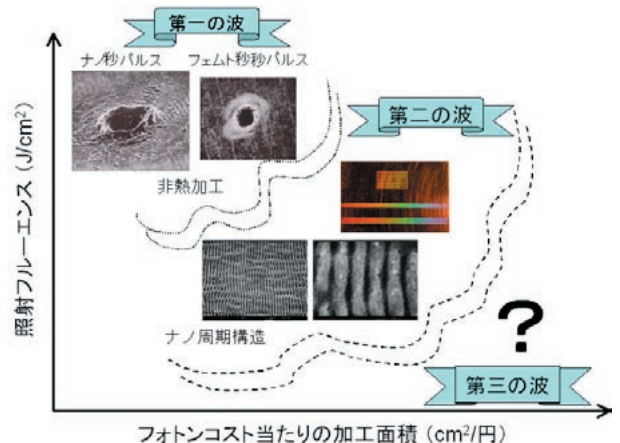


CONTENTS

- フェムト秒加工の第三の波
～加工しきい値以下の加工～
- レーザー光学設計コード(LOCCO)の開発
- フェムト秒レーザーによる電極表面の構造制御
- 【光と蔭】レーザー総研諮問会議



【図】フェムト秒加工の第一、第二、第三の波

フェムト秒加工の第三の波 ～加工しきい値以下の加工～

◆フェムト秒加工 第一の波

フェムト秒加工の第一の波とは言えば、やはり非熱加工による穴開けや切断であろう(「レーザー・クロス」No.163, 2001)。1997年に論文掲載されたナノ秒パルスとフェムト秒パルスによる金属の穴開け加工の比較写真はあちこちで引用され、これまでになかった高品質のレーザー加工技術として産業界の注目を集めた。国内でフェムト秒加工調査研究やフェムト秒加工研究会・セミナーが始まったのも、この少し後である。

しかし、この第一の波はフォトンコストという大きな堤防に行く手をさえぎられて、大きな流れを形成することはできなかった。また、この波を打ち消すように、ピコ秒レーザー加工の有用性が2004年頃から指摘され始めた。高付加価値加工であるリペアリング(修繕加工)など、ニッチとも呼びうる堤防の隙間から小さな波として波紋を広げつつあるに過ぎない。

◆フェムト秒加工 第二の波

フェムト秒加工の第二の波は、加工しきい値近傍で形成されるナノ周期構造ではなかろうか(「レーザー・クロス」No.181, 2003)。最近になって学会での関連発表件数も増えつつある。当初は、「いったい何に使えるんだ?」と言われたものだが、最近は摩擦低減効果をはじめとして膜密着性向上など、産業的に有益な応用が提案されている。

低い照射強度でナノ周期構造の加工が可能であり、小さなエネルギーで大面積を処理できる。単位面積当たりの加工コストが小さくて済み、かつ材料表面に機

レーザー加工計測研究チーム 藤田雅之
性能を付加できる興味深い加工現象である。省エネ効果が期待され、関東の地域コンソでは自動車部品へ向けた研究開発が進められている。今後、世界へ広がる大きな波となることを期待したい。

◆フェムト秒加工 第三の波

それでは、フェムト秒加工の第三の波は? それは、加工しきい値以下で起こる加工(表面改質)と言えよう(「レーザー・クロス」No.207, 2005)。フェムト秒パルスは小さなエネルギーでもピーク強度が高いため、ナノ周期構造を形成する時よりもさらに低い照射強度で試料表面の改質を誘起できる。表面改質と言え、アニーリングなどの熱加工では当たり前のように行われているが、フェムト秒パルスを使うと様子が違ってくるのである。フェムト秒加工と言え「非熱加工」というのが定番であり何か矛盾を感じるかもしれないが、相手(試料)を選べば新しい「波」が見えてくる。

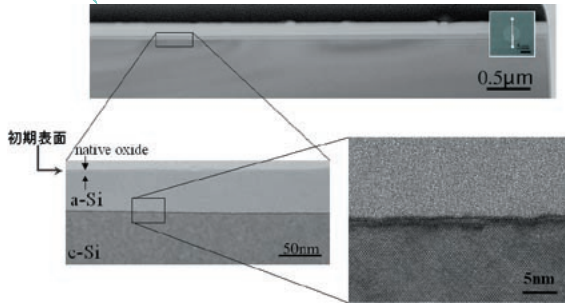
◆単結晶ウエハに極薄高密度のアモルファス層を形成

表面改質が分かりやすい代表例として、Siの単結晶ウエハを用いた実験結果を紹介する。

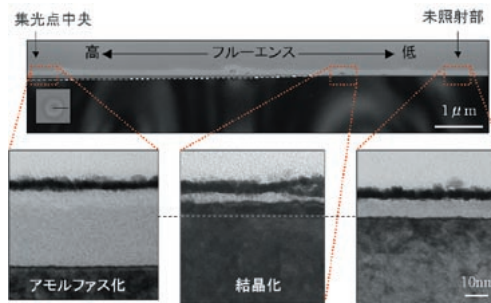
シングルショットでアブレーションが発生するフルーエンスよりも低いフルーエンスで単結晶Siにフェムト秒レーザーを照射すると、アモルファスSi(a-Si)へと相転移させることが可能である。メカニズムは明らかにされていないが、ある一定のフルーエンスの範囲でのみ相転移は発生する。ガウシアンビームで加工した場合、フルーエンスを調整することで円形やリング状のa-Si層を得ることが可能である。

次ページへつづく▶

フェムト秒加工の第三の波～加工しきい値以下の加工～



【図1(左)】アモルファス層の断面TEM



【図2(右)】照射部断面のTEM

エピタキシャル成長であると推測される。現在、詳細な実験を継続中である。

◆何に使える？

このような相転位が何に使えるのかは、まだ分かっていない。産業界の方々のご意見を取り入れながら応用研

究へと進めたいと思っている。なにせ相手は半導体Siである。何かに使えると信じている。

一例として、波長800nmのフェムト秒レーザーによって円形に形成されたアモルファス層の断面TEM(透過型電子顕微鏡)写真を図1に示す。形成されたアモルファス層は均一な深さ分布を持ち、層の厚みは約50nmと極めて浅い。また、照射前後において試料の体積変化はなく単結晶と同じ原子密度のアモルファス層である。パルス幅依存性を調べる実験において、このアモルファス化は8ps以下のレーザーパルスで誘起できることが明らかとなっている。

◆ウエハ上のアモルファス層を単結晶化

アモルファス化ができるのなら結晶化もできるのではないかと考えて実験を行った。単結晶Siウエハ上にアモルファスSiをスパッタリングで8nm積み上げてレーザー照射を行った。照射部断面のTEM(透過型電子顕微鏡)写真を図2に示す。結果は、照射強度が高い集光点中央ではアモルファス化が起り、それよりも照射強度が低い限定された範囲内で再結晶化が確認された。再結晶化は基板の単結晶ウエハから進行しており、

気になるのは、Siのフェムト秒加工の論文発表が皆無であるという事実である。世界初、日本初のフェムト秒加工の論文は試料としてSiを用いていた。しかし、その後の論文発表は見あたらない。水面下でSiのフェムト秒加工は行われているようである。

◆第四の波に期待

フェムト秒加工の第四の波は来るのだろうか？研究者の立場からは“来る”と言うしかない。いや、今、第四の波を呼び寄せているところである。これまでは、照射強度を変化させながら新しい現象を見いだしてきた。次は、フェムト秒パルスと何かを組み合わせる有益な加工を実証したいと考えている。その何かを探っているところである。
〔「レーザークロス」のバックナンバーはホームページからダウンロードできます〕

TOPICS

レーザー光学設計コード(LOCCO)の開発

理論・シミュレーションチーム(兼任) 佐伯 拓

近年、レーザー技術の著しい発達とともにその性能が着実に改善されている。レーザーは加工、医療、バイオ関連等の産業分野や基礎研究分野で応用のすそ野を広げつつある。そのための小型、大型の各種新規レーザー装置が次々と開発され、立ち上がろうとしている。

現在、使用されている、あるいは、これから建設する大型レーザーシステムの設計・開発において、レーザー装置の効率向上や限界性能を知ることは運用、コスト削減の面から見ても大変重要である。そこで、レーザー光学設計コードが必要となる。設計コードを利用すれば、レーザー装置を開発する際の試作をくり返す手間、貴重な時間や費用が省かれる。

大阪大学レーザー核融合研究センター(現レーザーエネルギー学研究中心)では、激光XII号レーザーを代表とする大型レーザーの設計・開発過程で光増幅・伝搬コード(GLAMP)が開発された。LOCCOは、

実際の複雑なレーザーシステム中の光伝搬の解析を行うため、このコードを再編成し、新たな計算を追加して作成された。

近年、デスクトップ、ノート型パソコンのマイクロプロセッサや記憶容量は著しく改善されているため、ウインドウズのパソコン上でこのコードは十分に動く。YAG等の結晶、セラミック等、固体、ガラスレーザー等固体レーザー等の4準位系レーザーの再生増幅器、発振器の飽和増幅解析が行え、システム中のレーザー伝搬における空間パターン、像転送、増幅後の時間波形の解析による最適化が行える。

使用例をいくつか挙げる。パルスレーザーでは、光学ダメージの問題がある。このダメージを避けるため、レーザー出力パワーに制限がかけられる。これは、電気-光変換効率の低下につながる。有限開口からの回折の成長、非線形屈折率効果による自己収束やフィラメンテーションはビーム品質を悪化させる。



LOCCOはその際のピーク光強度の計算が可能である。また、LOCCOは、レーザー加工等における集光計算に適している。任意のビーム形状、光強度が入力可能である。ビームスポット径や光強度は、高密度照射によって発生する多くの現象にとって重要なパラメーターであり、その計算が可能である。

【図】計算中のウインドウ画面(上)、装置リストウインドウ(下)

現在、LOCCOは各研究開発の施設で使用されているが、いまだ多くの開発課題があり、ユーザーから寄せられる要求を完全には満たしていない。現在、LOCCOの新規バージョンを開発中であり、新規コードを追加し拡張していく予定である。LOCCOの質問等に関しては、以下の連絡先までご連絡下さい。また、ホームページでもご案内しています。

(有)オプトエレクトロニクスラボラトリ
E-Mail: info@optolab.co.jp
URL: http://www.optolab.co.jp/

INFORMATION

フェムト秒レーザーによる電極表面の構造制御

共同研究員(京都大学化学研究所先端ビームナノ科学センター) 橋田昌樹

■電子放出特性改善の鍵

カーボンナノチューブ(CNT: Carbon Nano-Tubes)は、電界放出型表示装置(FED: Field Emission Display)のカソードとして有望視され、CNT-FEDの

実用化を目指した研究がなされてきた。CNT-FEDの電極製作には、低コストで大型化が容易である印刷法が用いられるが、カソード電極の電子放出特性(ターンオン電界の低減、電流密度の向上、電子放出の均一



レーザー総研諮問会議

去る2月22日第3回ILT諮問会議が阪大レーザー研大ホールで開催された。OELキャンペーン160(2006年2月27日)に諮問会議発足のレポートがある。それからちょうど1年たち、3回目の会合である。この経過から見ると年2回開催というペースは光科学技術の急速な展開から判断するとややテンポが遅いようだ。

当レーザー総研(ILT)は今年開設20周年を迎え、阪大レーザーエネルギー学研究中心(ILE)は創立35周年である。レーザー学会(LSJ)は来年35周年に当たる。現在の問題はこれらの組織を運営してきた世代にそろそろ交代の時期が来ていることだろう。このための課題として5年先を見据え10年を見通した将来計画が求められる。

筆者の考えでは上記3点セットがうまく機能すれば、レーザー研究の展開はOKである。このためには具体的な対策が肝要となる。以上が筆者の冒頭に述べた問題提起であった。

会議では藤田雅之君から「パワーレーザーネットワークの提案とあり方」、今崎一夫君から「ILT/ILEの共同研究」、三間罔興君から「ILE研究の今後の動向」、中井貞雄君から「レーザー駆動放射源と新産業創成」について課題提供があり、面白い議論が展開された。

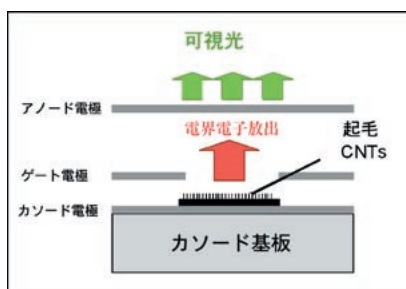
時代の大きな流れからすると2010年米国のNIF(National Ignition Facility)が稼働し、ICFの見通しが判明する。ILEとしてはFIREX(Fast Ignition Research Experiment)で自らの存在を2010年までに示さねばならない。現実にはICFの研究資金として与えられたEUV研究が終了するからPost EUVのテーマを提言する必要がある。

ILTはEUV光源開発、コンプトンγ線による核変換、太陽光励起レーザーの開発、レーザーリモート探傷のプロジェクトを展開しているが、さらにきめ細かい産業応用を模索したいものである。

LSJはレーザー研究人の組織化を通じて活躍しているが、さらにILE、ILTとの協力関係を深める努力が求められよう。また国内、国外のより緊密なネットワークを地道に構築することが大切で、そのための戦略が必要だ。

会議の議論は空理空論より具体的な方策を組み上げる努力が不可欠である。すなわちILEが他二者に求めるテーマ、ILTが他二者に望む問題点、LSJが他二者に期待する要点が、現状分析による欠陥の洗い出しと将来展望を見据えた施策を案出することにより点検される必要がある。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】



【図1】電界放出型表示装置

(図1)。これまでに、スクラッチ法、テープ剥がし法、イオン照射法、ナノ秒レーザーアブレーション法が提案されて起毛が試みられてきたが、カーボンナノチューブの構造を壊すことのない安定した手法開発を模索している状況にある。

■電極表面のカーボンナノチューブの起毛

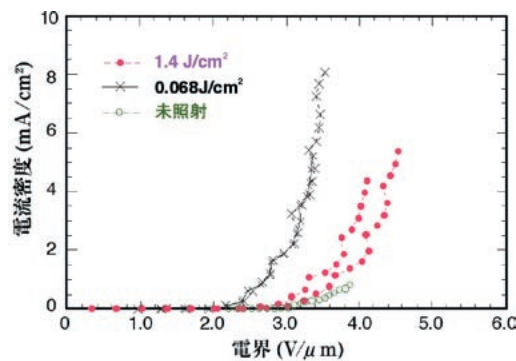
これらを背景に、固体を非熱的にアブレーションできることに加え、アブレーション閾値近傍のフルエンス領域(新加工領域)においてナノメートルスケールのアブレーション深さを実現でき、レーザー波長よりも小さいナノ周期構造を形成できるフェムト秒レーザーにより、電極表面のカーボンナノチューブの起毛を試みた。

カーボンナノチューブ電極は、バインダーとなる有機セルロースに多層カーボンナノチューブを1:1の割合で混合し、印刷法によりガラス基板上に制作した。電極のサイズは、厚み $3\mu\text{m}$ 、面積 $2\times 2\text{mm}^2$ である。アブレーション実験では、ガウシアン形状のフェムト秒レーザーパルス(波長 800nm 、パルス幅 130fs 、繰り返し 10Hz)を焦点距離 10cm のレンズにより集光し、カーボンナノチューブ電極表面に 0° の入射角度で照射した。焦点位置におけるレーザースポットは直径 $30\mu\text{m}$ (FWHM)であった。レーザーのエネルギーは、減衰器(半波長板と2枚の偏光子対)により $15\sim 0.7\mu\text{J}$ の範囲で変化させた。照射前後のカーボンナノチューブ電極は、走査型電子顕微鏡(SEM)により表面観察を、ラマン分光によりカーボンナノチューブの構造分析を行った。カーボンナノチューブ電極の電子放出特性(電流-電圧特性、ターンオン電界、電子放出の均一性)は、ダイオードシステム(図1)により測定した。

■電流放出特性の改善

図2に、レーザーアブレーションされたカーボンナノチューブ電極からの電界放出特性(陰極電界-陰極電流密度の関係)を示す。照射レーザーフルエンスが低いほど電界放出曲線は再現性が高く、低い電界でターンオンする結果が得られた。電界放出のターンオン電界は、電流密度が $7.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (電流は $0.3\mu\text{A}$)となる電界と定義した。 $0.068\text{J}/\text{cm}^2$ と $1.4\text{J}/\text{cm}^2$ のフルエンスでアブレーションされたカーボンナノチューブ電極のターンオン電界は、それぞれ $1.9\text{V}/\mu\text{m}$ 、 $2.3\text{V}/\mu\text{m}$ であった。ターンオン電界の照射レーザーフルエンス依存性を詳しく調べたところ、レーザーフルエンス

化)を改善する後処理技術の確立が重要課題となっている。後処理において、電極表面のカーボンナノチューブを均一に起毛させ電界放出しやすい構造を作るのが、電子放出特性改善の鍵を握っている



【図2】CNT電極の電子放出特性

が低いほどターンオン電界が低下し、最も低いターンオン電界は約 $1.8\text{V}/\mu\text{m}$ であった。このターンオン電界は、レーザー照射さ

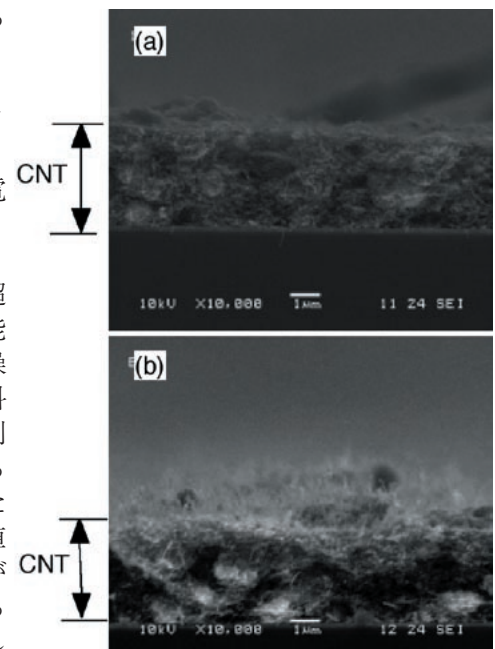
れていないカーボンナノチューブ電極の示す電界($4\text{V}/\mu\text{m}$)の約半分改善されることが分かった。

■フェムト秒レーザー特有の新しい起毛

図3(a)はレーザー未照射のカーボンナノチューブ電極の断面を、図3(b)は、最も低いターンオン電界を示した電極の断面を示しており、基板に対して直立したナノチューブが高密度に分布していた。このような起毛は、ナノ秒レーザーアブレーションには見られなかったもので、フェムト秒レーザーのアブレーション特有の新しい起毛状態であった。また、カーボンナノチューブ電極のラマンスペクトルを調べたところ、炭素の格子欠陥に起因するDバンド(1335cm^{-1})のピーク強度が低下していた。つまり、格子欠陥の炭素成分が選択的にアブレーションしていることを示唆している。ターンオン電界が改善した1つの理由として、カーボンナノチューブの高純度化が関係していると推察している。

■新たな高付加価値の加工分野開拓に貢献

ここで紹介したフェムト秒レーザーによる表面構造制御に関する研究により、材料の組成、構造、サイズを制御し、材料のもつ電気・熱伝導性、磁性、誘電性、光物性、超伝導性の機能性を自在に操り、新規材料を機能的に制御・創成するような、新たな高付加価値の加工分野が切り開かれるものと期待している。



【図3】カーボンナノチューブ電極の断面観察(a)レーザー未照射(b)レーザー照射