

令和元年6月11日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14111

研究課題名(和文) SiC基板へのフェムト秒レーザー誘起周期構造の形成ダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Understanding of formation dynamics of femtosecond-laser-induced periodic structures on SiC substrate

研究代表者

宮川 鈴衣奈 (Miyagawa, Reina)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10635197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒レーザーを結晶材料に照射することで、レーザーの波長より短い周期の周期構造が形成される。レーザーが被照射材料に与える影響を詳細に調べることで、光吸収と周期構造形成のダイナミクス理解に取り組んだ。結果、周期構造形成には多重パルス積重が必要であり、その周期はパルスの積重によって変化することを示した。また、その周期は被照射材料によって異なることに加え、形状が同様でも結晶状態は材料によって異なることを明らかにした。さらに、この周期構造の量子デバイスへの応用を試み、さらなる細線化のため結晶異方性エッチングを行ったところ、結晶質を維持したまま狭小化し、形状制御の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フェムト秒レーザー誘起周期構造の形成メカニズムについて、近年活発な議論がなされているが、その結晶状態については調べられていなかった。本研究で明らかにした、被照射材料に依る結晶状態の違いは、光と結晶との相互作用を理解する上で重要な知見になると考える。また、形状と結晶状態を制御することで、その特性を活かした表面創成による機能的応用と、フェムト秒レーザーの応用拡大に繋げていく。

研究成果の概要(英文)：Femtosecond-laser-induced periodic structures have less periodicity than the wavelength of the incident laser. In this study, I attempted to clarify the dynamics of the formation of the periodic structures.

The periodic structures were formed by superimposed pulses, and the periodicity changed with the pulse number. The periodicity and the crystallinity depended on the irradiated material. For the application as quantum devices, anisotropic wet etching was also effective to narrow the width in 1/4 and keep the structures crystalline.

研究分野：結晶工学

キーワード：フェムト秒レーザー ナノ周期構造 結晶

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒レーザーは、格子振動の周期（数ピコ秒）より短いパルス幅のため、材料への熱的ダメージを極力抑えられること、非線形効果が発現することなどから、透明材料へのレーザー加工やレーザーダイシングなどに応用されている。フェムト秒レーザーを半導体や金属に照射することで、照射したレーザーの波長より短い周期の周期構造が形成されることが知られている。この周期構造は、表面プラズモンポラリトン効果やパラメトリック崩壊過程などの材料表面でのプラズマ状態変化が寄与していることが示されているが、詳細のダイナミクス解明は今も継続的な課題である。

申請者は、高周波パワーデバイスなどへの応用に有用な SiC 基板の表面機能化を目指し、SiC 基板表面へのフェムト秒レーザー誘起周期構造の形成に取り組んできた。多重レーザーパルス照射により周期構造を形成し、パルス積重の少ない場合には波長と同程度か波長よりやや短い周期の周期構造を、パルス積重が多くなると波長より十分短い周期の構造を形成することを示した（図 1）。しかしながら、形成される構造の周期や結晶状態が変化する過程の詳細は明らかになっていないのが現状である。このダイナミクスを把握することで、フェムト秒レベルでの光と物質との相互作用を理解できる。すなわち、光エネルギーによる材料の表面状態の変化を理解する。これは、新たな物理の解明となると同時に、材料表面の機能化やフェムト秒レーザーの応用の幅を広げることに繋がる。

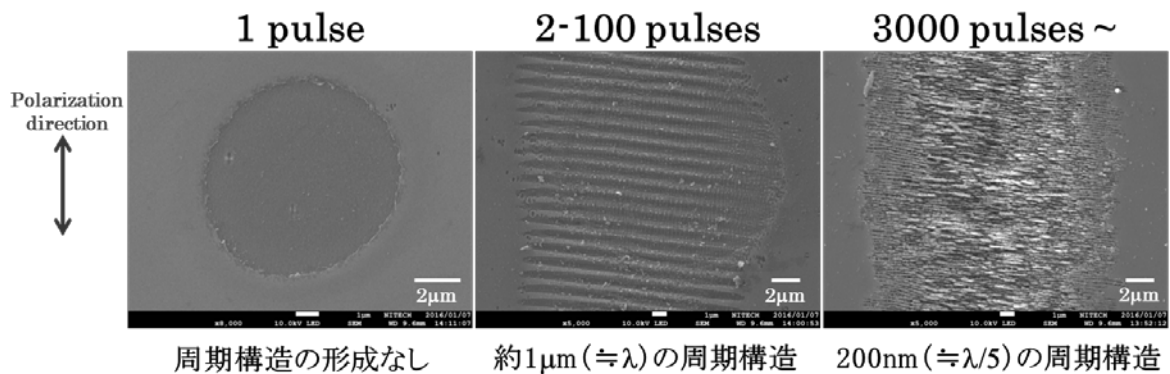


図 1. 照射パルス数変化に伴うレーザー誘起構造の周期変化

2. 研究の目的

格子振動より短い時間での光と物質との相互作用を電子レベルで理解し、機能的に応用することを本研究の目的とする。

具体的には、以下の 3 課題の達成を目指す。

- (1) フェムト秒レーザー誘起周期構造の形成ダイナミクスの理解
- (2) 実験的評価と理論的考察でレーザー光と材料の相互作用を理解
- (3) 新たな機能を発現する表面の創成

材料表面での電子状態や極性状態を考慮した変化を、レーザーのパルス数や繰り返し周波数を制御できるシステムを構築することで明らかにする。

3. 研究の方法

光と物質との相互作用を理解することを本研究の目的とし、以下の研究に取り組む。

- (1) フェムト秒レーザー誘起周期構造の形成ダイナミクスの理解

レーザーのパルス数や繰り返し周波数を制御する光学システムを構築し、レーザーが被照射材料に与える影響を詳細に調べることで、光吸収と周期構造形成のダイナミクスを理解する。

- (2) 実験的評価と理論的考察でレーザー光と材料の相互作用を理解

レーザー照射による被照射材料の変化を、透過型電子顕微鏡 (TEM) などの高感度分析手法により把握し、材料と光の相互作用を理解する。また、光の電界分布を理論的に検討することで、形成ダイナミクスを理解する。

- (3) 新たな機能を発現する表面の創成

レーザー照射部やレーザー誘起周期構造形成部における表面状態の変化を (2) で詳細に調べることで、表面状態の自在な制御を実現し、その特性を活かした表面創成により機能的な応用を目指す。

4. 研究成果

(1) フェムト秒レーザー誘起周期構造の形成ダイナミクスの理解

現有のフェムト秒レーザー発振器 (IMRA AMERICA 社製 D-10K: 波長 1045nm, パルス幅 450fs, 繰り返し周波数 100k-1000kHz) に、外部制御によりパルスを制御するシステムを構築した。

図2に、同一箇所積重されるレーザー光を変化させて照射した Si 基板の表面 SEM 像を示す。(a)ショットの重なりが無い場合には、周期構造は形成せずにビーム形状の円形にアブレーションされたのに対し、(b)-(d)照射領域の一部でも重なって照射される場合には、約 1 μ m 周期の構造を形成した。また、積重の領域が広がるとアモルファスのマイクロ構造を形成した。これより、パルスの一部でも積重している場合にはアブレーション領域を超えて電場の分布が発生していることが分かった。

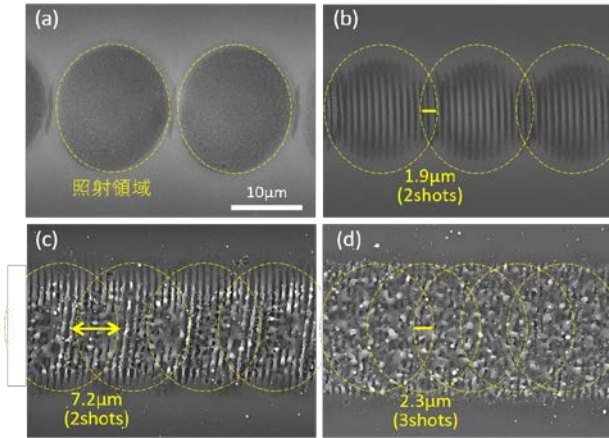


図2. パルス積重を変えて照射した Si 表面 SEM 像 (a)パルスの重なりなし、(b)1.9 μ mの2shots重なり、(c)7.2 μ mの2shots重なり、(d)2.3 μ mの3shots重なり

(2) 実験的評価と理論的考察でレーザー光と材料の相互作用を理解

被照射材料による違いを調べるため、各材料 (SiC、GaN、Sapphire、Si、GaAs) に形成したレーザー誘起周期構造の周期と結晶状態を図3にまとめた。形成される周期構造の周期は被照射材料によって異なることはこれまでも示されていたが、形状が同様でも結晶状態は材料によって異なることを明らかにした。SiC では基板と同品質の結晶性を維持しているのに対し、GaN や Sapphire では局所的に結晶の配向乱れが発生し、Si や GaAs では構造一部が多結晶化していることが分かる。周期構造を形成するレーザーの条件も異なるため直接的な比較は難しいが、今後これらの結晶状態はどの材料物性に起因しているのかを理論的考察と併せて明らかにすることで、構造形成の自在制御に繋げていく。

	SiC	GaN	Sapphire	Si	GaAs
	0.5W, 1000kHz	0.1W, 100kHz	4W, 1000kHz	0.075W, 100kHz	0.2W, 100kHz
TEM					
モデル					
周期	200 nm	200-250 nm	200-300 nm	650 nm	60, 450, 700nm

図3. 各材料に形成した周期構造の周期と結晶状態

(3) 新たな機能を発現する表面の創成

光・電子デバイスにナノ構造を形成することで、量子サイズ効果により新たな特性を付与できる。光デバイスでは、発光波長シフトや発光効率向上が知られている。本研究では、ナノ構造形成手法としてLIPSSを応用させた。本手法は、図4に示すようにナノ構造をトップダウン式で形成できる。また、窒化物半導体系LED構造では、KOHによる異方性エ

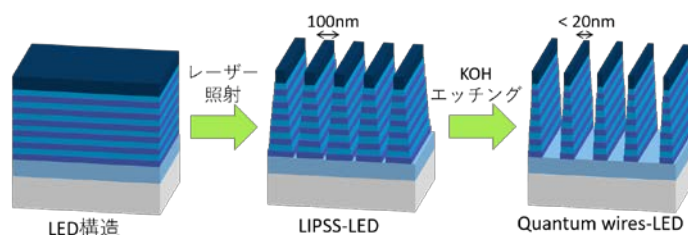


図4. ナノ周期構造の光デバイスへの応用

ッチングを利用した細線化を試みた。結果、レーザー照射により、元の積層膜の結晶性を維持したまま約 75nm 幅の LIPSS を形成し、さらに KOH エッチングによりその幅は約 18nm に細線化した。詳細な光学特性評価と構造の最適化は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Reina Miyagawa and Osamu Eryu, “Formation of femtosecond laser-induced periodic nanostructures on GaN”、Japanese Journal of Applied Physics、Vol. 58、2019、SCCB01、査読有
DOI:10.7567/1347-4065/ab06ac
2. Reina Miyagawa、Yutaka Ohno、Momoko Deura、Ichiro Yonenaga and Osamu Eryu, “Characterization of femtosecond-laser-induced periodic structures on SiC substrates”、Japanese Journal of Applied Physics、Vol. 57、2018、025602、査読有
DOI:10.7567/JJAP.57.025602
3. Reina Miyagawa、Kenzo Goto and Osamu Eryu, “Femtosecond-laser irradiation onto sapphire substrates in N₂ ambient atmosphere”、Phys. Status Solidi (C)、Vol. 14、2017、1700224、査読有
DOI: 10.1002/pssc.201700224

[学会発表] (計 23 件)

1. Reina Miyagawa 他、Dependence of pulse-width and pulse-number on LIPSS formation by ultra-short pulse laser irradiation、The 7th Laser Ignition and Giant-microphtonics Conference 2019 (LIC2019)、2019
2. 宮川 鈴衣奈 他、超短パルスレーザー照射による LIPSS 形成のパルス幅依存性、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、2019
3. 宮川 鈴衣奈 他、GaAs 基板に形成する LIPSS 周期のレーザースキャン速度依存性、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、2019
4. 宮川 鈴衣奈 他、薄膜堆積によるサファイア基板の LIPSS 周期制御、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、2019
5. (招待講演) 宮川 鈴衣奈 他、フェムト秒レーザー誘起周期構造形成及びその結晶性評価、第 90 回レーザ加工学会講演会、2018
6. 宮川 鈴衣奈 他、サファイアへの薄膜形成による LIPSS の周期制御、第 1 回結晶工学& ISYSE 合同研究会、2018
7. 宮川 鈴衣奈 他、GaN に形成したレーザー誘起周期構造の形状制御、第 1 回結晶工学& ISYSE 合同研究会、2018
8. 宮川 鈴衣奈 他、短パルスレーザー照射によるナノ周期構造のパルス幅依存性、第 1 回結晶工学& ISYSE 合同研究会、2018
9. Reina Miyagawa 他、Formation of femtosecond laser induced periodic nanostructures on GaN、International Workshop on Nitride semiconductors (IWN) 2018、2018
10. Reina Miyagawa 他、Formation and narrowing of femtosecond-laser-induced periodic structures、37th Elec. Mater. Symp.、2018
11. 宮川 鈴衣奈 他、ワイドギャップ半導体材料へのレーザー誘起ナノ周期構造の形成、第 110 回研究会・特別公開シンポジウム (日本学術振興会 ワイドギャップ半導体・電子デバイス 第 162 委員会)、2018
12. 宮川 鈴衣奈 他、GaN 基板に形成したフェムト秒レーザー誘起周期構造の結晶評価、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、2018
13. Reina Miyagawa 他、Stress evaluation of femtosecond-laser-irradiated GaN、European Conference on SiC and related materials (ECSCRM) 2018、2018
14. 宮川 鈴衣奈 他、GaN へのフェムト秒レーザー誘起周期構造の形成と形状制御、第 10 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会、2018
15. 宮川 鈴衣奈 他、サファイア基板へのフェムト秒レーザー誘起周期構造の形成と結晶評価、第 10 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会、2018
16. 宮川 鈴衣奈 他、GaN へのフェムト秒レーザー照射における応力の評価、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018
17. Reina Miyagawa 他、Characterization of femtosecond-laser-induced periodic structures on SiC substrates、36th Elec. Mater. Symp.、2018
18. Reina Miyagawa 他、Fine periodic structures formed by femtosecond-laser irradiation onto sapphire substrate、36th Elec. Mater. Symp.、2017
19. 宮川 鈴衣奈 他、フェムト秒レーザーによるサファイア基板への構造形成、先進パワー半導体分科会第 4 回講演会、2017
20. Reina Miyagawa 他、TEM observation of femtosecond-laser-induced periodic structures on SiC substrates、2017 International Conference on Silicon Carbide and

Related Materials (ICSCRM)、2017

21. Reina Miyagawa 他、Femtosecond-laser irradiation onto sapphire substrates in N₂ ambient、The 12th International Conference on Nitride Semiconductors、2017
22. 宮川 鈴衣奈 他、窒素雰囲気中でのサファイアへのフェムト秒レーザー照射、第2回材料科学フロンティア研究院シンポジウム、2017
23. 宮川 鈴衣奈 他、フェムト秒レーザー誘起周期構造の結晶性評価、第9回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会、2017

[その他]

ホームページ：http://researcher.nitech.ac.jp/html/100000244_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：江龍 修

ローマ字氏名：(ERYU, Osamu)

研究協力者氏名：大野 裕

ローマ字氏名：(OHNO, Yutaka)

研究協力者氏名：三宅 秀人

ローマ字氏名：(MIYAKE, Hideto)

研究協力者氏名：平等 拓範

ローマ字氏名：(TAIRA, Takunori)

研究協力者氏名：Peter Wellmann

ローマ字氏名：(WELLMANN, Peter)