

# 一般論文

## 誘導結合プラズマを利用したスパッタ装置による 高信頼性IGZO TFTの作製と低温プロセス化

Fabrication of Highly Reliable IGZO TFTs by Lowering the Process Temperature  
Using the Inductively Coupled Plasma Sputtering System

松尾大輔\*      岸田茂明\*  
D. Matsuo      S. Kishida  
小寺隆志\*      瀬戸口佳孝\*  
T. Kotera      Y. Setoguchi  
安東靖典\*  
Y. Andoh

### 概要

大型高精細フレキシブルディスプレイの量産化において、酸化物半導体TFTの信頼性とプロセスの低温化が大きな課題となっている。当社では、これらの問題を解決すべく酸化物半導体薄膜成膜用のスパッタ装置の開発を行っている。本装置は、誘導結合プラズマ(Inductively Coupled Plasma)技術を用いることで、スパッタ用ターゲットへの印加電圧をプラズマ生成条件とは独立して設定できる様に構成されている。その結果、室温での高密度成膜が可能となり、TFTの高い信頼性とプロセスの低温化の両立に成功した。

### Synopsis

In the mass production of large size high definition flexible displays, reliability of the oxide semiconductor TFT and the way to lower the process temperature have become serious problems. In order to solve these problems, we are developing new sputtering equipment to deposit oxide semiconductor thin films. This system can control the RF (Radio Frequency) power to generate ICP (Inductively Coupled Plasma) and the voltage applied to the sputtering target independently. Using this equipment, we can deposit high-density oxide semiconductor films at room temperature and fabricate highly reliable TFTs with them.

### ■ 1. はじめに

アモルファスInGaZnO (a-IGZO) に代表される透明アモルファス酸化物半導体 (Transparent Amorphous Oxide Semiconductor) は、アモルファスSi (a-Si) 半導体と比較して、電界効果移動度が1桁以上高く、OFF電流が小さいという優れた特徴を持っている<sup>(1)-(4)</sup>。一般的なスパッタ装置で製造できるため、低温ポリシリコン (LTPS) 半導体よりも低コストで、均一な大面積薄膜の形成が可能である。よって、より安価に低消費電力の高精細度ディスプレイを製造することができる。

また、フレキシブルディスプレイへの応用も進められており、電子ペーパーや有機発光ダイオードディスプレイ (OLED) の開発も進められている<sup>(5)-(9)</sup>。しかしながら、a-IGZO TFTは電氣的ストレスに対する信頼性に課題があることが報告されており、TFT特性の劣化 (TFTの閾値電圧 ( $V_{th}$ ) 変化) が問題となっている<sup>(10)-(16)</sup>。

IGZO TFTの作製プロセスにおいては、300°C以上での熱処理が一般的に必要と言われている<sup>(2), (17)</sup>。フレキシブルディスプレイの場合、使用するプラスチック

\* 研究開発本部

基板の耐熱温度がガラス基板と比べて低く、特に透明フレキシブルディスプレイの製造において、プロセスの低温化が課題となっている。これらの問題を解決するために、高密度なIGZO膜の成膜が可能な装置が求められている。膜密度が低い場合、過剰酸素が混入する空間が生じてTFTの動作を不安定化させることが知られている<sup>(18)-(20)</sup>。また、低密度IGZO膜のTFT動作には高温アニールが必要なが報告されている<sup>(18)</sup>。よって、膜密度は、IGZO TFT性能の重要な指標である。我々は、スパッタ成膜時に基板に流入するエネルギーの大きさが膜密度に影響を与える重要な因子であり、ターゲット電圧の変更によって制御できると考えて、プラズマ生成条件とターゲット電圧を独立に制御することができる装置の開発を行った。プラズマ生成には大型化が比較的容易な誘導結合プラズマ (ICP) 技術を用いた。本稿では、ICPスパッタ装置の開発状況と同装置で室温成膜したa-IGZO膜の品質やTFTとしての特性評価結果について報告する。

## 2. 装置の仕様

### 2. 1 装置概要

ICPスパッタ装置の概念図を図1に示す。高周波電源 (周波数13.56MHz) に接続されたアンテナを真空チャンバ内に設置し、RF電力を印加することによって、プラズマを生成する。ターゲットに負バイアス電圧を印加すると、プラズマから引き出されたイオンがターゲットに衝突し、その構成材料がスパッタされて基板上に膜が形成される。アンテナとターゲットはそれぞれ別の電源に接続されているため、プラズマ密度とターゲット電圧の独立制御が可能である。アンテナに印加する電力を増加させることで、高密度のプラズマを発生させることができるので、低いターゲット電圧でも成膜が可能である。なお、ターゲット表面でのプラズマ密度を高めるために従来のスパッタ装置で用いられている磁石は、本装置では不要である。

図2に開発した装置の外観を示す。成膜室内に、RF電源に接続した直線状アンテナと矩形のInGaZnO (1:1:1:4) ターゲットを設置している。基板サイズは320×400mm (G1/第1世代) であり、パーティクル低減対策として、基板を直立させた状態で搬送・成膜を行っている。また、膜厚や膜質を均一化させるために、基板は成膜中に揺動させている。

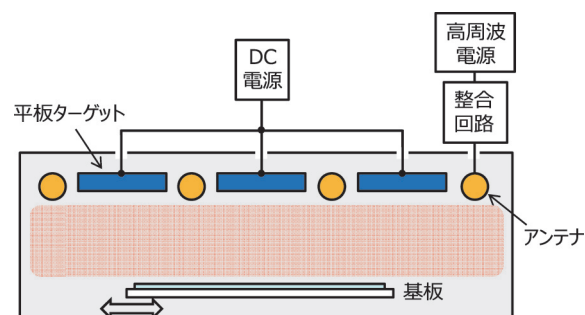


図1 ICPスパッタ装置の概念図

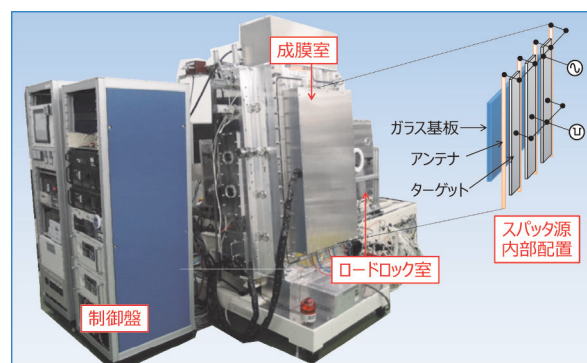


図2 G1サイズ装置 外観

### 2. 2 膜特性の面内分布と成膜速度

図3と図4に、RF電力7kW、ターゲット電圧400Vという条件で成膜したIGZO膜の膜厚と組成の分布を示すが、膜厚は±5%以下、組成は±2%以下のばらつきに抑えられている。ICPスパッタ装置は、RFマグネトロンスパッタ装置とは異なり、ターゲット近傍に磁石を配置していないため、プラズマがチャンバ全体に拡がり、成膜を均一に行うことが可能である。図5に、2種類のRF電力条件下でのターゲット印加電圧と成膜速度の関係を示すが、一定RF電力の下で、両者は良い直線関係にあることがわかる。

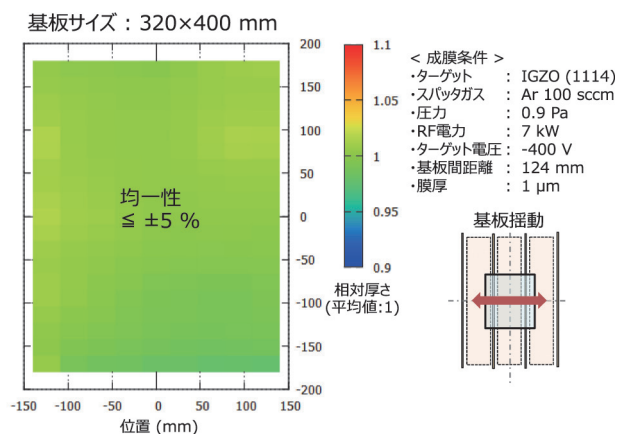


図3 G1サイズIGZO膜の面内膜厚分布

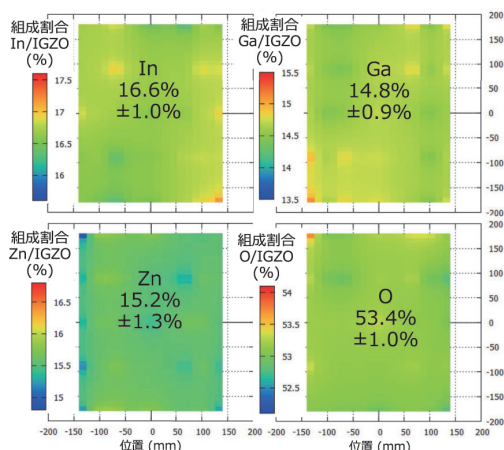


図4 G1サイズIGZO膜のXPS分析による面内組成分布

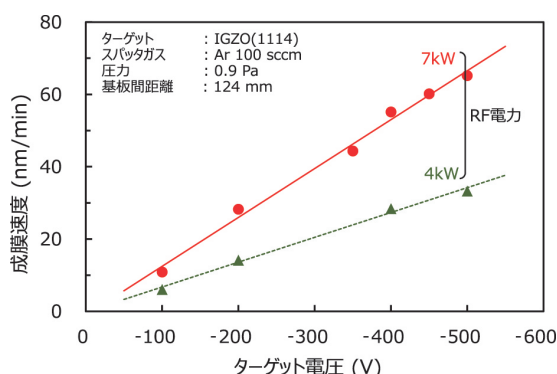


図5 各RF電力におけるターゲット電圧と成膜速度の関係

### 2. 3 ターゲットのエロージョン深さの面内分布

図6に、スパッタ終了後にターゲットのエロージョン深さの分布を測定した結果を示す。プラズマがチャンバ内で均一に拡がっているため、ターゲット材料が均一に消費されるので、表面の凹凸は非常に小さくなる。この表面形状から計算されたターゲットの利用率は85%であり、非常に高い。利用率が高い程、メンテナンス回数が減り、稼働率が向上するので、量産装置として優れている。

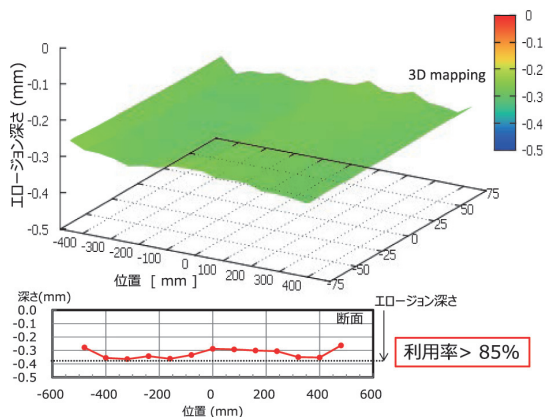


図6 ターゲットのエロージョン深さ分布と利用率

## 3. 膜質評価

### 3. 1 膜密度

RF電力とターゲット電圧を変更して成膜したIGZO膜の密度を、X線反射率法（XRR）を用いて測定した結果を図7に示す。膜密度とRF電力との相関は確認できなかったが、ターゲット電圧が低い程、膜密度が増加する傾向が認められた。-500V以下のターゲット電圧で、 $6.1\text{g/cm}^3$ 以上という高い膜密度が達成可能である。このように、RF電力とターゲット電圧の独立制御が可能なICPスパッタ装置は、優れた膜密度制御能力を有していることがわかる。

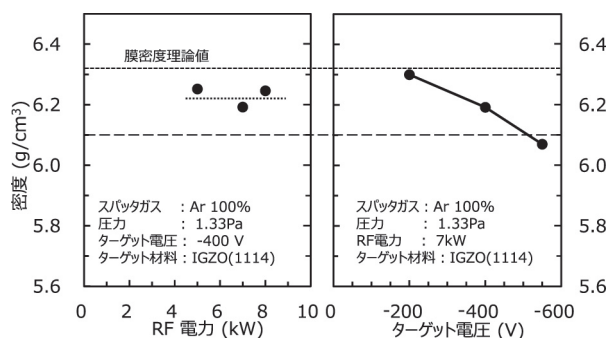


図7 ICPスパッタ装置で成膜したIGZO膜の膜密度

### 3. 2 金属-酸素結合状態

酸素欠損がTFTの信頼性低下の原因であると報告されているので、IGZO膜を構成する元素の結合状態を把握することが重要である<sup>(21)・(22)</sup>。ICPスパッタ装置で成膜したIGZO膜に含まれる各元素の結合状態を調べるために、成膜直後にXPS分析を行った。比較として、RFマグネトロン装置で成膜したIGZO膜の分析も行った。代表例として、両者のIn  $3d_{5/2}$ 軌道のXPSスペクトルを図8に示す。どちらも3つのピークから構成されているが、ICPスパッタによるIGZO膜の方が、金属-酸素結合の割合が多く、金属単体の割合が少ないことが分かった。図9に、膜を構成する金属元素(In,Ga,Zn)の結合状態の存在割合をまとめた結果を示す。ICPスパッタによるIGZO膜は、全ての元素において、RFスパッタによる膜よりも金属-酸素結合の割合が多い。この割合が多い程、酸素欠損が少ないと考えられるので、ICPスパッタで成膜したIGZO膜の方が、RFスパッタによるものよりも良質であると考えられる。



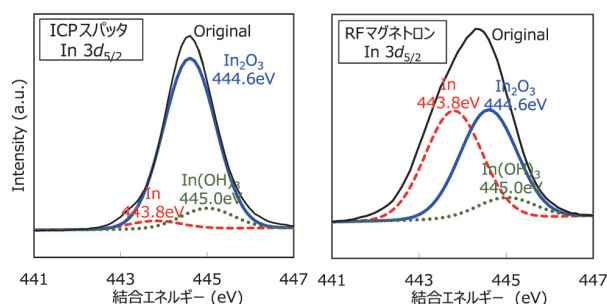
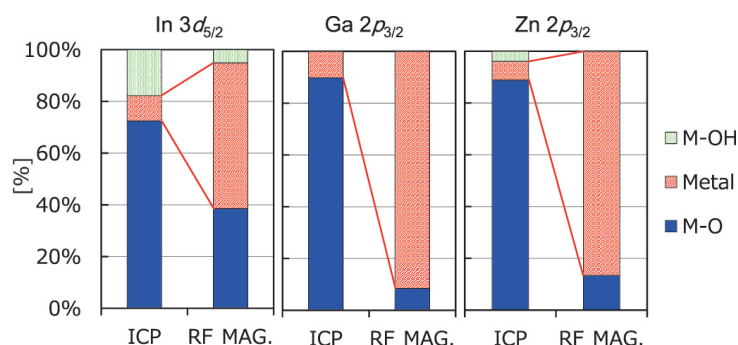
図8 In 3d<sub>5/2</sub>軌道のXPSスペクトルの比較

図9 XPSスペクトルのピーク分離による各元素の結合状態の割合

## 4. TFT特性の評価

### 4.1 TFTの作製

TFTとしての特性評価を行うために、ボトムゲートトップコンタクト型のIGZO TFTを作製した。作製したTFTの構造を図10に示す。TFTは、SiO<sub>2</sub> (100nm) / Si基板 (n型、抵抗率<0.007 Ω cm) 上に作製した。IGZO膜は、IGZOターゲット (In:Ga:Zn:O=1:1:1:4) を使用して、ICPスパッタ装置により室温で50nm成膜した。成膜時の圧力は0.9Pa、RF電力は7000W、ターゲット電圧は-350Vであった。Arガスを用いて成膜した単層IGZO膜と、さらにその上にArとO<sub>2</sub>の混合ガスを用いて成膜した2層構造のIGZO膜の2種類を準備した。2層構造膜は、第1層の45nmをArガス、第2層の5nmを5%O<sub>2</sub>/ (Ar+O<sub>2</sub>) の混合ガスで成膜した。比較のため、RFマグネトロンスパッタ装置を用いて、4.5%O<sub>2</sub>/ (Ar+O<sub>2</sub>) 混合ガスで成膜したサンプルも用意した。

フォトリソグラフィとウェットエッチングによりIGZO膜を島状に形成した後、Mo (80nm) とPt (20nm) の二層からなるS/D電極を、RFマグネトロンスパッタ装置を用いて成膜した。アニール処理は、O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>混合ガス雰囲気下、150℃～300℃で2時間実施した。保護膜は、感光性ポリシロキサンを用いて成膜し、N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>混合ガス雰囲気下、250℃で硬化した。

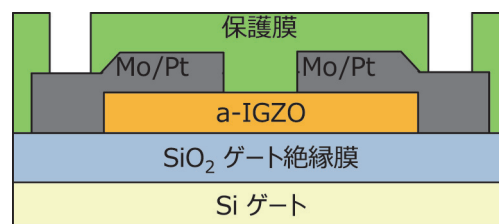


図10 作製したボトムゲートトップコンタクト型TFT構造

### 4.2 信頼性評価

ICPスパッタとRFマグネトロンスパッタで成膜したIGZO膜を用いて作製したTFTの信頼性を評価した。評価指標としては、ストレス電圧印加後の閾値電圧シフト量 ( $\Delta V_{th}$  (V)) を用いた。ストレス時間の経過と  $\Delta V_{th}$  の関係を、図11に示す。ポジティブバイアスストレス試験 (PBS,  $V_{gs}=20V$ ) の結果、RFマグネトロンスパッタで作製したIGZO TFTの場合、ストレス時間10,000秒後で、 $\Delta V_{th}=3.85$  Vに達した。一方、ICPスパッタによるIGZO TFTでは、 $\Delta V_{th}=0.46V$  となり、RFマグネトロンスパッタと比較して小さく抑えることができた。ネガティブバイアスストレス試験 (NBS,  $V_{gs}=-20V$ ) においても、ICPスパッタ法のIGZO TFTは、 $\Delta V_{th}$  が小さくなった。さらに、2層構造のIGZO膜で作製したTFTは、PBS試験の結果、 $\Delta V_{th}=0.09V$  となり、特性が著しく改善した (図12)。上記の結果より、ICPスパッタで成膜したIGZO TFTは、高い信頼性を示すことが分かった。

### 4.3 アニール処理の低温化検討

最も高い信頼性を示した2層構造のIGZO TFTを用いて、アニール処理の低温化を検討した。アニール温度を変更して  $I_d$ - $V_{gs}$  特性を評価した結果を図13に示す。アニールなしでもTFTとして動作するが、 $V_{th}$  がマイナスとなった。アニールを行うと、 $V_{th}$  はプラスにシフトした。処理温度150℃～250℃の範囲において、特性値に大きな変化は認められなかった。アニール温度150℃のサンプルの伝達特性から求めた電界効果移動度は、8.8cm<sup>2</sup>/Vs ( $V_{ds}=0.5V$ ) となり、150℃という比較的低い温度条件においても、かなり高い移動度で動作するTFTを作製することができた。各温度条件で作製したTFTの信頼性を評価するために、PBSを実施した結果を図14に示す。アニール温度150℃、200℃、250℃での  $\Delta V_{th}$  は、それぞれ、0.73、0.75、0.66Vであり、150℃～250℃の温度範囲では、大きな有意差は認められなかった。一方、保護膜にポリシロキサンを用いて250℃で硬化したサンプルは、 $\Delta V_{th}=0.09V$  を示しており、150℃でアニールしたTFTの保護膜を250℃で熱硬化すれば、250℃でア

ニールしたものと同等の信頼性を有するTFTを作製できる可能性がある。

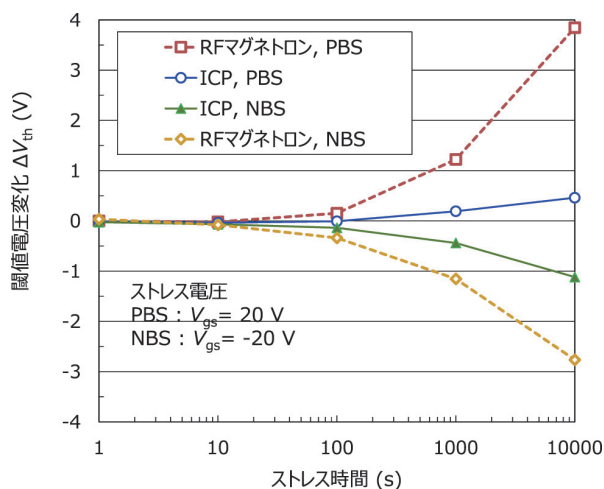


図11 ICPスパッタ装置とRFマグネトロンスパッタ装置で成膜したIGZO TFTの信頼性比較

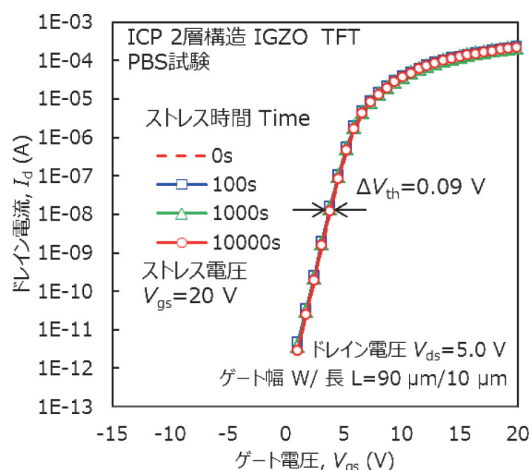


図12 2層構造IGZO TFTのPBS試験結果

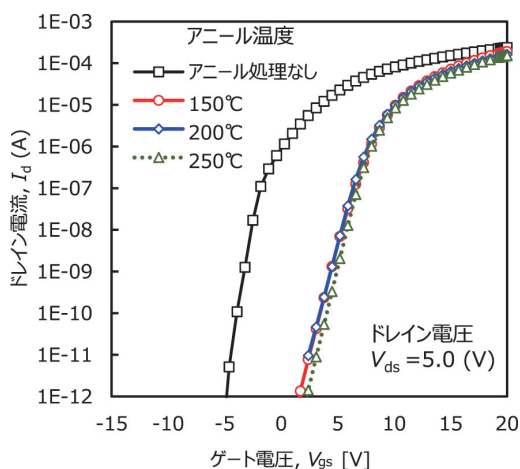


図13 IGZO TFTの $I_d$ - $V_{gs}$ 特性とアニール温度との関係

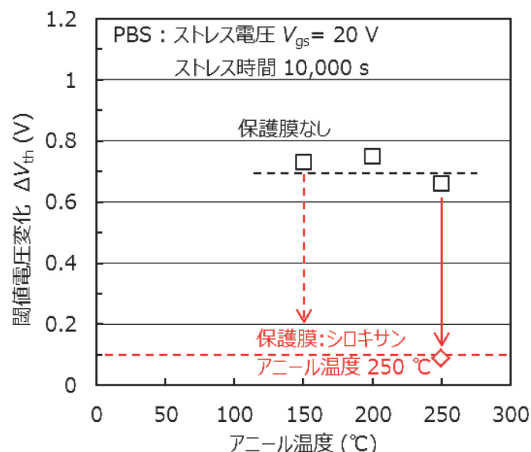


図14 IGZO TFTのPBS結果とアニール温度との関係

## 5. まとめ

ICPスパッタ装置は、優れた生産性を有し、良質なIGZO膜を成膜できることが分かった。また、低温プロセス条件においても、RFマグネトロンスパッタ装置と比較して、高い移動度を示す信頼性の高いTFTを作製することができた。その理由は、ICPスパッタ法により、高密度で欠陥が少ないIGZO膜が形成されたためであると考えている。今後は、量産化に向けて大型基板での成膜が可能な装置を開発していく予定である。

## 6. 謝辞

本研究の遂行にあたって、奈良先端科学技術大学院大学 浦岡行治 教授、藤井茉莉 助教、宮永良子 氏には多くのご助言を賜ると共に、実験にご協力頂いた。記して深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- (1) T. kamiya, K. Nomura, H. hosono, J. Displa Technol., 5, 273, (2009).
- (2) K. Nomura, H. Ohta A, T. Kamiya, M.Hirano, and H.hosono, Nature, 432, 488, (2004).
- (3) T. Kamiya, K.Nomura, and H. Hosono, Sci. Technol. Adv. Master, 11, 044305, (2011).
- (4) T. Kamiya, H. Hosono, NPG Asia Materials, 2, 15 (2010).
- (5) M. Ito, M. Kon, T. Okubo, M. Ishizaki, N. Sekine, Proc. IDW, 845, (2005).
- (6) H. N. Lee, J.W. Kyung, S. K. Kang, D. Y. Kim, M. C. Sung, S. J. Kim, C. N. Kim, H. G. Kim, S. T. Kim, Proc. IDW, 663, (2006).

- (7) M. Ito, M. Kon, C. Miyazaki, N. Ikeda, M. Ishizaki, R. Matsubara, Y. Ugajin, N. Sekine, Phys. Stat. Sol. 205, 1885, (2008).
- (8) C.-W. Han, M.-Y. Han, S.-R. Joung, J.-S. Park, Y.-K. Jung, J.-M. Lee, H.-S. Choi, G.-J. Cho, D.-H. Kim, M.-K. Yee, H.-G. Kim, H.-C. Choi, C.-H. Oh, I.-B. Kang, SID 17 Digest, 1, (2017).
- (9) J.U. Bae, J. H. Baeck, P. Yun, D. H. Kim, Y. H. Jang, K.-S. Park, S. Y. Yoon, I. B. Kang, AM-FPD' 17, 309, (2017).
- (10) A. Suresh, J. F. Muth, Appl. Phys. Lett. 92, 033502 (2008).
- (11) J.-M. Lee, I.-T. Cho, J.-H. Lee, H.-I. Kwon, Appl. Phys. Lett. 93, 093504 (2008).
- (12) S. Nakano, N. Saito, K. Miura, T. Sakano, T. Ueda, K. Sugi, H. Yamaguchi, I. Amemiya, M. Hiramatsu, A. Ishida, J. Soc. Inf. Disp., 20, 483, (2012).
- (13) K. nomura, T. Kamiya, H.hosono, J. Soc. Inf. Disp., 18, 789 (2010)
- (14) M. Fujii, H. Yano, T. Hatayama, Y. Uraoka, T. Fuyuki, J. S. Jung, J. Y. Kwon, Jpn. J. Appl. Phys., 47, 6236 (2008)
- (15) M. Fujii, Y. Ishikawa, M. Horita, Y. Uraoka, Appl. Phys. Express, 4, 104103, (2011).
- (16) S. Lee, K. Jeon, J.-H. Park, S. Kim, D. Kong, D. M. Kim, D. H. Kim, S. Kim, S. Kim, J. Hur, J. C. Park, I. Song, C. J. Kim, Y. Park, U.-I. Jung, Appl. Phys. Lett, 95, 132101, (2009).
- (17) K. Nomura, T. Kamiya, H. Ohta, M. Hirano, H. Hosono, Appl. Phys. Lett. 93, 192107, (2008).
- (18) K. Ide, M. Kikuchi, M. Ota, M. Sasase, H. Hiramatsu, H. Kumomi, H. Hosono, T. Kamiya, Jpn. J. Phys, 56, 03BB03 (2017).
- (19) K. Ide, Y. Kikuchi, K. Nomura, M. Kimura, T. Kamiya, H. Hosono, Appl. Phys. Lett. 99, 093507. (2011).
- (20) W. H. Han, Y. J. Oh, K. J. Chang, Phys. Rev. Appl, 3, 044008 (2015).
- (21) K. Nomura, T. Kamiya, Y. Kikuchi, M. Hirano, H. Hosono, Thin Solid Films, 518, 3012, (2010).
- (22) K. Nomura, T. Kamiya, E. Ikenaga, H. Yanagi, K. Kobayashi, H. Hosono, J. Appl. Phys., 109, 073726, (2011)
- (23) J. P. Bermundo, Y. Ishikawa, H. Yamazaki, T. Nonaka, Y. Uraoka, ECS J. Solid State Sci., 3, Q16, (2014).

---

## 執筆者紹介

---



**松尾 大輔** Daisuke Matsuo  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所



**岸田 茂明** Shigeaki Kishida  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
主任



**小寺 隆志** Takashi Kotera  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
主任



**瀬戸口 佳孝** Yoshitaka Setoguchi  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所  
グループ長



**安東 靖典** Yasunori Andoh  
研究開発本部  
ビーム・プラズマ技術開発研究所長