

# LiNbO<sub>3</sub> 基板上における Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の結晶成長

## Crystal growth of the Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on LiNbO<sub>3</sub> Substrates

日本大学理工学部 電子情報工学科 (山本研究室)  
4 年 9087 中村拓未

Department of Electronics & Computer Science (Yamamoto Lab)  
College of Science & Technology, Nihon University  
B4, 9087 Takumi Nakamura

Abstract : LNO 基板上に Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を成膜する準備として、*c* 面および *r* 面 LiNbO<sub>3</sub>(LNO)基板のアニール条件探索を行った。*c* 面では温度 700°C~1000°C で変化させ、5~12 時間大気中でアニールを行った。*r* 面では温度 700°C~1050°C、3~12 時間大気中でアニールを行った。AFM により基板表面状態の確認を行った。*c* 面 LNO 基板において、アニール時間 12 時間の場合について、アニール温度 700°C では直線状の溝を確認したが、ステップは確認できなかった。800°C 以上ではステップ-テラス構造が確認できたがステップは丸みを帯びた形状となった。アニール温度 1000°C、5 時間にした場合、丸みを帯びたステップ-テラス構造を確認したが、バンチングは見られなかった。また基板表面に背の高い微粒子が析出していた。二枚の基板の表面同士を重ねて熱処理を行った結果、重ねていない状態と同様の結果を得た。よってこの微粒子はアニール環境下周辺から飛来してきた微粒子ではないことがわかった。*r* 面 LNO 基板において、アニール時間が短い、もしくはアニール温度が高いと、繊維状のステップが現れてしまうということが分かった。*r* 面 LNO 基板上に Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を成膜した。粒子はコアレスセンスしており、その粒界では大きな段差、コアレスセンスしていない箇所では深い溝を確認した。ひとつのグレイン表面だけを見ると、nm オーダーで平坦であった。*r* 面 LNO 基板上に成膜した Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の方が溝の深さが大きくなっていった。よって *r* 面 LNO 基板上では、今回成膜した条件では温度が高すぎた可能性がある。

### 1. 背景

強磁性(Ferromagnetism : FM)/反強磁性(Antiferromagnetic : AFM)積層膜界面における磁気的交換相互作用によって、FM の磁化曲線がシフトすることが知られている。このシフトする磁場を交換バイアス磁場 ( $H_{EB}$ )と呼ぶ。Meiklejohn-Bean によると、 $H_{EB}$  は AFM 表面のスピンの大きさに比例する<sup>[1]</sup>。単結晶と同等な薄膜を作製すると必ず表面はステップ-テラス構造を示す。ほとんどの AFM 材料ではステップによって高さの異なったテラスのスピンは反強磁性的に配列している。一方、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の *r* 面は、その表面がステップ-テラス構造を示したとしても、すべての面でスピンは強磁性的に配列しており、大きな  $H_{EB}$  を得る可能性がある。そのためには、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面が原子レベルで平坦である必要がある。

これまで、DC-RF マグネトロンスパッタ法を用いて *r* 面および *c* 面サファイア基板上に、基板温度 580°C 以上にて Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を作製し、それぞれの結晶成長の違いについて解析を行ってきた。成膜条件は、基板温度 580~840°C、O<sub>2</sub>/Ar=2/8(ccm)~30/3(ccm)、内圧 0.3-0.4Pa、成膜時間を 2 時間とした。この条件下で、エピタキシャル成長を X 線回折(X-ray Diffraction : XRD)、反射型高速電子線回折(Reflection High Energy Electron Diffraction : RHEED)により確認した<sup>[2,3]</sup>。*r* 面配向 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面は、一つのグレイン内ではステップ-テラス構造およびバンチングステップを確認したが、グレイン同士がコアレスセンスした箇所では大きな段差が、それ以外の箇所では深さ 15-30nm の深い溝が発生した。*c* 面配向 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面は成膜温度を変化させても nm オーダーで平坦であった。逆格子マップの結果から *c* 面配向膜は双晶を含み、*r* 面配向膜は双晶を含まず成長したことが解った。これは基板との格子ミスマッチによる結晶歪みの影響を受けたためであると考えた。*c* 面配向膜に着目すると表面は平坦であるが、双晶を含んでいるため電界印加に対して逆の ME シグナルを発生させる。そのため積層膜界面においてトータルの AFM スピンは打ち消し合い、大きな  $H_{EB}$  を発生させることが出来ない。そこで結晶構造、格子ミスマッチの観点からより適切な基板として、LiNbO<sub>3</sub>(LNO)基板を選択した。格子ミスマッチは、*c* 面では、+4.01%(サファイア)から-3.77%(LNO)、*r* 面では、

+4.01%、+4.34% (サファイア)から-3.77%、-2.52%(LNO)となり、ミスマッチによる格子歪みの影響が緩和される可能性がある。よって *c* 面では双晶の成長、*r* 面では溝の発生が抑えられる可能性がある。

### 2. 目的

我々は FM 金属/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 積層膜において  $H_{EB}$  を利用することによって、電界印加による FM の磁化反転を目的としている。そのためには、表面が原子レベルで平坦であり、双晶を含まない Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜が必要である。これは、LNO 基板上に Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を成膜することで得られると考えた。よって *c* 面および *r* 面 LNO 基板の熱処理最適条件探索を行い、最適化した LNO 基板上に Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を成膜した。ここでの最適条件とは、アニール後の LNO 基板表面にステップ-テラス構造が現れ、ステップの高さが *c* 面では約 0.23nm、*r* 面では約 0.36nm となり、形状が直線状になる温度である。

### 3. 実験方法・条件

- ・アニール
  1. *c* 面および *r* 面 LNO 基板を 5 分アセトンで洗浄しさらに 15 分洗浄した。
  2. エタノールで 5 分洗浄した。
  3. 基板をアルミナ坩堝(純度 99.98%、RESCO04)に入れ電気炉(ミヤツフル電気炉 EURO THERM 社 : 2408)でアニールを行った。アニール条件は、*c* 面 LNO 基板を温度(f)700°C、(g)900°C、(h)1050°C、12 時間大気中でアニールを行った。次にアニール時間を 3 時間として、温度(i)700°C、(j)1050°C、大気中でアニールを行った。また、条件(k)として温度 1000°C、5 時間大気中でアニールを行った。また *r* 面 LNO 基板を、温度(f)700°C、(g)900°C、(h)1050°C、12 時間大気中でアニールを行った。次にアニール時間を 3 時間として、温度(i)700°C、(j)1050°C、大気中でアニールを行った。また、条件(k)として温度 1000°C、5 時間大気中でアニールを行った。

#### ・成膜

1. 基板を基板ホルダーに銀ペースト (Leitslber200:No.15035)で固定した。

- 成膜室からクライオポンプを繋ぐメインバルブを閉め、成膜室とクライオポンプを切り離し、チャンバー内に窒素を導入した。
- 大気圧になったのでチャンバーを開きチャンバー内に基板ホルダーを取り付けた。
- Cr ターゲットを 67.8MHz のカソードに取り付けた。
- ターゲットと基板の成す角度は 90°である。またターゲット中心から基板間の距離を 35mm に配置した。ロータリーポンプにより 3Pa まで排気しロータリーポンプと成膜室を繋ぐメインバルブを閉めロータリーポンプと成膜室を切り離した。
- クライオポンプと成膜室を繋ぐメインバルブを開けクライオポンプと成膜室を接続した。さらに  $1 \times 10^{-5}$  Pa まで排気した。
- カソードの温度を下げるために水を流し、ヒーターで基板表面の温度を 580°C に近づけた後 pyro メーターで表面温度を測定した。
- Ar の流量を 10lccm、酸素の流量 2ccm にし、チャンバー内に導入した。またチャンバー内の内圧させるために成膜室とクライオポンプを繋ぐメインバルブを閉めた。
- カソードの出力を 60W にし、プラズマが安定した後 80W にした。
- プラズマ発生後、反射が発生するため、マッチングボックスによりインピーダンスマッチングを行った。
- インピーダンスマッチングを取りながら Ar の流量 8ccm まで下げた。
- 徐々に成膜室とクライオポンプを繋ぐメインバルブを開け、チャンバー内内圧を下げていき 0.3Pa まで下げた。この値がスパッタ内の圧力(SputterPressuer)になる。
- 直流電源(GPO350-05:TAKASAGO 社)のスイッチを入れ電流を 0.04A、電圧はメーターを振り切らないように設定した。
- 表 3 に成膜条件を示す。成膜条件は基板温度 580°C、導入ガス O<sub>2</sub>/Ar 比を 0.25 (2/8ccm)、成膜時間を 2 時間とした。成膜条件と同じ条件でプレスパッタを 30 分を行った。
- 終了後直流電源を切り、Ar の導入を止めた。

表 3 成膜条件

成膜温度(°C)	580
O <sub>2</sub> /Ar(ccm)	0.25
成膜時間(min)	120
Cr ターゲット-直径(inch)	2
内圧(Pa)	0.3
DC(A)	0.04
RF(W)	80

4. 評価方法・条件

評価は、原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope : AFM) (SII)を用いてアニール後の LNO 基板表面像を測定し、表面状態の確認を行った。またラインプロファイルによりステップの高さを測定した。

AFM は、試料とカンチレバーとに原子間力が働き、斥力を受けてカンチレバーがたわむことを利用して、試料表面の凹凸を測定する装置である。カンチレバーの変位検出方法には、光てこ方式と光干渉方式の 2 種類があるが、本研究では光てこ方式の AFM を使用した。光てこ方式の AFM の構成図を図 5 に示す。光てこ方式は、レーザーダイオードから発射したレーザー光をカンチレバーへ入射し、その反射光を上下 2 分割したフォトダイオードで検出する。カンチレバーが試料の凹凸によって上下すると、レーザーの反射角度が変わるため、フォトダイオードの上下における受光量の比が変化する。この比の変化を、カンチレバーの変位として検出する。その変位を一定に維持するために、ピエゾ素子にフィードバックをかけ、ピエゾのコントロール信号を元に三次元の表面像を描く。なお、左右 2 分割のダイオードで検出することにより、カンチレバーのねじれも検出できるようになる<sup>11)</sup>。今回の実験では特にダイナミック・フォース・モード (DFM : Dynamic Force Mode) モードを用いた。走査エリアを (5000×5000) nm<sup>2</sup>、(2000×2000) nm<sup>2</sup>、(1000×1000) nm<sup>2</sup> で 3 点測定した。これにより薄膜表面像を測定した。

表 1 c 面 LNO 基板のアニール条件

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
温度 (°C)	700	800	900	950	1000
時間 (min)	720				300
雰囲気	大気中				

表 2 r 面 LNO 基板のアニール条件

	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)
温度 (°C)	700	900	1050	700	1050	1000
時間 (min)	720			180		300
雰囲気	大気中					

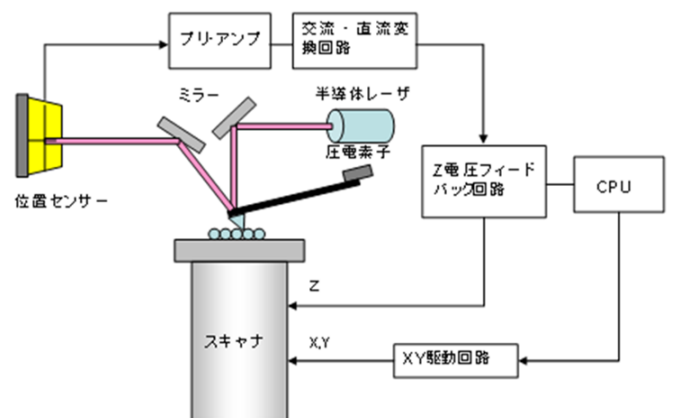


図 1 DFM 構成図

5. 結果

・ c 面

図 2 にアニール温度ごとの c 面 LNO 基板表面像を示す。アニール温度 700°C では直線状の溝を確認したが、ステップ-テラス構造は確認できなかった。800°C ではステップ-テラス構造を確認できたが、湾曲した形状となっていた。またラインプロファイルによりステップの高さを測定したところ、1 原子高さのステップ(高さ 0.23nm)が明瞭に確認できた。

900°C~950°Cではステップテラス構造及びバンチングステップを確認したが、ステップは直線状にならなかった。ステップの高さは、0.23nm~0.81nmとばらつきがあった。また、アニール後のLNO基板表面に背の高い粒子が現れていた。この微粒子がアニール環境下周辺から飛来した微粒子であるのか、アニールすることによって基板から析出した微粒子であるのか不明である。そこで、二枚のLNO基板の表面同士を重ね、(a)と同じ条件でアニールすることで確かめた。

図3に二枚のLNO基板の表面同士を重ねてアニールした時の基板表面像を示す。結果、重ねずにアニールした時のLNO基板表面と同様の結果を得た。

図4に条件(e)でアニールしたc面LNO基板表面像を示す。図よりステップ-テラス構造を確認できたが、湾曲した形状となり、バンチングは見られなかった。また1原子高さのステップ(高さ0.23nm)が明瞭に確認できた。

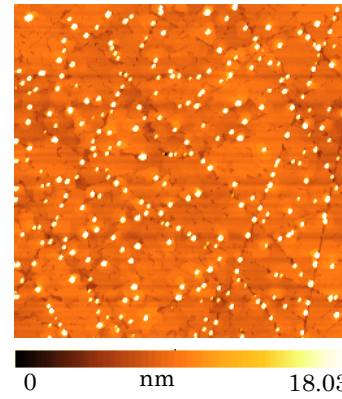


図3 二枚のc面LNO基板の表面同士を重ねて温度700°Cで12時間アニールした基板表面像(5×5μm<sup>2</sup>)

・r面

図5に条件(f)~(h)のアニール後のr面LNO基板表面像を示す。すべての条件でステップ-テラス構造及びバンチングステップを確認した。アニール温度700°Cでは角ばった形状のステップを確認した。ラインプロファイルによりステップの高さを測定したところ、バンチングしている所で0.8nm、それ以外の所で0.4nmとなった。アニール温度900°Cでは階段形状のステップを確認した。また、LNOの単一原子高さのステップ0.4nmを確認した。アニール温度1050°Cでは繊維状のステップを確認した。また、単一原子高さのステップ0.4nmを確認した。

図6に条件(i)、(j)のアニール後のr面LNO基板表面像を示す。アニール温度700°Cでは繊維状のステップを確認した。ラインプロファイルによりステップの高さを測定した結果、約0.4nmであった。アニール温度1050°Cでは繊維状のステップを確認し、右肩上がり方向にバンチングステップが現れていることが分かった。ステップの高さは、バンチングしている所で0.8nm、それ以外の所で0.4nmとなった。

図7に条件(k)のアニール後のr面LNO基板表面像を示す。図より繊維状のステップを確認し、右肩上がり方向にバンチングステップが現れていることが分かった。ステップの高さは、バンチングしている所で0.64nm、それ以外の所で0.4nmとなった。

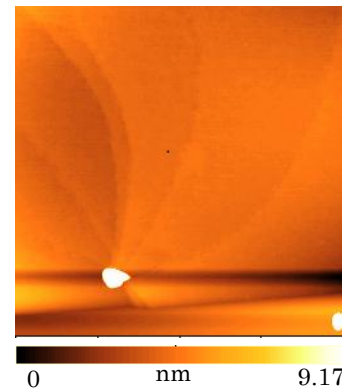


図4 条件(e)でアニールしたc面LNO基板表面像(2×2μm<sup>2</sup>)

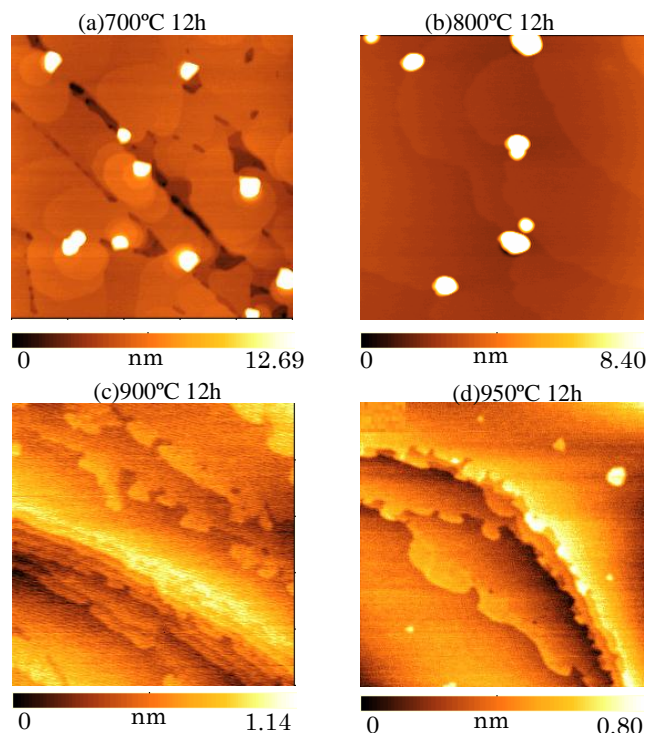


図2 アニール温度ごとのc面LNO基板表面像(1×1μm<sup>2</sup>)

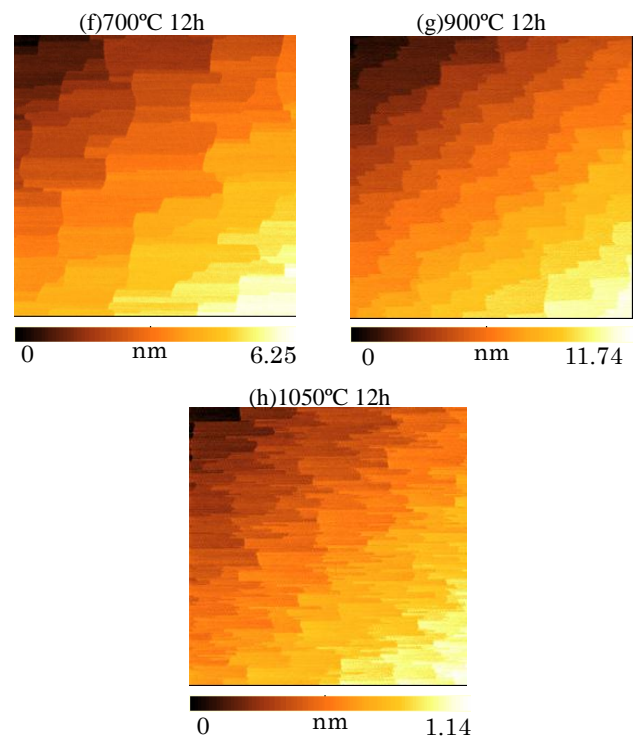


図5 12時間のアニール温度ごとのr面LNO基板の表面像(2×2μm<sup>2</sup>)



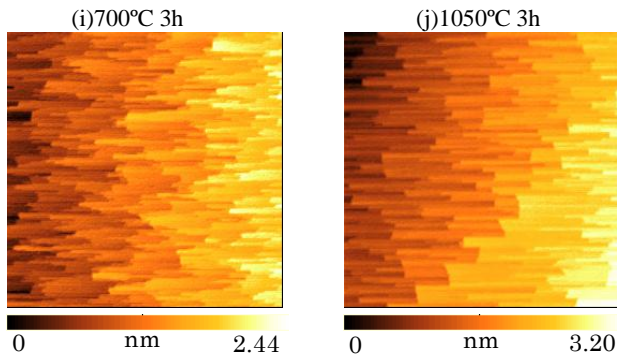


図6 3時間のアニール温度ごとの *r* 面 LNO 基板の表面像(2×2μm<sup>2</sup>)

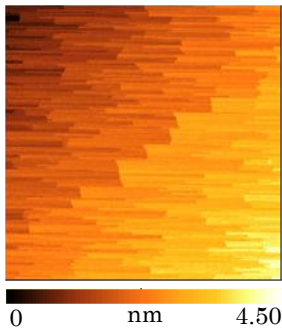


図7 条件(k)の *r* 面 LNO 基板表面像(2×2μm<sup>2</sup>)

#### ・ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

図8に成膜後の *r* 面配向 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面像を示す。粒子はコアレスセンスしており、その粒界では大きな段差、またコアレスセンスしていない箇所では約 58.18nm の深い溝を確認した。ラインプロファイルによりひとつのグレイン表面だけを見ると、nm オーダーで平坦であることが分かった。

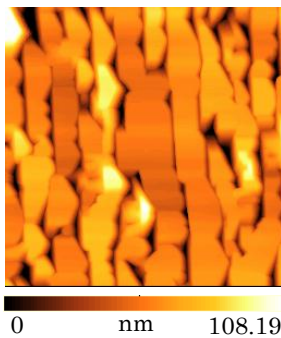


図8 *r* 面 LNO 基板上に成膜した Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面像(2×2μm<sup>2</sup>)

## 6. 考察

### ・ *c* 面

図9に *c* 面 LNO 基板のアニール処理の結果をまとめた図を示す。アニール時間 12 時間の場合について考える。アニール温度 700°C ではステップが現れなかった。これは温度が低いと原子が拡散しなかったためであると考えられる。800°C 以上ではステップ-テラス構造が確認できたがステップは丸みを帯びた形状となった。これは表面に存在する背の高い微粒子を避けるようにして原子が拡散したためであると考えられる。ここで、この微粒子がアニール環境下周辺から飛来した微粒子であるのか、アニールすることによって基板から析出した微粒子であるのかの二通り考えられた。そこで二枚の LNO 基板の表面同士を重ねてアニールを行った結果、重ねずにアニールした時の LNO 基板表面と同様の結果を得た。よってこの微粒子は基板から析出して来たものであると考えられる。

*c* 面 LNO 基板上では 550°C と 900°C の間の温度範囲で、

酸素、窒素、Ar 大気に関係なくリチウム・トリニオバート(LiNb<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)が析出するということが知られている。このことから析出してきた微粒子は LiNb<sub>3</sub>O<sub>8</sub> であり、かつ 900°C 以上ではこの微粒子が析出しないと考えられる。また、図 5.25 より温度が高くなっていくと微粒子の数が少なくなっていることが分かる。よって、さらに高い温度でのアニール処理を行うことが必要であると考えられる。

次にアニール温度 1000°C、5 時間にした場合、丸みを帯びたステップ-テラス構造を確認した。しかしながら、バンチングは見られなかった。また、背の高い微粒子が存在していたが、他の条件と比較すると微粒子の数が減少していることが分かる。よってアニール時間を 5 時間としてさらに温度を上げていくことで微粒子が消滅し、直線状のステップ-テラス構造が得られると考えられる。

### ・ *r* 面

図10に *r* 面 LNO 基板のアニール処理の結果をまとめた図を示す。この図から、アニール時間が短い、もしくはアニール温度が高いと、繊維状のステップが現れてしまうということが分かった。これはアニール時間が短いとステップの形成が途中でとまってしまうためであると考えられる。またアニール温度が高いと、LNO の Li が不安定な原子であり、Li だけが飛んで行ってしまうためではないかと考えられる。よってアニール時間を長く、温度を低くすれば、最適条件が得られると考えられる。

これらの結果から、*c* 面 LNO 基板では表面に背の高い微粒子が存在するため、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を成膜することができないが、*r* 面 LNO 基板ではステップの形状、高さ、バンチングステップ数の観点から、アニール条件(g)が最適条件であると考えた。よってこの条件(g)でアニールした *r* 面 LNO 基板上に Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を成膜した。

### ・ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

*r* 面サファイア基板上に成膜した Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面像を図11に示す。図8と図11を比較すると、*r* 面サファイア基板上では溝の深さが 15.1nm であった。よって *r* 面 LNO 基板上に成膜した Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の方が溝の深さが大きくなっていることが分かった。これは、今回サファイア基板上で成膜する際の最適条件で Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を成膜したが、この条件が LNO 基板上に成膜する際には不適切であるためと考えられる。

以前サファイア基板上で Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を成膜する際、成膜温度が高くなるにつれ溝の深さが大きくなっていくという結果が得られた。これは、表面温度が高くなれば原子の拡散距離は伸びるが1つ核ができると集中しようとする。結果的に一つのグレインが大きくなり、グレインどうしがコアレスセンスし大きな溝が生まれたと考えられる。このことから、*r* 面 LNO 基板上に関しても、今回成膜した条件では成膜温度が高すぎた可能性があると考えられる。

## 7. 課題と解決方法

今回の実験でアニールした *c* 面 LNO 基板では、表面が原子レベルで平坦な Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を得ることは難しい。よって更なる熱処理最適条件探索が必要である。今後は、アニール時間を 5 時間として、さらに高い温度に最適条件があると予測したため、1000°C 以上でアニールを行う。

今回成膜した条件では成膜温度が高すぎた可能性があると考えられる。よって今後は LNO 基板上での成膜条件の探索が必要である。

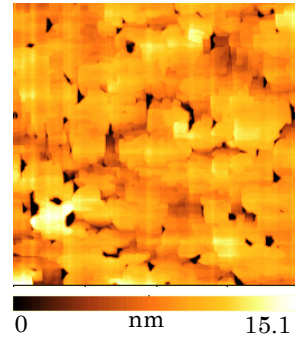


図 11 *r* 面サファイア基板の上に成膜した  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  薄膜表面像( $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ )

### 8. まとめ

我々は FM 金属/ $\text{Cr}_2\text{O}_3$  積層膜において  $H_{\text{EB}}$  を利用することによって、電界印加による FM の磁化反転を目的としている。そのためには、原子レベルで平坦な表面を持ち、双晶を含まない  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  薄膜が必要である。そこで結晶構造、格子ミスマッチの観点からより適切な基板として LNO 基板を選択した。これにより *c* 面では双晶の成長、*r* 面では溝の発生が抑えられる可能性がある。LNO 基板の熱処理最適条件探索を行った。*c* 面において、アニール時間 12 時間の場合について、アニール温度  $700^\circ\text{C}$  では直線状の溝を確認したが、ステップは確認できなかった。 $800^\circ\text{C}$  以上ではステップ-テラス構造が確認できたがステップは丸みを帯びた形状となった。これは表面に存在する背の高い微粒子を避けるようにして原子が拡散したためであると考えられる。また、二枚の LNO 基板の表面同士を重ねて熱処理を行った。その結果、重ねていない時の LNO 基板表面と同様であった。よってこの微粒子は基板から析出して来たものであると考えられる。アニール温度  $1000^\circ\text{C}$ 、5 時間にした場合、丸みを帯びたステップ-テラス構造を確認したが、バンチングは見られなかった。また温度が高くなっていくと微粒子の数が少なくなっていたため、さらに高い温度でのアニール処理を行うことが必要であると考えられる。*r* 面において、アニール時間が短い、もしくはアニール温度が高いと、繊維状のステップが現れてしまうということが分かった。これはアニール時間が短いとステップの形成が途中でとまってしまうためであると考えられる。またアニール温度が高いと、LNO の Li が不安定な原子であり、Li だけが飛んで行ってしまわないかと考えられる。これらの結果から、*r* 面 LNO 基板ではアニール条件(g)が最適条件であると考えた。よってこの条件(g)でアニールした *r* 面 LNO 基板の上に  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  薄膜を成膜した。粒子はコアレスセンスしており、その粒界では大きな段差、コアレスセンスしていない箇所では深い溝を確認した。ひとつのグレイン表面だけを見ると、nm オーダーで平坦であった。*r* 面 LNO 基板の上に成膜した  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  薄膜の方が溝の深さが大きくなっていった。よって *r* 面 LNO 基板上では、今回成膜した条件では温度が高すぎた可能性がある。

### 9. 参考文献

- [1] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev. **5** (1956) 1413-1414.
- [2] Ch. Binek, A. Hochstrat, and W. Kleemann, J. Magn. Magn. Mater. **234** (2001) 353-358.
- [3] X. He, Y. Wang, N. Wu, A. N. Caruso, E. Vescovo, K. D. Belashchenko, P. A. Dowben, and C. Binek, Nature Mater. **9** (2010) 579-585.
- [4] S.-H. Lim, M. Muraoka, S. E. Lofland, A. J. Zambano, L. G. S.-Riba, and I. Takeuchi, J. Magn. Magn. Mater. **321** (2009) 1955-1958.
- [5] T. Asada, K. Nagase, N. Iwata and H. Yamamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 546-549.

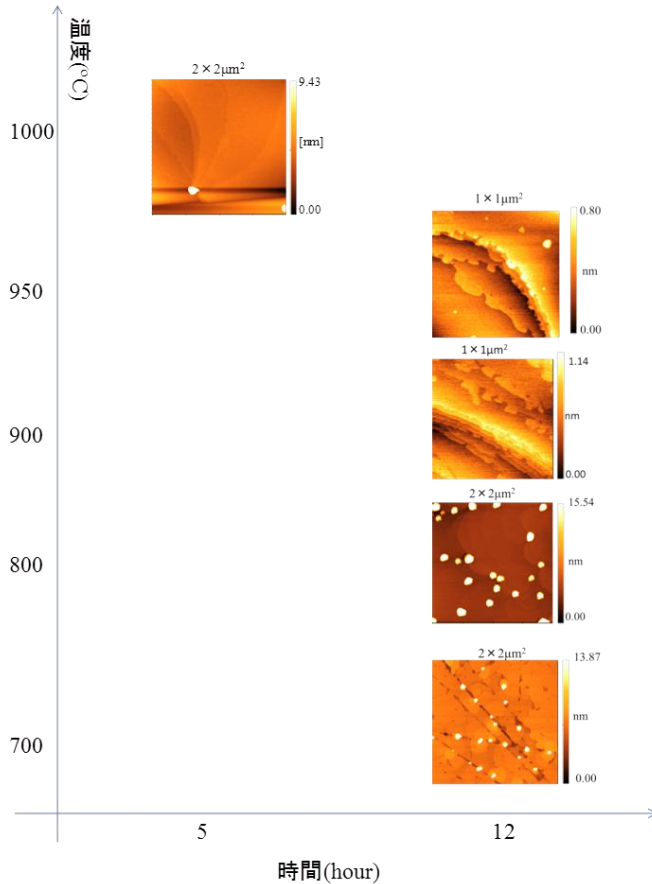


図 9 *c* 面 LNO 基板表面像まとめ

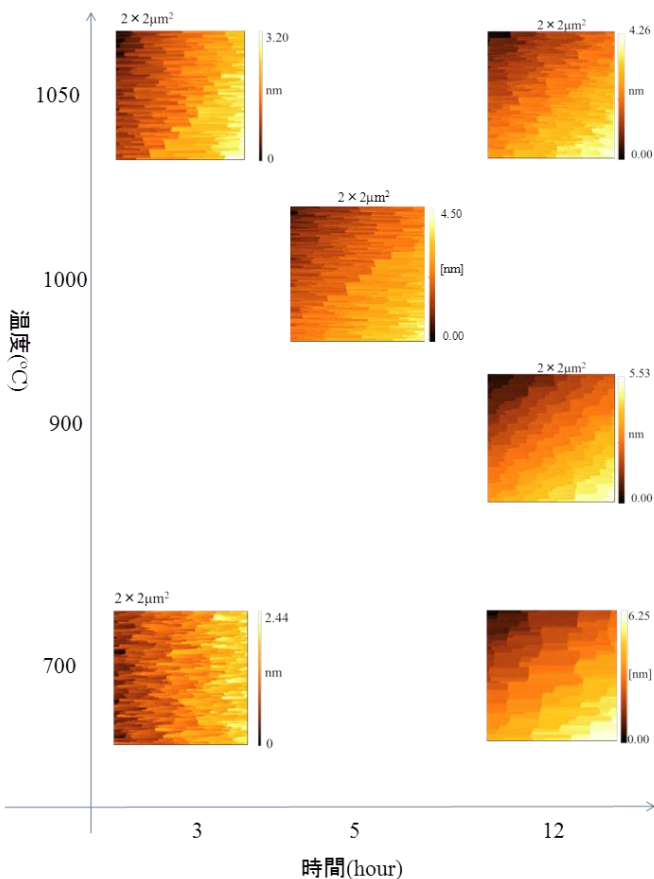


図 10 *r* 面 LNO 基板表面像まとめ

- [6]N. Iwata, T. Asada, S. Ootsuki, and H. Yamamoto, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **1034** (2008) K10-67.
- [7]N.Iwata, T.Asada, K.Nagase, T.Yamada and H.Yamamoto, Physica C **463-465** (2007) 1005-1008.
- [8] H. Mändar, T. Uustare, J. Aarik, A. Rosental, Thin Solid Films **515** (2007) 4570-4579.
- [9] D. Scarano, G. Spoto, S. Bordiga, G. Ricchiardi, and A. Zecchina, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **64-65**, (1993) 307.
- [10]G. H. Lee, "Realization of ultrasmooth surface with atomicscale step structure on  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  substrates," Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Gaya-Dong 24, Busanjin-Ku, Busan, South Korea, 614-714 (2002)
- [11] Nobuyuki Iwata, Takuji Kuroda and Hiroshi Yamamoto, "Mechanism of Growth of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Thin Films on (1102), (1120), and (0001) Surfaces of Sapphire Substrates by Direct Current – Radio Frequency Magnetron Sputtering", Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 11PG12-1~9 (9 pages).

