

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02435

研究課題名(和文) エピタキシャル薄膜を用いた無限構造ニッケル酸塩における異原子価置換効果の解明

研究課題名(英文) Investigation on aliovalent doping effect in nickelates with infinite structures using epitaxial thin films

研究代表者

松田 晃史 (Matsuda, Akifumi)

東京工業大学・物質理工学院・准教授

研究者番号：80621698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,500,000円

研究成果の概要(和文)：Ruddlesden-Popper型ニッケル酸塩 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 結晶について $\text{La}_3\text{Ni}_{207}(001)[110]//\text{LaAlO}_3(100)[001]$ 薄膜($n=2$, $\text{Ni}^{2.5+}$)、 $\text{La}_4\text{Ni}_{3010}(001)[110]//\text{NdGaO}_3(110)[001]$ 薄膜($n=3$, $\text{Ni}^{2.67+}$)を創製し、(Sn, Hf)ドーブおよび還元による半導体的導電性の発現と制御を見出した。 $\text{LaNiO}_3(100)[001]//\text{LaAlO}_3(100)[010]$ 薄膜($n=$, Ni^{3+})薄膜では電子ドーブおよび膜厚減少に伴う金属的導電性向上、 $\text{LaNiO}_2(100)$ 結晶(Ni^{+})へのトポケミカル還元を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

層状ペロブスカイトRuddlesden-Popper型(RP型、 $\text{An}+1\text{BnO}_{3n+1}$)はab面内に無限の広がりを持ち、層数 n による導電性制御、関連材料の超伝導発現も見出された。しかし、 $n=2$ 以上の多層結晶における構造と伝導特性の相関や、異原子価置換による効果は、その銅酸化物系と異なる機構に関する起源の解明が期待されている。本研究は、層状型ニッケル酸塩において n 選択的にエピタキシャル薄膜を創製し、新たに4価原子置換による構造・導電性変化、また二次元構造をもつ結晶へのトポケミカル還元を見出すことにより、Ruddlesden-Popper型結晶の異原子価置換による物性制御と材料設計に迫った。

研究成果の概要(英文)：Ruddlesden-Popper phase crystals (RP type, $\text{An}+1\text{BnO}_{3n+1}$) have layered perovskite structures with, in which conductivity control by the layer number “ n ” and superconductivity in related materials have been found. However, the correlation between structures and conduction properties in multilayer crystals with $n=2$ or more and the effect of aliovalent substitution are expected to be elucidated regarding the mechanism different from that of its cuprate system. In this research, epitaxial thin films of $\text{La}_3\text{Ni}_{207}(001)[110]//\text{LaAlO}_3(100)[001]$ ($n=2$, $\text{Ni}^{2.5+}$) and $\text{La}_4\text{Ni}_{3010}(001)[110]//\text{NdGaO}_3(110)[001]$ ($n=3$, $\text{Ni}^{2.67+}$) was developed, and control of their semiconducting conductivity by (Sn, Hf)-doping and reduction was found. $\text{LaNiO}_3(100)[001]//\text{LaAlO}_3(100)[010]$ ($n=$, Ni^{3+}) epitaxial thin films were also developed. Increase in metallic conductivity via electron doping and thickness reduction as well as further topochemical reduction to $\text{LaNiO}_2(100)$ crystals (Ni^{+}) were obtained.

研究分野：機能性セラミックス 無機材料化学 エピタキシャル薄膜

キーワード：ニッケル酸塩 エピタキシャル薄膜 異原子価置換 層状ペロブスカイト構造 Ruddlesden-Popper構造 トポケミカル相変態 水素還元

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の学術的背景

ニッケル酸塩系超伝導材料

近年、ペロブスカイト前駆体を還元し二次元の無限層構造をもつニッケル酸塩 $\text{Nd}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{NiO}_2$ の超伝導 ($T_c \sim 15 \text{ K}$) が見出された。平面正方 NiO_4 配位構造をとる NiO_2 無限層において $d^9 \text{Ni}^{1+}$ を得て、 $d_{x^2-y^2}$ 軌道内の正孔と軌道分極を生成したとが考えられる。二次元構造の広がりの特異的伝導に寄与する一方、面内での反強磁性カップリングを示さず、 CuO_2 層状構造に基づく銅酸化物系超伝導材料における異なる機構が興味を惹いている。

二次元 NiO_2 無限層構造ニッケル酸塩への展開

では、 ab 面内に無限の広がりをもつ層状ペロブスカイト Ruddlesden-Popper 型 ($\text{A}_{n+1}\text{B}_n\text{O}_{3n+1}$)、層間 O 原子を取り除き無限層 NiO_2 構造をもつ T'型 ($\text{A}_{n+1}\text{B}_n\text{O}_{3n-1}$) ではどうか(図 1)。RP 型のペロブスカイト層数 n の増大による導電性の向上を示す報告もあり、このような系でも同様の伝導を発現するか、構造と物性の相関を解き明かす上で重要である。RP 型では $\text{Ca}^{2+}:\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ ($n=2$) や $\text{Sr}^{2+}:\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ ($n=3$) など、正孔ドーピングによる電子構造制御について計算科学・実験的な研究例がある。

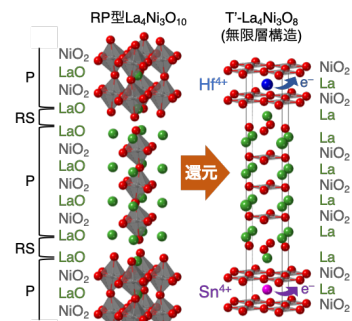


図 1 La-Ni-O 系の RP 型および還元された T'型の結晶構造。

(2) 研究課題の核心を為す学術的「問い」

多層構造 Ruddlesden-Popper 型 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 、および還元された T'型 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n-1}$ 等の結晶 ($n \geq 2$) への 4 価カチオン等異原子価置換や、正孔でなく電子ドーピングによる構造・物性への効果は依然として多くが不明である。

そこで本研究では、研究課題の核心をなす学術的「問い」として、「二次元・一次元 Ni-O 構造をもつニッケル酸塩における構造と伝導特性など物性との相関はどのようなモデルで理解され、どのような制御を受けるのか」を設定し、異方性の高い特異な結晶構造に起因する構造・物性相関の解明に、これまでにないこうした系のエピタキシャル薄膜を創製し、異原子価置換と電子ドーピングによる Ni の局所構造・電子構造に焦点をあてて取り組む。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的

- La-Ni-O 系 Ruddlesden-Popper 相 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n \geq 2$) において La^{3+} イオンを 4 価カチオンにより置換したエピタキシャル薄膜の創製。
- $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 結晶を前駆体とした平面正方配位 NiO_4 型の無限層構造を有する $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n-1}$ ($n \geq 2$) エピタキシャル薄膜の創製。
- La^{3+} の異原子価イオン置換が物性に及ぼす影響を見出し、異原子価置換による Ruddlesden-Popper 型および T'型結晶における構造・物性制御と材料設計指針に迫る。

(2) 学術的独自性と創造性

独自性 本研究は、研究代表者が見出した 4+イオン置換型 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 、 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ エピタキシャル薄膜を用いて行う研究であり、蓄積された知見やデータを利用できる点において先進的である。さらに、ニッケル酸塩の三次元構造に囚われず低次元の無限層構造を用いた結晶・電子構造制御の理解を試みるアプローチは、これまで高温超伝導の主役であった CuO_2 系から、多様な酸化物系への展開を提示するものであり、独創的である。

創造性 本研究は、トポタキシャル還元法を創成し、機能性セラミックス薄膜合成の研究領域を切り開き、異原子価ドーピングの二次元 NiO_2 無限層構造を有するエピタキシャル構造を創製する。また、その電子ドーピング効果を明らかにすることは、新奇な超伝導材料創製など、酸化物エレクトロニクス分野全体への波及効果が期待できる創造的な研究である。

3. 研究の方法

次の方法を用いて Ruddlesden-Popper 型結晶、T'型結晶のエピタキシャル薄膜を創製した。

- (1) パルスレーザー堆積(PLD)により、 NdGaO_3 (110)および LaAlO_3 (001)等の単結晶基板上への薄膜成長と、 O_2 中の熱処理・固相エピタキシーを併用した Ni 酸化状態と層状構造制御により層状ペロブスカイト型 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n \geq 2$) エピタキシャル薄膜の創製。ドーパントを含まない pure および (Hf^{4+} , Sn^{4+})-doped である $\text{La}_{3.95}(\text{Sn}_{0.025}\text{Hf}_{0.025})\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ ターゲットを用いた。
- (2) 続いて $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ エピタキシャル薄膜について、研究代表者が見出したエピタキシャル薄膜をテンプレートとして配向性を維持するトポタキシャル還元、すなわち固相還元エピタキシープロセス (A.Matsuda et al., Thin Solid Films 516 (2008) 3873.) により還元することにより、平面正方 NiO_2 面をもつ無限層構造 T- $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n-1}$ エピタキシャル薄膜を創製した。

4. 研究成果

(1) Ruddlesden-Popper 型 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ ($n=2$)

図2は、 LaAlO_3 (001)基板上に $T = 680^\circ\text{C}$ 、 $p\text{O}_2 = 10 \text{ Pa}$ 中において PLD 合成した pure および (Sn, Hf)-doped La-Ni-O 系薄膜の XRD 測定結果であり、PLD 成膜におけるドーパントの影響を示した。図2(a)は基板面直方位の $2\theta/\omega$ 測定結果であり、pure および (Sn, Hf)-doped 薄膜のいずれでも、 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 結晶相の(001)配向成長が得られた。また図2(b)に示した LaAlO_3 110 および $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 206 回折を検出した ϕ 測定の結果、 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (001)[110]// LaAlO_3 (100)[001]の関係をもつエピタキシャル薄膜が得られたと分かった。図2(a)では(Sn, Hf)-doped 薄膜において顕著なピークシフト等の変化が見られない一方、FWHM のわずかな増大、すなわち結晶性の低下がみられた。Sn および Hf ドーパントの格子間侵入が示唆された。

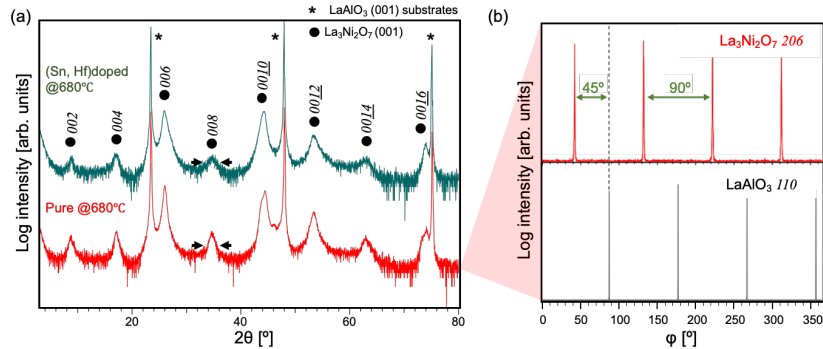


図2 LaAlO_3 (001)基板上に PLD 成膜($T = 680^\circ\text{C}$ 、 $p\text{O}_2 = 10 \text{ Pa}$)された pure および (Sn, Hf)-doped La-Ni-O 薄膜の XRD $2\theta/\omega$ 測定結果、および(b) XRD ϕ 測定結果。

図3は、PLD による $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (001)エピタキシャル薄膜、および還元アニールを行った薄膜の XRD $2\theta/\omega$ 測定結果である。図3(a)は超高真空中($\sim 3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$)、 500°C において、pure および (Sn, Hf)-doped 薄膜をそれぞれアニールした結果であり、いずれの薄膜も超高真空アニール後は $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 00L に帰属する回折ピークが高角側にシフトし、c 軸長の収縮が示された。図3(b)は H_2 雰囲気中($p\text{H}_2 = 1 \text{ atm}$ 、 100 sccm)において、 $T = 350^\circ\text{C}$ および $T = 500^\circ\text{C}$ でアニールした結果である。 500°C では熱分解による La_2O_3 異相析出がみられた一方、 350°C では、超高真空中の処理と同様に $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 00L 回折ピークが高角側にシフトした。超高真空中および大気圧 H_2 中いずれの熱処理においても高い c 軸配向性の維持とともに、最大で約 1.4% の 00L 面間隔収縮が示され、 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 結晶相へのトポケミカル相変態を得るための酸素脱離による静電反発が示唆された。

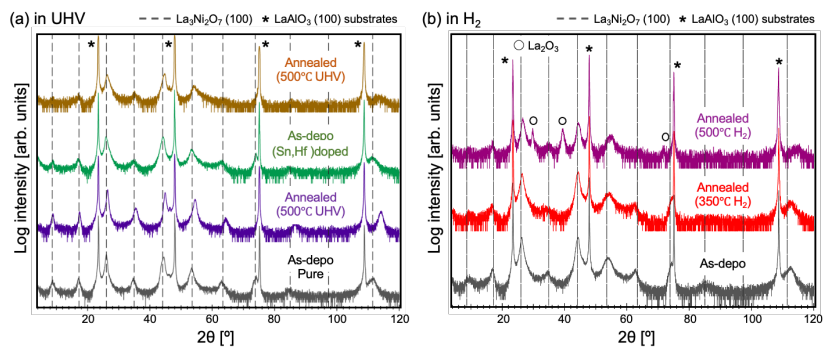


図3 LaAlO_3 (001)基板上に(a) PLD($T = 680^\circ\text{C}$ 、 $p\text{O}_2 = 10 \text{ Pa}$)、真空熱処理($T = 500^\circ\text{C}$)された pure および (Sn, Hf)-doped La-Ni-O 薄膜の XRD $2\theta/\omega$ 測定結果、および(b) PLD($T = 680^\circ\text{C}$ 、 $p\text{O}_2 = 10 \text{ Pa}$) および H_2 アニール($T = 350^\circ\text{C}$ 、 500°C 、 $p\text{H}_2 = 1 \text{ atm}$)された La-Ni-O 薄膜の XRD $2\theta/\omega$ 測定結果。

図4は、pure および (Sn, Hf)-doped $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (001)薄膜の抵抗率-温度(ρ - T)特性であり、pure 薄膜の $\sim 1.2 \text{ m}\Omega\text{cm}$ に対し、(Sn, Hf)-doped 薄膜では $\sim 6.4 \text{ m}\Omega\text{cm}$ の室温抵抗率であった。 Ca^{2+} ドーパの先行研究(*J. Alloys Compd.*, **367** (2004) 251-254.)で示された金属的挙動($T < 200 \text{ K}$)に対し、(Sn, Hf)-doped 薄膜では測定温度全域にわたり半導体的挙動がみられ、キャリア生成に対して散乱効果が大いことが示唆された。超高真空中および大気圧 H_2 中のアニールでは、それぞれ $5.8 \times 10^{-1} \Omega\text{cm}$ および $4.9 \times 10^1 \Omega\text{cm}$ であり、還元力の大きいアニールほど薄膜抵抗率が増大した。これは既往研究(*J. Phys. Soc. Jpn.*, **65** (1996) 3978-3982.)において示された酸素欠損起因の導電性変化と一致し、 H_2 アニールによる酸素脱離が示された。これは構造変化とも合致し、アニールにおける還元雰囲気および温度条件の最適化による T'構造へのトポケミカル相変態に関する知見が得られた。

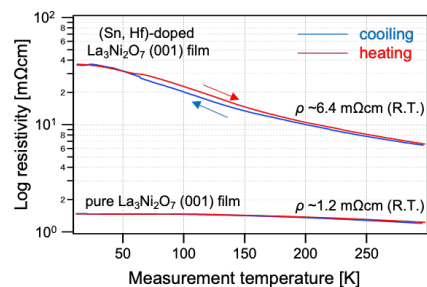


図4 Pure および (Sn, Hf)-doped $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (001)エピタキシャル薄膜の ρ - T 特性。

(2) Ruddlesden-Popper 型 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ ($n=3$)

図 5 は成膜温度および成膜酸素雰囲気を変化させた PLD 成膜後に、 $T=950^\circ\text{C} \cdot p\text{O}_2=1 \text{ atm}$ でアニールした薄膜の XRD 測定結果である。PLD 後では $T=680^\circ\text{C} \cdot p\text{O}_2=10 \text{ Pa}$ (中流量) においておよそ単相の $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ (001) 配向成長が得られ、大気圧 O_2 アニールによる高結晶性薄膜が得られた(図 5(a))。NdGaO₃ (110) 基板との格子不整合は $\sim 0.39\%$ と小さく、回折角は理論値とよく一致した。図 5(b) の XRD ϕ 測定結果では、 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ (001)[110] // NdGaO₃ (110)[001] の関係をもつエピタキシャル薄膜が得られたと分かった(図 5(c))。一方で、 $T=700^\circ\text{C}$ で PLD された薄膜においては同様の結晶性向上はみられず、異相による $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 結晶成長の阻害が示唆された。

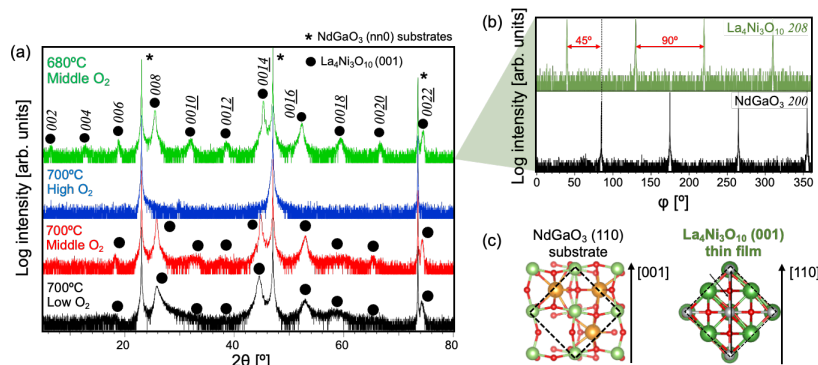


図 5 (a) PLD 成膜後、大気圧 O_2 中・ 950°C においてアニールされた薄膜の XRD $2\theta/\omega$ 測定結果、(b) PLD および O_2 アニール後の薄膜の XRD ϕ 測定結果、および(c) エピタキシャル関係模式図。

図 6 (a) は、(Sn, Hf)-doped 薄膜と同様に pure 薄膜について $T=680^\circ\text{C} \cdot p\text{O}_2=10 \text{ Pa}$ (中流量) における PLD 後に $T=950^\circ\text{C} \cdot p\text{O}_2=1 \text{ atm}$ で大気圧アニールした XRD $2\theta/\omega$ 測定結果である。Pure 薄膜では PLD 後において $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ (001) 相に加え $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (001) 異相がみられ、大気圧 O_2 アニール後には結晶性が低減した。PLD 後において単相 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ (001) エピタキシーを得ることが、アニールによる結晶性・配向性制御において重要であることが示された。4 価ドーパント導入が酸素欠損を抑制し、相対的に高い Ni 価数および構造が維持された可能性が示唆された。図 6(b) は、(Sn, Hf)-doped $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ (001) エピタキシャル薄膜の逆格子マップであり、NdGaO₃ (110) 基板結晶に面内で強く拘束されてエピタキシーしており、エピタキシャル歪とドーピングにより a 軸+0.29%、 b 軸-0.07%、 c 軸+0.45% の格子長変化を見出した。既往研究(*J. Phys. Soc. Jpn.*, **65** (1996) 3978–3982.) に対して、本研究で得られた (Sn, Hf)-doped $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ (001) エピタキシャル薄膜の ρ - T 特性では、測定温度域にわたり半導体的な抵抗率の温度依存性を示し、酸素欠損による平均価数 $\text{Ni}^{2.67+}$ から Ni イオンの還元が示唆された。また、(Sn, Hf) ドーパントによる Ni イオンの還元や、電子キャリア導入にともなう散乱増大にもよる影響も考慮されるべきである。

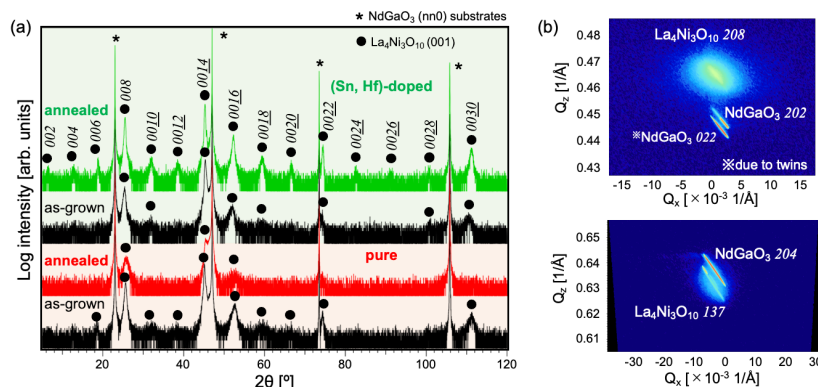


図 6 (a) NdGaO₃ (110) 基板上 pure および (Sn, Hf)-doped $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 薄膜の PLD 後および大気圧 O_2 中・ 950°C アニール後の XRD $2\theta/\omega$ 測定結果、および(b) $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ (001) 薄膜の逆格子マップ。

(3) LaNiO_3 ($n=\infty$)

LaAlO_3 (100) 基板上の La-Ni-O 系薄膜 PLD 成長において、成膜 O_2 圧が結晶相に及ぼす影響では、 $p\text{O}_2 < 10 \text{ Pa}$ では低 Ni 価数の La_2NiO_4 (Ni^{2+}) や $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ ($\text{Ni}^{2.5+}$) などが得られた一方、 $T=680^\circ\text{C} \cdot p\text{O}_2 \sim 50 \text{ Pa}$ 以上は高結晶性 LaNiO_3 (001) 単相薄膜が得られた。さらに基板温度である $T \geq 700^\circ\text{C}$ では熱分解が生じた。図 7 は、(Sn, Hf) ドーピングによる

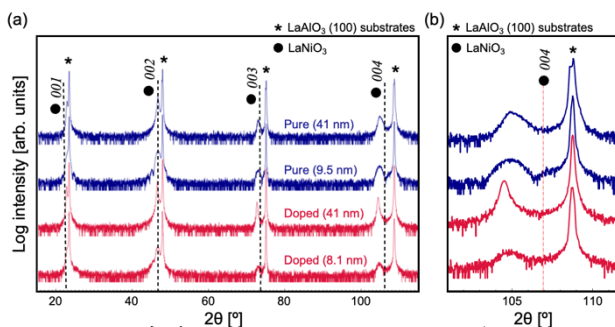


図 7 PLD 合成 ($T=680^\circ\text{C} \cdot p\text{O}_2=50 \text{ Pa}$) された、pure および (Sn, Hf)-doped La-Ni-O 薄膜の (a) XRD $2\theta/\omega$ 測定結果と (b) LaNiO_3 004 回折近傍の拡大図。

LaNiO₃ (001)エピタキシャル薄膜へ影響を評価した XRD 2θ/ω 測定結果、および構造の模式図である。比較のため、pure および(Sn, Hf)-doped LaNiO₃ について 2 水準の膜厚をもつ薄膜の結果を示した。Pure および(Sn, Hf)-doped LaNiO₃ (001)薄膜いずれも回折ピークが低角側へシフトし、pure 薄膜では~1.2%、また(Sn, Hf)-doped 薄膜では~1.5%、面直 c 軸方位の格子伸張がみられた。LaAlO₃ ($a = 3.82 \text{ \AA}$)に対し LaNiO₃ ($a = 3.84 \text{ \AA}$)と大きく、薄膜は単結晶基板から面内に圧縮、面直に伸張するエピタキシャル歪みが導入される。さらに(Sn, Hf)-doped LaNiO₃ (001)薄膜ではドーパント置換に誘起される静電反発などの効果も示唆された。

図 8 は、得られた LaNiO₃ エピタキシャル薄膜の導電性に及ぼすドーピング効果について、抵抗率—温度依存性を測定した結果である。本研究において PLD 合成された LaNiO₃ (001)エピタキシャル薄膜は、いずれも既往研究と同様の金属的導電性を示した。図 8(a)は膜厚のおよそ等しい pure 薄膜と(Sn, Hf)-doped 薄膜の比較であり、4 価ドーパントによる抵抗率低減を見出した。Sn⁴⁺ および Hf⁴⁺によるカチオン置換がもたらした格子伸張による結晶歪の増大、および 4 価ドーパントとして機能し、電荷キャリアとして電子が導入されたことを示唆した。また図 8(b)には、pure および(Sn, Hf)-doped 薄膜について抵抗率の膜厚依存性を示した。膜厚減少に伴う抵抗率減少、すなわち導電率の増大が見出された。Fowlie らは、同様の層状ペロブスカイト酸化物物において、エピタキシャル歪が導入された基板界面近傍(~2 nm)において高い導電性を、表面においてもっとも低い導電性を示すことを見出した(J. Fowlie et al., *Adv. Mater.*, **29** (2017) 1605197.)。本研究においても、相対的にエピタキシャル歪みを多く含む膜厚が小さい薄膜においてより高い導電性が得られており、よく合致する結果である。

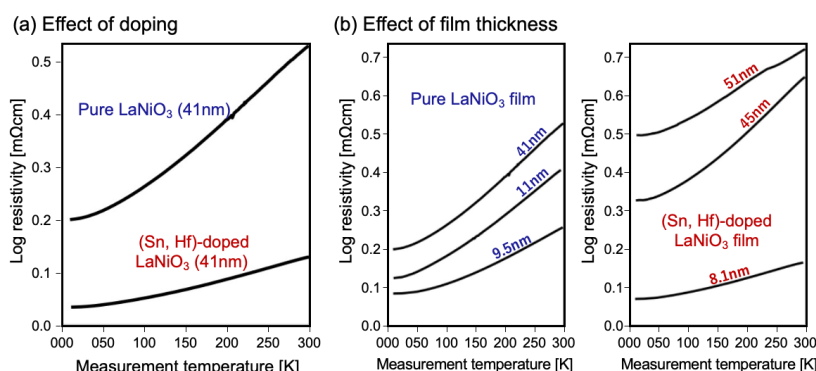


図 8 得られた LaNiO₃ (001)エピタキシャル薄膜の抵抗率—温度特性 ; (a) (Sn, Hf)ドーピングによる影響、および(b) pure 薄膜、(Sn, Hf)ドープ薄膜における膜厚依存性。

図 9 は、PLD 合成された LaNiO₃ (001)エピタキシャル薄膜を $T = 380^\circ\text{C} \cdot p\text{H}_2 = 1 \text{ atm}$ の大気圧アニーリングしたときの構造変化について XRD 測定した結果である。ここでは、15 min および 180 min (3h) の H₂ 雰囲気中アニーリングを行った。図 9(a)は XRD 2θ/ω 測定結果であり、H₂ アニーリング後においては PLD 合成された薄膜に対して、回折ピークはいずれも高角度側にシフトし、面直方位の収縮が示され、酸素脱離により 6 配位 Ni からの構造変化が示唆された。図 9(b)は薄膜の面内方位の回折を 2θ/φ 測定(中分解能)により検出した結果である。H₂ アニーリングされた薄膜では、PLD 直後にはみられなかった LaNiO₂ 011 回折が生じた。すなわち大気圧 H₂ アニーリングによる LaNiO₃ (001)から LaNiO₂ (100)への配向面変化を伴う還元、平面正方配位型 Ni からなる LaNiO₂ エピタキシャル薄膜が創製された(図 9(c))。

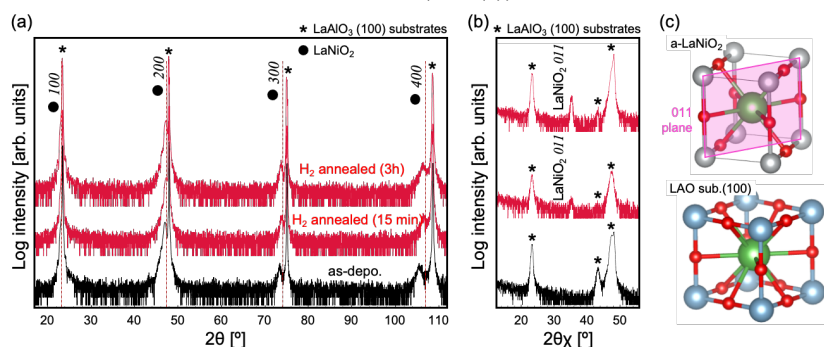


図 9 PLD 成膜後、 $T = 380^\circ\text{C} \cdot p\text{H}_2 = 1 \text{ atm}$ において還元アニーリングされた LaNiO₃ (001)エピタキシャル薄膜の(a) XRD 2θ/ω 測定結果と(b) XRD 面内 2θ/φ 測定結果、および(c) LaAlO₃ 基板上における還元 LaNiO₂ 相のエピタキシャル関係模式図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kenta Kaneko, Tomoaki Oga, Satoru Kaneko, Takayoshi Katase, Mamoru Yoshimoto and Akifumi Matsuda	4. 巻 131
2. 論文標題 Buffer-free epitaxial growth of ZnO(0001) thin films at room temperature by tetramethylammonium hydroxide pretreatment -Al ₂ O ₃ (0001) substrates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2109/jcersj2.131.P8-1	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kenta Kaneko, Yuki Goto, Tomoaki Oga, Satoru Kaneko, Mamoru Yoshimoto, Akifumi Matsuda
2. 発表標題 Vacuum ultraviolet excimer light-induced electric conductivity improvement of epitaxial NiO thin films grown at room-temperature
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akifumi Matsuda, Shohei Hisatomi, Yuki Goto, Satoru Kaneko, Mamoru Yoshimoto
2. 発表標題 Heteroepitaxy and Property of Triple-Layered Ruddlesden-Popper Phase $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ with Tetravalent-Dopants
3. 学会等名 2021 MRS Fall Meeting & Exhibit（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenta Kaneko, Tomoaki Oga, Hiroki Shoji, Shohei Hisatomi, Satoru Kaneko, Mamoru Yoshimoto, and Akifumi Matsuda
2. 発表標題 Vacuum-Ultraviolet Excimer Light Derived Conductivity and Structural Modification of Pure NiO Epitaxial Thin Films
3. 学会等名 2021 MRS Fall Meeting & Exhibit（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤祐己, 久富翔平, 大賀友瑛, 金子智, 吉本護, 松田晃史
2. 発表標題 PLD法によるLan+1Nin03n+1エピタキシャル薄膜合成と異原子価ドーピングの影響
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子健太, 庄司拓貴, 大賀友瑛, 金子智, 吉本護, 松田晃史
2. 発表標題 真空紫外光照射によるNiOエピタキシャル薄膜の導電性制御と結晶配向面依存性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子健太, 庄司拓貴, 大賀友瑛, 金子智, 吉本護, 松田晃史
2. 発表標題 エピタキシャルNiO薄膜へのエキシマ真空紫外光照射による導電性制御・構造変化
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2022年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤祐己, 久富翔平, 大賀友瑛, 金子健太, 金子智, 吉本護, 松田晃史
2. 発表標題 SrTiO3基板上NiO系薄膜のPLD合成と大気圧酸素アニール効果
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久富翔平, 後藤祐己, 大賀友瑛, 金子智, 吉本護, 松田晃史
2. 発表標題 異原子価ドーブ層状La-Ni-O系エピタキシャル薄膜のPLD合成および特性評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子健太, 庄司拓貴, 大賀友瑛, 金子智, 吉本護, 松田晃史
2. 発表標題 エピタキシャルNiO薄膜の物性および構造に及ぼすエキシマ真空紫外光照射の影響
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子健太, 庄司拓貴, 金子智, 吉本護, 松田晃史
2. 発表標題 真空紫外光照射によるNiOエピタキシャル薄膜の構造・物性への影響
3. 学会等名 日本セラミックス協会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akifumi Matsuda, Tomoaki Oga, Shohei Hisatomi, Nobuo Tsuchimine, Satoru Kaneko, and Mamoru Yoshimoto
2. 発表標題 Effect of aliovalent doping on epitaxial growth, structure and properties of triple-layered Ruddlesden-Popper phase lanthanum nickelate
3. 学会等名 2020 MRS Spring/Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久富翔平, 生田貴大, 大賀友瑛, 金子智, 松田晃史, 吉本護
2. 発表標題 PLDおよびO2アニールによる異原子価ドーブ層状ペロブスカイト型La-Ni-O薄膜の作製
3. 学会等名 日本セラミックス協会 2021年年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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