熱線反射膜利用による白熱電球の省電力化[†]

Irving S. Goldstein*
東 忠利**訳

1. 序 言

白熱電球は光の質、取り扱いの簡便さ、融通性、安全性および多くの既施設などにより、好ましい光源の一つとして生き残っている。白熱電球の唯一の欠点は効率の低さである。効率の低い理由は 図 1 を見れば明白である。

図 1 明所視比視感度曲線(E)と黒体放射の相対分光分布(B)

図 1 の曲線 B は、白熱電球の代表的な色温度である 2700 K の黒体放射の相対分光分布である。曲線 E は明所視の比視感度分布である。これら二つの曲線の重なりが、なぜ白熱電球では入力電力の可視光への変換効率が約 8 % と低いことを示している。黒体放射の大きい部分が目の感度領域に含まれないことから、白熱電球においては省電力化の可能性が大きく残っていることは明白である。基本的な考え方は、可能な限り多くの非可視光線をフィラメントに戻してやることである。そうすればフィラメント温度が高くなるから、フィラメント温度を一定に保つため消費電力を減らすように、フィラメントを再設計する必要がある¹⁾。

この光源の主要長所の一つは簡素なことにあがるが、この

ようなエネルギー節約機構を付加することは、意外に複雑性を増すことになる。このような白熱電球にはランプ形状と熱線反射膜とフィラメントの三つのサブシステムが必要である。ランプ形状には熱線反射膜を付けるガラス容器形状と、それに対応するフィラメント配置がある。熱線反射膜は可視光はランプの外に透過するが、赤外線を反射してフィラメント上に戻す。フィラメントは標準形白熱電球のフィラメントを特殊な条件に合うように設計しなおしたものになる。これらの各サブシステムについて主要なポイントと、それらがどのように関係しあっている最終的なランプ特性が得られるかを論じたい。

2. ランプ形状

全体的なランプ形状は、ランプの省エネルギー能力に大きく影響するだけでなく、熱線反射膜の選択やフィラメント設計にも影響を与える。実際のランプに熱線反射膜を付けるランプ形状としては、慎重な検討に値する形状が 3 種類ある。円筒形、楕円形、放物線形の 3 種類であり、図 2 にこれらを図解する。円筒形状は熱線反射膜の表面が最もフィラメント形状に合致するため、省エネルギーに対して最も可能性をもっている形状である。フィラメントと熱線反射膜が十分長ければ端部効果が小さくなり、省エネルギー率はさらに向上する。この形状の欠点は現在もっとも流通している白熱電球や器具に使われている、標準形の電球に適用させにくいことである。すなわち円筒形状はダブルエンド形ランプとし、比較的長くすることが好ましいが、この形状は、市場規模が比較的小さい高ワットのハロゲン電球にしか応用できないということである。

楕円形状は、標準形の電球やフィラメント形状に最も適用しうる形状である。この熱線反射膜形状は楕円を主軸の

図 2 熱線反射膜付き白熱電球の形状

[†] Energy Efficient Incandescent Light Sources using Heat Mirrors
* Duro-Test Corporation, North Bergen, New Jersey 07047, USA
** 朝東芝総合研究所 Tadatoshi Higashi

図3 楕円形状による熱線反射膜付き白熱電球の形状

まわりに回転した回転楕円体で、直線状フィラメントをその主軸に沿って楕円体の光学中心に配置するものである。この形状のより詳しい構造を 図3 に示す。

最初は球状容器を検討した。しかしフィラメント端部からの放射を集めにくく、また反射した光がフィラメントの中心部にホットスポットをつくるという欠点があった。楕円体容器のほうがフィラメントにとって良好な結像システムになる。図3において、この結像は点線による長方形で示されており、実線で表わした長方形フィラメントの像になっている。フィラメントの先端の像が上下逆になっていることがわかるようにA、Bの印が付けてある。

フィラメント上の点1から代表的な光路を追ってみると、赤外線および可視光線はランプ容器の点2に到達し、そこで熱線反射膜によって分離される。可視光線はランプから出ていくが、赤外線は反射されフィラメント上の点3に帰ってくる。点1と点3は楕円体の二つの焦点の間にある楕円体の光学中心に対して、常に互に対称の位置になっている。点3では放射のほとんどがフィラメントに当たり、フィラメントの放射率に応じて吸収されるか、反射される。点3で反射された放射も、続いて点4で反射されることによって、フィラメントに吸収される機会をもつことになる。点3でフィラメントの間隙や、光学系の収差のためにフィラメントに出合わなかった放射成分も点5で反射され、点1に向かうことによりフィラメントに当たる可能性がある。フィラメントがうまく中心に位置していれば、この楕円形状は、フィラメントに効率よく再吸収される形状である。

図2に示されている第3の形状は放物面である。これは放物線の断面をもった溝形でもよいし、また回転放物面でもよい。どちらの場合でもフィラメントは放物線の焦点に置かれ、放物面の内表面は全放射を反射するような被覆がなされる。容器前面の平面部分は可視光線を透過し、赤外線を反射して、赤外線がフィラメントに戻るように熱線反射膜が付けられる。この形状はフラッドライティングやスポットライティングのような投光照明への応用には特に適している。

3. 熱線反射膜

このような応用のための理想的な熱線反射膜は、750 nm以下の波長では100%の透過率をもち、750 nm以上の波長では100%の反射率をもっていることであり、図4のAに示されているものである。

図4 白熱電球用各種熱線反射膜の分光反射率

図4の曲線B、C、Dはこの理想的な特性に近似させるために用いたいくつかの手段を示している。一つの手段は全部が誘電体よりなる多層干渉膜である。成分をなす膜は基本的に透明であるため、赤外波長域で反射を起こさせるために干渉を用いている。図4の曲線Cは16層の $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 4分の1波長膜からなる赤外反射膜の特性を示す²⁾。この種の熱線反射膜には長所もあるが短所もある。図4を見るとわかるように、赤外波長域における反射域は比較的狭く、したがって省エネルギーの可能性が限られている。しかしながら、効果を最大にするように反射域の中心波長をずらすことが可能である。この膜の長所の一つは可視光透過率が非常に高いことである。また反射波長域が長波長にあるため比較的厚い膜を必要とし、一般には高内部ひずみが発生し、安定性の問題が生ずるところであるが $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 膜は比較的じょうぶである。各層の厚さが厚く層数が多いため、この熱線反射膜は比較的高価である。

金属-誘電体膜の反射率が比較のため図4に曲線Bとして示されており、より詳しい特性が図5に示されている。この膜は薄い銀(Ag)層の両側を8分の1波長の TiO_2 層ではさんだ構成になっている。この膜の高い赤外線反射率は銀の高い反射率に起因するものである。両側の TiO_2 層は銀に対する反射防止層として働くが、可視域の中心で透過率が最大になるように膜厚を調整してあるため、高い可視光透過率が実現されている。図5はこの関係を表わしたものであり、反射膜の透過率 T と反射率 R の他に銀層だけの透過率も示してある。誘電体層の屈折率が高いほど銀層の可視光透過率を高くすることができ、銀層の膜厚を厚くして高い赤外線反射率を得ることが可能になる(高屈折率を必要とするのは、銀が高い複素屈折率をもっているためである)。しかし TiO_2 より高い屈折率をもった誘電体

図5 銀層だけの透過率(点線)と比較した $\text{TiO}_2\text{-Ag-TiO}_2$ 熱線反射膜の反射率(R)と透過率(T)

は存在しない。 TiO_2 は可視波長域では実用材料として最高の屈折率をもっている。 TiO_2 以外の他の誘電体を用いると、ランプに適用したときの光学特性はかなり低下する。この膜の長所は赤外線反射率が高いことであり、その結果、優れた省エネルギー効果が得られることである。可視光透過率は $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 膜ほど高くはないが80~85%はある。TAT ($\text{TiO}_2\text{-Ag-TiO}_2$) 膜は $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 膜ほど耐熱性がなく、耐食性も劣るが、それでも十分にじょうぶであり、製造コストがずっと安い利点がある。TAT 膜はランプの実効色温度を数100 K高める効果があり、さらに設計を変更すれば、高効率の色付きランプを得るような変形も可能である。

図4には半導体形熱線反射膜の分光反射率も示されている。図に示されている例はすず(Sn)をドーブした酸化インジウム膜の特性である。ドーブ量を変えると高透過率から高反射率へ遷移する波長を移動させることが可能ではあるが、大きな省エネルギー効果が得られるように遷移波長を800 nm というような短波長にもってくることはできない。これをランプに應用して有効な効果が得られるのは多層干渉膜と併用したときであろう。多層干渉膜の反射率が低下しはじめるところが、半導体膜の反射率が増大する波長域になっているからである。しかし、このような組み合わせは複雑さの増大と高コストが欠点となる。

4. フィラメント

一般の白熱電球の場合と同じく、タングステンフィラメントの放射率は、あるフィラメント温度における可視光への変換効率を決定する。さらに、このランプの場合はフィラメントの放射率は、熱線反射膜から帰ってくる赤外線のフィラメントによる吸収を決定するため二重に重要である。図6は二重コイルのタングステンフィラメントが放射率の増大に大きい効果をもっていることを示している。したがって第1コイルと第2コイル(二重コイル)ピッチと直径のデザインがランプの効率に影響する。

熱線反射膜のフィラメントに対する効果のもう一つは、反射赤外線の結果として、入力電力を減少させる必要があ

図6 二重コイルタングステン線と直線タングステン線の分光放射率

ることで、たとえば50%の省電力ランプのデザインは標準100 W ランプとフィラメント温度は同じであっても、電気的には50 W しか消費しないようにデザインする必要がある。すなわち同じ点灯温度のとき、より高抵抗を必要とし、実際のコイルでは直径が小さくて長くなることを意味する。このタイプのフィラメントは、高電圧用フィラメントを巻くことに相当し、製造が難しくなる方向である。電子計算機によるフィラメント設計のプログラムは、熱線反射膜による省エネルギーを考慮していないため入力電力の減少を、透明電球において電圧を増大させても入力には変わらないとした場合に置き変えて処理することになる。短く直径の大きいフィラメント線を使うためには、少ない電力を消費する——たとえば、ダイオードのような電圧低下素子をランプベースに組み込むことが理想である。

熱線反射膜の可視光束透過率が、フィラメントのデザインに与える効果は赤外線の場合に比べて小さい。熱線反射膜の可視光透過率が100%より低い場合に、熱線反射膜付き電球が従来のランプと同じ光束を出すためには、フィラメントへの入力電力を増加することになる。入力電力を増加させる方向のフィラメント設計は簡単である。

フィラメントを短く、フィラメント直径を大きくすることを強調してきた理由は、熱線反射形省エネルギーランプにおいては、次の二つのフィラメントに関する制限を満たす必要があるためである。それは熱線反射膜に対しフィラメントが正しく中心位置にくること、およびフィラメント位置が長期間にわたり安定であることの二つである。熱線反射膜付き電球のフィラメントの位置が正確であることは、ランプの省エネルギーにとってたいせつなことである。もしフィラメントがフィラメント軸に直角な方向にフィラメント径だけ移動したとすると、得られるべき省エネルギーの20%が失われることになる。楕円体のランプ形状ではフィラメントの長さ方向の位置ずれは、フィラメントサポートの不具合(一般的には溶断)を起こす。この考察から明らかなように、フィラメントはランプの寿命期間

中を通じ正しく位置していなければならないため、フィラメントの安定性は重要である。さらにフィラメントは寿命中、まっすぐでなければならない。楕円体形状の場合はフィラメントの注意深い製作と熱処理によって、これらの規準をすべて満たすことが可能である。円筒状の場合はフィラメントサポートを追加する必要がある。

5. 考察と結論

熱線反射膜により省エネルギーをはかる実際の白熱電球では、上記の3要素が絡みあって実際のランプの特性を決めることになる。各要素の総合効果を評価する最も良い方法は、製作された各方式による実際のランプのデータを比較することである。このデータは表1に与えられている。

表1 実際に製作した熱線反射膜付き白熱電球の特性

形状	反射膜	理論省エネルギー限界%	省電力率%	光束透過率	効率増加%
球	TiO ₂ -Ag-TiO ₂	80	55	80	78
楕円	TiO ₂ -Ag-TiO ₂	88	50	80	60
円筒	SiO ₂ -TiO ₂	92	26	95	29

表1のパーセント省電力率は、実際の熱線反射膜付きのランプを、熱線反射膜を付けていない同形式のランプと、同じフィラメント温度で比較したものである。パーセント理論省エネルギー率は、その形状について完全な形と、理想的な熱線反射膜を仮定し、さらにガス損失とリード線による損失を無視して計算した値である。パーセント効率向上は熱線反射膜付きランプの最終効率によるものである。光束透過率は、透明ガラスの透過率を100%としたときの熱線反射膜ガラスの透過率である。球状容器に対するデータは光学研磨した半球を用いたランプに対する値である。楕円体形状容器のデータは商業ベースによるプレス容器、

および製造技術を使ったランプの値であり、100 W 2,500 時間寿命のランプに対応する65 W ランプである。円筒容器のデータは、ゼネラルエレクトリック社が500 W ハロゲン電球の置き換え用として製造している省エネルギー形350 W ハロゲン電球の公表されたデータから採ったものである。

表1で円筒容器のランプについては、理論省エネルギー率と実際のランプの省エネルギー率に大きな隔りがあるが、これは用いられている誘電体干渉膜の赤外反射特性が悪いためである。しかしハロゲン電球の高温容器の外面に直接付けるためには誘電体干渉膜を使わざるを得ない。

プレスによる楕円体容器の省エネルギー率が、光学研磨した球状容器の値に驚くほど近くなっていることは、注目すべきことである。楕円体形状の高い理論省エネルギー率も、この原因の一部となっている。楕円体形状の理論省エネルギー率と実際の省エネルギー率の差の原因は、楕円体形状の不完全さとガス損失、およびリード線損失と熱線反射膜の不完全さなどによる。

結論として、楕円体形状と円筒形状によるランプが商業的価値をもっているように思われる。楕円体形状のランプのほうが、いくらか融通性があり市場性が大きい。どちらのランプも従来のランプに比較して高価にはなるが、白熱電球に革新をもたらすものである。

文 献

(1) Brett, J. et. al.: "Development of high energy-conserving incandescent lamps", Journal of IES 10 (1981) 215~218
(2) Hoegler, L. E. and McGowan, T. K.: "Practical high efficiency tungsten-halogen lamps using IR reflecting films", Journal of IES 13 (1984) 165~174

(受付1986年5月19日)