

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20550175

研究課題名（和文） GaNバルク単結晶へのZnO薄膜の全方位的エピタキシャル電析

研究課題名（英文） Multi directional epitaxial electrodeposition of ZnO thin films on bulk GaN single crystals

研究代表者

吉田 司 (YOSHIDA TSUKASA)

岐阜大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90273127

研究成果の概要（和文）：様々な結晶面のシリコン高ドーパ導電性窒化ガリウム(GaN)バルク単結晶を回転ディスク電極に設置し、亜鉛塩水溶液中の溶存酸素の還元反応により、酸化亜鉛(ZnO)をヘテロエピタキシャル電析することを試みた。各GaN電極のKCl水溶液(70°C)中での*I-V*曲線より、GaNの酸素還元反応(ORR)に対する活性は、(10-11) > (1-100) ≥ (11-20) > (10-12) > (10-13) >> (0001)の序列であることがわかった。一方、塩化亜鉛を含む水溶液中で各GaN単結晶上にZnOを電析したところ、いずれのGaN単結晶上でもZnOがヘテロエピタキシャル成長していることがわかった。ZnO(11-22)面に対するXRD ω スキャンより、そのエピタキシーは(1-100) >> (10-11) ≥ (10-13) > (11-20) > (10-12) > (0001)の序列で、ほぼORRに対する電極活性の序列に沿い、ORRに対する活性の高い電極であるほどZnOエピタキシーが向上することがわかった。また、高い過電圧では核密度が上昇するものの、ランダムに析出しやすくなることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Heavily Si-doped conductive GaN bulk single crystals were used as a rotating disk electrode (RDE) to electrodeposit ZnO thin films employing the reduction of oxygen. Charge transfer rate constants for oxygen reduction reaction (ORR) were determined from the *I-V* curves in KCl aqueous solution at 70°C by Koutecky-Levich (K-L) analysis. The order of GaN(10-11) ≥ GaN(1-100) ≥ GaN(11-20) > GaN(10-12) > GaN(10-13) >> GaN(0001) was found. Heteroepitaxial growth of ZnO was achieved for all crystal faces. The level of exptaxy (mosaic spread) was checked from the full-width at half maxima (FWHM) of the XRD ω -scan for the (11-22) diffraction and was in the order of GaN(1-100) >> GaN(10-11) ≥ GaN(10-13) > GaN(11-20) > GaN(10-12) > GaN(0001). The higher activity for the ORR approximately resulted in the higher single crystallinity of the deposited ZnO. The effect of the deposition potential was also checked. The higher overpotential resulted in the higher density of ZnO nuclei but they were randomly oriented. It is therefore understood that ZnO with good quality can be obtained when the electrode activity is high, but not when a large overpotential is applied to increase the rate of deposition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：電気化学

科研費の分科・細目：材料化学・無機工業材料

キーワード：バルク GaN 単結晶、ZnO、電析、エピタキシャル成長

1. 研究開始当初の背景

酸化亜鉛(ZnO)は、その高いキャリア移動度から透明導電膜や太陽電池用電極として注目され、広いバンドギャップ(3.4 eV)と高い励起子結合エネルギー(60 meV)を有するため、紫外～青色発光材料としても盛んに研究されている最も有用な化合物半導体の一つである。亜鉛塩水溶液からの ZnO 薄膜のカソード電析は、膜成長が純粋に表面反応によって支配される特色から、Au(111)、サファイア(0001)/窒化ガリウム(GaN) (0001)など、適切な単結晶基板を用いることでヘテロエピタキシャルに ZnO の単結晶薄膜を得ることが可能である。

とくに GaN は ZnO と並び、共に Wurtzite 構造であり、 a , $b = 3.19 \text{ \AA}$ (GaN), 3.25 \AA (ZnO), $c = 5.19 \text{ \AA}$ (GaN), 5.21 \AA (ZnO)とその格子定数も極めて近い。そのため、単結晶 GaN を電極に用いることで、ZnO 単結晶薄膜のヘテロエピタキシャル電析が可能となる。古くは Pauporté らがサファイア上に MOCVD 法によって作製した GaN(0001)薄膜電極を用いて ZnO(0001)を得ることに成功している。一方で我々は、古河機械金属㈱の Si ドープされた高導電性バルク GaN 単結晶(0001)カットを用い、ZnO(0001)単結晶の電析に成功し、回転ディスク電極(RDE)を用いた電気化学分析により、酸素還元に対する電子移動標準速度定数や移動係数などの基本因子の定量に初めて成功した。極性面である(0001)面では、Ga 面のみが活性を持ち、N 面には ZnO が得られないことも明らかとなった。また、非極性面(1-100)カットについて、不定形の GaN サンプルを同社から購入し、静止系での実験を試みたところ、規則的に配列した長方形粒子で構成された膜が得られ、XRD よりこれが ZnO(10-10)単結晶であり、(0001)面よりも電極活性が高く、得られる膜質もより高いことが示された。

2. 研究の目的

古河機械金属㈱は、サファイア(0001)面上にハイドライド気相成長(HVPE)法によって、数ミリ以上の厚さに堆積させることで厚膜化し、バルク単結晶を得ている。この手法によって(0001)面以外の結晶面にカットした材料の作製が可能となる。そこで本研究では、(0001)面に限らず、{10-10}, {11-20}, {10-11}, {10-12}, および{10-13}面などの非極性面 GaN 単結晶(図 1)を用い、全方位的な単結晶 ZnO 薄膜のヘテロエピタキシャル電析を試みた。これは、GaN と ZnO が同一の結晶構

造と abc 軸全て近い格子定数を持つことに加え、高導電性バルク GaN 単結晶が得られる様になったことで初めて可能となる研究であり、期待される成果も従来知り得なかった情報である。

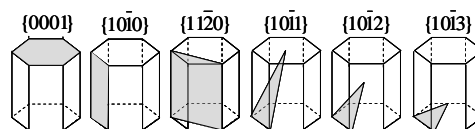


図 1 六方晶における各結晶面

独自に考案したアタッチメントを介して RDE に単結晶を取り付け、均一且つ強制的な対流を制御した条件下で実験を行うことで、Koutecky-Levich(K-L)解析が可能となり、酸素還元反応(ORR)に対する電子移動の標準速度定数を各結晶面について精密に決定することが可能となる。

また、薄膜試料が得られたならば、その結晶構造を XRD 測定(θ - 2θ スキャン, ω スキャン)によって精密に評価し、単結晶としての構造的クオリティを製膜条件との関係において吟味する。電解開始直後に核形成がインスタントに起こり、それらの結晶成長のみによって膜が成長する ZnO 電析では電解初期の構造を知ることが大切であり、FE-SEM 等によって核密度を評価する。これらの評価から、各結晶面の GaN 単結晶上へ析出した ZnO 薄膜のエピタキシーを決定する因子の解明を試みた。

3. 研究の方法

GaN(0001), (1-100), (11-20), (10-11), (10-12), および(10-13)基板(GaN(0001)は 10 mm × 10 mm, その他は 5 mm × 5 mm, 厚さ 0.43 mm)を、それぞれのサイズに溝掘りがされた円筒型 SUS をテフロン樹脂でモールドした特殊アタッチメント(外径 ϕ 25 mm)に、基板の裏面に In-Ga 合金を少量塗布して取り付けた。さらに GaN(0001)面の場合は ϕ 6 mm (電極面積 0.283 cm²)、その他の結晶面の場合は ϕ 3 mm (電極面積 0.085 cm²)の円形の穴が設けられたマスキングテープを回転中心に合わせて貼り付け、電極面積を規定した。電極表面をアセトンに 5 min, 0.1 M 塩酸に 2 min それぞれ浸漬し、水洗, 空気乾燥して作用極とした。参照極を Ag/AgCl, 対極を Pt 線とし、三電極一室型セルを組んだ。さらに各電極は、酸素飽和した 0.1 M KCl 水溶液(70°C)中で GaN(0001)は -1.3 V (vs. Ag/AgCl), その他の基板は -1.1 V で電解処理をし、電極の ORR に対する電極活性を高め

た。

酸素飽和した 0.1 M KCl 水溶液中(70°C, pH 5.6)、各 GaN 基板上で I - V 曲線を 100 から 700 rpm の各回転数で、スキャンレート 10 mV s⁻¹ にて測定し、得られた曲線に対して K-L 解析を行い、各電極の ORR 活性を調べた。

ZnO 薄膜電析は、基板の活性化処理後、ZnCl₂ 水溶液を 5 mM となるように添加し、-0.9, -1.0, -1.05 V で定電位電解した。電解後の電極表面は、SEM により観察し、XRD θ - 2θ および ZnO(11-22) 面に対する ω スキャンにより薄膜の結晶配向性、エピタキシーを評価した。

4. 研究成果

(1) GaN 各結晶面上での ORR 活性

各 GaN 単結晶の I - V 曲線を比較すると、GaN(0001)はその他の GaN 単結晶よりもはるかに卑な電位からカソード電流が立ち上がり、(10-13), (10-12), (1-100), (11-20), (10-11)の順で立ち上がり電位が貴方向シフトしていることがわかった。(図 2A)いずれの電極においても -2.9 mA cm⁻² のプラトー電流が現れるが、Levich 解析より、酸素の拡散限界電流であるということが明らかになった。

各 GaN 結晶面の ORR 活性の相違を定量評価するため、カソード電流が動学的に制限される過電圧領域において、K-L 解析を行った。観測される電流値 j に対して K-L 式は式 (1) のように表わされる。

$$j^{-1} = j_a^{-1} + j_k^{-1} = \frac{1}{0.62nFC_0D^{2/3}\nu^{-1/6}}\omega^{-1/2} + \frac{1}{nFk^0C_0e^{-\frac{\alpha nF}{RT}(E-E_{eq})}} \quad (1)$$

j_a : 拡散によって支配される電流(A cm⁻²), j_k : 電荷移動によって支配される電流(A cm⁻²), n : 反応電子数(=4), F : ファラデー定数(=96,485 C mol⁻¹), ν : 溶媒の動粘度 (70°C の水の動粘度 = 4.14 × 10⁻³ cm² s⁻¹), ω : RDE の角速度 (rad s⁻¹), C_0 : 溶液中の酸素の沖合濃度 (70°C の水中での濃度 = 5.67 × 10⁻⁷ mol cm⁻³), α : 移動係数, k^0 : 標準反応速度定数 (cm s⁻¹), R : 気体定数 (= 8.314 J K⁻¹ mol⁻¹) E : 印加電位 (V), E_{eq} : ORR の 70°C における平衡電位 (= +0.72 V vs. Ag/AgCl) である。 $\omega^{1/2}$ に対して測定電流値の逆数 j^{-1} をプロットすると、直線関係が得られた。(図 2B) さらに、そのプロットの切片が j_k となるので、式(1)の右辺第二項より、

$$\ln\left(\frac{j_k}{nFC_0}\right) = -\alpha\frac{nF}{RT}(E-E_{eq}) + \ln k^0 \quad (2)$$

となるため、 $\ln(j_k/nFC_0)$ vs. $E - E_{eq}$ プロットを行うことにより、直線関係が得られ(図 2C)、その傾きと切片から、各 GaN 電極上での ORR の動学的定数を求めた。(Table 1) k^0

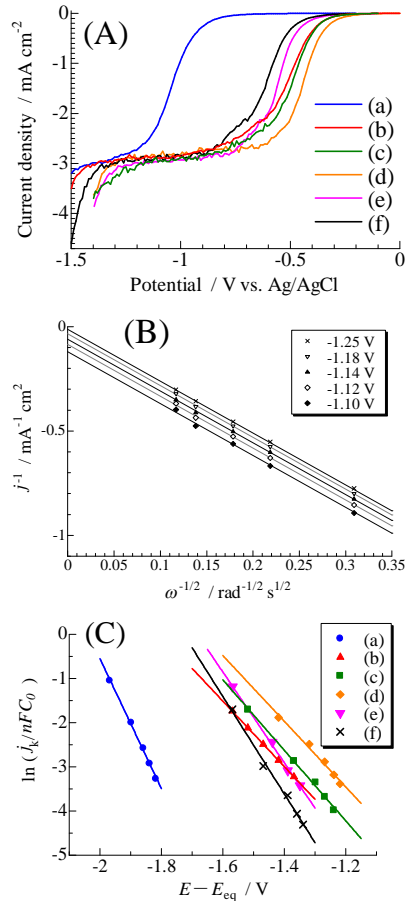


図 2 (A) 酸素飽和した 0.1 M KCl 水溶液中で 500 rpm にて各 GaN 電極上で貴な電位方向へスキャンした時の I - V 曲線、(B) GaN(0001)上での K-L プロット、(C) 各 GaN 電極の K-L プロットから求めた $\ln(j_k/nFC_0)$ vs. $E - E_{eq}$ プロット。(a-f)は GaN 各結晶面に対応しており、それぞれ(a) (0001), (b) (1-100), (c) (11-20), (d) (10-11), (e) (10-12), および (f) (10-13)である。

表 1 各 GaN 結晶面上での K-L 解析より求めた ORR に対する動学的定数

Crystal plane of GaN	α	k^0 / cm s ⁻¹	j_0 / A cm ⁻²
(0001)	0.11	8.3 × 10 ⁻¹⁴	1.8 × 10 ⁻¹⁴
(1-100)	0.055	1.6 × 10 ⁻⁶	3.4 × 10 ⁻⁷
(11-20)	0.059	1.0 × 10 ⁻⁶	2.2 × 10 ⁻⁷
(10-11)	0.055	4.2 × 10 ⁻⁶	9.2 × 10 ⁻⁷
(10-12)	0.076	3.1 × 10 ⁻⁸	6.7 × 10 ⁻⁹
(10-13)	0.082	5.3 × 10 ⁻⁹	1.7 × 10 ⁻⁹

は、電極の ORR 活性を示す値であり、その序列は、(10-11) > (1-100) ≥ (11-20) > (10-12) > (10-13) >> (0001)であり、極性面よりも非極性面の方がはるかに ORR 活性が高いことが明らかになった。

(2) 各 GaN 単結晶上への ZnO 電析

各 GaN 単結晶上で亜鉛塩水溶液中で -1.0 V, 100 rpm, 0.5 mC cm⁻² の電解により ZnO を電析した試料を、XRD θ - 2θ スキャンにて

分析したところ、どの GaN 結晶面上でも GaN に帰属するピークその他、それぞれの GaN 結晶面と同じ結晶面の ZnO 由来のピークを確認することができた。(図 3) それぞれの表面形態を SEM により観察すると、GaN(0001)上では、六方晶が基板の[100], [110]軸の結晶方向に沿って規則正しく配列している様子が確認できた。一方で、その他の結晶面上では、*c* 軸方向に沿って、GaN(1-100)は長方形形状、GaN(11-20)上ではひし形状、GaN(10-11)上では二等辺三角形形状の結晶が析出していることがわかった。(図 4) GaN(11-20)上のひし形は ZnO{201}面に対応し、GaN(10-11)上の二等辺三角形形状の結晶の頂角は 35.2°であり、ZnO{101}面に対応することがわかった。

さらに、結晶内面の配向性を調べるために、

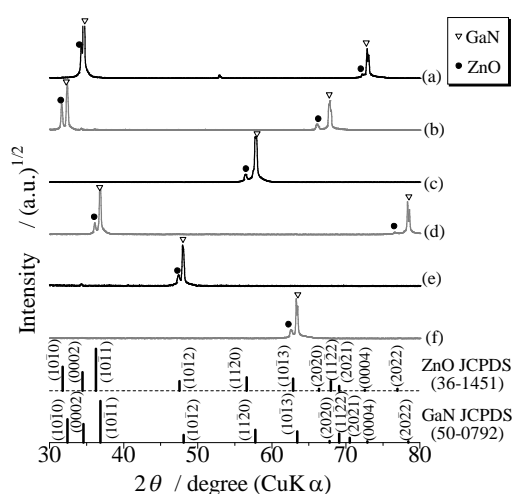


図 3 (a) GaN(0001), (b) GaN(1-100), (c) GaN(11-20), (d) GaN(10-11), (e) GaN(10-12), および (f) GaN(10-13)上に、酸素飽和した 5 mM ZnCl₂, 0.1 M KCl 水溶液(70°C)中で-1.0 V, 100 rpm で 0.5 C cm⁻² (*GaN(10-12)のみ 0.25 C cm⁻²のデータを表示) で析出した薄膜の XRD θ -2 θ パターン。

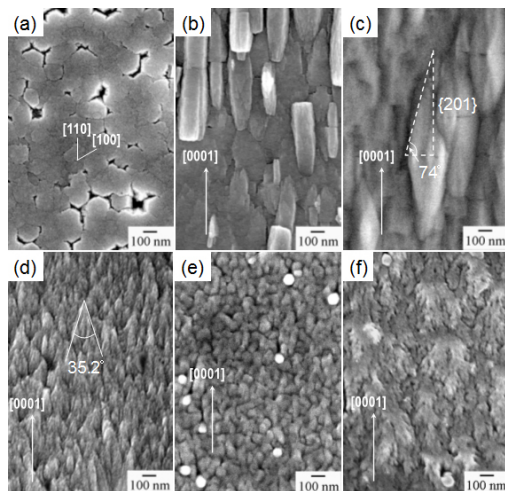


図 4 (a) GaN(0001), (b) GaN(1-100), (c) GaN(11-20), (d) GaN(10-11), (e) GaN(10-12), および (f) GaN(10-13)上に、析出した ZnO 薄膜の表面 SEM 像。

X 線入射角を ZnO(11-22)面の回折角($\theta = 33.981^\circ$)に合わせ、試料を傾斜させた状態で各結晶軸の周りに 360°回転させる ω スキャンを行った。GaN(0001)上では 60°ごとに六対称のピーク、GaN(1-100)上では 78.2°, 101.8°ごとに 4 つのピーク、GaN(11-20)上では 180°ごとの二回対称のピーク、GaN(10-11)上では 149.3°, 210.7°, GaN(10-12)上では 133.7°, 226.3°, および GaN(10-13)上では 100.0°, 260.0°ごとに 2 つのピークを観察することができた。このピークの部分を拡大すると、ピークの底辺がブロード化していることがわかった。(図 5a) 同様の条件で GaN 基板のみを測定すると、シャープなピークのみを観察することができるため、これは各 GaN 単結晶上に ZnO が析出しているためであると考えるのが妥当である。GaN(11-22)面の回折角は $\theta = 34.551^\circ$ と、ZnO(11-22)面の回折角に非常に近く、GaN に帰属するシグナルも重複して表れたものと考えられる。これらの分析から、所期の通り、すべての GaN 単結晶上に ZnO をヘテロエピタキシャル電析することに成功したと言える。

観測された ω スキャンピークが Gaussian 関数で示される GaN と ZnO の曲線の和であるとして、ピークを分離した。GaN の半価幅 (FWHM) は、GaN のみを同様の条件で測定した際に得られた値に固定し、ZnO の FWHM を可変として、フィッティング計算し(図 5b, c) 電析された ZnO の FWHM を求めた(表 2)。この FWHM が小さいほどそのエピタキシー、すなわち単結晶性が高いと評価される。そのエピタキシーの序列は、(1-100) >> (10-11) \geq (10-13) > (11-20) > (10-12) >

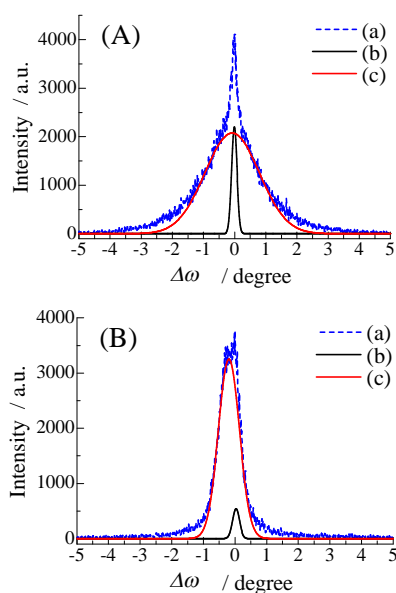


図 5 (A) GaN(0001), (B) GaN(1-100)上に析出した ZnO 薄膜の(a) ZnO(11-22)面に対する XRD ω スキャンパターン。そのピークを(b) GaN と(c) ZnO の成分にピーク分離したフィッティングカーブ。

表 2 各 GaN 単結晶上に析出した ZnO 薄膜の ZnO(11-22)に対する ω スキャンパターンのピーク分離より求めた ZnO 成分の FWHM

Crystal plane of GaN	FWHM / degree
(0001)	2.06
(1-100)	0.781
(11-20)	1.31
(10-11)	1.16
(10-12)	1.83
(10-13)	1.19

(0001)であり、これはほぼ ORR 活性の序列に沿っており、活性の高い電極ほど ZnO がエピタキシャル成長しやすいことがわかった。一部その序列が異なるのは基板自体の mosaic spread や GaN-ZnO 間の格子ミスマッチの大小によるものと考えられる。

また、電解電位の影響についても調べた。 -1.05 V, -1.0 V, および -0.9 V で GaN(0001) 上に ZnO を 500 mC cm^{-2} 電析し、その薄膜の XRD ω スキャンを測定した。その FWHM は、 -1.05 V, -1.0 V, -0.9 V でそれぞれ 2.52° , 2.08° , 1.81° と、過電圧を大きくするほど ZnO の単結晶性が低下することがわかった。同じ過電圧であれば活性の高い電極ほど電流値が増大するが、同じ電極について過電圧を大きくしても電流は増大し、過飽和度が高くなって核形成が起こりやすくなると期待される。電解初期の電極上への ZnO 核形成の様子を観察したところ、高過電圧では、核密度が高いものの、ランダムに析出していることがわかった。(図 6) したがって、ZnO のエピタキシー向上には電極活性を向上させることは有効であっても、ZnO 析出レートを向上させることは有効ではないということが明らかになった。

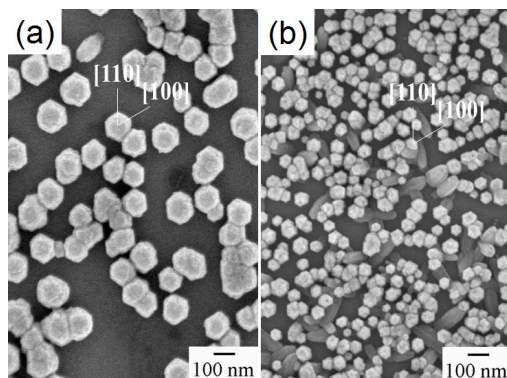


図 6 GaN(0001)上に(a) -0.9 V, (b) -1.05 V で 60 mC cm^{-2} 電析した ZnO 核の表面 SEM 像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① Keigo Ichinose, Yasuaki Kimikado, Tsukasa Yoshida, The Effect of Pre-treatments of F-Doped SnO_2 Substrates for Cathodic Nucleation of ZnO Crystals in Aqueous ZnCl_2 Solution with Dissolved O_2 , *Electrochemistry*, 査読有, Vol. 79, No. 3, 2011, 146-155.
- ② Jingbo Zhang, Lina Sun, Keigo Ichinose, Kazumasa Funabiki, Tsukasa Yoshida, Effect of Anchoring Groups on Electrochemical Self-assembly of ZnO/xanthene Dye Hybrid Thin Film, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 査読有, Vol. 12, 2010, 10494-10502.
- ③ Yukako Sakuragi, Xiao-Feng Wang, Hidetoshi Miura, Masaki Matsui, Tsukasa Yoshida, Aggregation of indoline dyes as sensitizers for ZnO solar cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 査読有, Vol. 216, 2010, 1-7.
- ④ Tsukasa Yoshida, Jingbo Zhang, Daisuke Komatsu, Seiichi Sawatani, Hideki Minoura, Thierry Pauporté, Daniel Lincot, Torsten Oekermann, Derck Schlettwein, Hirokazu Tada, Dieter Wöhrle, Kazumasa Funabiki, Masaki Matsui, Hidetoshi Miura, Hisao Yanagi, Electodeposition of Inorganic / Organic Hybrid Thin Films, *Advance Functional Materials*, 査読有, Vol. 19, No. 1, 2009, 17-43.
- ⑤ Lina Sun, Tsukasa Yoshida, Cathodic electrodeposition of ZnO and CuSCN thin films, *Transactions of Materials Research Society of Japan*, 査読有, Vol. 34, No. 2, 2009, 283-286.
- ⑥ Tsukasa Yoshida, Kenta Hiramatsu, Hideaki Koike, Takeshi Yane, Kazumasa Funabiki, Masaki Matsui, Hidetoshi Miura, Yoshiya Fujishita, Colorful and Plastic Solar Cells with Electrodeposited Nanostructured Zinc Oxide, *Galvanotechnik*, 査読有, Vol. 1, 2009, 164-168.
- ⑦ Kazuyuki Okabe, Yvonne Selk, Torsten Oekermann, Tsukasa Yoshida, Cathodic electrodeposition of CuSCN thin films, *Transactions of Materials Research Society of Japan*, 査読有, Vol. 33, No. 4, 2008, 1325-1328.

- ⑧ Keigo Ichinose, Tsukasa Yoshida, Epitaxial Electrodeposition of ZnO Thin Film on GaN (0001) Bulk Single Crystal, Physica Status Solidi (a), 査読有, Vol. 205, No. 10, 2008, 2376-2381.

〔学会発表〕(計61件)

- ① 市瀬 圭吾, 吉田 司, バルク窒化ガリウム単結晶上へ電析した酸化亜鉛薄膜のエピタキシー決定因子の解明, (1J24, 3月29日), 電気化学会第78回大会, 横浜国立大学, 2011年3月29日-31日.
- ② 市瀬 圭吾, 吉田 司, バルク窒化ガリウム単結晶上への酸化亜鉛のエピタキシャル電析, (17a-ZJ-5, 9月17日), 2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会, 長崎大学文教キャンパス, 2010年9月14日-17日.
- ③ 市瀬 圭吾, 吉田 司, バルク窒化ガリウム単結晶上への酸化亜鉛のエピタキシャル電析, (1107, 9月2日), 第41回電気化学秋季大会, 神奈川工科大学, 2010年9月2日-3日.
- ④ Keigo Ichinose, Tsukasa Yoshida, Epitaxial Electrodeposition of ZnO Thin Films on GaN Bulk Single Crystals, (1A06, 19th May), The 7th Asian Conference on Electrochemistry in Kumamoto (ACEC2010), 熊本KKR HOTEL KUMAMOTO, 2010年5月18日-22日.
- ⑤ 市瀬 圭吾, 吉田 司, バルク窒化ガリウム単結晶上への酸化亜鉛のエピタキシャル電析, (2C13, 11月8日), 第40回中部化学関係学協会支部連合秋季大会, 岐阜大学工学部, 2009年11月7日-8日.
- ⑥ 市瀬 圭吾, 吉田 司, バルク窒化ガリウム単結晶上への酸化亜鉛のエピタキシャル電析, (1D28, 9月10日), 2009年電気化学会秋季大会, 東京農工大学工学部, 2009年9月10日-11日.
- ⑦ 市瀬 圭吾, 吉田 司, バルク窒化ガリウム単結晶上への酸化亜鉛のエピタキシャル電析, (2I19, 3月30日), 電気化学会第76回大会, 京都大学吉田キャンパス, 2009年3月29日-31日.
- ⑧ Keigo Ichinose, Tsukasa Yoshida, Epitaxial Electrodeposition of ZnO Thin Films on GaN Bulk Single Crystals, (No. 66, 1月22日), Ninth International Symposium on Biomimetic Materials Processing (BMMP-9), 名古屋大学 野依記念館, 2009年1月20日-23日.
- ⑨ Keigo Ichinose, Tsukasa Yoshida, Epitaxial Electrodeposition of ZnO Thin Films on GaN Bulk Single

Crystals, (LLO-4, 12th Dec.), The IUMRS International Conference in Asia 2008 (IUMRS-ICA 2008), Nagoya Congress Center, 9-13 Dec., 2008.

- ⑩ Keigo Ichinose, Tsukasa Yoshida, Epitaxial Electrodeposition of ZnO Thin Films on GaN Bulk Single Crystals, (12th Sep.), 59th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (ISE), School of Engineering, Seville, Spain, 7-12, Sep., 2008.

〔図書〕(計4件)

- ① 吉田 司, 培風館, 酸化物半導体に関する研究開発の現状と今後の動向, 太陽電池の基礎と応用, 2010, 第7章-4, 253-258.
- ② 吉田 司, シーエムシー出版, 酸化亜鉛の電気化学析出を用いたプラスチック太陽電池の研究開発, 新コンセプト太陽電池と製造プロセス, 第3章-3, 2009, 85-97.
- ③ 吉田 司, ㈱エヌ・ティー・エス, 酸化亜鉛/色素ハイブリッド薄膜の電気化学析出を利用したプラスチック太陽電池の開発, 太陽エネルギー有効利用最前線, 第1編, 第4章-7, 2008, 293-306.
- ④ 吉田 司, ㈱テクノタイムズ社, 酸化亜鉛電析膜を用いるプラスチック太陽電池の開発, 月刊ディスプレイ, Vol.14, No. 10, 2008, 39-45.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~pcl/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 司 (YOSHIDA TSUKASA)
岐阜大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90273127

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし