

## ニオブ酸リチウムへのレーザアブレーション加工における 加工品質の向上に関する研究

茨城大 ○高濱 到, 茨城大 ◎周 立波, 清水 淳, 小貫 哲平, 尾嵩 裕隆

### 要旨

圧電・焦電など多機能性と、脆性を特徴とする LiNbO<sub>3</sub> 単結晶へのレーザ微細加工における、高品位加工面を得る加工条件の物理的要因について調べた。ピコ秒超短パルスレーザを用いて、雰囲気、パルスエネルギー密度、照射回数、時間間隔、スポット内ビーム強度分布などをパラメータとして、顕微鏡観測で加工面評価（無損傷、欠け、熔融）を行い、発熱を抑え、かつ放熱を促すなど温度変化を抑えることの重要性を定量的に明示した。

### 1. 緒言

ニオブ酸リチウム（化学式 LiNbO<sub>3</sub>、以下 LN）は代表的な強誘電体（反転可能な自発分極を持つ）材料の一つであり、圧電性、焦電性、光学異方性、光学的非線形性、など特異な性質をもつ材料である。その多機能性から、最近ではセンサ用共振器や微量流体のアクチュエータなど MEMS 構成材料としての応用も期待され<sup>1)</sup>、単結晶 LN 材も単純なスラブ状の形態ではなく、表面微細構造や微細立体構造を成形したり、組立・接合したりする製造技術が求められている。被加工材としての観点から LN を見ると、脆く割れやすいため取り扱いが難しい。衝撃発生を抑えたソフトな微細加工法として、当研究室ではこれまで超短パルスレーザを用いたレーザアブレーション加工における照射条件と加工面品位の関係を調べてきた<sup>2)</sup>。その中で、パルスエネルギー密度とパルス照射数を条件として、欠け、ひびや熔融隆起などのない高品位加工面が得られることを明らかにしてきた。本研究では、パルス時間間隔、焦点ビームプロファイル、雰囲気加工面品位に与える影響について調べ、それら照射条件と加工面品位との間の物理的関係を結びつける要素について考察した。

### 2. 加工原理

過去の研究を基にした超短パルスレーザによる LN 微細加工の機構モデルを示す。LN のフェルミレベル近傍の電子エネルギーバンド構造は、図 1 のような O-Nb 間の共有結合性結合による間接遷移型の半導体で、禁制帯波長 330nm (3.74eV) および直接遷移 ( $\Gamma$ - $\Gamma$  遷移) 波長 315nm (3.93eV)、欠陥準位 (F 中心) 375nm (3.31eV) である<sup>3)</sup>。一方大きな非線形感受率を持ち、Z スキャン法による評価で四光子吸収活性が確認されている<sup>4)</sup>。そのため、可視～近赤外発振のレーザによるレーザアブレーションは、線形光学的な光-物質間エネルギー結合ではなく、多光子励起など非線形光学的過程が主経路で誘発される。電子親和力は自発分極分域の極性に依存し、 $1.5 \pm 0.8$  eV である<sup>5)</sup>。図 1 に示すように、イオン化エネルギー（対応する光の波長：分域表面の極性）4.5 eV (270 nm：正分域) ～ 6.1 eV (200 nm：負分域) となる。四光子 (Nd:YAG 基本波に対して、4.66 eV) から六光子 (同 6.99 eV) 分の励起エネルギーでプラズマ化を誘発させられる。また、一部キャリアのエネルギー緩和 (<psec) や無輻射再結合 (>nsec) の過程で伝導キャリア-

格子振動の結合から熱(応力波)も発生する。これが加工面の欠け亀裂など脆性損傷、あるいは熔融による隆起を生じさせる。

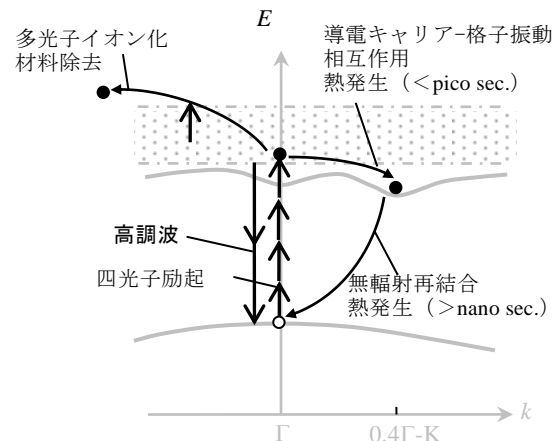


図 1 超短パルスレーザ照射における LN 電子系のエネルギー移動過程。

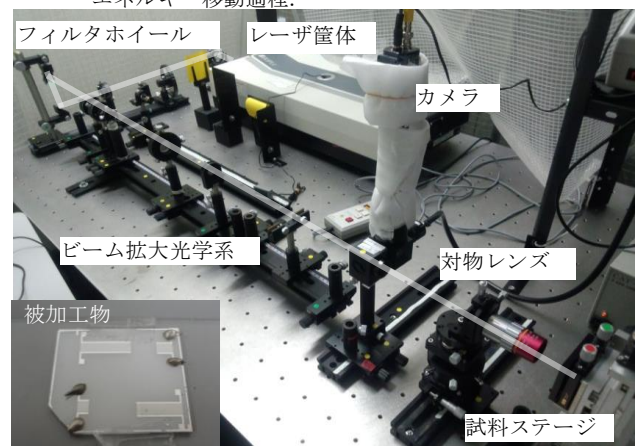


図 2 加工実験光学系。

### 3. 実験方法

図 2 のような構成で加工実験を行った。Nd:YAG 基本波 (1064nm) のパルス幅 60psec、出力 100μJ/pulse のレーザを用いて対物レンズで焦点を LN 表面に合わせ、直接描画による除去加工を行った。ND フィルタホイールで照射パルスエネルギーを調整し、ステージ掃引速度またはシャッターで照射パルス数を調節した。レーザ管体の Q スイッチ周波数によってパルス時間間隔を調整した。焦点面は試料表面上もしくは試料表面

より上として、ビーム拡大光学系の光軸や、焦点スポットぼかしによって照射された焦点ビームプロファイルを調整した。また試料雰囲気気を気中または純水中として加工実験を行った。加工面は光学顕微鏡によるカラー像、および電子顕微鏡による高精細像とレーザー顕微鏡によるプロファイル観察によって図 3 に示すように(α)痕跡なし、(β)高品位加工、(γ)欠け亀裂および(δ)溶融流動に分類評価した。

#### 4. 結果および考察

図 4 にパルス時間間隔を(a)10msec (100Hz), (b)1msec (1000Hz), (c)0.5msec (2000Hz)としたときの照射パルスエネルギー密度 $\rho$  (0.4~10J/cm<sup>2</sup>)と照射パルス数 $N$  (1~1000回)による加工面品位の変化を示す。図中の斜線は $\rho \times N$ =照射フルエンスのスケールである。フルエンスが増すに従い、(β)→(γ)→(δ)と表面性状が変化しているが、その各境界閾値(図中の点線)は、小 $\rho$ 大 $N$ の照射条件で、より大きなフルエンス上に現れている。これは、加工面性状の変化がレーザー照射に伴い発生した熱に起因したもので、 $\rho$ が累乗的に、 $N$ が加算的に発熱を促すため、大きな $\rho$ ほど発熱も大きく、 $N$ でフルエンスを稼いだ方が発熱を抑えられることを示している。また長パルス時間間隔ほど、各境界閾値はより大きなフルエンス上に現れている。これはパルス時間間隔が放熱冷却期間として働いていることを示している。ビーム品質を下げて焦点ビームプロファイルの尖度を小さくしたほうが照射部の発熱集中が抑えられ(β)の範囲を広くすることができた。また、純水中での加工では、水の大きな熱浸透率のため放熱が促進され、加工面に現れる熱影響を抑えることができた。以上より、LNの加工面性状を変化させているのは熱であり、発熱を抑え放熱を促すことが高加工面品位を得るために重要であることが分かった。

#### 5. 緒言

脆性機能材料の MEMS センサ利用の促進を目指して、LN のレーザー微細加工における高加工面品位が得られる加工条件と、その物理的機構との関係について調べた。材料特性や物理特性の文献調査と、加工実験による加工痕観測とから加工機構モデルを構築し、照射条件による加工面性状の変化の起源が熱であると示した。 $\rho$ が累乗的に、 $N$ が加算的に発熱を促すため、照射部のピークパワーを抑え発熱を抑制し、パルス時間間隔や液中雰囲気気で放熱を促すことで、高フルエンス照射でも溶融過程も経ず、欠けや亀裂も生じない加工面を得られることを示した。

#### 参考文献

- 1) M. Miyashita et al., IEEE Proc. of MEMS2008, (2008) 661-664
- 2) T. Onuki et al., Int. J. of Automation Technology, **8**, (2014), 896-902
- 3) R. Bhatt et al., Journal of Physics and Chemistry of Solid, **73**, (2012), 257-261
- 4) R.A. Ganeev et al., Optics Communications, **229**, (2004), 403-412
- 5) W-C. Yang et al., Appl. Phys. Lett., **85**, (2004), 2316-2318

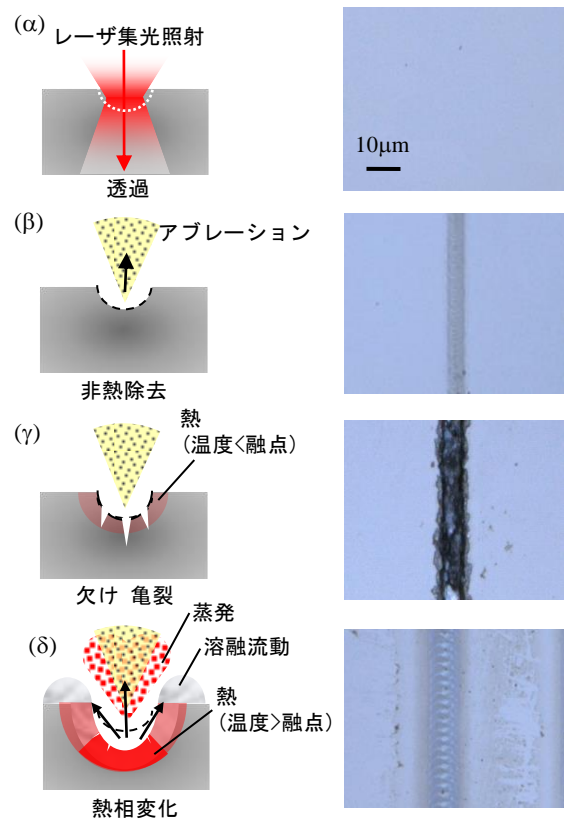


図 3 加工面性状の分類と加工機構

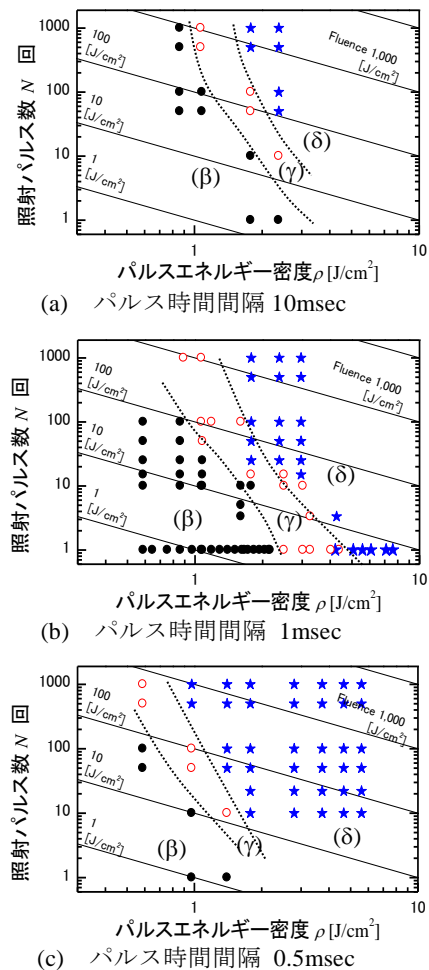


図 4 加工面性状のフルエンスによる変化特性のパルス時間間隔依存性