レーザーオリジナル

レーザーアブレーション加工時における
デブリー付着特性とその除去の実用化

折井 靖光*・宮本 勇**

(1994年11月4日 受理)

Characteristics of Debris Formation During Laser Ablation and a
Practical Method for Removing the Debris

Yasumitsu ORII* and Isamu MIYAMOTO**

(Received November 4, 1994)

The diameter of the debris deposited by KrF excimer laser ablation of polyimide has been measured as a function of gas pressure and laser fluence in different ambient gas species including He, N₂, air, O₂, and Kr. It was shown that the amount of the debris is decreased in ambient gases with low masses or at low pressures where generation of the blast wave can be suppressed. The relationship between the measured debris diameter and the shape of the luminous plume produced by ablation of polyimide was also investigated. A XeCl excimer laser was successfully implemented in thin film line deletions of a multichip carrier used in high-performance mainframe processors. The amount of the debris on a wire bond pad nearby laser deletion was quantified as an ultrasonic power for wire bonding. The helium gas purge condition was thus optimized to reduce the debris.

Key Words: Excimer laser, Ablation, Polyimide, Debris, Blast wave

1. 緒言

近年、新しい微細加工ツールとして、紫外領域で発振するエキシマレーザーが注目を浴びている。このレーザーはとくに高分子材料の微細加工において優れた特性を示し¹⁾、新しい生産技術の方向を示す可能性を秘めている。

このようなエキシマレーザーの加工特性に注目し、生産技術へ適用した代表的な例が、汎用

大型コンピューターの心臓部であるマルチチップ・モジュール(チップが最大121個搭載可能なマルチチップ・パッケージ)の多層セラミックス基板の薄膜製造工程²⁾および技術変更のための配線切断工程である。配線の切断工程においては、従来の多層セラミックス基板では、ルビーレーザーを使用していたが、新しい基板では、最上層部が可視域で吸収係数の小さいポリイミドの薄膜層で構成され非常に微細な配線

* 日本アイ・ビー・エム(株)野洲工場 (〒520-23 滋賀県野洲郡野洲町大字市三宅800番地)

** 大阪大学工学部生産加工工学教室 (〒565 吹田市山田丘2-1)

* Yasu Plant, IBM Japan, Ltd. (800 Ichimiya, Yasu-cho, Yasu-gun, Shiga 520-23)

** Department of Welding and Production Engineering, Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565)

層であるために、エキシマレーザーを採用することになった³⁾。ポリイミドのような高分子材料は紫外線の吸収係数が大きいのでアブレーション加工による熱影響がほとんどなく、加工深さの高精度な制御ができ、今回のような薄膜層を要する高密度な多層セラミックス基板の配線切断工程において最適な加工方法であるといえる。

その一方で、この種のアブレーション加工では加工部周囲に微細な分解除去物質が付着する問題があり、高密度化が進むマルチ・チップ・モジュールのパッケージ基板において、実用上大きな弊害となっている。以下ではこの付着物をデブリー(Debris)と呼ぶことにするが、現在までポリマーを中心にその付着特性ならびに低減法に関していくつか報告されている。特に、大気中でポリイミドをアブレーション加工すると、加工周囲に黒い物質(炭素)が付着する⁴⁾。このようなデブリー量を低減する方法として、静電気を用いる収集⁵⁾、赤外線レーザーにより付着したデブリーの排除⁶⁾、局所真空ノズルによる吸引⁷⁾などが提案されているが、実用上不十分である。また、Kuperらは、Heのような分子量の小さいガス雰囲気中で加工するとデブリーを減らすことができることを示し⁸⁾、Singletonらは、酸素雰囲気中でポリイミドを加工すると、発生するデブリーを二酸化炭素などのガスにすることが可能であるとしており⁹⁾、両者とも加工雰囲気がデブリー付着を低減する上で重要な要素であることをブラスト・ウェーブ理論を使って説明している。

本論文では、雰囲気ガスや真空度などの加工雰囲気条件に加えて、レーザーフルエンスをパラメーターとして加え、ポリイミドにおけるデブリー付着範囲の測定及び加工時に発生するブルームの撮影を行い、デブリー付着範囲とブルームの形状との関係を明らかにした。また、ブラスト・ウェーブ理論を使って、デブリー付着を低減する加工条件を総合的に評価した。この結果をもとに、製造工程に適したデブリーを減らす最適のガスパージの方法を考案し、多層

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental apparatus for excimer laser ablation.

セラミック基板の切断工程に取り入れ実用化に成功した。

2. ポリイミド加工時のデブリー付着特性

2.1 実験方法

Fig. 1に示す装置を使って、雰囲気ガス、真空度、1パルス当りのフルエンスをパラメーターとして、KrFエキシマレーザー(波長248 nm; パルス幅34 ns FWHM, Lambda Physik LPX210 icc)をマスク投影することによりポリイミド(カプトン)のアブレーション加工を行った。雰囲気ガスは、He, N₂, 空気, O₂, Arの5種類、フルエンスは1 J/cm², 8 J/cm²とし、真空度は0.1–700 Torr(13–93,325 Pa)の間で変化させた。加工穴径は400 μmとし、照射パルス数は、フルエンスに応じて加工深さが同じになるように1 J/cm²で380で、8 J/cm²で120と変化させた。いずれの場合も繰り返し数は2 ppsである。レーザー加工中に発生するブルームの状況は35ミリカメラで撮影した。加工部周辺の試料表面を金属顕微鏡を用いて写真撮影し、変色領域をデブリーの付着範囲と定義した。

Fig. 2 Debris diameter measured with a microscope ($\times 50$): (a) N_2 ambient, 700 Torr, $1 J/cm^2$; (b) N_2 ambient, 100 Torr, $1 J/cm^2$; (c) N_2 ambient, 0.1 Torr, $1 J/cm^2$.

2.2 デブリーの付着特性

2.2.1 付着範囲

大気圧下ではデブリーの付着領域の輪郭は Fig. 2(a)に示すように極めて明瞭であり、エキシマレーザーによって分解・蒸発した微粒子を限られた領域に閉じこめる力が作用することが示唆される。この輪郭は雰囲気ガス圧が100 Torrでも依然として明瞭であるが、10 Torrと更に低下すると次第に不明瞭となる。

種々の雰囲気ガスに対する真空度とデブリーの範囲の関係を Fig. 3, Fig. 4に示す。フルエンスが $1 J/cm^2$ のときは、空気、 N_2 、Ar雰囲気

Fig. 3 Debris diameter plotted against ambient gas pressure (Laser fluence: $1 J/cm^2$).

Fig. 4 Debris diameter plotted against ambient gas pressure (Laser fluence: $8 J/cm^2$).

いずれの場合も1–10 Torrまでは、真空度を上げるにつれ、デブリーの範囲が増加している。1–10 Torrでは、デブリーの範囲はかなり広がるが、デブリーの色はかなり薄くなりデブリーの境界もわかりにくくなる。0.1 Torrまで真空度を上げると、デブリーの付着範囲はかなり小さくなる。He雰囲気では、全体的にデブリーがほとんど認められない状態である。O₂雰囲気でも、200–500 Torrにおいて、デブリーがほとんど形成されない非常にきれいな加工が得られた。これはポリイミドの分解物である

カーボンが、 O_2 と反応して、 CO_2 となるためである。 O_2 雰囲気中で、真空度が100 Torr以下になると逆にデブリーが増えているのは、分解生成物Cと O_2 の反応が期待できなくなるためである。

一方、 $8 J/cm^2$ の時は、空気、 N_2 、Ar雰囲気においてほぼ $1 J/cm^2$ の時と同じ傾向を示すが、 $1 J/cm^2$ のときより高いガス圧力(10 Torr以下)でデブリーの範囲が減少する方向へ向かう。また、空気は、 N_2 、Ar雰囲気と比べて、デブリーの範囲が小さいこともわかる。これも前述したとおりで、空気雰囲気が O_2 を含むため、一部デブリーが CO_2 となるためと考えられる。He雰囲気では、600–700, 10–100 Torrを除いては、ほぼデブリーがない状態である。 O_2 雰囲気では、200–700 Torrにおいて、デブリーの無い非常にきれいな加工が実現できており、 $1 J/cm^2$ のときと比べて、低い真空度(700–600 Torr)でもデブリーがなくなっている。

2.2.2 付着重量

アブレーション加工前後の試料の重量変化を測定することにより、デブリー量を求めた。いま、アブレーションによって形成された穴の体積を V 、アブレーション加工による質量減少を M とすると、デブリーの付着割合 η は(1)式より求められる。

$$\eta = 1 - M/V\rho \quad (1)$$

ただし、 ρ はポリイミドの密度である。実験により除去された穴の表面径、底面径、及び深さを顕微鏡にて測定し V を求めた。尚、穴の内部にもデブリーは付着し、この体積 V はデブリーを含んだものになるが、付着全面積に対して、レーザー照射部分は小さいため、その量は微量として無視してよい。また、超精密天秤(読取り精度 $0.1 \mu g$)を用いて M を測定した。(1)式により、除去されたポリイミドのうちどれだけの割合がデブリーとなってポリイミド表面に付着しているのかがわかる。フルエンス $6 J/cm^2$ におけるデブリー付着率と真空度の関係をFig. 5

Fig. 5 Yield of debris on a polyimide surface as a function of ambient pressure.

に示す。大気圧では、除去されたポリイミドのうち約60%がデブリーとして周囲に付着していることがわかる。一方、0.01 Torrに真空度を上げると、わずか2.5%だけがデブリーとして周囲に付着し、ほとんどが加工表面には戻ってこないことがわかる。以上より、50倍の顕微鏡で見えないようなデブリーは重量的にも無視してよく、デブリーの顕微鏡観察によりデブリーの有無もほぼ評価することができることがわかった。

2.3 プルーム観察

Fig. 6に、真空度を変えて空気中で加工した時のプルーム写真を示す。このとき撮影露光時間を0.5秒(レーザーパルス繰返し数: 2 pps)としたので、1パルスを照射したときにプラズマプルームが発生から消滅にいたる全状況が積算された像が撮影される。プルームは、フルエンスが高いほど大きくなり観察が容易となるので、ここでは、フルエンスが $8 J/cm^2$ のときのプルーム写真のみを示す。300 Torr以上では、プルームの底面が加工物に接触しており、200 Torrになると、プルームが加工面から少し浮いた状態となる。更に真空度を上げると一方向に噴出するようになる。プルームの形態とデブ

Pressure (Torr)					
700	300	200	100	10	0.1

Plume Width (micron)					
2,400	3,500	3,800	4,400	8,500	-
Debris Diameter (micron)					
1,670	2,360	2,400	3,000	3,350	*

(*) No measurable debris at 50x microscope

Fig. 6 Images of plume in the ablation of polyimide at various pressures (ambient: air).

Gas Species					
He	N ₂	Air	O ₂	Ar	Kr

Plume Width (micron)					
2,400	2,600	2,600	2,400	2,600	2,600
Debris Diameter (micron)					
1,320	2,480	1,670	*	2,537	2,315

(*) No measurable debris at 50x microscope

Fig. 7 Images of plume of polyimide in various ambient gases (700 Torr).

Fluence (J/cm ²)					
8.0	5.0	4.5	3.0	2.0	1.5

Plume Width (micron)					
2,600	2,100	2,100	1,800	1,500	1,200
Debris Diameter (micron)					
1,650	1,950	1,890	1,710	1,350	1,280

Fig. 8 Images of plume of polyimide at various laser fluences (ambient: air).

リー付着状況の間には明らかに相関がありブルーーム底面が試料面に接触しているときはデブ

リーの輪郭が明瞭であるが、浮上すると次第に不明瞭になり、噴出状態ではほとんど観察できなくなる。

Fig. 7に種々の雰囲気ガス中での700 Torr, 8 J/cm²におけるブルーームの写真を示す。ブルーームのとり形状は、ガスの種類、真空度、フルエンスに応じて、大きく3つのタイプに分類できる。一つは、台形状をしたもので、空気、O₂中での加工がこれに相当し、次は、台形状をしたブルーームの上部にフレイム(炎)が現れるもので、N₂, Ar, Krの場合である。最後は、ブルーームが上方向に伸びる卵型で、He中での加工や真空度を高くした時がこれに相当する。デブリーの量は、フレイムつき台形型、台形型、卵型の順となる。空気中でも、フルエンスを下げれば、Fig.8に示すように上部にフレイムが現れる。

Fig. 8にフルエンスを変えて760 Torrの大気中で加工した時のブルーームの写真を示す。フルエンスが低下するとブルーーム上部にフレイムが顕著に現れるてくることがわかる。フルエンスを増大すると、デブリーの範囲も大きくなっていくが、更にフルエンスが増大して上部にフレイムが現れなくなると、逆にデブリーの範囲は小さくなる。本研究で行った実験の最大フルエンスは8 J/cm²であるが、更にフルエンスを上げると、デブリーがほとんどない状態が実現できると思われる。

2.4 プラスト・ウェーブ半径とデブリー半径との比較

エキシマレーザーをポリイミドに照射した時に発生する衝撃波は、Srinivasanらによって研究されている¹⁰⁾。この衝撃波は原子爆弾のように小さな領域に非常に大きなエネルギーが投与されたときに発生する非定常の衝撃波で、プラスト・ウェーブと呼ばれている。プラスト・ウェーブの半径 R の最大値は次式で与えられる¹¹⁾、それ以降は音波にスローダウンする。

$$R_0 = (E_0/P_0)^{1/3} \quad (2)$$

R_0 : プラスト・ウェーブのフロントを駆動する圧力とその前方の雰囲気圧力と等しくなる時のプラスト・ウェーブの半径

E_0 : レーザーエネルギー

P_0 : プラスト・ウェーブ前方の雰囲気ガスの圧力

(2)式により求められた R_0 とデブリーの付着半径の測定値 R_a との割合(R_a/R_0)をFig. 9に示した。デブリー付着範囲は R_0 より幾分小さく、Arのように重いガス中では、200 Torr以上では、 R_a/R_0 はほぼ一定で、 R_0 の約70%の範囲にデブリーが広がっていることがわかる。このことはプラスト・ウェーブ内に閉じこめられた分解生成粒子が互いに衝突することによって、デブリー粒子に成長することを示唆している。しかし、100 Torr以下になると両者の比例関係は崩れ、付着範囲は次第に狭くなる。また、空気、 N_2 などの比較的軽い雰囲気気ではArより高い300 Torrで比例関係が崩れている。

デブリー粒子が、プラスト・ウェーブ内で成長すると考えると、ガス密度がある値より低くなると、アブレーション加工中にプラスト・ウェーブの形成が阻止されるものと考えられる。特にHeのような低質量ガス中では、大気圧近辺においても R_a/R_0 は一定ではなくてプラスト・ウェーブが形成されにくいものと推察される。

Dyerらによるとレーザー照射後ただちにプラスト・ウェーブが形成されるのではなく、あ

Fig. 9 The ratio of debris diameter measured with a microscope to diameter of blast wave calculated by equation (2) as a function of ambient pressure.

る時間の遅れがある。すなわち、レーザーアブレーション加工によって除去された質量 M_0 に比べて排除される雰囲気ガスの質量が大きくなったとき、プラスト・ウェーブが形成され、次式がその形成条件である¹²⁾。

$$R \gg (3M_0/2\pi\rho_0)^{1/3} \quad (3)$$

ただし、 R はプラスト・ウェーブの半径、 ρ_0 は雰囲気ガスの密度である。すなわち、雰囲気ガスの密度が小さければ、プラスト・ウェーブは発生しにくく、上記の結果と一致している。なお、 O_2 に関しては、前述のように分解生成物と反応するので、この理論には従わない。

2.5 デブリーの低減法

以上の実験結果からプラスト・ウェーブを抑制すれば、デブリーを低減できることがわかり、Table Iにデブリーを少なくする方法をまとめた。これは、Korenらが提案しているデブリー付着のメカニズム¹³⁾と一致する。彼らは、プラスト・ウェーブの中心部分に生じる高温プラズマの放射冷却により負圧が発生し、それに伴う冷却波が試料面に向かう強いドライビング

Table I Debris reduction methods.

Methods to Reduce Debris	Relation to Blast Wave Theory Eq.(2): $R=(E_0/P_0)^{1/3}$, Eq.(3): $R >> (3 M_0/2 \pi \rho_0)^{1/3}$.
1 Ablation in Low Mass Molecular Gas Environment	$\rho_0 \rightarrow \text{Small (Eq.3)}$
2 Ablation in Vacuum Environment	$P_0 \rightarrow \text{Small (Eq.2)}$
3 Ablation at High Laser Fluence	$E_0 \rightarrow \text{Large (Eq.2)}$
4 Ablation in Oxygen Environment (in case of polyimide)	None

フォースを形成することによってデブリー粒子が試料表面に付着すると考察している。ブラスト・ウェーブを抑制するためには、(3)式より加工雰囲気中のガス密度 ρ を下げるのが最も効果的で、Table Iにおける(1)の方法で実現できる。この方法によりブルームは台形型から卵型へ変わる。ブラスト・ウェーブが発生してもその半径 R が大きいほどデブリー付着量を低減できることが実験結果よりわかっている。これは、 R が大きいほど衝撃波内の分解粒子密度が低下し、冷却波が抑制されるためと考えられる。(2)式によると R を大きくするには、雰囲気圧力を低くし、フルエンスを上げればよいことになり、Table Iにおける(2)、(3)の方法に相当する。この方法により、フレームつき台形型ブルームはフレームなしの台形型ブルームへ変わる。また、ブラスト・ウェーブが発生している状況で、もうひとつのデブリーを低減する方法は、Table Iにおける(4)の方法であり、発生した分解物を雰囲気ガスと反応させ、ガス化させる方法である。ポリイミドの場合、分解物はカーボンと考えられており、これが O_2 と反応して CO_2 となり、加工表面に付着するデブリーを大幅に減らすことができる。

3. 多層セラミック基板の配線切断工程への応用

3.1 工程の問題

ここで、実際の生産工程でデブリーがどのような問題を起こすのかを紹介する。汎用コンピュータに使われているマルチ・チップ・モジュールの多層セラミックス基板の薄膜層内の配線の切断にエキシマレーザーを使用している。この配線の切断とその後の工程であるワイヤリングにより、多層セラミック基板に技術変更を入れることが可能になる。配線の切断は、Fig. 10に示すようにポリイミド薄膜層と銅配線層を除去するものである。そのときの問題は、デブリーが近くのボンディングパッド上に付着し、それがその後工程であるワイヤーボンディングに対して悪影響を及ぼすことである。デブリーは主にポリイミドの分解物であるスス(炭素)と銅の酸化物である。Table Iに示したデブリーを減少する方法の中で(2)の方法は加工部をバキュームチャンバーに入れる必要があり、

Fig. 10 Microscope picture (a) and the schematic cross section (b) showing metal line deletion above an underlying polyimide film, achieved by means of a XeCl excimer laser; deletion width is 25 microns.

Fig. 11 Energy required for wire bonding.

装置が複雑になる欠点があり、またサイクルタイムの増加にもつながるので、製造工程には適さない。(4)の方法では、ポリイミドの分解物であるススを除去することは可能だが、パッド上への銅の酸化物の付着が増大し、ワイヤーの強度は弱くなる。以上から、フルエンスが与えられると(1)の方法が最も有効でありこれを採用することとした。その際、加工上部にガスバージ用のノズルを取り付け、分子量の小さいHeガスを吹き付けながら加工するという方法をとった。

3.2 デブリー量低減の評価

最適のガスバージ条件を決めるために、パッド上にデブリーが付着している状態でボンディングをするときに必要とされる超音波振動エネルギーを求めた。Fig. 11に示すように、ワイヤーボンディング時に付加される超音波振動のエネルギーを E_{TOTAL} とすると、(4)式が成立する。

$$E_{TOTAL} = E_{LASER} + E_{PAD} + E_{BOND} \quad (4)$$

Fig. 12 Schematic illustration of the experimental apparatus for debris amount evaluation.

ただし、 E_{LASER} はデブリーを除去するのに要するエネルギー、 E_{PAD} はパッド上の金属被膜などの汚れを除去するのに要するエネルギー、 E_{BOND} はワイヤーと金パッドを接合させるのに要するエネルギーである。 E_{LASER} をレーザー切断の有無によって測定される超音波振動エネルギー E_{TOTAL} の差として求めた。

この方法を使って、Fig. 12に示すように、ガスバージ条件を変えて、ワイヤーボンディングの強度を低下させない条件を求めた。(A)は、ガスバージをせずに、大気中で加工したもの、(B)は、15度のノズルの角度により、Heあるいは N_2 ガスをバージしたもの、(C)は、60度のノズルの角度により、Heガスをバージしたもの、(D)は、(C)の条件で、左からバキュームノズ

Table II Values of E_{LASER} evaluated.

Equipment	A	B	B	C	D	E
Environment	Air	He	N ₂	He	He	He
INDEX	100	Purge 81	Purge 120	Purge 9	Purge 67	Purge 12

ルで分解物などを吸い取るようにしたもの、(E)は、(D)の条件で、バキュームノズルの位置をガスパージのノズルより高い位置に設定したものである。尚、レーザーはXMR社製XeClエキシマレーザー微細加工装置を使用し、フルエンスはすべて15 J/cm²を使用している。

Table II に(A)の大気圧中での加工による E_{LASER} を100として、他の条件における E_{LASER} の値の相対値を示す。この結果から、パージガスは、N₂よりHeガスの方が E_{LASER} の低減効果が大きく、またガスパージのノズルの角度も、15度より60度のほうがよいことがわかった。これは、15度の角度でパージすると、Heガスが広い領域に広がり、加工上部にうまくHe環境がつかれないためであると考えられる。また、バキュームノズルに関しては、設置位置が難しく、Heノズルの近くに設定すると、He環境をつぶすことになるので、結果的に E_{LASER} が増大している。しかし、少し上に位置をずらしてやれば、よい結果が得られている。以上の結果より、ガスパージ法においては、如何にうまく加工上部にHeガスの静的な雰囲気を作るかが重要であることがわかる。

4. 結言

本研究ではエキシマレーザーによるポリイミドのアブレーション加工におけるデブリー付着特性を調べるとともに、多層セラミック基板の銅配線切断(ポリイミド層被膜)工程においてデブリー低減できるガスパージ法を検討した。得られた結果は以下のように要約できる。

(1) 雰囲気ガスの密度を下げて、プラスト・ウェーブを抑制することによりデブリー付着を低減できる。プラスト・ウェーブが発生する場

合には、その半径を大きくすることによりデブリー量が低減できる。また、ポリイミドの場合にはO₂雰囲気中での加工がデブリー低減に有効である。

(2) 実際の生産工程では、真空チャンバーの中の加工よりも大気中でのガスパージが現実的である。デブリー低減に有効なHeガスパージノズルを開発し、多層セラミック基板の銅配線切断工程に適用した。

謝辞

実験にご協力頂いた、日本アイ・ビー・エム福田勝彦氏、戸室満成氏および田村元一氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) R. Srinivasan and B. Braren: Chem. Rev. 89 (1989) 1303.
- 2) J. R. Lankard Sr. and G. Wolbod: Appl. Phys. A54 (1992) 355.
- 3) P. J. Brofman, S. K. Ray and K. F. Beckham: IBM J. Res. Develop. 36 (1992) 929.
- 4) R. Srinivasan, B. Braren and R. W. Dreyfus: J. Appl. Phys. 61 (1987) 372.
- 5) R. J. von Gutfeld and R. Srinivasan: Appl. Phys. Lett. 51 (1987) 15.
- 6) G. Koren and J. J. Dnelton: Appl. Phys. B45 (1988) 45.
- 7) D. E. Seeger and M. G. Rosenfield: L. Vac. Sci. Technol. B6 (1988) 399.
- 8) S. Kuper and J. Brannon: Appl. Phys. Lett. 60 (1992) 1633.
- 9) D. L. Sigleton, G. Parakevopoulos, R. S. Irwin: J. Appl. Phys. 66 (1989) 3324.
- 10) R. Srinivasan, K. G. Casey and B. Braren: Chemtronics 4 (1989) 153.
- 11) Ya. B. Zel'dovich and Yu. P. Raizer: *Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena* (Academic, New York, 1966).
- 12) P. E. Dyer and J. Sidhu: J. Appy. Phys. 64 (1988) 4657.
- 13) G. Koren and U. P. Oppenheim: Appl. Phys. B42 (1987) 41.