

各種半導体の中赤外 FEL 照射による微細 LIPSS 形成条件

～微細 LIPSS 形成閾値と融解閾値～

Conditions for fine LIPSS formation induced with mid-infrared FEL for semiconductors

- Thresholds of LIPSS formation and melting -

○(M1)田中 陽平¹, (M2)細川 誓¹, 橋田 昌樹^{1,2}, 全 炳俊³, 長島 健⁴,尾崎 典雅⁵, 井上 峻介^{1,2}, 阪部 周二^{1,2}京都大学大学院理学研究科¹, 京都大学化学研究所², 京都大学エネルギー理工学研究所³,摂南大学⁴, 大阪大学工学研究科⁵°Yohei Tanaka¹, Chikai Hosokawa¹, Masaki Hashida^{1,2}, Heishun Zen³, Takeshi Nagashima⁴,Norimasa Ozaki⁵, Shunsuke Inoue^{1,2}, Shuji Sakabe^{1,2}GSS, Kyoto Univ.¹, ICR, Kyoto Univ.², IAE, Kyoto Univ.³, ICR, Setsunan Univ.⁴, GSE, Osaka Univ.⁵

E-mail: ytanaka@laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

アブレーション閾値近傍のフルーエンスで短パルスレーザーを複数回照射することにより、レーザーの波長 λ よりも小さな周期間隔 Λ を持つ微細周期構造 (LIPSS) が材料表面に自己形成されることが知られている⁽¹⁾。特に、 $\Lambda \ll \lambda$ であるような LIPSS は微細 LIPSS と呼ばれ、レーザー光の回折限界よりも微細な加工の手法として注目されているが、その形成機構はいまだに明らかにされていない。

本研究では LIPSS 形成過程のその場観察を最終目標としている。今回はその予備実験として、可視光レーザーでプローブ可能な周期間隔の LIPSS を形成するため、中赤外の自由電子レーザー (FEL) を使用した実験を行った。

2. 実験

光源として、京都大学エネルギー理工学研究所の KU-FEL を使用した。KU-FEL のパルスは 2Hz で繰り返されるパルス幅 2 μ s (FWHM) のマクロパルス中に、2,856MHz で繰り返されるパルス幅 500fs (FWHM) のマイクロパルスが含まれ、エネルギーの安定度は約 10% である⁽²⁾。ピーク波長 λ_{FEL} を 11.4 μ m とし、ビーム径 14mm (FW σ^2 M) のビームを焦点距離 50mm の ZnSe レンズで 72 μ m (FW σ^2 M) に集光し、標的に入射角度 0°で照射した。1 マクロパルスあたりの照射エネルギー E_{macro} は 10 μ J~2mJ、照射マクロパルス数 N_{macro} は 1~200 回の範囲で変化させた。標的として、事前の FEL 照射実験で LIPSS が形成できた Si と

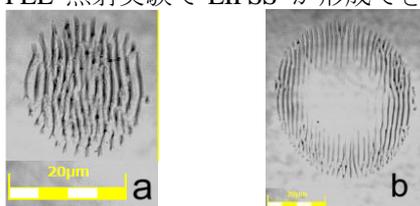


図 1 Si 表面に形成された LIPSS ($N_{\text{macro}}=1$ pulse) 照射エネルギーは $E_{\text{macro}}=237\mu\text{J}$ (a), $E_{\text{macro}}=323\mu\text{J}$ (b)

表 1 LIPSS が形成された半導体における LIPSS 形成/融解閾値とバンドギャップ、融点、熱伝導率

材料	Ge	Si	SiC-4H
LIPSS 形成閾値 F_{LIPSS} [J/cm ²]	6.9	12.2	24.6
融解閾値 F_{melt} [J/cm ²]	7.8	12.8	<56
バンドギャップ [eV]	0.66	1.1	3.2
融点 [K]	1,210	1,683	3,003
熱伝導率 [W/(m·K)]	60	150	500

比較するため、今回は 8 種類の半導体を使用した。

3. 結果

照射した材料のうち、Ge, Si, SiC-4H に LIPSS が形成された。LIPSS の方向は FEL の偏光方向と平行であったが、SiC-4H での実験において照射エネルギーが融解閾値 F_{melt} よりも十分大きいと考えられる場合、偏光と垂直な方向に $\Lambda \sim \lambda_{\text{FEL}}$ の LIPSS が形成された。

非熱的な過程と考えられているアブレーションの閾値⁽³⁾と同様に、LIPSS 形成閾値 F_{LIPSS} はバンドギャップと相関があることがわかった。また、複数の材料における LIPSS 形成の可否を比較した結果、LIPSS が形成されるためには、材料固有の F_{LIPSS} と F_{melt} が $F_{\text{LIPSS}} < F_{\text{melt}}$ を満たす必要があることがわかった。

参考文献

- 1) M. Hashida, et al, J. Laser Micro/Nano Eng., 9 (2014) 234-237
- 2) H. Zen et al, International Particle Accelerator Conference, Dresden, Germany, TUPRI077, pp.1745-1747 (2014)
- 3) L. Gallais et al, Appl. Opt. 53(2014) A186-A196.

謝辞

本研究の一部は、H30-R1 年度文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118070187、京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッションエネルギー研究拠点 (課題番号 ZE31B-27)、天田財団重点研究開発助成 (課題番号 AF-2018203-A3)、NIFS 共同研究 (NIFS17KNTS053) の研究助成により行われた。