

磁場印加PLDを用いた誘電体-磁性体複合薄膜における自発的相分離の動力学

メタデータ	言語: ja 出版者: 公開日: 2022-03-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 脇谷, 尚樹 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00028752

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01705

研究課題名(和文) 磁場印加PLDを用いた誘電体-磁性体複合薄膜における自発的相分離の動力学

研究課題名(英文) Dynamics on spontaneous phase separation in dielectric-magnetic composite thin film prepared using PLD under magnetic field

研究代表者

脇谷 尚樹 (Wakiya, Naoki)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：40251623

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は薄膜のエピタキシャル成長時に生じるスピノーダル分解の動力学の解明と組成波の伝搬方向の複合化による微構造制御と新機能の発現を解明することである。RHEEDと電磁石を搭載したPLD装置を開発し、成膜時に磁場を印加した場合についてのみ、成膜後の時効により薄膜表面の原子配列に変化が生じることが見いだされた。この変化は、組成波の膜厚方向への伝搬を直接捉えた証拠であると考えられた。誘電体と磁性体の複合薄膜では組成波はそれぞれの物質の伝搬様式を有したまま、複合化されることが明らかになった。さらに、計算機シミュレーションによる自発的な超格子構造の生成を定性的に再現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのスピノーダル分解の考え方は、最初に均一な固溶体を作製してから、長時間アニールすることで相分離を生じさせていたが、本研究は薄膜では成長時に磁場を印加することで相分離を起こさせることが可能であることが示された。また、その際に生じるスピノーダル分解の様式、すなわち、組成波の伝搬方向は制御可能であることが示された。このことは、成膜時の磁場印可によって相分離を生じさせ、それに伴って新しい機能が付与できる可能性があることを示している。すなわち、本研究は成膜時の磁場印可で既存の物質を機能を有する材料に生まれ変わらせる可能性があることを示すものであり、学術的および工学的な意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to clarify the dynamics of spinodal decomposition during epitaxial growth of thin film, and to control microstructure of thin film by designing the direction of propagation of composition wave. In this work, novel PLD equipped with an RHEED and an electromagnet was developed. Using this PLD change of surface crystal structure of epitaxial thin film was observed only for the thin film deposited under application of magnetic field during deposition. For composite thin film of dielectric and magnetic ceramics, it was found that the direction of propagation of composition wave follows their original fashion. We qualitatively succeed to reproduce spontaneous superlattice formation by computer simulation on the basis of phase-field model.

研究分野：セラミックス薄膜

キーワード：PLD エピタキシャル成長薄膜 磁場印可 自発的相分離 スピノーダル分解 動力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは成膜中に磁場印加可能なダイナミックオーロラ PLD を開発し、磁場中で作製したエピタキシャル成長薄膜は、磁場印加無しで作製した薄膜が示さない特異な微構造と物性を示すことを見いだしてきた。その概略は以下の通りである。

Sr-Ti-O 薄膜における自発的な超格子構造の生成と強誘電性発現[1]

Ni-Fe-O 薄膜における自発的な相分離 (組成の異なる柱からなる柱状構造薄膜) の生成と垂直磁気異方性発現

Co-Fe-O 薄膜における自発的な相分離 (バルクヘテロ構造) の生成[2]

薄膜作製時の相分離はイオンビームアシスト成膜法で作製した Au-Ni 薄膜[3]やパルス DC スパッタリング法で作製した TiC 薄膜[4]で報告されているが、原因として、基板への陽イオンの衝突が薄膜表面から内部に向かう元素の拡散の活性化エネルギーを低下させてスピノーダル分解を誘起するためと考えられている[4]。PLD 法では集光したパルスレーザーをターゲットに照射した際に発生するプルーム (気相) を基板上に堆積させて薄膜を作製する方法であるが、プルームの分光分析に関する既往の研究から、発生直後のプルーム中には電子と陽イオンが存在するが、これらはすぐに再結合し、成膜に寄与する粒子のほとんどは電気的に中性であることが報告されている [5]。一方、プルームに磁場を印加すると電子と陽イオンの再結合が抑制され、成膜に寄与する粒子は陽イオンが主体となる [5]。これらより、研究代表者らは上記の ~ の結果はすべてモードの異なるスピノーダル分解として分類可能であることに気がついた。の自発的な超格子構造の生成は、スピノーダル分解の組成波が 1 方向 (z 軸方向) にのみ伝搬することによって生成する (1 方向伝搬型) の自発的な相分離 (組成の異なる柱からなる柱状構造薄膜) は組成波が 2 方向 (x 軸および y 軸方向) にのみ伝搬することによって生成する (2 方向伝搬型) の自発的な相分離 (バルクヘテロ構造) は組成波が 3 方向 (x 軸、y 軸および z 軸方向) にランダムに伝搬することによって生成する (3 方向ランダム伝搬型)。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の 2 つである。

(1) 薄膜のエピタキシャル成長時に生じるスピノーダル分解の動力学的解明 (実験と計算)。

(2) 組成波の伝搬方向の複合化による微構造制御と新機能の発現。

これらの目的を達成するため、本研究では以下の 3 つの研究項目を行った。

(1a) 高速反射電子線回折 (RHEED) を搭載した新しいダイナミックオーロラ PLD の開発による、薄膜のエピタキシャル成長のその場観察を通じた動力学的解明

(1b) スピノーダル分解時の拡散に伴う化学ポテンシャル計算による動力学的解明

(2) 複合組成薄膜を用いた組成波の伝搬方向の複合化による微構造制御と新機能の発現

3. 研究の方法

薄膜は SrTiO₃(ST)(001)単結晶基板上に基板温度 700°C、供給酸素分圧 1.0×10^{-4} Torr、印加磁場 1,200 G、成膜時間 30 分で作製した。PLD 成膜を行うレーザーは Nd:YAG レーザーの 4 倍波 ($\lambda = 266$ nm) とした。得られた薄膜の結晶構造は薄膜単結晶解析 X 線回折装置 (MRD) によって $2\theta/\varphi$ スキャンおよび逆格子空間マッピング (RSM) 行うことで解析した。また、走査型透過電子顕微鏡 (STEM) による構造解析も行った。薄膜の組成と膜厚は、同一の成膜条件で Si(001)基板上に作製した薄膜の蛍光 X 線分光法 (XRF) 分析より求めた。ST 薄膜成膜後、RHEED を用いて薄膜表面の結晶構造観察を行った。

計算機によるスピノーダル分解のシミュレーションは Cahn-Hilliard の拡散方程式に基づき、フェーズフィールド法により行った。

4. 研究成果

4.1. 高速反射電子線回折 (RHEED) を搭載した新しいダイナミックオーロラ PLD の開発による、薄膜のエピタキシャル成長のその場観察を通じた動力学的解明

RHEED を搭載した新しいダイナミックオーロラ PLD 装置の概略図と磁場を発生させるために作製した電磁石を図 1 に示す。電磁石は無酸素銅製のホローコンダクターを絶縁テープで覆い約 11 ターン巻いて作製した。装置

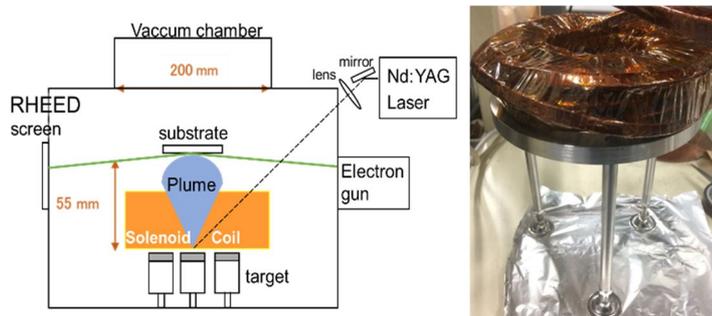


図 1 本研究で開発した RHEED と電磁石を搭載した PLD 装置の模式図とソレノイドコイルの写真

の性能は最大 1,200 G の磁場印加と成膜後に RHEED 観察が可能なことである。1,200 G の磁場下で ST(001) 単結晶基板の上に堆積した A-サイト過剰組成の ST 薄膜の XRD($2\theta/\omega$)パターンと逆格子空間マッピングを図 2 に示す。この図より超格子特有のサテライトピークが観測され、RSM の結果より薄膜ピークと ST 基板の面内格子定数が一致しており、薄膜は基板に対して格子整合しているとともに自発的に超格子構造が生成することが明らかになった。1,200G の磁場下で ST(001)単結晶基板の上に ST 薄膜を堆積し、成膜後の基板温度を 700°C に保持(時効)した時の [110]および[100]方向から観察した RHEED 像をそれぞれ図 3 に示す。成膜時に磁場を印加し成膜終了後時効を行った ST 薄膜のみ、図 3 に示すように双方向において成膜終了後から 3 分以内に劇的に変化した RHEED 像が観察された。これらの結果から、1,200G の印加磁場下での成膜と成膜後 700°C での時効の両方が、up-hill 拡散が進行し自発的な超格子構造を生成するために不可欠であることが推定された。

また、ST 薄膜を成膜し時効を行い RHEED 像の変化が観察された後、膜厚 30 nm の ST 薄膜を成膜した時の RHEED 像を図 4 に示す。300 nm 成膜し 4 分時効をした(d)の上に 30 nm 薄膜を堆積すると、成膜直後は 300 nm 成膜直後の像(c)と同一の像(e)が観察されるが、4 分後には(f)に変化する。成膜を再開して(f)の上に 30 nm 薄膜を堆積すると(g)の像が得られ、再び成膜を停止すると 4 分後には(h)の像となる。この工程をもう一度繰り返したときの像が(i)成膜直後と(j)4 分後である。(e)(g)(j)の像は(c)と、(f)(h)(j)の像は(d)と同一である。この結果からエピタキシャル関係を維持しながら元素が表面から内部に拡散する現象、すなわちスピノーダル分解のダイナミクスを直接とらえることができた。

図 5 (a) で示すように薄膜表面に SrO 二重層が含まれていると考え、成膜直後の RHEED 像について考察する。まず[100]方向からの観察では、像のストリーク間隔は 1 周期分に相当し、模式図中では(1)の 1 格子に相当する。次に[110]方向からの観察では、像のストリーク間隔は[100]方向からの像の 1 周期のストリーク間隔と比べて $\sqrt{2}$ 倍および $\sqrt{2}/2$ のス

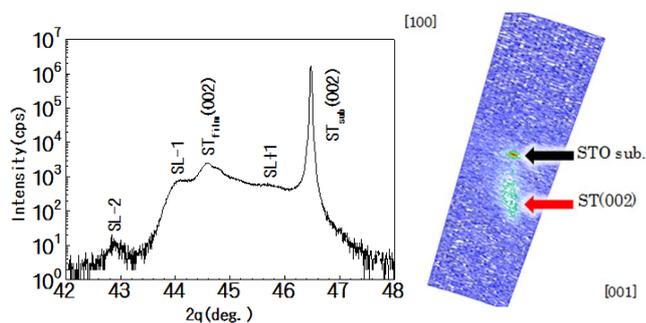


図 2 ST(001)基板の上に磁場中で作製した A-サイト過剰組成の ST 薄膜の X 線回折図形と逆格子空間マップ

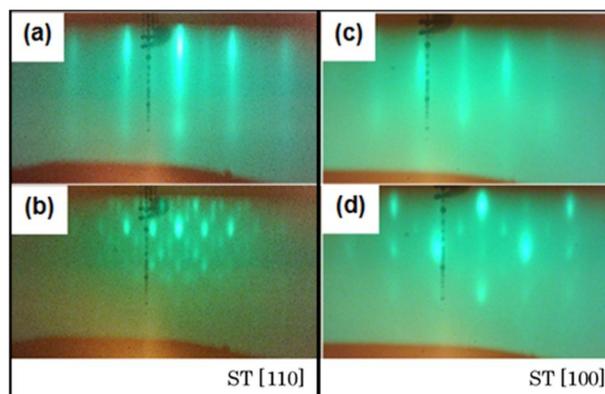


図 3 ST(001)基板の上に磁場中で作製した A-サイト過剰組成の ST 薄膜の RHEED 像。

(a) (c)成膜直後、(b) (d) 成膜終了後 3 分後

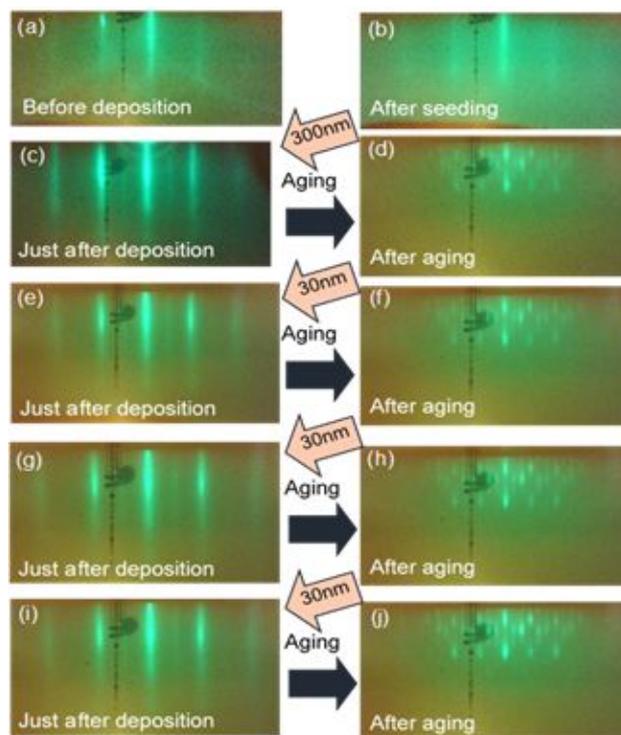


図 4 ST(001)基板の上に磁場中で作製した A-サイト過剰組成の ST 薄膜の各段階における RHEED 像

(a) 成膜前 (b) シード層成膜後 (c) 成膜直後 (e) (g) (i) 膜厚 30nm の ST 薄膜成膜直後 (d) (f) (h) (j) 4 min 時効後

トリーク間隔であった。この $\sqrt{2}$ 倍の幅は 1 周期分に、 $\sqrt{2}/2$ 倍の幅は 2 倍の周期分に相当し、模式図中では(2)の面間隔と(3)に相当する。次に、4 分間時効を行った後の RHEED 像について考察する。時効を行うことで RHEED 像が変化したことから、SrO 二重層が再配列し図 5 (b) に示す表面構造に変化したと考える。まず [100]方向からの観察では、時効後に新たに $1/2$ 倍のストリーク間隔が現れこの幅は 2 倍の周期に相当し、模式図中では(4)に相当する。次に[110]方向からの観察では、時効後に新たに $\sqrt{2}/3$ 倍および $\sqrt{2}/6$ 倍のストリーク間隔が現れた。 $\sqrt{2}/3$ 倍の幅は 3 倍の周期に、 $\sqrt{2}/6$ 倍の幅は 6 倍の周期に相当し模式図中では(5)と(6)に相当する。以上のことから、ST 薄膜表面において SrO 二重層の再配列が起こり時効中に RHEED 像が変化したと推察される。

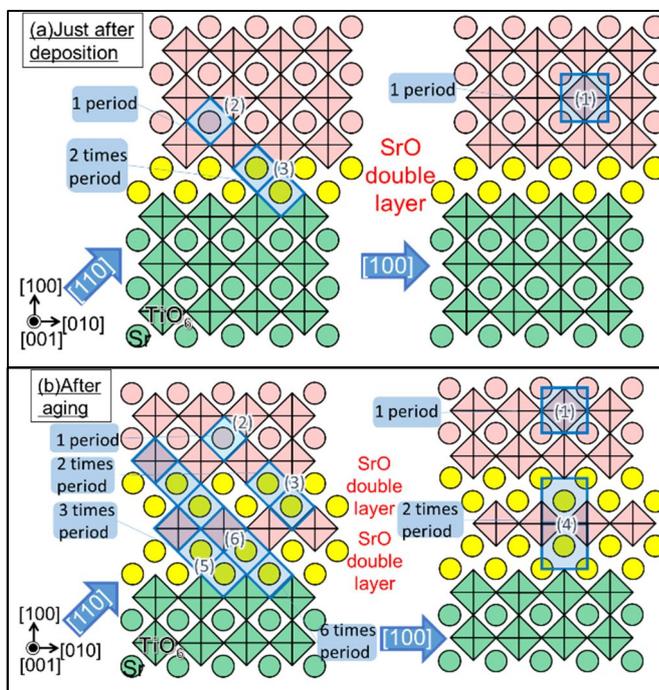


図 5 ST(001)基板上に磁場中で作製した A-サイト過剰組成の ST 薄膜の表面の結晶構造の模式図 (a)成膜直後、(b)時効後

4.2. 複合組成薄膜を用いた組成波の伝搬方向の複合化による微構造制御と新機能の発現

2000 G の磁場中で作製した、ST-CFO 複合薄膜(膜組成 93mol%-7mol%)と ST-NFO 複合薄膜(膜組成 90mol%-10mol%)の XRD($2\theta/\omega$)パターンと STEM を用いて観察した薄膜断面の HAADF 像をそれぞれ図 6 および図 7 に示す。ここで、CFO と NFO はそれぞれコバルトフェライトとニッケルフェライトである。両薄膜において超格子特有のサテライトピークが観測され、HAADF 像からも膜厚方向にコントラストが変化していることがわかる。これにより、ST にフェライトを少量添加した複合薄膜においても自発的に超格子構造が生成することが明らかとなった。EDS マッピングの結果からは、このコントラストの変化が Ti, Fe, Co および Ni の濃度変化に対応していることが確認された。このことから、ST メインの複合薄膜とすることで、スピノーダル分解による組成波は膜厚方向(1D)に優位に伝搬し、添加したフェライトも 1 次元的な周期をもつことが明らかとなった。同様に 2000 G の磁場中で作製し、フェライト添加量を増やした ST-CFO 複合薄膜(膜組成 62mol%-38mol%)と ST-NFO 複合薄膜(膜組成 49mol%-51mol%)の XRD ($2\theta/\omega$)パターンと STEM を用いて観察した薄膜断面の HAADF 像および EDS マッピングの結果をそれぞれ図 8 および図 9 に示す。

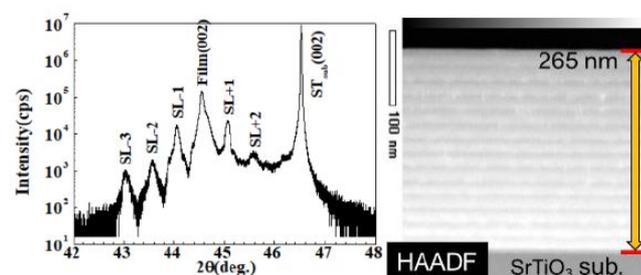


図 6 ST 基板上に磁場中で作製した A-サイト過剰組成 ST と CFO の複合薄膜の X 線回折図形と STEM 像

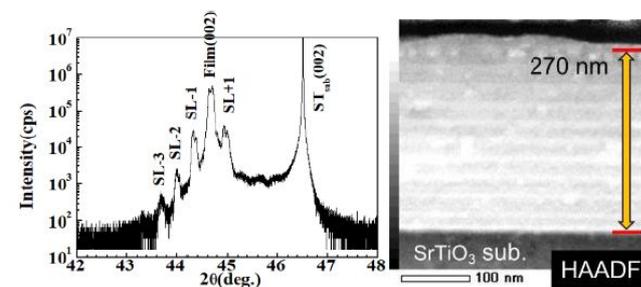


図 7 ST 基板上に磁場中で作製した A-サイト過剰組成 ST と NFO の複合薄膜の X 線回折図形と STEM 像

ST-CFO(62mol%-38mol%)複合薄膜では ST と CFO がそれぞれ成長していることが XRD パターンから見て取れる。EDS 像の解析により、膜厚方向に周期的ではない Fe と Co の組成振動が確認され、面内方向には Ti, Fe, Co, Sr の明瞭な組成振動が得られた。すなわち、ランダム性を有する膜厚方向の組成波と面内方向の組成波が足し合わされたような相分離が進行していることが

確認された。EDS 像の解析により、膜厚方向に周期的ではない Fe と Co の組成振動が確認され、面内方向には Ti, Fe, Co, Sr の明瞭な組成振動が得られた。すなわち、ランダム性を有する膜厚方向の組成波と面内方向の組成波が足し合わされたような相分離が進行していることが

示唆された。ST-NFO(49mol%-51mol%)複合薄膜においても、STとNFOがそれぞれ成長していることがXRDパターンから見て取れるが、それに加えてSTピーク近傍にサテライトピークも観測された。EDS像の解析からは、膜厚方向にFe, Ni, Srの組成振動が確認され、面内方向にはFeとNiの組成振動が得られた。すなわち、膜厚方向の組成波と面内方向の組成波が足し合わされたような相分離が進行していることが示唆された。以上のように、フェライトの添加量を増やした場合の組成波の伝搬方向について考えると、ST由来の膜厚方向の組成波(1D)とフェライト由来のランダム方向または面内方向の組成波(2D or 3D)が両方進行して相分離していると考えられる。

4.3.スピノーダル分解時の拡散に伴う化学ポテンシャル計算による動力学的解明
薄膜内部の相分離を考えるために、フェーズフィールド法を用いた。

本来はSrTiO₃とSr過剰SrTiO₃中に含まれるSrO二重層との相分離を考えるべきであるが、計算上パラメータを決定することが難しい。そのこのため今回は、A相: SrTiO₃とB相: SrOについて、初期組成の均一なAB合金と仮定して計算を行った。系の全自由エネルギーの勾配から、組成場の時間発展が計算される。図10はSr/Ti=1.4, 温度700°C, 拡散の活性化エネルギー1.81 eV, 外部磁場2000 Gの条件下で組成の時間発展をシミュレーションした結果である。計算領域は100 nm四方とした。シミュレーション結果から、超格子構造が形成されていることが分かる。すなわち、スピノーダル分解による自発的な超格子の生成が計算機シミュレーションによって再現できることが明らかになった。図11は成膜温度を変化してシミュレーションを繰り返すことで得られた超格子周期のアレニウスプロットである。この図からスピノーダル分解を引き起こすup-hill拡散の活性化エネルギーとして0.49 eVが得られた。この値は実験的に得られた0.25 eVと近い。このことはフェーズフィールド法によるシミュレーションは定性的のみならず定量的にも正しいことを示唆する。

参考文献

- [1] N. Wakiya *et al.*, *NPG Asia Mater.*, **8** (2016) e279
- [2] N. Wakiya *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **432** (2017) 391
- [3] J.H. He *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 056105
- [4] C. Q. Chen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **96** (2010) 073103
- [5] L. Dirnberger *et al.*, *Appl. Phys. A*, **59** (1994) 311

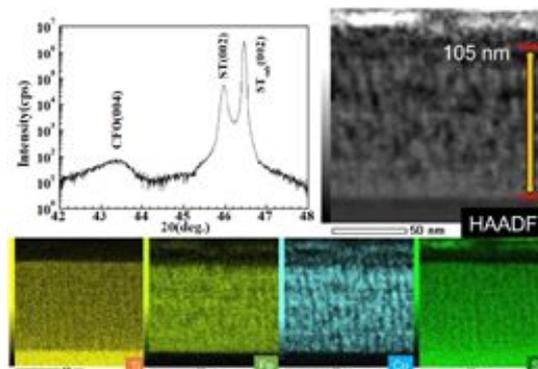


図8 ST(001)基板上に磁場中で作製したST-CFO (62mol%-38mol%) 薄膜のX線回折図形、STEM像およびEDS像

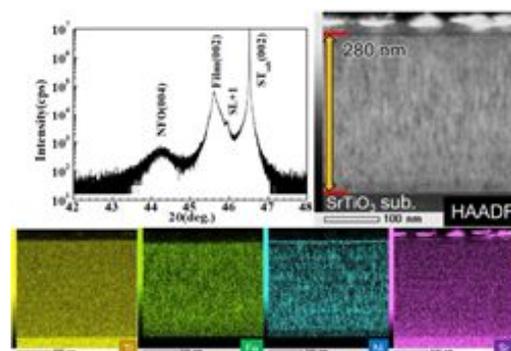


図9 ST(001)基板上に磁場中で作製したST-NFO (49mol%-51mol%)薄膜のX線回折図形、STEM像およびEDS像

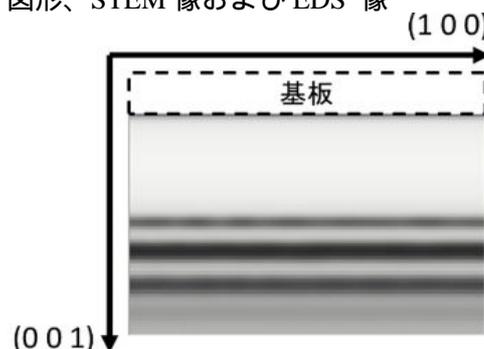


図10 フェーズフィールド法を用いた自発的相分離のシミュレーションにより再現された超格子構造

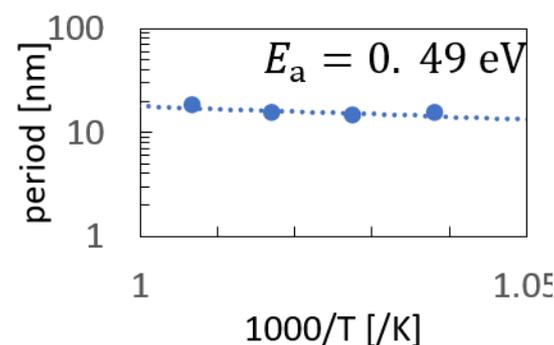


図11 シミュレーションにより得られた超格子の周期と成膜温度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 脇谷 尚樹	4. 巻 28
2. 論文標題 ダイナミックオーロラPLD法により作製したセラミックス薄膜の磁場誘起スピノーダル分解	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J Soc. Inorg. Mater. Jpn.	6. 最初と最後の頁 92-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahiko Kawaguchi, Jumpei Suzuki, Naonori Sakamoto, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya	4. 巻 129
2. 論文標題 As-grown Mn3CuN thin films with high crystallinity prepared by dynamic aurora pulsed laser deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Ceram. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahiko Kawaguchi, Mayu Yoshida, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya	4. 巻 129
2. 論文標題 Development of Dynamic Aurora PLD Equipped with RHEED and Effects of Magnetic Fields on Room-Temperature Epitaxial Growth of NiO Thin Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Ceram. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahiko Kawaguchi, Takeshi Kawai, Takuma Hiraiwa, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya	4. 巻 129
2. 論文標題 Spontaneous Superlattice Formation and Electrical Properties of Sr-excess SrTiO3 Thin Film Deposited on SrTiO3(101) by Dynamic Aurora PLD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Ceram. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 457-463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Ishigami, Takahiko Kawaguchi, Naonori Sakamoto, Shenglei Che, Nobuyoshi Koshida, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya	4. 巻 128
2. 論文標題 Dynamic Aurora PLD with Si and Porous Si to Prepare ZnFe ₂ O ₄ Thin Films for Liquefied Petroleum Gas Sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Ceram. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 457-463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.20010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Harinarayan Das, Nipa Debnath, Takashi Arai, Takahiko Kawaguchi, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya	4. 巻 30
2. 論文標題 Superparamagnetic magnesium ferrite/silica core-shell nanospheres: A controllable SiO ₂ coating process for potential magnetic hyperthermia application	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Adv. Powder Technol.	6. 最初と最後の頁 3171-3181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2019.09.026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takanori Kiguchi, Yumiko Kodama, Takumi Shimizu, Takahisa Shiraishi, Naoki Wakiya, and Toyohiko J. Konno	4. 巻 58
2. 論文標題 Interface structure of Pb(Zr,Ti) _{0.3} MgO(001) epitaxial thin film in early stage of Stranks-Krastanov growth mode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SLLA08/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3b13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sridevi Meenachisundaram, Hironori Mori, Takahiko Kawaguchi, Parthasarathi Gangopadhyay, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Chellamuthu Muthamizhchelvan, Suruttaiyudaiyar Ponnusamy, Hisao Suzuki, and Naoki Wakiya	4. 巻 787
2. 論文標題 Magnetoelectric effect in Free-standing Multiferroic Thin Film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Alloy Compd.	6. 最初と最後の頁 1128-1135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2019.02.135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nipa Debnath, Takahiko Kawaguchi, Harinarayan Das, Shogo Suzuki, Wataru Kumasaka, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya	4. 巻 19
2. 論文標題 Magnetic-field-induced phase separation via spinodal decomposition in epitaxial manganese ferrite thin films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sci. Technol. Adv. Mater.	6. 最初と最後の頁 507-516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14686996.2018.1482520	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 A. S. Kamzin, H. Das, N. Wakiya, A. A. Valiullin	4. 巻 60
2. 論文標題 Magnetic Core/Shell Nanocomposites MgFe2O4/SiO2 for Biomedical Application: Synthesis and Properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Solid State	6. 最初と最後の頁 1752-1761
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S1063783418090147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 A. S. Kamzina, N. Wakiya	4. 巻 60
2. 論文標題 Mossbauer Studies of Composites Hydroxyapatite/Ferroxides	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Solid State	6. 最初と最後の頁 2471-2478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S1063783418120144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Padarti, Jeevan Kumar; Jupalli, Taruna Teja; Chie Hirayama, Mamoru Senna, Takahiko Kawaguchi, Naonori Sakamoto, Naoki Wakiya, Hisao Suzuki	4. 巻 19
2. 論文標題 Low-temperature processing of Garnet-type ion conductive cubic Li7La3Zr2O12 powders for high performance all solid-type Li-ion batteries	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Taiwan Inst. Chem. Eng.	6. 最初と最後の頁 507-516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jtice.2018.02.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Naoki Wakiya, Takahiko Kawaguchi, Naonori Sakamoto, Hisao Suzuki
2. 発表標題 Preparation and property of thin film gas sensor for combustive gases
3. 学会等名 ICONN2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 茉由, 川口 昂彦, 坂元 尚紀, 鈴木 久男, 脇谷 尚樹
2. 発表標題 RHEEDを用いたダイナミックオーロラPLD法によるチタン酸ストロンチウム薄膜の自発的相分離挙動の分析
3. 学会等名 MRM Forum 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 茉由, 川口 昂彦, 坂元 尚紀, 篠崎 和夫, 鈴木 久男, 脇谷 尚樹
2. 発表標題 RHEEDを用いたダイナミックオーロラPLD法チタン酸ストロンチウム薄膜における自発的相分離のその場観察
3. 学会等名 第36回日本セラミックス協会関東支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Wakiya, Takahiko Kawaguchi, Akira Sato, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki
2. 発表標題 Electrical properties of Pb(Zr,Ti)O ₃ thin film deposited on porous Si
3. 学会等名 ICMAT2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiko Kawaguchi, Jumpei Suzuki, Tomoharu Shirai, Naonori Sakamoto, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya
2. 発表標題 Epitaxial growth of anti-perovskite Mn ₃ CuN thin films by Dynamic Aurora PLD
3. 学会等名 PACRIM13 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiko Kawaguchi, Futa Aoshima, Mayuko Sugita, Naonori Sakamoto, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya
2. 発表標題 Thin film growth of perovskite oxynitrides by Dynamic Aurora PLD
3. 学会等名 PACRIM13 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Takashima, Nipa Debnath, Takahiko Kawaguchi, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya
2. 発表標題 Modification of Perpendicular Magnetic Anisotropy in Nickel Ferrite Thin Films
3. 学会等名 PACRIM13 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mayu Yoshida, Takahiko Kawaguchi, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya
2. 発表標題 RHEED Observation on Phase Separation in Sr-Ti-O Epitaxial Thin Film by Dynamic Aurora PLD
3. 学会等名 PACRIM13 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Takashima, Takanori Kiguchi, Takahiko Kawaguchi, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki, Naoki Wakiya
2. 発表標題 Spontaneous Phase Separation in Composite Thin Films of Strontium Titanate and Ferrites by Dynamic Aurora PLD
3. 学会等名 PACRIM13 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Wakiya, Takuma Hiraiwa, Takahiko Kawaguchi, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki, Hisao Suzuki
2. 発表標題 Effect of Orientation of Substrate on Spontaneous Superlattice Formation and Electrical Properties of Sr-Ti-O Thin Film deposited by Dynamic Aurora PLD
3. 学会等名 PACRIM13 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島 圭佑、坂元 尚紀、木口 賢紀、川口 昂彦、篠崎 和夫、鈴木 久男、脇谷 尚樹
2. 発表標題 ダイナミックオーロラPLD法によるコバルトフェライト添加チタン酸ストロンチウム薄膜における自発的相分離
3. 学会等名 日本セラミックス協会2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島 圭佑、Debnath Nipa、川口 昂彦、坂元 尚紀、鈴木 久男、脇谷 尚樹
2. 発表標題 ダイナミックオーロラPLD 法によるチタン酸ストロンチウム薄膜の自発的超格子生成におよぼすコバルトフェライトの添加効果
3. 学会等名 第 38 回エレクトロセラミックス研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平岩 卓磨、川口 昂彦、坂元 尚紀、鈴木 久男、脇谷 尚樹
2. 発表標題 ダイナミックオーロラPLD 法によるチタン酸ストロンチウム薄膜の[011]方向の自発超格子構造の生成と誘電特性
3. 学会等名 第 38 回エレクトロセラミックス研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Meenachisundaram, T. Kawaguchi, N. Sakamoto, K. Shinozaki, M. Chellamuthu, S. U. Ponnusamy, H. Suzuki, N. Wakiya
2. 発表標題 Enhanced Ferroelectric Effect in Free-Standing PZT Thin Film by RF Sputtering
3. 学会等名 IFAAP2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中日新聞2021年1月21日 静岡大・中日新聞連携講座 『まだ見ぬ材料 生む技術 人工オーロラで物質変化 工学部 脇谷尚樹教授』掲載
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川口 昂彦 (Kawaguchi Takahiko) (30776480)	静岡大学・工学部・助教 (13801)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鈴木 久男 (Suzuki Hisao) (70154573)	静岡大学・電子工学研究所・教授 (13801)	
研究分担者	坂元 尚紀 (Sakamoto Naonori) (80451996)	静岡大学・電子工学研究所・准教授 (13801)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関