

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760608

研究課題名(和文)化学溶液法における紫外レーザー照射時のナノ秒温度計測に基づく光結晶成長機構の解明

研究課題名(英文)Elucidation of mechanism of photo-crystal growth in chemical solution deposition method based on nano second temperature measurement under pulsed UV laser irradiation

研究代表者

篠田 健太郎 (Shinoda, Kentaro)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：10442732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：塗布光照射法では、紫外パルスレーザー照射時の数十ナノ秒程度のごく短時間における表面温度上昇が酸化物薄膜の低温合成に重要な役割を果たしており、その実測による定量化が望まれてきた。そこで、高速応答の近赤外フォトディテクターを用いて、レーザー照射時の試料表面からの放射光を検出する装置を開発し、熔融凝固時のプラトー現象を利用することでナノ秒温度計測が可能であることを見出した。本計測手法の開発により、種々の酸化物薄膜の光結晶成長機構における光熱反応の定量化が可能となった上、本研究はエキシマレーザープロセスのモニタリングツールとしても有用であり、プリンタブルエレクトロニクスへの応用展開も期待できる。

研究成果の概要(英文)：In the excimer laser-assisted metal organic deposition (ELAMOD), a surface temperature rise at a few tens of nanoseconds upon the irradiation of pulsed UV laser is the key to the low temperature fabrication process of oxide thin films. In order to understand this photo-thermal process quantitatively, we have developed a novel system utilizing near-infrared sensors that can detect thermal emission signals from the irradiated surfaces. Utilization of plateau, which was observed in the emission signal history, enables the conversion of emission signal intensities into temperatures. This method enables us quantitative analysis of photo-thermal process of photo crystal growth in the ELAMOD process, and is also useful as a monitoring tool for excimer laser processing, which will expand the ability of ELAMOD process into flexible and printable electronics.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：塗布光照射法 ELAMOD その場計測 エキシマレーザー 酸化物薄膜 プロセスモニタリング 透明導電膜 ペロプスカイト酸化物

1. 研究開始当初の背景

塗布光照射法はスピコート等により塗布した金属有機化合物膜もしくはナノ粒子膜にエキシマレーザーを照射することにより、エピタキシャル膜等の高品質酸化物薄膜を 300°C以下の低温で堆積させることができるコーティング技術である。たとえば、塗布光照射法により 3 元系の RbVO₃ 薄膜を PET (ポリエチレンテレフタレート) 上に堆積させることも可能であり、白色無機蛍光体をフレキシブルな有機基板上へ室温で製膜できた画期的な成果として報告されている [1]。熱分解や CVD による高品質酸化物薄膜の堆積には通常 500-1000°C と高い製膜温度が必要で、また PLD 等のレーザーアブレーションでは大面積化が困難であったのに対し、本手法は前述の特長に加えて、大面積化やパターンニングも可能であり、蛍光材料に加え、透明導電膜や抵抗体膜応用に向け、国内外の産業界から大きな注目を集めている。一方で、塗布光照射法における光照射時の結晶成長メカニズムは詳細にはわかっておらず、本手法の厚膜への適用や、大気圧プラズマやフェムト秒レーザーといった新規光源の検討を困難にしており、適用領域拡大へ向けて、学术界、産業界共にその解明を強く望んでいる。

塗布光照射法では紫外エキシマレーザーを照射するため、光化学反応を主とした光励起エピタキシャル成長が製膜メカニズムを支配していると考えられてきた。しかしながら、最近の差分法を用いたシミュレーションによれば、パルス幅 25ns 程度のエキシマレーザーを照射した時、表面近傍は数十 ns の間で 1500°C 以上に加熱されており [2]、本手法においても熱反応が重要であることがわかってきた (以後、光を照射したときの化学的反応を光化学反応、熱的な反応を光熱反応と呼ぶ)。本温度上昇結果だけをみれば逆に光熱反応のみでも結晶成長が起こりうるということが考えられるが、皮膜中の結晶成長方向の電子顕微鏡観察結果との整合性が取れないことなど実験と不一致な部分も多いことから、光熱反応と光化学反応の両者が光結晶成長機構において重要な役割を果たしていると考えられている。これら 2 つの反応の影響を定量的に理解するためには、表面温度変化を実測することが必須であるが、ナノ秒オーダーでの温度計測の困難性から今日まで試みられてこなかった。

一方で、我々はこれまでに溶射粒子の衝突現象における微小領域の超高速温度測定方法の開発をおこなってきた [3-6]。本計測装置では ~50µm の溶射粒子の温度を 50ns 程度の時間分解能で計測することが可能であった。本成果をもとに塗布光照射法における温度計測可能性を見積もると、レーザー照射面積は 0.1~1 cm² 程度で溶射粒子サイズに比べて数桁大きいことから、ナノ秒オーダーの時間分解能でも放射光検出は十分可能であると考えられた。そこで、温度計測の可否を検証

するために InGaAs フォトダイオード、フィルター、集光レンズを組み合わせた簡易の計測装置を試作し、エキシマレーザー照射時の試料表面からの放射光の検出を試みたところ、ノイズが見られるものの放射光を検出することが実際に可能であった。本計測は集光条件も不完全で、素子感度も低い安価なものを用いていることから、試作装置の高度化を測れば、温度計測は十分可能であると考え、本研究の開始に至った。

2. 研究の目的

そのような背景下、本研究では、1. 高速応答近赤外素子を用いた紫外パルスレーザー照射時のナノ秒温度計測技術の確立、2. ナノ秒温度計測による光熱反応の定量化に基づく塗布光照射法における光結晶成長機構の解明の 2 点の達成を目指した。

3. 研究の方法

(1) エキシマレーザー照射装置の開発 [7]
図 1 に本研究で開発したエキシマレーザー照射装置の概略図を示す。本装置はその場計測装置とレーザーシステムから構成される。その場計測装置はエキシマレーザーを照射したときに試料表面から放出される熱放射光を収集するために用いられる。レーザーシステムはレーザー照射箇所の大面積化を測るのに用いる。XeCl エキシマレーザー (レーザー波長 $\lambda = 308$ nm、光子エネルギー 4.0 eV、半値幅 FWHM = 26 ns (Light-Machinery Lumonics Pulse Master PM-882) を試料照射用レーザーとして用いた。レーザー光はビーム成型器で形状を整え、レーザー光強度は減衰器を通して調整した。調整したレーザー光は両凸の熔融石英レンズ ($f = 300$ mm) を用いて試料表面上に集光した。パルス紫外レーザー照射時に試料は急速加熱され、熱放射を発生するようになるが、その試料からの熱放射をアンプ付きの InGaAs フォトダイオード (Newport 818-BB-30A) を用いて検出した。このフォトダイオードの有効直径、波長域、上昇時間はそれぞれ 0.1 mm、1000-1600 nm、及び、400 ps である。2 つの反射防止膜付き片凸熔融石英レンズ (対物側が $f = 150$ mm で検出器側が $f = 100$ mm) を用いてこの熱放射を集光した。得られた熱放射はカット波長が 800 nm のロングパスフィルターを用いて迷光の混入を抑制した。また、有効直径が 1 mm、波長域が 190-1100 nm で上昇時間が 1 ns のアンプ付き Si フォトダイオード (Ophir Optronics FPS-10) を用いてレーザーパルスの検出をおこなった。これらの得られた信号は 1 m 長の BNC 同軸ケーブル (RG58) を通して、周波数 500 MHz で 4 チャンネルのデジタルオシロスコープ (Tektronix DP03054) を用いて記録した。このとき、Si フォトダイオードでえられた信号をトリガーとして、熱放射光の取得をしている。

取り外し可能なミラーを利用して、その場

計測装置とレーザースキャン装置間の光路切り替えができるようにした。試料は電動ステージ上にマウントできている。XeCl エキシマレーザーは円筒レンズを用いて、 $10 \times 0.5 \text{ mm}^2$ の線上に集光してあるため、 10 mm 幅の試料までは 1 mm/s の速度でスキャンすることができる。このとき、レーザーのパルス周波数は 10 Hz が多かったため、単位面積当たり 5 パルスのレーザーが照射されたことになる。

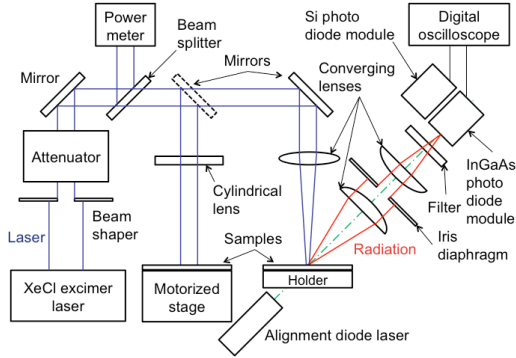


図 1：エキシマレーザー照射装置の概略図。エキシマレーザー照射時の表面からの放射光を収集するその場計測装置と大面積照射を可能とするレーザースキャンシステムから構成される。レーザーの光学路は計測装置とレーザースキャン装置の間でミラーにより切り替えができるようになっている。

(2) 放射温度測定 [7]

プランクの黒体放射スペクトル分布則に基づいて熱放射シグナルから温度を見積ることができる [8, 9]。

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (1)$$

ここで、 λ 及び T はそれぞれ波長及び温度、 $M(\lambda, T)$ は黒体放射のスペクトル放射分布、そして、 c_1 及び c_2 はそれぞれ第一および第二放射定数 ($c_1 = 5.9548 \times 10^7 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ 、 $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{mK}$) である。検出器によって集められた熱放射シグナル $I(T)$ は次のように表せる [8-11]。

$$I(T) = \frac{A}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) \tau(\lambda) F(\lambda) G(\lambda) M(\lambda, T) \times \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda, \quad (2)$$

ここで、 θ 及び ϕ はそれぞれ極角及び方位角、 A は検出器によって測定される試料の領域、 $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T)$ はスペクトル方向放射率、 $\tau(\lambda)$ 、 $F(\lambda)$ 、及び $G(\lambda)$ はそれぞれ 2 つのレンズの透過率、フィルターの透過率、そして検出器の応答に検出器のプリアンプの増倍率を掛けた値である。この放射率の項は以下のように単純化できる。

$$\int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi/2} \varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi = \varepsilon_c \omega, \quad (3)$$

ここで、 ε_c 及び ω はそれぞれ実効放射率及び視野の立体角である。本研究で用いた検出器の実効波長 λ_c として最大応答波長である $\lambda = 1.52 \mu\text{m}$ を選べば、(2) 式は次のように単純化できる。

$$I(T_c) = \frac{\varepsilon_c K(\lambda_c)}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_c T_c}\right) - 1}, \quad (4)$$

ここで、

$$K(\lambda_c) = \frac{2A\omega\tau(\lambda_c)F(\lambda_c)G(\lambda_c)\Delta\lambda_c}{\lambda_c^5}. \quad (5)$$

である。

従って、もし ε_c が既知であれば、実効温度は以下のように見積もることができる。

$$T_c = \frac{c_2}{\lambda_c} \frac{1}{\ln\left[\frac{\varepsilon_c K(\lambda_c)}{I} + 1\right]}. \quad (6)$$

(5) 式に従えば、 $K(\lambda_c)$ を計算することができるが、実効温度を直接測定できるほどには精密に求めることはできなかった。従って、後述するように、ITO (インジウムスズ酸化物) のプラトー温度を用いて、 $\varepsilon_c K(\lambda_c) = 2.07 \times 10^3 \text{ mV}$ と校正した。

(3) 実験 [7, 12-14]

① その場計測装置の妥当性検証実験

開発したその場計測装置の時定数の妥当性を検証するために、Si (100) の単結晶を用いて測定をおこなった。比較のために、既報のコード [2] を用いて、1 次元の熱伝導数値計算も併せておこなった。ただし、このシミュレーションコードでは熔融や凝固といった相変態の項は考慮していない。次に、GEOMATEC 社製の厚さ 200 nm の ITO 薄膜が堆積されたガラス基板 ($10 \times 10 \times 0.7 \text{ mm}^3$) を用いた。レーザー照射時の熱放射を開発したその場計測装置により検出した。

② 本実験

基板には SrTiO_3 (STO、バンドギャップ 3.2 eV) 及び LaAlO_3 (LAO、バンドギャップ 5.6 eV) 単結晶を用い、アモルファス $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ (LSMO) 薄膜を化学溶液法により作製した。La: Sr: Mn = 0.8: 0.2: 1.0 となるように混合したトルエン希釈の 2-エチルヘキサン酸溶液を 2000 rpm で 15 s の条件で単結晶基板上にスピコートした。得られた膜を大気中で 100°C - 10 min で乾燥させ、 500°C - 10 min で仮焼した。この手順を 5 回繰り返す、およそ 170 nm の膜厚のアモルファス膜を得た。光源には光子エネルギーが 4.0 eV (波長 308 nm) で半値幅が 26 ns の XeCl エキシマレーザーを用いた。本レーザー装置を用いて紫外パルス光をサンプル表面に照射したときの表面温度上昇を放射光強度の変化としてアンプ付きの InGaAs フォトダイオードを用いて検出した。

4. 研究成果[7, 12-14]

(1) 計測装置の妥当性

図2にレーザーフルエンス $F = 533 \text{ mJ/cm}^2$ で照射したときに Si (100) 単結晶から得られた信号を示す。レーザーパルス強度が最大になってから 11ns 後に InGaAs 素子による検出信号も最大に到達し、その後、減衰するプロファイルがえられた。同じ条件で計算した表面温度プロファイル及びそのときに仮定したレーザープロファイルも併せて図中に示した。表面温度が最大に到達する時刻と検出信号が最大に達する時間は極めてよく一致していることから、測定系の時定数はエキシマレーザープロセスにおける表面温度変化を計測するのに十分小さく、プロセスのその場計測が可能であることが示された。

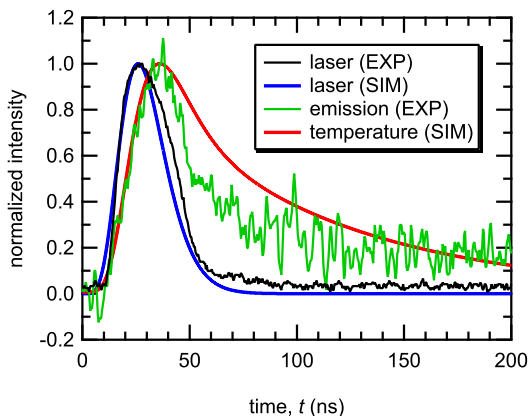


図2. Si 検出器によって得られた XeCl エキシマレーザーのパルス波形及び InGaAs 検出器によって得られた Si 単結晶からの信号

(2) マンガン系ペロブスカイト酸化物におけるその場計測

STO 単結晶、及び、LAO 単結晶基板に XeCl エキシマレーザーを照射した。STO 単結晶基板に照射したときには、エキシマレーザーのパルス光が入射してからおよそ 20 ns 後に検出光の強度は最大に達した。このずれは熱拡散の影響によるものであり、パルス光照射によって、加熱された基板からでてきた輻射光を正しく検出できたことを示している。一方、LAO 単結晶基板の場合には、パルス光の波形と検出光の波形に時間的なずれは見られなかった。また、得られた検出光の強度は STO の場合に比べて、2 桁小さかった。パルス光の入射に対して、検出光に遅れがないという事実は検出光が熱輻射光でないことを示している。XeCl レーザーの光子エネルギーは 4.0 eV であり、LAO のバンドギャップ 5.6 eV よりも小さいことから、XeCl レーザーは LAO 基板に吸収されず、加熱効果はないことが予想されたが、それと矛盾しない結果である。検出光の因子として、LAO 基板に含まれる不純物などの蛍光を拾っていることが考えられるが、現時点で検出光のソースは特定できてはいない。ただし、観察事実として、光子エネルギーとバンドギャップの関係から吸

収が起こらないとされる場合においても、このように光が検出されることがあることには注意する必要がある。このことは、検出光強度のみの比較では、解釈を誤りうる可能性を示しており、その場観察においては時間依存変化など検出光波形についても観察する重要性を示唆している。

図3に、(a) STO、及び、(b) LAO 単結晶基板上に製膜した LSMO 薄膜からの放射光の時間変化プロファイルを示す。両方の場合において、パルスレーザー光が最大強度に達してから約 20 ns 後に放射光も最大強度に達した。我々が行った 1 次元の伝熱に関する数値計算結果とも時間軸はよく一致したことから、サンプルからの熱放射光を適切に捉えることができたと考えられる。両者の放射光の最大強度に大きな差はなかったものの、特筆すべきは、STO 基板上の LSMO 薄膜の減衰速度すなわち冷却速度は LAO 基板上のものに比べてより小さく、減衰過程に明瞭な違いが見られたことである。

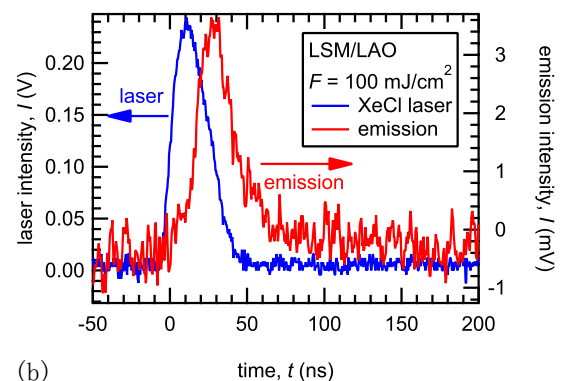
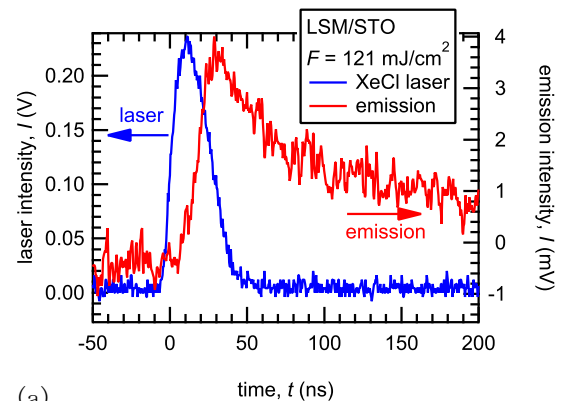
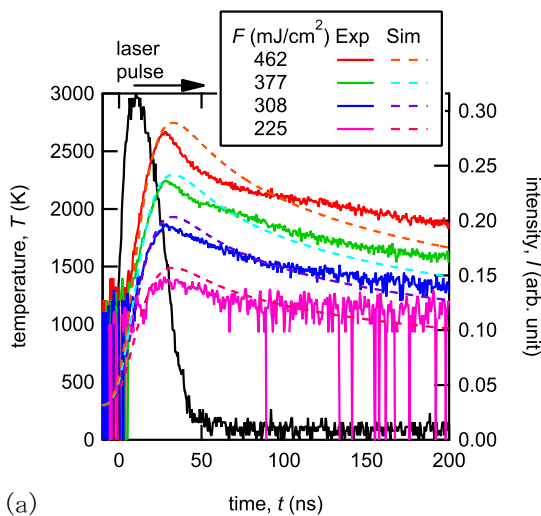


図3: InGaAs 検出器により測定された LSMO 薄膜からの放射シグナル。(a) STO 基板上、(b) LAO 基板上。

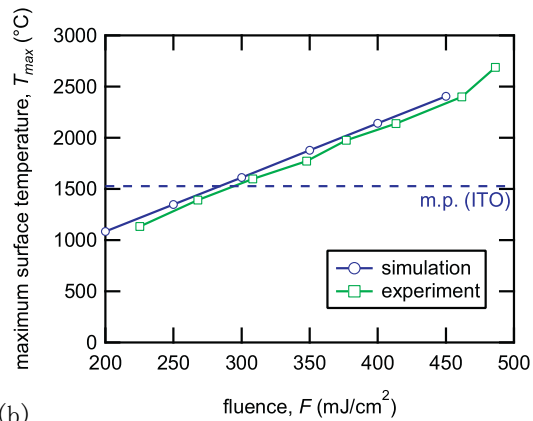
(3) 透明導電膜におけるその場計測

図4(a)に XeCl エキシマレーザー照射時にガラス基板上的 ITO 薄膜から得られた表面温度変化プロファイルを示す。本プロファイルは $F = 225 \text{ mJ/cm}^2$ のときに得られたものであり、温度上昇部は数値計算結果と良く一致していた。一方で、冷却過程に関しては実験のほうが早く冷却していた。300 mJ/cm^2 以上の高いフルエンス領域ではプラトー領域が観

察され、凝固に伴うリカレンスが起きていることが示唆された。ただし、数値計算では相変態を考慮していないので、計算プロファイルにはこの変化はみられない。今後の数値計算では相変態の項を取り組んでいくことも重要である。このときの最大到達温度について図4(b)にプロットした。融点で校正しているので絶対温度自体は参考程度であるが、特筆すべきは傾きが極めて良く一致していることである。傾きについては実験方法の項で述べたように仮定を入れていないため、その場計測手法の正しさを示しているとともに、プロセスの加熱過程は断熱的におこなっているとみなせることがわかった。



(a)



(b)

図4: (a) XeCl エキシマレーザー照射ときのITO 薄膜の温度変化。実線がその場計測結果で、点線が数値計算結果である。(b) 最大到達温度のプロット。

図5に様々なフルエンスで処理したITO 薄膜の表面粗さを示す。ITO 薄膜のAFMで観察した表面形態は $F < 300 \text{ mJ/cm}^2$ では大きく変化しなかった。このことは、表面粗さがほぼ一定の値を取っていることとも矛盾しない。一方で、 $F > 300 \text{ mJ/cm}^2$ になると、表面形態が大きく変化し、熔融・凝固したことを示すマッドクラックパターン状の組織を呈した。この遷移に伴って、表面粗さも大きく増大した。その後、 F の増大とともにいったん表面

粗さは小さくなった。このことは薄膜と基板の密着性が向上していることを示唆しており、マッドクラックパターンのサイズが小さくなっていることから類推できる。 $F \sim 400\text{--}450 \text{ mJ/cm}^2$ で極小を迎え、それ以上のフルエンスでは再び表面粗さが大きくなり、粒状の組織が観察されるようになった。このことは高いフルエンス領域で膜のアブレーションが起きていることを示唆している。以上をまとめると、図5に併せて示したように3つの領域、すなわち、アニール、熔融・凝固、アブレーションに分類でき、本その場計測によりそれらが判別できることはプロセスモニタリングツールとしても非常に有用であると考える。

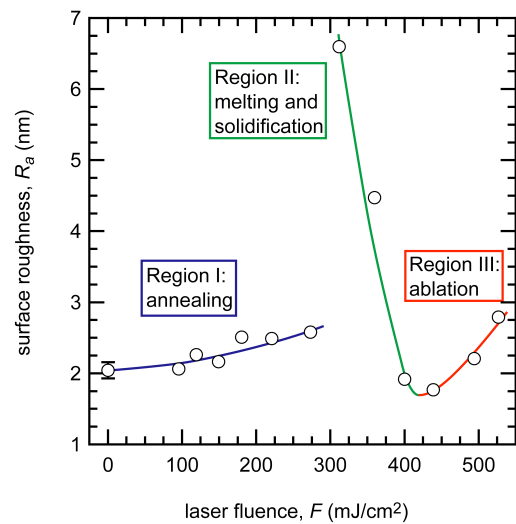


図5: レーザーフルエンス変化時のITO 薄膜表面粗さの変化

[参考文献]

- [1] T. Nakajima et al., Nat. Mater. 7 (2008) 735; [2] T. Nakajima et al., Chem. Mater. 20 (2008) 7344; [3] K. Shinoda et al., J. Therm. Spray Technol. 14 (2005) 511; [4] K. Shinoda et al., J. Appl. Phys. 100 (2006) 0749033; [5] K. Shinoda et al., Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 194103; [6] Photonics Spectra, July 2007; [7] K. Shinoda et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 05FB08; [8] D.P. DeWitt and G.D. Nutter, Theory and Practice of Radiation Thermometry (Wiley, New York, 1989); [9] R. Siegel and J. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer (Taylor & Francis, London, 2001) 4th ed.; [10] M. Hatano et al., J. Appl. Phys. 87 (2000) 36; [11] S. Chen and C.P. Grigoropoulos, Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 3191; [12] K. Shinoda et al., Appl. Surf. Sci. 292 (2014) 1052; [13] K. Shinoda et al., Appl. Phys. B 113 (2013) 479; [14] 篠田ら, 日本電子材料技術協会会報 44 (2013) 34.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

1. K. Shinoda, T. Nakajima, M. Hatano, T. Tsuchiya, Design of process diagnostics for excimer laser irradiation of oxide thin films, Japanese Journal of Applied Physics, 53 (2014) 05FB08-1-6, DOI: 10.7567/JJAP.53.05FB08 (査読有).
2. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, In situ monitoring of excimer laser annealing of tin-doped indium oxide films for the development of low-temperature fabrication process, Applied Surface Science, 292 (2014) 1052-1058, DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.12.101 (査読有).
3. 篠田健太郎, 中島智彦, 土屋哲男, 塗布光照射法による金属酸化物膜成長のその場計測, 日本電子材料技術協会会報, 44 (2013) 34-37 (査読無).
4. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, In situ measurement of crystallization of oxide thin films during irradiation of pulsed UV laser in chemical solution deposition process, Applied Physics B, 113 (2013) 479-484, DOI: 10.1007/s00340-013-5493-3 (査読有).
5. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, Ultrafast temperature measurement at nanosecond timescale under irradiation of pulsed UV laser, Proceedings of 5th Tsukuba International Coating Symposium (2012) 57-58 (査読無).

[学会発表] (計9件)

1. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, In situ temperature measurement of oxide thin films at a nanosecond time scale during pulsed UV laser irradiation, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014/3/17 (相模原).
2. 篠田健太郎, 中島智彦, 土屋哲男, ナノ秒その場計測技術に基づくエキシマレーザープロセスの高度化, 第33回エレクトロセラミックス研究討論会, 2013/10/29 (つくば).
3. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, Design of process diagnostics for excimer laser irradiation of transparent conductive oxide thin films, JSAP-MRS Joint Symposia, 2013/9/17 (Kyoto, Japan).
4. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, In situ monitoring of thermal radiation of tin-doped indium oxide thin films under excimer laser irradiation, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 2013/3/29 (厚木).
5. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, Ultrafast temperature measurement at nanosecond timescale under irradiation of

pulsed UV laser, 5th Tsukuba International Coating Symposium, 2012/11/29 (Tsukuba, Japan).

6. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, Thermal radiation measurement in ultrafast phenomena as a process monitoring tool, 5th Asian Thermal Spray Conference, 2012/11/26 (Tsukuba, Japan).
7. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, In situ measurement of fabrication of La-Ba-Mn-O films by ELAMOD process (松山).
8. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, In situ monitoring of excimer laser annealing of tin-doped indium oxide films for the development of low-temperature fabrication process, The 2012 International Conference on Flexible and Printed Electronics (ICFPE2012), 2012/9/7, (Tokyo, Japan).
9. K. Shinoda, T. Nakajima, T. Tsuchiya, In situ measurement of crystallization of oxide thin films during irradiation of pulsed UV laser in chemical solution method, 8th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications, 2012/8/13 (Rochester, NY, USA).

[その他]

1. ホームページ
<https://staff.aist.go.jp/kentaro.shinoda/>

2. 受賞

篠田健太郎, 中島智彦, 土屋哲男, 日本電子材料技術協会 第49回秋期講演大会 優秀賞, 2012/11/9.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠田 健太郎 (Kentaro Shinoda)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員
研究者番号: 10442732

(2) 研究協力者

中島 智彦 (Tomohiko Nakajima)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

土屋 哲男 (Tetsuo Tsuchiya)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・グループ長

波多野 睦子 (Mutsuko Hatano)

東京工業大学大学院・理工学研究科電子物理工学専攻・教授