

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246007

研究課題名(和文) 酸化亜鉛系混晶自立ウエファアの素子応用に向けた基礎研究

研究課題名(英文) Research on Physics and Chemistry of ZnO and its related alloy crystal wafers aiming to utilization of ZnO based devices

研究代表者

大橋 直樹 (OHASHI NAOKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・光材料センター・センター長

研究者番号：60251617

研究成果の概要(和文)： 酸化亜鉛系混晶自立ウエファアの素子応用に向け、特に、その表面状態の制御や欠陥制御について検討した。まず、補助金によって導入した精密研磨装置を用い、ダメージの少ない表面平坦化を検討し、光学物性に優れた原子レベル平坦面の形成に成功した。これに加えて、素子設計に必要な物性値である圧電特性の評価を実施し、さらに、ヘテロ構造を形成するための、エピタキシャル技術について検討を加えた。

研究成果の概要(英文)： Surface planarization process was optimized for device application of (Zn,Mg)O alloy wafers and physical properties of the wafers were evaluated for realistic designing of (Zn,Mg)O based devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	23,000,000	6,900,000	29,900,000
2009年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2010年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
年度			
年度			
総計	38,000,000	11,400,000	49,400,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用物性・結晶工学

キーワード：酸化亜鉛、ウエファア、精密研磨、圧電特性、エピタキシャル成長

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、以下の酸化物半導体、あるいは、ワイドギャップ半導体に関する3つの課題を背景として、行われた。

## (1) 非平衡欠陥

申請者等は、酸化物中の点欠陥の構造と物性の関係について検討し、蒸着等で成長した薄膜結晶には、熱平衡状態に近いバルク結晶中では見られない非平衡な欠陥が存在することを示してきた。例えば、パルスレーザー蒸着(PLD)で得た(Zn,Mg)O薄膜の格子定数は熱処理によって変化する。無添加(x=0)以外

の薄膜で見られた熱処理による格子定数変化は、蒸着薄膜中の非平衡欠陥の存在とその緩和過程を示唆する。すなわち、非平衡性をもった薄膜試料の評価のみでは厳密な物性の議論が不可能と考えられる。そのため、(Zn,Mg)Oの詳細な検討には、バルク結晶の評価が必須と考えるに至った。

また、ドナー準位を形成する不純物であるアルミニウムを添加した、PLD成長の(Zn,Mg)O固溶体を検討した際、MgO濃度の増加に伴うキャリア活性化率の低下が認められた。こうした現象も、薄膜が有する非平衡性と関係している可能性があり、

(Zn,Mg)O の素子応用を考えるにあたり、熱平衡に近いバルク結晶で、詳細を明らかにする必要があると考えた。

## (2) ZnO の自発分極と極性

ウルツ鉱型結晶は、陽イオンと陰イオンの交互積層からなる極性構造であり、そのc面の一方が陽イオン終端面のc(+)面、他方が陰イオン終端面のc(-)面となる。その結晶のもつ極性が結晶成長にも影響し、成長方向によって、環境から取り込まれる不純物の種類や濃度にも影響していると言われている。また、一般的な基板にZnOを蒸着した場合、c(-)面成長の薄膜結晶しか得られない。したがって、素子応用を計る上でも、また、基礎物性を検討する上でも、バルク結晶を用い、極性をも考慮した検討をする必要性があり、LPE成長したバルク(Zn,Mg)O結晶を利用した研究の実施は、非常に重要な意義を持つと考えた。

## (3) ZnO のバンド構造

ZnO系LEDの開発は、世界的に注目される研究課題となっている。例えば、LEDの基本構造であるダブルヘテロ構造を考えた場合、純ZnOを発光層として用いるならば、キャリアの閉じ米のためには、バンドギャップを拡張したp型層、すなわち、p型(Zn,Mg)Oが必要であり、(Zn,Mg)Oへの正孔注入技術が求められる。さらに、ウルツ鉱型ZnOでは、piezo電界の効果の考慮が必要であるが、その圧電常数も求められておらず、また、バンドラインナップも必ずしも明らかにされていない。ZnOや(Zn,Mg)Oの応用展開を図る上で、その基礎物性評価と基礎的な特性制御の問題は、速やかに解決されるべき課題である。

## 2. 研究の目的

ZnO、および、(Zn,Mg)Oは、金属に近い伝導性を持つ透明導電体として、さらに、ウルツ鉱型の構造に由来する圧電性を示す物質として、様々な機能の発現が期待される。そのため、申請者等が開発した(Zn,Mg)Oウエファースは、近紫外線領域における光学機能、透明導電体特性、圧電体特性を複合化した機能集積素子を得るためのプラットフォームとして応用可能と考えられる。特に、(Zn,Mg)OとZnOのバンドギャップ差を利用したZnO/(Zn,Mg)Oヘテロ界面機能素子の形成等が可能となる。そこで、本研究では、(Zn,Mg)Oウエファースをプラットフォームとして活用した複合機能素子を開発するための、基礎的な物性・特性データの蓄積と、基本的な素子構造を試作することを目的とする。特に、(Zn,Mg)O結晶の素子応用のために、検討が必要な項目は、以下である。

- (1) バルク結晶が無かったために未解明となっていた(Zn,Mg)O固溶体の基礎物性

- (2) (Zn,Mg)Oの圧電特性評価のための絶縁体化と圧電特性の詳細な評価
- (3) ドープした(Zn,Mg)O固溶体のキャリアの活性化率の改善
- (4) ZnOや(Zn,Mg)O固溶体のバンドラインナップやZnO/(Zn,Mg)O接合特性の評価

そこで、本研究では、申請者等が開発したLPE法で育成した(Zn,Mg)O結晶を利用し、上記の諸問題を解決することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究は、以下の方法で行われた。

- (1) デバイス作製プロセスを最適化するためにも必要な、主構成成分や添加物の拡散挙動の知見を、同位体を用いたトレーサー法によって評価すると共に、エピタキシャルウエファースとしての応用の最適な表面形成技術(精密研磨技術)の検討。
- (2) 異なるマグネシウム濃度をもった結晶の共振反共振法による圧電特性測定と、それに先立つ、結晶絶縁化の方法探索。
- (3) 薄膜では得られない、平衡状態に近いバルク結晶へのドーピング効果や欠陥濃度の検討。
- (4) ZnOや(Zn,Mg)O固溶体のバンドラインナップを計画にするための放射光を利用した光電子分光による電子状態評価と、それに対応する第一原理計算。

## 4. 研究成果

### (1) プロセス最適化

本研究では、ウエファースとしての応用を考慮し、単結晶の表面研磨技術を重視し、本研究費によって精密研磨装置を導入し、これを用いた研磨技術の開発に注力した。結果、ダメージの極めて少ない表面を得るに至った。特に、結晶の切り出しや粗研磨がもたらす結晶へのダメージに注目し、通常の切削、検索プロセスによって、結晶の表面のどれほどの厚さの部分にダメージがもたらされるかを検討した結果、通常の砥粒を用いた鏡面研磨や切削加工がもたらすダメージ層の厚さは、100nm以上に及ぶことが分かった。これは、デバイスを作製する上では、深刻な厚さであることが分かった。また、それを除去するのに有効な精密研磨技術を検討した結果、コロイダルシリカを用い、機械化学研磨を施すことが有効であり、特に、機械化学研磨によって100nmほどの表層を除去することによって、極めて欠陥の少ない表面を得ることが可能であることが分かった。この機械化学研磨を施すことによって、欠陥濃度の1つの指標であるバンド端発光の蛍光寿命が、通常の鏡面研磨に比べて10倍以上に延びることが分かり、また、低温での発光スペクトルにも

変化が見られ、機械的なダメージを受けた層の除去が、ウエファー応用の上で、極めて重要な意味を持つことが再確認された。この結果は、Key Eng. Mat. 誌に論文として掲載されることになっており、さらに詳細なデータを公表する準備を進めているところである。

## (2) 絶縁化と圧電特性の評価

絶縁のためのドーパントの検討を行った結果、液相エピタキシー法でのドーパントの導入では、圧電特性評価に足る高い絶縁性は実現できず、結果として、育成後の後処理として、アクセプターを導入することによって、高い絶縁性を持ったウエファーを得ることが出来た。薄板での測定のため、直接  $d_{33}$  を得ることが出来ておらず、また、 $d_{33}$  が小さいことから光学変位計での測定は、実現しなかった。そこで、この得られたウエファーについて、 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$ の間で、共振・反共振法による圧電特性評価(電気機械結合係数測定)、および、誘電率の測定を行った。その結果、マグネシウムを添加した(Zn,Mg)O 固溶体結晶の誘電率、圧電定数共に、マグネシウム添加の効果は大きくなく、ほぼ、無添加の単結晶に近い値を示すことが分かった。マグネシウムを加えることによって、弾性率が若干減少し、逆に、誘電率が若干増加していることで相殺されて、結果的に、電気機械結合係数に大きな変化が無かったものと推察している。この結果については、第一原理計算によって理論的な検証を行っており、第一原理計算でも、この推察を支持する結果が得られている。これらの成果については、現在、公開の準備をしているところである。

## (3) 平衡状態でのドーピング

液相エピタキシーによるドナーを添加した結晶成長を行った結果、平行固溶限界内の結晶では、比較的高い電子移動度が観測された。また、液相エピタキシーによって得られた結晶では、アルミやガリウムなどのドーピング効率がほぼ 100%に近い状態となっていることが確認された。[雑誌論文⑦]これらから、液相エピタキシーで得られる結晶では、低温での薄膜合成プロセスで得られる結晶とは異なる、すなわち、非平衡欠陥濃度の低い結晶が得られていることが確認された。[雑誌論文⑩]

また、酸化亜鉛へのアクセプター導入の検討の過程で、試料形状によって、n型酸化亜鉛が正のホール係数を与えてしまうという現象を見出した。これによって、p型酸化亜鉛のプロセス探索に確度を増すことが出来た。[雑誌論文⑭]

## (4) 放射光による電子状態評価

液相エピタキシーによって合成された結

晶でも、そのバンド端発光スペクトルは低温においてもブロードであったことから、結晶内の不均一性の存在が示唆された。放射光を用いた光電子分光分析の結果、マグネシウム添加による酸素のスペクトルのブロードニングが確認され、また、このブロードニングは、マグネシウムに配位する酸素と、亜鉛に配位する酸素との間の電子状態の差に起因していると推察された。[雑誌論文⑫]

一方、本研究で注目した極性による電子状態変化についても、興味深い結果が得られた。すなわち、(0001)面と(000-1)面とで、その価電子帯の光電子分光スペクトルの形状が異なっていることが確認された。[雑誌論文⑫]この価電子帯のスペクトルの極性依存性は、無添加の酸化亜鉛、マグネシウムを添加した酸化亜鉛、さらに、そこにドナーを添加した酸化亜鉛など、本研究で測定したあらゆる酸化亜鉛について観測されており、極性によるデバイス特性の変化などを知る上で、非常に有用な知見が得られた。これについては、さらに続報となる論文を準備中である。

## 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 14 件)

- ① B. Li, Y. Adachi, J. Li, H. Okushi, I. Sakaguchi, S. Ueda, H. Yoshikawa, Y. Yamashita, S. Senju, K. Kobayashi, M. Sumiya, H. Haneda And N. Ohashi, "Defects in ZnO Transparent Conductors Studied by Capacitance Transients at ZnO/Si Interface", Appl. Phys. Lett. 98 巻 2011 記事番号: 082101, 査読有
- ② I. Sakaguchi, T. Ohgaki, Y. Adachi, S. Hishita, N. Ohashi, And H. Haneda, "Effect of Post-Annealing on Structural and Optical Properties, and Elemental Distribution in Heavy Eu-Implanted ZnO Thin Films", J. Ceram. Soc. Jpn., 118 巻, 2010, 1087-1089, 査読有
- ③ S. Anandan, N. Ohashi, M. Miyauchi, "ZnO-Based Visible-Light Photocatalyst Band-Gap Engineering and Multi-Electron Reduction by Co-catalyst", Appl. Catal. B, 100 巻, 2010, 502-509, 査読有
- ④ K. Matsumoto, Y. Adachi, T. Ohgaki, N. Ohashi, H. Haneda, I. Sakaguchi, "Correlation Between Film Thickness and Zinc Defect Distribution along the Growth Direction in an Isotopic Multilayer ZnO Thin Film Grown By Pulsed Laser Deposition Analyzed

- Using the Internal Diffusion Method", *Solid State Commun.*, 150 卷, 2010, 43-44, 査読有
- ⑤ I. Sakaguchi, K. Matsumoto, T. Ohgaki, Y. Adachi, K. Watanabe, N. Ohashi, H. Haneda, "Oxygen Tracer Diffusion in Magnesium-doped ZnO Ceramics", *J. Ceram. Soc. Jpn*, 118 卷, 2010, 362-365 査読有
- ⑥ I. Sakaguchi, K. Watanabe, T. Ohgaki, T. Nakagawa, S. Hishita, Y. Adachi, N. Ohashi, H. Haneda, "Ion Implantation and Diffusion Behavior of Silver in Zinc Oxide", *J Ceram. Soc. Jpn*, 118 卷 2010, 217-219, 査読有
- ⑦ J. Kobayashi, N. Ohashi, H. Sekiwa, I. Sakaguchi, M. Miyamoto, Y. Wada, Y. Adachi, K. Matsumoto, H. Haneda, "Properties of Gallium- and Aluminum-doped Bulk ZnO Obtained from Single-Crystals Grown by Liquid Phase Epitaxy", *J. Cryst. Growth* 311 卷 2009, 4408-4413, 査読有
- ⑧ S. Venkataraj, S. Hishita, Y. Adachi, I. Sakaguchi, K. Matsumoto, N. Saito, H. Haneda, N. Ohashi, "Structure and Electric Properties in Tin-Doped Zinc Oxide Films Synthesized by Pulsed Laser Deposition", *J. Electrochem. Soc.*, 156 卷 2009 H424-H429, 査読有
- ⑨ N. Ohashi, Y. Adachi, T. Ohsawa, K. Matsumoto, I. Sakaguchi, H. Haneda, S. Ueda, H. Yoshikawa, K. Kobayashi, "Polarity-Dependent Photoemission Spectra of Wurtzite-type Zinc Oxide", *Appl. Phys. Lett.*, 94 卷 2009 記事番号: 122102, 査読有
- ⑩ J. Kobayashi, H. Sekiwa, M. Miyamoto, I. Sakaguchi, Y. Wada, T. Sekiguchi, Y. Adachi, H. Haneda, N. Ohashi, "Growth of Bulky Single Crystalline Films of (Zn,Mg)O Alloy Semiconductors by Liquid Phase Epitaxy", *Cryst. Growth & Design*, 9 卷, 2009, 1219-1224, 査読有
- ⑪ T. Ohsawa, I. Sakaguchi, N. Ohashi, H. Haneda, H. Ryoken, K. Matsumoto, S. Hishita, Y. Adachi, S. Ueda, H. Yoshikawa, K. Kobayashi, "Formation of Compensated Defects in Zinc Magnesium Oxides Assignable from Diffusion Coefficients and Hard X-Ray Photoemission", *Appl. Phys. Lett.*, 94 卷, 2009, 記事番号: 042104, 査読有
- ⑫ T. Ohsawa, Y. Adachi, I. Sakaguchi, K. Matsumoto, H. Haneda, S. Ueda, H. Yoshikawa, K. Kobayashi, N. Ohashi, "Electronic States in Zinc Magnesium Oxide Alloy Semiconductors: Hard X-Ray Photoemission Spectroscopy and Density Functional Theory Calculations", *Chem. Mater.*, 21 卷, 2009, 144-150, 査読有
- ⑬ T. Nakagawa, K. Matsumoto, I. Sakaguchi, M. Uematsu, H. Haneda, N. Ohashi "Analysis of Indium Diffusion Profiles Based on the Fermi-Level Effect in Single-Crystal Zinc Oxide", *Jpn. J. Appl. Phys.* 47 卷, 2008, 7848-7850, 査読有
- ⑭ T. Ohgaki, N. Ohashi, S. Sugimura, H. Ryoken, I. Sakaguchi, Y. Adachi, H. Haneda, "Positive Hall Coefficients Obtained from Contact Misplacement on Evident n-Type ZnO Films and Crystals", *J. Mater. Res.*, 23 卷, 2008, 2293-2295, 査読有
- [学会発表] (計 15 件)
- ① N. Ohashi, I. Sakaguchi, Y. Adachi, T. Ohgaki, H. Haneda, "ルツ鉱型ワイドギャップ半導体中の欠陥の挙動", 励起ナノプロセス研究会 第 6 回研究会, 11/02-03, 2010, 堺
- ② 宮崎宏基, 坂口勲, 安達裕, 石垣隆正, 大橋直樹, "酸化亜鉛表面の平坦化と加工ダメージの評価", 第 30 回エレクトロセラミックス研究討論会, 10/29-30, 2010, 東京
- ③ N. Ohashi, Y. Adachi, I. Sakaguchi, B. Li, J. Li, J. Williams, K. Matsumoto, T. Ohgaki, S. Ueda, H. Yoshikawa, K. Kobayashi, H. Okushi, J. Chen, T. Sekiguchi, H. Haneda, "Charge Compensation in Oxide Semiconductors", International Symposium On Compound Semiconductor 2010, May 31-June 04 (2010), 高松
- ④ N. Ohashi, "Development of Zinc Oxide and Its Related Materials and Structures", Korea-Japan Joint Workshop On Semiconductor Physics, Apr. 21, 2010, 大田, 韓国
- ⑤ N. Ohashi, Y. Adachi, I. Sakaguchi, K. Matsumoto, S. Ueda, H. Yoshikawa, Y. Yamashita, K. Kobayashi, H. Haneda, "Hard-X-Ray Photoelectron Spectroscopy on Zinc Oxide and Its Related Alloys", 2009 MRS Fall Meeting, Nov. 30-Dec. 4, 2009, Boston USA
- ⑥ N. Ohashi, "Charge Compensation and Interfacial Structure of Oxides for

- Electric Applications", Mater. Sci. & Tech. 2009, Oct. 25-29, 2009, Pittsburgh, USA
- ⑦ 大橋直樹, "酸化物半導体・光学材料としての酸化亜鉛", 第2回 光材料・応用技術研究会, 08/28, 2009, 東京
- ⑧ N. Ohashi, I. Sakaguchi, Y. Adachi, S. Ueda, H. Yoshikawa, K. Kobayashi, K. Matsumoto, Y. Yamashita, H. Haneda, "Electronic Structure in Zinc Oxide Studied by X-Ray Photoemission", STAC-3, Jun. 16-18, 2009 横浜
- ⑨ N. Ohashi, I. Sakaguchi, T. Nakagawa, Y. Adachi, K. Matsumoto, S. Ueda, H. Yoshikawa, K. Kobayashi, H. Haneda, "Zinc Vacancies in ZnO", 8th Pacific Rim Conference On Ceramic And Glass Technology, May 31-Jul.05, 2009, Vancouver, Canada
- ⑩ 坂口勲, 中川翼, 安達裕, 大橋直樹, 松本研司, 羽田肇, "酸化亜鉛セラミックス中の酸素拡散に対するマグネシウムの添加物効果", 日本セラミックス協会 2009 年年会 03/16-18, 2009, 府中
- ⑪ N. Ohashi, J. Kobayashi, H. Sekiwa, M. Miyamoto, Y. Adachi, I. Sakaguchi, Y. Wada, "Growth and Characterization of (Zn,Mg)O Bulk and Film Crystals", Photonic West, Jan. 24-29, 2009, San Jose, USA
- ⑫ N. Ohashi, "Structure of Polar Crystals in Terms of Crystal Growth and Functions", 6th Asian Meeting On Electroceramics, Oct. 22-24, 2008, つくば
- ⑬ J. Kobayashi, H. Sekiwa, M. Miyamoto, I. Sakaguchi, Y. Wada, Y. Adachi, H. Haneda, N. Ohashi, "Self-Standing (Zn,Mg)O Single Crystalline Wafers Prepared by A Liquid Phase Epitaxy Method", Fifth International Workshop On Zinc Oxide And Related Materials, Sept. 22-24, 2008, Michigan, USA
- ⑭ T. Osawa, Y. Adachi, I. Sakaguchi, K. Matsumoto, H. Haneda, S. Ueda, H. Yoshikawa, K. Kobayashi, N. Ohashi, "Electronic Structure of (Zn,Mg)O Alloy Crystals Studied by Photoemission Spectroscopy Using Synchrotron Radiation", Fifth International Workshop On Zinc Oxide And Related Materials, Sep. 22-24, 2008, Michigan, USA
- ⑮ N. Ohashi, I. Sakaguchi, Y. Adachi, Y. Wada, T. Ohgaki, S. Ueda, H. Yoshikawa, T. Osawa, K. Matsumoto, K. Kobayashi, H. Haneda, "Defects in Wide Band Gap Semiconductors", 2nd Intl. Conf. Sci. Tech. Adv. Ceramics, May 30-Jul, 01, 2008. 幕張
- 〔図書〕 (計 3 件)
- ① 大橋直樹, 坂口勲, 石垣隆正, 齋藤紀子, 安達裕, 羽田肇, "酸化亜鉛の欠陥構造と物性", マテリアルズインテグレーション, 21 巻, 2008
- ② 大橋直樹, 小林純, 関和秀幸, "酸化亜鉛の高機能化に向けた物性制御と欠陥制御", 工業材料 56 巻, 2008
- ③ 大橋直樹, 羽田肇 (編集、執筆) セラミックス機能化ハンドブック, 2011
- 〔産業財産権〕
- 出願状況 (計 2 件)
- 名称: 非晶質基材  
 発明者: 安達裕, 大垣武, 坂口勲, 大橋直樹  
 権利者: 独)物質・材料研究機構  
 種類: 特許  
 番号: 特開 2010-50342  
 出願年月日: 平成 20 年 8 月 2 日  
 国内外の別: 国内
- 名称: ZnO 単結晶の製造方法、それによって得られた自立 ZnO 単結晶ウエファー、並びに自立 Mg 含有 ZnO 系混晶単結晶ウエファーおよびそれに用いる Mg 含有 ZnO 系混晶単結晶の製造方法  
 発明者: 関和秀幸, 小林純, 坂口勲, 大橋直樹  
 権利者: 三菱瓦斯化学株式会社, 独)物質・材料研究機構  
 種類: 特許  
 番号: 特開 2009-234825  
 出願年月日: 平成 21 年 3 月 2 日  
 国内外の別: 台湾]
- 取得状況 (計 4 件)
- 名称: 酸化亜鉛蛍光体とその製造法及び発光装置  
 発明者: 大橋直樹, 石垣隆正, 田口広之, 坂口勲, 羽田肇, 関口隆史  
 権利者: 独)物質・材料研究機構  
 種類: 特許  
 番号: 特許第 4635184 号  
 取得年月日: 平成 22 年 12 月 3 日  
 国内外の別: 日本国内
- 名称: 酸化亜鉛単結晶ウエファーの製造法  
 発明者: 大橋直樹, 羽田肇, 大垣武,

佐藤 充, 前田 克己, 杉村 茂昭  
権利者 : 独)物質・材料研究機構, 東京電波株式会社  
種類 : 特許  
番号 : 特許第4610870号  
取得年月日 : 平成22年10月22日  
国内外の別 : 日本国内

名称 : ウルツ鉱型 I I I - V 族窒化物薄膜結晶の製造法  
発明者 : 大橋 直樹, 羽田 肇, 大垣 武, 佐藤 充, 前田 克己, 杉村 茂昭  
権利者 : 独)物質・材料研究機構, 東京電波株式会社  
種類 : 特許  
番号 : 特許第4413558号  
取得年月日 : 平成21年11月27日  
国内外の別 : 日本国内

名称 : 酸化亜鉛基積層構造体  
発明者 : 大橋 直樹, 羽田 肇, 両見 春樹, 坂口 勲, 安達 裕, 竹中正  
権利者 : 独)物質・材料研究機構  
種類 : 特許  
番号 : 特許第4210748号  
取得年月日 : 平成20年11月7日  
国内外の別 : 日本国内

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

大橋 直樹 (OHASHI NAOKI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・光材料センター・センター長  
研究者番号 : 60251617

### (2)研究分担者

坂口 勲 (SAKAGUCHI ISAO)  
独立行政法人物質・材料研究機構・光材料センター・主幹研究員  
研究者番号 : 20343866

和田 芳樹 (WADA YOSHIKI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・光材料センター・主幹研究員  
研究者番号 : 90343847

羽田 肇 (HANEDA HAJIME)  
独立行政法人物質・材料研究機構・センサ材料センター・センター長  
研究者番号 : 70354420

安達 裕 (ADACHI YUTAKA)  
独立行政法人物質・材料研究機構・光材料センター・主幹研究員  
研究者番号 : 30354418

石垣 隆正 (ISHIGAKI TAKAMASA)  
法政大学・生命科学部・教授  
研究者番号 : 40343842

大垣 武 (OGAKI TAKESHI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・センサ材料センター・研究員  
研究者番号 : 80408731

### (3)連携研究者

吉川 英樹 (YOSHIKAWA HIDEKI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・共用ビームステーション・主幹研究員  
研究者番号 : 20354409

上田 茂典 (UEDA SHIGENORI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・共用ビームステーション・研究員  
研究者番号 : 20360505