

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686011

研究課題名(和文)フェムト秒レーザーによる表面ナノ加工技術の開発

研究課題名(英文)Development of surface nanoprocessing techniques with femtosecond laser pulses

研究代表者

宮地 悟代(MIYAJI, Godai)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30378905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,900,000円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒レーザーパルスを固体表面に照射することによってナノメートルサイズの周期構造体を形成・制御するための基礎研究を行い、直線性の良い最小25 nmの格子構造を均一に形成することに世界で初めて成功した。固体表面に励起された自由電子の集団運動(表面プラズモンポラリトン)と、その周囲に発生する高強度の局所場(光近接場)を制御するため、2ステップアブレーションプロセス法を開発した。

研究成果の概要(英文)：I have studied the fundamental research on the control of the nanostructure formation on solid surfaces induced with femtosecond laser pulses, resulting in the formation of homogeneous nanograting with the size of 25 nm. The simple two-step ablation process has been developed to control the surface plasmon polaritons and the intense near fields on the target surfaces with the femtosecond laser pulses.

研究分野：非線形光学、レーザー工学

キーワード：光プロセッシング フェムト秒レーザー レーザーアブレーション 表面プラズモンポラリトン 光近接場

1. 研究開始当初の背景

(1) ナノメートルオーダーの微細加工技術の開発が、次世代の先端科学と持続的な産業界発展のための基盤として位置付けられている。その要素技術の一つとして、レーザーのような伝搬光による光プロセスが注目され、活発に研究が行われているが、空間分解能は原理的に回折限界によって光の波長程度に制限されてしまう。

(2) 研究代表者が所属していた研究グループをはじめ多くの研究者が、出力を精密に制御したフェムト秒 (fs) レーザーを大気中にて固体表面に集光照射するだけで、集光スポット内部全体にレーザー波長の $1/10 \sim 1/5$ (最小 10 nm オーダー) のナノ周期構造が自己組織化的に形成されることを観測してきた。この物理現象の発見は、レーザーによるナノプロセッシング技術開発の可能性を示唆していたため、これまでに多くのグループによって物理過程の解明、及びサイズ・形状制御手法の開発が精力的に進められてきた。しかし、相転移を伴うナノ領域での電場と物質の超高速相互作用という未知領域の現象を、後続の熱プロセスから弁別して追跡できる計測手法がないこともあり、物理過程の解明が難しく課題となっていた。

(3) 研究代表者らは、誘電体 (DLC、TiN) 及び半導体 (Si、GaN 等) について各種の実験研究を行い、高強度な fs レーザーパルス照射によって表面に発生する近接場が、ナノサイズのアブレーションを誘起することを突き止めた。さらに、ナノサイズの周期構造は、表面電荷密度の増大によって過渡的に励起される局在表面プラズモンポラリトン (Surface Plasmon Polariton, SPP) による周期電場に起因することを明らかにし、実験結果が計算結果と良く一致することを報告してきた。さらに、この物理モデルを利用し、レーザー光と近接場・SPP の空間的なコヒーレント結合を制御すると、狙ったサイズのナノ構造を均一に形成することができると考えて実験を行った結果、表面研磨された GaN 基板表面に中心波長 800 nm の fs レーザーを大気中で複数パルス重ねて照射するだけで、特定の周期を持った直線性の良いナノ格子を直径数 100 μm の照射スポット全体に均一に作製すること、及び、その周期をレーザーの照射条件によって制御することに世界で初めて成功した。

(4) 多くの研究にも係わらずナノ構造生成現象の物理メカニズムの詳細は未だ理解されておらず、さらに微細な構造を制御よく形成するためにはこの物理過程の解明と新たな制御手法の開発が必要不可欠であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上述の予備実験の手法を伝搬光による初めてのナノ加工技術へと発展させ、レーザーナノプロセッシングの基盤を確立することである。

3. 研究の方法

(1) 鏡面研磨された結晶 GaN(0001)基板の表面に低エネルギー密度 (低フルーエンス) の fs レーザーパルスを複数パルス重ねて照射することにより GaN 表面にナノ構造が形成されることを観測し、そのために必要なレーザーパラメータを明らかにした。サンプル表面の形状を走査型電子顕微鏡 (SEM) および走査プローブ顕微鏡 (SPM) にて測定し、ナノ構造の形状・周期サイズを明らかにした。

(2) これまでに、低フルーエンスの fs レーザーパルスで誘電体や半導体表面に誘起されるナノ周期構造の形成過程が、fs パルス照射による近接場の生成と SPP の励起によって説明できることを報告してきた。この物理モデルを基に、入射レーザー光と近接場・SPP の空間的なコヒーレント結合を制御することによって、GaN 基板表面に直線性の良いナノ格子を均一に形成した。

(3) ナノ構造はナノ秒レーザーパルスや比較的高いフルーエンスの fs パルスでは生成されないこと等の結果から、微細構造の生成を阻害する一つの要因として、レーザー照射によってターゲット内部に発生する熱の影響を指摘してきた。しかし、複数の fs パルス照射によってアブレーションするターゲット表面の格子温度を測定した例はなかったため、高密度電子励起を伴う非熱過程がナノ構造生成にとって必須か否かは明確に理解されていなかった。ポンプ・プローブ法を用いることにより Si の反射率を時間分解計測し、複数パルス照射によるアブレーション時の表面電子密度と格子温度を測定した。

(4) 低フルーエンスの fs レーザーパルスによる 2 ステップのアブレーションプロセスを用いると、SPP の空間定在波により、GaN 基板表面に一定の周期を有する均一なナノ格子を形成できる。SPP は励起波長に大きく依存するため、短波長の fs パルスを用いると、ナノ格子の周期を小さくできると考えられる。波長 ~ 270 nm の紫外 fs パルスを用いてナノ格子の形成過程を調べた。

(5) チタンやステンレス鋼表面に単一パルスアブレーション閾値よりも低いフルーエンスの fs レーザーパルスを複数パルス照射すると、平均周期間隔が 200 \sim 400 nm のナノ周期構造生成が観測されることはすでに報告されている。不明である生成メカニズムの詳細を理解するため、2 ステップのアブレーションプロセスを利用し、ナノ格子の形成過程をレーザーの照射条件を変えて調べた。

(6) 上述の光近接場発生・SPP 励起はレーザーパルス内の電磁場振動の時間域で起こるため、ポンプ・プローブ法を用いることにより実時間で光学的に観測するためにはアト秒の時間幅を有するレーザーパルスが必須となる。高強度の fs レーザーを希ガス中に集光すると真空紫外域のアト秒パルスが発生することが知られているが、発生の詳細な物理メカニズムは未だ明らかになっていない。

い。搬送波-包絡線位相 (CEP) を制御できる 5 fs レーザーを Ne 中に集光し、発生するアト秒パルススペクトルを測定することにより、単一のアト秒パルス発生のための最適な条件と、物理メカニズムを実験的に明らかにした。

4. 研究成果

(1) GaN 表面に、大気中で垂直方向からフェムト秒レーザーを低フルーエンスで複数パルス重ねて照射することにより、自己組織化的にナノ周期構造生成することを観測した。レーザの偏光方向と垂直な方向に伸びた線状の周期構造が生成され、空間周期は $d = 150 \sim 280 \text{ nm}$ で分布していることが分かり、GaN 表面にもフェムト秒レーザーによって波長の $1/5$ 程度に達するナノ構造体を形成できることを実証した。

(2) フェムト秒レーザーアブレーションにおいて、図 1(a)に示すような入射レーザ光と近接場・SPP の空間的なコヒーレント結合を制御できる簡便な 2 ステップのアブレーションプロセスを提案した。

(3) 上述の 2 ステッププロセスにおいて、まず、第 1 ステップとして、GaN 表面を 2 ビームによる干渉縞でアブレーションさせた。一方をターゲットに垂直に (Beam1)、もう一方を入射角 θ で入射し (Beam2)、空間的・時間的に 2 つのビームを重ねた。これにより、図 1(b)に示すように、GaN 表面に $\Lambda = 937 \text{ nm}$ 、

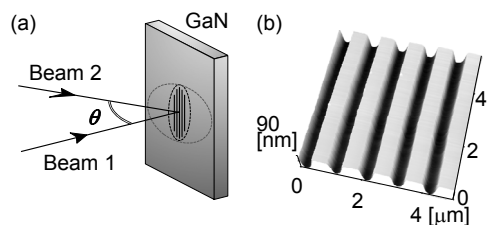


図 1. (a)2 ステップアブレーションプロセスの概要図、(b)第 1 ステップにより GaN 表面に形成した干渉パターン。

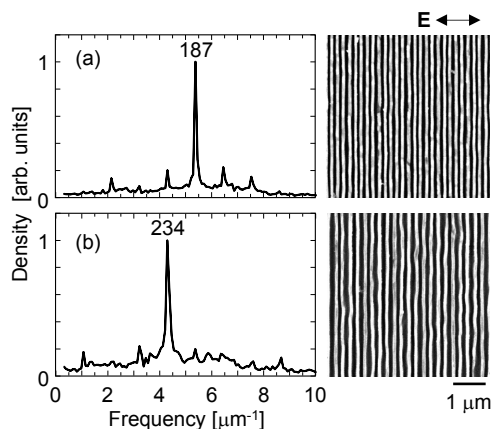


図 2. 第 2 ステップにより GaN 表面に形成したナノ格子。(a)Beam1 のフルーエンス $F = 400 \text{ mJ/cm}^2$ 、(b) $F = 480 \text{ mJ/cm}^2$ 。

深さ 75 nm の均一な干渉パターンを形成した。第 2 ステップでは、Beam2 を遮断し、この干渉パターンを形成した表面に Beam1 のみを複数パルス照射し、図 2 に示すようなナノ格子を生成した。ここで、注目すべきこととして、ナノ格子の周期 d は q を整数として $d \sim \Lambda/q$ の周波数成分が存在していることが分かった。以上の結果により、近接場・SPP を空間制御することによって半導体表面をナノ加工できることを実証した。

(4) GaN 表面に自己組織的に生成されるナノ構造の周期 d は、レーザーフルーエンス F によって変化する。第 2 ステップで高い F の Beam1 を照射したとき、図 2(b)に示すように、ナノ格子の周期が変化することを観測した。このことにより、 F によってナノ格子のサイズを nm オーダーで精密に制御できることを示した。

(5) ナノ格子の形状を詳しく調べるため、走査透過型電子顕微鏡 (STEM) で断面を観察したところ、図 3(a)に示すように、周期構造を構成する突起の高さは、 $h = 530 \sim 730 \text{ nm}$ であることが分かった。さらに、 h は均一ではないが、突起間の底部は均一にアブレーションしており、全ての水平位置が揃っていることが分かった。これにより、均一かつ高い強度を有する局所場が周期的に発生し、突起間の底部を一様にアブレーションしていることを示した。

(6) 形成したナノ格子を構成する突起の中央部及び突起間の底部で観測した電子回折像を測定したところ、結晶性と方位が GaN 基板と一致していることが分かり、本手法によるナノ格子生成では GaN の結晶性と方位を保ったままナノ加工できることを示した。

(7) 以上の結果により、GaN 表面にフェムト秒レーザーアブレーションにより形成されるナノ周期構造体の主要な形成メカニズムが近接場・SPP の発生であることが示されたため、さらに微細化を試みた。SPP は励起波

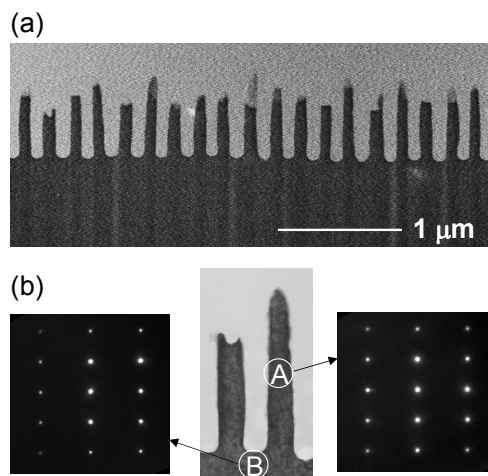


図 3. (a) STEM によるナノ格子の断面画像。暗い部分が GaN を示している。(b) ナノ構造体を拡大した STEM 画像と電子回折パターン。

長に大きく依存することがよく知られているため、短波長の fs パルスを用いると、ナノ格子の周期を小さくできると考えて実験を行った。これにより、GaN 表面に Line/Space が 25 nm の均一なナノ格子を作製することに成功した。

(8) 金属ではナノ構造生成の主要なメカニズムが不明であったため、チタンおよびステンレス鋼表面に 2 ステップアブレーションプロセスを用いることにより、ナノ格子生成を試みた。実験結果と計算により、いずれの表面にも単一空間モードの SPP が励起され、その周期近接場によるアブレーションでナノ格子が誘起されることを示した。さらに、表面が粗い物質に対しては、表面凹凸による近接場・SPP の空間制御ではなく、光の空間変調を利用すればナノ格子が形成されることを示した。

(9) ポンプ・プローブ法により、複数の fs レーザーパルスでアブレーションする Si 表面の過渡的な反射率変化を観測し、Si 表面の励起自由電子密度と格子温度を評価した。得られた結果より、微細な表面ナノ構造生成には、低フルエンスの fs パルスによって非熱的に（表面が熱溶解されずに）誘起されるアブレーション過程が必須であることを明らかにした。

(10) レーザー光を気体原子に照射したときに生じる高次高調波発生の物理過程の詳細を理解するため、CEP を制御可能な高強度 5 fs レーザーパルスを用いて、CEP に依存した特徴的な高次高調波スペクトルを観測した。得られた実験結果と簡単なモデル計算の結果を比較することにより、高次高調波のスペクトルが CEP で大きく変化するのは、搬送波の半周期ごとに発生するアト秒パルスの数が少なく、それらの位相差が CEP で大きく変化することに起因することを示した。また得られた高次高調波スペクトルを逆フーリエ変換することにより、フーリエ限界パルス幅が ~110 as のほぼ単一のアト秒パルスが発生していることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 10 件)

- ① 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザーアブレーションによる表面ナノ格子の作製, レーザ加工学会誌, 21, 74-79 (2014), 査読有.
- ② T.Shinonaga, M.Tsukamoto, and G.Miyaji, Periodic nanostructures on titanium dioxide film produced using femtosecond laser with wavelengths of 388 nm and 775 nm, Opt. Express, 22, 14696-14704 (2014), DOI: 10.1364/OE.22.014696, 査読有.
- ③ K.Miyazaki and G.Miyaji, Mechanism and control of periodic surface nanostructure formation with femtosecond laser pulses, App.

Phys. A, 114, 177-185 (2013), DOI: 10.1007/s00339-013-8130-4, 査読有.

- ④ G.Miyaji and K.Miyazaki, Ultrafast Dynamic Processes for Periodic Surface Nanostructure Formation Induced with Femtosecond Laser Pulses, Rev. Laser Eng.(Jpn), 41, 816-820 (2013), 査読有.
- ⑤ K.Miyazaki and G.Miyaji, Nanograting formation through surface plasmon fields induced by femtosecond laser pulses, J. Appl. Phys., 114, 153108-1/6 (2013), DOI: 10.1063/1.4826078, 査読有.
- ⑥ G.Miyaji and K.Miyazaki, Role of multiple shots of femtosecond laser pulses in periodic surface nanoablation, Appl. Phys. Lett., 103, 071910-1/4 (2013), DOI: 10.1063/1.4818818, 査読有.
- ⑦ K.Miyazaki and G.Miyaji, Periodic nanostructure formation on silicon irradiated with multiple low-fluence femtosecond laser pulses in water, Physics Procedia, 39, 674-682 (2012), DOI: j.phpro.2012.10.088, 査読有.
- ⑧ G.Miyaji, K.Miyazaki, K.Zhang, T.Yoshifuji, and J.Fujita, Mechanism of femtosecond-laser-induced periodic nanostructure formation on crystalline silicon surface immersed in water, Opt. Express, 20, 14848-14856 (2012), DOI: 10.1364/OE.20.014848, 査読有.
- ⑨ G.Miyaji, K.Zhang, J.Fujita, and K.Miyazaki, Nanostructuring of Silicon Surfaces with Femtosecond-Laser-Induced Near-field, J. Laser Micro/Nanoengineering, 7, 198-201 (2012), DOI: 10.2961/jlmn.2012.02.0012, 査読有.
- ⑩ G.Miyaji and K.Miyazaki, Nanograting fabricated with femtosecond laser pulses, SPIE Newsroom (2012), DOI: 10.1117/2.1201210.004516, 査読有.

〔学会発表〕 (計 34 件)

- ① (招待講演) 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザーの非熱的相互作用による Si 表面でのナノ周期構造形成, 第 82 回レーザー加・学会講演会 (東京都・産業技術総合研究所 臨海副都心センター, 2015 年 1 月 14 日).
- ② (招待講演) 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザー誘起表面ナノ周期構造生成の超高速ダイナミクス, レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会 (東京都・東海大学高輪校舎, 2015 年 1 月 11 日).
- ③ K.Miyazaki, G.Miyaji, and T.Inoue, Controlling Periodic Nanostructure Formation on Metal Surfaces with Femtosecond Laser Pulses, ICPEPA-9 (島根県松江市・くにびきメッセ, 2014 年 10 月 1 日).
- ④ G.Miyaji and K.Miyazaki, Fabrication of Nanograting with Plasmonic Near-field

- induced by Ultraviolet Femtosecond Laser Pulses, *ICPEA-9* (島根県松江市・くにびきメッセ, 2014年9月30日).
- ⑤ G.Miyaji, M.Kimura, T.Noguchi, K.Miyazaki, and K.Matsuda, Attosecond Pulse Generation with Carrier-Envelope Phase Stabilized Few-Cycle Laser Pulses, *The 5th International Symposium of Advanced Energy Science* (京都府宇治市・京都大学宇治キャンパス, 2014年9月29日).
 - ⑥ 宮地悟代, 井上俊茂, 宮崎 健創, フェムト秒レーザー誘起表面プラズモンポラリトンによる金属表面のナノ格子形成, 第75回応用物理学会秋季学術講演会(北海道札幌市・北海道大学, 2014年9月17日).
 - ⑦ 宮崎健創, 宮地悟代, フェムト秒レーザーアブレーションによるナノ格子創製, LSJ第465回研究会「レーザー応用」&九州支部学生講演会(鹿児島県指宿市・休暇村指宿, 2014年9月8日).
 - ⑧ 宮地悟代, 宮崎健創, CEP制御サイクルレーザーパルスによるアト秒パルス発生, LSJ第465回研究会「レーザー応用」&九州支部学生講演会(鹿児島県指宿市・休暇村指宿, 2014年9月8日).
 - ⑨ G.Miyaji and K.Miyazaki, Nanograting Formation with Ultraviolet Femtosecond Laser Ablation, *LAMP2014* (Vilnius, Lithuania, 2014年6月20日).
 - ⑩ K.Miyazaki, G.Miyaji, and T.Inoue, Mechanism of Femtosecond-Laser-Induced Periodic Nanostructure Formation on Metal Surface, *LAMP2014* (Vilnius, Lithuania, 2014年6月19日).
 - ⑪ (招待講演) 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザー誘起表面プラズモンポラリトンによるナノ格子生成, レーザー学会学術講演会第34回年次大会(福岡県北九州市・北九州国際会議場, 2014年1月22日).
 - ⑫ (優秀論文発表賞) 井上俊茂, 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザーアブレーションによる金属表面のナノ格子形成過程, レーザー学会学術講演会第34回年次大会(福岡県北九州市・北九州国際会議場, 2014年1月22日).
 - ⑬ 木村 誠, 宮地悟代, 宮崎 健創, フェムト秒レーザーアブレーションによる金属表面のナノ格子形成過程, レーザー学会学術講演会第34回年次大会(福岡県北九州市・北九州国際会議場, 2014年1月20日).
 - ⑭ (招待講演) 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザーアブレーションによる GaN 表面のナノ格子生成, 第80回レーザー加・学会講演会(東京都・東京大学生産研, 2013年12月5日).
 - ⑮ (優秀賞) 森川健二, 三宅正男, 宮地悟代, 宮崎健創, 平藤哲司, ナノインプリントを利用した三次元周期構造の作製, 日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部 材料化学研究会・鉄鋼プロセス研究会 平成25年度第2回講演会(大阪府吹田市・関西大学, 2013年11月28日).
 - ⑯ (注目論文) 宮地悟代, 宮崎健創, 紫外フェムト秒レーザーアブレーションによるナノ格子形成, 第74回応用物理学会秋季学術講演会(京都府京田辺市・同志社大学, 2013年9月17日).
 - ⑰ 井上俊茂, 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザーアブレーションによるステンレス鋼表面のナノ格子形成過程, 第74回応用物理学会秋季学術講演会(京都府京田辺市・同志社大学, 2013年9月17日).
 - ⑱ 木村誠, 宮地悟代, 野口恭史, 宮崎健創, CEP安定化5 fsレーザーパルスによる高次高調波発生, 第74回応用物理学会秋季学術講演会(京都府京田辺市・同志社大学, 2013年9月20日).
 - ⑲ K.Miyazaki and G.Miyaji, Direct Patterning of a Nanograting with Femtosecond Laser Pulses, *PIERS2013* (Stockholm, Sweden, 2013年8月15日).
 - ⑳ G.Miyaji and K.Miyazaki, Role of Multiple Shots of Low-fluence Pulses in Femtosecond-laser-induced Periodic Surface Nanostructure Formation, *PIERS2013* (Stockholm, Sweden, 2013年8月15日).
 - ㉑ K.Miyazaki and G.Miyaji, Imprinting of Nanogratings with Femtosecond-Laser-Induced Surface Plasmon Polaritons, *LAMP2013* (新潟市・朱鷺メッセ, 2013年7月25日).
 - ㉒ G.Miyaji and K.Miyazaki, Effect of Multiple Shots of Femtosecond Laser Pulses on Periodic Surface Nanostructuring, *LAMP2013* (新潟市・朱鷺メッセ, 2013年7月25日).
 - ㉓ K.Miyazaki and G.Miyaji, Imprinting of a Homogeneous Nanograting with Femtosecond Laser Ablation, *CLEO-PR 2013* (京都市・京都国際会議場, 2013年7月2日).
 - ㉔ G.Miyaji and K.Miyazaki, Effect of Superimposed Multiple Shots of Femtosecond Laser Pulses on Periodic Surface Nanoablation, *CLEO-PR 2013* (京都市・京都国際会議場, 2013年7月3日).
 - ㉕ K.Miyazaki and G.Miyaji, Patterning of a homogeneous periodic nanostructure with femtosecond laser pulses, *International Symposium on Nanoscale Pattern Formation at Surfaces* (Copenhagen, Denmark, 2013年5月27日).
 - ㉖ K.Miyazaki and G.Miyaji, Nanograting Imprinted with Femtosecond-Laser-Induced Plasmonic Near-Field, *CLEO Europe-EQEC 2013* (Munich, Germany, 2013年5月15日).
 - ㉗ G.Miyaji and K.Miyazaki, Role of Multiple Shots of Femtosecond Laser Pulses in Periodic Nanostructure Formation on Silicon Surface, *CLEO Europe-EQEC 2013* (Munich,

- Germany, 2013 年 5 月 15 日).
- ⑳ 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザーアブレーションによる GaN 表面のナノ格子形成過程, 第 60 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川県厚木市・神奈川県工科大学, 2013 年 3 月 29 日).
 - ㉑ (招待講演) K.Miyazaki and G.Miyaji, Periodic nanostructures formed on silicon surface with femtosecond laser pulses, *LANE 2012* (Stadthalle Fürth, Germany, 2012 年 11 月 15 日).
 - ㉒ (招待講演) K.Miyazaki and G.Miyaji, Ultrafast Dynamics of Periodic Nano-pattern Formation with Femtosecond Laser Pulses, *IUMRS-ICEM 2012* (神奈川県横浜市・パシフィコ横浜, 2012 年 9 月 23 日).
 - ㉓ 宮地悟代, 宮崎健創, フェムト秒レーザーによる GaN 表面のナノ格子生成, 第 73 回応用物理学学会学術講演会 (愛媛県松山市・愛媛大学, 2012 年 9 月 12 日).
 - ㉔ K.Miyazaki and G.Miyaji, Periodic Nanopattern Formation on Si with Femtosecond-Laser-Induced Surface Plasmon Polaritons, *The 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication* (Washington DC, USA, 2012 年 6 月 15 日).
 - ㉕ G.Miyaji and K.Miyazaki, Fabrication of Nanograting on GaN Surface with Femtosecond Laser Ablation, *The 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication* (Washington DC, USA, 2012 年 6 月 15 日).
 - ㉖ N.Yasumaru, E.Sentoku, K.Miyazaki,

G.Miyaji, and J.Kiuchi, Femtosecond-laser-induced Nanostructure Formed on Stainless Steel, *The 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication* (Washington DC, USA, 2012 年 6 月 14 日).

〔その他〕

ホームページ :

http://www.tenure-track-tuat.org/scholar/technology/post_41.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮地 悟代 (MIYAJI, Godai)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号 : 30378905

(2) 研究協力者

宮崎 健創 (MIYAZAKI, Kenzo)
京都大学・名誉教授
研究者番号 : 50293957

安丸 尚樹 (YASUMARU, Naoki)
福井工業高等専門学校機械工学科・教授
研究者番号 : 90158006

Alexander E. Kaplan
ジョンズホプキンス大学・教授

Jürgen Reif
ブランデンブルグ工科大学・教授