

高出力UV光学部品用 反射性コーティング作製方法の研究

M・ワイズマン、A・ルー、S・チングク、P・ロッヂ、W・アーノルド、
S・ニーランド、C・トダーロ

複数の組織の光学研究者らによる共同研究で考案された、紫外光学部品を作製するための新しい方法について説明する。アルミニウムでコーティングされたプラスチック製リフレクタに金属中間層を挿入することにより、UV LEDの高出力照射の下で、長期間にわたって安定した動作を継続することができる。

UV LEDの価格低下に伴い、紫外(UV)光源は、材料硬化⁽¹⁾、光線療法⁽²⁾、消毒^{(3)、(4)}といった幅広い用途における多大な可能性を見せている。多くの場合、そのような光源には、狭い放射角やその他所望の配光を形成するための光学素子が必要である。光学素子は、可視光に対しては安価なガラスやシリコ

ンで製造できるが⁽⁵⁾、紫外域の光を透過させるには、よりコストの高い石英ガラスが必要になる(本稿で対象とするのは、180 ~ 400nmの範囲の紫外域である。基本的には、UV-A(315 ~ 400nm)、UV-B(280 ~ 315nm)、そしてUV-C(100 ~ 280nm)のうちの180 ~ 280nmの部分の帯域に相当する)。

より費用対効果が高いのはおそらく、金属被覆表面を使用して光を反射する方法である。約0.2 ~ 0.5μmの薄いアルミニウム(AI)層をプラスチック金型の上に蒸着させることによって、これを作成することができる^{(6)~(9)}。しかし、1W/cm²よりも高い光出力密度が求められる多くの用途において(<http://bit.ly/2LYzjd1>)、そうしたリフレクタは加熱して、表面変形、亀裂、さらには剥離などの損傷を示すようになる。

本稿で紹介する研究では、銅(Cu)とニッケル(Ni)を組み合わせたものなど、厚さ30μm以上の金属中間層を挿入することにより、リフレクタの最大温度を著しく低下させることができ(この実験では、117°Cから51°Cに低下した)、UV LEDの高出力照射を受けるリフレクタの長期的な安定動作を確保できることを実証した。

材料実験

独OSAオプトライト社(OSA Opto Light)は最近、スケーラブルなUV LED光源を開発した。最大120cmの長さにわたって並べて配置できるように設計された、LEDプレートとパラボラリフレクタアレイで構成されている。パラボラリフレクタによって、光は約20°の角度で放射され、各パラボ

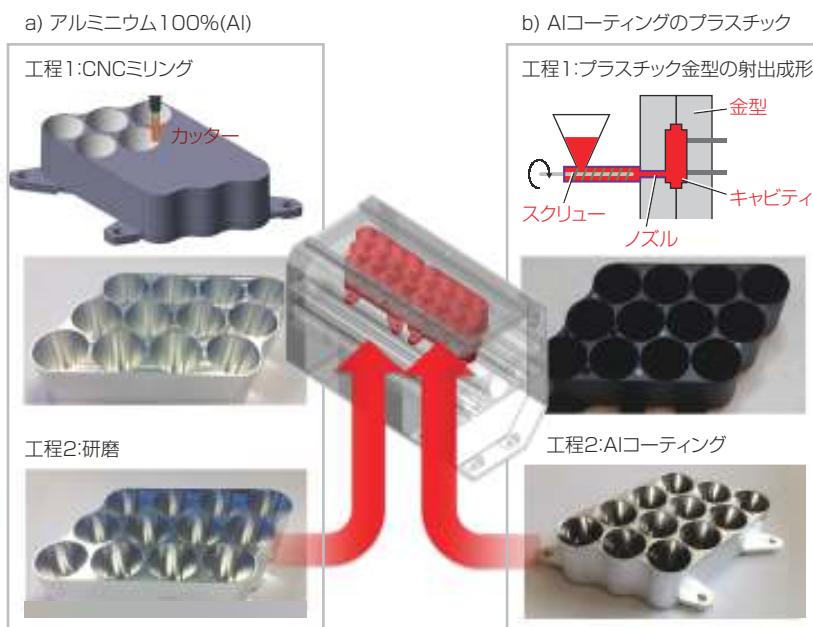


図1 OSAオプトライト社が設計したUV LED光源。(a)では、AI 100%の材料からパラボラリフレクタアレイを作成し、(b)では、プラスチック金型の上に薄いAI層を重ねている(図はすべてOSAオプトライト社提供)。

ラリフレクタの下には1～4個のLEDチップを配置できる。図1の中央に示されているのが、最も短いタイプのモジュールで、両側に示されているのが、Alパラボラリフレクタアレイを作成する方法として試験した、2種類の方法である。左側の方法では、Al100%の材料からコンピュータ数値制御(Computerized Numerical Control:CNC)ミリングによって、リフレクタアレイを作成した後に、表面を研磨している。ミリング後のAl表面は粗いため、研磨の工程が必要である。右側の方法では、プラスチック製のリフレクタ金型の上をAl層でコーティングすることによって、リフレクタアレイを作成している。伊カトッド社(Khatod)が、ポリカーボネート(PC)を使用してプラスチック金型の射出成形を行い、Alコーティングの厚さは約0.2 μmだった。この方法では研磨は不要であるため、製造コストは低く抑えられる。表に、2つの作成方法のメリットとデメリットをまとめて示す。

この研究で作成した金属リフレクタについて、走査電子顕微鏡と焦点光顕微鏡を使ってコーティングの厚さに関する実験を行った。図1に示されているものと同じ2種類のリフレクタアレイを使用し、小さなLEDユニットの中でリフレクタの試験を行った。赤外線(IR)カメラとサーモメーターを使用して、デバイス動作時の温度を調べ、リン化ガリウム(GaP)検出器を使用して、光出力を調べた。

UVリフレクタのシミュレーション

図2は、高出力のUV照射が、プラスチック製リフレクタをコーティングするAl薄膜に与える影響の例を示している。(a)は、1W(365nm)の光を5000時間照射した場合のAl表面の変

表 Al100%のリフレクタと、薄いAlコーティングを施したプラスチック製リフレクタの比較

	Full Al	Al-coated plastic mold
Surface polishing	Polishing required	No polishing required
Production coats	High	Low
Long-term stability	Good	Depending on optical power

表提供:OSAオプトライト社

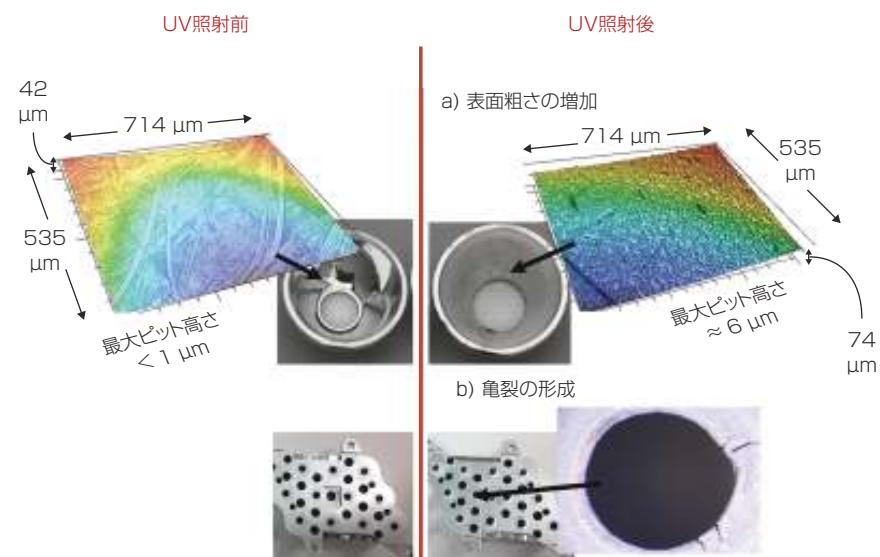


図2 Alコーティングのプラスチック製リフレクタには、(a)表面粗さの増加や(b)亀裂の形成といった、UV照射に起因する劣化現象が見られた。

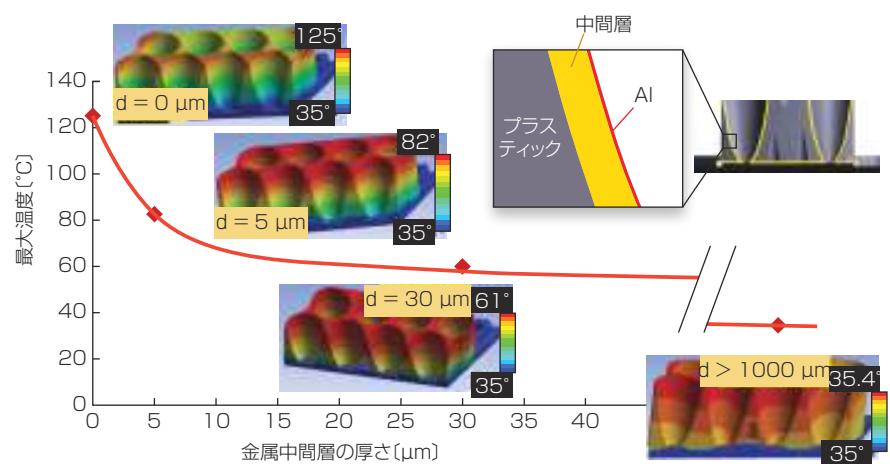


図3 ANSYS 19.1によるシミュレーションで得られた、UV光を照射したパラボラリフレクタアレイの最大温度を、金属中間層の厚さの関数として表したグラフ。右上隅には、薄いAl層の下に挿入された中間層の図が示されている。

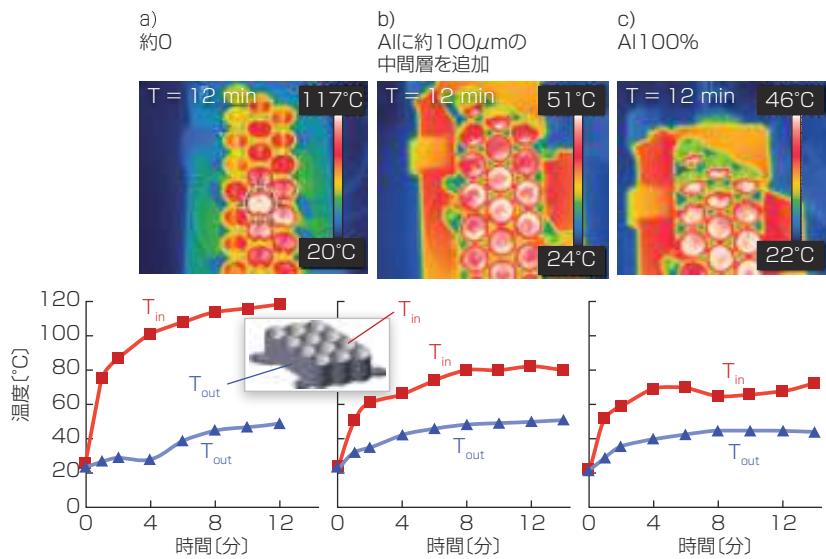


図4 パラボラリフレクタあたり2WのUV光を照射した場合のリフレクタアレイの温度測定結果。a)は、薄いAlコーティングを施したPC製リフレクタ、b)は、薄いAlコーティングに加えて厚さ100μmのCu/Ni中間層を挿入したPC製リフレクタ、c)は、Al100%のリフレクタ。

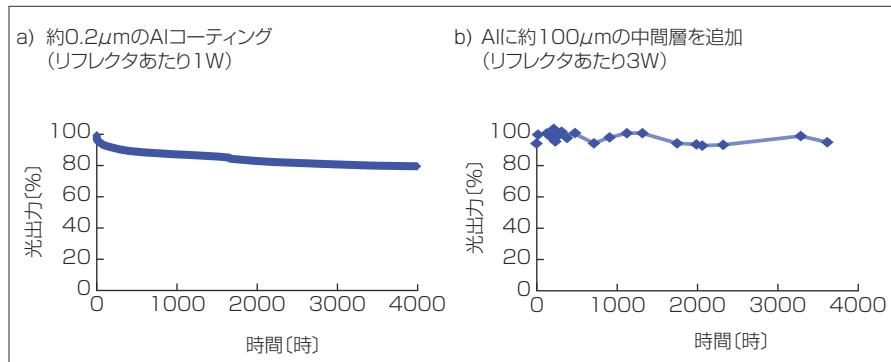


図5 UVリフレクタ材料の寿命を調べるために、光出力と時間の関係を測定した。a)は、パラボラリフレクタあたり1WのUV光を照射した、薄いAl層付きのプラスチック製リフレクタ、b)は、パラボラリフレクタあたり3WのUVを照射した、Cu/Ni中間層とAlコーティング付きのプラスチック製リフレクタ。

形の様子を示している。UV照射前には1μm未満だった最大ピット高さが、UV照射後には約6μmになっており、表面粗さが増している。(b)は、パラボラリフレクタあたり1.5Wの光出力(390nm)で数時間動作させた後に、リフレクタアレイの底面にUV照射による亀裂が生じた様子を示している。

図2に示したAlコーティングのプラスチック製リフレクタの表面粗さと亀裂は、Al層が高温になることに関連している。プラスチックの熱伝導率は低いため(例えればPC10で0.2W/mK)、

熱は主にAl層を介して伝導する。しかし、この層は厚さが0.2μmしかないため、高出力のUV照射の下で、吸収したすべての熱を伝導することができず、100°Cを超える温度に達する可能性がある。しかし、厚みのあるAl層でプラスチック金型をコーティングしようとすると、光学品質が低下する場合が多く、剥離が生じる可能性さえある^{(7), (11)}。本稿の研究では、CuとNiを組み合わせたものや、クロム(Cr)のみでできたものなど、厚みのある金属中間層を挿入する方法を考案した。

プラスチック金型を電気めっきしてから、その上にAlコーティングを施すことによって、これを実現した。

どの程度の厚さの金属中間層であれば、リフレクタの最大温度を効率的に引き下げることができるかを見積るために、ANSYS 19.1プログラムによって有限要素シミュレーションを実行した。図3は、d=0(層なし)、d=5μm、d=30μm、d>1000μm(100%金属製のリフレクタ)の4つの異なる厚さの金属中間層による結果を示している。中間層(黄色で示されている)の図が、図3の右上隅に示されている。各パラボラリフレクタに対するUV光の光出力を1.5W、中間層の熱伝導率を200W/mKとして、シミュレーションを実行した。挿入されているリフレクタアレイの図は、4つのシミュレーションによって得られた温度分布を示しており、グラフは、各シミュレーションで達した最大温度を示している。図3には、厚さ5μmの金属層により、リフレクタ温度を125°Cから82°Cまで(35%)低下できることが示されている。中間層をさらに厚くして30μmにすると、リフレクタ温度は125°Cから60°Cまで(52%)低下し、100%金属製のリフレクタとの差はわずか25°Cとなる。中間層の厚さを30μm以上にしても、飽和に達して、最大温度がそこから大きく低下することはない。図3は、厚さ30μm以上というものが、100%金属製のリフレクタとほぼ等価な、最適な熱伝導特性が得られる、中間層の十分な厚さであることを実証している。

リフレクタの実験結果

この理論的なシミュレーションに基づき、厚さ約100μmのCu/Ni製中間層を挿入したパラボラリフレクタアレイを用意し、中間層を持たないAlコ

ーティングのリフレクタおよびAl100%のリフレクタと比較した。図4は、これら3種類のリフレクタに対し、各パラボラリフレクタの下から波長390nm、出力1.5Wの光を照射した場合の温度測定結果を示したものである。上の画像は、モジュールを12分間動作させた後にIRカメラで撮影した様子で、下のグラフは、LEDモジュール点灯後の時間に伴う温度変化を示している。青線で示された T_{out} は、パラボラアレイ側壁に取り付けられたセンサケーブルの温度で、赤線で示された T_{in} は、パラボラアレイ内部のセンサケーブルの温度である。 T_{in} の温度値は、IRカメラで測定された最大温度よりもやや高いが、それは、センサケーブルがUV照射にさらされていて、光からの直接的な熱を追加で受けるためである。こうした影響はあるものの、中間層ありと中間層なしのリフレクタの間の定量的な違いは、 T_{in} にもはっきりと現れている。IR画像は、中間層なしのリフレクタの最大安定温度が117°Cであるのに対し、中間層ありの場合は51°Cで、Al100%のリフレクタよりも5°C高いだけであることを裏付けている。Cr製の中間層でも、温度の著しい低下が観測されたが、われわれの実験で最も良い結果が得られたのは、CuとNiの組み合わせだった。

Cu/Ni中間層がリフレクタアレイの長期的安定性に与える影響を調べるために、4000時間に及ぶ連続照射試験を実施した。図5(a)は、リフレクタあたり1WのUV(390nm)を照射した場合の中間層なしのパラボラリフレクタからの光出力、(b)は、リフレクタあたり約3WのUV(390nm)を照射した場合の厚さ100μmのCu/Ni中間層を挿入したリフレクタからの光出力を示している。中間層ありのリフレクタ

は、3倍の光出力で照射されているが、±3%の実験誤差範囲内を維持し、光出力の低下はまったく見られなかつた。一方、中間層なしのパラボラリフレクタは、1/3のUV出力で照射されているにもかかわらず、光出力は約20%低下した。

結論

この研究において、Alコーティングのプラスチック製リフレクタに金属中間層を追加することが、優れた熱伝導特性を備えた高出力対応のUVリフレ

クタを実現するための有望な方法であることを実証した。また、有限要素の熱シミュレーションにより、最適な性能を達成するには中間層の厚さを30μm以上にしなければならないことを確認することができた。リフレクタ温度を低下させることで、4000時間にわたる過酷なUV照射の下でも光出力の低下は観測されず、この光学素子が長期間にわたって性能を維持することが示された。この技術的解決策は、次世代の高出力UV光源の実現の円滑化につながると期待される。

謝辞
ドイツ連邦教育研究省により、プログラム「Twenty20 – Partnership for Innovation」の下で提供された、この研究に対する財政的支援に謝意を表したいと思う。

ANSYS 19.1による熱シミュレーションを行ってくれたロルフ・バルダウフ氏(Rolf Baldauf)、一部のリフレクタに対する焦点顕微鏡測定を行ってくれた独PVcomB社のホルガー・レイン氏(Holger Rhein)、そして、この研究開発活動を支援してくれたOSAオプトライト社のチームに心から感謝する。

参考文献

- (1) C. Mendes-Felipe et al., "State-of-the-Art and Future Challenges of UV curable Polymer-Based Smart Materials for Printing Technologies," orig. publ. Adv. Mater. Technol., 4, 1800618 (2019).
- (2) M. Kneissel and J. Rass, III nitride Ultraviolet Emitters: Technology and Applications, Springer, p. 310 (2018).
- (3) S.E. Beck et al., "Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems"; orig. publ. Water Res., 70 (2015).
- (4) Advanced UV for Life Consortium, "UV LEDs for New Applications: Status and Perspectives 2018."
- (5) C. Todaro, Khatod presentation, "Development and Production of Secondary Optics in LSR."
- (6) S.M. Muralidhar et al., "Studies on Nanostructure Aluminium Thin Film Coatings Deposited using DC magnetron Sputtering Process," orig. publ. IOP Conference Series: Mater. Sci. and Eng., 149, 012071 (2016).
- (7) L. Robert and S.K. Obwoya, "The Effect of Thickness of Aluminium Films on Optical Reflectance," J. Ceramics, Article ID 213635 (2015).
- (8) H. Hukkanen, International Patent, "A Light Guide System," WO2014/188066A1.
- (9) J.R. Householder et al., US Patent, "Reflective Variable Spot Size Lighting System," US 2012/0140478 A1.
- (10) X. Zhang et al., "Measurements of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Polymer Melts with the Short-Hot-Wire Method," orig. publ. Int'l. J. Thermophys., 23, 1077–1090 (2002).
- (11) P. Quintana, A.I. Oliva, O. Ceh, and J.E. Corona, "Thickness effects on aluminum thin films," orig. publ. Superficies y vacío, 9, 280–282 (1999).

著者紹介

M・ワイズマン(M. WEIZMAN)、A・ルー(A. RUH) S・チンクエ(S. CINQUE)、P・ロッヂ(P. ROTSCH)、W・アーノルド(W. ARNOLD)は、独OSAオプトライト社(OSA Opto Light GmbH, <https://www.osa-opto.com/>)所属。S・ニーランド(S. NIELAND)は独CiSマイクロセンサ研究所(CiS Research Institute for Microsensors, <https://www.cismst.de>)、C・トダーロ(C. TODARO)は伊カトッド社(Khatod (<https://www.khatod.com/>)所属。