

超高圧水銀ランプの電極温度測定システムの構築

植月 唯夫* 辻林 貴司**

Study on the measurement system to evaluate the electrode temperature in super-high-pressure mercury lamps

Tadao UETSUKI and Takashi TUJIBAYASHI

Thoriated tungsten ($\text{ThO}_2\text{-W}$) is popularly used for the electrodes in super-high pressure mercury lamps (SHPs) used in semi-conductor processing. However, $\text{ThO}_2\text{-W}$ is not desirable for the global environment because of its radioactivity. Therefore it would be very valuable to make a new non-radioactive material to replace $\text{ThO}_2\text{-W}$ as the electrode, and many research efforts have been attempted for this purpose. However, the materials which were researched till now could not improve upon $\text{ThO}_2\text{-W}$ lifetime when they were used as the electrode in the lamps. To evaluate the lamp life the electrode temperature and its distribution are very important, because the lamp life has the close relations with them. However to measure the electrode temperature of a SHP is very difficult because of its plasma radiation. We report the new optical method to evaluate the tungsten electrode temperature of SHP.

Key words: Super-high pressure mercury lamp, Thoriated tungsten, Radioactivity, Electrode temperature

1. 緒 言

半導体製造の一工程のフォトリソグラフィには超高圧水銀ランプが使用されている(図1参照)。



図1 超高圧水銀ランプの外管

このランプは数 mm の電極間距離に数 A~数十 A の電流を流す必要があり、電極性能がランプの性能・信頼性に大きな影響を及ぼす。現在このランプに使用されている電極材料はトリエーテッドタングステンであるが、この材料は微量ではあるが放射性を有している。そのためにそれに代替されるべき電極の創出が望まれている。これまでに数

多くの研究がなされてきた^{1)~4)}が未だにトリエーテッドタングステンに代替できる電極材料は創出されていない。津山高専ではこの課題に対して、電極材料だけでなく電極の粒界形状に着目して研究を行っている。この研究を進める上で、電極温度や電極温度の分布を把握することは非常に重要である。電極温度は、高すぎると蒸発が激しくなり、寿命に大きな影響を及ぼす。また温度分布は、ランプの性能を左右するプラズマの広がり把握するのに非常に重要である。フォトリソグラフィではこのランプからの紫外線放射を集光して利用しており、プラズマが広がると集光効率が悪くなり性能が悪くなるためである。我々は、ランプ点灯中の電極温度・温度分布を測定するために、スペクトル測定から温度を求める計測システムの構築を行ったので報告する。本報告の構成であるが、2節で物体の温度と物体から放射されるスペクトルの関係についての基礎知識を整理し、3節で現在利用されている測定方法の紹介、およびその測定方法により点灯中の超高圧水銀ランプの電極温度を測定することの難しさを述べる。そして4節でその困難さを克服して構築した測定方法とその結果を5節で考察を述べ、最後に6節でまとめを行う。

2. 温度計測に関する基礎知識

原稿受付 平成 23 年 8 月 31

*電気電子工学科

**電気電子工学科 5 年

物体はその温度に応じた光(電磁波)を放射する。物体が黒体である場合、その光の分光放射輝度(波長 λ での単位波長幅あたり、単位立体角あたり、単位投影面積あたりの放射束) $L(\lambda, T)$ と熱力学的温度 T との関係を表したものがプランクの放射則であり次式で与えられる⁵⁾。

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

$L(\lambda, T)$; 分光放射輝度($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)

λ ; 物体から発散する放射の波長(m)

T ; 物体の絶対温度(K)

$C_1 = 2\pi^5 c^2 h / 15 = 3.75140 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$

$C_2 = hc/k = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$

c ; 真空中の光の速度($c = 3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

h ; プランク定数($h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

k ; ボルツマン定数($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)

この $L(\lambda, T)$ と λ の関係を図 2 に示す。黒体以外の物質からの分光放射輝度はその物質固有の分光放射率 $\varepsilon(\lambda)$ をこの $L(\lambda, T)$ に掛けた値となる。

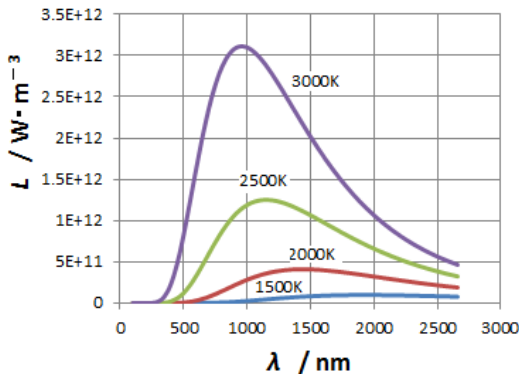


図2 黒体からの分光放射輝度(理論値)

3. 一般的測定方法およびその問題点

まず、一般の赤外温度放射計に用いられる原理を説明する。式(1)において波長 λ が数100nmと小さいとき、 $\exp(C_2/\lambda T) \gg 1$ という関係が成立するため、次式(2)に変形できる。

$$L(\lambda, T) = \frac{2C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} \quad (2)$$

実際には、分光放射輝度はスペクトル強度として測定できる。それを $M(\lambda, T)$ とすると、次式(3)で示される。

$$M(\lambda, T) = A \frac{\varepsilon(\lambda)}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} \quad (3)$$

ここで A は分光スペクトル測定器の感度などを考慮した定数であり、 $\varepsilon(\lambda)$ は物体の分光放射率であ

る。スペクトル λ_1 、 λ_2 での分光スペクトル強度(測定値)を M_1 、 M_2 とするとそれらは以下の関係式で示される。

$$M_1(\lambda_1, T) = A \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\lambda_1^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_1 T}\right)} \quad (4)$$

$$M_2(\lambda_2, T) = A \frac{\varepsilon(\lambda_2)}{\lambda_2^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2 T}\right)} \quad (5)$$

式(4),(5)より次式(6)が得られる。

$$\frac{M_1(\lambda_1, T)}{M_2(\lambda_2, T)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)} \frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \frac{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2 T}\right)}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_1 T}\right)} \quad (6)$$

ここで λ_1 、 λ_2 を近い値にとると $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$ が成り立つ。したがって、式(6)を変形させることで温度 T を次式のように求めることができる。

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{M_1(\lambda_1, T)}{M_2(\lambda_2, T)} - \ln \left(\frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \right)} \quad (7)$$

実際に電極からのスペクトルを測定し、式(7)により温度を計算した。測定は図3に示すようにレンズで結像させ、スペクトル測定には大塚電子株式会社のMCPD-3700を使用した。この測定器の仕様を表1に示す。この機器の校正は基準光源のスペクトル測定により行った。

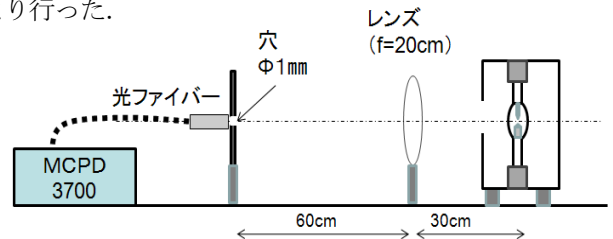


図3 電極からの放射スペクトル測定システム模式図

表1 MCPD-3700の仕様

測定可能波長範囲	320nm~820nm
分光器	ブレードドホログラフィック型 F = 3、f = 135 mm
検出器	電子冷却型 フォトダイオードアレイ 1024ch
1素子あたりの波長幅	0.6nm/素子
オプティカルファイバー	石英製ファイバー、口金径φ12nm、長さ約1m
スキャン時間	16msec ~ 20sec

温度を計測したスペクトル強度を図 4 に示す。測定したランプは純粋なタングステン電極で作成されたもので 200 時間点灯したものを使用した。図 4 のスペクトル波形は図 2 の連続スペクトルに強烈な輝線スペクトルが加わったものになっている。この輝線スペクトルはプラズマ中の水銀からのスペクトルであると考え、その影響のない場所（図中の λ_1 , λ_2 の 2 点）での強度から式(7)を用いて温度を計算した。この測定を図 5 に示す先端から 1.5 mm 毎に 5 点について行い、電極上の温度分布を求めた。その結果を図 6 に示す。

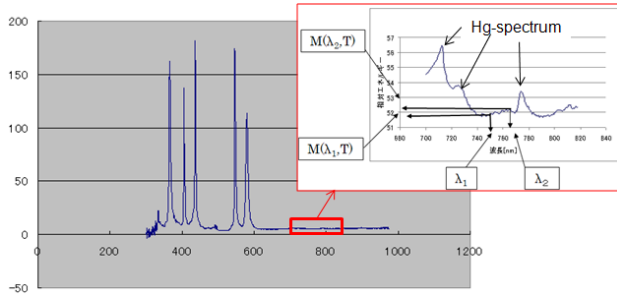


図 4 超高圧水銀ランプからの放射スペクトル

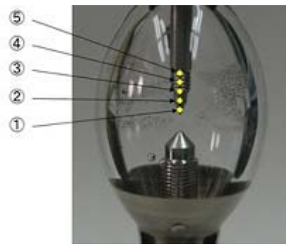


図 5 電極温度の分布を把握するための測定点

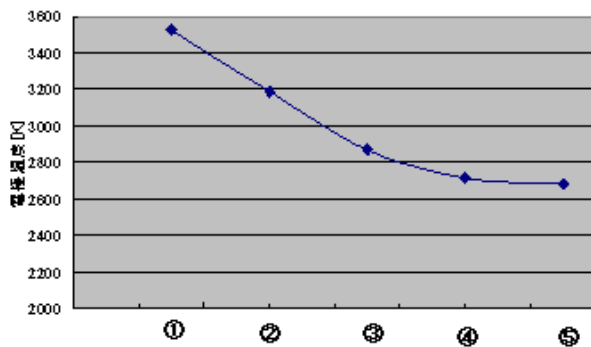


図 6 従来の測定方法で測定した電極温度分布

図 6 では先端温度がタングステンの融点近くになっており、かつ電極の根元付近でも 2700 K を示している。この温度は一般常識から考えて高温すぎる。このように高温になった原因は水銀スペクトルを除去することができなかったためと考えた。そこで水銀スペクトルを除去して正確な温度測定をするための測定システムを構築する必要性を生じた。

4. 新測定システムの構築

4. 1. 電極部分の観察結果

ランプから放出される水銀スペクトルを除去することは非常に困難であるため、ランプを消灯してからの測定が可能かどうかを調査した。使用している分光器 MCPD-3700 (大塚電子株式会社製) のデータ測定スピードが約 20ms であることから、ランプの消灯時の電極部分の赤熱状態がどう変化するかを知るために市販品のランプ (図 5 の W 電極ランプとは異なる) をスピードカメラで撮影した。その結果を図 7 に示す。

この図からランプ消灯後も数 10ms の間は十分に赤熱していることが確認できた。したがって、MCPD-3700 で消灯前後のスペクトルデータを測定することにした。

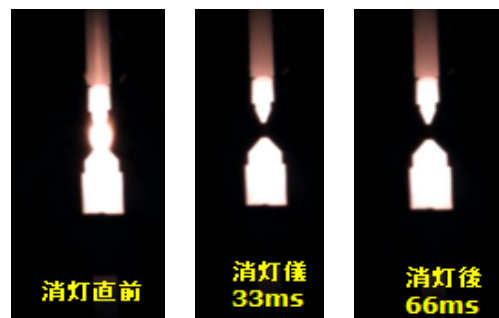


図 7 超高圧水銀ランプの消灯前後の様子

4. 2. 分光器での測定結果

図 8 にスペクトル測定結果を示す。この結果から、消灯後は水銀スペクトルが除去でき、かつ温度放射による放射スペクトルが観察できているのが確認できる。

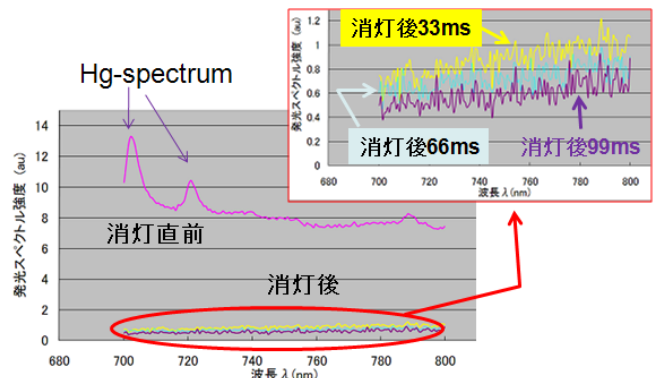


図 8 超高圧水銀ランプ消灯前後の電極からの放射スペクトル

ここで、スペクトル測定の時間が数 10ms と非常に短いためホワイトノイズが非常に大きい。そのため 2 節で述べた 2 点のスペクトル強度から求める計算方法は誤差が大きいため、以下のようにして求めた。式(3)を変形すると次式(8)のようになる。

$$\log_e \left(\lambda^5 M(\lambda, T) \right) = \log_e \left(A \varepsilon(\lambda) \right) - \frac{C_2}{T \lambda} \quad (8)$$

式(8)の左辺は測定値から求めることができる。その左辺の値を縦軸にとり、横軸 $1/\lambda$ としてグラフ

化すると、式(8)は直線となり、その傾きを α とすると、次式(9)より電極温度 T が求まる。

$$\alpha = \frac{C_2}{T} \quad \therefore T = \frac{C_2}{\alpha} \quad (9)$$

4. 3. 電極温度の時間的な変化

図8の測定結果を式(8)に基づいてグラフ化したものを図9に示す。図9の直線の傾きから温度を求めた結果を表1に示す。

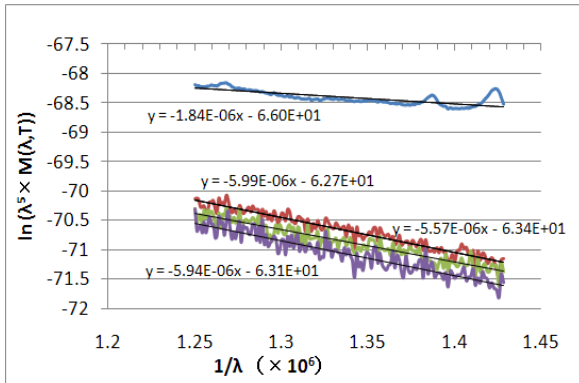


図9 プランクの放射則に基づいて計算したデータ

表2 タングステン電極先端温度の時間変化

測定時間	点灯中	消灯後 33ms	消灯後 66ms	消灯後 99ms
電極温度 (K)	7819	2402	2583	2422

表2の結果から、点灯中は水銀スペクトルの影響で電極温度が正確に測れないこと、消灯後の約100ms間はさほど電極温度の低下がないこと、の2つのことが確認できる。表2において、消灯後の3つの温度のばらつきは、ホワイトノイズによる測定誤差だと考えている。

4. 4. 放射率の影響について

3節で述べたようにタングステンは放射率を有している。3節では2つの波長(λ_1 , λ_2)を近い値に取れば放射率はほぼ一定であると考えることができた。4.2節と4.3節での結果も放射率を一定とみなして行った。しかし、ここで使用した温度測定方法は、700~800nmの広い波長領域を使用しており、この広い領域では放射率が一定ではない。

タングステンの放射率に関してはJ.C.De Vosがタングステンリボンについて報告している⁶⁾。(図10参照)。それを用いて図9、表2の消灯後の電極温度を補正した結果を図11、表3に示す。

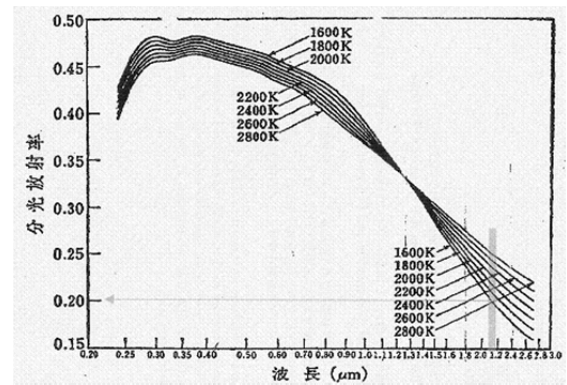


図10 タングステンリボンの放射率

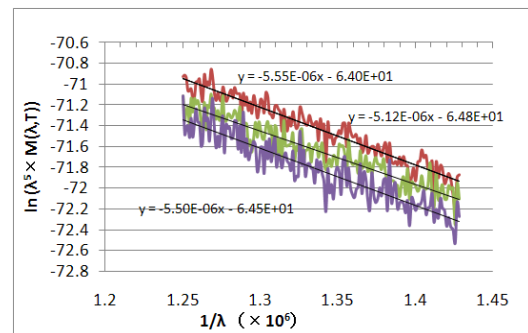


図11 放射率を考慮して計算したデータ

表3 放射率補正後のタングステン電極先端温度の時間変化

測定時間	消灯後 33ms	消灯後 66ms	消灯後 99ms
電極温度(K)	2592	2810	2616

5. 測定結果と考察

5. 1. 電極温度分布測定結果

4節で述べた測定方法で求めた結果を図12に示す。図12に示した値は、消灯後33ms, 66ms, 99ms時点で求めた温度を平均した値である。

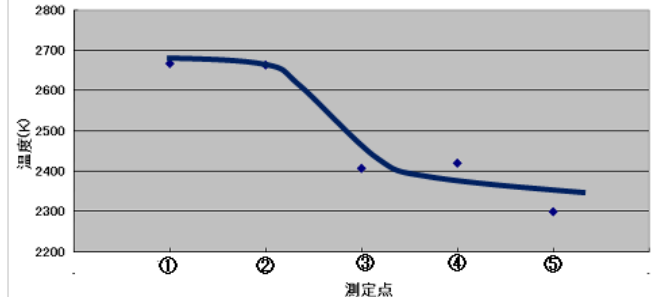


図12 提案した測定方法で得られた電極温度分布(放射率補正済)

この図から先端付近の2点は温度がさほど変化せず、先端から離れた3点目で急に温度が低下しているように見える。その原因を考察するために、陰極を拡大した写真を図13に示す。(a)はランプが新品時の陰極写真であり、(b)は200時間点灯時の陰極写真である。この図より、200時間時点の陰極

先端が放電によりかなり丸くなっているのがわかる．電極先端部分（図 13 中①，②部分，各測定位置の間隔は 1.5mm）の電極温度差が小さかったのは，プラズマがかなり広がっているのが原因だと考えている．残念なことに新品時の測定ができていない，かつ特別仕様のランプで新品ランプが手元にないために比較ができない．今後，陰極先端形状とプラズマの状態（広がり方）を観察して確認していく予定である．

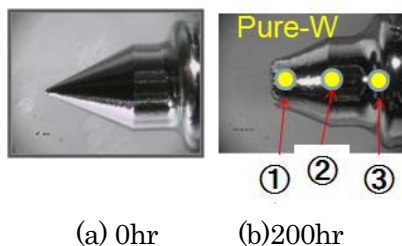


図 13 初期と 200 時間点灯時の陰極形状

6. ま と め

本研究で，超高压水銀ランプの新電極の開発のために必要な電極温度測定方法について検討した結果を述べる．電極温度を非接触で測定する方法として最も一般的なのは，Plank の放射則に基づき 2 つの波長に対する分光輝度を求め，それから計算する方法である．この方法は，光学的に薄い空間中で輝線スペクトルを含まない場合には非常に有効であるが，本研究対象としているようなプラズマ密度の濃い放電空間中では正しい温度を測定することは困難であった．本研究では，ランプ消灯直後の電極からの温度放射スペクトルを測定す

ることで，プラズマからの放射の影響を除去し，測定する方法を確立した．ただし，この測定には高速（約 20ms）で広範囲のスペクトル測定が可能な分光器が必要であり，MCPD-3700（大塚電子株式会社製）を使用した．点灯中（プラズマ密度が濃い状態）で，従来の測定方法では正しい値が測れないこと，我々が考えた方法では妥当な値が測定できることを確認した．

謝辞

本研究にとって欠かすことのできない MCPD-3700 という高価な設備をお貸しいただいた大塚電子株式会社に心から御礼を申し上げる．

参考文献

- 1) F.Matsuda et al., "Role and Behaviors of Rare Earth Metal Oxides During the Operation of Tungsten Doped Electrodes", Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 21, No. 2, pp. 75-84, October 1990R
- 2) F.Matsuda et al., "Consumption and "Rim" Formation of Gas Tungsten Arc Cathode", Vol. 6, No. 2, pp. 205-209, 1988
- 3) K.Tanaka et al., "Effect of Additives in Tungsten Electrode", Japan Welding Society, Vol. 13, No. 4, pp. 524-531, 1995
- 4) F.Matsuda et al., "Comparative Study on Fundamental Arc Characteristics with La-, Y- Ce-Oxide Tungsten Electrode", Vol. 6, No. 2, pp. 199-204, 1988
- 5) 深尾保ほか：改訂電気応用 I，コロナ社（2005）3-5
- 6) J.C.DeVos, "A NEW DETERMINATION OF THE EMISSIVITY OF TUNGSTEN RIBBON", Physica XX, pp.690-714 (1954)