フェムト秒レーザを用いた 薄厚シリコンウエハのダイシング加工*

—レーザパルス幅が抗折強度と切断品質に及ぼす影響—

二宮孝文** 沢田博司** 川原公介*** 横谷篤至† 黒澤宏†

Dicing Process for Thin Silicon Wafer by Using Femtosecond-laser
- Effect of Laser Pulse Width on Flexural Strength and Cutting Quality -

Takafumi NINOMIYA, Hiroshi SAWADA, Kosuke KAWAHARA, Atsushi YOKOTANI and Kou KUROSAWA

Thin semiconductor wafer is more required for portable devices due to its mechanical flexibility or space gain. In dicing process for this thin wafer, suppression of micro-cracks is indispensable, which result in starting point of substrate breakage. In this research, laser cutting was performed for thin silicon wafer as a new dicing technique to conventional diamond blade dicing. Nano-, pico- and femtosecond laser were used to cut substrates in order to investigate the dependence of the flexural strength on the pulse width and the irradiated laser energy. As a result of that, the average strength of the diced wafer with the femtosecond laser was about three times larger than that with the nanosecond laser. In the case using the femtosecond laser, moreover, the minimum strength was about three times as large as that of the conventional blade dicer.

Key words: femtosecond laser, laser ablation, dicing, thin silicon wafer, flexural strength

1. 緒 言

シリコンウエハのダイシング加工は集積回路パターンの形成を終えたウエハを個別のチップに切り分ける工程であり、現在広く用いられている工法としてブレードダイシング法が挙げられる。しかし、この工法は薄刃のダイヤモンドブレードによる切削加工であるため、チップングやクラックといった表面欠陥の発生が避けられず、チップの機械的強度が大幅に低下することが知られている。それでもチップ強度はこれまで大きな問題にはならなかった。その理由は、平面寸法に対する厚さが割れない程度に確保できていたためである。ところが近年では、SiP(System in Package)工法を用いる LSI や IC カード用チップで、従来 $300\mu\text{m}$ 程度で使われていたものが $100\mu\text{m}$ にまで薄厚化されてきた。厚さは強度に 2 乗で効くため、 $1/3$ に薄厚化されたチップは $1/9$ の曲げ荷重で破壊してしまうことになる。このため、薄厚化されたチップのぜい弱性が歩留りと信頼性の観点から重要な問題となっている。なおかつ、チップ薄厚化に対するさらなる要求は強く、最近では $20\sim 30\mu\text{m}$ 厚に対応できる加工法が求められている。

このような薄厚化の潮流は、非接触加工の特性が生かせるレーザダイシングに有利な状況といえる。しかし、従来のナノ秒レーザでは、溶融したシリコンが再凝固する際に生じるストレスによるマイクロクラックの生成が問題になる。すなわち、HAZ(Heat Affected Zone)の影響が、チップングと同様に強度低下を招くことが予想される。そこで、超高速アブレーションプロセスによる非加熱加工が期待できるフェムト秒レーザに注目した。一般に、レーザの光電場で励起された電子はピコ秒程度

で余剰エネルギーを格子系に放出し緩和に至るが、この遷移よりもレーザのパルス幅が短い場合は、格子系加熱後に起こるさまざまな状態変化の前にレーザエネルギーの注入を完了させることができる。つまり、レーザは高いエネルギー効率で照射部位だけを高温高密度状態に変化させることができ、この微小領域のみを精密に除去することができる。余分な熱の散逸が目的外の不必要な HAZ の発生を招き、材料強度や加工品質を大きく低下させるが、フェムト秒レーザによるアブレーション加工は HAZ を無視できる程度に抑えることが可能である^{1)~3)}。

そこで本研究では、フェムト秒からナノ秒間の異なるパルス幅のレーザを用いて、薄厚シリコンウエハのダイシング加工を行い、個片化したチップの三点曲げ試験と外観観察からレーザパルス幅が抗折強度と切断品質に及ぼす影響を検討した。

2. シリコンチップの抗折強度

半導体集積回路に用いられるシリコンウエハは、イレブンナインの純度と高い均質性を有する實際上無欠陥ともいえる単結晶材料である。機能材料としての有用性は無論のこと、ヒステリシスや疲労寿命などの機械的特性に優れることから、マイクロアクチュエータや光スイッチなどの、MEMS の構造材料としても盛んに利用されている。また、この高い結晶性をもつシリコンから、ウェットエッチングを用いて作成した厚さ $30\mu\text{m}$ のマイクロ幅の微小はりは、試験試料中の最小値でも鋼の降伏応力に匹敵する 2GPa の抗折強度が得られ、最大で 8GPa の強度が得られるという⁴⁾。本来シリコンは鋼に匹敵する優れた高強度材料といえよう。しかし、半導体製造工程で扱うシリコンチップにはこのような高強度性は期待できない。割れやすく非常にぜい弱である。実際、ブレードダイシングで個片化したミリ幅のシリコンチップの抗折強度は、 500MPa 程度の平均強度しか得られず強度のバラツキも大きい⁵⁾。

* 原稿受付 平成 16 年 6 月 2 日

** 正 会 員 NEC マシナリー(株) (草津市南山田町 85)

*** NEC マシナリー(株)

† 宮崎大学工学部 (宮崎市学園木花台西 1-1)

Fig.1 Micrograph of edge chipping by blade dicing

この主な原因は、ぜい性材料の破壊起点となるチッピングと呼ばれる表面欠陥が、ダイシング工程を中心とする製造過程で導入されることにある。図1に厚さ $63\mu\text{m}$ のシリコンウエハをブレードダイシングで個片化したときの、典型的なチッピングの発生状態を示す。ブレードダイシングではエッジ部分に数多くのチッピングが認められる。

3. シリコンのアブレーション率

レーザーアブレーションは高強度の短パルスレーザーを集光照射することで、固体材料の表面を瞬時に蒸散させる加工法である。また、アブレーション率は1パルスのレーザー照射で除去できる加工量を意味する。図2に、フェムト秒からナノ秒のレーザーを $f40\text{mm}$ レンズで鏡面シリコンに集光照射したときのアブレーション率と照射エネルギーの関係を示す。同図において、フェムト秒レーザーに見られる、 $E=30\mu\text{J/pulse}$ 付近から起こるアブレーション率の低下は、Air-Breakdownによる集光性の悪化に起因する現象である。すなわち、精密加工で利用可能な照射エネルギーは、通常雰囲気においてはこれを越えることは出来ない。

一方、低照射エネルギー側に目を向ければ、レーザーパルス幅がより短いほどアブレーションしきい値が低エネルギー側にシフトしていくことがわかる。つまり、ナノ秒レーザーでは $E=3\mu\text{J/pulse}$ 以下のエネルギーでレーザーを照射しても、材料に対してなんら形状変化を与えることはできない。しかし、フェムト秒レーザーであれば、 $E=0.1\mu\text{J/pulse}$ でもそれが可能であり、超高速性と高強度性を有するフェムト秒レーザーならではの精密微細加工が期待される加工領域である。

4. 実験方法

レーザー加工において、励起波長はエネルギー吸収やエネルギー密度に関する重要な要素である。よって、フェムト秒からナノ秒の各パルス幅のレーザーは、同一の波長であることが望まれる。そこで今回の実験では、チャープパルス増幅過程で生じる、同一のキャビティで発振するレーザー光を使用した。

まず、フェムト秒レーザー(パルス幅: $\tau=120\text{fs}$, 中心波長: $\lambda=800\text{nm}$, 繰り返し周波数 1kHz)は、チャープパルス増幅を有するチタンサファイアレーザーシステムを通常に動作させ発生させた。また、ピコ秒レーザーは、同システムでチャープパルス増幅を終えた $\tau=200\text{ps}$ のレーザーを、コンプレッサの手前から強制的に取り出した。さらに、ナノ秒レーザーは、増幅器内の緩和発振をポッケルスセルの動作時間で切出すことで、 $\tau=10\text{ns}$ のレーザー光を生成した。なお、この方法で発生させたレーザーはビーム横モードや発散角・繰り返し周波数も同等になる。

Fig.2 Dependence of the ablation rate on pulse energy

$\lambda=800\text{nm}$, REP=1kHz, N=16shot

Fig.3 Test method for measurement of chip strength by mean of 3-point bending

よって、加工結果はパルス幅の及ぼす影響のみを強く反映する。また、試料には、裏面研削で $63\mu\text{m}$ まで薄厚化した6インチの鏡面シリコンウエハ(100)を使用した。ウエハの保持は粘性シートを使用し、レーザーは鏡面側に $f40\text{mm}$ レンズを用いて集光照射した。ビーム走査速度は 0.3mm/sec の一定速とし、ウエハが完全切断されるまでレーザーを重複照射した。照射エネルギーは、図2において、いずれのパルス幅でもアブレーションが起こる $E=4\sim 20\mu\text{J/pulse}$ とした。なお、照射エネルギーは集光レンズ手前におけるパワーメータ(407A, Spectra-Physics)の測定値とする。その他の実験条件については次のとおりである。

切断チップ寸法: $3\times 3\text{mm}$

焦点位置: 試料表面に固定

偏光: 切断方向に垂直

ビームモード: TEM_{00}

ステージ分解能: $0.1\mu\text{m}$

加工雰囲気: 大気中(アシストガス未使用)

一方、個片化したシリコンチップの強度評価は、SEMIスタンダードで定義される静的三点曲げ試験法⑨を用いた。その模式図を図3に示す。なお、試料数は25個、テスト速度は 1mm/min とし、評価面は裏面研削の影響を避けるためチップ表面側とした。

5. 実験結果と考察

5.1 照射エネルギーと加工速度

フェムト秒レーザーの集光照射で切断溝が形成される過程について、 $E=4\mu\text{J/pulse}$ を例に挙げて示す。図4は、レーザーの重複照射が1～4scanの間に形成された切断溝の断面形状である。1scan目の溝形状は、レーザー強度分布に似たガウス形状で、溝幅と深さは共に $10\mu\text{m}$ 程度である。なお、この時点で形成された表層の溝幅は、走査を重ねても広がらずほぼ一定幅に保たれる。そして、2scan目で、切断溝は約 $20\mu\text{m}$ の位置まで到達し、先端部分が $5\mu\text{m}$ 程度のテーパを形成する。3scan以降は、テーパ形状を維持したまま下部の溝幅でほぼ垂直に加工が進み30scanで完全切断に至る。また、上部のテーパが形成される間の加工速度に比べて、その後の加工速度は加工深さに応じて低下していく。このような切断溝の形成過程は、レーザーが切断面で多重反射を起こし底面に再収束するウォールフォーカス効果で説明できる。すなわち、切断溝内に照射したレーザーエネルギーの大半は、切断面で反射し底面に伝送される。このため、重複照射を重ねても、上部のテーパ部分はほとんど形状変化しない。

同様に、 $E=8\mu\text{J/pulse}$ のナノ秒やピコ秒レーザーの切断溝の形成過程も上記と大きく変わらない。しかし、加工速度に関しては、初期の速度は比較的速いが深度が深くなると遅くなる。この様子を図5に示す。ところで、 $E=4\mu\text{J/pulse}$ の場合フェムト秒レーザーなら30scanでウエハを完全切断できたが、ナノ秒やピコ秒レーザーでは100scanの重複照射を繰り返しても、切断溝が貫通する手前で加工が停滞し完全切断には至らなかった。加工が進まない直接的な原因は、溝内に残留したデブリによってレーザーが底面に到達できないためである。言い換えれば、フェムト秒レーザーの場合は、アブレーションルームの噴出速度が速くデブリの排出能力が高いこと、切断面の反射率が比較的高くウォールフォーカス効果がより顕著になることが、加工速度を高める要因と考えられる。なお、それぞれの照射エネルギーでウエハの完全切断に要した走査回数を表1に示す。アブレーション率をもっと小さいフェムト秒レーザーが、加工速度の面では優位になっていることがわかる。

5.2 レーザパルス幅の加工品質に及ぼす影響

比較的加工速度が速い $E=10\mu\text{J/pulse}$ 以上の加工条件では、パルス幅を問わず裏面にはく離欠陥が発生した。例として図6に、 $E=10\mu\text{J/pulse}$ のフェムト秒レーザーで生じた裏面欠陥を示す。欠陥の底面径が約 $10\mu\text{m}$ の円すい形状であることから、完全切断される直前の極薄状態のシリコンが、アブレーションルームの噴出反跳力に抗しきれないことがはく離の原因と考えられる。一般にウエハ裏面は、研削加工で導入される無数の転位とマイクロクラックからなる加工変質層の残留で、欠けや割れを生じやすい。このため、必要に応じてエッチング等でこれを完全除去することも行われる。

図7に、各パルス幅でウエハを完全切断したときの切断溝の断面形状を示す。これらは、表1の加工条件において、最も良好な切断品質が得られたものである。図のように、マクロ的な外観形状から明確な違いを見出すことは困難である。ただ、ナノ秒レーザーは他のレーザーに比べて切断溝が一回り小さく、切断溝エッジの溶融突起の盛り上がりがやや大きい。また、切断溝の周囲にHAZと思われる表面ひずみが認められる。

一方、明らかな差異は切断面の表面状態に見られる。

Fig.4 Cross section image at each number of scanning by femtosecond laser

Fig.5 Dependence of cutting depth on number of scanning

Fig.6 Micrograph of destruction on rear side by laser dicing

Pulse energy $E\ \mu\text{J/pulse}$	Processing conditions for laser dicing		
	Number of scanning		
	120fs	200ps	10ns
4	30	—	—
8	20	30	30
10	8	20	20
20	8	8	8

図8は、三点曲げ試験で評価される表面エッジのFE-SEM像だが、ナノ秒レーザーの切断面には明らかな溶融の形跡が認められる。これにより表面粗さは最大高さ R_z で約 $7\mu\text{m}$ となる。しかし、フェムト秒レーザーの場合は $R_z=0.4\mu\text{m}$ と平滑性が格段に高い。また、 R_a もナノ秒レーザーに比べて6倍強の平滑性が得られる。なお、ピコ秒レーザーの表面粗さはこの中間にあり、比較的滑らかな切断面が得られている。以上の結果を表2にまとめる。

(a) Dicing by femtosecond laser

(b) Dicing by picosecond laser

(c) Dicing by nanosecond laser

Fig.7 Cross section image of chasm using different pulse widths laser

Table2 Characteristic processing dimension by laser dicing

	120fs	200ps	10ns
Prominence μm	≤ 1	≤ 2	≤ 3
Front cutting width μm	$\div 10$	$\div 10$	$\div 8$
Rear cutting width μm	≤ 5	≤ 4	≤ 3
Ra μm	0.048	0.069	0.299
Rz μm	0.430	1.150	6.880

(a) Dicing by femtosecond laser

(b) Dicing by picosecond laser

(c) Dicing by nanosecond laser

Fig.8 FE-SEM micrographs of cutting edge using different pulse widths laser

5.3 レーザパルス幅の抗折強度に及ぼす影響

図9に表1の条件で個片化したチップの抗折強度を示す。まず、抗折強度のパルス幅依存性については、フェムト秒とナノ秒レーザー間に、いずれの加工条件においても平均強度に2~3倍の大きな開きが見られる。また、ピコ秒レーザーはその中間付近の値である。ここで、非定常状態における物質中の熱の散逸量を熱拡散長: L で求めれば⁹⁾,

Fig.9 Dependence of flexural stress at break on pulse energy

$$L = \sqrt{\frac{\kappa_T}{\rho c_p} \cdot \tau} \quad (1)$$

$T=300\text{K}$ として、 κ_T 熱伝導率 $=156\text{W/mK}$ 、 ρ :密度 $=2329\text{kg/m}^3$ 、 C_p 熱容量 $=0.715\text{kJ/kgK}$ から l 、 τ をレーザー照射時間として、120fsで $0.003\mu\text{m}$ 、200psで $0.137\mu\text{m}$ 、10nsで $0.968\mu\text{m}$ となる。切断面に導入される溶融層の厚さはこの熱拡散長に依存し、溶融で生じる熱ひずみによりマイクロクラックが形成される。マイクロクラックそのものを直接観察することは困難であるが、き裂状欠陥のマイクロクラックは、ぜい性材料であるシリコンチップの破壊強さを決定づけるため、図9のように抗折強度はパルス幅に依存して低下する。一方、フェムト秒やピコ秒レーザーでは、抗折強度の照射エネルギー依存性が顕著であり、照射エネルギーの増加に応じて抗折強度は低下する。これは、アブレーションで駆動される衝撃波やブルーームの反跳力・アブレーションプラズマが、表面欠陥を形成するためと考えられる。ナノ秒レーザーの場合は、このような二次的な要因と同等以上に直接的な熱影響が抗折強度を大きく低下させる。

最後に、各パルス幅のレーザーダイシングで得られる抗折強度と、ブレードダイシングで得られた抗折強度を図10にまとめる。なお、ブレードダイシングにおいても、レーザーダイシングと同一ロットの $63\mu\text{m}$ 厚シリコンウエハ(100)を試料に用いた。そして、同様に $3\times 3\text{mm}$ に個片化したチップの表面側で抗折強度を評価した。これによれば、フェムト秒レーザーダイシングのチップ強度は、ブレードダイシングに比べて平均強度で約1.3倍、最小強度で約3倍の強度となる。製造工程で発生するシリコンチップの割れやカケは最小強度のチップで発生する。それゆえ、最小強度の向上は大きな意味を持つ。このことから、フェムト秒レーザーダイシングは、今後より薄厚化していくシリコンウエハの個片化に有効な加工法といえる。

Fig.10 Dependence of flexural stress at break on processing methods

6. 結 言

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) フェムト秒レーザーダイシングは、薄厚シリコンチップの抗折強度の向上に有効である。ナノ秒レーザーによる平均強度やダイヤモンドブレードによる最小強度と比較して、約3倍の抗折強度が得られた。
- (2) レーザパルス幅の短縮に応じて抗折強度は向上するが、過度のレーザーエネルギーの注入は抗折強度を低下させる。
- (3) レーザパルス幅の短縮に応じて HAZ の低減が可能となり、切断面の表面粗さやエッジ溶融突起の盛り上がりを抑えた良好な切断品質が得られる。
- (4) 深度の深い切断溝では、ナノ秒やピコ秒レーザーよりもフェムト秒レーザーの加工速度が速い。

参 考 文 献

- 1) B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. v. Alvensleben, A. Tünnermann: "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids", Appl. Phys. A63, (1996) 109.
- 2) P.S.Banks, B.C.Stuart, M.D.Perry, M.D.Feit, A.M.Rubenchik, J.P.Armstrong, H.Nguyen, F.Roeske, R.S.Lee, B.R.Myer, and J.A.Sefcik: Femtosecond laser machining, Conference on Lasers and Electro-Optics, 6, OSA Technical Digest Series (1999) 510.
- 3) R.Stoian, M.Boyle, A.Thoss, A.Rosenfeld, D.Ashkenasi, G.Korn, E.E.B.Campbell, and I.V.Hertel: Ultrafast laser ablation of dielectrics employing temporally shaped femtosecond pulses, Proceedings of SPIE, Second International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 4426, (2001) 78.
- 4) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 井上茂道, 藤井秀敏: Si 単結晶マイクロエレメントの破壊・疲労特性評価と水環境効果, 日本機械学会論文集, A 編, 62, 596, (1996), 978.
- 5) 江刺正喜: マイクロマシン, 産業技術サービスセンター, (2002) 213.
- 6) SEMI International Standards: SEMI G86-0303, SEMI Japan, (2003) 1.
- 7) レーザー学会編: レーザープロセッシング, 日経技術図書, (1990) 215.
- 8) 永井治彦: レーザープロセス技術, オプトロニクス, (2000) 65.
- 9) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック, 養賢堂, (1990) 231.