

ランプ加熱方式高速熱処理装置のモデリング・シミュレーション

Modeling & Simulations of The Lamp Heating-type Rapid Thermal Processor

服部 昌 M. HATTORI

The RTP (Rapid Thermal Processor) is a single-wafer thermal processing apparatus used in the semiconductor field featuring high temperature ramp rates and fast processing. In recent years, the use of materials and processes in research and development applications under processing conditions not originally anticipated is expanding. To meet these needs, we worked on modeling, simulation and experimental analysis of heating phenomena by halogen lamps, optical properties of materials and thermal balance inside the furnace. Through these efforts, we clarified the points for carrying out highly accurate thermal processing performance under a broader range of conditions. In this paper, we describe the modeling and simulation of RTP, and the verification of the actual device.

Key Words: RTP, lamp annealing, silicon wafer, heat treatment

1. はじめに

半導体用の熱処理装置を装置形態で分類すると Furnace と RTP (Rapid Thermal Processor) に大別される¹⁾。Furnace は、バッチ式で安定した雰囲気の中で長時間にわたる均一な熱処理に用いられ、RTP はランプアニールとも呼ばれ、枚葉式で高速昇温・短時間加熱に用いられる。RTP は半導体の製造工程において、極めて薄い酸化膜形成やイオン注入後のアニール、メタルシリサイドのコンタクト形成などに用いられてきた¹⁾が、一方ではシリコン以外の材料やプロセスの研究開発用に用いられることも多い。特に近年、太陽電池の電極焼成における多段加熱のように数段階の温度における一定時間保持や高温での長時間温度保持のような RTP の本来の用途とは異なる使い方をすることが増え、手軽で多用途に使える研究開発用途に特化した RTP のニーズが増加してきた。そこで、RTP の装置開発に生かせる実用的なモデリングという観点から、物理定数の検証や同定、加熱メカニズムや放射温度計計測の特性などの解析を進め、得られた結果をランプ出力 24kW、150mm 角の加熱領域を持つ卓上 RTP 「DTL-6」²⁾ の開発へと展開した。

本報では、RTP の代表的な加熱対象であるシリコンウェハ (Si ウェハ) を対象に、ここで実施した RTP の

モデリング・シミュレーションと DTL-6 による実機検証について述べる。

2. RTP の基本構造

RTP の基本的な構造を図 1 に示す。熱源にはハロゲンランプ (ランプ) が放出する近赤外光を利用する。加熱対象である Si ウェハは石英製プロセスチューブ (石英チューブ) の中に配置され、光源と石英チューブは水冷機構を持つアルミニウム製のハウジング (ハウジング) によって囲まれている。ウェハ温度は石英チューブの開口部に配置された光学フィルタを通して放射温度計によって測定を行う。また、ハウジング内にはランプ表面とハウジングの冷却のため N_2 ガスを流している。

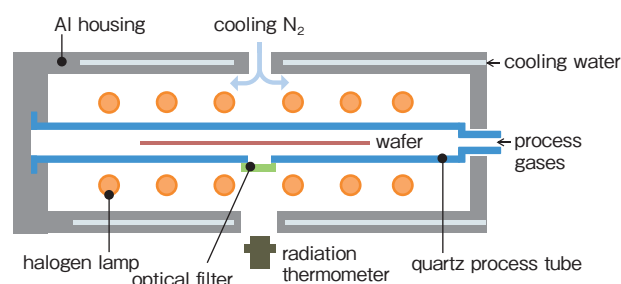


図 1 RTP の基本構造
RTP basic structure

3. ランプ加熱プロセスにおける基本事項

3.1 Si ウェハ加熱の基礎方程式

Si ウェハの加熱における熱収支を図2に示す。温度 T_w のSi ウェハは $\epsilon_w \sigma T_w^4$ の熱を放出し、周囲空間が放射するエネルギーに自身の放射率を乗じたエネルギーを吸収すると考える。熱収支は放射が支配的であるため、ここでは、まず対流や熱伝導は無視するものとし、一般化するために、単位面積当たりの物理量を扱うものとする。

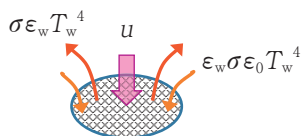


図2 Siウェハ加熱の熱収支
Heat balance on a silicon wafer

ウェハ加熱に関する基礎方程式は(1)式で表される。

$$C_w \frac{dT_w}{dt} = u - \sigma (\epsilon_w T_w^4 - \epsilon_w \epsilon_0 T_0^4) \quad (1)$$

ただし、

u : ウェハの加熱に寄与する有効照射エネルギー密度 [W/cm²]

C_w : ウェハの単位面積当たりの熱容量 [J/K]

T_w : Si ウェハの温度 [K], T_0 : 周囲温度 [K]

ϵ_w : Si ウェハの放射率, ϵ_0 : 周囲の放射率

σ : Stefan-Boltzmann 定数 [= 5.68 × 10⁻¹² W/cm²]

ここで、室温での熱平衡状態 ($T_w^4 = \epsilon_0 T_0^4$) で、ランプを点灯した時点を考えて(1)式は

$$u = C_w \frac{dT_w}{dt} \quad (2)$$

となり、所望する昇温速度を与えれば加熱に必要なランプのエネルギー密度を求めることができる。この値を u_m とすれば、 u_m から、ウェハの最高到達温度 T_{wm} [K] の目安を得ることができる。

すなわち、(1)式で $dT_w/dt = 0$ とおくと

$$T_{wm} = \left[\frac{u_m}{\epsilon_w \sigma} + \epsilon_0 T_0^4 \right]^{1/4} \quad (3)$$

T_w^4 に対し T_0^4 を無視すれば、

$$T_{wm} \sim (u_m / \epsilon_w \sigma)^{1/4} \text{ [K]} \quad (4)$$

(2), (4)式より、例えば、φ150 SEMI 規格 Si ウェハ ($t=0.675\text{mm}$, $C_w=0.114\text{J/Kcm}^2$, $\epsilon=0.67$) を 100℃ /

秒で昇温させるには、 $u_m=11.4\text{W/cm}^2$ が必要であり、この時、 $T_{wm} \sim 1315\text{K}$ (= 1042℃) である。

このエネルギーで、結晶Si 太陽電池用ウェハ ($t=0.2\text{mm}$, $C_w=0.034\text{J/Kcm}^2$, $\epsilon=0.9$) を加熱すれば、昇温速度は 335℃/秒、到達温度は、 $T_{wm} \sim 1222\text{K}$ (= 949℃) となる。

実際には、周囲温度 T_0^4 の項があるため、最高到達温度は、上記値より高くなる。

このように、装置の基本スペックとなる昇温速度と最高温度は独立に決めることはできない。

3.2 Si ウェハの光吸収・放射の温度・波長依存性

Si ウェハは分光放射率が大きな温度依存性をもつことが知られている³⁾。図3にSi ウェハの分光放射率を示す。Si の放射率は、光学吸収端の 1.1μm 以上の波長域で 600℃ まで大きな温度依存性を示す。放射率は放射温度計での温度計測時に問題にされるが、物質の光吸収において放射率=吸収率であることからSi ウェハ加熱過程を議論するには、この変化を考慮しなければならない。この放射率の変化は図3で各温度に対応する曲線の囲む面積を計算するのが本来であるが、この変化の原因は電子の遷移であると考えられることより Fermi-Dirac の分布関数型に従うと仮定し、式(5)のように置いた。

$$\epsilon(T) = \epsilon_1 + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{1 + \exp\left(\frac{T_2 - T}{B}\right)} \quad (5)$$

ただし、

ϵ_1 : 低温での初期放射率

ϵ_2 : 最終的な放射率

T_2 : 放射率が ϵ_2 となる温度

B : 放射率変化の温度幅を調整するパラメータ

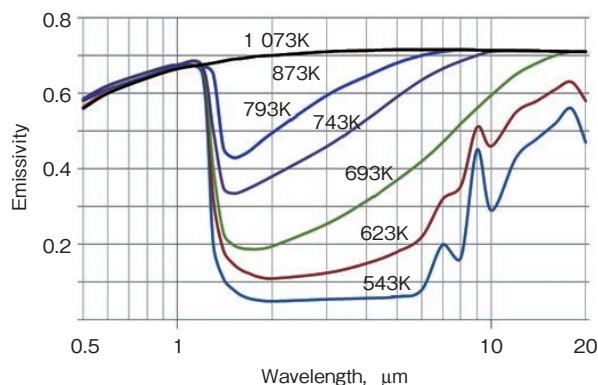


図3 Si ウェハの分光放射率
Spectral emissivity of a silicon wafer

4. RTP の熱系モデリング

4.1 RTP 装置内での熱の相互作用

RTP 装置の中では、ランプにより Si ウェハだけではなく、石英チューブ、ハウジングも加熱され、また、ウェハと石英チューブ、石英チューブとハウジングの間での熱の相互作用も存在する。各部材の熱放射を図4に示す。

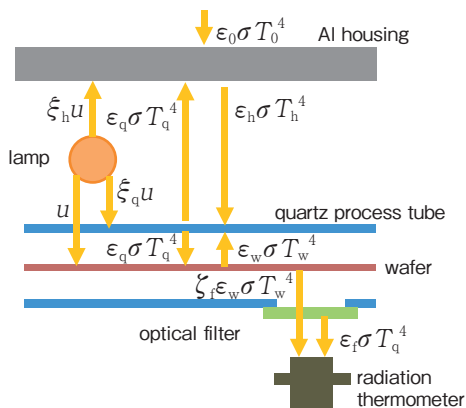


図4 RTP 炉内の熱の相互作用

Interaction of heat radiation within the RTP

これを状態方程式の形にすると(6)式ようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_w \\ T_q \\ T_h \end{bmatrix} = \sigma \begin{bmatrix} -\frac{\epsilon_w}{C_w} & \frac{\epsilon_w \epsilon_q}{C_w} & 0 \\ \frac{\epsilon_q \epsilon_w}{C_q} & -\frac{\epsilon_q}{C_q} & \frac{\epsilon_q \epsilon_h}{C_q} \\ 0 & \frac{\epsilon_h \epsilon_q}{C_h} & -\frac{\epsilon_h}{C_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_w^4 \\ T_q^4 \\ T_h^4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_w} \\ \xi_q \frac{1}{C_q} \\ \xi_h \frac{1}{C_h} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\epsilon_h \sigma \epsilon_0 T_0^4}{C_h} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、

T_q, T_h : 石英チューブ, ハウジング温度 [K]

C_q, C_h : 石英チューブ, ハウジングの単位面積当たりの熱容量 [J/K]

ϵ_q, ϵ_h : 石英チューブ, ハウジングの放射率

ξ_q, ξ_h : ウェハ有効照射エネルギーに対する石英チューブ, ハウジングへの有効照射エネルギー比率

Si ウェハ, 石英チューブ, ハウジングは, それぞれ分光的な吸収特性が異なるため, 厳密にはランプの発光状態からそれぞれへの加熱に寄与するエネルギーを求め

る必要があるが, それを Si ウェハへの入力 u に対する比率 ξ_q, ξ_h で表しモデルの単純化を行った。

4.2 放射温度計が検出する温度

温度は放射エネルギーに変換することにより加減算が可能となる。ハウジングからの熱放射光は放射温度計には直接光として入射しないため, 放射温度計が検出するのはウェハからの放射光と石英チューブに取り付けられた観測窓からの放射光になる。したがって, (6)式の出力として放射温度計が検出する放射エネルギー E_{rad} は(7)式で表され, この合成された放射エネルギーをウェハの放射率で割った(8)式 T_{rad} が観測温度として出力される。

ただし, ここでは, フィルタ温度=石英チューブ温度とした。

$$E_{rad} = \sigma [\zeta_f \epsilon_w \eta_{rad}(T_w) \quad \epsilon_f \eta_{rad}(T_q) \quad 0] \begin{bmatrix} T_w^4 \\ T_q^4 \\ T_h^4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ただし、

ζ_f : 光学フィルタの透過率、

ϵ_f : 光学フィルタの放射率

$\eta_{rad}(T)$: 温度 T における放射温度計の検出波長域の放射エネルギー比率

$$T_{rad} = \left(\frac{E_{rad}}{\epsilon_w} \right)^{1/4} \quad (8)$$

4.3 物理定数の温度依存性

これまでモデリングにおける物理量を定数であるかのように扱ってきたが, 実際には温度依存性を考慮すべきものがあり, それらは計算に利用しやすいように温度に関する多項式で近似を行った。

石英の比熱は, メーカーの技術資料に記載されたグラフ⁴⁾ を読み取り 4 次式近似を行った (これを $c_q(T)$ [J/gK] とする: (6)式の C_q ではなく, 石英の材料としての比熱)。

η_{rad} は, Planck の放射則

$$L(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (9)$$

ただし、

k : Boltzmann 定数 [1.381×10^{-23} J/K],

h : Planck 定数 [6.626×10^{-34} J s],

c : 光速 [2.998×10^8 m/s]

を用い, 温度 T [K] の時の対象とする波長域 $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ の放射エネルギーと全放射エネルギーの比率

表1 温度依存パラメータの多項式近似係数
Polynomial approximation coefficient of temperature dependent parameter

	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
$c_q(\tilde{T})$		-8.45×10^{-1}	3.53	-5.59	4.18	-7.52×10^{-2}
$\eta_{rad}(\tilde{T})$	2.46	-1.20×10	2.23×10	-1.95×10	7.32	-5.90

$$\eta_{rad}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} L(\lambda, T) d\lambda} \quad (10)$$

を計算し多項式近似を行った。

表1に $c_q(\tilde{T})$ 、および、 $\eta_{rad}(\tilde{T})$ を多項式近似した係数を示す。ただし、 $\tilde{T}=T/1\,000$ 、 a_i は多項式を $\sum_{i=0}^n a_i \tilde{T}^i$ と表した時の \tilde{T}^i の係数である。

ξ_q 、 ξ_h は、石英チューブ、ハウジングにランプの発光エネルギーがどの程度供給されるのかについて、可観測量である Si ウェハへの加熱エネルギーを基準として表すために導入した量である。このパラメータ値は、別途行ったハロゲンランプの実験・解析を基に求めた。

ξ_h は、光吸収域がランプの発光スペクトルの短波長側に偏っているため、波長 $1\mu\text{m}$ でのアルミニウム半光沢面の放射率を考慮して $0.05 \sim 0.1$ と見積もった。ハウジングは熱容量が他の部分の 20 倍以上あり、熱伝導が良く、水冷されているため、 ξ_h が変わってもほとんど影響が出ない。

石英はカットオフ波長 $4.5\mu\text{m}$ 以下の光を透過し、それ以上の光を吸収する⁵⁾。ランプはタングステンフィラメントを石英管（バルブ）に封入する構造であるため、カットオフ波長以上の光は出射されず、フィラメント光を吸収して $250 \sim 800^\circ\text{C}$ に上昇したバルブ表面⁶⁾からの熱放射（二次光）が石英チューブを加熱する。 ξ_q の

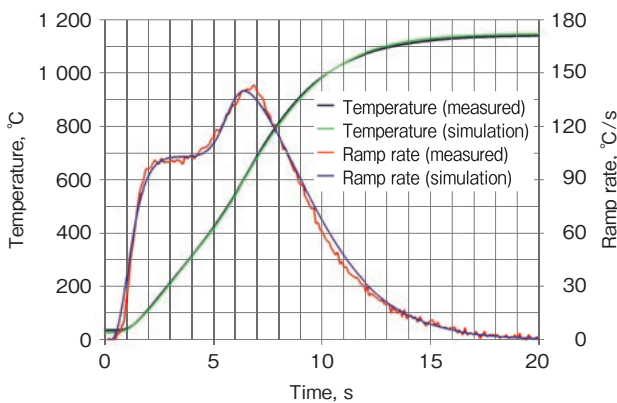
値は、 u の最小出力時は 0.4 を越えるが、ランプの最大出力時は 0.05 に減少するため、この間の直線補間を行った。

5. モデルの検証

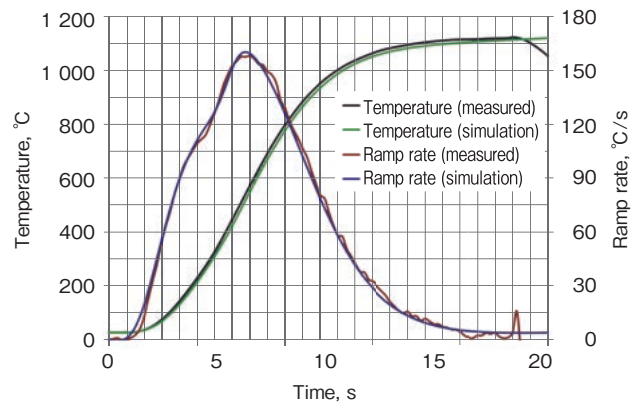
5.1 Si ウェハの昇温過程

DTL-6 を用いランプにフルパワー（ 24kW ）を印加して加熱した結果を、(4)式による放射率の変動を考慮したシミュレーション結果と併せて図5に示す。(1)は $\phi 150\text{SEMI}$ 規格 Si ウェハ、(2)は太陽電池用多結晶 Si ベアウェハである（時間軸と昇温速度のスケールが両者で異なるので注意されたい）。

なお、熱電対はランプ光により発熱し大きな計測誤差が生じるため⁷⁾、熱電対先端を実際のウェハに埋め込み、セラミックボンドで固めた計測用ウェハ（TC ウェハ）により温度計測を行った。昇温速度（Ramp rate）は、温度プロファイルからの計算値である。また、シミュレーションにはオープンソースの数値計算ソフトウェア Scilab を用いた。SEMI ウェハでは $100 \sim 400^\circ\text{C}$ 付近で昇温速度が停留するが、この現象はシミュレーションによっても再現され、放射率の温度依存性により、この温度域で厳密な処理をしたい場合は、注意が必要なこと



(1) $\phi 150\text{SEMI}$ 規格 Si ウェハ ($t=0.675\text{mm}$)
シミュレーション条件
 $\epsilon_1=0.44$, $\epsilon_2=0.71$, $T_2=750$, $B=50$



(2) 太陽電池用多結晶 Si ベアウェハ ($t=0.2\text{mm}$)
シミュレーション条件
 $\epsilon_1=0.84$, $\epsilon_2=0.90$, $T_2=700$, $B=25$

図5 Si ウェハの昇温プロファイルと昇温速度：実測とシミュレーションの比較
Comparison of measured and simulated wafer temperature-increase profile and ramp rate

が分かる。一方、光を極力取り込むように表面に反射防止層がある太陽電池ウェハでは放射率の変化が少なく、この影響はわずかである。

5.2 外乱影響

放射温度計を用い高温で一定時間温度を保持する制御を行うと、制御温度は一定であるにもかかわらず、ウェハの実温は低下する現象がみられる。この様子を図6(1)に示す。図中の control temp. はフィードバック制御に用いている放射温度計の指示値、wafer temp. は TC ウェハの指示値、MV (manupirate value) はランプの電力制御値である。このような現象は RTP が高温で一定の保持時間を要する処理に用いられるようになって問題視されてきた。この現象を(6)~(8)式のモデルを用い T_{rad} をフィードバックする温度制御シミュレーションを行った。図6(2)はその結果である。 T_{rad} は(8)式の値であり、実測の control temp. に相当する。 T_w は(7)式第1項で実測の wafer temp. である。

従来は、この現象に対処するため、TC ウェハを用いて処理を実施。温度低下を測定して、処理レシピ(装置への指令値として与える処理パターン)の補正を行っていたが、このようなシミュレーションで補正量の予測が可能となった。

6. おわりに

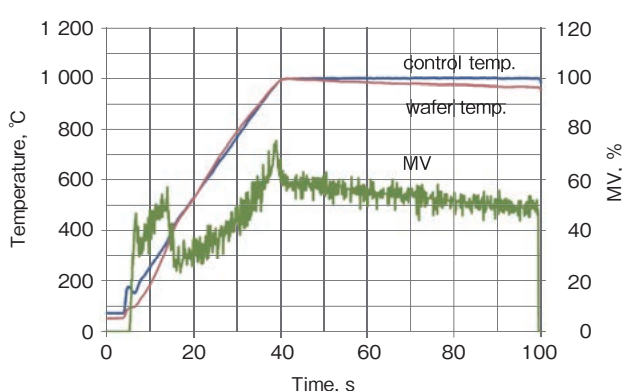
以上のように、Si ウェハの光吸収、RTP 装置内の熱の相互作用、放射温度計への放射光入力、材料や物理量の温度依存性などのモデル化を行い、RTP を「より広い利用範囲で、より厳密な熱処理」に適用するためのシ

ミュレーションを行った。部分的に非常に粗い単純化・近似を行ったが、実際の現象をよく再現していると言える。これら解析結果は、卓上型 RTP 「DTL-6」の開発において、ハード面では仕様実現の必要十分条件が明確になったことによる、装置の高効率化・小型化・低コスト化に直結し、ソフト面では、5項の現象に対処する放射率補間機能など、プロセス実験を補助する諸機能の実装に活用した。

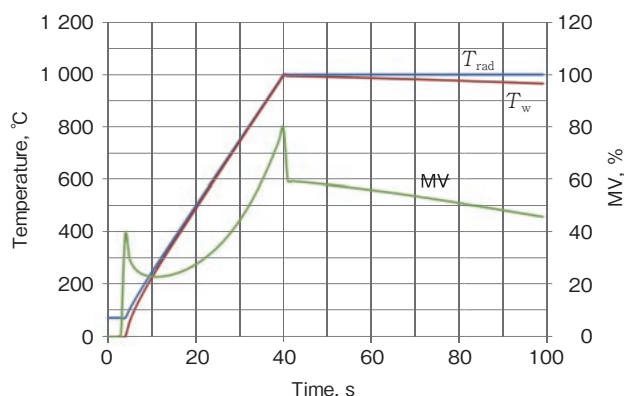
本報では、Si ウェハへの利用のみの紹介となったが、RTP は多くの材料への適用が可能であり、ここで得られた知見・ノウハウは、お客様の新たな材料・プロセス開発の場に提供していく所存である。

7. 謝辞

本報のモデリング・シミュレーションは、筆者が非常勤講師を務める大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻の授業、基盤 PP[®] (Pioneering Integrated Engineering Research Program) において構築したものである。基盤 PP は、企業講師が持ち込む開発課題を1年かけて解決していくという開発実務を実践演習する産学連携講座である。2013~2016年度に光洋サーモシステム班に参加し、文献・各種データの調査、実験・解析を進めていただいた、学生諸氏に感謝をするとともに、これからの活躍を願うものである。また、本報では割愛したハロゲンランプのモデリング・シミュレーションや放射温度計の検出波長域による計測特性の解析についてもいずれ稿を改めて発表していきたい。



(1)実測値



(2)シミュレーション

図6 放射温度計を用いた制御により生じるウェハ実温度誤差

Wafer actual temperature error caused by temperature control using radiation thermometer feedback

参考文献

- 1) 前田和雄：はじめての半導体製造装置，工業調査会 (1999)118-127.
- 2) http://www.koyo-thermos.co.jp/products/handou/handou_dtl6.html.
- 3) N. M. RAVINDRA, B. SOPORI, O. H. GOKCE, S. X. CHENG, A. SHENOY, L. JIN, S. ABEDRABBO, W. CHEN, and Y. ZHANG : 「Emissivity Measurement and Modeling of Silicon-Related Materials: An Overview International Journal of Thermo physics, Vol. 22, No. 5, September 2001.
- 4) 「石英ガラス技術ガイド1－石英ガラスの化学的，物理的特性」，信越石英株式会社(2010)9.
- 5) 「石英ガラス技術ガイド2－石英ガラスの光学的特性の特性」，信越石英株式会社(2010)3.
- 6) 「ハロゲン電球の基礎」光技術情報誌ライトエッジ，No. 22，ウシオ電機株式会社(2001).
- 7) 服部 昌：「ランプ加熱装置による Si ウェハの熱処理」次世代の太陽電池・太陽光発電－その発電効率向上，用途と市場の可能性，技術情報協会(2018)423-428.
- 8) <http://www.ams.eng.osaka-u.ac.jp/fpp-j.html>

筆者



服部 昌*

M. HATTORI

* 光洋サーモシステム株式会社 商品開発部