

令和元年10月10日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21338

研究課題名（和文）ホモロガスIn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO薄膜の超格子形成機構とその熱電特性の解明研究課題名（英文）Formation mechanism of homologous In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub> superlattice thin films and their thermal/electrical properties

研究代表者

賈 軍軍 (Jia, Junjun)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：80646737

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：汎用性が高いガラス基板上に、高温で化学的に安定なIn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub>超格子熱電薄膜の作製が成功した。その形成メカニズムも解明した。高温においてIn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub>超格子薄膜のキャリア発生源としては酸素空孔のほかに、格子間亜鉛も寄与する。In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub>超格子薄膜の熱伝導率は2 W/mK以下で、アモルファス薄膜と同程度である。第一原理計算を用いて、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub>超格子構造中のヘテロ界面及びAntisite Inによるフォノン散乱が熱伝導率への影響を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では汎用性があるガラス基板上に超格子構造薄膜の形成方法を確立でき、高分解能TEM観察とin-situ XRD測定との統合により、後焼成によるアモルファスI<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜からホモロガス構造In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>n</sub>薄膜への固相反応に関する新しい評価手法を提案した。加えて、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub>超格子薄膜の熱伝導機構を理解し、高温で薄膜中の欠陥生成・消滅機構を解明した。高温超格子熱電素子の実用化に向けて、これまで利用が困難であった高温領域の未利用熱エネルギーを効率的に回収することに役立つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We developed a new method to fabricate the In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub> thin film with superlattice structure on the glass substrate as thin-film thermoelectric materials. Our results suggested that the majority carriers originate from oxygen vacancies in the In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer and Freckle-type Zn interstitials at the temperature range of 400 to 600 °C. The superlattice structure also leads a rather low thermal conductivity (2 W/mK), which is due to the phonon scattering from the inner interface of superlattice structure and those modulated In atoms in In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub> structure.

研究分野：応用物理

キーワード：熱・電気特性 超格子構造 アモルファス In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ZnO In-situ XRD XAFS

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、高温において化学的に安定かつ高い熱電性能指数を持つホモロガス構造  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  超格子薄膜の作製及び熱電特性の評価を研究してきた。熱電発電は、自動車の排熱、地熱、温泉熱などの未利用熱エネルギーを電気エネルギーとして直接回収する技術であり、環境面から世界的に注目を集めている。現在熱電材料として主に使用される材料は  $\text{BiTe}$  系や  $\text{PbTe}$  系合金である。しかし、これらの合金は高温で酸化、分解、蒸発してしまうという問題があり、使用温度領域や寿命が限られる。そのため、環境耐久性が高い新たな酸化物材料が求められている。熱電材料の性能は、性能指数 (ZT) で評価される。

$$ZT = S^2 \times T / (\rho \times \kappa) \quad (1)$$

ここで、 $S$  はゼーベック係数、 $\rho$  は電気抵抗率、 $\kappa$  は熱伝導率、 $T$  は温度である。 $ZT > 1$  が実用化の目安とされる。式(1)より、熱電材料は電気抵抗率と熱伝導率が低く、熱起電力が大きくなければならない。現在新しい高温熱電材料として ITO など透明導電酸化物材料に注目が集まりつつある。しかし ITO は大気中かつ高温下ではキャリアの放出源である酸素欠陥が減少して、電気抵抗率の上昇を招き、結果として熱電変換効率が低下する。そのため、高温で安定な熱電材料が必要である。本研究では、図 1 に示す  $\text{InO}_2$  と  $\text{ZnO}$  が積層した超格子構造を有するホモロガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜に注目する [1]。ここで  $m$  は整数であり、 $m+1$  は  $\text{InO}_2$  層に存在する  $\text{ZnO}$  層の挿入数と考えればよい。先行研究において、 $\text{In}_2\text{O}_3$  と  $\text{ZnO}$  の粉末を原料とした固相合成法で  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  ペレットの合成がなされた [2]。しかし、このようなペレットでは充填密度や粒径、ミクロな組成の不均質などの影響を受けるために、物質そのものの電気・熱伝導特性の評価及び最大熱電性能指数の実現は困難である。

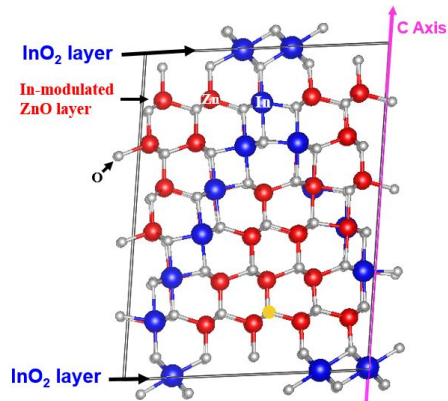


図 1、 $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_n$  のホモロガス構造 ( $n=5$ )

本研究では、直流スパッタ法を用いて、 $\text{In}_2\text{O}_3$  と  $\text{ZnO}$  のアモルファス複合酸化物薄膜を堆積し、後焼成することによって、ホモロガス構造を持つ  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の作製が成功した。膜厚方向に  $C$  軸が配向し、高い均一さと緻密さを持つホモロガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜を作製した。さらに、後焼成により高配向のホモロガス構造  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜への自発的な超格子形成メカニズムの解明及びその熱・電気特性の評価を行った。

2. 研究の目的

本研究では、ガラス基板上に高温で化学的に安定かつ高い熱電性能指数を持つ  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  酸化物超格子薄膜を作製し、その形成メカニズムの解明及び熱・電気特性の評価を目的とした。

3. 研究の方法

直流スパッタ法を用いて、 $\text{In}_2\text{O}_3$  と  $\text{ZnO}$  のアモルファス複合酸化物薄膜を堆積し、後焼成することによって、ホモロガス構造を持つ  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  超格子薄膜の作製が成功した。この超格子薄膜の形成メカニズム、及び熱・電気特性評価に関して、以下の三つ研究手法を用いて研究を進めた。

1) 透過型電子顕微鏡、In-situ XRD 及び X 線吸収微細構造測定 (XAFS) を用いて、アモルファス薄膜からホモロガス構造への形成メカニズムを解明した。

2) 高温での In-situ ホール効果測定により  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜のキャリア密度と酸素分圧の関係を測定し、高温でのキャリア発生源を明らかにした。

3) パルス光加熱サーモリフレクタンス法による  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の  $C$  軸方向の熱伝導率を定量的に測定した。さらに、熱伝導に関して、第一原理計算を用いて、 $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  超格子構造中のヘテロ界面 ( $\text{InO}_2$  層と  $\text{In-Zn-O}$  層の界面) と Antisite In によるフォノン散乱の効果を明らかにした。

4. 研究成果

4.1 ガラス基板上における  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  のホモロガス構造の形成メカニズム

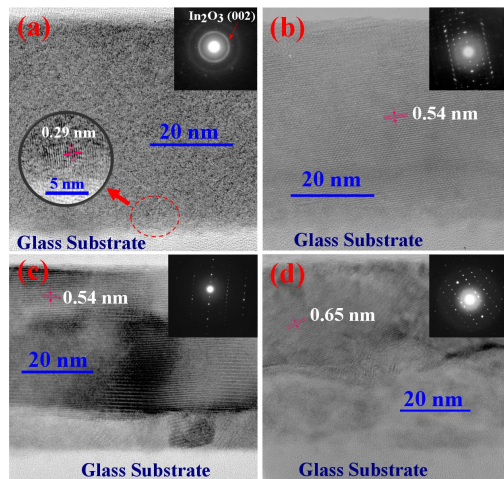


図 2、後焼成による  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$  薄膜の TEM 像及び電子線回折パターン (内挿の図)。焼成温度: (a) 600、(b) 700、(c) 800、(d) 900。

#### 4.1.1 透過電子顕微鏡を用いたアモルファス構造からホモロガス構造への結晶化過程の解明

直流スパッタ法によってガラス基板の上にアモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$  と  $\text{ZnO}$  複合酸化物薄膜を作製し、700 の大気焼成によるホモロガス構造を持つ高配向  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜を合成した。トルコの Sabanci University の Prof. Ow-Yang と共同研究を行い、走査型透過電子顕微鏡 (STEM) を用いてアモルファス構造からホモロガス構造への結晶化過程を解明した。図 2 に示したように、アモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$  と  $\text{ZnO}$  複合酸化物薄膜 ( $\text{In}:\text{Zn}=1:1$  at.%) は、焼成温度 600 で、面内にランダム配向した微結晶 (図 2a) が見られ、焼成温度 700 になる (図 2b) と、薄膜表面に対して C 軸が垂直になる方位で結晶化が生じ、ホモロガス構造の多結晶膜となった。さらに温度を 900 まで上げると分相が生じて二層構造 (図 2d) になり、上部の層は  $\text{In}_2\text{O}_3$  ピックスバイト構造であることが確認できた。この実験事実から、アモルファス構造からホモロガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  構造への結晶化において、アモルファス薄膜表面から先に結晶化し、膜厚方向に沿って結晶化していく現象が明らかになった。

#### 4.1.2 In-situ XRD 測定を用いて $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ の母材料であるアモルファス $\text{In}_2\text{O}_3$ の結晶化過程の実験調査

アモルファス構造からホモルガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  構造への固相反応に関する理論を構築するために、アモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$  薄膜とアモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$ - $\text{ZnO}$  複合酸化物薄膜を加熱しながら、高強度の X 線の利用が可能な放射光を用いた In-situ XRD 測定を行い、結晶化温度付近で長距離秩序性の変化を系統的に調べた。さらに、広域 X 線吸収微細構造 (XAFS) の測定を行い、焼成温度によって  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の短距離秩序性 (局所構造) の変化を把握した。特に、結晶化する際に局所構造の変化を検討し、固相反応においてアニオン元素とカチオン元素の拡散現象を定性的に説明した。

$\text{In}_2\text{O}_3$  薄膜の結晶化に関しては、従来の経験では 160 付近にすぐ結晶化しているが、本研究では、焼成温度が 150 になってから 30 分経過した時点で結晶化することが明らかになった。図 3 には、150 において、In-situ XRD 測定によって測定した (222) の解析ピークの時間変化を示した。焼成時間の増加と共に、(222) 面のピーク強度が強くなり、半値幅も狭くなった。これは薄膜中に  $\text{In}_2\text{O}_3$  の結晶子サイズが徐々に大きくなったものと考えられる。

図 4 に、焼成時間の増加に伴う (222) 面の回折ピークの積分強度の変化を示した。ここで、縦軸には  $\text{In}_2\text{O}_3$  (222) 面の最大積算強度で規格化したものであり、結晶化度と対応する。Avrami 式を用いて、結晶化度と焼成時間の関係曲線をフィッティングした。その結果、アモルファス酸化物薄膜は低い温度で薄膜内部から結晶化し、高い焼成温度で界面から結晶化することが明らかになった。透過電子顕微鏡を用いて、結晶化した薄膜構造を詳細に分析した結果とほぼ同じである。これらの結果に基づいて、アモルファス構造からの結晶化過程を定量的に評価するため、In-situ XRD 測定法は有効な研究手法といえる。

#### 4.1.3 XAFS 測定を用いてアモルファス $\text{In}_2\text{O}_3$ - $\text{ZnO}$ 薄膜の結晶化温度付近で局所構造の変化に関する調査

XAFS 測定を用いて、アモルファス構造からホモルガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  構造への結晶化過程

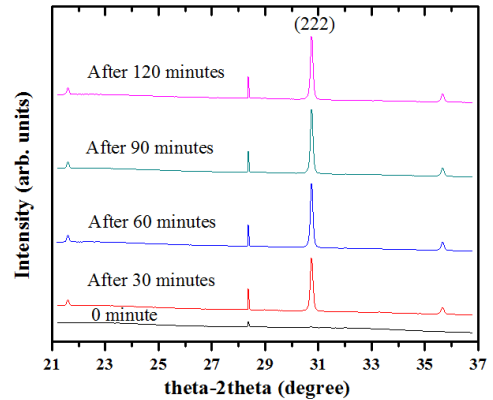


図 3、大気中 150 の焼成において、焼成経過時間によりアモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$  薄膜の XRD 回折パターン。

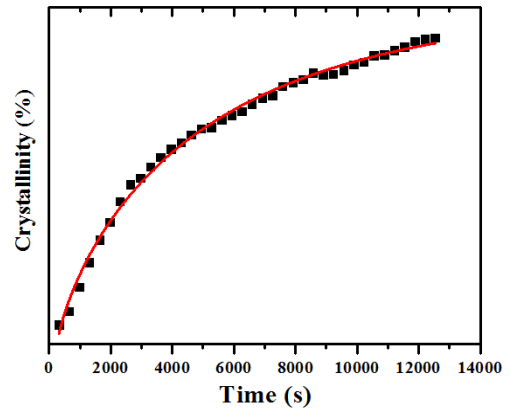


図 4、大気中 150 の焼成におけるアモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$  薄膜の結晶化過程。

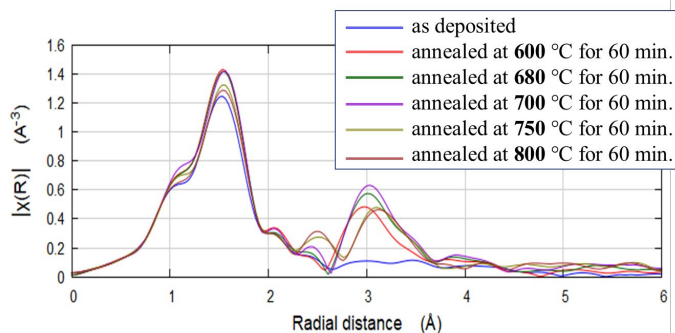


図 5、As-deposited および焼成した  $\text{In}_2\text{O}_3$ - $\text{ZnO}$  薄膜の Zn K-edge EXAFS スペクトルから得られた動径分布関数。



において、結晶化温度付近で局所構造の変化を調べた。図5はAs-depositedおよび焼成した $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 薄膜のZn K-edge XAFSスペクトルから得られた動径分布関数である。As-deposited薄膜は第一近接原子(酸素)のピークしか見えないことから、アモルファス薄膜中に短距離秩序性だけがあることが明確した。また、焼成温度の増加に伴って、第二近接のピークが顕著に増加し、結晶化に起因した中距離秩序性が向上したと考えられる。これは結晶化に伴って、Zn原子周りの局所構造を変化することが示唆している。一方、結晶化に伴って、In周りの第一近接原子(酸素)のピークが大きくなるが、第二近接のピークがあまり変化しない。

#### 4.2 高温においてホモロガス $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜のキャリア発生源

高温においてホモロガス $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜のキャリア発生源を調べるため、スパッタ法によってエピタキシャルホモロガス $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜を作製し、高温in-situホール測定装置を用いて、様々な酸素分圧で $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜のキャリア密度と移動度を調べ、Brouwer Diagramを用いてキャリア発生源に関する欠陥形成メカニズムを解明した。

図6に示すように、400と600における様々な酸素雰囲気中で平衡状態になった $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜のキャリア密度は酸素分圧の $-2/5$ と $-1/4$ 乗に比例している。通常酸素空孔がキャリア発生源の場合には、キャリア密度は酸素分圧の $-1/6$ 乗に比例する。この違いにより、高温で $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜中に酸素空孔以外のキャリア発生源が存在していることが明らかになった。そして、酸素空孔以外のキャリア発生源を調べるために、 $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜を600から室温まで急冷し、サンプル中に残留したキャリアの活性化エネルギーを測定した。そのキャリアの活性化エネルギーは30 meVであり、伝導帯直下の浅い準位に不純物準位として存在することが示唆している。ホモロガス $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 構造中に、InがZnのサイトに置換した場合(Antisite In)には、イオン化するのは55 meVのエネルギーが必要で、この不純物準位はAntisite Inに起因したものではない。一方、A. Janottiらは格子間Znが浅い準位ドナーであると報告した[3]。Brouwer分析の結果及び欠陥の生成メカニズムに基づいて、高温(400と600)において、 $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜中にフレンケル型のZn欠陥が存在する可能性が高い。

即ち、高温でのホモロガス $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜のキャリア発生源は酸素空孔以外に、Znフレンケル欠陥の形成によりできた格子間亜鉛も寄与する。この研究成果はIUMRS-ICAM 2017国際会議(The 15<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials)でAward for Encouragement of Research賞を受賞した。

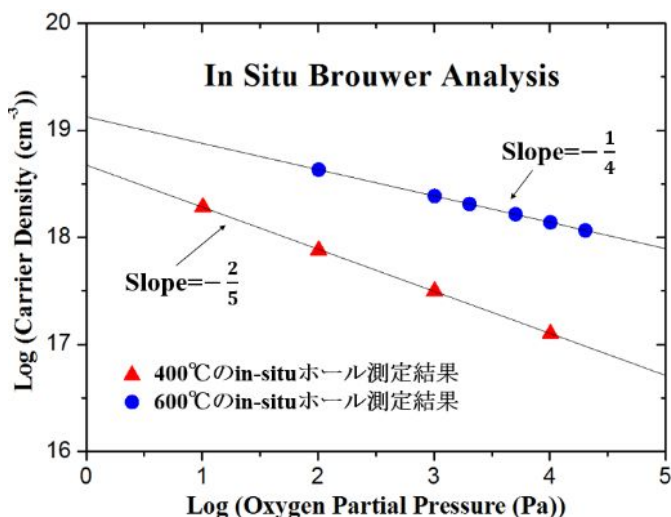


図6、In-situホール測定による酸素分圧とキャリア密度のLog-logプロット(Brouwer Analysis結果)

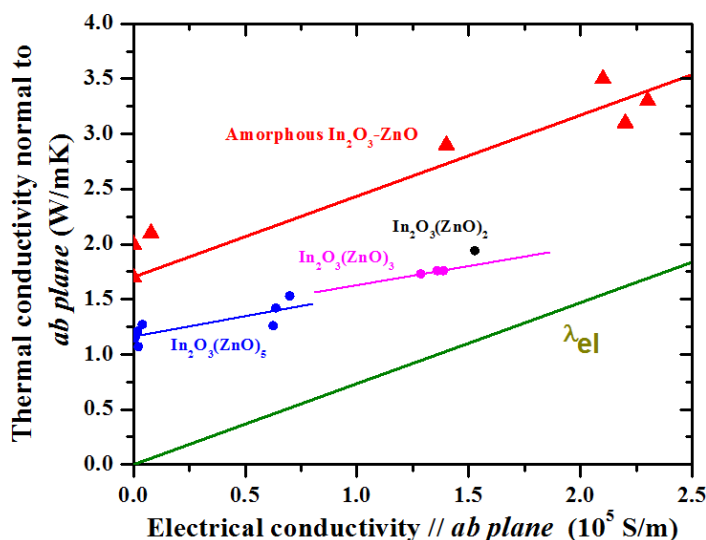


図7、 $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜における結晶構造の異方性に起因した電気伝導と熱伝導の異方性。緑線：自由電子の寄与による熱伝導率；赤線：様々な電気伝導率を持つアモルファス $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 薄膜(In:Zn=5:1 in at.%)の熱伝導率；ピンク線：様々な電気伝導率を持つ $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_3$ ピタキシャル薄膜の熱伝導率；青線：様々な電気伝導率を持つ $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_5$ エピタキシャル薄膜の熱伝導率。

### 4.3 ホモロガス $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ 薄膜における熱伝導機構の解明

ホモロガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜における熱伝導機構を解明するため、スパッタ法によって  $\text{In}_2\text{O}_3$  と ZnO 複合酸化物ターゲットを用いて、サファイア C 面基板上にエピタキシャル  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  ( $m=2, 3, 5$ ) 薄膜を作製した。産業技術総合研究所と協力し、パルス光加熱サーモフレクタンクス装置を利用し、エピタキシャル  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の熱伝導率を評価した。

図 7 に示したように、作製したホモロガス構造を持つ  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の熱伝導率は 2 W/mK 以下である。既報の多結晶  $\text{In}_2\text{O}_3$  薄膜と多結晶 ZnO 薄膜の熱伝導率より小さい ( $\text{In}_2\text{O}_3$ : ~3.5 W/mK [4] と ZnO: ~5.4 W/mK [5])。ホモロガス構造を持つ  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の熱伝導率はアモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$ -ZnO 薄膜 (In:Zn=5:1 in at.%) の熱伝導率の約半分程度である。これはフォノンが超格子構造中のヘテロ界面を通過する際のインピーダンスにより無視できない界面熱抵抗が生じたためだと考えられる。また、 $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の  $\text{InO}_2$  層間の In-Zn-O 層数が増加するにつれ、熱伝導率は小さくなった。これはホモロガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  構造中の  $\text{InO}_2$  層と In-Zn-O 層の界面でのフォノン散乱及び In-Zn-O 層中の In のフォノン散乱効果による影響だと考えられる(図 1 に参考)。

図 7 に、ホモロガス構造  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の熱伝導率と電気伝導率をヴィーデマン・フランツ則の形で得られた傾きは一般的のヴィーデマン・フランツ則の傾き(緑線)より小さいことを示した。一般的に、等方性の材料中において、ヴィーデマン・フランツ則は自由電子による熱伝導率を表す。この小さい傾きは  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  超格子薄膜の結晶構造異方性に起因した熱伝導率と電気伝導率の異方性によるものだと考えられる。そのため、膜面に測定した電気伝導率と膜厚方向の熱伝導率がヴィーデマン・フランツの法則を用いて説明できない。

### 4.4 今後の課題

本研究では、汎用性があるガラス基板上に  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  超格子薄膜の作製が成功した。アモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$ -ZnO 薄膜は薄膜表面から先に結晶化し、膜厚方向に沿ってホモロガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  構造へ結晶化していく現象が解明した。また、放射光を用いた In-situ XRD 測定及び XFAS 測定によって、アモルファス構造からの結晶化における固相反応プロセスに関する新しい実験評価手法を構築した。今後これらの実験データを定量的に解析し、薄膜の結晶化に関する物理モデルを構築する。

### 4.5 参考文献

- 1) J. L. Da Silva, et al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 255501.
- 2) E. Mitchell Hopper, et.al, J. Appl. Phys. 109 (2011) 013713; J. Appl. Phys. 112 (2012) 093712.
- 3) A. Janotti, et. al, Phys. Rev. B 76 (2007) 165202.
- 4) M. Ohtaki, et. al, J. Appl. Phys. 79 (1996) 1816.
- 5) Junjun Jia, et. al., Applied Physics Express, 6 (2013) 021101.

### 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

- 1、Junjun Jia, Cleva Ow-Yang, Guliz Inan Akmeahmet, Shin-ichi Nakamura, Kunihisa Kato, Yuzo Shigesato, Formation of homologous  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  thin films and its thermoelectric properties, Journal of Vacuum Science & Technology A, 34, 041507 (2016).
- 2、Junjun Jia, Ayaka Suko, Yuzo Shigesato, Toshihiro Okajima, Keiko Inoue, Hiroyuki Hosomi, Evolution of defect structures and deep subgap states during annealing of amorphous In-Ga-Zn oxide for thin-film transistors, Physical Review Applied, 9, 014018 (2018).
- 3、賈軍軍、岡島敏浩、重里 有三、放射光を用いたアモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$  系薄膜の結晶化に関する評価、九州シンクロトロン光研究センター2017年報、pp. 10-12, 2019.

[学会発表](計 12 件)

- 1、Junjun Jia, Hans Wardenga, Andreas Klein, Yuzo Shigesato, In-situ Brouwer analysis on defects in homologous  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  films, European Materials Research Society (E-MRS) 2016 Spring Meeting, 2016/05/02 - 05/06, Lille, France. (国際学会)
- 2、賈軍軍、Hans Wardenga、Andreas Klein、重里有三、ホモロガス構造を持つ  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の熱物性、第 77 回応用物理学会・秋季学術講演会、2016/09/13 - 9/16、朱鷺メッセ、新潟

県。(国内学会)

3、賈軍軍、八木貴志、山下雄一郎、重里有三、ホモロガス  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜中の熱伝導現象、第 37 回日本熱物性シンポジウム(日本熱物性学会)、2016/11/28 - 11/30、岡山国際交流センター、岡山県。(国内学会)

4、賈軍軍、山下雄一郎、八木貴志、竹歳尚之、重里 有三、層状構造を持つ  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  薄膜の熱伝導特性、第 64 回応用物理学会・春季学術講演会、2017/03/14 - 03/17、パシフィコ横浜、横浜市。(国内学会)

5、J. Jia, Y. Yamashita, T. Yagi, Y. Shigesato, Thermal conduction in homologous  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  Films, 2017 MRS Spring Meeting, 2017/04/17 - 4/21, Arizona, USA. (国際学会)

6、J. Jia, H. Wardenga, A. Klein, Y. Shigesato, Characterization of layered  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$  films, IUMRS-ICAM 2017 Symposium B-1 (3rd Bilateral MRS-J/E-MRS symposium), 2017/08/27 - 09/01, Kyoto, Japan. (国際学会)

7、賈軍軍、岡島敏浩、重里 有三、後焼成によるアモルファス IGZO 薄膜の欠陥変化及びそのメカニズム、第 78 回応用物理学会・秋季学術講演会、2017/09/05 - 09/08、福岡国際会議場、福岡市。(国内学会)

8、J. Jia, S. Yamamoto, T. Okajima, Y. Shigesato, Experimental investigation on structural evolution of amorphous indium-based oxide films during annealing by in-situ XRD and EXAFS measurements, 2017 MRS Fall Meeting, 2017/11/26 - 12/01, Boston, USA. (国際学会)

9、J. Jia, T. Sugane, Y. Shigesato, Fabrication of p-type  $\text{SnO}_x$  thin films and its defect structure, 2018 Materials Research Society (MRS) Spring Meeting, 2018/4/2 - 4/6, Arizona, USA. (国際学会)

10、J. Jia, Y. Shigesato, Phonon Engineering on  $\text{In}_2\text{O}_3$ - and  $\text{ZnO}$ -based Thin Films, CIMTEC 2018, 2018/6/4 - 6/14, Perugia, Italy (招待講演) (国際学会)

11、賈軍軍、重里 有三、アモルファス IGZO トランジスタにおける欠陥構造と電子構造の関係性の解明、第 28 回日本 MRS 年次大会 (MRS-J)、2018/12/18 - 12/20、北九州国際会議場、北九州。(国内学会)

12、岩崎慎平、賈軍軍、岡島敏浩、重里 有三、アモルファス  $\text{In}_2\text{O}_3$  系薄膜の結晶化に関する研究、第 28 回日本 MRS 年次大会 (MRS-J)、2018/12/18 - 12/20、北九州国際会議場、北九州。(国内学会)

## (2)研究協力者

研究協力者氏名：

- (a) 重里有三 教授 (青山学院大学)
- (b) 八木貴志氏と山下雄一郎氏 (産業技術総合研究所 物質計測標準研究部門)
- (c) Prof. Andreas Klein (Technische Universität Darmstadt)

ローマ字氏名：

- (a) Prof. Shigesato Yuzo (Aoyama Gakuin University)
- (b) Dr. Takashi Yagi, and Dr. Yuichiro Yamashita (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))
- (c) Prof. Andreas Klein (Technische Universität Darmstadt)

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、研究者個人に帰属されます。