PLD 法により作製した PZT/YBCO/MgO ヘテロ構造 薄膜の分極反転機構

学生員 山 里 将 朗 (熊本大)

非会員 Alexander M. Grishin (スウェーデン王立工科大学)

正 員 山 形 幸 彦 (熊本大)

正 員 池 上 知 顯 (熊本大)

正 員 蛭 原 健 治 (熊本大)

Polarization reversal switching kinetics of pulsed laser deposited PZT/YBCO/MgO heterostructure thin films.

Masaaki Yamazato, Student Member, *A. M. Grishin, non member, Yukihiko Yamagata, Member,

Tomoaki Ikegami, Member, Kenji Ebihara, Member (Kumamoto University, * Sweden Royal Institute Technology)

We have fabricated epitaxial $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ (PZT)/ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) films (ferroelectric/superconductor/heterostructures) on the single-crystal MgO substrates by a KrF pulsed laser deposition technique. The heterostructure has high electric resistivity ρ (at 150 kV/cm) of $4 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$, dielectric permittivity of 820 and loss $\tan \delta$ of 0.04, remnant polarization of $32 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ and coercive field of 41 kV/cm. Film thickness dependence of the coercive electric field over the thickness range $0.04 \sim 1.2 \mu\text{m}$ is in close agreement with prolate ellipsoid nucleus model proposed by Kay and Dunn. Switching property of the fabricated epitaxial PZT thin films corresponds to ferroelectric needle-like nucleus growth.

キーワード：レーザーアブレーション法，強誘電体，PZT，YBCO，残留分極，スイッチング特性

1. まえがき

近年 PbTiO_3 や $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT), $(\text{Pb}, \text{La})(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 等の Pb 系強誘電体薄膜が，次世代の DRAM 材料や金属/強誘電体/半導体電界効果トランジスタ (MFSFET) のゲート材料，不揮発性強誘電体メモリ (FERAM) 等の電子デバイス材料として注目されている^{(1),(2)}。さらに強誘電体材料からのパルス電界による電子放出が報告されており，強誘電体冷陰極 (FECC) やフラットパネルディスプレイへの応用も検討されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。これらのデバイスは，強誘電体キャパシタの残留分極を利用して動作しており，分極反転により解放される電荷が，FERAM の読み出し信号や FECC における放出電子源として用いられている。従って分極反転スイッチングは強誘電体薄膜素子の動作を決定する重要な現象である。

強誘電体薄膜は化学的気相成長法 (CVD) やスパッタリング法，ゾル・ゲル法，レーザーアブレーション (PLD) 法等の様々な方法により作成されている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。これらのうち PLD 法は，高い成膜速度，ターゲットと成長膜間の組成のずれがほとんど無い，プラズマブルーム中の高エネルギー

粒子による結晶化の促進等の優れた特長を多く持つ方法である。筆者らは以前より PLD 法を用いて作製した PZT/YBCO ヘテロエピタキシャル薄膜の結晶及び分極構造について研究を行ってきた⁽¹⁰⁾。YBCO 層は Pb 系強誘電体薄膜の電極として優れた特性を持つことを明らかにしており，本研究においても下部電極として用いている。

本論文では，PLD 法を用いて PZT/YBCO ヘテロ構造薄膜を MgO(100)基板上に作製し，その結晶構造を調べた。また抗電界の膜厚依存性が Kay と Dunn のモデル⁽¹¹⁾に一致することを確かめ，さらに分極反転時に流れる電流波形に Kolmogorov の手法を用いて一次元的な分域核成長が起こっていることを示した。

2. 実験方法

薄膜作製には KrF エキシマレーザー (Lambda Physik LPX305icc, $\lambda=248 \text{ nm}$, パルス幅 25 ns, 最大出力 850 mJ) を用いた。基板には単結晶 MgO(100)を，ターゲットには焼結した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ($\phi=35\text{mm}$)と $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ ($\phi=30 \text{ mm}$)をそれぞれ用いた。基板はブロックヒーター (Neocera Flat Plate Heater SH2) により，YBCO 成膜時は 200 mTorr の酸

酸素雰囲気中 710 °C, PZT 成膜時には 100 mTorr の酸素雰囲気中 550 °C にまで加熱した. YBCO, PZT ターゲット-基板間距離はそれぞれ 50 mm と 40 mm に設定し, レーザーエネルギー密度は 2 J/cm² に固定した. PZT/YBCO ヘテロ構造膜を堆積させた後, 600 Torr の酸素雰囲気中, 400 °C で 60 分間 *in-situ* アニールを行った. 表 1 に主な実験条件をまとめて示す.

表 1 PZT, YBCO 薄膜堆積条件

	YBCO	PZT
ターゲット	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}	PbZr _{0.52} Ti _{0.48} O ₃
KrF エキシマレーザー	Lambda Physik 305icc λ=248 nm, パルス幅=25 ns	
レーザーエネルギー密度	2 J/cm ²	2 J/cm ²
繰り返し周波数	5 Hz	5 Hz
ショット数	4500	450 ~ 18000
雰囲気ガス	O ₂ 200 mTorr	O ₂ 100 mTorr
基板	MgO (100) single crystal	
基板温度	710 °C	550 °C
アニール	O ₂ 600 Torr, 400 °C, 60 min	

作製した PZT/YBCO/MgO ヘテロ構造薄膜の結晶性評価を X 線回折により行った. また上部電極として直径 200 μm の金電極を真空蒸着法により作製した Au/PZT/YBCO/MgO キャパシタ構造に対してソーヤータワー回路による *P-E* ヒステリシスループの測定や LCR メータ (NF 回路設計ブロック 2345) による誘電率・損失 $\tan \delta$ の測定を行った.

3. 実験結果及び考察

< 3・1 > PZT/YBCO/MgO ヘテロ構造の結晶性

まず, PZT/YBCO/MgO ヘテロ構造膜の結晶構造について評価を行った. PZT や YBCO 等は結晶の方向によって異なる物性値を持つ異方性材料であり, 膜全面が様な電気的特性を持つためには高い配向性を持つ試料を作製することが要求される. 図 1 に PZT(0.75 μm)/YBCO(0.4 μm)/MgO 構造の θ -2 θ X 線回折パターンを示す. 図より YBCO と PZT の (00 l) 面からの回折ピークのみが観測される. これは基板に垂直な方向に YBCO, PZT の *c* 軸がそろって成長しており, 高い *c* 軸配向性が得られていることを示している. 回折角より求めた *c* 軸長は, *c* = 1.1647 nm (YBCO) と *c* = 0.4055 nm (PZT) となった. この様に PZT, YBCO 両層における高い *c* 軸配向性は, 図 2 に示すロックンングカーブによっても確かめることができる. 図 2 において, PZT-002, YBCO-006 及び MgO-002 の隣接する回折ピークの半値幅はそれぞれ, 0.98°, 0.68°, 0.27° である. さらに図 3 に示す様に ϕ -scan プロファイルにおいて YBCO-0110, PZT-113, MgO-113 とともに 4 回対称性が確認され(*a*, *b*)面内においても高い配向性を示し, PZT と YBCO 層が完全な結晶整合性を持つことが確認できる. すなわち YBCO 層は PZT 膜の下部電極として非常に優れた材料で

図 1 PZT/YBCO/MgO ヘテロ構造の θ -2 θ X 線回折パターン⁽¹²⁾. 図中(00 l)は YBCO 層からの回折次数を示す.

Fig.1. θ -2 θ X-ray diffraction scan for PZT/YBCO/MgO heterostructure. The (00 l) indices define the reflections of YBCO layer.

図 2 PZT/YBCO ヘテロ構造における隣接した PZT-(002), YBCO-(006), MgO-(002) 反射の X 線回折ロックンングカーブ⁽¹²⁾.

Fig.2 X-ray diffraction rocking curves of neighboring PZT-(002), YBCO-(006) and MgO-(002) reflections for the PZT/YBCO heterostructure.

図 3 YBCO-0110, MgO-113, PZT-113 面からの ϕ -scan 回折ピーク⁽¹³⁾.

Fig. 3 ϕ -scan at oblique geometry represents the intensity of reflections from the YBCO-0110, MgO-113 and PZT-113 crystallographic planes.

あることがわかる。X線回折から得られた以上のエピタキシャル関係をまとめると次のようになる：

$$(001) \text{ PZT} \parallel (001) \text{ YBCO} \parallel (001) \text{ MgO} \\ [100], [010] \text{ PZT} \parallel [100], [010] \text{ YBCO} \parallel [100] \text{ MgO}.$$

< 3・2 > Au/PZT/YBCO キャパシターの強誘電特性

PZT/YBCO/MgO ヘテロ構造膜に直径 200 μm の金電極を多数蒸着し、その P (分極) $-E$ (電界) ヒステリシスループ及び誘電率、誘電損失を測定した。その結果膜厚 0.6 μm の PZT 膜において、残留分極 $P_r = 32 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、抗電界 $E_c = 41 \text{ kV}/\text{cm}$ 、比誘電率 $\epsilon_r = 820$ 、 $\tan \delta = 0.04$ の値が得られた。YBCO 膜上に PZT 層を堆積させた例では、 $P_r = 29 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、 $E_c = 70 \sim 85 \text{ kV}/\text{cm}$ と報告されており、本研究で得られた膜がそれと比較して優れた強誘電性を示していることがわかる⁽¹⁹⁾。特に抗電界の値が約半分と小さく、実際に不揮発性メモリ等に応用する際に動作電圧を低くできる利点を持つ。図 4 にリーク電流の電界依存性を示す。図の 3 種類の点は同一膜上の異なる 3 つのキャパシターについて調べたものである。3 つ共ほぼ等しい値を持つことより均一性に優れた膜であることがわかる。一般にショットキー等の非オーミック接合では、印加電界の正負により強誘電性に非対称性が現れるため素子の設計上好ましくない。図 4 の実験値を最小自乗法により近似するとリーク電流密度 I と電界 E との間に $I \propto E^{1.1}$ の関係が成り立ち、ほぼオーミック特性が得られている。このことから YBCO 層が PZT 膜の下部電極材料に適していることが確認できる。

図 4 Au/PZT/YBCO/MgO キャパシターのリーク電流密度

Fig. 4 Leakage current density of Au/PZT/YBCO/MgO capacitors.

図 5 に PZT/YBCO ヘテロ構造キャパシターの $P-E$ ヒステリシスループの膜厚依存性を示す。測定は室温で行っており、膜厚 d は 0.04 $\sim$ 1.2 μm の範囲で変化させている。膜厚が最も薄い 0.04 μm の膜においてもはっきりとした $P-E$ ヒステリシスループが確認できる。これは我々の作製

した膜の結晶性が良く、漏れ電流が少ないためである。また、図より自発分極が膜の厚さに関わらずほぼ一定の値を示しているのに対して、抗電界 E_c は膜厚が薄くなると大きく増大していることがわかる。このような傾向は C. Björmander *et al* によって PNZT 膜においても観測されている⁽¹⁴⁾。

図 5 異なる膜厚 ($d = 0.04 \sim 1.2 \mu\text{m}$) における PZT/YBCO ヘテロ構造キャパシターの $P-E$ ヒステリシスループ

Fig. 5. Ferroelectric hysteresis loops of PZT/YBCO heterostructure capacitors with different thickness.

図 6 残留分極 P_r 、抗電界 E_c の膜厚依存性。

図中 E_c を結ぶ実線は最小自乗法により求めた、

$$E_c (\text{kV}/\text{cm}) = 33.7 d^{-0.65} (\mu\text{m})$$

の関係を示している。

Fig. 6. Thickness dependence of spontaneous polarization P_s , remnant polarization P_r and coercive field E_c of PZT films. Solid line E_c vs. film thickness indicates $E_c (\text{kV}/\text{cm}) = 33.7 d^{-0.65} (\mu\text{m})$ dependence.

この図より求めた自発分極 P_s 、残留分極 P_r 、抗電界 E_c の膜厚依存性を図 6 に示す。抗電界 E_c の実験値を最小自乗法で近似すると次の関係式が得られる。

$$E_c \propto d^{-0.65} \dots\dots\dots (1)$$

一方、Kay と Dunn は抗電界の膜厚依存性について、長楕円面の分域核形成モデルを提案している⁽¹¹⁾。この理論では外部の場による準安定状態において電気分極の核が形成される“臨界”核の概念⁽¹²⁾に基づき抗電界の膜厚依存性を説明している。分極の形成にはエネルギーの損失が伴い、仮に分域核の大きさが“臨界”サイズより小さいならばその核は消滅し、逆に大きい場合には成長することになる。臨界核の大きさは、外部電界、表面張力、双極子-双極子相互作用を含む熱力学的ポテンシャルの鞍点として決められ、外部電界の関数になる。このモデルによれば、臨界核のサイズが膜厚に等しくなるときの外部電界を抗電界 E_c とすると、抗電界の膜厚依存性は次の式で与えられる。

$$E_c \propto d^{-2/3} \dots\dots\dots (2)$$

本実験の実験値より求めた (1) 式と、Kay と Dunn の臨界核モデルによる (2) 式とは非常に良い一致を示していることがわかる。この事より、本研究で得られた膜の強誘電体分域が長楕円面の分域核生成により形成されていると考えられる。また著者らはすでに P - E ヒステリシスループの形状から PZT 層の結晶構造は、短軸と長軸の比が 140 の非常に細い長楕円形であることを報告している⁽¹⁰⁾。これらの事は、本実験で作製した Au/PZT/YBCO ヘテロ構造キャパシターにおける分極反転が、針状（長楕円）の強誘電体分域核生成をとおしてなされる事を示している。また Scott 等⁽¹⁶⁾や Larsen 等⁽¹⁷⁾は我々の結果とは異なり、抗電界は $d^{-4/3}$ に比例すると報告している。Larsen 等はこの様な抗電界の膜厚依存性を、PZT 層に直列に接続された非強誘電層により電圧降下が生じるというモデルにより理論的な説明を行っている。すなわち抗電圧 V_c が $V_c = E_c d$ ではなく、非強誘電層による電圧降下 V_i が生じるため $V_c = V_i + E_c d$ となるため、抗電界が膜厚の $-2/3$ 乗ではなく、 $-4/3$ 乗に比例する結果が得られたとしている。我々の作製した膜においてはその様な抗電界の膜厚依存性は見られないことから非強誘電層は存在せず、基板に垂直な方向に一樣な強誘電特性を持つ膜であると考えられる。

< 3・3 > **Au/PZT/YBCO** キャパシターのスイッチング特性 図 7 にスイッチング特性測定回路を示す。図に示すように強誘電体薄膜に直列に 50 Ω の抵抗を接続し、入力したパルス波形 (NF Multifunction Synthesizer 1930A) に対する応答波形をディジタルオシロスコープ (HP 54504A) で観測している。

図 7 スwitching特性測定回路

Fig.7. Measurement circuit for switching properties.

図 8.PZT 薄膜 (0.75 μm) の代表的なスイッチング電流応答波形

Fig.8. Typical transient switching current 0.75 μm thick PZT film.

この回路を用いて測定したスイッチング電流波形を図 8 に示す。上の波形が入力パルス電圧を、下の波形が応答電流波形を示している。なお、この測定を行う前に負のパルス電圧を与えることによって PZT 試料をあらかじめ負の状態に分極させてある (Poling)。図 8 のグラフにおいて、最初の入力パルス電圧により分極状態が負から正の状態へと変化 (Switching) するのに対して、2 番目の入力パルスでは分極の符号は変化せず (non-switching)、残留分極と自発分極の変化分だけ電流が流れることになる。すなわち、switching 時の変位電流は $D = 2P_s + \epsilon E$ に相当するのに対し、non-switching 時は $D = \epsilon E$ に相当する変位電流が流れる⁽¹⁸⁾。従って、分極の反転により流れる電流 (反転スイッチング電流) は、最初の電流応答波形 (switching) から 2 番目の応答波形 (non-switching) を差し引くことによって得られる。この様にして得られる反転電流波形の入力電圧依存性を示したのが図 9 のグラフである。

図9 反転スイッチング電流の入力電圧 V_{in} 依存性
Fig.9. Input voltage dependence of reversal switching responses.

図より入力電圧の増大に伴い、反転スイッチング電流の最大値が大きくなり、スイッチング時間は短くなっているのがわかる。ところで、Kolmogorov の手法は強誘電体分域スイッチングを定量的に考察するために用いられる。これによると、反転スイッチング電流は次式で与えられる⁽¹²⁾。

$$I(t) \propto \left(\frac{t}{t_{sw}} \right)^D \exp \left[- \left(\frac{t}{t_{sw}} \right)^{D+1} \right] \quad \dots (3)$$

ここに t_{sw} はスイッチング時間、 D は分域成長の次元因子である。強誘電体の分域は最初にできる分域核が成長して形成される。すなわち強誘電層-電極界面で、 $D = 3$ のとき分域核が球状に成長し、 $D = 2$ のとき平面状の分域核が横方向に成長し、 $D = 1$ のとき針状の分域核が一方の電極から反対側への電極へ向かって成長していく。この式を図9の入力電圧 15 V の電流波形にフィッティングさせた結果を図10に示す。

図10 反転スイッチング電流とKolmogorovの理論曲線 ($V_{in}=15$ V のとき)
Fig.10. Reversal switching current and Kolmogorov's solution. (at $V_{in}=15$ V)

グラフより $D = 0.93$ とした時に良く一致しているのがわかる。図9の全ての反転スイッチング電流波形に(3)式を適用すると、 $D = 0.90 \sim 1.1$ の値が得られた。この結果は強誘電体分極反転が針状の分域核成長を通して行われていることを示している。この事は、抗電界の膜厚依存性の考察で述べた一次元的な強誘電体分域スイッチングのモデルの妥当性を指示すると考えられる。

4. むすび

本論文では PLD 法により PZT/YBCO/MgO ヘテロ構造薄膜を作製し、結晶構造、強誘電特性の評価及び分極スイッチング機構についての考察を行った。以下に結論を示す。

(1) MgO(100)基板上に PZT/YBCO ヘテロ構造薄膜を作製した。X線回折 (2θ , θ , ϕ -scan) により PZT, YBCO 両層共に c 軸及び(a , b)面内配向していることを示し、完全なヘロビ^{*}残シャル成長が行われていることを明らかにした。

(2) PZT 層に直径 200 μm の Au 電極を作製し強誘電特性を測定した。その結果膜厚 0.6 μm の膜において、残留分極 $P_r = 32 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、抗電界 $E_c = 41 \text{ kV}/\text{cm}$ 、比誘電率 $\epsilon_r = 820$ 、 $\tan \delta = 0.04$ の非常に優れた強誘電性を示した。

(3) 残留分極、抗電界の膜厚依存性を明らかにした。抗電界の膜厚依存性が Kay と Dunn によって示された長楕円面分域核成長モデルと一致することを示し、強誘電体分域成長が1次元であることを明らかにした。さらに、分極反転スイッチング時の過渡電流特性を求め、Kolmogorov の式により一次元的な強誘電体分域成長をすることを明らかにした。

以上のように、結晶性、強誘電性に優れた PZT/YBCO/MgO ヘテロ構造膜を作製し、抗電界の膜厚依存性と分極反転時のスイッチング電流特性を調べることで、強誘電体分極反転が一次元的な分域成長を通して行われることを示した。

ここで得られた成果は、実際に分極反転を利用する FERAM や電界電子放出素子の作製に有用と思われる。

(平成 10 年 5 月 22 日受付、平成 10 年 8 月 24 日再受付)

文献

- (1) J. F. Scott and C. A. Paz de Araujo: "Ferroelectric Memories", Science **246**, 1400 (1989)
- (2) D. J. Taylor, P. K. Larsen, and R. Cuppens: "Effects of disturbing pulses on the switchable polarization of Pb(ZrTi)O₃ thin film capacitors", Appl. Phys. Lett. **64**, 1392 (1994)
- (3) Y. Kuratani, S. Omura, M. Okuyama and Y. Hamakawa: "Enhancement of Field-Excited Electron Emission from Lead-Zirconate-Titanate Ceramic Using Ultra thin Metal Electrode", Jpn. J. Appl. Phys. **34** (1995) 5471
- (4) G. Rosenman, D. Shur, Kh. Garb, R. Cohen and Ya. E. Krasik: "Polarization switching in ferroelectric cathodes"

- J. Appl. Phys. **82**, 772 (1997)
- (5) O. Auciello, M. A. Ray, D. Palmer, J. Duarte, G. E. McGuire, and D. Temple: "Low voltage electron emission from $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ -based thin film cathodes", Appl. Phys. Lett. **66**, 2183 (1995)
- (6) G. Rosenman, D. Shur, and A. Skilar: "Ferroelectric electron emission flat panel display", J. Appl. Phys. **79**, 7401 (1996)
- (7) S. Fujii, I. Kanno, T. Kamada and R. Takayama: "Preparation of *c*-Axis Oriented $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ Thin Films by RF-Magnetron Sputtering and their Dielectric and Piezoelectric Properties", Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 6065 (1997)
- (8) S. Chung, J. W. Kim, G. H. Kim, C. O. Park and W. J. Lee: "Formation of a Lead Zirconate (PZT)/Pt Interfacial Layer and Structural Changes in the Pt/Ti/Si Substrate during the Deposition of PZT Thin Film by Electron Cyclotron Resonance Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 4386 (1997) and Characterization of Ferroelectric Capacitors for Nonvolatile Memories", MRS BULLETIN/JUNE, 31, 1996
- (10) A. M. Grishin, M. Yamazato, Y. Yamagata and K. Ebihara: "Structure and polarization in epitaxial ferroelectric $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Nd:YAlO}_3$ thin films", Appl. Phys. Lett. **72**, 620 (1998)
- (11) H. F. Kay and J. W. Dunn: "Thickness Dependence of the Nucleation Field of Triglycine Sulfate", Philos. Mag. **7**, 2027 (1962)
- (12) A. M. Grishin, M. Yamazato, Y. Yamagata, T. Ikegami and K. Ebihara: "Criticality at the Ferroelectric Phase Transition in Epitaxial PZT Films", Proceeding of MRS Spring Meeting, 1998
- (13) C. Björmander, A. M. Grishin, B. M. Moon, J. Lee and K. V. Rao: "Ferroelectric/superconductor/ $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{LaAlO}_3$ heterostructure prepared by Nd:YAG pulsed laser deposition", Appl. Phys. Lett. **64**, 3646 (1994)
- (14) C. Björmander, K. Sreenivas, M. Duan, A. M. Grishin and K. V. Rao: "Thickness dependence of the coercive electric field of laser ablated niobium-doped lead-zirconium-titanate films", Appl. Phys. Lett. **66**, 2493 (1995)
- (15) エリ・ランダウ, イェ・リフシッツ著: "ランダウ=リフシッツ理論物理学教程, 統計物理学 第3版". 岩波書店, 1984年
- (16) J. F. Scott, C. A. Paz de Araujo and L. D. Mcmillan: "ANOMALOUS SWITCHING KINETICS IN FERROELECTRIC THIN (≤ 200 nm) FILMS", Ferroelectrics **140**, 219 (1993)
- (17) P. K. Larsen, G. J. M. Dormans, D. J. Taylor and P. J.

van Veldhoven: "Ferroelectric properties and fatigue of $\text{PbZr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49}\text{O}_3$ thin films of varying thickness: Blocking layer model", J. Appl. Phys., **76**, 2405 (1994)

- (18) J. F. Scott, L. Kammerdiner, M. Parris, S. Traynor, V. Ottenbacher, A. Shawabkeh and W. F. Oliver: "Switching kinetics of lead zirconate titanate submicron thin-film memories", J. Appl. Phys., **64**, 787 (1988)
- (19) Y. Ishibashi and Y. Takagi: "Note on Ferroelectric Domain Switching", J. Phys. Soc. Jpn. **31**, 506 (1971)

山里 将朗 (学生員)

(学生員) 1969年12月27日生まれ。94年琉球大学大学院電気・情報工学研究科修了。95年熊本大学大学院自然科学研究科博士課程に入学,現在に至る。高温超伝導薄膜,窒化物薄膜,強誘電体薄膜作製プロセスの開発及び応用等に関する研究に従事。応用物理学会会員

Alex. M. Grishin (非会員) 1947年2月1日生まれ。74年クラレ科学アカデミー無線物理電子研究所大学院修了,学術博士。84年理学博士。93年スウェーデン王立工科大学(KTH)客員教授。98年4月より10月末まで熊本大学客員教授,同年11月KTH教授,現在に至る。この間超伝導,強誘電体,磁性体の実験・理論研究に従事。

山形 幸彦 (正員)

(正員) 1962年10月2日生まれ。91年九州大学大学院総合理工学研究科博士課程了。91年4月熊本大学工学部電気情報工学科助手,95年5月同大助教授,現在に至る。工学博士。この間薄膜作製プロセス,プラズマ計測,超伝導体の応用に関する研究に従事。93年度電気学会論文発表賞B受賞。応用物理学会員

池上 知顕 (正員)

(正員) 1955年9月1日生まれ。80年3月九州大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月同大学工学部電気工学科助手,88年4月熊本大学工学部電気情報工学科助手,90年2月同助教授,現在に至る。レーザー誘導放電,超伝導作製プロセス・応用に関する研究に従事。応用物理学会,プラズマ・核融合学会会員

蛸原 健治 (正員)

(正員) 1941年10月27日生まれ。67年3月九州大学大学院修士課程修了。同年大阪市立理学部助手。69年山口大学工学部講師。75年4月熊本大学工学部助教授,84年2月同教授,現在に至る。高温超伝導薄膜作製プロセス開発と応用,プラズマプロセス工学,工学博士。電子情報通信学会,応用物理学会,静電気会,日本物理学会, MRS 学会員。