

光パワーメータの応答直線性校正の 波長広帯域化に関する調査研究

田辺稔*

(平成23年1月6日受理)

A survey on expanding wavelength band of linearity calibration for optical power meter

Minoru TANABE

Abstract

The precise and accurate measurements of laser power or energy are required to provide safety and quality assurance of laser related products as various applications are broadened into many fields. Of various parameters in optical measurements, nonlinearity calibration of an optical power meter with its spectral dependence are demanded to cover the widely spectral ranges in these fields. In this paper, problems of the current calibration system of the power meters to expand spectral band and its solution are addressed. Additionally, the basis of laser power standards, calibration status, and the recent capabilities and activities of the laser standards at the national metrology institutes are described.

1. 緒論

1960年、T. H. Maiman がルビーを用いた光の増幅に成功して以来¹⁾、今日までの50年間で、固体・気体・液体レーザー、半導体レーザー、X線レーザー、自由電子レーザーと様々なレーザーが開発されてきた。レーザーを用いたフォトリソグラフィ産業は電子・情報産業を支える基盤技術となり、最先端科学のフロンティア開拓にも不可欠となっている。また、フォトリソグラフィ産業の市場は1983年に0.4兆円（国内年間生産額）であったが、ここ半世紀の間に8兆円規模となり爆発的な成長を遂げた（光産業技術振興協会2009年度技術レポート参照）。その成長を支えたのが半導体レーザーを光源とした光製品であり、例えば、CDやDVD等の光ディスクや光ファイバ通信機器である。表1に年間の世界のレーザー生産量を示す。表に示す様に半導体レーザーの生産が大部分を占めていることから、フォトリソグラフィ産業は半導体レーザーの実用化と共に

急速に成長したと過言ではない。

表1 年間の世界のレーザー生産量（Laser Focus World, Jan./Feb 2008）

用途	個数 [千個]	半導体レーザーの割合 [%]
光メモリ	714,000	100
センサー	29,136	100
娯楽	20,675	100
検査・測定・制御	15,101	100
光通信	14,450	100
プリンター	10,231	100
医療	372	95
材料加工	59	14
基礎研究	5	21

光ディスクの分野では、記憶素子の大容量化に伴い、CD用のAlGaAs（中心波長780nm）からDVD用のAlGaInP（中心波長650nm）系、Blu-ray用のAlGaInN（中心波長405nm）系まで、半導体レーザーの中心波長

*計測標準研究部門 光放射計測科レーザー標準研究室

が短波長化してきた。一方、光ファイバ通信の分野では、AlGaAsの波長850 nm帯、InP系半導体を基板に用いた波長1.3–1.5 μm 帯のレーザの出現と光ファイバの伝送損失の低下に伴い通信波長の広帯域化が進んできた。1989年、M. Nakazawaらによってエルビウムを添加したファイバ増幅器が開発され²⁾、1.48 μm の励起波長を用いると殆ど損失することなく信号光を増幅できる理想的な増幅器となり、短期間のうちに光ファイバ通信網における標準的な増幅システムの地位を確立した。これに続いて、1995年以降、複数の波長を用いて伝送信号を多重化し、ファイバ1本当たりの伝送トラヒックの大容量化を行う波長多重(Wavelength Division Multiplexing: WDM)通信技術の実用化が進み、現在は、光ファイバ通信の主流が1260–1650 nmといった幅広い波長を利用するものに移っている。さらに、2009年、Y. Enyaらによって緑色のレーザ(中心波長520 nm)が開発され³⁾、光の三原色(赤、緑、青)が波長変換素子を介することなく半導体レーザのみで達成できるようになることに伴い、ディスプレイ等の光源利用への拡大が予想される。

このような社会的背景の中で、レーザの利用を拡大するにはレーザの特性を評価する標準が必要となる。レーザの基本的な物理量としては波長、パワー等があるが、それら物理量を高精度に測定することはレーザの信頼性を向上させるだけでなく安全性の面からも重要である。結果的に、各レーザの物理量の高精度な測定がレーザ製品の品質に繋がるため、レーザに関する標準を開発・供給する意義は非常に大きい。

我が国のレーザに関する標準は、産業技術総合研究所・計量標準総合センター(National Metrology Institute of Japan: NMIJ)が管理する国家標準を頂点として、途切れない連鎖構造(トレーサビリティ)を形成している。NMIJでは、国家標準の維持・管理・開発だけでなく、国家標準間の比較に基づく相互承認を行うことで国家間の同等性が確認された標準を世の中に供給している。特

に、最近では、上記のような新規レーザの市場参入や光通信波長の広帯域化に伴う要請から、ある代表的な波長一点における校正サービスのみではなく、幅広い波長帯域で校正できる技術の確立が急務となっている。

今回、その様なレーザ標準の広帯域化に関する開発に取り組むにあたり、現在のレーザパワー関連標準の供給体制や校正技術、その不足点、および、海外の研究動向に関する調査研究を行った。本稿はその結果をまとめたものであり、6つの章から構成されている。第2章では、レーザパワーの各種測定器の原理について述べる。第3章では、光パワーメータの直線性校正法について概説する。第4章では、現在のNMIJにおけるレーザパワー標準の供給体制について述べた後、幅広い波長帯域で校正可能となるための技術的課題を列挙し、それらの解決に向けた取り組みについて詳説する。続く第5章では、海外標準研究所の光ファイバ系の標準に焦点をあて、主要標準研究所のトレーサビリティ体系や各国の校正・測定能力、ならびに世界の光ファイバ系標準の動向について述べる。第6章は総括であり、調査研究のまとめを行う。

2. 様々なレーザ出力測定器の原理

2.1 レーザ出力測定の概要

レーザ光には、時間的にパワーが一定な連続光とパルス光がある。連続光の測定では平均パワーを表す単位ワット(W)が用いられ、パルス光の測定では1パルスあたりのエネルギー総量が単位ジュール(J)で表される。本稿では連続光のパワー測定に焦点をあてる。

表2にレーザパワーの測定方法と測定原理の分類を示す。今日の社会で利用されているレーザ光は、用途によってパワーや波長範囲が大きく異なるため、そのレーザ光の特徴に合った検出器が必要である。一般的なパワーメータは熱型検出器と光電型検出器であり、各国標準研究所では一次検出器として電力置換式の熱型検出器が用

表2 レーザパワーの測定法、原理による分類

測定方法	測定原理	特徴
熱的	温度検出(熱電対, サーモパイル) 電荷検出(焦電素子)	電力置換により絶対値校正が可能, 高精度, 感度が広い波長で一定
光電的	内部光電効果(フォトダイオード) 外部光電効果(光電管)	高感度, 高速応答, 感度が波長に依存, 反射率の入射角依存性が大
光化学的	銀塩反応(写真)	狭波長域, 定量的評価に不適
非線形光学的	光整流効果	パルス測定用途
機械的	輻射圧	高出力測定用途

いられている。本章では、様々な光パワーメータの原理について述べる。

2.2 電力置換型検出器

2.2.1 常温型カロリメータ

電力置換式の熱型検出器の一つであるカロリメータは、レーザ光を受光部の吸収体に吸収させ、その吸収体の温度上昇と等価になるように直流電力を印加し、入射光パワーを電気的なパワーに置き換えて評価する方式である。1987年、旧電子技術総合研究所のT. Inoueらによって開発された等温制御型のカロリメータ⁴⁾が我が国におけるレーザパワー標準の基礎となっている。図1(a)に当時開発されたカロリメータ型レーザパワー標準器の構造と制御システムの概要図を示す。受光部は吸収体と円筒型カバーで構成されており、各表面には3 M Nextelを用いた黒コーティングが施されている。このコーティングの反射率は波長400–1500 nmに対して2–3%程度である。円筒カバーは、吸収体からの反射光を吸収させる事で受光部全体の反射ロスを0.1%以下に抑制しており、円筒カバーの先端部と底部に取り付けられたヒータは、吸収体で反射した後の円筒カバーで吸収されるレーザ光のパワーと電気的パワーの等価性を評価する機能を果たしている。測定原理を以下に述べる。まず、制御システムを用いて熱電冷却素子に加える冷却パワーとヒータの電気的パワーのバランスを取って受光部の等温状態をつくる。この等温制御下でレーザを入射すると、受光部の温度が上昇し等温状態が崩れるが、フィードバック制御によりヒータの電気的パワーが減少させられ、レーザパワーとヒータの電気的パワーの和が冷却パワーと等しくなることで等温状態が維持される。以上より、入射レーザパワーはこのヒータの電気的パワーの変化から測定できる。このカロリメータ型レーザパワー標準器の測定パワー範囲は50 μW –10 mWである。上記のカロリメータを用いて10 μW 以下の光パワーを計測した場合、周囲の温度変動や気圧変動等の擾乱が計測の不確かさを大きくする。そこで、図1(b)に示す様にその温度変動を相殺するために光測定用と同様の受光部を備え付けたツイン型のカロリメータが開発された⁵⁾。このツイン構造のカロリメータは、現在の我が国のレーザパワー特定標準器であり、測定の不確かさは、波長633 nm、パワー50 μW –10 mWにおいて0.15–0.35% ($k=2$)を達成している。

上記のカロリメータをファイバ系レーザのパワー測定に用いるために、図1(c)に示す様に光ファイバカロリメータが開発された⁶⁾。このカロリメータでは受光部

の円筒を取り除いて開口数を拡大し、ファイバ端と吸収体間の距離と吸収体の大きさを最適化して光ファイバからの発散ビームを漏れなく検出できるような構造となっている。ビームの発散角の違いによる不確かさは0.02–0.15%であり、空間系レーザパワーの測定不確かさと同程度である。このカロリメータによる最終的な光ファイバパワーの測定不確かさは、波長1.3 μm 帯、1.5 μm 帯、パワー50 μW –1 mWで0.23–0.37% ($k=2$)である。

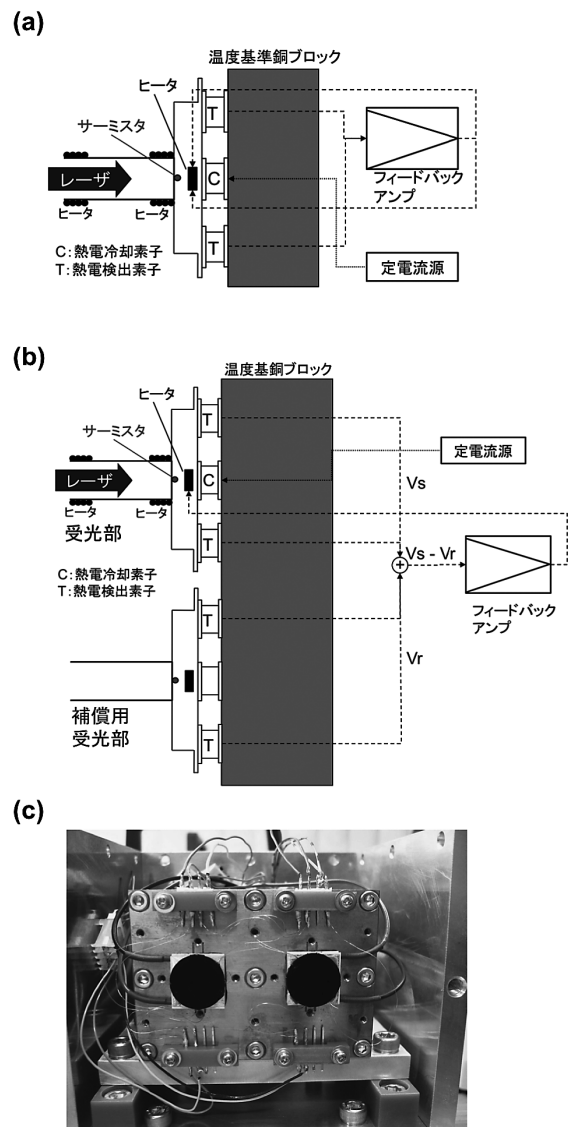


図1 (a), (b) カロリメータ型レーザパワー標準器の概要図。(a) 初期タイプ、(b) 現行タイプ、(c) 光ファイバカロリメータ検出部 (写真)

2.2.2 極低温放射計

電力置換型極低温放射計は、4.2 Kの液体ヘリウム温度まで冷却可能な真空容器内に光吸収体と温度計を取り付けたカロリメータである（図2）。外部からの光を吸収体へ入射させるため、石英製の窓を取り付けている。この窓を直線偏光がブリュースター角で入射する配置にすることで、窓での光反射を抑制している。容器内を極低温にする利点として、熱型検出器の熱雑音が小さくなること、金属の熱拡散率が常温の1000倍以上となるため電力置換の等価性が向上すること等が挙げられる。以上の利点から、極低温放射計は不確かさ0.01%以下でパワーの絶対値計測が可能であるため、各国の一次標準器として使用されている^{7)~9)}。前述の常温型カロリメータと比較すると、不確かさは一桁程度小さくなるが、極低温の冷却装置を要するため装置が大型化し可搬性がないという欠点をもつ。一般に、極低温放射計は測光・放射量の源流となる高精度な一次標準検出器として発展し、世界の標準研究所同士の国際比較も積極的に実施されている^{10), 11)}。

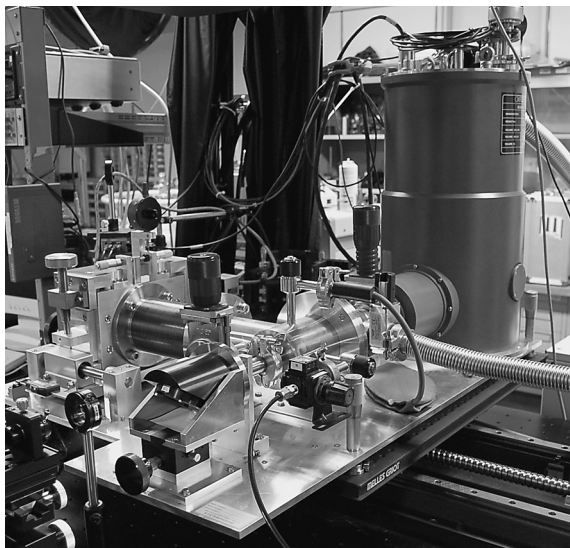


図2 NMIJにおいて運用されている極低温放射計の例（写真）

2.3 その他の熱型検出器

2.3.1 焦電検出器

焦電検出器は、自発分極をもつ強誘電デバイス（チタン酸ジルコン酸鉛など）の表面に帯電する電荷が、温度の変化に応じて増減する効果（焦電効果）を利用した熱型の検出器である。焦電素子は常温状態でも分極しているが、表面にイオンを吸着しているので分極は観測できない。しかし、レーザー光が入射した時、素子の温度変化

によって分極が変化し、その変化分を電圧として検出することができる。

2.3.2 サーモパイル検出器

異なる二種類の金属を接合し、その接合面での温度差に起因する熱起電力を発生する素子を熱電対とよぶ。サーモパイルは、複数の熱電対を直列あるいは並列に接続した検出器である。片面をレーザーによって加熱し、もう片面をヒートシンクで冷却しておけば、その温度差で発生した電圧からレーザーパワーが測定できる。このサーモパイル検出器は、小型であることから実用標準器として使用されることが多い。

2.4 光電型検出器

2.4.1 フォトダイオード

図3にシリコンフォトダイオードの断面図を示す。フォトダイオードは、p型半導体とn型半導体を用いたpn接合デバイスである。pn接合した半導体にエネルギーギャップを超える光が入射すると、半導体内で電子-正孔対が生成される。p領域、n領域で生成された電子-正孔対は、少数キャリアの拡散によって空乏層まで移動し、空乏層で吸収された光によって生成された電子・正孔と共に光電流として検出される。ここで、入射光パワー P [W]、検出される光電流 i [A]をとすると、フォトダイオードの応答度 R [A/W]は以下の式(2-1)で表すことができる。

$$R = \frac{i}{P} \quad (2-1)$$

また、応答度はフォトダイオードの量子効率 η_e を用いて、以下の式(2-2)で表すことができる。

$$R = \frac{qn\lambda}{hc} \eta_e \quad (2-2)$$

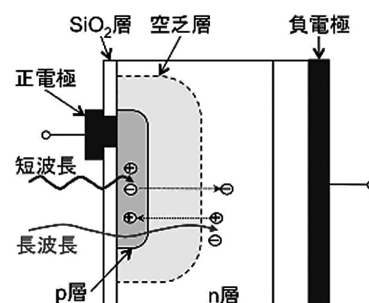


図3 シリコンフォトダイオードの断面図

ここで、 q は素電荷、 n は空気の屈折率、 λ は入射レーザーの波長、 h はプランク定数、 c は光速である。さらに、量子効率 η_e は内部量子効率 η_i を用いて以下の式 (2-3) で表すことができる。

$$\eta_i = \frac{\eta_e}{1 - \rho(\lambda)} \quad (2-3)$$

ここで、 ρ はフォトダイオード表面の反射率である。量子効率が1ならば、式 (2-2) から応答度は波長に比例する関数となり、入射波長の絶対値が既知であれば、光電流値から入射光パワーを算出することが可能である。ところが、外部から逆バイアスをかけ接合面付近で空乏層の幅を広げることで内部量子効率を1に近づける工夫をしたとしても厳密にはその値は不明である。また、式 (2-3) に示す様に入射表面での反射とその入射角、偏光依存性があるため量子効率は1ではない。よって、フォトダイオードを用いた入射パワーの高精度計測を行う際は、別途前述の絶対検出器を用いて応答度の校正を行う必要がある。

フォトダイオードには、上記の他に pn 接合間に高純度層を設けて接合容量を減らし、高速かつ高感度化した pin フォトダイオードや、検出電流に対する増幅作用をもったアバランシェフォトダイオードがある。可視、近赤外の短波長に対しては Si フォトダイオード、通信波長帯に対しては Ge や InGaAs フォトダイオードが用いられている。

2.4.2 トラップ検出器

フォトダイオードを用いた計測で不確かさが大きくなる要因としては、検出器表面の高反射率と入射光の偏光依存性が挙げられる。これらの諸問題を解決するためにトラップ検出器が開発された¹²⁾。トラップ検出器はフォトダイオードを複数個用いて全体としての反射ロスを低減するとともに、入射光の偏光依存性を抑制できるような配置に設計された検出器である。トラップ検出器は出射光路の違いから、入射光に対して再帰的に反射光が戻る反射型^{12), 13)}と入射進行方向に出射する透過型¹³⁾がある。図4にトラップ検出器の構造例を示す、以上の様な工夫により、トラップ検出器は不確かさ0.01%という高精度計測を実現し、各国の標準研究所では極低温放射計用の伸介器として利用されている(第5.2節参照)。

可視光の波長領域に対しては Si フォトダイオードが用いられ、その性能評価がされてきた^{14), 15)}。また、通信波長帯の領域に対しては Ge や InGaAs フォトダイオードを用いたトラップ検出器が開発され、その特性評価も進んでおり、通信波長帯用の伸介器として使用する試み

も出てきている^{16), 17)}。

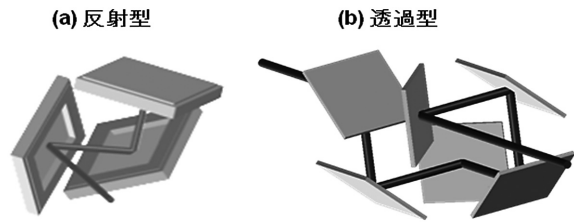


図4 トラップ検出器の構造例¹³⁾。(a) 3素子反射型、(b) 6素子透過型

3. 光パワーメータの応答直線性校正法

3.1 光パワーメータの応答直線性校正の必要性

第2章では、カロリメータ等の電力置換型の熱型検出器を用いることで、電気的パワーから入射レーザーのパワーの絶対値を評価する原理について述べた。ところが、熱型検出器は熱擾乱等の影響でノイズレベルが数 nW 程度となり、1 μ W 以下のパワーでは測定の際のばらつきが大きくなるため、低パワー領域の計測には限度がある。しかし、光ファイバ通信の分野では1 pW から1 W までの幅広い光パワー計測が必要とされており、熱型検出器を用いてその校正範囲をカバーするのは事実上困難である。このような広いパワー範囲に対しては、広いダイナミックレンジを有する被校正検出器(例えば、フォトダイオード)を用い、その応答直線性を校正することで対応が可能である。つまり、あるパワー(例えば1 mW)において熱型検出器でパワーの絶対値校正を行い、そのパワーより高い又は低い領域で検出器の直線性校正を行い、広いダイナミックレンジを確保することで校正が可能となる。光パワーメータの直線性の校正手法として、重畳法、減衰量増分法、比較法、微分法などがあるが、本章では、NMIJ で利用されている重畳法と減衰量増分法について述べる。

3.2 重畳法の原理

重畳法(重ね合わせ法)は、基準器が不要な応答直線性の自己校正法で、International Electrotechnical Commission (IEC) 文書 IEC 61315 に記載され、世界各国で広く用いられている手法である。図5に重畳法を用いた光パワーメータの直線性校正の概要図を示す。以下は校正手法の手順であり、これらの操作を繰り返すことで、1 pW から1 mW におよぶ広いパワー範囲の直線性を校正できる。

1. 光源からの光をカップラ1で2つに分け、それぞれの

分岐において同じパワー値になる様にバランス調整用の減衰器を調整する。

- 両方の分岐のスイッチを ON にし、パワーメータに同時入射した出力値 R_{12} を計測する。
- スイッチ 1 とスイッチ 2 を交互に ON, OFF し、それぞれの分岐からのレーザ出力値 R_1, R_2 を計測する。
- 以下の式を用いて非直線性 NL を計算する。

$$NL = \frac{R_{12}}{R_1 + R_2} - 1$$

- レベル設定用の減衰器で、3.01 dB (2分の1) 減衰させ、1 から 4 の手順を繰り返す。

重畳法を用いた直線性校正の不確かさの要因としては、測定データのばらつき、光の重ね合わせ時の干渉による不確かさ、パワーメータへの入力光の偏波のずれによる不確かさ、温度変動が原因となる測定結果に生じる不確かさが挙げられる。例として、3.01 dB を 3 段階積み上げ 9.03 dB (8分の1) 分の範囲を校正した際の不確かさバジェットシートを表 3 にまとめる。この時の合成標準不確かさは 1.8×10^{-4} dB となり、相対拡張不確かさで表すと 0.008 % ($k = 2$) となる。

以上、重畳法で 3.01 dB ステップで光パワーメータの直線性校正を行う例について述べたが、NMIJ では産業界のニーズから 10 dB ステップにも対応できる校正法を開発し¹⁸⁾、以下の減衰量増分法で供給を行っている。

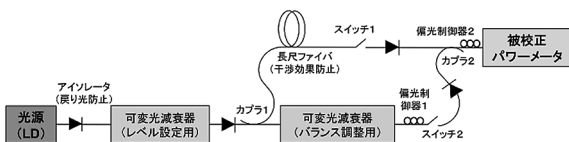


図 5 重畳法を用いた光パワーメータの直線性校正法

表 3 不確かさのバジェット表 (9.03 dB ステップ)

不確かさの要因	標準不確かさ
データのばらつき	1.63×10^{-4} dB
重ね合わせ時の干渉	0.66×10^{-4} dB
温度依存性	0.35×10^{-4} dB
偏波依存性	2.00×10^{-7} dB

3.3 減衰量増分法

図 6 に示すように、減衰量増分法は一定のステップ減衰量を与える減衰器とパワーレベルシフト用の減衰器を組み合わせて校正を行う手法である。あらかじめ重畳法で直線性を校正された標準パワーメータによるステップ

減衰量の測定値と被校正パワーメータで測定した測定値を比較することで、このステップに対するパワー区間での被校正パワーメータの直線性を求める。そして、光パワーレベルを広範囲にシフトし、様々なパワー区間における被校正パワーメータの直線性のずれを求め、基準パワーに対して広いパワー範囲にわたる応答直線性を校正する。

減衰量増分法を用いた直線性校正の不確かさの要因としては、ステップ切り換えに伴う偏光変動と被校正パワーメータの偏光依存性のずれによる不確かさ、パワーレベル設定ずれの不確かさ、ステップ減衰量の不確かさ、ステップ調整用減衰器のパワー依存性の不確かさ、レベル切り換え時の偏光変動に関する不確かさが挙げられる。-90 dB から 0 dB までの区間における光パワーメータ直線性校正の不確かさのバジェットシートを表 4 に示す。この時の合成標準不確かさは 2.55×10^{-3} dB となり、相対拡張不確かさで表すと 0.1 % ($k = 2$) となる。

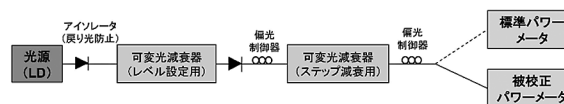


図 6 減衰量増分法を用いた光パワーメータの直線性校正法

表 4 不確かさのバジェット表 (-90 dB-0 dB の区間)

不確かさの要因	標準不確かさ
繰り返しに起因するばらつき	7.90×10^{-4} dB
ステップ切り換え時の偏光変動	1.15×10^{-4} dB
レベルセットのずれ	8.43×10^{-6} dB
ステップ減衰量の不確かさ	2.10×10^{-3} dB
ステップ減衰器のパワー依存性	1.45×10^{-4} dB
レベル切り換え時の偏光変動	4.44×10^{-6} dB

4. 我が国におけるレーザパワー標準の開発

4.1 我が国におけるレーザパワー標準の供給体制

図 7 にレーザパワー標準、光減衰量 (応答直線性) 標準のトレーサビリティの体系図を示す。また、表 5 にレーザ関連標準の jcss 校正および依頼試験一覧を示す。jcss 校正では、NMIJ が所持する特定標準器により、登録事業者の特定二次標準器が校正され、一般ユーザー向けのレーザパワー校正は、この特定二次標準器を元に登録事業者が校正を行っている。依頼試験では、一般ユーザー向けの校正を NMIJ が直接行っており、一部の量目につい

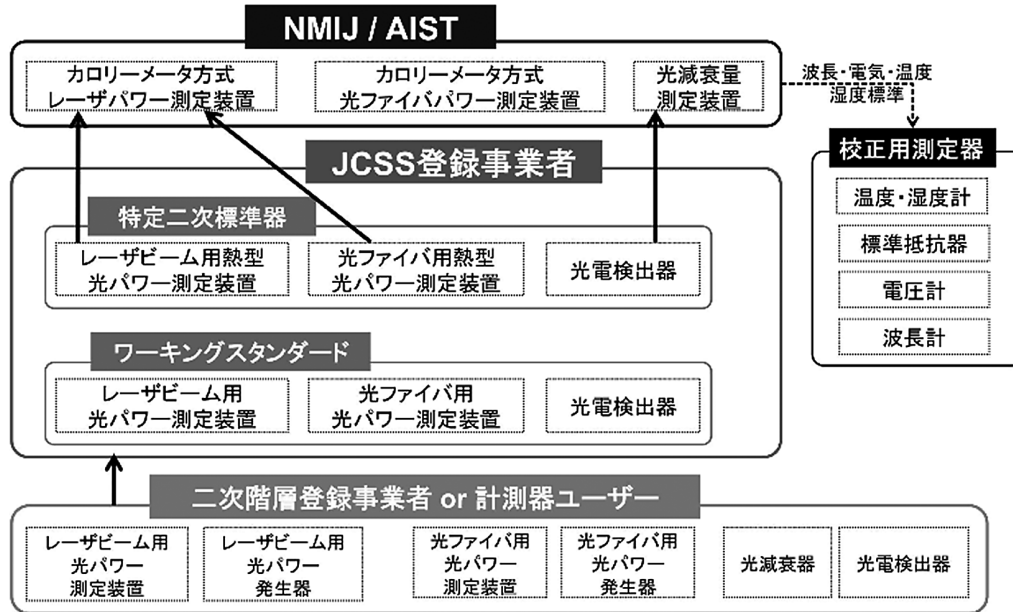


図7 我が国におけるレーザーパワー・減衰量（応答直線性）標準のトレーサビリティの体系

では、jcss 校正と依頼試験の両方を行っている。

現在、NMIJ では、Blu-ray、DVD、CD 用のレーザー波長帯（405 nm、650 nm、780 nm）近傍の波長帯域内全ての波長で、レーザーパワーメータ校正を可能とする校正設備の整備を進めている。また、光ファイバパワー・光減衰量（応答直線性）標準では、波長範囲拡大に向けた校正技術の確立を目指している（第4.2節参照）。

4.2 現在のレーザーパワー標準の供給体制における不足点と今後の課題

4.2.1 フォトダイオードの応答非直線性

現在、光パワーの供給において主要な被校正器物は、フォトダイオード型の光パワーメータである。その理由として、小型で持ち運びやすく現場での測定に適していること、および、適用パワー範囲（ダイナミックレンジ）が広いことが挙げられる。一方、フォトダイオードの応答は波長やパワーに依存する非直線性をもつため、第2.4節で述べた各波長に対する応答度の校正のほかに、広範囲なパワーにおいて直線性校正を行う必要ある。図8に入射パワーに対するフォトダイオードの非直線性の関係の例と各非直線性の要因を示す。非直線性の要因には高パワー領域から順に、飽和、スーパーリニアリティ^{19)~21)}、ショット雑音がある。このほか、レンジ切り換え時の出力の不連続も広義の非直線性に含まれる。以下、フォトダイオードの応答非直線性について詳説する。

レンジ不連続は、光パワーメータ製品の各パワーレ

ンジの負荷抵抗値と内蔵 ROM 上のパワー表示換算係数データがレンジ間で整合していないことや、光パワーメータ製品に内蔵される出力処理回路特性に起因する。ショット雑音は、微弱な光信号を検出する時に荷電粒子がランダムに動いて生じる電流の自然揺らぎである。

フォトダイオードの飽和の原理は以下の通りである。図9にフォトダイオードの等価回路を示す。入射フォトン数が増え、光電流が I_{ph} に達すると、フォトダイオードの内部直列抵抗や光電流検出回路で生じる電圧降下 V が増大しフォトダイオードに順方向電流 I_F が流れる。図9において、 I_L は外部負荷 R_L に流れる電流であり、以下の式（4-1）で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 I_L &= I_{ph} - I_F \\
 &= I_{ph} - B \left(\frac{qD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \\
 &= \frac{V}{R_L}
 \end{aligned}
 \tag{4-1}$$

ここで、 B は pn 接合の面積、 q は素電荷、 D_n は電子の拡散係数、 n_{p0} は p 型領域の電子濃度、 L_n は電子の拡散長、 D_p はホールの拡散係数、 p_{n0} は n 型領域のホール濃度、 L_p はホールの拡散長、 k はボルツマン定数、 T は温度を表す。式（4-1）に示される様に、この電圧降下 V が増えた結果、順方向電流が増加しフォトダイオードの応答が飽和する。この式（4-1）から、フォトダイオードの

表5 レーザ関連標準の jcss 校正および依頼試験一覧

校正項目	試験・校正の細目	校正対象機器	不確かさ($k=2$)	試験・校正の種類
レーザー パワー (空間系)	488 nm, 515 nm 10 mW – 200 mW	光パワー 測定器	0.13 – 0.17 %	jcss 校正
	633 nm 50 μ W – 10 mW		0.13 – 0.22 %	jcss 校正
	1550 nm 50 μ W – 1 mW		0.13 – 0.22 %	jcss 校正
	404 nm 50 μ W – 10 mW	レーザーパワー メータ	0.13 – 0.22 %	依頼試験
	488 nm, 515 nm 200 mW – 1 W		0.7 %	依頼試験
	1.1 μ m 1 W – 100 W		1.1 – 1.8 %	依頼試験
	10.6 μ m 1 W – 10 W		1.3 %	依頼試験
光ファイバ パワー	852 nm 50 μ W – 1 mW	光パワーメータ	0.21 – 0.48 %	依頼試験
	1310 nm, 1550 nm 50 μ W – 1 mW	光パワーメータ	0.23 – 0.37 %	依頼試験
応答 直線性 (減衰量)	1310 nm 1 pW – 1 mW	光パワーメータ	0.025 – 0.23 % (0.0011 – 0.0099 dB)	jcss 校正
	1550 nm 1 pW – 1 mW	光パワーメータ	0.012 – 0.10 % (0.0005 – 0.0045 dB)	jcss 校正
	852 nm, 1 nW – 100 μ W	光パワーメータ	0.097 – 0.22 % (0.0042 – 0.0096 %)	依頼試験
	1465 nm 1 mW – 250 mW	光パワーメータ	0.067 – 0.12 % (0.0029 – 0.0050 dB)	依頼試験
	1550 nm 2 mW – 1 W	光パワーメータ	0.044 – 0.12 % (0.0017 – 0.0052 dB)	依頼試験
	1310 nm 1 pW – 1 mW	光パワーメータ	0.025 – 0.23 % (0.0011 – 0.0099 dB)	依頼試験
	1550 nm 1 pW – 1 mW	光パワーメータ	0.012 – 0.10 % (0.0005 – 0.0045 dB)	依頼試験
レーザーエネルギー (パルス)	354 nm, 532 nm, 1064 nm, 1 – 100 mJ	レーザーエネルギー メータ, レーザ ジュールメータ	1.5 – 1.9 %	依頼試験

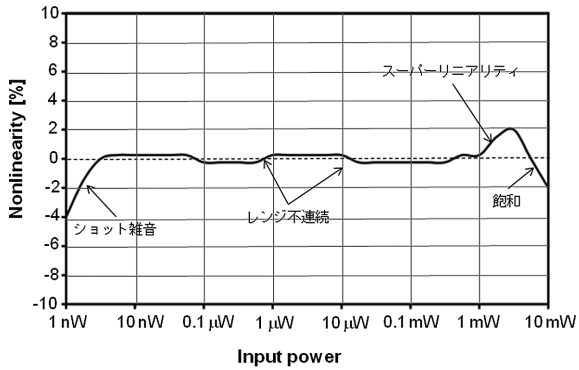


図8 フォトダイオードの非直線性と入力パワーの関係の例と各非直線性の要因

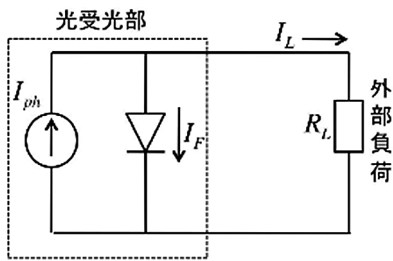


図9 フォトダイオードの等価回路

飽和は光電流ベースの要因であり、入射レーザーの波長とは無関係であることが分かる。図10にフォトダイオードの飽和のパワー依存性の例を示す。実在のフォトダイオードの場合は、レーザーパワーが増加するにつれて、飽和現象の前に後述するスーパーリニアな現象が発生する場合があるが、図10では飽和現象の例のみを示している。

スーパーリニアリティの定性的な説明としては以下の通りである。例えば、シリコンフォトダイオードに長波長の光を入射した場合、図11に示す様にシリコンの吸収係数が小さいため、全ての光子が空乏層で吸収されずフォトダイオードの奥の層（図12の場合、N層）で吸収される割合が増える。この空乏層外で発生した少数キャリアは拡散して一部が空乏層に到達するが、一部は半導体の格子欠陥や不純物に起因する再結合中心に捕獲される。低パワー入射では光吸収によって生成される電子-正孔対が少なく、再結合中心に捕獲される少数キャリアの割合が一定であるため、再結合による光電流ロスが一定になる。一方、高パワー入射では生成される電子-正孔対が多く、再結合中心に少数キャリアが満たされるため、キャリアが空乏層まで達しやすくなり光電流ロスが少なくなる。以上の様に非直線性のうちスー

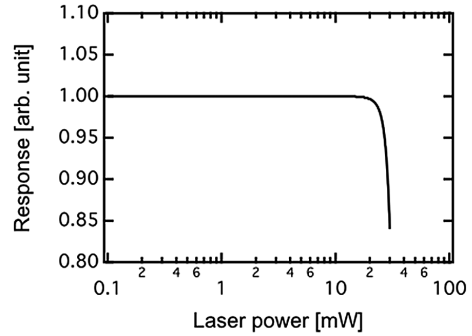


図10 飽和のパワー依存性の例

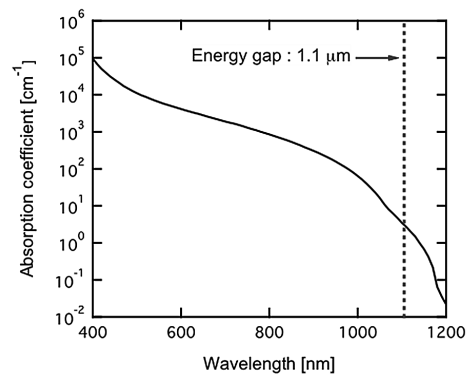


図11 シリコンの吸収係数の波長依存性

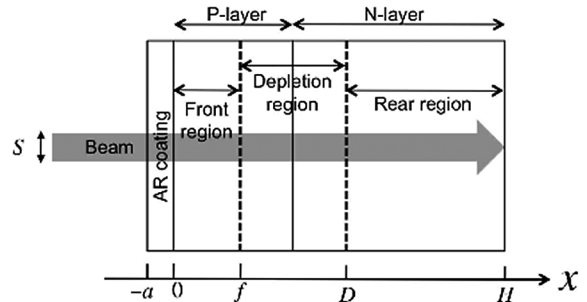


図12 フォトダイオードの断面図

パーリニアリティは波長や入射パワーに依存し、時として、この大きさは数%に及びフォトダイオードによって大きさが異なることも報告されている²⁰⁾。

4.2.2 スーパーリニアリティの定式化と今後の課題

応答直線性校正の波長広帯域化のニーズは以下の通りである。光ファイバ通信では、WDM技術における1.2-1.7 μmの波長帯域で1 pW-1 Wのパワー範囲に対して応答直線性の校正が求められている。光メモリの分野では、Blu-ray用レーザーにおいて波長400-420 nm

でパワー数 mW から数百 mW 超の応答直線性の校正が求められている。以上の様なニーズに応えるため、数十 nm の範囲内の波長すべてに対してパワー・応答直線性の校正を一括して供給することが求められる。このような所望の波長範囲において、網羅的に光パワーメータの直線性校正を行うことも原理的には可能であるが、膨大な波長点に対する応答直線性の校正が必要となり、校正に要する時間とそれに伴う顧客のコスト負担を考慮すると現実的でない。よって、いくつかの少数の校正波長点における応答直線性の校正結果を用いて、必要とされる波長帯域内全ての波長に対して小さな不確かさで（エンドユーザーレベルで 1% 以下）直線性を評価できる様な校正手法の確立が望まれる。そのためには、フォトダイオードの応答非直線性、特にスーパーリニアリティの入射パワーと波長の依存性を定量的に検討すべきである。これまで、スーパーリニアリティを定量的に検証するために、以下に示すような理論的なモデルが構築され実験結果との検証が行われてきた^{20), 22)}。

K. D. Stock は、赤外の波長領域（800–1130 nm）におけるシリコンフォトダイオードの量子効率の波長依存性が、吸収された光子密度 $A'(\lambda, x)$ と非直線性に寄与する再結合中心の捕獲効率 $F(x)$ に依存すると仮定し、以下の式（4-2）に示す様に非直線性 $G(\lambda)$ の定式化を行った²⁰⁾。

$$G(\lambda) = \int_0^H F(x) A'(\lambda, x) dx \quad (4-2)$$

ここで、 λ は波長、 x は図 12 に示す様に光入射方向の軸を表す。800 nm を超える赤外の波長領域の計測に対してシリコンフォトダイオードを用いた場合、図 11 に示す様に吸収係数が小さいため、フロント領域の吸収は無視できるくらい小さく殆どの光子がリア領域で吸収される。リア領域では x が大きくなるにつれて空乏層に到達する少数キャリアの割合が低いことから、再結合中心の捕獲効率は以下の式（4-3）に示す様に二つの定数 A と N を用いて表される。

$$F(x) = 0 \quad x < D$$

$$F(x) = A(x - D)^N \quad D \leq x \leq H \quad (4-3)$$

次に、吸収光子密度 $A'(\lambda, x)$ はシリコンの保護窓の透過率 $\tau(\lambda)$ と反射率 $\rho(\lambda)$ を考慮して、

$$A'(\lambda, x) = [1 - \rho(\lambda)] \tau(\lambda) A(\lambda, x) \quad (4-4)$$

と表される。ところが、全体の層が薄いフォトダイオードでは、赤外の波長域に対してフォトダイオード内で全光子が吸収されず、 $x = H$ と $x = 0$ で反射が生じフォトダイオード内で再度吸収されていくことが予測さ

れる。よって、このフォトダイオード内での反射と吸収を含めると式（4-5）の様に表すことができる。

$$A(\lambda, x) = \alpha \exp(-\alpha x) + \alpha \sum_{n=1}^{\infty} \left[\rho_1^n \rho_2^{n-1} \{ \exp(-\rho_1^n (2nH - x)) \} + \rho_2 \{ \exp(-\alpha(2nH + x)) \} \right] \quad (4-5)$$

ここで、 α はシリコンの吸収係数、 ρ_1 は $x = H$ での反射率、 ρ_2 は $x = 0$ での反射率であり波長依存性を有する。以上の様なモデル式を用いた非直線性の波長依存性と光子数 $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ をシリコンフォトダイオードに入射した場合の非直線性の波長依存性を実測した結果を比較した。その結果、波長 1050 nm までは $N = 1.5$ の時に実験結果と良く一致するが、波長 1050 nm 以上では実験と理論に違いが生じることが分かった。この原因として、半導体-電極と半導体-窓材の様な接合面では荷電粒子が多いため局所的に光子の吸収が起こりやすいことや再結合密度が局所的に上昇することが考えられている。

K. D. Stock のモデル式では入射パワーに対する依存性は含まれておらず、非直線性自体がパワーによってどのような波長依存性をもつかまでは分からない。2005 年、A. Ferrero らは発生する光電流の解析を基にシリコンフォトダイオードの内部量子効率に関するモデルを構築し、その過程においてスーパーリニアリティの定式化を行った²²⁾。まず、空乏層で吸収された光子は全て光電流に寄与すること、空乏層外で生成された電子-正孔対は空間電荷層に拡散した分のみ光電流に寄与することの二つを仮定した。そして、フロント層、リア層、空乏層で吸収され発生する光電流の和 i と全光子が空乏層で吸収され発生する電流 i_ϕ を用いて内部量子効率 η_i を以下の式（4-6）で表した。

$$\eta_i = \frac{i}{i_\phi} \quad (4-6)$$

ここで、モデルの簡略化のためフロント領域を 0 とすると、 i は空乏層領域で吸収され発生する光電流 i_A とリア領域で吸収され発生する光電流 i_B の和で表すことができる。フォトダイオード中の光子数は電子-正孔対の発生率密度 G_0 に置き換えることができ、以下の式（4-7）の様にフォトダイオードの中を指数関数的に減衰する。

$$G(x) = G_0 \exp(-\alpha_a a) \exp(-\alpha x) \quad (4-7)$$

ここで、 α_a は図 12 で示す反射防止膜の吸収係数、 a は反射防止膜の厚さ、 α はシリコンの吸収係数である。ま

ず、空乏層で吸収され発生する光電流 i_A は、

$$i_A = qS \int_0^D G(x) dx = \frac{qSG_0 \exp(-\alpha_a a)}{\alpha} [1 - e^{-\alpha D}] \quad (4-8)$$

となる。ここで、 q は素電荷、 S は入射ビームの直径を表す。次に、リア領域で吸収され発生する光電流 i_B を求める。リア領域を n 型半導体とすると、発生した電子-正孔対の少数キャリア（ホール）は空乏層へ拡散し光電流に寄与するキャリアと、拡散中に再結合中心に捕獲されるキャリアがある。この時の少数キャリアの輸送方程式は、

$$\frac{\partial p_n(x)}{\partial x} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G(x) - U(x) \quad (4-9)$$

となる。ここで、 $U(x)$ はリア領域での再結合レート、 D_p はホールの拡散係数、 p_n は n 層でのホール濃度である。また、キャリアは低ドープの場合を仮定し電界によるドリフト項は無視している。定常状態では、式 (4-9) の左辺が 0 なので、 i_B を式 (4-10) で表すことができる。

$$i_B = qS \left\{ \frac{G_0 \exp(-\alpha_a a)}{\alpha} (e^{-\alpha D} - e^{-\alpha H}) - \int_D^H U(x) dx \right\} \quad (4-10)$$

再結合に関しては、以下の式 (4-11) に示す様に Hall-Read-Shockley の再結合中心モデル^{23), 24)}を用いる。

$$U = \sigma v_{th} N_t \frac{np - n_i^2}{n + p + 2n_i^2 \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{k_B T}\right)} \quad (4-11)$$

ここで、 σ は捕獲断面積、 v_{th} は室温でのキャリアの熱速度、 N_t は半導体中の再結合中心の濃度、 n は電子の濃度、 p はホールの濃度、 n_i は真性キャリアの濃度、 E_i は真性フェルミレベル、 E_t は再結合中心のエネルギーレベル、 k_B はボルツマン定数、 T は温度を表す。この式 (4-11) を式 (4-10) に代入して積分を計算し、式 (4-8) を用いて光電流の和 i を計算すると

$$i = \exp(-\alpha_a a) \left\{ i_\phi (1 - \delta_{out}) - i_\phi \frac{\delta}{2} \left[1 + \frac{1}{\Xi i_\phi} \ln \left(1 + \frac{\Xi i_\phi}{1 + \frac{\Xi i_\phi \delta_{out}}{\delta}} \right) \right] \right\} \quad (4-12)$$

となる。ここで、

$$i_\phi \equiv \int_0^\infty qSG_0 \exp(-\alpha x) dx = \frac{qSG_0}{\alpha} \quad (4-13)$$

とおき、量子効率が 1 の時に発生する電流を表す。また、 Ξ と δ は

$$\Xi \equiv \frac{2\tau_p \alpha \exp(-\alpha_a a)}{qN_d} \frac{\delta}{S} \quad (4-14)$$

$$\delta \equiv e^{-\alpha D} - e^{-\alpha H} \quad (4-15)$$

である。ここで、 τ_p はホールの寿命、 N_d はドナー密度である。さらに、

$$\delta_{out} \equiv e^{-\alpha H} \quad (4-16)$$

とおき、吸収されなかった光の割合を表す。以上の様に、空間電荷領域とリア領域で吸収され発生する光電流について定式化を行ったが、実際にはフロント領域で吸収され発生する光電流成分も存在する。よって、リア領域での電流と同様にフロント領域での電流を考慮し、式 (4-6) と式 (4-12) を用いて量子効率を定式化すると、

$$\eta_i = \exp(-\alpha_a a) \left\{ 1 - \delta_{out} - \frac{\delta_r}{2} \left[1 + \frac{1}{\Xi_f i_\phi} \ln \left(1 + \frac{\Xi_f i_\phi}{1 + \frac{\Xi_f i_\phi \delta_{out}}{\delta_r}} \right) \right] - \frac{\delta_f}{2} \left[1 + \frac{1}{\Xi_f i_\phi} \ln \left(1 + \frac{\Xi_f i_\phi}{1 + \frac{\Xi_f i_\phi (1 - \delta_f)}{\delta_f}} \right) \right] \right\} \quad (4-17)$$

となる。ここで、

$$\delta_f \equiv 1 - e^{-\alpha F} \quad (4-18)$$

$$\delta_r \equiv e^{-\alpha D} - e^{-\alpha H} \quad (4-19)$$

であり、フロント層とリア層での光の吸収割合を表す。また、一般的な内部量子効率は、式 (2-1)、式 (2-2)、式 (2-3) を用いて以下の式 (4-20) で表すことができる。

$$\eta_i = \frac{hc}{qn\lambda} \left(\frac{i}{P} \right) \frac{1}{1 - \rho(\lambda)} \quad (4-20)$$

式 (4-6) と式 (4-20) を用いると i_ϕ は

$$i_\phi = \frac{qn}{hc} (1 - \rho) \lambda P \quad (4-21)$$

で表される。以上の様に、式 (4-17) 中の $\Xi_f i_\phi$ と $\Xi_r i_\phi$ は、入射パワー、ビーム径、ドナー密度や寿命などのパラメータの関数となる。ここで、式 (4-17) 中における非直線性成分を

$$-\frac{\delta_r}{2\Xi_j i_\phi} \ln \left(1 + \frac{\Xi_j i_\phi}{1 + \frac{\Xi_j i_\phi \delta_{out}}{\delta_r}} \right) - \frac{\delta_f}{2\Xi_j i_\phi} \ln \left(1 + \frac{\Xi_j i_\phi}{1 + \frac{\Xi_j i_\phi (1 - \delta_f)}{\delta_f}} \right) \equiv NL$$

(4-22)

とおき, N_d に 10^{15} cm^{-3} , D に $120 \text{ }\mu\text{m}$, H に $300 \text{ }\mu\text{m}$, f に $1 \text{ }\mu\text{m}$, τ_p に 10^{-4} s , a に 30 nm を代入し, λ を 630 nm と 850 nm とした時の NL のパワー依存性を図 13 に示す. 図 13 から入射ビームのパワー P の増加に伴い単調に増加する関数となり, 結果的に内部量子効率を上昇させる. つまり, 式 (4-22) がスーパーリニアリティを表す式となり, 波長, 入射レーザーのパワー, レーザービーム径に依存することが分かる.

近年, NMIJ の K. Amemiya らは, ある InGaAs フォトダイオードに対して, このスーパーリニアリティのモデル式と実験データの比較を行い, 良い一致を示す可能性があると報告している²⁵⁾. ところが, その後の検討の結果, フォトダイオードによっては A. Ferrero らのモデルが適応できないことや Hall-Read-Shockley の再結合中心モデルで傾向を説明できないことが新たに確認されている²⁶⁾. この原因としては, 低ドープを仮定したモデルであるため式 (4-9) において内部電界によるドリフト項が無いと仮定していることや表面再結合の効果が含まれていないことが考えられる. よって, 現在のフォトダイオードの特性を定量的に説明するには, 理論モデルの修正が必要であると考えられる.

以上をまとめると, フォトダイオードのスーパーリニアリティの波長依存性に関して, 実験結果との比較により理論モデルの妥当性の検証が行われているが, 現段階では十分に検証されていない. このスーパーリニアリティの波長依存性に関する理論の妥当性が検証できれば, 一点または少数の波長点における直線性校正結果を元にして内外挿的に波長帯域を拡張できる. 今後, 更に実験データを蓄積し, かつ, 理論モデルの修正を行い技

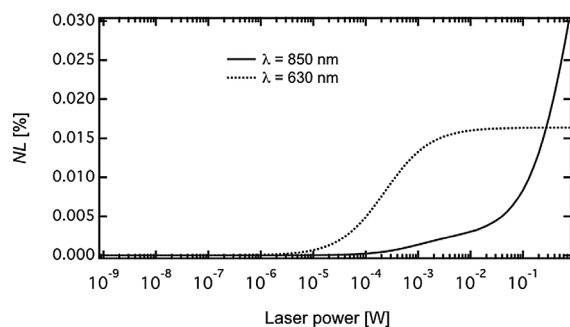


図 13 スーパーリニアリティの波長依存性の例

術的な解決策を探ることが必要である.

5. 海外の光ファイバ系標準に関する動向

5.1 海外標準研究所に関する調査の重要性

前章まで, 国内におけるレーザーパワー関連標準のトレーサビリティ体系や校正サービス, および, 近年の社会的ニーズに対応するための技術的課題やその解決法について述べたが, 本章では海外における動向について概説する. 国家間の同等性が保証された標準の供給には, 海外研究所間での国際比較が必要で, NMIJ が果たすべき重要な役割の1つである. よって, 世界の標準研究所の供給サービスを知り, 世界の標準研究所の中での NMIJ の位置づけを確認することが重要である. また, レーザーパワー標準の中でも光ファイバに関する標準は, 国家間の光通信の互換性・同等性を確保するためには必要不可欠である. 本章では, 特に光ファイバ系標準に関する最新の国際動向に関する調査結果について述べる.

5.2 各国標準研究所のトレーサビリティ体系

5.2.1 米国標準研究所のトレーサビリティ体系

米国の標準研究所 (National Institute of Standards and Technology: NIST) では, 一次標準器として極低温放射計を用い, 1 mW (半導体レーザーの出力) で不確かさ 0.01% を達成している. この極低温放射計を用い, 波長 $633, 1319, 1559 \text{ nm}$ で焦電型検出器 (Electrically calibrated pyroelectric radiometer: ECPR) に値を移している. 焦電素子には LiTa_3 を用いており, レーザー照射表面に厚さ約 1 mm の金黒コーティングを蒸着し吸収率 99% を保っている. 連続光のレーザーパワーを計測する時は, チョッパーを挿入して 15 Hz 間隔で同期検波する. この ECPR を実用標準器に用い, 波長 $600-1600 \text{ nm}$, $10 \text{ }\mu\text{W}-1 \text{ mW}$ のパワーレベルで 0.16% の不確かさを達成している. 校正の例として, この実用標準器を用いて Si, Ge, InGaAs のフォトダイオードに $0.28-0.41 \%$ の不確かさでサービスを実施している²⁷⁾. 図 14 (a) にトレーサビリティ体系図を示す. 応答直線性の校正サービスは重畳法を用いており, 波長 $980, 1480 \text{ nm}$ において $1 \text{ mW}-1 \text{ W}$ の範囲で $0.07-0.16 \%$, 波長 $850, 980, 1300, 1480, 1550 \text{ nm}$ において $1 \text{ pW}-1 \text{ mW}$ の範囲で 0.1% の不確かさとなっている. 光ファイバパワー・直線性以外の標準として, 波長, 波長分散, 偏光モード分散, ファイバの幾何学形状の校正サービスを実施している. その他, NIST 特有の校正サービスとしてはレーザービーム径がある.

5.2.2 英国標準研究所のトレーサビリティ体系

英国の標準研究所 (National Physical Laboratory: NPL) では、NISTと同様に極低温放射計を一次標準器 (不確かさ 0.005%) として、Si トラップ検出器に値 (不確かさ 0.01%) を移し、次に、サーモパイル検出器に値を移すトレーサビリティの体系となっている。サーモパイル検出器の吸収体の光パワーの吸収率は波長によらず一定で、パワー校正の不確かさ 0.1% である。校正の例として、このサーモパイル検出器を実用標準器に用いてフォトダイオードに 0.7% の不確かさでサービスを実施している (Laser Focus World Jan 2005 参照)。図 14 (b) にトレーサビリティ体系図を示す。応答直線性は、波長 850, 980 nm と 1270–1650 nm の領域において 1 pW–30 mW を重畳法 (不確かさ 0.05%)、同波長領域において 10 mW–100 mW と 1 pW–10 mW を比較法 (不確かさ 0.3%) によって校正を行っている。光ファイバパワー・応答直線性以外の標準では、波長分散、波長、シングルモードファイバのカットオフ波長、ファイバの屈折率、ファイバの長さ等の幾何学形状、偏光モード分散、光パルス試験器 (Optical Time Domain Reflectometer: OTDR)、光ファイバの開口、光スペクトラムアナライザー等、広範囲にわたって校正サービスを行っており、各国標準研究所の中でも光ファイバ系の標準に対して非常に力を入れている。

5.2.3 ドイツの標準研究所のトレーサビリティ体系

ドイツの標準研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt: PTB) でも、NIST や NPL と同様に極低温放射計を一次標準器 (波長 632.8 nm, パワー 0.6 mW で不確かさ 0.005%) としている。そして、同波長で Si トラップ検出器に不確かさ 0.01% で値を移し、サーモパイル検出器に値付けされる。このサーモパイル検出器を実用標準器に用いており、波長 632.8–1650 nm, パワー 3 μW–30 mW で不確かさ 0.15% を

達成している。図 14 (c) にトレーサビリティ体系図を示す。2006 年の報告によると、波長 1260–1360 nm と 1460–1620 nm, パワー 0.4 mW において極低温放射計を用いて不確かさ 0.014–0.042% を達成し、その値を Ge, InGaAs トラップ検出器に値を移し、トラップ検出器を実用標準器としたトレーサビリティの構築を計画している²⁸⁾。応答直線性の校正は 1 pW のパワーまでサービスを実施している。

5.3 海外標準研究所の校正・測定能力と NMIJ との比較

5.3.1 国際比較の状況

光ファイバ関連量について、これまでにいくつかの国際比較が実施されている。1992 年に結果が公表された CCPR-K2. PREV (1992) (光ファイバパワー, 1300 nm, 1550 nm, 3 μW–100 μW, 13 か国参加, 幹事国: 米国)²⁹⁾ には、NMIJ (当時、電子技術総合研究所: Electrotechnical Laboratory) も参加し、不確かさの範囲内で良い一致が確認された。その後、NMIJ は NIST との二国間比較を積極的に行ってきたおり、光ファイバパワー (1304 nm, 1546 nm, 100 μW)³⁰⁾、光パワーメータ直線性 (1310 nm, 1550 nm, 1 nW–1 mW)³¹⁾、ならびに、ハイパワー用光パワーメータ直線性 (1480 nm, 1480 nm, 1 mW–500 mW)³²⁾ について、不確かさの範囲内で良い一致が確認された。このうち、光ファイバパワー (1304 nm, 1546 nm, 100 μW) に関しては NIST が各国標準研究所と二国間比較を多く実施しているため、NIST を参照機関として他の標準研究所 (6 機関) とも値の相関が確認できており³³⁾、参加全機関にわたって不確かさの範囲内での良い一致が見られた。また、2010 年 12 月現在、進行中の国際比較としては APMP-PR. S2 (光ファイバパワー, 1310 nm, 1550 nm, 1 μW, 10 μW, 100 μW, 8 か国参加, 幹事国: 韓国) と APMP-PR. S4 (光ファイバパワー, 直線性, 1550 nm, 1 mW–250 mW, 3 か国参加, 幹事国: 日本) があり、いずれも仲介器の巡回がすでに終了している。

5.3.2 海外標準研究所の校正能力

各国の標準研究所の校正能力を示す CMC (Calibration Measurement Capability) リストが、国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures: BIPM) の基幹比較データベース (Key Comparison Database: KCDB) Appendix C に掲載されている。表 6 に Photometry and Radiometry 領域 Fibre optics における各国標準研究所の光ファイバパワー応答度に関する

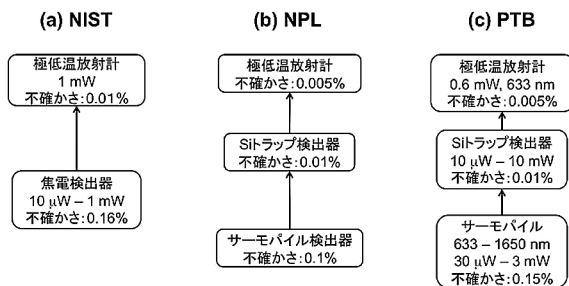


図 14 (a)NIST, (b)NPL, (c)PTB のトレーサビリティ体系図

CMC 登録リストを示す。多くの機関が通信波長帯(850, 1310, 1550 nm)において、nW レベルから mW レベルのパワーに関して CMC 登録している。光パワーメータの応答直線性 (Linearity) については NMJ のみしか CMC 登録していないが、その他の標準研究所では nW

のパワーレベルに対して絶対パワー測定後に直線性で校正し、最終的に2つの不確かさを合成した結果を表記しているものと思われる。第5.2節で述べた NIST, NPL の様に光ファイバ増幅器用光源の波長帯 (980, 1480 nm) に対応可能な機関や、連続波長帯域において CMC

表 6 BIPM の基幹比較データベースの光ファイバパワー応答度 CMC 登録リスト

機関名	国名	波長	パワー範囲	不確かさ(k=2)
NMIJ	Japan	1550 nm	50 μ W – 1 mW	0.35 %
		1550 nm	1 nW – 1mW (Linearity)	0.01 – 0.1 %
NMIA	Australia	670 – 1560 nm	10 μ W – 1 mW	1.6 %
NIM	China	850, 1310, 1550 nm	1 nW – 1 mW	3 %
DFM	Denmark	800 – 1600 nm	50 μ W – 1 mW	0.75 %
MIKES	Finland	1310, 1550 nm	1 nW – 1 mW	1.2 – 2 %
		1550 nm	1 mW – 200 mW	1.5 %
LNE	France	850 nm		1.6 %
		1310 nm		1.7 %
		1550 nm		1.8 %
PTB	Germany	650, 850, 1300, 1550 nm	1 nW – 3 mW	0.3 – 0.6 %
INRIM	Italy	850 nm	10 μ W – 1 mW	2.0 %
KRIS	Korea	1310, 1550 nm	100 nW – 3 mW	0.6 %
		1310, 1550 nm	10 nW – 100 nW	0.7 %
NML-SIRIM	Malaysia	1310, 1550 nm		2 %
CENAM	Mexico	850, 1300, 1550 nm	18 mW – 100 mW	1.2 %
VSL	Netherlands	850, 1300, 1550 nm	< 1 mW	3 %
A*STAR	Singapore	850 \pm 25 nm, 1310 \pm 20 nm, 1550 \pm 20 nm	1 μ W – 1mW	1.2 %
NMISA	South Africa	600 – 1800 nm	1 mW – 10 mW	1.5 %
IFA-CSIC	Spain	800 – 1600 nm	20 μ W – 1 mW	1.5 %
SP	Sweden	850, 1300, 1550 nm	5 μ W – 1 mW	1 – 2 %
METAS	Switzerland	850, 1310 nm	5 μ W, 100 μ W	1.1 %
NPL	UK	850, 1300, 1480 – 1570 nm		1.0 %
NIST	USA	670, 780, 840 – 860 nm, 980, 1270 – 1330 nm, 1480, 1510 – 1560 nm	0.1 mW	0.5 %

登録している機関も見られる。その他、CMCに登録されている光ファイバ関連の標準項目としては、通信帯の波長、光スペクトラムアナライザの波長軸、波長分散などがあり、NIST、スイスの標準研究所 METAS、スペインの標準研究所 IFA-CSIC 等が積極的に CMC 登録を行っている。

5.3.3 海外標準研究所と NMIJ の比較

表6の CMC 申請をみると、NMIJ はパワー範囲や不確かさでは他の標準研究所にひけを取らない。現在、NMIJ では、波長 1310 nm で 1 pW-1 mW、波長 1550 nm で 1 pW-1 mW と 1 mW-1 W、波長 852 nm で 50 μW-1 mW の光ファイバパワーメータの応答度の CMC 登録を申請中であり、各国標準研究所のサービス範囲に肩を並べるようになってきた。また、図 14 に示す様に主要な海外標準研究所では、極低温放射計を基準にして値を移した実用標準器を用いて被校正器物の校正を行うのに対して、NMIJ の常温型カロリメータを直接用いて被検出器の校正を行っており、その測定不確かさは各国標準研究所と比較して全く引けをとっていない。

一方、広帯域な波長に対する光ファイバパワーや応答直線性の校正では、第 5.2 節で述べた様に NIST や NPL が 0.1 % 以下の不確かさで校正サービスを実施し世界をリードしている。これら海外標準研究所の校正方法は、所望の光源の波長一点ごとに光パワーメータの直線性校正を行う手法であり、第 4.2 節で述べた様な光パワーメータの応答直線性校正の波長広帯域化までは進んでいない。よって、NMIJ が世界の標準研究所では実施されていないこの校正手法の確立を先導して行うべき意義は大きいと考えられる。

5.4 光ファイバ標準に関連する近年の動向

2010年7月に CCPR (Consultative Committee for Photometry and Radiometry) 会合の一環として開催された Fiber Discussion Group "Fiber Optics" で取り上げられた今後検討すべき標準項目として、光ファイバの波長分散、波長減衰特性、偏波モード分散、後方散乱係数、マルチモードファイバのモード分散、光パワーメータの応答度、直線性、光源のパルス幅、光パルス試験器 (OTDR) の長さ軸、減衰量、反射率、光スペクトラムアナライザの波長軸、パワー軸、コネクタの入力ロス、反射ロスなどが取り上げられた。特に、光パルス試験器の長さ軸の校正項目は、韓国の標準研究所 (KRISS) を幹事機関として、アジア太平洋計量計画 (Asia Pacific Metrology Programme: APMP) 主催で 2011年6月まで

に国際比較を開始する予定である。

6. 総括

本稿では、近年の産業界の動向・要望の概要と、光パワーメータの波長依存性を考慮したレーザパワー標準の研究の意義、現在のレーザパワー標準の供給体制や校正技術について概説し、現在の供給体制における技術的課題について検討した。併せて、海外標準研究所の標準供給体制や近年の海外の動向について述べ、我が国におけるレーザパワーや光減衰量 (応答直線性) の標準が、海外の標準研究所とパワー範囲、不確かさ、その校正手法などの点において同レベルにあることを確認した。加えて、これら産業界や海外の標準研究所の研究動向から、光パワーメータの応答直線性校正の波長広帯域化を NMIJ が先んじて行う意義の大きさを明らかにした。この技術は、今後検討すべき標準量目 (波長分散、光スペクトラムアナライザのパワー軸、OTDR 等) の校正手法の確立にも大きく貢献できる可能性が高い。

今後もレーザの利用分野は拡大し、上記の様な CW 光に対する標準だけでなく、半導体レーザのパルス光等の変調光に対する標準をはじめとする未供給の標準への需要増加が見込まれる。引き続き、世界のレーザ標準に関する動向、産業界の技術動向、計測標準に対する需要の調査を行いつつ、新たな標準技術の整備と確立にむけて検討を行う必要がある。

謝辞

本調査研究を行うあたり、産業技術総合研究所計測標準研究部門光放射計測科の座間達也科長、同科レーザ標準研究室の市野善朗室長、両宮邦昭研究員ほかレーザ標準研究室の皆様には懇切な御指導・御助言を賜りました。ここに深く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) T. H. Maiman: Simulated optical radiation in ruby, *Nature* 187 (1960) 493-494
- 2) M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki, and H. Kubota, "Erbium-doped fiber amplifier and its application to non-linear optics," *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1171 (1989) 328-345
- 3) Y. Enya, Y. Yoshizumi, T. Kyono, K. Akita, M. Ueno, M. Adachi, T. Sumitomo, S. Tokuyama, T. Ikegami, K.

- Katayama, and T. Nakamura: 531nm Green Lasing of InGaN Based Laser Diodes on Semi-Polar {2021} Free-Standing GaN Substrates, *Appl. Phys. Express* 2 (2009) 082101-1-3
- 4) T. Inoue, I. Yokoshima and A. Hiraide: Highly Sensitive Calorimeter for Microwatt-Level Laser Power Measurements, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* IM-36 (1987) 623-626
 - 5) Y. Suzuki, A. Murata, M. Araragi and T. Inoue: Calorimeter with Compensative Absorber for Measuring Microwatt Level Optical Power, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 40 (1991) 219-221
 - 6) Y. Suzuki, N. Chida, A. Murata and T. Inoue: A Calorimeter for Optical Fiber Power Standard and Advantages in Calibration of Optical Fiber Power Meters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 42 (1993) 430-433
 - 7) J. E. Martin and N. P. Fox and P. J. Key: A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements, *Metrologia* 21 (1985) 147-156
 - 8) K. D. Stock and H. Hofer: Present State of the PTB Primary Standard for Radiant Power Based on Cryogenic Radiometry, *Metrologia* 30 (1993) 291-296
 - 9) T. R. Gentile, J. M. Houston, J. E. Hardis, C. L. Cromer, and A. C. Parr: National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer, *Appl. Opt.*, 35 (1996) 1056-1068
 - 10) R. Goebel, R. Pello, R. Köhler, P. Haycocks and N. Fox: Comparison of the BIPM cryogenic radiometer with a mechanically cooled cryogenic radiometer from the NPL, *Metrologia* 33 (1996) 177-179
 - 11) R. Goebel, R. Pello, K. D. Stock and H. Hofer: Direct comparison of cryogenic radiometers from the BIPM and the PTB, *Metrologia* 34 (1997) 257-259
 - 12) E. F. Zalewski and C. R. Duda: Silicon photodiode device with 100% external quantum efficiency, *Appl. Opt.*, 18 (1983) 2867-2873
 - 13) Y. Ichino, T. Saito, and I. Saito: Optical Trap Detector with Large Acceptance Angle, *J. Light & Vis. Env.* 32 (2008) 25-31
 - 14) N. P. Fox: Trap detector and their properties, *Metrologia* 28 (1991) 197-202
 - 15) T. Kūbarsepp, P. Kärhä, and E. Ikonen: Characterization of a polarization-independent transmission trap detector, *Appl. Opt.* 36 (1997) 2807-2812
 - 16) K. D. Stock and R. Heine: Spectral characterization of InGaAs trap detectors and photodiodes used as transfer standards, *Metrologia* 37 (2000) 449-452
 - 17) K. D. Stock, R. Heine and H. Hofer: Spectral characterization of Ge trap detectors and photodiodes used as transfer standards, *Metrologia* 40 (2003) S163-S166
 - 18) 向井誠二, 井上武海: 増分減衰量法による光減衰量標準-広ダイナミックレンジ光パワーメータ応答直線性校正システム-, 電子情報通信学会技術研究報告 103 (2003) 71-74
 - 19) A. S. Schaefer, E. F. Zalewski, and J. Geist: Silicon detector nonlinearity and related effects, *Appl. Opt.* 22 (1983) 1232-1236
 - 20) K. D. Stock: Si-photodiode spectral nonlinearity in the infrared, *Appl. Opt.* 25 (1986) 830-832
 - 21) L. P. Boivin: Automated absolute and relative spectral linearity measurements on photovoltaic detectors *Metrologia*, 30 (1993) 355-360.
 - 22) A. Ferrero, J. Campos, A. Pons, and A. Corrons: New model for the internal quantum efficiency of photodiodes based on photocurrent analysis, *Appl. Opt.* 44 (2005) 208-216
 - 23) R. N. Hall: Electron-hole recombination in germanium, *Phys. Rev.* 87 (1952) 387
 - 24) W. Shockley and W. T. Read: Statistics of the recombination of holes and electrons: *Phys. Rev.* 87, (1952) 835-842
 - 25) K. Amemiya, S. Mukai, D. Fukuda, and T. Zama: Wavelength Dependence of Nonlinearity of Optical Fiber Power Meters, *IET Optoelectronics* (in press)
 - 26) 兩宮邦招, 田辺稔, 福田大治, 沼田孝之, 座間達也: フォトダイオード応答非直線性要因の理論的・実験的検証, 応用物理学会2010春期講演会
 - 27) I. Vayshenker, X. Li, D. J. Livigni, T. R. Scott, and C. L. Cromer: NIST MEASUREMENT SERVICES: Optical Fiber Power Meter Calibrations at NIST, *NIST Special Publication* 250-54
 - 28) M. López, H. Hofer, and S. Kück: High accuracy measurement of the absolute spectral responsivity of Ge and InGaAs trap detectors by direct calibration against an electrically calibrated cryogenic radiometer in the near-infrared, *Metrologia* 43 (2006) 508-514
 - 29) J. L. Gardner, R. L. Gallawa, K. D. Stock, and D. H. Nettleton: International intercomparison of detector responsivity at 1300 and 1550 nm, *Appl. Opt.* 31 (1992) 7226-7231

- 30) I. Vayshenker, J. H. Lehman, D. J. Livigni, X. Li, K. Amemiya, D. Fukuda, S. Mukai, S. Kimura, M. Endo, J. Morel, and A. Gambon: Trilateral optical powermeter comparison between NIST, NMIJ/AIST, and METAS, *Appl. Opt.* 46 (2007) 643-647
- 31) S. Mukai, K. Amemiya, M. Endo, I. Vayshenker, X. Li, and S. Yang: Bilateral optical fiber powermeter linearity comparison between NMIJ and NIST, *Digest of Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2008)* (National Institute of Standards and Technology, Broomfield, June. 2008) 178-179.
- 32) I. Vayshenker, S. Yang, K. Amemiya, S. Mukai, and T. Zama: Optical high-power nonlinearity comparison between the National Institute of Standards and Technology and the National Metrology Institute of Japan at 1480 nm, *Appl. Opt.* 49 (2010) 32-36
- 33) I. Vayshenker, D. J. Livigni, X. Li, and J. H. Lehman: International comparisons of optical fiber power measurements, *Proceedings of NEWRAD 2008 (NEWRAD Scientific Committee, Daejeon, Oct. 2008)* 303-304