



بررسی ریزساختار و حوزه‌های فروالکتریک لایه نازک هم‌محور تیتانات سرب رشدیافته با روش رسوب‌گذاری از فاز مایع

امین یوردخانی*

بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، تهران، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۸/۰۸/۰۶
دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷
پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

کلیدواژه‌ها:

لایه نازک،
تیتانات سرب،
رشد هم‌محور،
حوزه فروالکتریک

چکیده در این تحقیق، لایه نازک تیتانات سرب (PTO)، با ضخامت ۱۵۰ nm، با استفاده از روش رسوب‌گذاری از فاز مایع، روی زیرلایه تک‌بلور تیتانات استرانسیم آلانید شده با Nb با جهت بلوری [۰۰۱]، رشد داده شده است. نتایج پراش پرتو ایکس با قدرت تفکیک بالا (HR-XRD)، نشان داد که لایه PTO، در جهت [۰۰۱]، رشد یافته است. لایه نازک، زیرلایه، تقارن درجه چهار لایه نازک و زیرلایه، به وسیله روبش زاویه ϕ ، به اندازه ۳۶۰ درجه، حول صفحات {۱۰۲}، تأیید شد؛ بنابراین، لایه، به طور کامل، در جهت بلوری C، رشد یافته است. نقشه فضایی وارون حول صفحه (۱۰۳) لایه و زیرلایه، نشان داد که لایه نازک، تحت کرنش فشاری صفحه‌ای است. ثوابت شبکه‌ای محاسبه شده لایه PTO از موقعیت قله‌ها در محورهای عمودی و افقی، به میزان $a=0.403$ nm و $c=0.407$ nm است. این تنش فشاری، به دلیل تشکیل فصل مشترک هم‌دوس در فصل مشترک لایه و زیرلایه و عدم انطباق ثوابت شبکه لایه و زیرلایه، ایجاد شده است. مطالعات توپوگرافی AFM، نشان داد که لایه نازک، از دانه‌های کشیده‌ای تشکیل شده است که در جهت‌های [۱۰۰] و [۰۱۰]، رشد کرده‌اند. پیکربندی حوزه‌های فروالکتریک با میکروسکوپ نیروی پیزوالکتریکی (PFM)، مطالعه شد. نتایج، نشان داد که لایه، از حوزه‌های فروالکتریک، با مرز زاویه ۱۸۰ و ۹۰ درجه، تشکیل شده است. تشکیل حوزه‌های فروالکتریک با مرز زاویه ۹۰ درجه، در اثر کرنش فشاری ایجاد شده در لایه، به دلیل عدم انطباق ثوابت شبکه لایه و زیرلایه است. در واقع، حوزه‌های فروالکتریکی با مرز ۹۰ درجه، جهت کاهش انرژی الاستیک لایه، تشکیل شده است.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.205466.1049>

URL: http://www.jamt.ir/article_120202.html

JAMT: Vol. 9, No. 2, (Summer 2020), 73-79

Investigation of Microstructure and Ferroelectric Domain of Epitaxial PbTiO₃ Thin Film Grown by Liquid Phase Deposition

Amin Yourdkhani*

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Tehran, Iran

Paper History:

Received: 2019-10-28
Revised in revised form: 2020-06-16
Accepted: 2020-12-08

Abstract

In this research, PbTiO₃ (PTO) thin films with 150 nm thickness were grown on (001) Nb-doped SrTiO₃ substrate. High-resolution X-ray diffraction (HR-XRD) studies showed that the PTO films are epitaxial with [001] orientation. The ϕ -scan of the film and substrate around {102} revealed a fourfold symmetry for both demonstrating [001] perfect orientation of the films. XRD reciprocal space map around (103) of the film and

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، تهران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۳۳۴۸، دورنگار: ۰۲۱-۸۲۸۸۳۳۹۰

پیام نگار: a.yourd@modares.ac.ir

Please cite this article as: Yourdkhani, A., "Investigation of microstructure and ferroelectric domain of epitaxial PbTiO₃ thin film grown by liquid phase deposition", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 9, No. 2, (2020), 73-79. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.205466.1049>).



Keywords:
Thin Films,
Lead Titanate,
Epitaxial Growth,
Ferroelectric Domains

substrate revealed that film is fully strained with a compressive strain. The lattice constants calculated from the horizontal and vertical peak positions are; $a = 0.403$ nm and $c = 0.407$ nm. This compressive strain was developed due to the coherent interface formation in the film and substrate interface and the lattice parameter mismatch of the film with respect to the substrate. Topography studies by atomic force microscopy (AFM) showed that films are highly uniform with densely packed elongated grains developed along the [100] and [010] orientations. Ferroelectric domain configuration of the film was investigated by a piezoelectric force microscope (PFM). Two types of 180 and 90 degrees ferroelectric domains were observed. The epitaxial compressive strain is responsible for the formation of 90 degree domains. The developed strain via the lattice mismatch between the PTO layer and the substrate enforces electrical dipoles to rotate away from the normal direction to compensate the elastic energy of the film.

<https://doi.org/10.30501/jam.2020.205466.1049>

URL: http://www.jam.ir/article_120202.html

۱- مقدمه

بر این صفحه، اندازه‌گیری کردند. پهنا در نصف شدت این قله حاصل از صفحه براگ، 0.09 درجه اندازه‌گیری شد که این مقدار بسیار کم، مربوط به کیفیت بسیار بالای لایه‌ها است. در تحقیق دیگری [۲۲]، لایه‌نازک تیتانات سرب، روی زیرلایه اسپینل ($MgAl_2O_4$)، با جهت‌گیری [۱۰۰]، به روش کندوپاش یونی، در دمای $550-800^\circ C$ ، رشد داده شد. مطالعات آنها نشان داد که جهت‌گیری بلوری، ترکیبی از دو نوع a و c است و سرعت سرد شدن، در نسبت جهت‌گیری c به a ، مؤثر است. با افزایش سرعت سرد شدن، جهت‌گیری a ، شدت یافت. میزان عدم انطباق ثابت شبکه تیتانات سرب و زیرلایه، بر شکل‌گیری حوزه‌های فروالکتريک، اثرگذار است. در پژوهش فوق، لایه-نازک تیتانات سرب، با ثابت شبکه $a=0.390$ nm، روی دو زیرلایه اسکاندات تربیم ($TbScO_3$) با ثابت شبکه 0.3960 nm و اسکاندات ساماریم ($SmScO_3$) با ثابت شبکه 0.3985 nm، به روش رسوب بخار شیمیایی پیش ماده‌های آلی-فلزی، رشد داده شد [۲۳]. مطالعات این پژوهشگرها درباره پیکربندی حوزه‌های فروالکتريک، نشان داد که عدم انطباق بیشتر در زیرلایه اسکاندات ساماریم، منجر به تشکیل بیشتر حوزه‌ها با جهت‌گیری a می‌شود.

حدود دو دهه است که روش رسوب‌گذاری از فاز مایع^۱ (LPD)، جهت رشد لایه اکسید فلزات، ارائه شده است. با این روش، می‌توان به راحتی، لایه‌های نازکی به ضخامت‌های مختلف، با تنظیم زمان رسوب‌گذاری، رشد داد. این روش، ارزان قیمت است، نیاز به تجهیزات گران قیمت ندارد و می‌توان سطح وسیعی از زیرلایه‌ها را با این روش، پوشش داد. محلول LPD، شامل کمپلکس فلوراید فلزات است. این کمپلکس‌ها، به صورت محلول در آب هستند و به کندی، هیدرولیز می‌شوند، واکنش هیدرولیز، به تعادل شیمیایی می‌رسد (واکنش

لایه‌های نازک فروالکتريک، جایگزین احتمالی تک-بلورهای فروالکتريک هستند؛ زیرا رشد تک‌بلورها، بسیار هزینه‌بر و دشوار است [۱، ۲]. این لایه‌های نازک، در حسگرها [۳، ۴] و محرک‌های پیزوالکتريک [۵، ۶]، سیستم‌های میکروالکترومکانیک [۷، ۸]، حافظه‌های دستیابی تصادفی فروالکتريک [۹] و حسگرهای پیزوالکتريک [۱۰] کاربرد دارند. اکسیدهای پروسکایت، با فرمول شیمیایی ABO_3 که A ، شامل عناصر باریم، استرانسیم و سرب و B ، شامل عناصر زیرکونیم و تیتانیم است، نظیر تیتانات باریم ($BaTiO_3$)، تیتانات سرب ($PbTiO_3$) و $PbZr_xTi_{1-x}O_3$ ، مهم‌ترین مواد فروالکتريک هستند [۱۱]. این اکسیدها، دارای ضریب پیزوالکتريک، در محدوده $300-500$ pm/V، قطبش، در محدوده $25-45$ $\mu C/cm^2$ و دمای کوری، در محدوده $120-480^\circ C$ هستند [۱۲، ۱۳]. لایه‌های نازک تک‌بلور رشد داده، باید خواص قابل مقایسه‌ای با توده‌های تک‌بلور داشته باشند [۱۴]. برای رشد لایه‌های فروالکتريک تک‌بلور همدوس، از هر دو روش فیزیکی و شیمیایی استفاده شده است. زیرلایه مورد استفاده، باید جهت‌گیری و چیدمان اتمی تقریباً یکسانی نسبت به لایه نازک داشته باشد تا شرایط لازم جهت تشکیل لایه نازک هم‌محور، فراهم شود. روش‌های کندوپاش یونی [۱۵، ۱۶]، رسوب با لیزر پالسی [۱۷، ۱۸]، رشد هم‌محور از فاز مایع [۱۱]، رسوب از فاز بخار [۱۹] و سل-ژل [۲۰]، جهت رشد لایه‌های نازک هم-محور استفاده شده است. در تحقیقی [۲۱]، لایه‌های نازک تیتانات سرب به ضخامت 140 nm، با کیفیت عالی از نظر هم-محوری، به روش برآرایی پرتو-مولکولی، روی زیرلایه تیتانات استرانسیم ($SrTiO_3$)، با جهت [۰۰۱]، رشد داده شد. کیفیت بالای هم‌محوری لایه‌های نازک را با تنظیم شناساگر در مرکز بازتاب صفحه براگ (۰۰۱) و چرخش نمونه حول محور عمود

¹ Liquid Phase Deposition (LPD)

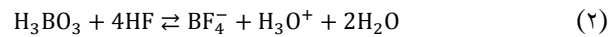
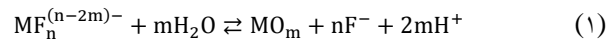
مخلوط شدند و سپس، محلول حاصل، با ۵۰ cc آب بدون یون، رقیق شد. در نهایت، محلول سوم، به این محلول فوق، اضافه شد و محلول LPD، حاصل شد. زیرلایه (۰۰۱) Nb-STO، به ضخامت ۳ mm و مساحت $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ، از شرکت MTI، تهیه شد. زیرلایه‌ها، به صورتی که سطح پولیش شده، به سمت کف بشر قرار می‌گرفت، در دمای 45°C ، به مدت سه ساعت، معلق شدند. سپس، زیرلایه‌ها، از محلول، خارج و با آب بدون یون، شستشو شدند. نمونه‌ها، در دمای محیط، به مدت یک شبانه روز، خشک شدند و سپس، با سرعت گرمایش $10^\circ \text{C}/\text{min}$ ، تا دمای 750°C ، حرارت داده شدند و در این دما، به مدت شش ساعت، عملیات حرارتی شدند. مشخصه‌یابی پراش پرتو ایکس، با پراش‌سنج Philips مدل X'pert Analytical، با تابش پرتو $\text{Cu-K}\alpha$ ، در هندسه θ - 2θ ، انجام شد. نقشه فضای وارون لایه و زیرلایه و روبش در هندسه ϕ ، با پراش‌سنج با قدرت تفکیک بالا Bruker مدل D8 انجام شد. توپوگرافی سطح لایه و پیکربندی حوزه‌های فروالکتریک، با میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و نیروی پیزوالکتریکی (PFM) ساخت شرکت Asylum مدل MFP-3D، با استفاده از یک سوزن هادی، اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

لایه‌های تهیه شده، قبل از عملیات حرارتی، آمورف هستند [۲۷] و عملیات حرارتی، در دماهای حدود 750°C ، منجر به تبلور لایه نازک می‌شود. شکل ۱، الگوی پراش پرتو ایکس لایه PTO رشد داده شده روی زیر لایه (۰۰۱) Nb-STO را نشان می‌دهد.

در الگوی لایه‌نازک تیتانات سرب، قله‌های مربوط به صفحه‌های (۰۰۱) لایه و زیرلایه، ظاهر شده است. این داده‌ها، مؤید جهت‌گیری کامل لایه، در جهت محور بلوری c است. همچنین، لایه رشد داده شده، تک‌فاز است. فاز پیروکلر، معمولاً به صورت ناخالصی، در سنتز اکسیدهای پروسکایت، در دماهای پایین‌تر سنتز، تشکیل می‌شود. عدم حضور این فاز، تأیید می‌کند که عملیات حرارتی، در دمای مناسبی، انجام شده است. الگوی پراش لایه، با الگوی مرجع با شماره ۰۷۴۴-۰۷۰-۰۱، با ساختار بلوری تتراگونال و گروه فضایی P4mm، منطبق است.

(۱) و پیشرفت نمی‌کند. طبق واکنش (۲)، جهت برهم‌زدن تعادل شیمیایی، استفاده از مصرف کننده یون فلوراید، مانند اسید بوریک، ضروری است. با مصرف شدن یون فلوراید، واکنش هیدرولیز، پیشرفت می‌کند و رسوب اکسی-هیدروکسید فلز، تشکیل می‌شود.



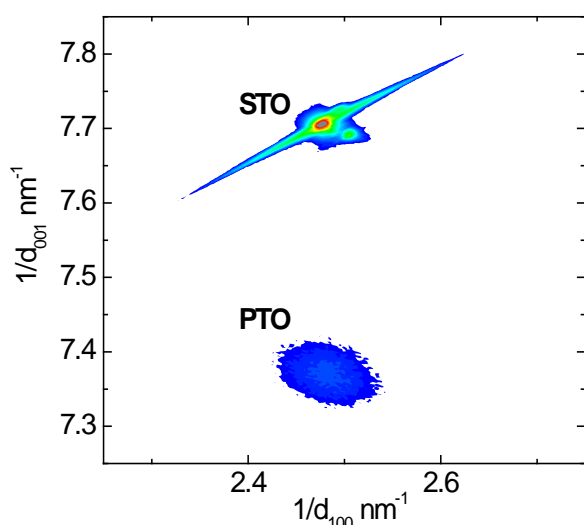
از آنجایی که محصول هیدرولیز، ذرات بسیار ریز با انرژی سطحی بالایی هستند، روی هر سطحی که در تماس با محلول باشد، رسوب می‌کنند و منجر به تشکیل لایه‌ای یکنواخت می‌شوند. واکنش LPD، در دمای کمتر از 70°C انجام می‌شود. همه موارد ذکر شده، نوید این را می‌دهد که این روش، حتی در کاربردهای صنعتی هم، جهت رشد لایه‌های اکسید فلزات، استفاده شود [۳۱-۲۴].

در این پژوهش، لایه‌نازک هم‌محور تیتانات سرب، به روش شیمی تر، روی زیرلایه تک‌بلور تیتانات استرانسیم آلایش یافته با نیوبیم، تحت عنوان رسوب‌گذاری از فاز مایع، رشد داده شد. این پژوهش، مقدمه‌ای برای رشد هم‌محور لایه-نازک اکسید فلزات دیگر، مانند تیتانات‌های پروسکایت و فریت‌های اسپینل، با روش رسوب‌گذاری از فاز مایع، برای کاربردهای الکتریکی و مغناطیسی است.

۲- روش تحقیق

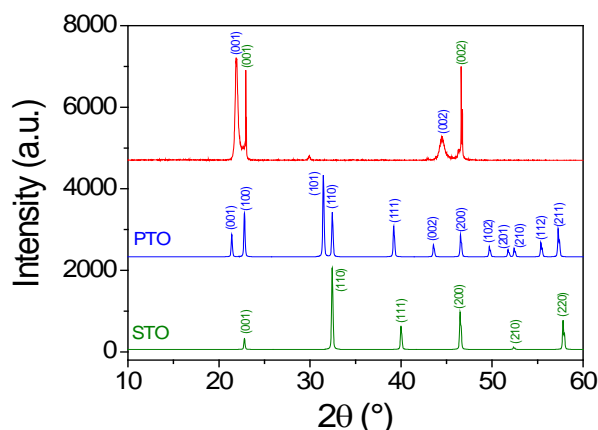
مواد اولیه $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ با خلوص ۹۹/۹۹ و شماره شناسایی ۶-۴۰-۱۶۹۶۲، H_3BO_3 با خلوص ۹۹/۹۹ و شماره شناسایی ۳-۳۵-۱۰۰۴۳ و $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ با خلوص ۹۹/۹۹۹ و شماره شناسایی ۸-۷۴-۱۰۰۹۹، از شرکت Alfa-Aesar، تهیه شدند. از آب بدون یون، با هدایت الکتریکی $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ ، به عنوان حلال، استفاده شد. سه محلول آبی مختلف، آماده شد. محلول اول و دوم، با حل کردن 0.5 mmol از $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ و 0.5 mmol از $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ، در 20 cc آب بدون یون، تهیه شدند. محلول سوم، با حل کردن $1/5 \text{ mmol}$ از H_3BO_3 ، در 20 cc آب بدون یون، تهیه شد. ابتدا، محلول‌های اول و دوم، با هم

نقشه فضای وارون، حول صفحه (۱۰۳) لایه و زیرلایه، در شکل ۳، نشان داده شده است. در محور افقی، موقعیت قله لایه و زیرلایه، منطبق است. این موضوع، نشان می‌دهد که لایه نازک، دارای فصل مشترک هم‌محور با زیرلایه است و لایه، تحت کرنش فشاری است [۳۲]. عدم تطابق موقعیت قله لایه و زیرلایه در محور عمودی، به دلیل ثابت شبکه بزرگتر لایه نازک، نسبت به زیرلایه، در جهت محور بلوری c است. ثابت شبکه لایه PTO، از موقعیت قله‌ها، در محورهای عمودی و افقی، به میزان $a=0/403 \text{ nm}$ و $c=0/407 \text{ nm}$ ، بدست آمد.

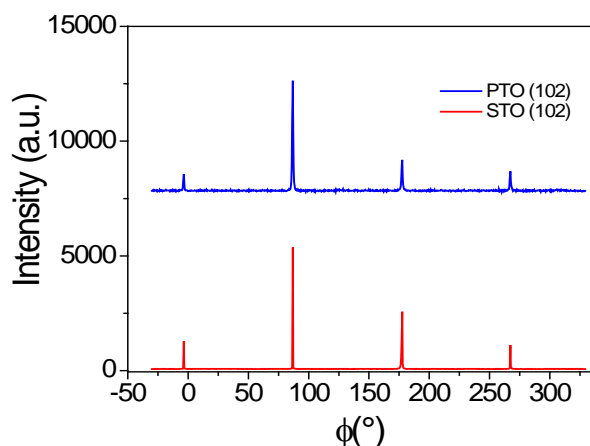


شکل ۳. نقشه فضای وارون حول صفحه (۱۰۳) لایه و زیرلایه

شکل ۴: الف، توپوگرافی سطح لایه را نشان می‌دهد. لایه، از دانه‌های کشیده، در جهت‌های عمود برهم، تشکیل شده است. عرض این دانه‌ها، حدود 200 nm و طول آنها، در محدوده $1-1/5 \mu\text{m}$ است. زبری مؤثر لایه‌ها، حدود 6698 \AA ، اندازه‌گیری شد. دانه‌های کشیده عمود برهم، این تصور را ایجاد می‌کند که این دانه‌ها، در جهت‌های خاص بلوری، رشد کرده‌اند. جهت بررسی این موضوع، نمونه‌های با سطح مربع، طوری با AFM مورد ارزیابی قرار گرفتند که جهت روبش، موازی با لبه‌های زیرلایه باشد. لبه‌های زیرلایه، موازی جهت-های $[100]$ و $[010]$ هستند. شکل ۴: ب، تصویر AFM جمع-آوری شده در این حالت را نشان می‌دهد. دانه‌های کشیده، موازی یا عمود بر جهت روبش هستند. بنابراین دانه‌های کشیده، در جهت‌های $[100]$ و $[010]$ ، رشد یافته‌اند. این نوع ریزساختار، در لایه‌های هم‌محور پروسکایتی رشد داده شده با



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس لایه PTO رشد داده شده روی زیر لایه (۰۰۱) Nb-STO؛ طیف‌ها به ترتیب از بالا به پایین، طیف اول: لایه نازک، طیف دوم: الگوی مرجع تیتانات سرب با شماره ۰۰۷۴۴-۰۱۰-۰۷۰ و طیف سوم: الگوی مرجع با شماره ۰۰۵-۰۰-۰۶۳۴ را نشان می‌دهد

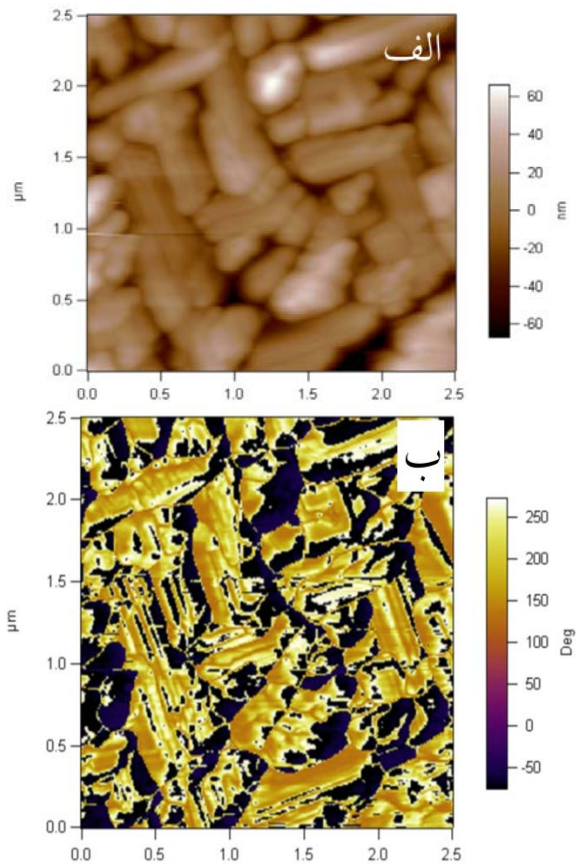


شکل ۲. الگوی روبش ϕ حول صفحات $\{102\}$ لایه و زیرلایه

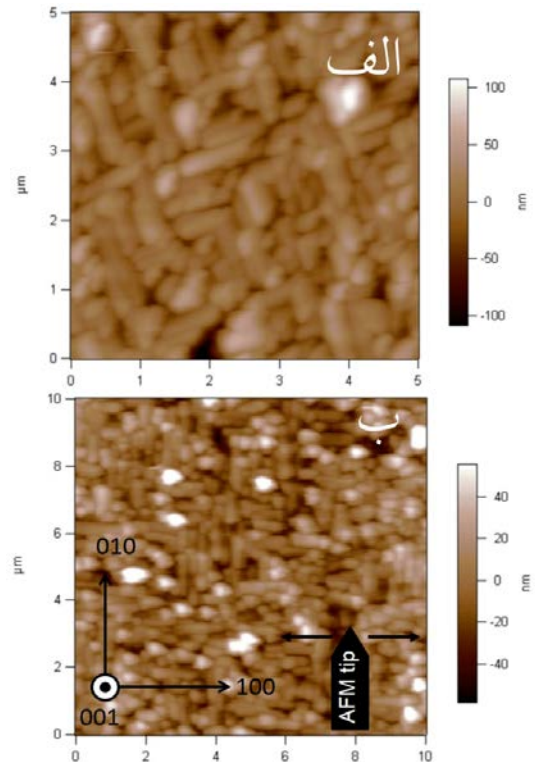
برای مطالعه جهت‌گیری لایه نازک و زیرلایه، روبش ϕ حول صفحات $\{102\}$ لایه و زیرلایه، انجام شد. الگوی این روبش، در شکل ۲، نشان داده شده است. این دسته صفحات، به صورت مایل، نسبت به سطح هستند و طول بردار پراکندگی، طوری تنظیم شد که با بردار شبکه معکوس $\{102\}$ ، منطبق شود. سپس، نمونه، حول این محور، به اندازه 360° درجه، چرخیده شد. الگوی روبش ϕ ، دارای چهار قله، با فاصله 90° درجه است که بیانگر تقارن درجه چهار بلوری لایه و زیرلایه است. غیبت قله‌های دیگر، مؤید جهت‌گیری بسیار عالی لایه نازک، در جهت محور بلوری c است. جهت‌گیری بلوری بین لایه و زیرلایه، به صورت $[001]_{\text{PTO}} // [001]_{\text{STO}}$ و $[001]_{\text{PTO}} // [001]_{\text{STO}}$ است.

که در هنگام استحاله فازی از پارالکتریک به فروالکتریک آن ماده، تحت تنش، قرار گرفته باشد.

روش‌های رسوب با لیزر پالسی و کندوپاش یونی نیز مشاهده شده است [۳۳، ۳۴].



شکل ۵. الف) توپوگرافی سطح و ب) پیکربندی حوزه‌های فروالکتریک



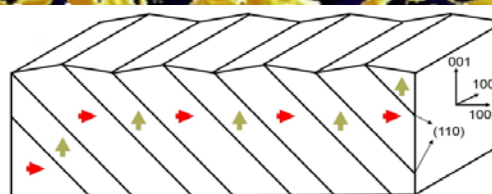
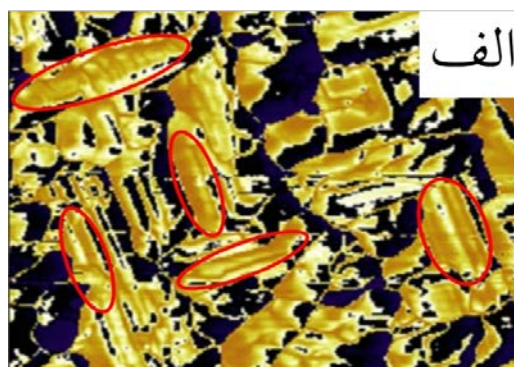
شکل ۴. الف) توپوگرافی سطح و ب) توپوگرافی سطح به صورتی که جهت روبش، موازی با لبه‌های زیرلایه باشد

در شکل ۶. الف، مناطقی که مربوط به حضور حوزه‌ها، با مرز زاویه ۹۰ درجه است، با علامت بیضی، مشخص شده است. حوزه‌های با مرز زاویه ۹۰ درجه، به صورت متناوب، از حوزه‌های با جهت‌گیری در جهات a و c^+ تشکیل شده‌اند. در شکل ۶. ب، آرایش حوزه‌های با مرز زاویه ۹۰ درجه، به صورت طرحواره، نشان داده شده است. این حوزه‌های با مرز زاویه ۹۰ درجه، جهت جبران افزایش انرژی الاستیک ناشی از کرنش همدوس، شکل گرفته است. هر حوزه a ، در یکی از جهت‌های $[100]$ و $[010]$ ، جهت‌گیری می‌کند و مجاور دو حوزه c^+ است. مرز بین حوزه‌ها، در دسته صفحات $\{110\}$ ، تشکیل می‌شود. این پیکربندی حوزه‌های فروالکتریک، ناشی از استحاله فازی پارالکتریک به فروالکتریک، در زیر دمای کوری، در اثر سرد شدن بعد از عملیات حرارتی است. در اثر این استحاله، فاز مکعبی با تقارن بالا، با گروه فضایی $Pm3m$ ، به

شکل ۵. الف و ب، به ترتیب، توپوگرافی سطح و فاز پیزوالکتریک همان سطح را نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۵. الف و ب، نشان می‌دهد که تقریباً همبستگی بین مورفولوژی و حوزه‌های فروالکتریک، وجود ندارد و این موضوع، غیر واقعی بودن تصویر پیکربندی حوزه‌های فروالکتریک را رد می‌کند. در شکل ۵. ب، عمدتاً دو نوع جهت‌گیری فضایی، مشاهده می‌شود. مناطق تاریک، جهت‌گیری حوزه‌های مغناطیسی را به داخل صفحه، نشان می‌دهد؛ در حالی که مناطق روشن، جهت‌گیری حوزه‌ها را به سمت خارج صفحه نشان می‌دهد. تصویر فاز پیزوالکتریک، نشان می‌دهد که دو نوع حوزه فروالکتریک، با مرز زاویه ۹۰ و ۱۸۰ درجه، وجود دارد. مرز زاویه ۱۸۰ درجه، دو حوزه را که جهت‌گیری قطبش آنها، نسبت به هم ۱۸۰ درجه است را جدا می‌کند؛ در حالی که مرز زاویه ۹۰ درجه، دو حوزه را که جهت‌گیری قطبش آنها، نسبت به هم ۹۰ درجه دارند را جدا می‌کند. حوزه‌های با مرز زاویه ۹۰ درجه، معمولاً در سیستم‌های فروالکتریک، ایجاد می‌شوند

- Streiffer, S., "Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications", *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, No. 5, 051606, (2006), 1-46. <https://doi.org/10.1063/1.2336999>
- Dragan, D., "Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics", *Reports on Progress in Physics*, Vol. 61, No. 9, (1998), 1267-1324. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/61/9/002>
 - Buchanan, R. C., Huang, J., "Pyroelectric and sensor properties of ferroelectric thin films for energy conversion", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 19, No. 6, (1999), 1467-1471. [http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219\(98\)00454-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00454-3)
 - Polla, D. L., Ye, C., Schiller, P., Tamagawa, T., Robbins, W. P., Glumac, D., Hsueh, C. C., *Applications of PZT and Related Thin Films in Piezoelectric Microsensors*, MRS Proceedings, Boston, (2011). <https://doi.org/10.1557/PROC-243-55>
 - Liu, N., Yang, J., Chen, W., "Thin-film piezoelectric actuators of nonuniform thickness and nonhomogeneous material properties for modulating actuation stress", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 22, No. 10, (2015), 803-812. <https://doi.org/10.1080/15376494.2013.864431>
 - Oldham, K., Pulskamp, J., Polcawich, R., Ranade, P., Dubey, M., "Thin-film piezoelectric actuators for bio-inspired micro-robotic applications", *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 95, No. 1, (2007), 54-65. <https://doi.org/10.1080/10584580701756482>
 - Kanda, K., Inoue, J., Saito, T., Fujita, T., Higuchi, K., Maenaka, K., "Fabrication and characterization of double-layer $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ thin films for micro-electromechanical systems", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 1, 09LD12, (2012), 1-5. <https://doi.org/10.1143/JJAP.51.09LD12>
 - Yuya, I., Jing, Z., Norio, T., Tsuyoshi, O., Kan, O., "Characteristic analysis of diaphragm-type transducer that is thick relative to its size", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, No. 7S1, 07JD11, (2017), 1-8. <https://doi.org/10.7567/1.56.07JD11>
 - Kijima, T., Aoyama, T., Miyazawa, H., Hamada, Y., Ohashi, K., Nakayama, M., Furuya, N., Matsumoto, A., Natori, E., Tanaka, K., Shimoda, T., "Ferroelectric random access memory using $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti},\text{Nb})\text{O}_3$ films", *Proceedings of 2007 Sixteenth IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics*, Nara-City, (2007). <https://doi.org/10.1109/ISAF.2007.4393155>
 - Takayama, R., Tomita, Y., Iijima, K., Ueda, I., "Pyroelectric properties and application to infrared sensors of PbTiO_3 , PbLaTiO_3 and PbZrTiO_3 ferroelectric thin films", *Ferroelectrics*, Vol. 118, No. 1, (1991), 325-342. <https://doi.org/10.1080/00150199108014770>
 - Zeng, X., Qin, F., Yao, X., Xu, N., Xu, S., "A systematic study on the growth of PZNT films by LPE method", *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 13, (2006), 4267-4272. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5473-z>
 - Matsubara, S., Miura, S., Miyasaka, Y., Shohata, N., "Preparation of epitaxial ABO_3 perovskite-type oxide thin films on a $(100)\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Si}$ substrate", *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, No. 12, (1989), 5826-5832. <https://doi.org/10.1063/1.343654>
 - McDaniel, M. D., Ngo, T. Q., Hu, S., Posadas, A., Demkov, A. A., Ekerdt, J. G., "Atomic layer deposition of perovskite oxides and their epitaxial integration with Si, Ge, and other semiconductors", *Applied Physics Reviews*, Vol. 2, No. 4, 041301, (2015), 1-32. <https://doi.org/10.1063/1.4934574>
 - Wang, Y., Ganpule, C., Liu, B. T., Li, H., Mori, K., Hill, B., Wuttig, M., Ramesh, R., FINDER, J., Yu, Z., Droopad, R., Eisenbeiser, K., "Epitaxial ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ thin films on Si using SrTiO_3 template layers", *Applied Physics Letters*, Vol. 80, No. 1, (2002), 97-99. <https://doi.org/10.1063/1.1428413>
 - Kushida, K., Takeuchi, H., "Epitaxial growth of PbTiO_3 films on SrTiO_3 by RF magnetron sputtering", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 38, No. 6, (1991), 656-662. <https://doi.org/10.1109/58.1088866>
 - Seiji, N., Tomohisa, U., Kentaro, D., Koh, S., Hironori, F., Osami, S., Yoshio, K., Nobuo, T., Masaru, S., "Strain evolution of epitaxial tetragonal-like BiFeO_3 thin films on LaAlO_3 (001) substrates prepared by sputtering and their bulk photovoltaic effect", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 55, No. 10, (2016), 1015011-1015019. <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.1015011>

فاز با تقارن پایین‌تر، با گروه فضایی $P4mm$ ، تبدیل شده است.
[۳۵]



ب 90 degree domains

شکل ۶. الف) حوزه های فروالکتريک با مرز زاويه ۹۰ درجه، با علامت بيضی مشخص شده است. ب) طرحواره آرایش حوزه‌های فروالکتريک با مرز زاويه ۹۰ درجه

۴- نتیجه‌گیری

لایه‌نازک PTO، با ضخامت ۱۵۰ nm، به صورت همدوس، به روش رسوب‌گذاری از فاز مایع، رشد داده شد. نتایج پراش پرتو ایکس، نشان داد که لایه‌نازک، تحت تنش فشاری ناشی از عدم تطابق ثابت شبکه‌ای لایه و زیرلایه است. مطالعات ریزساختاری، نشان داد که دانه‌ها، در جهت‌های [۱۰۰] و [۰۱۰]، رشد یافته‌اند. حوزه‌های فروالکتريک، از حوزه‌های ۹۰ و ۱۸۰ درجه، تشکیل شده‌اند. تنش فشاری در لایه نازک، باعث تشکیل حوزه‌های ۹۰ درجه شده است.

۵- سپاسگزاری

از دانشگاه تربیت مدرس برای حمایت مالی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- Setter, N., Damjanovic, D., Eng, L., Fox, G., Gevorgian, S., Hong, S., Kingon, A., Kohlstedt, H., Park, N. Y., Stephenson, G. B., Stolitchnov, I., TagansteV, A. K., Taylor, D. V., Yamada, T.,

26. Deki, S., Hosokawa, A., Béléké, A. B., Mizuhata, M., " α -Ni(OH)₂ thin films fabricated by liquid phase deposition method", *Thin Solid Films*, Vol. 517, No. 5, (2009), 1546-1554. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.09.040>
27. Yourdkhani, A., Caruntu, G., "Characterization of the microstructural and piezoelectric properties of PbTiO₃ thin films synthesized by liquid-phase deposition", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 115, No. 30, (2011), 14797-14805. <https://doi.org/10.1021/jp202127t>
28. Yourdkhani, A., Perez, A. K., Lin, C., Caruntu, G., "Magnetolectric perovskite-spinel bilayered nanocomposites synthesized by liquid-phase deposition", *Chemistry of Materials*, Vol. 22, No. 22, (2010), 6075-6084. <https://doi.org/10.1021/cm1014866>
29. Yourdkhani, A., Caruntu, D., Perez, A. K., Caruntu, G., "Liquid phase deposition of barium hexaferrite thin films", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 118, No. 4, (2014), 1774-1782. <https://doi.org/10.1021/jp409634x>
30. Yourdkhani, A., Caruntu, G., "Highly ordered transition metal ferrite nanotube arrays synthesized by template-assisted liquid phase deposition", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 21, No. 20, (2011), 7145-7153. <https://doi.org/10.1039/C0JM04441E>
31. Yourdkhani, A., Caruntu, D., Vopson, M., Caruntu, G., "1D core-shell magnetolectric nanocomposites by template-assisted liquid phase deposition", *CrystEngComm*, Vol. 19, No. 15, (2017), 2079-2088. <https://doi.org/10.1039/C7CE00101K>
32. Perántie, J., Stratulat, M. S., Hannu, J., Jantunen, H., Tyunina, M., "Enhancing polarization by electrode-controlled strain relaxation in PbTiO₃ heterostructures", *APL Materials*, Vol. 4, No. 1, (2016), 0161041-0161046. <https://doi.org/10.1063/1.4939790>
33. Xu, R., Karthik, J., Damodaran, A. R., Martin, L. W., "Stationary domain wall contribution to enhanced ferroelectric susceptibility", *Nature Communication*, Vol. 5, No. 1, (2014), 3120-3127. <https://doi.org/10.1038/ncomms4120>
34. Andreev, N. V., Sviridova, T. A., Chichkov, V. I., Volodin, A. P., Van Haesendonck, C., Mukovskii, Y. M., "Crystal structure and surface morphology of magnetron sputtering deposited hexagonal and perovskite-like YbMnO₃ thin films", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 586, No. 1, (2014), S343-S347. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.156>
35. Tilley, R. J. D., *Perovskites: Structure-property relationships*, Wiley, (2016). <https://doi.org/10.1002/9781118935651>
17. Catalan, G., Lubk, A., Vlooswijk, A. H. G., Snoeck, E., Magen, C., Janssens, A., Rispens, G., Rijnders, G., Blank, D. H. A., Noheda, B., "Flexoelectric rotation of polarization in ferroelectric thin films", *Nature Materials*, Vol. 10, No. 12, (2011), 963-967. <https://doi.org/10.1038/nmat3141>
18. Yu, Y. H., Lai, M. O., Lu, L., "Distribution in orientation axis of thin film grown by pulsed laser deposition", *Thin Solid Films*, Vol. 516, No. 6, (2008), 907-911. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.04.150>
19. Chentir, M. -T., Utsugi, S., Fujisawa, T., Ehara, Y., Ishikawa, M., Morioka, H., Yamada, T., Matsushima, M., Funakubo, H., "Small-strain (100)/(001)-oriented epitaxial PbTiO₃ films with film thickness ranging from nano- to micrometer order grown on (100)CaF₂ substrates by metal organic chemical vapor deposition", *Journal of Materials Research*, Vol. 28, No. 5, (2013), 696-701. <https://doi.org/10.1557/jmr.2012.441>
20. Liu, B., Sun, T., He, J., Dravid, V. P., "Sol-gel-derived epitaxial nanocomposite thin films with large sharp magnetolectric effect", *ACS Nano*, Vol. 4, No. 11, (2010), 6836-6842. <https://doi.org/10.1021/nn101952q>
21. Li, Z., Foster, C. M., Guo, D., Zhang, H., Bai, G. R., Baldo, P. M., Rehn, L. E., "Growth of high quality single-domain single-crystal films of PbTiO₃", *Applied Physics Letters*, Vol. 65, No. 9, (1994), 1106-1108. <https://doi.org/10.1063/1.112112>
22. Matsubara, S., Shohata, N., Mikami, M., "Epitaxial growth of PbTiO₃ on MgAl₂O₄/Si substrates", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 24, No. S3, (1985), 10-12. <https://doi.org/10.7567/JJAPS.24S3.10>
23. Borodavka, F., Gregora, I., Bartasyte, A., Margueron, S., Plausinaitiene, V., Abrutis, A., Hlinka, J., "Ferroelectric nanodomains in epitaxial PbTiO₃ films grown on SmScO₃ and TbScO₃ substrates", *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, No. 18, (2013), 187216 1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4801966>
24. Deki, S., Aoi, Y., Okibe, J., Yanagimoto, H., Kajinami, A., Mizuhata, M., "Preparation and characterization of iron oxyhydroxide and iron oxide thin films by liquid-phase deposition", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 7, No. 9, (1997), 1769-1772. <https://doi.org/10.1039/A700628D>
25. Deki, S., Iizuka, S., Akamatsu, K., Mizuhata, M., Kajinami, A., "Novel fabrication method for Si_{1-x}Ti_xO₂ thin films with graded composition profiles by liquid phase deposition", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 11, No. 4, (2001), 984-986. <https://doi.org/10.1039/B100615K>