

平成21年5月27日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760014
 研究課題名 (和文) 共鳴トンネル超格子による新構造 p 型 GaAs 基板上 II-VI 族半導体光デバイスの開発
 研究課題名 (英文) Development of II-VI widegap semiconductor optical devices on p-GaAs substrates using resonant tunnel superlattice.
 研究代表者
 阿部 友紀 (TOMOKI ABE)
 鳥取大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：20294340

研究成果の概要：

本研究では、ZnSe 系 II-VI 族ワイドギャップ半導体による新光デバイス（青・緑レーザ/発光ダイオード、青・紫外線光検出器など）がもつ技術課題を根本的に解決するために、成長界面に「共鳴トンネル超格子層」を導入した。本技術の確立により、p 型 GaAs 基板結晶から p 型 ZnSe 成長層への正孔注入障壁低減することに成功し、従来成し得なかったデバイス構造を実現し、光検出器、発光ダイオード等の ZnSe 系青・紫外線領域光デバイスの効率を大幅に向上した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,100,000	0	1,100,000
2007 年度	1,200,000	0	1,200,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	240,000	3,340,000

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：共鳴トンネル効果、半導体超格子、ZnSe 系ワイドギャップ半導体、MBE 成長

1. 研究開始当初の背景

ZnSe 系 II-VI 族ワイドギャップ半導体による新光デバイス（特に青・紫外線光センサーなど）は、次世代マルチメディアシステムで必須となる高速大容量光ディスクシステム構築のキーデバイスとして期待されている。しかしながら、p 型 GaAs と p 型 ZnSe との間に形成される 1eV 以上の大きな価電子帯障壁により、従来、上記光デバイスの基板は n 型 GaAs、ZnSe に制約されてきた。これらの n 型基板を用いたデバイスでは、上部電極コンタクト層にトンネル効果を利用した「ZnTe/ZnSe 超格子電極」、または組成を徐々

に変えた「ZnSeTe グレーデッド電極」を設ける必要があり、この上部電極部に起因したレーザの素子劣化、発光ダイオードの光取り出し効率低下、光検出器の吸収損失といった重要な問題を抱えている。

研究代表者らは、新たに p 型 GaAs 基板と p 型 ZnSe 成長層との成長界面に「ZnTe/ZnSe 共鳴トンネル界面超格子層」を導入する新技術を見出し、正孔注入障壁の低減に成功した。この新技術を応用した p 型 GaAs 基板上の ZnSSe PIN 型光検出器およびアバランシェフォトダイオード (APD) は、素子上部窓層 (n+ 窓層) を 200 Å 以下に極薄化することが可能

となり、外部量子効率の飛躍的向上（特に400nm以下の紫外線領域で外部量子効率 $\eta > 70\%$ ）に有効であるとともに、素子動作の安定化に有効であることを実証した。

2. 研究の目的

本研究は、上述した「ZnTe/ZnSe 共鳴トンネル界面超格子層」の最適化を行うとともに、新構造 p 型 GaAs 基板上的実デバイスへ適用し、従来の n 型基板上的デバイスがもつ技術課題（光検出器の外部量子効率、発光ダイオードの発光効率等）の打破を目的とするものである。

具体的には、貫通転位・積層欠陥の低減（ひずみ超格子による欠陥吸収効果）による暗電流の極限的制御（ $< 10^{-13} \text{A/mm}^2$ ）を行い、実デバイス（短波長 PIN、APD 光検出素子、青・青緑・白色 LED）での高効率化（LED; n 型基板上素子の 4 倍以上、光検出器; 紫外領域（300-400nm）で 50%以上）・素子安定性向上・長寿命化（ > 1 万時間）を図る。

3. 研究の方法

分子線エピタキシー法により、従来の n-GaAs 基板上的 ZnSe 系 II-VI 族化合物半導体光デバイスがもつ問題点を根本的に解決するために、p-GaAs 基板と p-ZnSe の間に ZnTe/ZnSe 共鳴トンネル超格子を挿入し、下記のデバイスに適応した。

(1) 受光デバイス

① n⁺窓層の極薄膜化による ZnSSe 系 PIN 型光検出器の高効率化

p-GaAs 基板上に素子を作製することにより、窓層を n⁺-ZnSSe とすることで窓層を薄膜化し、高効率化を図った。また、極薄膜化に伴うドナードーピング効率の低下を抑制するために、窓層成長前の Zn 照射およびバッファ層成長を行うことにより、窓層を 150 Å まで極薄膜化し、特に紫外領域の高効率化を図った。

② 有機-無機ハイブリッド化による光検出器の高効率化

窓層に紫外透明な有機導電膜(PEDOT:PSS)を用いることにより、ショットキ型光検出器を作製し、紫外線に対する外部量子効率の向上を図った。

③ アバランシェ・フォトダイオードの低暗電流化

p-GaAs 基板上的 ZnTe/ZnSe 界面トンネル超格子による転位吸収効果に加え、pn 接合型ガードリングを施すことにより、動作時の暗電流低減を図った。

(2) 発光デバイス

ZnSSe:Te/ZnMgSSe ダブルヘテロ構造発光ダイオードにおいて、p-GaAs 基板上に素子を作製することにより、窓層を n⁺-ZnSSe とすることで、従来の n-GaAs 基板上発光ダイオードの発光効率(光取り出し効率)の向上を図る。

4. 研究成果

(1) 受光デバイス

① n⁺窓層の極薄膜化による ZnSSe 系 PIN 型光検出器の高効率化

n-GaAs 基板上的 ZnSSe PIN 型光検出器の吸収損失の問題点を根本的に解決するために、p-ZnTe/p-GaAs ヘテロ界面に挿入した ZnTe/ZnSe 共鳴トンネル超格子を利用し、p-GaAs 基板上的 ZnSSe PIN 型光検出器を作製した。図 1 に、p-GaAs 基板上に作製した ZnSSe PIN 型光検出器の構造を示す。

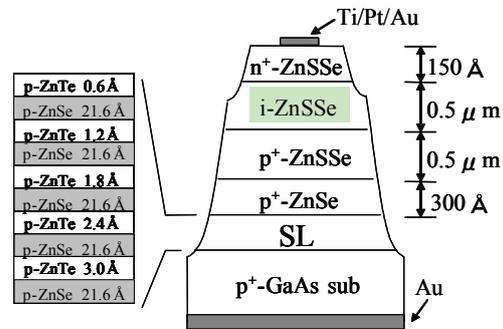


図 1: p-GaAs 基板上的 ZnSSe 系 PIN 型光検出器の構造。

外部量子効率スペクトルを図 2 に示す。図 2 より、波長 300nm において Se 照射後に窓層 150 Å を成長した素子の効率は 3%、窓層 300 Å 素子での効率は 35%であったのに対し、Zn 照射後にバッファ層を成長した後窓層 150 Å を成長した素子は効率 45%と大幅な効率の向上が見られた。さらに、反射防止膜を付けることで効率は 56%と予想される。

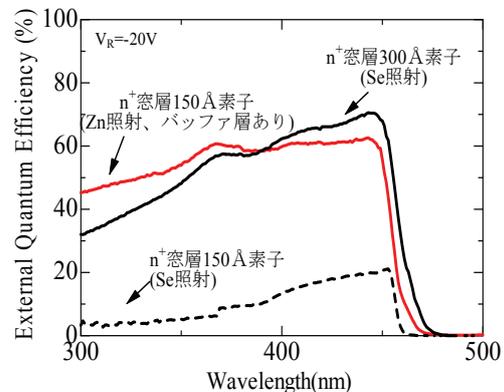


図 2: p-GaAs 基板上 ZnSSe 系 PIN 型光検出器の外部量子効率。

②有機-無機ハイブリッド化による光検出器の高効率化

①のn+ 窓層の極薄膜化により、紫外千領域の高効率化を実証できたが、これ以上の窓層の極薄膜化はドナードピングの面から困難であり、新たなヘテロ窓層の導入が必須となった。そこで紫外透明有機導電膜を窓層とした有機-無機ハイブリッド型光検出器の開発を行った。図3に有機-無機ハイブリッド型光検出器(PEDOT:PSS/ZnSSe/GaAs 基板)の構造を示す。p-GaAs 基板上に MBE 成長により p-ZnSSe, i-ZnSSe を成長し、この半導体エピ層上にスピコート法で PEDOT:PSS を塗布して光検出器を作製した。

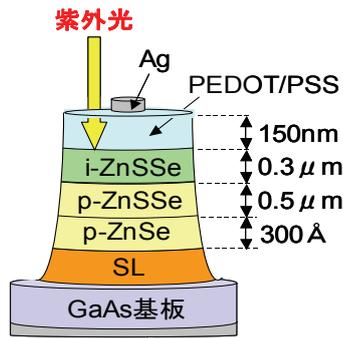


図3：有機-無機ハイブリッド型光検出器の構造。

作製した有機-無機ハイブリッド型光検出器、①の無機モノリシック型 ZnSSe-PIN 素子、および紫外領域に特化した市販の Si-PIN 光検出器の外部量子効率スペクトルの比較を図4に示す。有機-無機ハイブリッド光検出器は、①の ZnSSe の n⁺-i-p 構造(n⁺:150Å)素子と比べ、青-紫外領域にわたって大きな効率の向上(紫外:70~90%)を実現した。特に紫外領域において効果が大きく、反射防止膜を付与していない状態で波長 300nm における外部量子効率は 80%であり、Si-PIN 光検出器の波長 300nm の効率 54%と比較しても 25%以上の高い効率を示している。

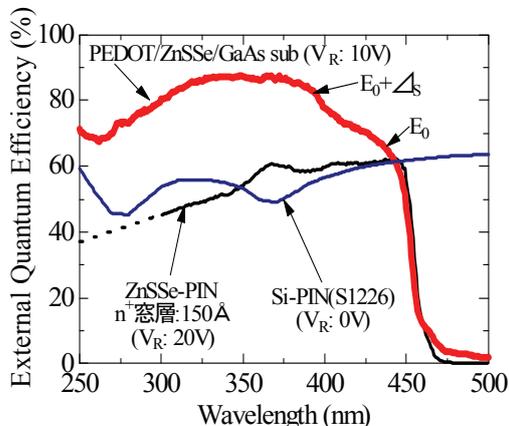


図4：有機-無機ハイブリッド型光検出器の外部量子効率。

③アバランシェ・フォトダイオードの低暗電流化

図5に、pn 接合型ガードリングの構造を示す。このガードリングは、窓層を含む n 型半導体層の上に p 型ガードリングの層を成長させた後、リング形状にエッチングしたものである。ガードリング下の n 型層は pn 接合面となり、完全に空乏化するよう p 型層の材料、膜厚およびアクセプタ濃度を設計した。

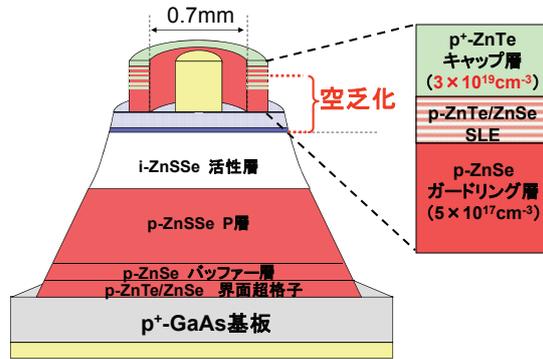


図5：pn 接合型ガードリング付き ZnSSe アバランシェ・フォトダイオードの構造。

図6に ZnSSe-APD の I-V 特性を示す。同図より、PN 接合型ガードリング付き ZnSSe-APD は APD 動作を繰り返し 10 回行っても暗電流は増加せず、動作劣化を克服し、安定動作を実現した。それに加え、APD 動作時の暗電流は従来型 ZnSSe-APD に比べ 2 桁以上低減する結果を得た。上記の成果は PN 接合型ガードリングで形成された空乏層が側面リーク電流の遮断した効果によるものとする。

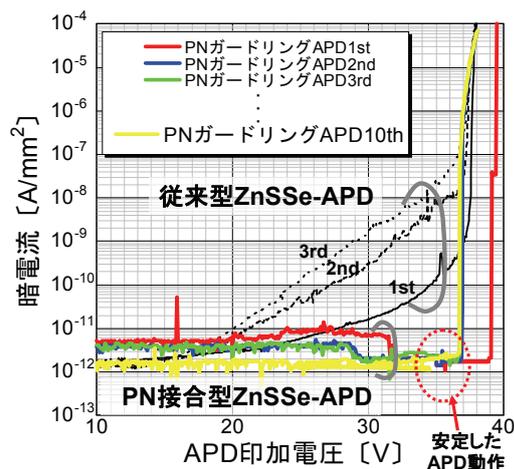


図6：pn 接合型ガードリング付き ZnSSe アバランシェ・フォトダイオードのブレークダウン特性。

(2) 発光デバイス

従来の n-GaAs 基板上の発光ダイオードでは、デバイス上部の窓層の ZnTe 層が緑色発光に対して吸収損失となる。また、p-ZnTe は移動度が $20 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度と低いこともあり抵抗率を下げるのが難しく、半透明の Au 膜が必要となる。したがって、半透明電極も含めた窓層部分での吸収損失により、光取り出し効率は 3 分の 1 程度しかなく、効率向上の大きな障害になる。

そこで、ZnSe/GaAs ヘテロ界面の共鳴トンネル超格子を利用した図 7 のような p-GaAs 基板上的 ZnSSe:Te/ZnMgSSe ダブルヘテロ構造緑色発光ダイオードを作製した。窓層は n^+ -ZnSSe であり、活性層の緑色発光に対して完全に透明であるため、 $0.1 \mu\text{m}$ と厚くすることが可能である。また、 n^+ -ZnSSe は $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の高濃度キャリアドーピングが可能であり、移動度も $150 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度と大きいいため低抵抗の窓層として働き、その結果表面の半透明金属電極が必要なく、In あるいは AuGe のスポット電極とすることができる。

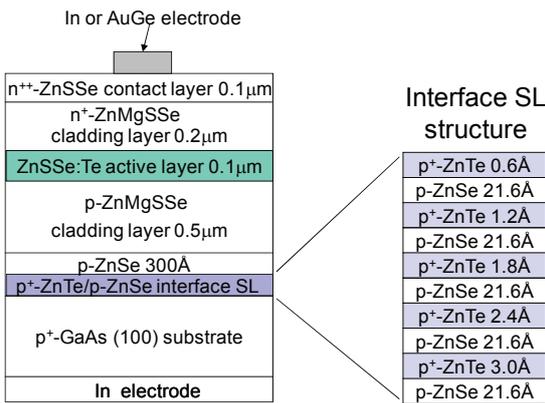


図 7: p-GaAs 基板上的 ZnSSe:Te/ZnMgSSe ダブルヘテロ構造発光ダイオードの構造。

図 8 に、p-GaAs 基板および n-GaAs 基板上に作製した ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH 構造緑色 LED の(a) 発光スペクトル、(b) 外部量子効率の電流密度依存性を示す。p-GaAs 基板上的 LED は、n-GaAs 基板上的 LED と比較して外部量子効率が 3 倍に増加していることがわかる。これは、表面の共鳴トンネル超格子を p-ZnSe/p-GaAs ヘテロ界面に移動したことによる表面吸収損失の低減効果であり、p-ZnSe/p-GaAs ヘテロ界面の ZnTe/ZnSe 共鳴トンネル超格子が光検出器のみでなく、発光ダイオードにも有効であることが明らかとなった。

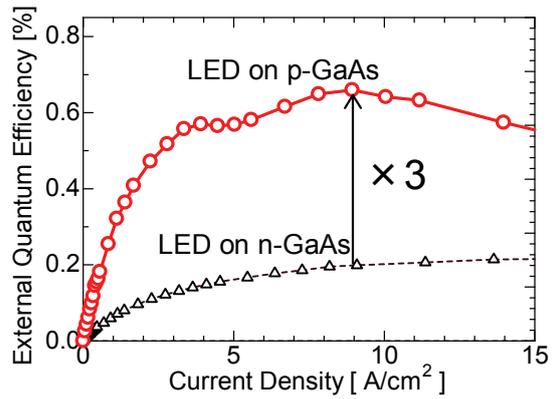


図 8: p-GaAs 基板上的 ZnSSe:Te/ZnMgSSe ダブルヘテロ構造発光ダイオードの効率。

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 7 件) (すべて査読有り)

[1] K. Miki, Y. Oshita, D. Katada, K. Nobe, M. Nomura, M. Adachi, T. Abe, H. Kasada, K. Ando, "High Sensitive Ultraviolet PIN Photodiodes of ZnSSe n^+ -i-p Structure/ p^+ -GaAs with extremely thin n^+ -Window layer grown by MBE", J. Korean Phys. Society, 53, pp. 2925-2928 (2008).

[2] T. Abe, N. Yamane, T. Nishiguchi, H. Kozeni, T. Yoshida, M. Adachi, H. Kasada and K. Ando, "Demonstration of Practical Blue Waveguide Stark-Effect Modulators of ZnSe/ZnMgSSe Asymmetric Coupled Quantum Wells", J. Korean Phys. Society, 53, pp.94-97 (2008).

[3] K. Ando, Y. Hashimoto, K. Kanzaki, S. Ohashi, Y. Morita, T. Abe, H. Kasada, and M. Adachi, "New Defect Control for Extremely Long-Lived Widegap-White Light Emitting Diodes", J. Korean Phys. Society, 53, pp. 2857-2860 (2008).

[4] T. Abe, T. Yoshida, N. Yamane, T. Nishiguchi, H. Kasada and K. Ando, "High Efficiency Blue-Violet Optical Modulators of ZnSe/ZnMgSSe Asymmetric Coupled Quantum Wells", phys. stat. sol. (c), 3, pp.1209-1212 (2006).

[5] K. Miki, T. Abe, J. Naruse, K. Ikumi, T. Yamaguchi, H. Kasada and K. Ando, "High Sensitive Ultraviolet PIN Photodiodes of ZnSSe n -i-p Structure/ p -GaAs substrate grown by MBE", phys. stat. sol. (b), 243, pp. 950-954 (2006).

[6] T. Abe, K. Makimoto, M. Adachi, T.

Tanikawa, N. Inoue, T. Nishinaga, H. Kasada and K. Ando, "Development on High Efficient Green LEDs of ZnSSe:Te-ZnMgSSe DH Structure on p-GaAs and Its Degradation Mechanism", phys. stat. sol. (c), 3, pp.1209-1212 (2006).

- [7] M. Adachi, K. Ando, T. Abe, N. Inoue, A. Urata, S. Tsutsumi, Y. Hashimoto, H. Kasada, K. Katayama and T. Nakamura, "Slow-mode Degradation Mechanism and Its Control in New Bright and Long-lived ZnSe White LEDs", phys. stat. sol. (b), 243, pp. 943-949 (2006).

[学会発表] (計 19 件)

・国際会議

- [1] K.Miki, Y.Oshita, D.Katada, K.Nobe, M.Nomura, M.Adachi, T.Abe, H.Kasada, K. Ando, "High Sensitive Ultraviolet Photodiodes of ZnSSe n+-i-p Structure on p+-GaAs with extremely thin n+-Window layer Grown by MBE", 13h Int. Conf. II-VI-Compounds, Sept. 2007, Jeju, Korea.
- [2] T.Abe, N.Yamane, T.Nishiguchi, H.Kozeni, T.Yoshida, M.Adachi, H.Kasada, K.Ando, "Demonstration of Practical Blue Waveguide Stark-effect Modulators of ZnSe/ZnMgSSe Asymmetric Coupled Quantum Wells", 13h Int. Conf. II-VI-Compounds, Sept. 2007, Jeju, Korea.
- [3] M.Adachi, K.Ando, Y.Hashimoto, K.Kanzaki, S.Ohashi, Y.Morita, T.Abe, H.Kasada, "New Defect Control for Extremely Long-Lived Widegap Light Emitting Diodes", 13h Int. Conf. II-VI-Compounds, Sept. 2007, Jeju, Korea.

・国内学会

- [4] 田中健, 阿部友紀, 他, "ZnSSe 系 II-VI 族ワイドバンドギャップ半導体を用いた紫外高感度光検出素子の開発 -紫外透明有機導電膜を用いたショットキー型光検出素子-", 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 30 日, 筑波大学
- [5] 稲垣雄介, 阿部友紀, 他, "青-紫外線光波帯 ZnSSe 系アバランシェ・フォトダイオード(APD)に関する研究 - pn 接合型ガードリング付 APD の量子効率・増倍率改善 -", 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 2 日, 中部大学
- [6] 野村まり, 阿部友紀, 他, "青 - 紫外線光波帯 ZnSSe 系アバランシェ・フォトダイオード(APD)に関する研究 - p 型ガードリングによる側面リーク電流の制御 -", 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 4 日, 中部大学
- [7] 小銭洋輝, 阿部友紀, 他, "ZnSe/ZnMgSSe

非対称結合量子井戸のシュタルク効果による青色導波型光変調器(変調度 10dB)の開発と低電圧動作化", 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 4 日, 中部大学

- [8] 山崎祐起, 阿部友紀, 他, "ZnSe 系白色 LED の遅い劣化機構に関する研究-増殖性ドナー欠陥の起源-", 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 29 日, 日本大学
- [9] 岡本啓史, 阿部友紀, 他, "ワイドバンドギャップ(ZnSe 系, GaN 系)LED の長寿命化のための REDR 反応の人工的制御", 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 29 日, 日本大学
- [10] 堅田大介, 阿部友紀, 他, "ZnSSe 系 PIN 型光検出素子の紫外高感度化の検討", 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 29 日, 日本大学
- [11] 野村まり, 阿部友紀, 他, "青 - 紫外線光波帯 ZnSSe 系アバランシェ・フォトダイオード(APD)に関する研究 - p 型ガードリングによる側面リーク電流の制御 -", 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 29 日, 日本大学
- [12] 大下雄太, 阿部友紀, 他, "ZnSSe 系 PIN 型光検出素子の紫外高感度化: 極薄膜 n⁺窓層成長手法の検証", 第 68 回応用物理学学会学術講演会, 2007 年 9 月 5 日, 北海道工業大学
- [13] 森川弦太郎, 阿部友紀, 他, "ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH 構造中の Te 束縛励起子によるレーザー動作検証", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 2007 年 3 月 28 日, 青山学院大学
- [14] 西口俊史, 阿部友紀, 他, "ZnSe/ZnMgSSe 非対称結合量子井戸のシュタルク効果による青色導波型光変調器", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 2007 年 3 月 28 日, 青山学院大学
- [15] 山根典嗣, 阿部友紀, 他, "ZnSe/ZnMgSSe 非対称結合量子井戸による導波型シュタルク効果光変調器", 第 67 回応用物理学学会学術講演会, 2006 年 8 月 30 日, 立命館大学
- [16] 江畑達郎, 阿部友紀, 他, "Te ドープ ZnSe/ZnMgSSe DH 構造における電流注入レーザー動作検証", 第 67 回応用物理学学会学術講演会, 2006 年 8 月 30 日, 立命館大学
- [17] 三木耕平, 阿部友紀, 他, "ZnSSe-PIN 型光検出器の紫外高感度化: 超薄膜 n⁺窓層の検討", 第 67 回応用物理学学会学術講演会, 2006 年 8 月 30 日, 立命館大学
- [18] 森田 康裕, 阿部友紀, 他, "走査型拡がり抵抗顕微鏡(SSRM)によるワイドギャップ半導体の素子劣化の評価", 第 67 回応用物理学学会学術講演会, 2006 年 8 月 30 日, 立命館大学
- [19] 大橋修二, 阿部友紀, 他, "ZnSe 系白色 LED の遅い劣化機構に関する研究 - 増

殖性DNA性欠陥の起源－", 第67回応用物理学会学術講演会, 2006年8月30日, 立命館大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥取大学・工学研究科・准教授

阿部 友紀

研究者番号：20294340

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(研究協力者)

鳥取大学・工学研究科・教授

安東 孝止

鳥取大学・工学部・技術専門職員

笠田 洋文