

MEMS用レジストの新展開

(日本化薬株式会社) 小野 禎之

TEL 03-3598-5175

FAX 03-3598-5431

e-mail yoshiyuki.ono@nipponkayaku.co.jp

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical System) とは多様な要素 (センサ、アクチュエータ、電子回路など) を一つの基板上に集積化し高度な働きを持たせた小形システムである。MEMS 技術のベースは、半導体の微細加工技術 (フォトリソグラフィ、成膜・エッチング、メッキ技術、ダイシング技術、接合技術など) から発展してきた技術が “MEMS 技術” と呼ばれている。その一部であるリソグラフィ技術としては、紫外線/電子線/放射線技術が利用されており、その代表例が LIGA プロセス (シンクロトロン放射で発生する X 線によって PMMA (アクリル樹脂) をパターニングし微細加工する技術) である。^{1) 2) 3)} X 線による LIGA プロセスは初期設備投資が莫大であるため、安価な紫外線露光装置を用いた UV-LIGA プロセスが報告されてきた。^{4) 5) 6)} これら UV-LIGA プロセスで広く用いられてきたのが MEMS レジストであり、エポキシ硬化反応が利用されている。

本講演ではエポキシ硬化系の MEMS レジスト及びそのについて取り上げる。

2. MEMS レジストの特徴

エポキシ硬化反応を利用した MEMS レジストの特徴を半導体レジストと比較すると、①高アスペクト比 (パターンの縦/横比が大きい) ②厚膜形成可能 (100 μm 超も可能) ③垂直パターンを形成可能 などが挙げられる。(図 1) このような特徴は、MEMS 構造を形成する上で様々な優位性をもたらす。その代表例が、インクジェットヘッドノズル形成である。⁷⁾ 高アスペクト・厚膜形成性はインク流路の容積を大きくとることができ、垂直パターン形成性は精緻な 3 次元構造作成を容易にする為、MEMS レジストとして広く応用検討されてきた分野である。

代表的な MEMS レジストのひとつとして “SU-8” が挙げられる。SU-8 はエポキシ樹脂・光酸発生剤を主成分とし、光により発生した強酸をエポキシ開環反応に利用している。特徴として、①i 線感度が高い、②i 線での深部硬化性が良い (i 線吸収が少ないことによる)、③エポキシ重合性が高い (発生する酸強度による) などが挙げられる。この

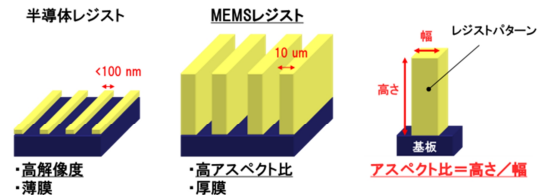


図 1 MEMS レジストの特徴

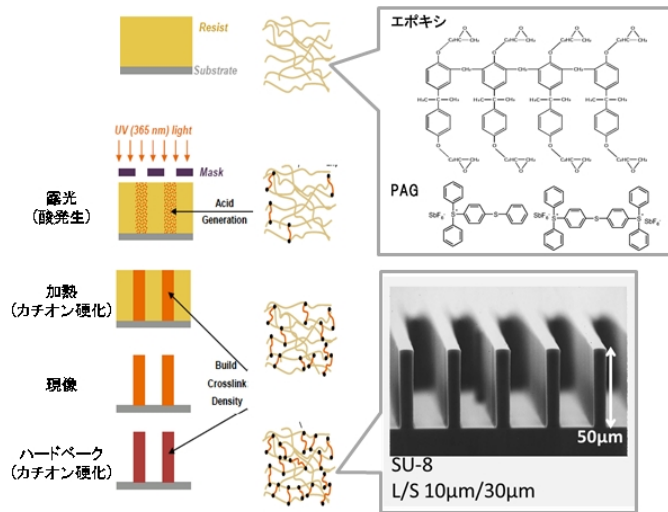


図 2 代表的な MEMS レジスト (SU-8 の例)

特性は樹脂骨格と光酸発生剤のアニオン・カチオン構造に依存する。SU-8 のパターンニング過程と硬化反応イメージ及びパターン形成例を図 2 に示した。本硬化系は、フェノールノボラックの様な硬化剤を使用しない為その影響を考慮しなくてよく、エポキシ樹脂単体の骨格のみで機能発現し、多種多様なカチオン硬化性樹脂を組み合わせ使用できるのが特徴である。表 1 に SU-8 の硬化膜特性値を示した。表 1 に示すように、SU-8 は優れた機械強度、耐熱性を有しているため MEMS 構造中で永久的に硬化膜が残存する“永久レジスト”として広く検討されてきた。本講演では、このような MEMS レジストについて概説する。

表 1 SU-8 の一般物性

項目	単位	SU-8
ガラス転移温度 *1	°C	203
5%重量減少温度	°C	311
破断強度	MPa	60
ヤング率	GPa	2.0
破断伸び	%	6.5
誘電率 *2	—	4.1
密着力	MPa	53
残留応力	MPa	24
塗布膜厚*3	μm	100
硬化温度	°C	<200°C
アスペクト	—	10:1

*1 DMAによる
*2 1MHz
*3 単層塗布の場合

3. MEMS レジストの各種プロセスへの展開

液状レジスト（以下 液レジ）もしくはドライフィルムレジスト（以下 DFR）を利用した MEMS プロセスとその必要特性（用途、課題、要求特性）を表 2 に示した。ここで示すように、各プロセスに対する液レジと DFR の適用範囲は様々である。MEMS

表 2 MEMS プロセスと用途／要求特性

	埋め込み	接合	テンディング	超厚膜	コンフォーマル
用途	配線・ビアの絶縁封止 立体構造物の封止	CIS素子・キャビティ封止 (Si-glass) SAW素子・キャビティ封止 (LT-無機材)	SAW素子・キャビティ封止 (LT-樹脂)	UV-LIGA 各種MEMS構造形成	段差配線形成・絶縁 ビア絶縁層形成
課題	配線ダメージ (腐食、応力集中)	接合性 (接着性、接合条件の緩和)	テンディング性 (フィルム化、素子腐食)	厚膜化、ラインアップ	段差・コーナー追従
要求特性	低温硬化 高アスペクト アンチモンフラー 低ハロゲン 低応力	低温硬化 高アスペクト アンチモンフラー 低ハロゲン 高接着性 低応力・低弾性	低温硬化 高アスペクト アンチモンフラー 低ハロゲン 高耐熱 (高 Tg)	高精度 高アスペクト 厚膜 100 μm 超形成 積層塗布	低粘度 スプレーコート対応 フィルム柔軟性
液レジ (※1)	○	△	×	△	△
ドライフィルム (※2)	○	○	○	○	△

※1 ○:最速, △:容易, ×:困難

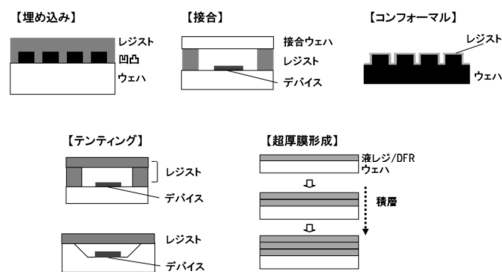


図3 MEMS プロセス構造例

プロセスにより形成される構造例 (レジスト使用箇所をグレーで例示) を図 3 に示す。本講演では、MEMS における主要プロセスである、接合プロセス・テンディングプロセス・埋め込みプロセスへの展開について概説する。

3-1. 接合プロセス

接合プロセスは、各種 MEMS デバイス素子（撮像素子、表面弾性波素子など）をキャビティ内に封止する用途で重要である。撮像素子を封止する場合には、デバイスウェハ上にレジストで支持枠を形成し、ガラスで加温・加圧接合することで封止する方法が提案されている。⁸⁾ ここで、要求される特性を表 3 に示す。

表 3 接合プロセスの要求特性

1) 高アスペクト	: 支持枠を位置精度よく形成するため。
2) 低ハロゲン・アンチモンフラー	: デバイス中の配線腐食への影響を減らすため。
3) 低温硬化 (200°C 以下)	: デバイスへの熱ダメージ低減のため。
4) 低応力	: デバイスウェハへの密着性向上と反り低減のため。
5) 低弾性	: 柔軟性を持たせ接合性を向上させるため。

3-2. テンディングプロセス

テンディングプロセスも接合プロセス同様に、各種 MEMS デバイス素子（撮像素子、表面弾性波素子など）をキャビティ内に形成し封止する用途で重要である。表面弾性波素子を封止する場合には、デバイスウェハ上へレジストで支持枠と天板部分を形成して封止する WLP（ウェハレベルパッケージ）への応用が提案されている。⁹⁾ こ

で、要求される特性を表4に示す。キャビティ構造形成をレジストで行うためには、DFRが必要となるが、従来のSU-8は液レジドであるため、犠牲層プロセスのような煩雑な方法を使わないと本プロセスへの展開は難しい。

表4 テンティングプロセスの要求特性

1) 高アスペクト	: 所望の支持枠を位置精度よく形成するため。
2) 低ハロゲン・アンチモンフリー	: デバイス中の配線腐食への影響を少なくするため。
3) 低温硬化	: デバイスへの熱ダメージ低減のため。
4) 低応力	: デバイスウェハへの密着性と反り低減のため。
5) 高耐熱(高Tg)・高弾性	: モールディング時の天板変形を防止するため。

3-3. 埋め込みプロセス

埋め込みプロセスは、キャビティ構造不要の3次元配線構造物を形成し、絶縁封止する用途で使用される。埋め込みプロセス例として、永久レジストによる3次元構造物形成と配線形成とを同時に行い、レジストで配線を埋め込み絶縁封止する方法が提案されている。¹⁰⁾ 埋め込みプロセスでは、レジストと配線が直接接するため、配線ダメージ(配線への応力集中や腐食低減)に対する配慮が重要である。ここで、要求される特性を表5に示す。SU-8は高アスペクトで高耐熱・高弾性という点で配線形成に優れる一方、ハロゲンフリーではないため腐食対策が不十分で、本プロセスへの展開は難しい場合がある。

表5 接合プロセスのレジストへの要求特性

1) 高アスペクト	: 位置精度よく配線形成するため。
2) 低ハロゲン・アンチモンフリー	: 配線への腐食低減のため。
3) 低温硬化・低応力	: 配線への応力集中やデバイス反り低減のため。

3-4. テンティングプロセス

最新のDFR貼合装置を用いたテンティングプロセスによるキャビティ構造形成例を図4に示す。図4-a)は貼合温度・速度・圧力・ローラーギャップ等の貼合条件が最適化されておらず、キャビティの両サイド(○で図示)でレジストフローに起因する形状崩壊が起きている。図4-b)に最適化条件で形成したキャビティ構造例を示す。レジストフロー性を考慮し、装置の温度・圧力・貼合速度条件を設定した装置条件によってキャビティ構造の崩壊が改善されていることが分かる。レジスト硬化膜特性だけでなく、硬化前のレジストフロー性を考慮したプロセス装置との適合性の重要性を示す事例である。

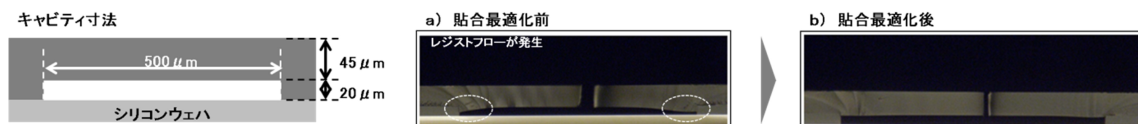


図4 最新の貼合装置により形成したキャビティ形成例

(装置: テイコクテーピングシステム社 DXL2-800、レジスト: 日本化薬 SU-8 3000 CF DFR)

各プロセスの共通課題・要求特性は、高アスペクト、低温硬化、ハロゲンフリー、アンチモンフリー、低応力に集約される。次節以降これらの課題に対応できる最新のMEMSレジスト技術を紹介する。

4. 最新のMEMSレジスト

4-1. 接合プロセス用 MEMS レジスト

接合プロセスへ MEMS レジストを展開する場合、低温接合できる柔軟かつ接着性の高いレジストが必要である。このようなレジストは感光性接着剤と呼ばれ、硬化後の低弾性率が必要だが、従来の SU-8 では十分にカバーされていない。ここでは、「KPM-500 DFR シリーズ（日本化薬製）」を例とし説明する。

KPM-500 DFR は MEMS レジスト中のエポキシ樹脂を高純度化・アルカリ可溶変性し、低弾性エポキシを導入することで、SU-8 の超厚膜・高アスペクトという特徴を失うことなく、接合性を高めたアルカリ現像型感光性接着剤である。ウェハ接合後のダイシング耐性にも優れる KPM-500 は“接合できる SU-8”ともいうべきレジストである。低応力・低弾性・低ハロゲンといった特徴は、接合プロセスのみならず埋め込みプロセスにも好適である。

4-2. 環境対応型 MEMS レジスト

近年、環境対応の一環である、RoHS 指令による有害物質規制以外にも、塩素 (Cl) 系、臭素 (Br) 系のハロゲンフリー、アンチモンフリーの要求が高まっている。産業界におけるハロゲン濃度自主規制の一例として、ハロゲンフリー規格を以下に例示した。

※社団法人日本電子回路工業会 (JPCA) : JPCA-ES01-2003

ここでは「Cl が 900ppm 以下、Br が 900ppm 以下、Cl と Br の総量で 1500ppm 以下」と規定されている (表 6)。¹¹⁾ この規格は、SU-8 にも例外なく要求され、アンチモン (Sb) フリー、ハロゲンフリー (上記基準に準拠)

表6 JPCA-ES01 に規定されたハロゲン濃度規制

ハロゲン	閾値
Cl	900ppm以下
Br	900ppm以下
Cl及びBrの総量	1500ppm以下

対応は市場一般ニーズである。しかしながら、SU-8 はこの点で課題を抱えている。これら課題に対し、環境対応した MEMS レジストとして「SU-8 3000CF DFR シリーズ (日本化薬製)」を例とし紹介する。

SU-8 3000CF DFR は、高純度エポキシ樹脂・アンチモンフリー光酸発生剤を採用することで環境対応し、SU-8 の特性を全く損なうことなくハロゲンフリーとアンチモンフリーを同時にクリアした DFR である。SU-8 3000CF DFR は“環境対応型 SU-8 の DFR 版”ともいうべきレジストと言える。ハロゲンフリー、アンチモンフリーにより、金属配線腐食性を極力低減し、各種配線を含むテンティングプロセス・埋め込みプロセスへの新規展開が可能となる。

5. まとめ

エポキシ硬化反応を利用した MEMS レジストとして「SU-8」及びいくつかの“SU-8 ライク”な製品を紹介したが、MEMS レジストは、その優れたパターン形状の制御性、機械強度、膜物性、絶縁性、超厚膜での解像性により MEMS 構造体の積層、封止、絶縁、接合材など立体構造形成への応用展開がされてきた。今後は、MEMS デバイスのキャビティパッケージ、WLP、ファンアウトパッケージ、3D/TSV など成長が見込まれる分野への応用展開が進むと期待される。また、本講演では、DFR プロセス最適化についても若干触れたが、今後 MEMS 分野への展開を進める上では各種プロセス装置性能の向上及び装置とのマッチングが欠かせないため、今後の装置開発が期待される。

6. 文献

- 1) 外林 秀人, 高分子 / 高分子学会 [編], Vol. 43 (8), p. 564-569, 1994
- 2) 高田, 博史ら, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 116 (12),

p. 1334-1340, 1996

3) 羽賀 剛ら, 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), Vol. 120 (7), P363 - 369, 2000

4) 北垣 寛ら, 京都府中小企業総合センター技報, 32 号, P79-82, 2004

5) 川畑 達央, 表面技術, Vol. 50, 11 号, P956-960, 1999

6) 早乙女 康典, 表面技術, Vol. 55, 4 号, P 254-260, 2004

7) 宮川 昌士ら, インクジェットヘッドおよびその製造方法, 特開 2001-18396

8) 関根 弘一, 固体撮像装置及びその製造方法, 特開 2006-005211

9) 高田 忠彦ら, 弾性波装置及びその製造方法, 特許第 5077714 号

10) 大庭 美智央ら, チップコイル, 特開 2006-173163

11) 和田彩佳, 計測と制御, 55 巻第 1 号 2016 年 1 月号, 2016