

軟X線レーザーによる 表面ナノ加工技術

量子科学技術研究開発機構 量子技術基盤研究部門
関西光量子科学研究所 量子応用光学研究部
X線超微細加工技術研究プロジェクト
上席研究員 石野 雅彦

2023年6月20日(火)

本技術の概要

- 従来のレーザー光よりも発振波長の短い **軟X線レーザーによる表面加工技術**です。
- 酸化アルミニウム（サファイア）および酸化チタンの各表面においては、**サブナノメートルの深さを持つ加工**が可能です。

軟X線：概ね波長が 0.1~30 nmの電磁波を指す。

サブナノメートル： 0.1 nm以上1 nm未満の長さを指す。

表面加工



材料表面に目的とするパターンを描画（2D）
または形成（3D）すること。

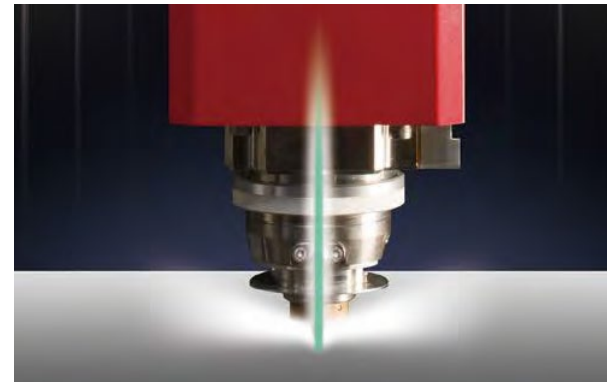
機械加工



オークマ株式会社

<https://www.okuma.co.jp/product/5avmc/index.html>

レーザー加工



三菱電機株式会社

<https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/mecha/laser/pmerit/2d/gx-f/index.html>

ドリル等の工具を使った**機械加工**やレーザー照射による溶融・気化を利用する**レーザー加工**が代表です。

加工操作に求められる技術



自動化が進む加工装置

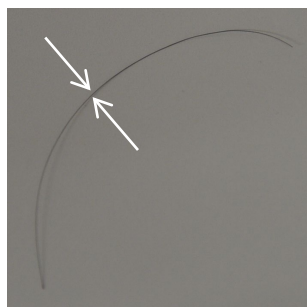
手法	操作スキル
機械加工	パラメータ設定ができる技術者が必要 (NC装置以外ではある程度の熟練が必要)
レーザー加工	パラメータ設定ができる技術者が必要

装置の高い制御性、パラメータの自動設定により、誰が操作・作業しても同じ製品ができます。

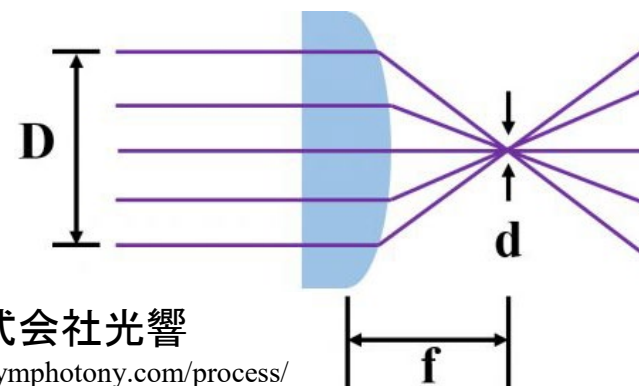
加工技術の問題点

加工サイズには限界がある。

手法	加工サイズ	主な要因
機械加工	> 数十マイクロメートル	工具サイズ
レーザー加工	> 1マイクロメートル	集光サイズ



毛髪（直径） 50~80 μm



株式会社光響
<https://www.symphotony.com/process/>

集光サイズ $d \propto F \lambda$

$F = f/D$ エフナンバー

表面微細加工技術



最先端はリソグラフィ技術

手法	照射(露光)波長
レーザー加工	赤外線~紫外線 例) YAGレーザー: 1064 nm
リソグラフィ加工	ArFレーザー: 193 nm 極端紫外線(EUV)光: 13.5 nm

半導体集積回路の製造においては、EUVリソグラフィ技術が最先端の製造技術として実用化されています。

2030年までには、最小線幅の実効値が10ナノメートルよりも細くなることが予想されています。

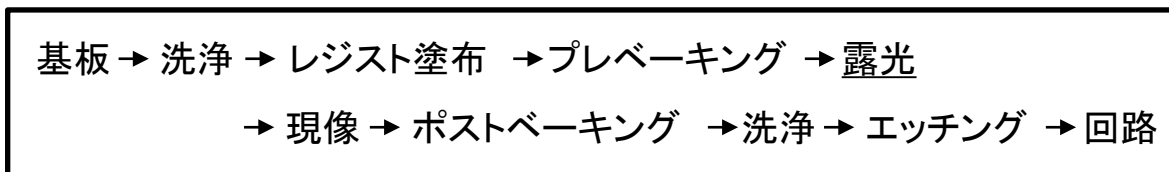
レーザー加工の発展には加工サイズの微細化が必要です。

レーザー加工の利点

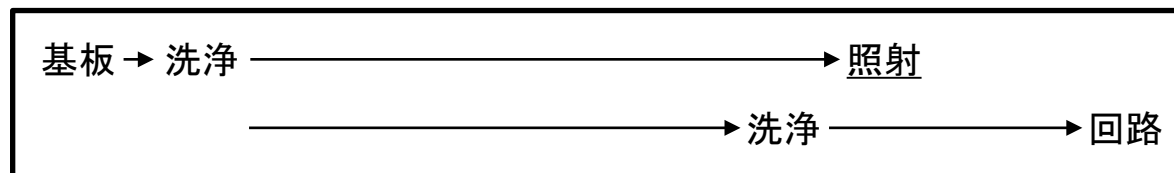


- 材料表面の直接加工手段である。
 - リソグラフィ加工の複雑な工程を省略できる。
 - レジストなどの薬剤を必要としない。

リソグラフィ加工



レーザー加工

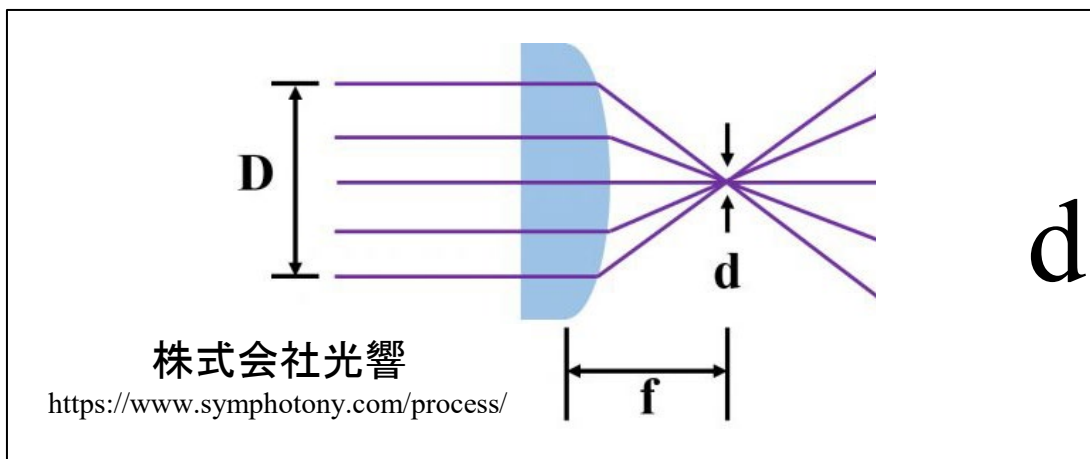


簡便かつ環境負荷の少ない加工手段となり得ます。

解決手段: 3つの新技術



加工サイズの微細化は**レーザー波長の短波長化**と**集光径の縮小**、**照射強度の調整**が必須となる。



(1) 短波長化

$$d \propto F \lambda$$

Diagram showing the relationship between spot diameter d , focal length F , and wavelength λ . Arrows point from the text above to λ and from the text below to F .

(2) 微小集光光学系の採用

(3) 照射強度の調整

(1)短波長化



短波長レーザー = 軟X線レーザー

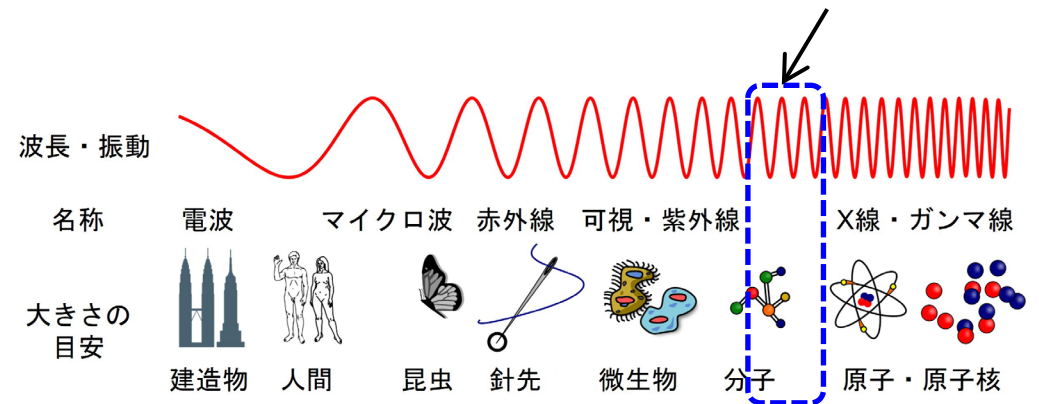
赤外線(波長 $\sim 1 \mu\text{m}$) = $1/100 \Rightarrow$ 軟X線(波長 $\sim 10 \text{ nm}$)

軟X線領域に発振波長をもつ軟X線レーザーを照射光源に適用します。

軟X線とは波長が0.1~30 nmの電磁波です。

軟X線は空気を含む物質に強く吸収されるため、真空中を伝播させる必要があります。

紫外線とX線をつなぐ光



Wikiペディア:電磁スペクトル
<https://ja.wikipedia.org/wiki/電磁スペクトル>

レーザー条件

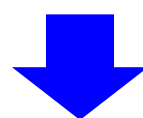
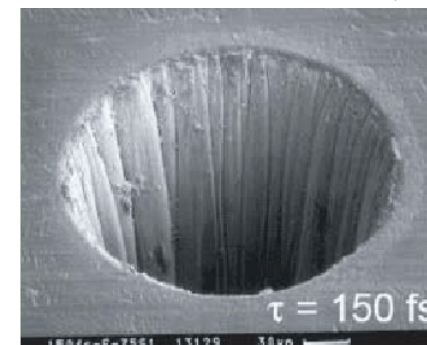
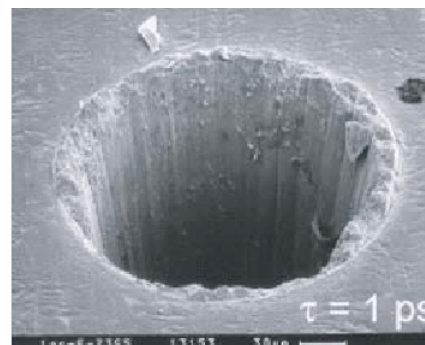
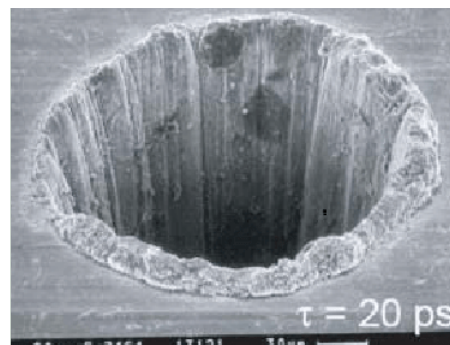
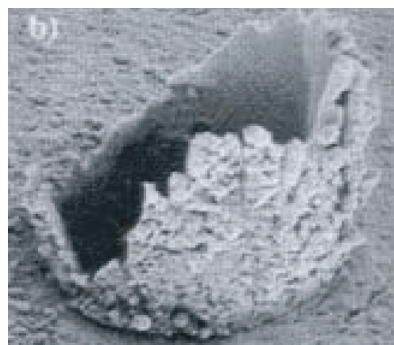


レーザー加工において、**熱的影響**（バリやクラック）のない**構造形成**には超短パルスレーザーが有効です。

ナノ秒パルス

ピコ秒パルス

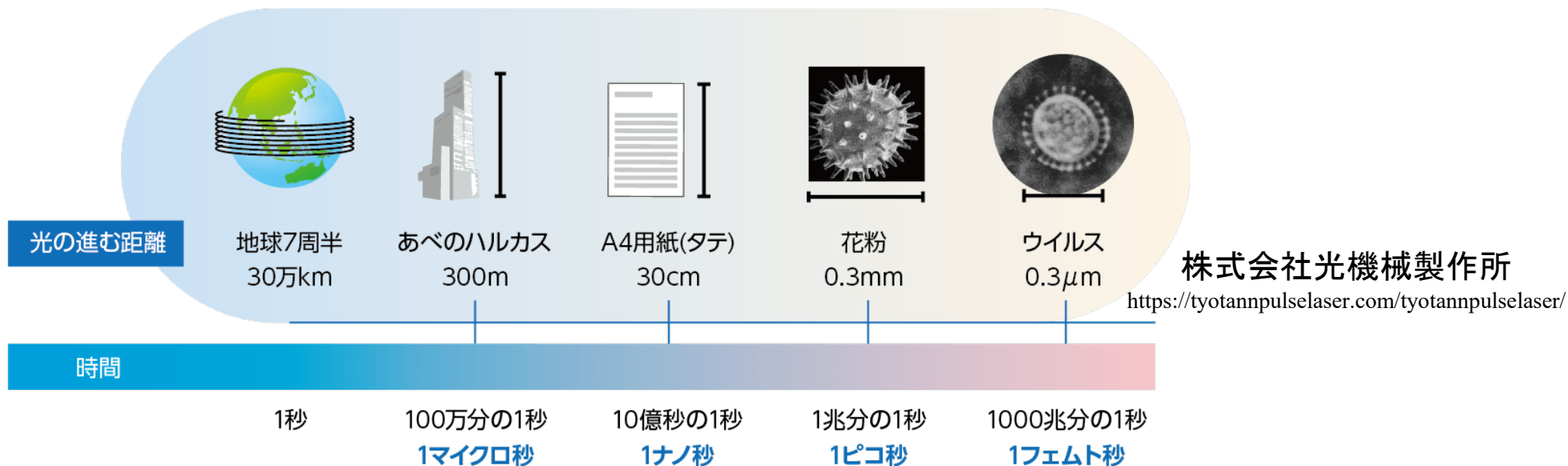
フェムト秒パルス



株式会社光機械製作所
<https://tyotannpulselaser.com/tyotannpulselaser/>

ピコ秒およびフェムト秒の超短パルスレーザー

パルス幅



株式会社光機械製作所
<https://tyotannpulselaser.com/tyotannpulselaser/>

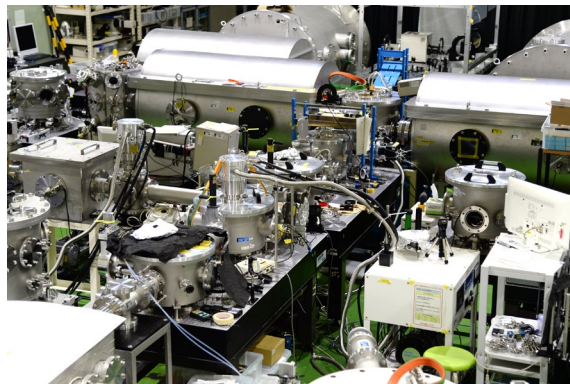
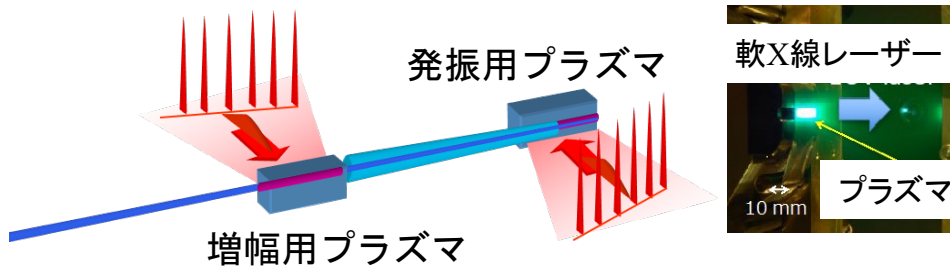
ナノ秒 (ns) => 1/1000 => **ピコ秒 (ps)** => 1/1000 => **フェムト秒 (fs)**
|
YAGレーザー
超短パルスレーザー

超短パルスレーザーのパルス幅は、指先に光路が入る時間スケールです。

超短パルス軟X線レーザー

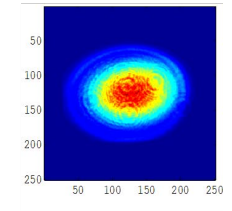
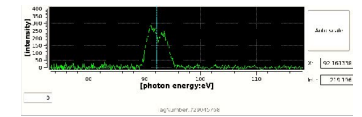


プラズマ軟X線レーザー(量研)



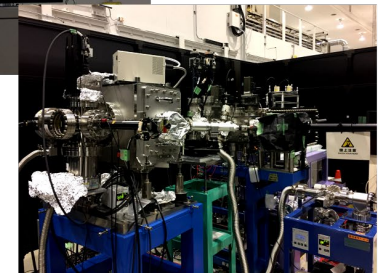
発振波長: 18.9 または 13.9 ナノメートル
パルス幅: 7 ピコ秒

軟X線自由電子レーザー(理研)



理研 "SACLA BL1"

<http://xfel.riken.jp/index.html>



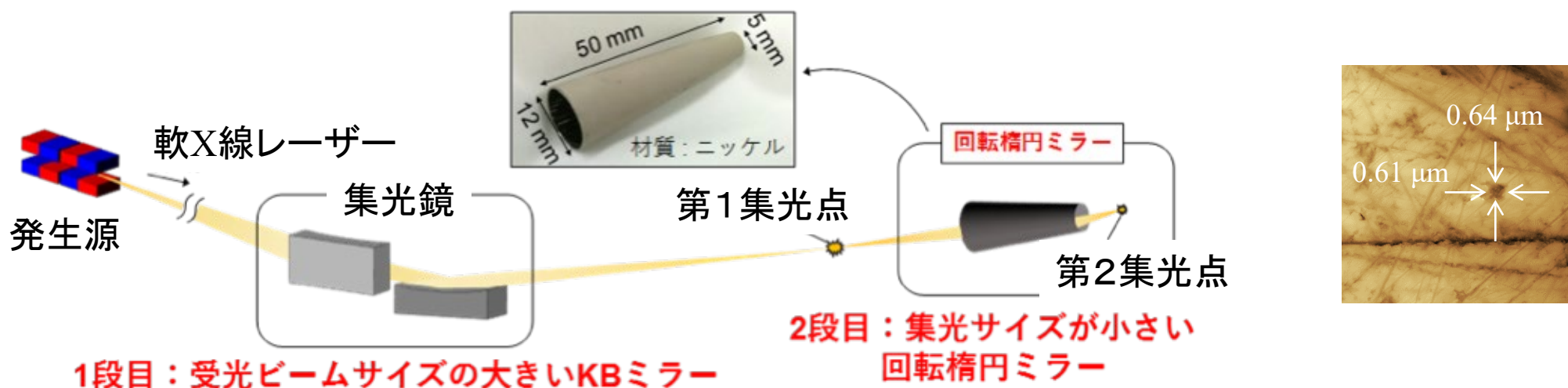
発振波長: 8 ~ 40 ナノメートル(可変)
パルス幅: 28 フェムト秒

いずれの光源もレーザー加工に利用可能です。

(2) 微小集光光学系の採用



2段集光光学系によるナノ集光の実現



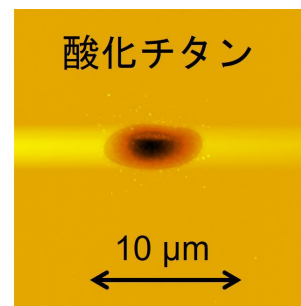
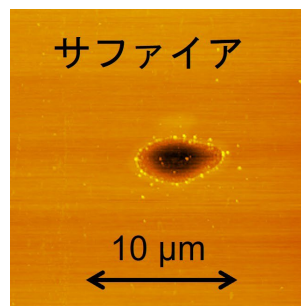
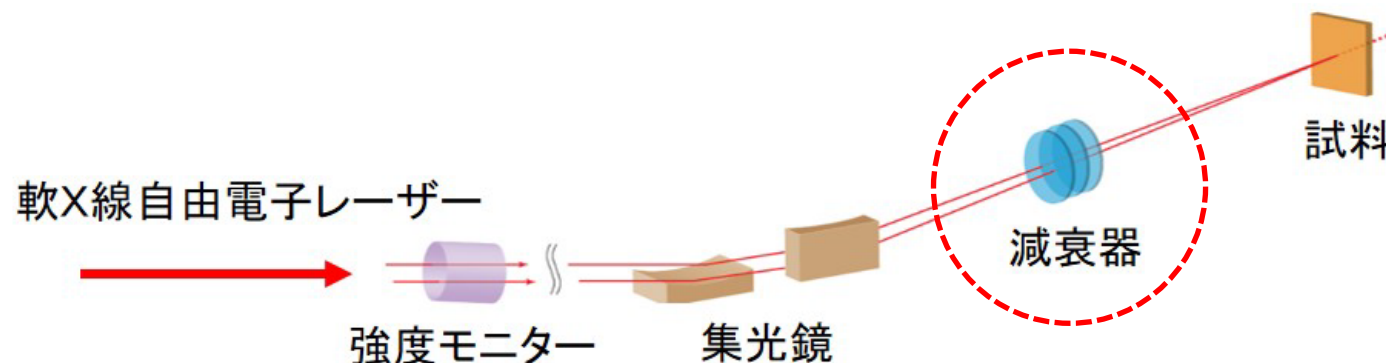
理研 (SPring-8, SACLA) プレスリリース
http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2019/191002/

J. Synchrotron Rad. 26, 1406 (2019).
転載許諾済

ナノメートルスケールのスポット径を実現します。

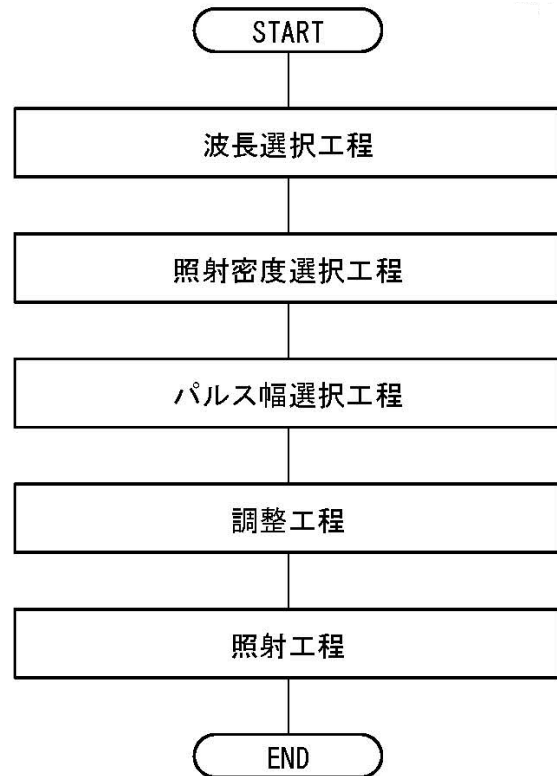
(3) 照射強度の調整

減衰器による強度調整機構の導入



強度調整が適切でないと **加工損傷** になります。

照射手順



波長選択範囲：1～30 ナノメートル

照射強度調整

パルス幅選択範囲：10 フェムト秒～10 ピコ秒

試料位置調整

加工



注意深く準備を行えば順序が変わっても大丈夫

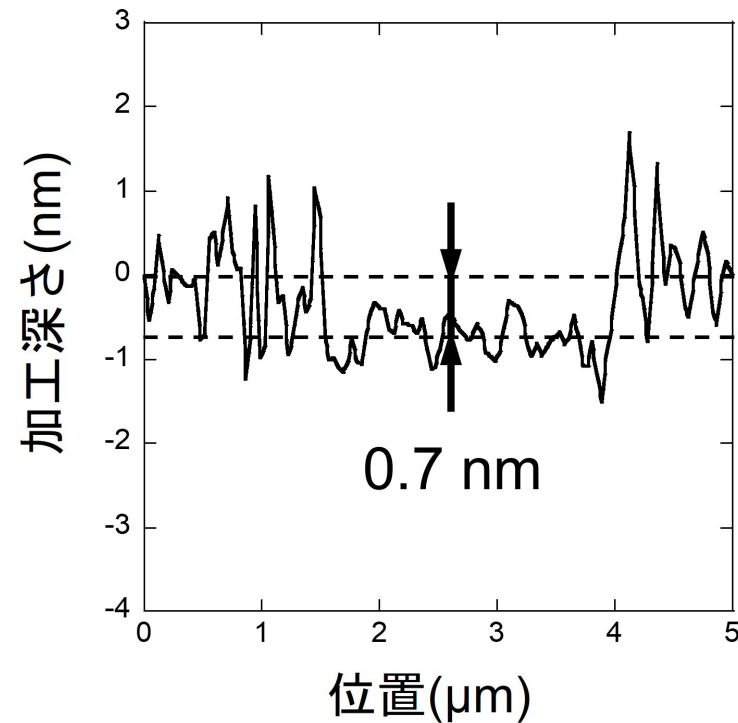
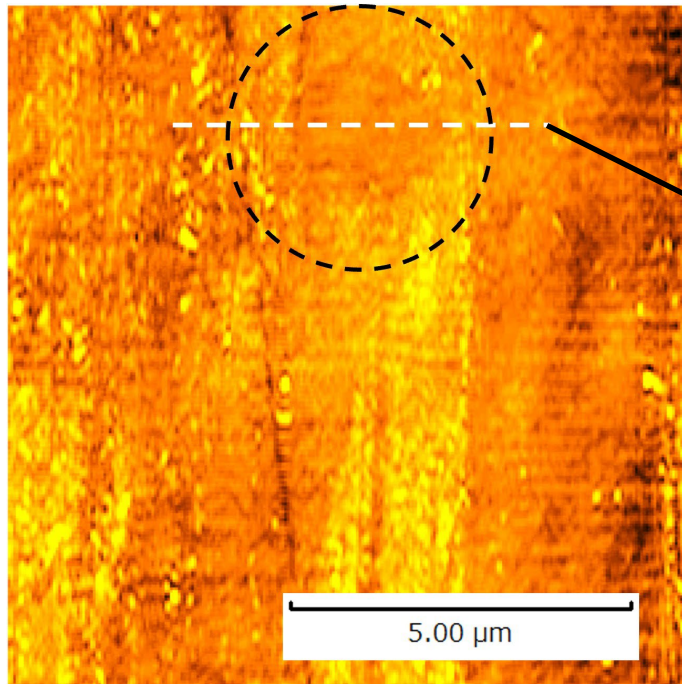
加工試料



- サファイア（酸化アルミニウム）： Al_2O_3
- 酸化チタン： TiO_2

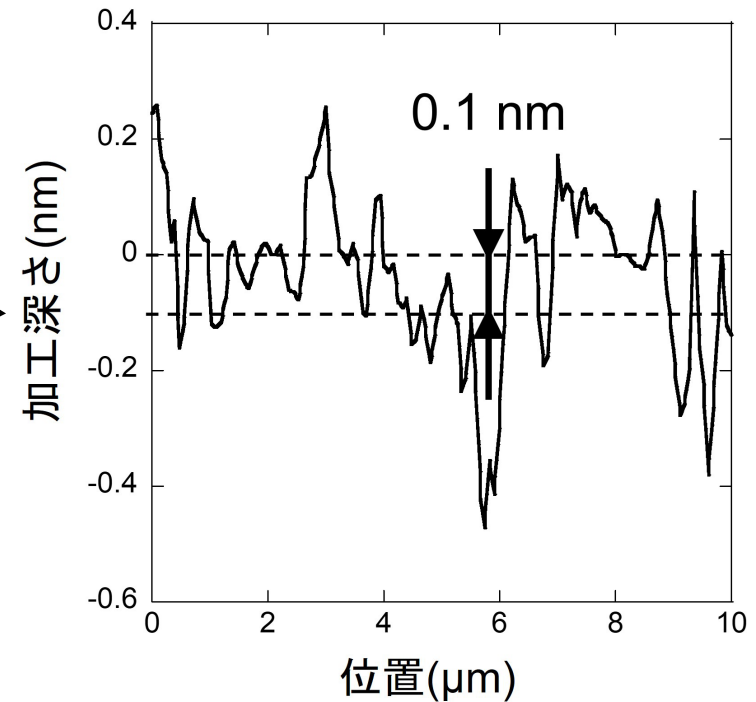
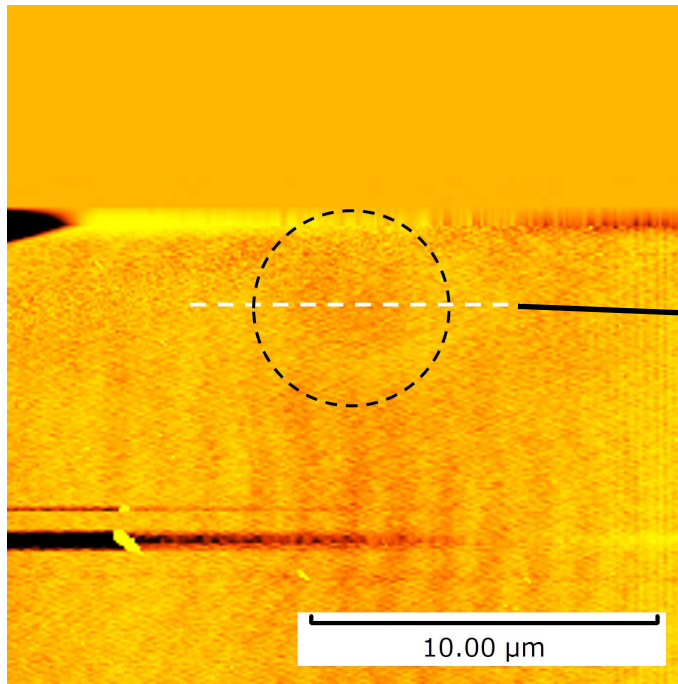
機械的（硬い、耐摩耗性）、光学的（透過性、触媒）、熱的（耐熱性、熱伝導性）、電氣的（絶縁性、誘電率）、化学的（耐食性）な特性に優れており、工業的にも広く用いられています。

実施例：サファイア



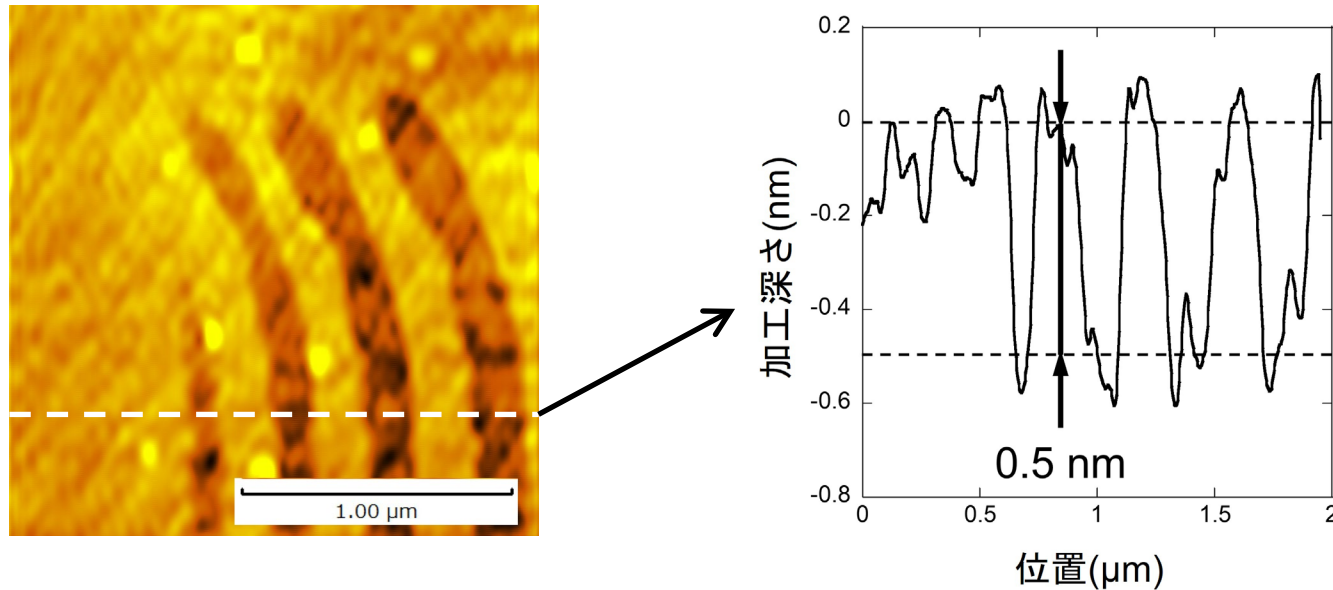
1パルス照射(シングルショット)でサブナノメートル(1 nm未満)の深さをもつ構造を形成できます。

実施例：酸化チタン



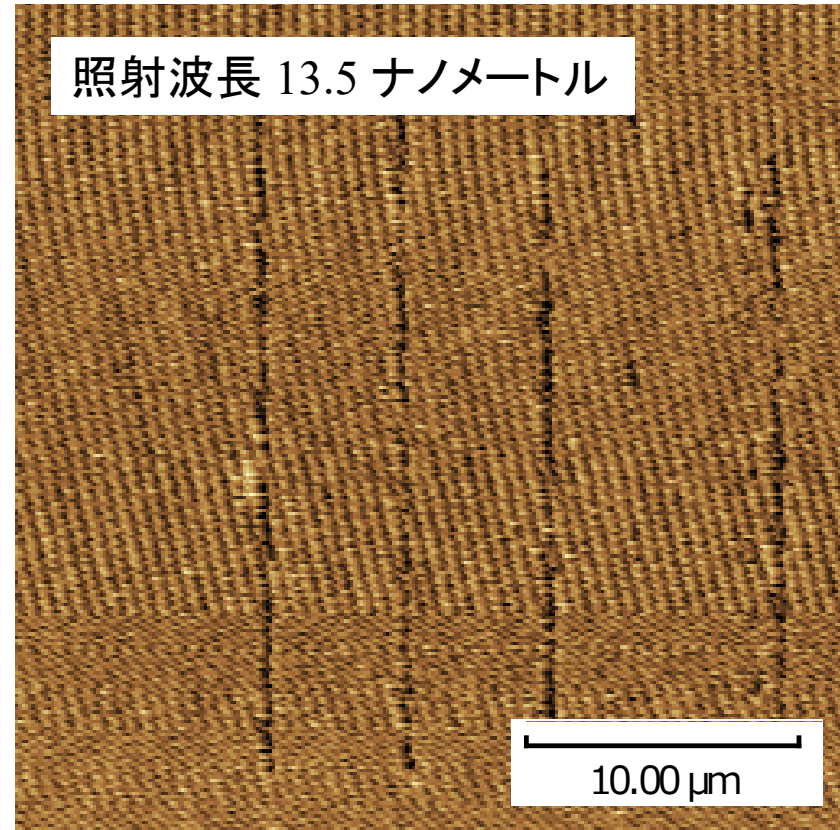
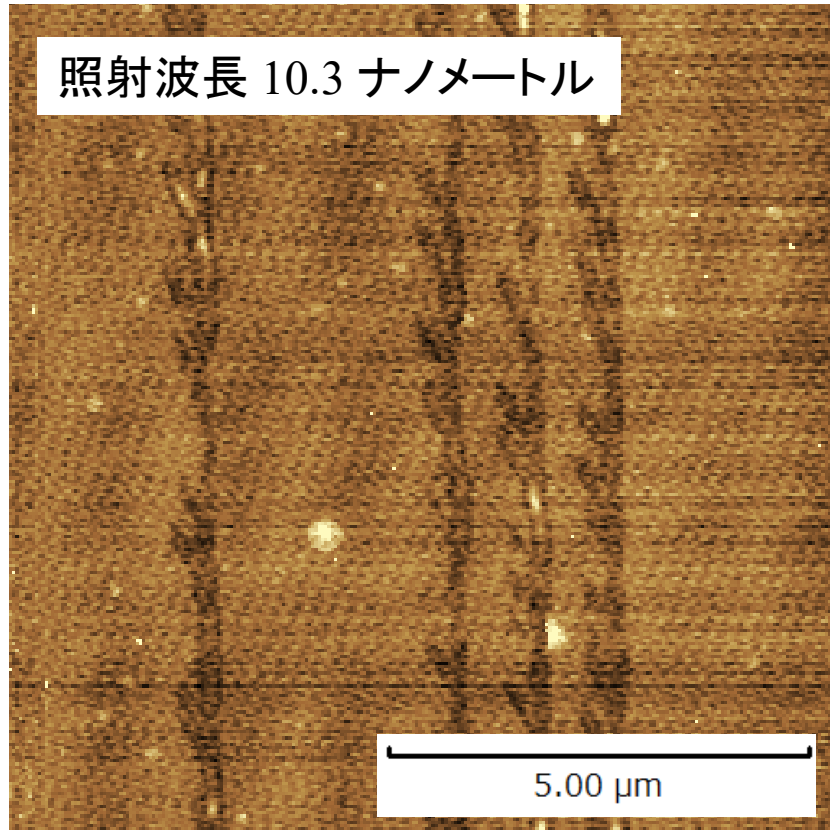
1000パルス照射でサブナノメートル(1ナノメートル未満)の深さをもつ構造を形成できます。

実施例：サファイア



1パルス照射(シングルショット)でそれぞれ**100ナノメートル幅とサブナノメートルの深さをもつ構造**を形成できます。

実施例：サファイア



試料を走査することで、**10マイクロメートルを超える
ライン状パターン構造**を形成できます。

想定される用途



- ナノメートルスケールのパターン描画が見込めるため、**従来のレーザー加工では未到達の超精密微細加工**の実現が期待できます。
- サファイアおよび酸化チタンに対する加工では、誘電体材料の加工と考えると**電気素子への展開**、基板材料の加工と考えると**光学素子への展開**が考えられます。

実用化に向けた課題

- 現在は、実証実験に留まっています。
- 今後、実用化に向けて実験データを蓄積し、加工条件の設定に努めます。
- 実用化においては、加工速度（スループット）の向上技術を確立する必要があります。
- 本技術の導入には軟X線レーザー光源の導入が必須となります。

量研のもつプラズマ軟X線レーザー光源の開発技術を活用し、軟X線レーザー光源の導入を支援します。

プラズマ軟X線レーザーの導入

光源開発概算と想定ロードマップ

- ・プラズマ励起用レーザーシステム : 1億5千万円
 - ・軟X線レーザー光源およびビームライン : 5千万円
 - ・軟X線光学部品 : 2千万円
 - ・その他(建屋, 加工ライン, 人件費など) : 適宜
-) 2億円～

	軟X線レーザー光源および加工装置の導入				
	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目以降
ロードマップ	プラズマ励起用レーザーシステムの構築		軟X線レーザー光源の開発		マシンスタディ
	ビームラインの構築		加工ラインの構築		
					軟X線レーザー加工機による製品生産

(参考)

理研(播磨)X線自由電子レーザー施設: 388億円(2011年完成)

ASML社(蘭)EUVリソグラフィ装置: > 1億ユーロ(140億円)/台

企業への期待



- レーザー加工技術や超微細パターン描画に興味を持つ企業との共同研究を希望します。
 - **表面ナノ加工の技術向上**を目指します。
- レーザー加工装置の開発企業、表面加工分野への技術展開を考えている企業との共同研究を希望します。
 - **プラズマ軟X線レーザー光源の導入**を支援します。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 表面造形方法及び表面造形装置
- 出願番号 : 特願2023-41379
- 出願人 : 量子科学技術研究開発機構
近畿大学
- 発明者 : 石野雅彦、チンタンフン
錦野将元、三上勝大

産学連携の経歴

- 2018年-2027年
文部科学省、光・量子飛躍フラッグシップ
プログラム（Q-LEAP）事業に採択
- 2021年-2023年 近畿大学と共同研究実施

お問い合わせ先



量子科学技術研究開発機構
イノベーションセンターまでお願いします

T E L : 043 - 206 - 3027

F A X : 043 - 206 - 4061

e-mail : chizai@qst.go.jp

ご清聴ありがとうございました

終わり