインターフェイスする時に、光測定器が測定しなくてはならない数値は電圧です。しかし、2つのタイプのディテクタ間で測定されなければならない場合には、かなり相違が生じます。2つの異なるタイプの電圧源を受け入れるような光パワーメータの電気回路を設計し、構成しなければなりません。

サーモパイルディテクタは、非常に遅いサブミリボルトレベルのバンド幅電圧 ($\text{\AA}1 \text{ Hz}$) を作り出します。このような低電圧を解決しようとする時の問題点は、接続やプリント回路基板で生み出される異金属材料で引き起こされた電圧を補正したり、取り除いたりすることです。サーモパイルディテクタで電圧を生成させる望ましい物理的効果が、接続やプリント回路基板に存在している望ましくない効果に類似していることは、いく分皮肉なことです。この不要な熱電圧を最小にするように電気的コンポーネントを選ぶ時、注意を払わなければなりません。さらに、微弱電圧を正確に分解するために、コンポーネントやサーモパイルの熱ドリフトに対して、光パワーメータはオフセット電圧がゼロになるようにする必要があります。

これとは対照的に、パイロディテクタは、マイクロ秒程度の比較的速い立上り時間信号を生成します。(パイロの基礎のセクションの図を参照)。光パワーメータの電気回路は、基線電圧とパルスのピーク振幅の両方をサンプルアンドホールドしなければなりません。これらの2つの電圧は、その後、差動アンプに入力されます。ディテクタの感度から光パルスのエネルギー量を決定するのはこの電圧差です。これらの回路は、ノイズに敏感であるため、サンプルアンドホールド回路に偶発的トリガが入るのを避けるよう注意しなくてはなりません。より速いパイロディテクタは狭いピーク値をもっているため、振幅精度を劣化させないで、回路のバンド幅がピーク値のレベルを捕捉できるだけ十分速いことが重要です。

積分球

Newportの汎用積分球 (P187参照) は、様々な測定に使うことができます。用途を拡大するオプションのアクセサリ (P185参照) も多数ご用意しております。

ビームパワー

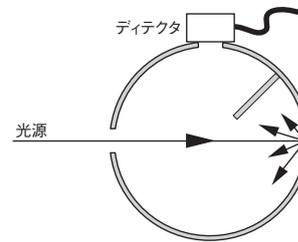


図3：ビームパワー

完全な平行光または非平行光ビーム (図3) を、偏光方向やビームのアライメントとは無関係にパワー測定を行うことは簡単です。ビームは、積分球の中に入射され、直接反射された光から遮光されたディテクタが空間的に統合されたビームパワーを測定します。積分球は、レーザダイオードやレンズ付きLED、レンズ付きランプなど、拡がり角の大きなビームのパワー測定に理想的です。

透過率

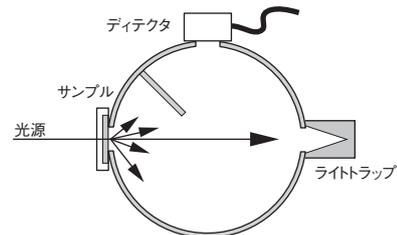


図4：拡散透過率

ポートの1つに保持されたサンプルから透過した放射光を集積することで、透過率 (図4) を測定することができます。サンプルを照射し、次に積分球外で直接測定した光源と比較します。積分されない透過光からディテクタをシールドするために遮光板を、散乱しない光を取り除くために光トラップをそれぞれ使用します。全散乱積分光、蛍光、体積散乱、前方散乱、および、後方散乱も測定可能です。

反射率

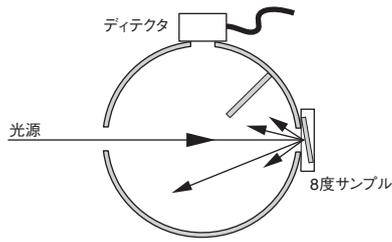


図5：正反射+拡散の反射率

反射率を測定するために、サンプルをポートの1つに保持し、入射光線に照射させます。全体の反射光は、積分球によって空間的に積分され、遮光されたディテクタで測定します。入力ポート外に正反射させる直入射サンプルホルダを使用することによって、反射光の正反射成分を取り除くことができます。8度の入射サンプルホルダで、「正反射+拡散」反射率（図5）の測定が可能です。既知の標準に対するサンプルの反射率は、その両方の測定と比を計算することで導き出すことができます。サンプルと標準は、サンプルの反射率によって起きたエラーを避けるため、類似した反射率のものを使用します。二重ビームシステムで、この測定誤差の可能性を取り除いています。

光ファイバパワー出力

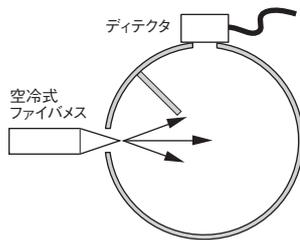


図6：光ファイバパワー

積分球は、同様に、光ファイバの出力を測定するためにも理想的です。特に、この手法では、気流によるサーモパイルの検出感度の影響を避けることができ、外科または眼科用の空冷式高出力ファイバメスの測定ができます（図6）。

レーザーダイオードパワー

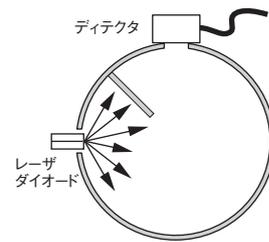


図7：レーザーダイオードパワー

積分球および校正済みディテクタの構成は、レーザーダイオードの光パワーを高精度の絶対値測定に適しています。この測定では、ディテクタ位置やディテクタ検出面への過剰入射や飽和による問題で起こるエラーは関係ありません。入力ポートとディテクタポートの間にある遮光板は、ディテクタがレーザーの発光口や発光面に直接さらされないようにするために置かれています。積分球で検出された光束は、常に、入射光束の微量な一部分です。ディテクタに到達する前に何度も光が反射することで起こる減衰は、積分球を高出力レーザーの光パワー測定に最適なものになっています（図7）。