

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2006～2008
課題番号：18310070
研究課題名（和文） シリコンナノフォトニクスとプラズモニクスの融合による新奇フォトニクス材料の創製
研究課題名（英文） Photonics Materials Realized by the Combination of Silicon Nano-Photonics and Plasmonics
研究代表者 藤井 稔（FUJII MINORU） 神戸大学・大学院工学研究科・准教授 研究者番号：00273798

研究成果の概要：

「Si ナノフォトニクス」と「プラズモニクス」を融合し、新しいナノ複合光学材料を実現することを目的に研究を行った。Si 系発光材料に及ぼす金属表面や金属ナノ構造の影響について包括的な研究を行った結果、金属ナノ構造により Si 系発光材料の特性を大きく変化させることができるだけでなく、Si ナノ結晶から希土類イオンへのエネルギー移動レートを制御できる可能性があることが明らかになった。また、表面プラズモン励起がアップコンバージョン発光増強に有効であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2007年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：新複合領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：ナノ構造物性

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、長年に渡って半導体ナノ結晶（特に、Si, Ge 等の IV 族半導体ナノ結晶）の光物性に関する研究を行っており、これらのナノ結晶の高効率発光が量子サイズ効果に起因することを実証してきた。さらに Si ナノ結晶中への不純物ドーピング技術を確立し、ドーピングした不純物原子の振る舞い及びそれらが発光特性へ及ぼす効果について研究を行ってきた。Si ナノ結晶と不純物原子（イオン）との相互作用に関する研究の途上で、ナノ結晶が興味深い光機能性を示すこ

とを明らかにした。特筆すべき機能性として、Si ナノ結晶の光増感作用があげられる。Si ナノ結晶と Er イオンを同時にドーピングした SiO₂ 薄膜において Er イオンの近赤外発光強度が 3 桁程度増大することを見出した。これは、Si ナノ結晶の励起エネルギーが非常に高い効率で Er イオンに伝達される現象（エネルギー移動）に起因する。Si ナノ結晶からのエネルギー移動は、Er のみならず他の希土類イオンに対しても可能である。現在この現象を利用した超小型光増幅器の開発に向けて精力的に研究が進められている。同様のエ

エネルギー移動は Si ナノ結晶と酸素分子の間でも可能であり、Si ナノ結晶を光増感剤として一重項酸素（活性酸素の一種）が高効率で生成されることが見出されている。この現象は、Si ナノ結晶のバイオ応用の可能性を開くものとして注目されている。Si ナノ結晶の光増感作用は、Si ナノ結晶が間接遷移型半導体の0次元量子閉じ込め系であることに起因しており、直接遷移型半導体ナノ材料には見られない特異なものである。すなわち、Si ナノ結晶は光のエネルギーを励起状態のエネルギーとして長時間（室温で100 μ 秒程度）にわたって蓄えるエネルギーリザーバーとして、又蓄えたエネルギーを多岐にわたる物質に効率よく与えるエネルギードナーとしての働きを有しており、「Si ナノ結晶を中心的な構成要素とし、それに他の物質を付加することにより新奇な光学的機能を有する物質（デバイス）の創製」が可能であると考えられる。

これらの研究と平行して、我々は金属薄膜や金属ナノ結晶の表面プラズモンとその応用に関する研究を行っている。金属表面または界面は、電磁場と物質の相互作用に様々な影響を及ぼす。我々は、主に金属ナノ構造の表面プラズモン励起に伴う強い電場を利用した発光増強や表面増強ラマン散乱について研究を行ってきた。特に、それらのサイズ（ラフネス）依存性に関する研究を行っており、発光増強に最適な金属粒子のサイズを明らかにしてきた。最近になって、表面プラズモン共鳴を利用して、InGaNやCdSe等の化合物半導体ナノ構造の発光効率を改善する試みがなされている。また、Si半導体デバイスのさらなる高性能化に金属ナノ構造の表面プラズモンを利用しようとする研究も活発に行われている。特に、最先端デバイスの性能向上のボトルネックである配線遅延の問題解決に、微細金属ストライプからなるプラズモン導波路を使う動きが活発になっている。さらには、Siナノ結晶の光学特性を、金属ナノ構造のプラズモンにより制御しようとする試みが、カリフォルニア工科大学のH. Atwater教授のグループとFOM(オランダ)のA. Polman教授のグループで行われている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、我々のこれまでの研究の2つの流れを融合し、金属ナノ構造を用いて「主にSiナノ結晶を中心的な構成要素とするナノフォトニクスマテリアル」の光学特性の大幅な向上を実現することである。また、金属ナノ構造により、Siナノ結晶の光増感特性を大幅に向上させることを目的とする。Siナノ結晶中の励起子と希土類イオン間、もしくは異なる希土類イオン間でエネルギーの

授受が行われている系の近傍に金属ナノ構造を配置することにより、エネルギードナー（主にはSiナノ結晶）の電子励起、表面プラズモン励起、エネルギーアクセプター（主に希土類イオン）の電子励起を結合し、エネルギー移動効率を改善させ、その結果、系全体としての発光効率や光増幅率の増強を実現する。金属ナノ構造によるエネルギー移動レートの制御に関しては、色素間のエネルギー移動に関する研究例が存在する。しかしながら、研究例は少なくそのメカニズムの理解は十分になされていない。本研究により、これまでと全く異なる系において「プラズモニクスの適用によるエネルギー移動レートの向上」に関するデータの蓄積がなされることは、このような現象の背景に存在する物理の理解を可能にし、有機フォトニクス分野への有効なフィードバックが可能であると考えている。

3. 研究の方法

以上のコンセプトのもとに、主に次の3項目の達成を目的に研究を行った。

- (1) 金属ナノ構造によるSiナノ結晶の発光再結合レート制御及び増強。
- (2) 金属ナノ構造によるSiナノ結晶-希土類イオン間、希土類イオン-希土類イオン間のエネルギー移動レートの制御及び増強。
- (3) 金属ナノ構造による、希土類イオンのアップコンバージョン発光増強。

具体的な研究内容については、結果と合わせて「4. 研究成果」に示す。

4. 研究成果

(1) 金属ナノ構造によるSiナノ結晶の発光再結合レート制御及び増強

Siナノ結晶の発光特性を金属薄膜や金属ナノ構造により制御し、発光増強を実現することを目的に研究を行った。金属薄膜や金属ナノ構造を用いて発光材料の発光特性を制御する研究は多くなされているが、ほとんどが有機色素膜や直接遷移型化合物半導体ナノ結晶を対象にしている。Siナノ結晶は、Si系発光デバイスの開発のためにキー材料であるにもかかわらず、研究例は少ない。

まず最もシンプルな系として、Siナノ結晶近傍に金属薄膜を配置した時の発光特性の変化について系統的に研究を行った。金属表面とSiナノ結晶の距離を系統的に変化させ、Siナノ結晶の位置におけるPhotonic Mode Density (PMD)を変化させる方法で、Siナノ結晶集合体の中で実際に発光に寄与しているナノ結晶の発光再結合レートと非発光再結合レートを独立に見積もり、発光内部量子効率の波長依存性を測定することに成功した。その結果、Siナノ結晶集合体では少数の

ナノ結晶が非常に高い内部量子効率（50%以上）で発光しており、発光に寄与するナノ結晶の割合によって系全体の量子効率が決まることが明らかになった。この成果は、本研究が「Si ナノ結晶の発光増強」という応用面の要請に答えるだけでなく、半導体ナノ結晶の物性に関する基礎研究に大きく寄与するものであると考えている。

Si ナノ結晶を介した金属の表面プラズモンポラリトンの励起プロセスを詳細に調べるため、Si ナノ結晶をドーピングした SiO₂ 薄膜上に金属薄膜を堆積し、その上に有機物の一次元もしくは二次元のグレーティングを形成した系を作製した。角度分解発光測定より求めた分散関係と計算で得られた分散関係を比較することにより、Si ナノ結晶によるフラットな金属表面の表面プラズモン励起をはじめて実証した。また、発光減衰曲線の解析によりそのレートの波長依存性について知見を得ることができた。

しかしながら、フラットな金属表面を用いた場合、発光増強度は非常に小さかった。そのため、金属表面へのラフネスの形成もしくは金属表面への二次元周期構造の形成を行った。その結果、より大きい発光増強を得るとともに、発光増強度と表面構造の関係を明らかにした。

(2) 金属ナノ構造による Si ナノ結晶-希土類イオン間、希土類イオン-希土類イオン間のエネルギー移動レートの制御及び増強。

原子番号 68 番のエルビウム(Er)は、固体中で一般に 3 価のイオンの状態をとる。Er³⁺の第一励起準位から基底準位への遷移のエネルギーは光通信の標準波長である 1.5 μ m に一致する。そのため Er ドープ光ファイバーは Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) という形で光通信用の増幅器へ広く応用されている。Er³⁺は、Si ナノ結晶からのエネルギー移動により高効率に励起されることが知られている。この Si ナノ結晶による Er³⁺の光増感作用を用いると、光増幅器を大幅に小型化できる可能性があり、多くの注目を集めている。我々は、金属の表面プラズモン励起をうまく利用すると、Si ナノ結晶から Er³⁺へのエネルギー移動レートの増大が可能になり、Er³⁺の発光をさらに増強できるのではないかと考え研究を行った。

具体的には、Si ナノ結晶と Er を同時ドーピングした SiO₂ 薄膜の近傍に金属薄膜を設置し、Si ナノ結晶から Er イオンへのエネルギー移動レートに及ぼす金属薄膜の効果について詳細に調べた。その結果、エネルギー移動レートが PMD の 2 乗に依存して変化し、エネルギー移動レートが増加する場合も減少する場合もあることを見出した。これは、

これまでに報告されている結果（エネルギー移動レートは PMD に依存しない。もしくは、エネルギー移動レートは PMD に比例する）と大きく異なるものであり、注目を集めている。この結果は、金属の形状や Si ナノ結晶/Er³⁺結合系との距離を最適化することにより、エネルギー移動レートの大幅な向上が期待できることを示している。また、実験データの解析より、エネルギー移動レートの波長依存性を得る事にはじめて成功した。さらに、共鳴エネルギー移動の存在を示す等、Si ナノ結晶/Er³⁺結合系の基礎物性に関して多くの知見を得た。

(3) 金属ナノ構造による、希土類イオンのアップコンバージョン発光増強。

希土類イオンは古くからアップコンバージョン発光を示すことで知られている。アップコンバージョン発光の応用例として、アップコンバージョンレーザや三次元ディスプレイ、バイオイメージング等がある。さらに、シリコン太陽電池の励起に寄与しない赤外光を可視光に変換して効率を上げる研究なども進められており、アップコンバージョン発光の応用分野は多岐にわたっている。

本研究の目的は、Er のアップコンバージョン発光を金属薄膜もしくは金属ナノ構造を用いて改善することである。これまでに述べたように、金属ナノ構造を用いた色素分子や希土類イオン、半導体量子ドットの発光特性の改善については多くの報告例がある。一方、アップコンバージョン発光について、近傍に存在する金属の影響を調べたという報告は非常に少ない。まず最もシンプルな系としてフラットな金属薄膜が Er³⁺のアップコンバージョン発光に及ぼす影響について研究を行った。その後、表面にラフネスを持つ金属薄膜によるアップコンバージョン発光増強について研究を行った。

研究の結果、Er と Yb を同時ドーピングした薄膜近傍に金属表面が存在すると金属の表面プラズモン励起によりアップコンバージョン発光が大幅に増強されることが明らかになった。特に、Ag 島状薄膜を用いた場合、最大 220 倍の発光増強が得られた。これは同時に測定したダウンコンバージョン発光の増強度に比べて非常に大きく、表面プラズモン励起がアップコンバージョン発光増強に有効であることが明らかになった。金属ナノ構造の吸収スペクトルと発光増強度の波長依存性の比較より発光増強のメカニズムの解明を行った。その結果、発光増強には励起効率の向上と発光効率の向上の両者が関与しているが、アップコンバージョン発光が多光子過程であるため励起効率の向上の効果がより顕著であることが明らかになった。

以上のように、Si 系発光材料に及ぼす金属表面、金属ナノ構造の影響について包括的な研究を行った。その結果、「Si ナノフォトニクス」と「プラズモニクス」を融合させることにより、Si 系発光材料の特性を大きく変化させるだけではなく、基礎研究の観点からも多くの新しい知見を得ることができた。本研究により、当該分野の今後の方向性が相当明らかになったと思われる。今後は、本研究で得られた知見をもとに、金属ナノ構造の形状や Si 系発光材料と金属ナノ構造の位置関係をより精密に制御し、より高い効果が得られる系の開発を行いたい。

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) Toshihiro Nakamura, Minoru Fujii, Yoshiko Usui, Takeho Aisaka and Shinji Hayashi, Enhancement of Upconversion Luminescence from Er Doped Al₂O₃ Films by a Thin Metal Layer, Electrochemical Society (ECS) Transactions, in press 査読有.
- (2) Ignacio Izeddin, Dolf Timmerman, Tom Gregorkiewicz, A. S. Moskalenko, A. A. Prokofiev, Irena N. Yassievich and Minoru Fujii, Energy Transfer Processes in Er-doped SiO₂ Sensitized with Si Nanocrystals, Physical Review B, 78, 035327-1-14 (2008) 査読有.
- (3) Nobuyuki Ishikura, Minoru Fujii, Masaki Inui and Shinji Hayashi, Photoluminescence Properties of Si Nanocrystals near Rough Au Films, Transactions of the Materials Research Society of Japan, 33, 141-144 (2008) 査読有.
- (4) Takeho Aisaka, Minoru Fujii and Shinji Hayashi, Enhancement of Upconversion Luminescence of Er Doped Al₂O₃ Films by Ag Island Films, Applied Physics Letters, 92, 132105-1-3 (2008) 査読有.
- (5) Minoru Fujii, Toshihiro Nakamura, Satoru Miura, Masaki Inui and Shinji Hayashi, Energy Transfer from Si Nanocrystals to Er Ions near a Metal Layer, Physica Status Solidi (a), 205, 47-51 (2008) 査読有.
- (6) Kimihisa Matsumoto, Eiji Takeda, Kenji Imakita, Minoru Fujii and Shinji Hayashi, Luminescence Properties of Er and Si Nanoparticles Co-doped Aluminum Silicate Thin Films, Transactions of the Materials Research Society of Japan, 32, 441-443 (2007) 査読有.
- (7) Toshihiro Nakamura, Minoru Fujii, Satoru Miura, Masaki Inui and Shinji Hayashi, Spontaneous Emission Rate of Si Nanocrystals on Thin Au Film, Japanese Journal of Applied Physics, 46, 6498-6502 (2007) 査読有.
- (8) Eiji Takeda, Minoru Fujii, Toshihiro Nakamura, Yugo Mochizuki and Shinji Hayashi, Enhancement of Photoluminescence from Excitons in Silicon Nanocrystals via Coupling to Surface Plasmon Polaritons, Journal of Applied Physics, 102, 023506-1-6 (2007) 査読有.
- (9) Kimihisa Matsumoto, Minoru Fujii and Shinji Hayashi, Photoluminescence from Si Nanocrystals Embedded in In₂O₃/SiO₂ Glass Thin Films, Japanese Journal of Applied Physics, 46, 1779-1782 (2007) 査読有.
- (10) Ignacio Izeddin, A. S. Moskalenko, Irena N. Yassievich, Minoru Fujii and Tom Gregorkiewicz, Nanosecond Dynamics of the Near-Infrared Photoluminescence of Er-Doped SiO₂ Sensitized with Si Nanocrystals, Physical Review Letters, 97, 207401-1-4 (2006) 査読有.
- (11) Eiji Takeda, Toshihiro Nakamura, Minoru Fujii, Satoru Miura, and Shinji Hayashi, Surface Plasmon Polariton Mediated Photoluminescence from Excitons in Silicon Nanocrystals, Applied Physics Letters, 89, 101907-1-3 (2006) 査読有.
- (12) Kenji Imakita, Minoru Fujii, Toshihiro Nakamura, Satoru Miura, Eiji Takeda and Shinji Hayashi, Enhancement of Radiative Recombination Rate of Excitons in Si Nanocrystals on Au Film, Japanese Journal of Applied Physics, 45, 6132-6136 (2006) 査読有.
- (13) Toshihiro Nakamura, Minoru Fujii, Satoru Miura, Masaki Inui and Shinji Hayashi, Enhancement and Suppression of Energy Transfer from Si Nanocrystals to Er Ions through a Control of the Photonic Mode Density, Physical Review B, 74, 045302-1-6 (2006) 査読有.
- (14) Satoru Miura, Toshihiro Nakamura, Minoru Fujii, Masaki Inui and Shinji Hayashi, Size Dependence of

Photoluminescence Quantum Efficiency of Si Nanocrystals, Physical Review B, 73, 245333-1-5 (2006) 査読有.

[学会発表] (計 26 件)

- (1) [Invited talk] Minoru Fujii, Sensitization of Er³⁺ by Si nanocrystals in Er and Si nanocrystals co-doped SiO₂, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRiME 2008), October 12-17 (2008), Honolulu, Hawaii (USA).
- (2) [Invited talk] Minoru Fujii, Optical Properties of Si Nanocrystals, The Fifth International Workshop on Active-Matrix FlatPanel Displays and Devices (AM-FPD 08) -TFT Technologies and FPD Materials, S-2, July 2-4 (2008), Tokyo (Japan).
- (3) [Key talk][Invited talk] Minoru Fujii, Sensitization of Er³⁺ in SiO₂ by Si Nanocrystals, Sensitized Er doped waveguide amplifier/laser (SEDWAL) Workshop 2008, April 13-15 (2008), Levico Terme - Trento (Italy).
- (4) 石倉伸幸、藤井稔、乾真規、林真至, Roughnessを持つ金薄膜近傍における Si ナノ結晶の発光特性, 第 18 回日本 MRS 学術シンポジウム 2007 年 12 月 7 日-9 日 日本大学.
- (5) [Invited Talk] Minoru Fujii, Photoluminescence Properties of Silicon Nanocrystals near a Metal Thin Film, 2007 (MRS) fall meeting, GG. 5.1, November 25-30 (2007), Boston (USA).
- (6) 相坂武穂、藤井稔、林真至, 表面プラズモン励起による Er³⁺ のアップコンバージョン発光の増強, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007 年 9 月 4 日-8 日, 北海道工業大学.
- (7) 藤井 稔, 金属薄膜近傍におけるシリコンナノ結晶の発光特性, 神戸大学連携創造本部先端研究推進部門, 2007 年度第 5 回 ナノ・フォトニクス技術セミナー@VBL, 「有機-無機, 金属-半導体複合ナノ構造物質の新奇物性及び機能」, 2007 年 7 月 26 日(木), 神戸大学.
- (8) [Invited talk] 藤井稔、中村俊博、武田英治、三浦智、乾真規、望月有吾、石倉伸幸、林真至, 表面プラズモンポラリトン励起によるシリコンナノ結晶の発光増強, ナノオプティクス研究グループ第16回研究討論会, 2007年7月13日-14日, 神戸大学.
- (9) 望月有吾、武田英治、中村俊博、藤井稔、林真至, 表面プラズモンポラリトン励起による Si ナノ結晶の発光増強, 第 54 回応用物理学会関係連合講演会, 2007 年 3 月 27 日-30 日, 青山学院大学.
- (10) [Invited talk] 藤井稔, 希土類ドーブシリコンナノ結晶, 量子エレクトロニクス研究会 "シリコンフォトニクス, 2007 年 1 月 16 日-18 日, 上智大学軽井沢セミナーハウス.
- (11) 三浦智、藤井稔、中村俊博、乾真規、林真至, Measurement of the Quantum Efficiency of Silicon Nanocrystals through a Controlled Photonic Mode Density, 第 17 回日本 MRS 学術シンポジウム, 2006 年 12 月 8 日-12 月 10 日, 日本大学 (第 17 回日本 MRS 学術シンポジウム奨励賞受賞).
- (12) 松本公久、武田英治、今北健二、藤井稔、林真至, Luminescence Properties of Er and Si nanoparticles Co-doped Aluminum Silicate Thin Film, 第 17 回日本 MRS 学術シンポジウム 2006 年 12 月 8 日-10 日, 日本大学.
- (13) 乾真規、三浦智、中村俊博、藤井稔、林真至, Si ナノ結晶の発光量子効率, 第 17 回光物性研究会 2006 年 12 月 8-9 日 大阪市立大学.
- (14) 藤井 稔, ナノシリコン, 第9回「KOBETECH サミット」, 平成18年12月1日(金) 神戸大学.
- (15) [Invited Talk] Minoru Fujii and Shinji Hayashi, Photoluminescence Properties of Impurity-doped Si Nanocrystals, 2nd Workshop on Impurity Based Electroluminescent Devices and Materials, T-12, October 17-20 (2006), Wakayama (Japan).
- (16) 相坂武穂、確井佳子、藤井稔、林真至, 金薄膜近傍における Er イオンのアップコンバージョン発光の増強に関する研究, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 23 日-9 月 26 日 千葉大学.
- (17) Eiji Takeda, Toshihiro Nakamura, Minoru Fujii, Satoru Miura and Shinji Hayashi, Surface Plasmon Polariton Mediated Photoluminescence from Excitons in Silicon Nanocrystals, 9th International Conference on Near-field Optics, Nanophotonics & Related Techniques, Tu2-4, September 10-15 (2006), Lausanne (Switzerland).
- (18) [Invited Talk] 藤井稔、林真至, シリコンナノ結晶の発光特性と光増感作用, "第 67 回応用物理学会学術講演会, シンポジウム "微小球フォトエレクトロニクスの新展開," 2006 年 8 月 29 日-9 月 1 日 立命館大学.
- (19) 確井佳子、中村俊博、相坂武穂、藤井稔、林真至, 金薄膜近傍における Er のアップコンバージョン発光増強, 第 67 回応用物理学会関係連合講演会, 2006 年 8 月 29 日-9

- 月 1 日 立命館大学.
- (20)[Invited Talk] Minoru Fujii,
Modification of Luminescence
Properties of Er Doped Si Nanocrystals
near a Metal Thin Film, Int. Workshop
on Nanostructured Materials
(Nanomat) 2006, June 21-23 (2006),
Antalya (Turkey).
- (21)V. Yu. Timoshenko, D. M. Zhigunov, O.
A. Shalygina, D. A. Palenov, P. K.
Kashkarov, R. J. Zhang and M.
Zacharias, M. Fujii and S. Hayashi,
Photoluminescence of Erbium Doped
Structures of Silicon Nanocrystals
under Strong Optical Excitation,
E-MRS spring meeting, D S13 04, May
29-June 04 (2006), Nice (France).
- (22)Satoru Miura, Minoru Fujii, Toshihiro
Nakamura, Masaki Inui and Shinji
Hayashi, Size Dependence of
Photoluminescence Quantum
Efficiency of Si Nanocrystals,” E-MRS
spring meeting, D S10 03, May 29-June
04 (2006), Nice (France).
- (23)Ignacio Izeddin, Minoru Fujii and Tom
Gregorkiewicz, Auger Process of
Luminescence Quenching in Er-Doped
Si Nanocrystals, E-MRS spring
meeting, D S9 04, May 29-June 04
(2006), Nice (France).
- (24)Toshihiro Nakamura, Minoru Fujii,
Satoru Miura, Masaki Inui and Shinji
Hayashi, Modification of Energy
Transfer from Si Nanocrystals to Er
Ions near a Au Layer - Wavelength
Dependence, E-MRS spring meeting, D
S7 03, May 29-June 04 (2006), Nice
(France).
- (25)Ignacio Izeddin, Minoru Fujii and Tom
Gregorkiewicz, The Missing Er Ions:
Time-Resolved Photoluminescence of
SiO₂:Er Sensitized with Si
Nanocrystals, European MRS (E-MRS)
spring meeting, C 11 07, May 29-June
04 (2006), Nice (France).
- (26)[Invited Talk] Minoru Fujii, Silicon
Dioxide Films Containing Silicon
Nanocrystals and Er Ions -Modification
of Spontaneous Emission Rate and
Energy Transfer Rate by Metal Thin
Films, 2006 Materials Research
Society (MRS) Spring Meeting, I2.1,
April 18-20 (2006), San Francisco
(USA).

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤井 稔 (FUJII MINORU)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00273798

(2)研究分担者

林 真至 (HAYASHI SHINJI)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50107348

森脇 和幸 (MORIWAKI KAZUYUKI)
神戸大学 大学院工学研究科 准教授
研究者番号：50322194

(3)連携研究者