

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560367

研究課題名(和文) ナノ構造制御有機薄膜の多重表面プラズモン複合励起と高効率デバイスへの応用

研究課題名(英文) Multiple SP Combined Excitations in Nanostructured Organic Films and Application to High-Efficiency Devices

研究代表者

加藤 景三 (KATO, Keizo)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00194811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)： グレーティング構造を持つ金属薄膜および有機薄膜の表面プラズモン(SP)励起について種々検討した。また、金属グレーティング薄膜界面を伝搬する伝搬型SPと金属微粒子界面に束縛された局在SPとの多重SP複合励起についても検討した。さらに、透過型SP励起や長距離伝搬SP励起などについても検討した。そして、ナノ構造制御した有機薄膜における多重SP複合励起は、有機デバイスの高効率化に有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)： The surface plasmon (SP) excitations were examined for the metal and organic thin films with grating structures in detail. The multiple SP excitations combined with the grating-coupled SP excitation and the localized SP excitation due to metal particles were also investigated. Furthermore, transmission SP excitation and long-range SP excitation were also investigated. It was found that the multiple SP combined excitations are useful for the development of high-efficiency organic devices.

研究分野：有機エレクトロニクス

キーワード：表面プラズモン 有機薄膜 ナノ構造制御 金属グレーティング 金属微粒子 太陽電池 センサ

1. 研究開始当初の背景

(1) 光で励起され金属表面に局在し、光に近い速度で伝搬する自由電子の縦波は光の振動数を持つ二次元光波で表面プラズモン (SP) として知られている。通常、全反射減衰 (ATR) 法のクレッチマン配置 (プリズム/金属薄膜/誘電体薄膜/空気構造) やオッター配置 (プリズム/低屈折率媒質間隙/誘電体薄膜/金属構造) で、p偏光レーザー光をプリズム側から入射しプリズム表面で全反射させることで、SPを金属界面に共鳴励起できる。そのため、ATR法はSPR法と呼ばれる。そして、このSP励起により金属界面近傍の電界が増強される。このSPを用いた学問分野は、最近、プラズモニクスと呼ばれ国内外で数多く研究されるようになってきている。特に、ここ数年で大きな注目を浴びてきており、SP増強電界の活用の研究が始まっている。

(2) 研究代表者らは、このSPR法やSP励起に関して、20年ほど前から種々の有機薄膜などに対して様々な研究を行い、多数の成果を発表してきている。本研究で扱うグレーティング構造によるSP励起を利用した色素増感太陽電池について既に特許出願しており、このグレーティング構造による多重SP励起と金属微粒子を用いた局在SPの同時励起による多重SP複合励起については、まだほとんど報告がなされていない。グレーティング構造による多重SP励起、金属微粒子を用いた局在SPの複合励起による多重SP複合励起に関する本研究は、非常に独創的である。また、これらの多重SP複合励起機構の解明と、この多重SP複合励起による電界増強を利用した高効率デバイス開発のためのデバイス構造の最適化を行う本研究は、学術的・産業応用上において非常に大きな意義があると考えられる。また、この多重SP複合励起による電界増強は、太陽電池に限らず、バイオセンサや新規のナノフォトニックデバイスなど、様々なデバイスへの応用の可能性があり、その基礎的な応用を試みる本研究は非常に重要である。

2. 研究の目的

(1) ナノ構造制御した有機薄膜における多重表面プラズモン (SP) 複合励起について検討を行い、有機デバイスの高効率化に向けた研究を行う。すなわち、グレーティング構造を持つ金属薄膜上に金属微粒子を含む有機薄膜などを作製し、金属薄膜界面を伝搬するSPと金属微粒子界面に束縛された局在SPとの多重SP複合励起などについて検討する。

(2) 多重SP複合励起などに関するデバイスの最適化構造を見出し、太陽電池やセンサなどの有機デバイスの高効率化に結び付ける。

3. 研究の方法

(1) CD-Rの凹凸構造や、より格子間隔の狭いBD-Rの凹凸構造を利用したインプリントにより、様々なグレーティング構造を持つ金属薄膜および有機薄膜を作製する。また、金属グレーティング上に有機薄膜中に金属微粒子を分散させた複合膜の作製を行うなどして、種々のナノ構造制御した有機薄膜の作製を行う。そして、種々の有機分子などを用いて作製されたナノ構造制御有機薄膜や金属薄膜の表面観察等を行い、膜構造やグレーティング構造などについて評価する。また、色素分子層を挿入した膜などの様々なナノ構造制御有機薄膜について光吸収やホトルミネセンスなどの光学的特性も評価し、詳しく検討する。

(2) 種々の有機薄膜や金属薄膜の表面凹凸の評価結果や金属微粒子の分布などの評価結果などを基に、ナノ構造と多重SP複合励起の関係を詳細に検討する。そして、多重SP複合励起に関する最適化構造の検討を行う。すなわち、金属微粒子層の層間隔や金属微粒子の分布を変化させることなどにより、様々なナノ構造制御した有機薄膜を作製する。そして、ナノ構造制御有機薄膜中のSP励起電界などについて、FDTD法による電界計算の結果もフィードバックして詳細に検討を行い、多重SP複合励起に関する最適化構造を見出す。

(3) 多重SP複合励起などに関するデバイスの最適化構造の検討結果などを基に、高効率有機デバイスへの応用を試みる。すなわち、太陽電池やセンサなどを多重SP複合励起に関する最適化構造で作製し、それらのデバイス特性について評価を行う。そして、多重SP複合励起による電界増強を利用した高効率デバイスの開発に結び付ける。

4. 研究成果

(1) 図1に示すグレーティングカップリングSP励起を利用した色素増感太陽電池について検討を行った。CD-R ($L = 1.6 \mu\text{m}$) またはBD-R ($L = 320 \text{ nm}$) グレーティング基板を用い、電気泳動法により TiO_2 薄膜を堆積し、 TiO_2 薄膜上に交互吸着 (LbL) 法により色素吸着した。カチオンとして 5,10,15,20-Tetrakis (1-methyl-4-pyridinio) porphyrin tetra (p-toluenesulfonate) (TMPyP)、アニオンに銅クロロフィリンナトリウム (SCC) を用いた。BD-R グレーティング基板/Au (150 nm)/ TiO_2 (40 nm)/TMPyP-SCC (20 bilayers)/電解質/ITO) のSPR特性を調べるために、白色光の入射角度を固定し、入射光波長の変化による反射率特性を測定した結果を図2に示す。BD-R 基板上の場合は測定波長の範囲に各角度において一つのSPR励起によるディップが観測さ

れている。光入射角を大きくするにしたがって、ディップは長波長側へシフトすることがわかった。さらに、これらのディップは、TMPyP-SCC 交互吸着層の膜厚が厚くなるにつれて長波長側にシフトすることも他の実験から観測され、これらの結果より、SP は Ag/TMPyP-SCC の界面において共鳴励起されていると言える。すなわち、光吸収層である TMPyP-SCC 交互吸着膜における電界を増強することが可能であることが示唆された。

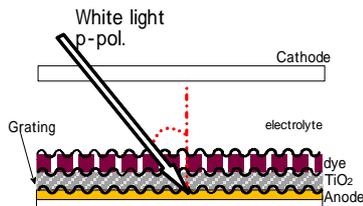


図1 グレーティングカップリング SPR を利用した色素増感太陽電池

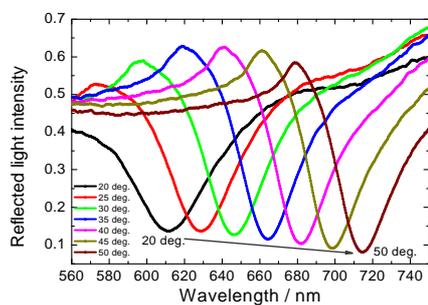


図2 SPR の波長依存性

(2) Au 担持 TiO₂ 薄膜を作製し, BD-R グレーティング基板/Au (150 nm)/Au 担持 TiO₂ (30 nm)/TMPyP-SCC (20 bilayers)/電解質/ITO を作製し, 金属グレーティングによる伝搬型 SP 励起と金属微粒子による局在 SP 励起の光電変換に寄与する効果の検討を行った。SP 励起による短絡光電流の増強度の光入射角依存性を図3に示す。同一セルにおいて, SP 共鳴励起している場合(p 偏光照射時)と, 共鳴励起していない場合(s 偏光照射時)の短絡光電流の測定を, 入射角度 0° から 35° の範囲で固定して行った。この時, 伝搬型 SP 励起の効果や金微粒子による局在 SP 励起の効果も無い場合の短絡光電流の値を 1 として, これに対するそれぞれの条件で同様に短絡光電流を測定した場合の値の比を増強度として示している。同図より, いずれの試料も SPR 励起により 2 倍以上の増強度となっていることがわかる。また, グレーティングカップリング SPR 励起のない 1.00 at% の Au 担持 TiO₂ 薄膜においては 3 倍の増強度が得られており, Au 担持することだけでも短絡光電流がかなり増大することが確認された。グレーティングカップリング SPR のある 1.00 at% の Au 担持 TiO₂ 薄膜においては,

入射光角度 25° において 7 倍もの増強度が得られている。これは, グレーティング構造による伝搬型 SPR と Au ナノ粒子による局在 SPR の両方の効果によって, 光電変換効率の増大が得られていると考えられる。

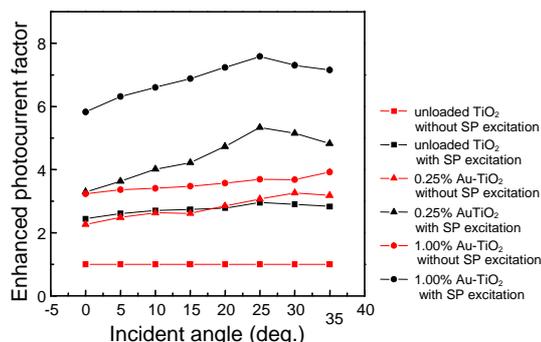


図3 SPR 励起による短絡光電流の増強度の光入射角依存性

(3) 長距離伝搬 SP 励起についても検討した。長距離伝搬 SP 励起は, エバネッセント波の浸入長が長く, 通常の SP 励起よりも鋭い SPR 特性となるので, 高感度なセンサへの応用が可能である。図4にそのセンサ構造を示す。センサチップは, 高屈折率ガラス基板上にサイトップを 800 nm 堆積し, その上に Cr/Au (2 nm/30 nm) を堆積し, ポリアクリル酸 (PAA) ファイバ膜を堆積させ作製した。そして, この長距離伝搬 SP 励起バイオセンサにより, ヒト免疫グロブリン G のセンシングを試み, 高感度に検出できることを示した。

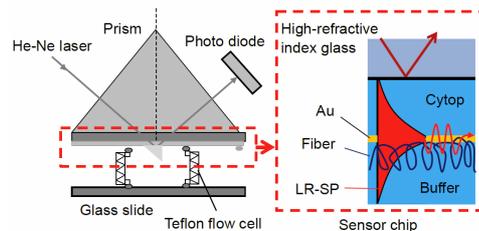


図4 長距離伝搬 SP 励起を利用したバイオセンサ

(4) 透過型 SP 励起についても検討した。図5に透過型 SP 励起を電気化学セルに組み込んだ測定系を示す。白色光を p 偏光で入射し, 特定の波長で SP 励起し, その励起に伴う放射光スペクトルを右側の検出器で測定する。DVD-R グレーティング (L=740 nm) 上に Au を蒸着し, その上にポリエチレンジオキシチオフェン (PEDOT) を電解重合によって約 20 nm 堆積し, PEDOT のドーピングと脱ドーピング時の透過型 SP の出力光スペクトルの変化を測定し, ドーピング・脱ドーピングによる光制御が可能であることを示した。また, 透過型 SP 励起をマイクロ流体デバイスと組

合せることによりバイオセンサへの応用も可能である。さらに、金属微粒子による局在SPも複合することにより、透過型SP励起の高感度化についても検討した。

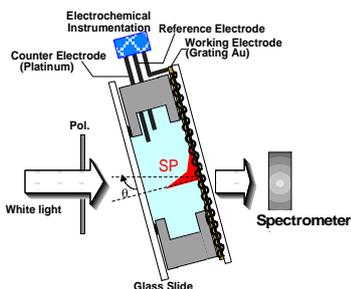


図5 透過型SP励起の測定系

(5) SP励起を光導波路分光法や水晶振動子微量天秤法と組合せた複合センサを提案し、有機センサの高性能化についても検討を行った。図6にSP励起を光導波路分光法を組合せた複合センサを示す。このセンサによりフタロシアニン LbL 膜の堆積過程のその場評価を行った。BK-7 スライドガラスを光導波路基板として用い、Au (5 nm)/Ag (50 nm)上に poly(methyl methacrylate- co-methacrylic acid) (PMMA-co-PMAA) を作製した。PMMA-co-PMAA は可視光域で透明であり、SP励起波長を調整するために用いた。さらに、基板上に溶液を保持するためのセルを紫外線硬化樹脂により形成した。このセンサに対して、基板端面から平行白色光を照射して基板中を導波させた。そして、水溶性の正イオン性の銅フタロシアニン (Alcian Blue, pyridine variant) と透明な陰イオン性のポリスチレンスルホン酸 (PSS) を LbL 膜作製材料として用い、フタロシアニン LbL 膜堆積 (0-5 bilayers) に伴う出力光スペクトルの変化を測定した。その結果、フタロシアニン色素堆積、純水によるリンス、PSS 堆積、純水によるリンスの順に、溶液中での薄膜堆積過程のその場観測が可能であることが明らかとなった。また、水晶振動子微量天秤法との複合センサにより、ポリアリルアミンと PSS 水溶液による LbL 膜の堆積過程のその場評価を行い、膜状態の評価も可能であることを示した。以上の結果より、SP励起を光導波路分光法や水晶振動子微量天秤法と組合せることにより、高性能センサとなることを明らかにした。

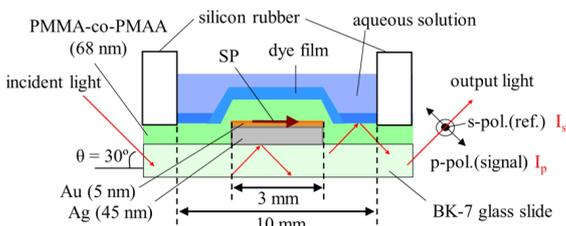


図6 SPR法とOWG法を用いた複合センサ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計19件)

Saengrawee Sriwichai, Akira Baba, Sukon Phanichphant, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: "In Situ Study of Electropolymerized Poly(3-aminobenzoic acid) Thin Film on BD-R and DVD-R Grating Substrates by Electrochemical-Transmission Surface Plasmon on Resonance Spectroscopy", International Journal of Polymer Science, ID 650516 (7 pages) (2015) 査読有
DOI: 10.1155/2015/650516

Hathaitip Ninsonti, Kazuma Hara, Supeera Nootchanat, Weerasak Chomkitichai, Akira Baba, Sukon Phanichphant, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: "Enhanced Photocurrent Generation at a Spiro-OMeTAD/AuNPs-TiO₂ Interface with Grating-coupled Surface Plasmon Excitation", IEICE Transactions Electronics, Vol.E98-C, No.2, pp.104-109 (2015) 査読有
DOI: 10.1587/transele.E98.C.104

Keisuke Kawachi, Kazunari Shinbo, Yasuo Ohdaira, Akira Baba, Keizo Kato, Futao Kaneko: "Evaluation of a PAH/PSS Layer-by-Layer Deposited Film Using a Quartz-Crystal-Microbalance and Surface-Plasmon-Resonance Hybrid Sensor", IEICE Transactions Electronics, Vol.E98-C, No.2, pp.136-138 (2015) 査読有
DOI: 10.1587/transele.E98.C.136

Paphawadee Netsuwan, Hiroto Mimiya, Akira Baba, Saengrawee Sriwichai, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko, Sukon Phanichphant: "Long-Range Surface Plasmon Resonance Immunosensor Based on Water-Stable Electrospun Poly(Acrylic Acid) Fibers", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.204, pp.770-776 (2014) 査読有
DOI: 10.1016/j.snb.2014.07.121

Supeera Nootchanat, Hathaitip Ninsonti, Akira Baba, Sanong Ekgasit, Chuchaat Thammacharoen, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: "Investigation of Localized Surface Plasmon/Grating-coupled Surface Plasmon Enhanced Photocurrent in TiO₂ Thin Films", Physical Chemistry Chemical Physics, Vol.16, pp.24484-24492 (2014) 査読有
DOI: 10.1039/c4cp03885a

Weerasak Chomkitichai, Hathaitip Ninsonti, Akira Baba, Sukon Phanichphant, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: "Multiple Plasmonic Effect on Photocurrent Generation of Metal-loaded Titanium Dioxide

Composite/Dye Films on Gold Grating Surface”, Surface and Interface Analysis, Vol.46, pp.607-612 (2014) 査読有
DOI: 10.1002/sia.5577

Chutiparn Lertvachirapaiboon, Akira Baba, Sanong Ekgasit, Chuchaat Thammacharoen, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Distance-Dependent Surface Plasmon Resonance Coupling between a Gold Grating Surface and Silver Nanoparticles”, Plasmonics, Vol.9, Issue 4, pp.899-905 (2014) 査読有
DOI: 10.1007/s11468-014-9695-2

Hathaitip Ninsonti, Weerasak Chomkitichai, Akira Baba, Natda Wetchakun, Wiyong Kangwansupamonkon, Sukon Phanichphan, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Au-Loaded Titanium Dioxide Nanoparticles Synthesized by Modified Sol-Gel/ Impregnation Methods and Their Application to Dye-Sensitized Solar Cells”, International Journal of Photoenergy, Article ID:865423 (8 pages) (2014) 査読有
DOI: 10.1155/2014/865423

Sopis Chuekachang, Rapiphun Janmanee, Akira Baba, Sukon Phanichphant, Saengrawee Sriwichai, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko, Nobuko Fukuda, Hirobumi Ushijima: “Electrochemically Controlled Detection of Adrenaline on Poly(2-aminobenzylamine) Thin Films by Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Quartz Crystal Microbalance”, Surface and Interface Analysis, Vol.45, pp.1661-1666 (2013) 査読有
DOI: 10.1002/sia.5301

Sopis Chuekachang, Rapiphun Janmanee, Akira Baba, Sukon Phanichphant, Saengrawee Sriwichai, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko, Nobuko Fukuda, Hirobumi Ushijima: “Fabrication of Thin Film from Conducting Polymer/Single Wall Carbon Nanotube Composites for the Detection of Uric Acid”, Molecular Crystals and Liquid Crystals, Vol.580, pp.1-6 (2013) 査読有
DOI: 10.1080/15421406.2013.803887

Paphawadee Netsuwan, Saengrawee Sriwichai, Sukon Phanichphant, Akira Baba, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Fabrication of Carboxylated Conducting Polymer/CNTs Composites Thin Films for Immunosensor Application”, Molecular Crystals and Liquid Crystals, Vol.580, pp.7-14 (2013) 査読有
DOI: 10.1080/15421406.2013.803890

Rapiphun Janmanee, Akira Baba, Sukon Phanichphant, Saengrawee Sriwichai, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Electrochemically Fabricated Pyrrole Copolymer Thin Films and Their Electroactivity in Neutral Aqueous Solution”, Molecular Crystals and Liquid Crystals, Vol.580, pp.29-34 (2013) 査読有
DOI: 10.1080/15421406.2013.804775

Chutiparn Lertvachirapaiboon, Chirayut Supunyabut, Akira Baba, Sanong Ekgasit, Chuchaat Thammacharoen Kazunari Shinbo Keizo Kato and Futao Kaneko: “Transmission Surface Plasmon Resonance Signal Enhancement via Growth of Gold Nanoparticles on a Gold Grating Surface”, Plasmonics, Vol.8, pp.369-375 (2013) 査読有
DOI: 10.1007/s11468-012-9400-2

加藤景三: “表面プラズモン励起を利用した有機薄膜の評価と高性能有機デバイス”, 応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会会誌, Vo.24, No.2, pp.79-84 (2013) 査読無

Kazunari Shinbo, Akihiro Uno, Ryo Hirakawa, Akira Baba, Yasuo Ohdaira, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Fabrication of a Quartz-Crystal-Microbalance/Optical-Waveguide Hybrid Sensor and In situ Evaluation of Vacuum-Evaporated Lead Phthalocyanine Thin Film”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.52, pp.05DC20-1-5 (2013) 査読有
DOI: 10.7567/JJAP.52.05DC20

Hathaitip Ninsonti, Weerasak Chomkitichai, Akira Baba, Wiyong Kangwansupamonkon, Sukon Phanichphant, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Enhanced Photocurrent Properties of Dye/Au-loaded TiO₂ Films by Grating-coupled Surface Plasmon Excitation, IEICE Transactions Electronics, Vol.E96-C, No.3, pp.385-388 (2013) 査読有
DOI: 10.1587/transele.E96.C.385

Akira Baba, Kohji Tada, Rapiphun Janmanee, Saengrawee Sriwichai, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko, Sukon Phanichphant: “Controlling Surface Plasmon Optical Transmission with Electrochemical Switch Using Conducting Polymer Thin Films”, Advanced Functional Materials, Vol.22, pp.4383-4388 (2012) 査読有
DOI: 10.1002/adfm.201200373

Chutiparn Lertvachirapaiboon, Ryosuke Yamazaki, Prompong Pienpinijtham, Akira Baba, Sanong Ekgasit, Chuchaat

Thammacharoen, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Solution-based Fabrication of Gold Grating Film for Use as a Surface Plasmon Resonance Sensor Chip”, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.173, pp.316-321 (2012) 査読有
DOI: 10.1016/j.snb.2012.07.003

Rapiphun Janmanee, Akira Baba, Sukon Phanichphant, Saengrawee Sriwichai, Kazunari Shinbo, Keizo Kato, Futao Kaneko: “In situ Electrochemical-Transmission Surface Plasmon Resonance Spectroscopy for Poly(pyrrole-3-carboxylic acid) Thin-Film-Based Biosensor Applications”, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol.4, pp.4270-4275 (2012) 査読有
DOI: 10.1021/am300970m

[学会発表](計129件)

加藤景三: “有機薄膜のナノ構造制御による表面プラズモン励起と高性能デバイスへの応用”, 平成26年度繊維学会年次大会(招待講演), 2014年6月11日~2014年6月13日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

加藤景三, 馬場 暁, 新保一成, 金子双男: “ナノ構造制御有機薄膜の表面プラズモン共鳴励起と高性能デバイス・センサへの応用”, 電子情報通信学会有機エレクトロニクス研究会(招待講演), 2014年3月4日~2014年3月4日, 東京工業大学(東京都目黒区)

金子双男, 馬場 暁, 新保一成, 加藤景三: “エバネッセント波と表面プラズモン共鳴を利用したナノ構造有機薄膜デバイス”, 有機EL討論会第17回例会(招待講演), 2013年11月18日~2013年11月19日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

加藤景三: “ナノ構造制御有機薄膜の表面プラズモン励起による評価”, 有機EL討論会第16回例会(招待講演), 2013年6月27日~2013年6月28日, 日本科学未来館(東京都江東区)

加藤景三: “表面プラズモン励起を利用した有機薄膜の評価と高性能有機デバイス”, 応用物理学学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会研究会「有機分子・バイオエレクトロニクスの新たな挑戦(招待講演)», 2013年6月14日~2013年6月15日, 新潟大学(新潟県新潟市)

加藤景三, 馬場 暁, 新保一成, 金子双男: “表面プラズモン励起を利用した高効率・

高性能有機デバイス”, 有機・無機エレクトロニクスシンポジウム(招待講演), 2012年6月29日~2012年6月29日, 富山国際会議場(富山県富山市)

Kazunari Shinbo, Yasuo Ohdaira, Akira Baba, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Detections of Organic Dye Film Deposition and Gas Adsorption Using Surface Plasmon Resonance Waveguide Sensor”, Collaborative Conference on 3D & Materials Research 2012(招待講演), 2012年6月25日~2012年6月29日, ソウル(大韓民国)

Kazunari Shinbo, Yasuo Ohdaira, Akira Baba, Keizo Kato, Futao Kaneko: “Evaluation of Thin Film Deposition and Gas Detection Using Surface Plasmon Resonance and Optical Waveguide Sensors”, 7th International Symposium on Organic Molecular Electronics(招待講演), 2012年6月6日~2012年6月7日, NTT 武蔵野研究開発センタ(東京都武蔵野市)

[図書](計4件)

加藤景三, 新保一成, 馬場 暁 他, 電気学会, 新機能・高性能有機デバイス応用のためのナノ材料・構造制御, 2015年, 60頁

馬場 暁, 新保一成, 加藤景三 他, 技術情報協会, バイオセンサの先端科学技術と新製品への応用開発, 2014年, 534頁

馬場 暁, 新保一成, 加藤景三, 金子双男: プラズモンナノ材料開発の最前線と応用, シーエムシー出版, 2013年, 278頁

馬場 暁, 新保一成, 加藤景三 他, エヌ・ティ・エス, 高効率太陽電池~化合物・集光型・量子ドット型・Si・有機系・その他新材料~, 2012年, 376頁

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 景三 (KATO, Keizo)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 00194811

(2) 研究分担者

新保 一成 (SHINBO, Kazunari)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 80272855

馬場 暁 (BABA, Akira)
新潟大学・研究推進機構超域学術院・准教授
研究者番号: 80452077