

エキシマレーザーによる銅薄膜の除去プロセス



林 秀明*, 宮本 勇**

Process of Thin Cu Film Removal by KrF Excimer Laser

Key Words: KrF excimer laser, Cu film, Removal process, Thermal conduction calculation, High speed photographing

1. はじめに

エキシマレーザーは波長・パルス幅が短く、金属材料への浸透深さが浅いため、CO₂やYAGなどの赤外レーザーに比べて、高精度で熱影響の非常に少ない加工が可能である。特にごく薄い表層加工に適しており、ポリマーおよびセラミックスの加工^{1,2)}、エッチング³⁾および薄膜の除去加工などの有望な応用として期待されている。

これまでの薄膜の除去加工はフォトリジストを用いるエッチングが一般的であるが、エキシマレーザーによるアブレーション加工はドライプロセスであり、しかも単一パルスで加工が完成するので大幅な工程の短縮が期待される。薄膜の除去加工には、Q-スイッチYAGレーザーやエキシマレーザーなどを用いて研究がなされてお

り^{4,5)}、点描画像や回路形成への応用が試みられている。いずれの応用においても精度の向上が望まれるが、そのためには薄膜の除去メカニズムの解明が不可欠である。

レーザーによる薄膜の除去メカニズムは多くの研究者によって研究されているが^{6~8)}、いずれもレーザー照射後の残存膜形態の観察や熱伝導解析からの推論であり実証されたものではない。除去現象を知るにはプロセスの観察が不可欠であるが、レーザーパルスが短いため、高速かつ高い空間分解能の撮影が必要なため、これまで現象観察の例は報告されていない。そこで、著者らは高い時間・空間分解能での現象観察と熱伝導解析により薄膜の除去メカニズムを明らかにしたので報告する。

2. 実験方法

透明アクリル (PMMA) 基板上にイオンスパッ



* Hideaki HAYASHI
1972年11月17日生
1995年大阪大学工学部生産加工工学科卒業
現在、大阪大学大学院工学研究科生産加工工学専攻修士課程在学中 (宮本研究室)
TEL 06-879-7535



** Isamu MIYAMOTO
1941年2月10日生
1971年大阪大学大学院工学研究科溶接工学専攻博士課程修了
現在、大阪大学工学部、生産加工工学科、教授、工博、加工基礎学
TEL 06-879-7533
FAX 06-879-7533
E-Mail miyamoto@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

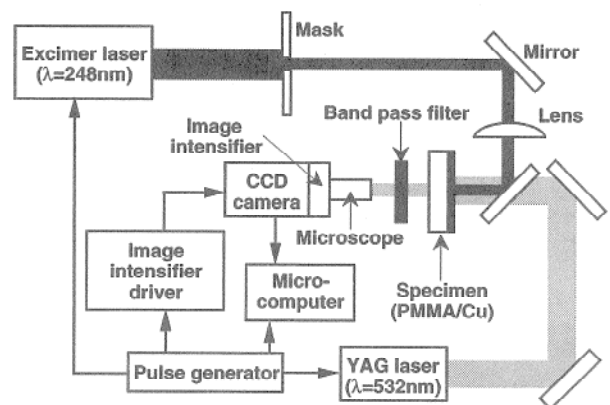


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup for excimer laser machining thin metallic film.

タにより蒸着したCu薄膜(膜厚0.15~0.6 μm)を試料として用いた。Fig. 1に示した実験装置により大気中にてシングルショットのKrFエキシマレーザ(波長:248nm,パルス幅:37ns)を照射してCu薄膜を除去した。試料の表側から照明用YAGレーザ(第2高調波,波長:532nm)を照射し,PMMA基板の裏面へ透過するYAGレーザ光を,高感度イメージインテンシファイアを用いてCu薄膜の除去プロセスを高速撮影した。

3. Cu薄膜の除去特性

正方形のマスクを用いて均一にエキシマレーザを照射し除去した薄膜の形態を光学顕微鏡によって観察した。フルエンスが低いと薄膜は完全に除去されないが,適正に選ぶとFig. 2に示すように,Cu薄膜はシングルショットでクリアに除去され,その周辺に熱影響はみられない(a)。このとき少なくとも2~3 μmの寸法精度が得られる。フルエンスが過大になると

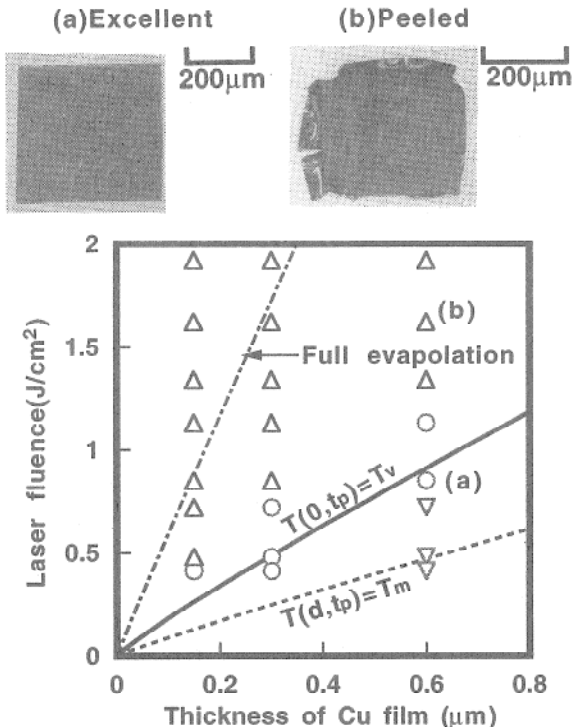


Fig. 2 Classification of laser machining quality at various fluences and film thicknesses. Solid and dotted lines indicate calculated laser fluence to heat Cu film up to $T(0, t_p) = T_v$ and $T(d, t_p) = T_m$ respectively. (O: excellent, x: peeled, ▽: partially removed)

除去領域は広がり,極端なときにはビーム照射領域の周辺で薄膜の剝離を生じる(b)。図には,良好,剝離の発生,部分的除去となる膜厚とフルエンスの条件を示している。良好領域のフルエンスは,膜厚の増大に伴いほぼ直線的に増加することがわかる。

PMMA基板上に蒸着したCu薄膜の温度上昇は次式で与えられる⁵⁾。

$$T_1(x, t) \approx \frac{W}{K} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ 2\sqrt{k_1 t} \alpha^{n+1} \text{ierfc} \left(\frac{(2n+1)d \pm x}{2\sqrt{k_1 t}} \right) - 2\sqrt{k_1 t} e^{-\frac{d}{\delta}} \frac{A \alpha^n}{1+A} \text{ierfc} \left(\frac{(2n+1)d \pm x}{2\sqrt{k_1 t}} \right) + 2\sqrt{k_1 t} e^{-\frac{d}{\delta}} \frac{\alpha^n}{1+A} \text{erfc} \left(\frac{(2n+1)d \pm x}{2\sqrt{k_1 t}} \right) - \delta e^{-\frac{d}{\delta}} + 2\sqrt{k_1 t} \text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{k_1 t}} \right) \right\}$$

(ただし, d:膜厚, T:温度, K:熱伝導率, k:熱拡散係数, W:レーザパワー, R:反射率, δ:レーザの浸透深さ, t:パルス時間)膜の裏面が沸点ならびに融点に達するフルエンスの計算値を,それぞれ実線および点線でFig. 2に示す。裏面が融点に達する条件では膜除去が不完全であった。良好な膜除去となる上限付近では薄膜が沸点近くに加熱されることがわかる。適正条件は完全蒸発のフルエンス(鎖線)の約1/3と低いこと,およびCu薄膜が照射部周辺に溶滴となって付着することから,金属薄膜は大部分が熔融状態で除去されるものと考えられる。以上のことより,熱伝導計算によって良好な膜除去となるレーザ照射条件をほぼ予測できることがわかった。

4. 薄膜の除去メカニズム

これまで金属薄膜の除去メカニズムに関しては多くの研究が報告されており,完全に蒸発による除去⁶⁾,基板-薄膜間のガスの膨脹による爆発的除去⁷⁾,レーザ照射領域の金属薄膜が蒸発反跳力で周辺へ押し広げられるモーメントムによる除去⁸⁾,などが提案されている。

適正フルエンス条件での高速度撮影結果をFig. 3に示す。エキシマレーザ照射後の数百nsの間には映像の変化が見られず,少なくとも

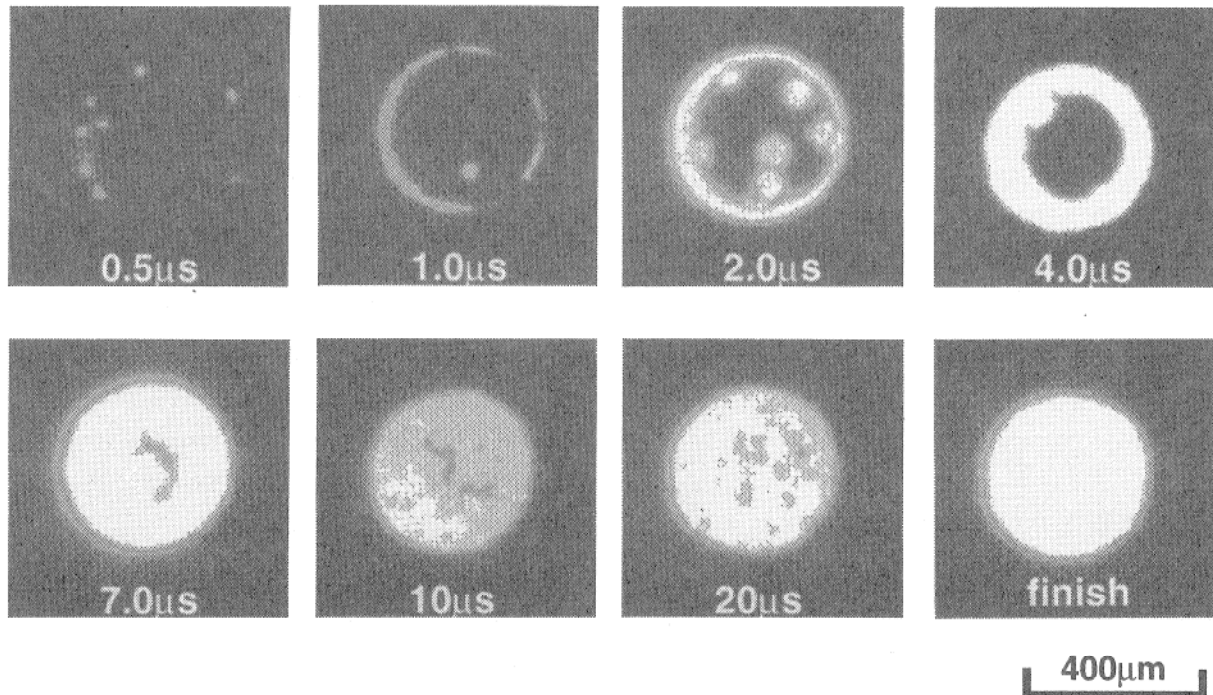


Fig. 3 Dynamic behavior of Cu film removal under optimum condition observed by high speed photographing

もレーザパルス時間内はレーザ照射領域全体にわたってCu薄膜が存在し、基板はレーザ照射されないことがわかった。1 μ s付近でCu薄膜はレーザ照射円の境界付近で周辺の膜と分離し中心方向へ移動を始める。4~7 μ sでは熔融金属は中心付近に集まり、その勢いで細かな粒子になって周辺に飛散するのが観察される。このように爆発的除去⁷⁾は見られず、熔融状態で除去されるのが観察された。

以上の高速撮影に基づく薄膜の除去メカニズムの模式図をFig. 4に示す。レーザ照射部は全域にわたって熔融するが、その境界部は回折により強度が高いため、レーザ照射領域とその周辺が切り離される(a)。このとき、蒸発反跳力で熔融金属は下方方向に押しえつけられ半径方向に押し出される。適正フルエンスでは蒸発反跳力は比較的小さく、円盤状の熔融金属のエッジ部に小さな隆起を形成する(b)。その隆起に働く表面張力によって、熔融金属は中心方向へ駆動・加速される(c)。中心部に向かって加速された熔融金属は慣性によって溶滴となって周辺へ飛散する(d)(e)。Veikoら⁸⁾は、蒸発反跳力が熔融金属を外側に押し出し除去すると推論しているが、実際にはこれとは逆に中心部に向

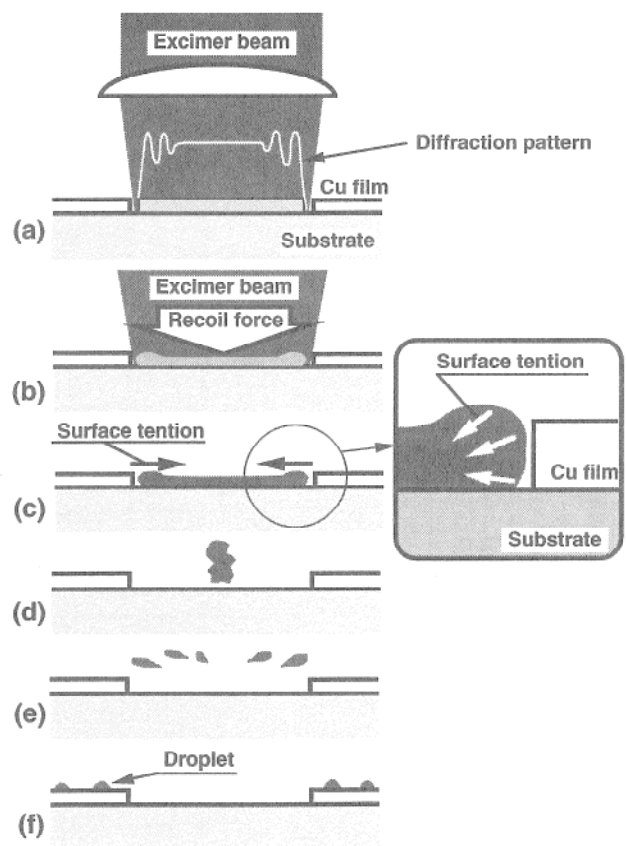


Fig. 4 Schematic illustration showing metal film removal process under optimum condition

かう熔融金属流の慣性により除去されることがわかった。

レーザーフルエンスが過大の時、蒸発反跳力が大きくなり照射部の熔融金属は半径方向に押し出され、その際周辺の薄膜を2次的に熔融して寸法精度を低下させる。さらにフルエンスが大きくなると、半径方向に押し出すモーメントムによって剝離を生じる。このため、薄膜除去の寸法精度は、レーザー照射部の熔融金属の挙動により左右される。

5. お わ り に

以上、基板上的Cu薄膜の除去メカニズムを簡単に述べた。この応用ではレーザーパターニング後にメッキ回路が形成されるが、要求精度は数十ミクロンで、本方法の精度は十分に高い。より高精度で回路形成するには、基板との密着強度の高い膜蒸着、ならびに銅に近い線膨張係数を有する基板の選択が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 伊藤慶子, 森安雅治: 第29回レーザー熱加工研究会論文集(1993) 101-110
- 2) P. E. Dyer and J. Sidhu: J. Appl. Phys., 64(9)(1988) 4657-4663
- 3) S. Kuper, K. Brannon and J. Brannon: Laser Ablation of Electronic Materials, E. Fogarassy and S. Lazare, ed., North-Holland (1992) 213-220
- 4) M. I. Cohen, B. A. Unger, and J. F. Milkosky: The Bell System Technical Journal (1968) 385-405
- 5) D. Maydan: The Bell System Technical Journal, 50(6)(1971) 1761-1789
- 6) U. C. Peak and A. Kestenbaum: J. Appl. Phys., 44(5)(1973) 2260-2268
- 7) V. J. Zaleckas: Appl. Phys. Lett., 31(9)(1977) 615-617
- 8) V. P. Veiko, S. M. Metev, A. I. Kaidanov, M. N. Libenson, and E. B. Jakovlev: Journal of Physics D. 13(1980) 1565-1570

