

半導体・MEMSのための 超臨界流体

博士(工学)	近藤	英一	編著
工学博士	上野	和良	
博士(工学)	内田	寛	
博士(工学)	曾根	正人	
博士(工学)	生津	英夫	共著
工学博士	服部	毅	
Ph. D.	堀	照夫	
	森口	誠	

コロナ社

ま え が き

本書を手にとった方は、おそらく「超臨界流体」か「マイクロエレクトロニクス」いずれかに興味のある方と思う（もちろん両方に興味のある方であれば心強いことこの上ない）。

実のところ、超臨界流体のマイクロエレクトロニクス応用を考えるとということは、現在の真空プロセスやウェットプロセスの弱点について考えるということにほかならない。また、すでに超臨界流体に興味のある読者にとっては、これまでの化学分野における応用とは異なる新たな視点について考えることになろう。その意味で本書はいずれの読者も対象としており、超臨界流体がマイクロ・ナノプロセスにおけるブレークスルーを切り開くに最適な媒体であると信じる執筆者によって成されたものである。

「超臨界」とはものものしい語であるが、臨界点とは物質の状態が変わる特別な条件という物理学の用語で、超臨界流体とは気体と液体の区別がなくなる熱力学的な温度・圧力条件、すなわち「臨界点」を越えた状態を指す。超臨界流体の発見ははるか19世紀に^{さかのほ}遡り、工業では古く高圧蒸気などと呼ばれてきた。臨界点を越えた状態を「超臨界流体」として特別に意識するようになったのは比較的新しいことで、主に工学の化学分野においてのことである。

超臨界流体の成書には優れたものがこれまでいくつか出版されているが、上記の事情もあり化学反应用途に関するものが主体であった。それらの書では溶媒としての作用や化学反応の特異性に力点を置いて内容が整理され、科学的また技術的にも高度な内容を含んでいる。その重要性に疑いの余地はなく、編著者も^{いま}未だ大いに参考に与っているのであるが、動もすると幅広い範囲を取り扱うあまり、プロセスの実用の立場からの超臨界流体の性質や応用については導入的部分の記述が不足し、また大学専門分野の教養を前提とされることもまま

あって、わかりづらい面も見受けられたように思う。

超臨界流体におけるナノレベルの優れた拡散輸送能と流体としてのマクロ的な振舞いの共存は、微細化の進む半導体プロセスや、ナノ～センチにわたるさまざまな構造体が複合する MEMS においてこそ真価を発揮する。以上の信念から、本書では、乾燥、洗浄、堆積などの基本的なプロセスについての超臨界流体応用をまとめた。もちろん研究のつねとして、マイクロ・ナノエレクトロニクス分野でも、本書の範囲をはるかに越えた非常に興味深い応用事例が数多く報告されているが、あえて既存プロセスの代替を中心に絞り、丁寧な解説を行うように心がけたのは上記の理由による。

そういうわけで、本書は超臨界流体の新しい応用の切り口を提供することを意図したものであるから、上記したように、すでにある程度知識のある諸兄にとっても、応用はもちろん基本的な事項の説明などについても新たな思わぬ視点が得られるものと思う。

超臨界流体はすでに工業的に多く実用化されている媒体である。マイクロエレクトロニクス分野でも優れた最適の応用例は必ずあるはずであり、少品種大量生産から多品種少量生産への転換が求められている現在こそ、活用が必要であり、本書がそれを志す読者諸兄の一助になれば望外の慶びである。

本書の企画はもともと、東京工業大学曾根正人先生によって着想されたものであり、閑居を決め込んでいた編著者に鞭撻の労をおかけしたものである。曾根先生には著者に名を連ねていただき、また、各分野で日本を代表する執筆者にご参加いただくことができた。文体の統一や加除・加筆、各著者の重複部の調整は編著者が行ったものであり、撰述の不備は編著者がその責を負うものである。

2012年7月

弦信庵

目 次

1. 超臨界流体とマイクロ・ナノプロセス

1.1 超臨界流体とは	1
1.1.1 物質の三態と超臨界流体	1
1.1.2 超臨界 CO ₂ 流体の性質	9
1.1.3 CO ₂ 以外の超臨界流体	22
1.2 マイクロ・ナノプロセスにおける超臨界 CO ₂ のメリット	25
1.2.1 乾 燥	26
1.2.2 洗 浄	28
1.2.3 流体としての特長	33
1.2.4 反応場としての利用	37
1.2.5 安全性・リサイクル性	39

2. 半導体と MEMS の製造プロセス

2.1 半導体プロセス	40
2.1.1 半導体集積回路の歴史と特徴	40
2.1.2 半導体集積回路プロセス	42
2.1.3 超臨界流体プロセスの半導体プロセス導入に関する考察	51
2.2 MEMS プロセス	53
2.2.1 MEMS プロセスと超臨界流体への期待	53
2.2.2 MEMS プロセスの特徴と超臨界乾燥・洗浄	55

2.2.3	貫通電極と薄膜堆積	59
2.2.4	バイオ MEMS への期待	63

3. 超臨界乾燥

3.1	超臨界乾燥の原理と特長	65
3.1.1	パターン倒れの原因	65
3.1.2	ライン列（高密度パターン）のパターン倒れ	66
3.1.3	表面張力ゼロの乾燥	70
3.1.4	孤立レジストラインのパターン倒れ	71
3.2	半導体プロセスへの応用	73
3.2.1	CO ₂ を用いた超臨界乾燥	73
3.2.2	フッ素系化合物を用いた超臨界乾燥	75
3.3	MEMS への超臨界乾燥応用	80
3.3.1	超臨界 CO ₂ 乾燥	80
3.3.2	超臨界 HFE 乾燥	82
3.4	超臨界乾燥装置	84
3.5	レジストパターンの改質	86
3.6	ま と め	89

4. 超臨界流体を用いた半導体・MEMS 洗浄技術

4.1	次世代半導体洗浄に超臨界流体を用いる背景	90
4.2	トランジスタ形成工程（FEOL）への適用	91
4.2.1	トランジスタ形成工程での洗浄の課題	91
4.2.2	超臨界 CO ₂ によるフォトリソレジスト剥離・洗浄	93
4.3	多層配線工程（BEOL）への適用	97

4.3.1	多層配線工程での洗浄の課題	97
4.3.2	超臨界 CO ₂ によるフォトレジスト剥離・エッチング残渣除去	99
4.3.3	超臨界 HFE によるフォトレジスト剥離・エッチング残渣除去	102
4.4	大口径ウェーハへの実用化に向けて	105
4.4.1	超臨界 CO ₂ によるパーティクル除去	105
4.4.2	物理的な補助手段の活用	106
4.4.3	その他の課題	108
4.5	MEMS 洗浄への適用	108
4.6	おわりに	110

5. 多孔質薄膜と細孔エンジニアリング

5.1	低誘電率薄膜と多孔質化	111
5.1.1	集積回路の高速化と多孔質薄膜	111
5.1.2	多孔質薄膜と超臨界 CO ₂ 流体	112
5.2	多孔質薄膜の作製	114
5.2.1	ゾル・ゲルプロセスと超臨界乾燥	114
5.2.2	ブロックコポリマーとテンプレート除去	117
5.3	細孔エンジニアリング	119
5.3.1	細孔形成・細孔内洗浄	119
5.3.2	細孔改質	120
5.3.3	細孔内吸着と拡散	122

6. めっきへの応用

6.1	めっき前処理	126
6.1.1	高分子材料のメタライズ	126
6.1.2	超臨界流体の特性と高分子内への化合物の注入	127
6.1.3	超臨界流体を用いる繊維・プラスチックのめっき	131

6.1.4	めっき繊維の特徴・機能	135
6.1.5	プラスチック基板のメタライズ	137
6.2	電気めっきへの応用	140
6.2.1	技術的背景	140
6.2.2	超臨界 CO ₂ エマルジョン	142
6.2.3	超臨界 CO ₂ エマルジョンの電気伝導性	143
6.2.4	SNP による金属皮膜	144
6.2.5	結晶粒の微細化	146
6.2.6	SNP の反応メカニズム	147
6.2.7	超臨界 CO ₂ の役割	148
6.2.8	SNP 法による多孔薄膜	149
6.2.9	無欠陥で均一な金めっき薄膜	150
6.3	無電解めっきへの応用	151
6.3.1	無電解 SNP 法	151
6.3.2	超微細孔への埋込み	152
6.3.3	高分子表面のメタライズへの SNP 応用	155
6.3.4	半導体プロセスへの応用	158
6.3.5	MEMS への応用	159

7. 化学的薄膜堆積

7.1	薄膜堆積プロセスの一般	163
7.1.1	PVD	164
7.1.2	CVD	165
7.1.3	液相法	166
7.1.4	薄膜堆積プロセスに求められること	167
7.2	薄膜堆積における超臨界流体の役割	169
7.2.1	堆積媒体としての超臨界流体	169
7.2.2	超臨界流体を用いるメリット	171
7.2.3	半導体集積回路・MEMS プロセスにおける位置づけ	175

7.3 装置構成	179
7.3.1 密閉式	180
7.3.2 流通式	180
7.4 金属膜堆積	182
7.4.1 堆積機構	182
7.4.2 段差被覆性と埋込み性	188
7.5 絶縁膜堆積	193
7.5.1 原料化合物の溶解・再析出	193
7.5.2 原料化合物の化学反応	194
7.5.3 反応装置	196
7.6 まとめ	198

8. 超臨界流体を用いたエッチング加工

8.1 従来のエッチング手法	199
8.1.1 マイクロマシニングにおけるエッチング工程	199
8.1.2 ウェットエッチングとドライエッチング	200
8.1.3 等方性エッチングと異方性エッチング	202
8.2 超臨界流体を利用したエッチング手法	203
8.2.1 構造体付着/破壊の抑制	204
8.2.2 エッチング剤や反応生成物の除去	206
8.3 超臨界中でのエッチング, 洗浄, 乾燥一貫処理	207
8.4 まとめ	211

引用・参考文献	212
---------	-----

索引	223
----	-----

1章

超臨界流体と マイクロ・ナノプロセス

1.1 超臨界流体とは

1.1.1 物質の三態と超臨界流体

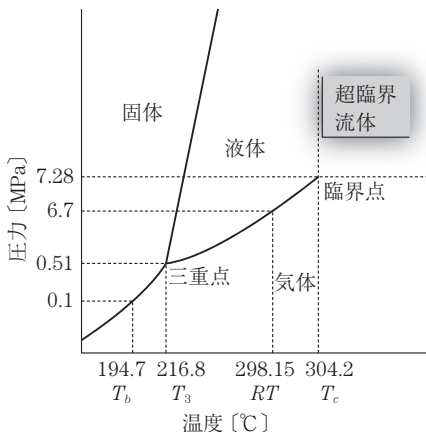
〔1〕 状態 図 物質のとり形態を物理的に分類すると、「気体」、「液体」、「固体」の3種類になり、これを物質の三態という。水 (H_2O) でいうと、気体は「水蒸気」（湯気のことではない）、液体はいわゆる「水」、そして固体は「氷」である。

二酸化炭素 (CO_2) を例にとると、まず、空気には気体の CO_2 が含まれている。透明なので目で見ることにはできないが、身近に存在している。ドライアイスは冷たい CO_2 の固体で、これも身近な物質である。

生ビールのサーバーの横に緑色のボンベがあるのを見かけるが、あの中に液体の CO_2 が入っている。それは読者には周知のことであろうが、液体の CO_2 はわれわれの生きている常温・常圧の世界には存在できないということに注意していただきたい。高压に圧縮することで液化し、ボンベの中に保存しているわけである。ボンベから出ると気体に戻るのだが、その圧力を使ってタンクのビールを押し出しているのである。

純物質が気体、液体、固体のどの状態をとるかは、温度と圧力で決まる。これを地図のように領域分けして示した図を、「状態図」あるいは「相図」という。図 1.1 の CO_2 の状態図を見ると、常温（約 300 K）・常圧（1 気圧 = 0.1 MPa）[†]で

[†] メガパスカル。正確には、1 MPa = 9.87 atm。

図 1.1 CO₂ の状態図

は気体であるということがわかる。常圧で温度を下げていくと固体，すなわちドライアイスになる。ドライアイスは1気圧では -79°C 以下の極低温でのみ存在できる固体である。実際には，われわれは常温でドライアイスを扱うことができるが，保管容器から取り出すとみるみる気化して消えてしまう。状態図はより正確には平衡状態図といい，時間の概念を無視して物質が本来とるべき姿を分類しているのである。

状態図中に引かれている線は，ちょうど地図における国境のように，各態の存在領域の境界線を示している。国境の経度緯度を読み取るように，ある温度で気体から液体へと態が変わる圧力を読み取ることができる。

気体と液体の境界線は他の二つの線と違って盲腸線になっている。この終点を臨界点という。国境に終わりがあるということはどういうことなのだろうか？それは，そこから先はどこにも属していないということであり，状態図における臨界点を越えた状態，すなわち「超臨界」状態では，物質は気体でも液体でもなくなった状態になる。液体でも気体でもなく，両者の性質をそれぞれ少しずつ併せもつことになる。臨界点を越えた流体は圧縮しても液化せず，どんなに温度を上げても沸騰することはない。

気体も液体も流体であるので，超臨界状態でも流体となる。そこで超臨界流

体 (supercritical fluid) と呼ぶ。CO₂ の臨界点は 31°C・7.4MPa (73 気圧) であるから、それ以上の温度・圧力で超臨界流体となる。温度については夏場であれば容易に到達する温度である。73 気圧以上というとずいぶん高く感じるが、N₂ などのガスボンベの内圧は 15 MPa であるから、工業的には決して高い値とはいえない。表 1.1 に種々の物質の臨界点を示す。

表 1.1 各種の物質の臨界点

物 質	臨界温度 [°C]	臨界圧力 [MPa]
二酸化炭素	31.2	7.38
水	374.3	22.1
メタノール	240.0	8.09
エタノール	240.8	6.14
アセトン	235.1	4.70
ヘキサン	280.5	4.07
アンモニア	132.6	11.3
亜酸化窒素 (N ₂ O)	36.6	7.24

〔2〕 臨界点と超臨界 超臨界現象は 1822 年に Cagniard de La Tour によって CO₂ において発見された^{1)†}。得られた臨界点は現在知られている値に近いものである。1869 年に Thomas Andrews により「critical point」の名称が用いられた²⁾。当時は高压のガスの挙動に大きな興味をもたれており、周期律表を考案したメンデレーエフも、シャルルの法則や、臨界温度についての研究を行っていた。なお、超臨界 CO₂ が溶解性を有し、圧力に応じて変化することは Hanny and Hogarth によって発見された⁴⁾。

気体や液体を構成する分子は、熱エネルギーをもって運動している。気体分子は実質的に運動エネルギーのみをもち自由に動き回っており、その熱運動エネルギーは 1 自由度当り $kT/2$ のエネルギーをもち温度に比例する。液体は熱エネルギーのうちの一部分が凝集エネルギー (分子間引力のつくる位置エネルギー) に分配されている。分子間凝集力の最も基本的なものはファンデルワールス力⁵⁾で、分子間距離の 6 乗に逆比例する。気体を圧縮すると分子間距離が縮まり、熱運動エネルギーの一部が分子間凝集エネルギーに転化し安定化すると気体は

† 肩付番号は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

液化する。気体がある温度（臨界温度）より高い場合には、加圧による凝集力より熱運動エネルギーが大きくなり、気体はいくら加圧しても液化せず、高密度の気体となる。これが超臨界状態である。この説明から明らかなように、超臨界流体では熱運動エネルギーが凝集エネルギーを上回っており、凝集相でないという意味で厳密に言えば気体である。臨界温度 T_c と気液変態温度、つまり沸点 T_b の間には絶対温度で

$$T_b = \frac{2}{3}T_c \quad (1.1)$$

の関係がほぼ成立することが知られている（ゲルベルグ則^{6)†}）。

図 1.2 に CO_2 の体積-圧力線図 (p - V 等温線図) を示す。これは、一定の CO_2 量のまま、ある温度で体積を変えた場合の、温度と体積の関係を示したものである。例えば、ピストンに気体の CO_2 を入れ、圧縮していくとしよう。温度は 20°C として点 A から圧縮していくと、ボイル・シャルルの法則 ($pV = \text{const.}$) に従って、 p が V に反比例する曲線をたどって圧力は上昇していく。この図は

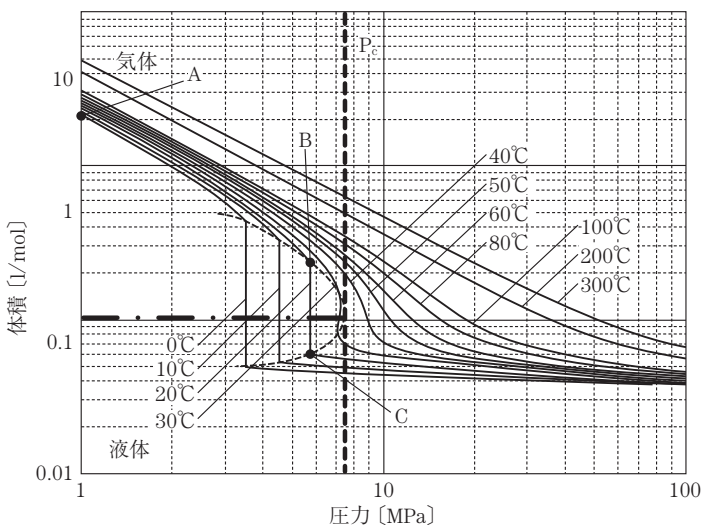


図 1.2 CO_2 の体積-圧力線図 (p - V 等温線図)

† C.M. Guldberg (1890)。

両対数グラフなのでその関係は直線となっている。点 B (約 6 MPa) に達すると、B-C を結ぶ線 (tie line) を左に移動して圧力一定のまま体積は急に減ずる。これが液化現象で、20°C における tie line の圧力が、図 1.1 の p - T 状態図における気液共存線の与える値になる。したがって、tie line の上側では CO₂ は気体、下側では液体であり、このときピストン内では液体 CO₂ と気体 CO₂ が同じ圧力で共存し平衡状態にある。この圧力は 20°C における CO₂ の蒸気圧に相当する。点 C を過ぎて圧縮を続けると、液体の圧縮率に従って体積は減少するが、液体の圧縮率は小さいから大きな圧力を要し、曲線 (実質的に直線) の勾配は非常に大きくなる。

臨界温度で同じことをするとどうなるだろうか。このとき、気相側では最初は p が V に反比例するが、臨界圧力に近づくに従って少しずつ反比例則に従わなくなり傾きが小さくなる。tie line は短くなり、平衡にある気体と液体の密度がたがいに近づいてくる。そして臨界点においてついに一致する (臨界体積)。つまり、気体と液体の区別は消失するわけである。tie line の両端の軌跡がつくる山形は、各温度における気液の共存線を示している。この山の頂点より右の領域が超臨界流体である。

臨界温度より温度が離れると再び、完全ではないがほぼボイル・シャルル則に従うようになる。例えば 80°C ではほぼ直線 (両対数なので反比例関係) であることがわかるであろう。超臨界流体が基本的には「濃い気体」であるということはこのことから理解できる。臨界温度よりやや上の温度、例えば 40°C では、臨界体積付近における挙動をまだ少し保っている。

[3] 超臨界流体の密度 ここで沸騰現象について考えてみよう。

容器に液体を入れて熱すると、その物質は気化し、そのときの平衡蒸気圧は温度で決まる。平衡蒸気圧が外環境の圧力と等しくなると、液体内部にも等しい圧が作用しているので、液体表面で気化した蒸気も、また液体内部で発生した蒸気も外圧と等しい蒸気圧をもつ。これを沸騰といい、そのときの温度を沸点という。

沸点以下の場合でも、気化は当然起きており、その (平衡) 蒸気圧は状態図

索 引

【あ】	
浅溝素子分離	45, 90
亜酸化窒素	25
アスペクト比	109
アッシング	81
圧電アクチュエータ	179
圧電センサ	179
アニール	160
アラミド繊維	129
亜臨界状態	6
亜臨界水	23
アルマイト	152
アレニウスの式	185
アレニウスプロット	186
アンモニア	25
アンモニア/過酸化水素/ 純水混合液	92
【い】	
イオンエッチング	202
鋳 型	113
異方性エッチング	202
移 流	33, 173
【う】	
ウェーハ回転	106
ウェットエッチング	98, 200
ウエル	45
埋込み性	190
【え, お】	
エアロゲル	114
液晶ポリマー	137
液相法	166

エタン	24
エチレン	24
エッチング	55, 199
エッチング残渣	99
エッチング残渣除去	103
エッチング種	209
エッチング速度	208
エッチングマスク	66, 169, 178, 202
エマルジョン	31
エレクトロマイグレーション	51, 160
エントレーナー	30, 129
オーバハンダ	190
汚染物質	29
【か】	
界面活性剤	31
化学薄膜堆積法	140
化学機械研磨	47
化学効果	13
化学蒸着	48
化学的気相堆積法	164
拡 散	33
拡散係数	20
拡散流束	20
活性化エネルギー	37, 186
換算圧力	21
換算温度	21
換算密度	13
乾 燥	26
カンチレバー	108, 167, 178, 207
貫通孔	60

【き】	
気液変態温度	4
希釈 HF 洗浄	92
犠牲層	57, 66, 80, 108, 178, 199
犠牲層エッチング	80, 204
キセノン	24
キセロゲル法	112
気相エッチング	82
気相法	163
基板シリコンリセス	92
基板シリコンリセス制御	92
逆ミセル	31
吸着過剰	123
吸着量	16
共溶媒	8, 30
極性溶媒	30
キレート錯体化	206
均一電着性効果	158
金属埋込み	50
金属材料	176
金属-酸化物-半導体電界 効果トランジスタ	40
【く】	
クヌーセン拡散	123
クラウジウス・モソッティ の式	112
クラウン	167
クラスタ	11, 72, 131
クラスタリング	11, 16
クラスト層	92, 93
ガラスホフ数	36
グルベルグ則	4

クロロトリメチルシラン 116

【け】

珪酸エチル 102
 経時絶縁破壊 46, 51
 結晶異方性エッチング
 200, 202
 ケブラー繊維 135
 ゲル化 115
 ケルビン凝集 192
 ケルビン細孔 192
 ケルビン式 191
 原子層堆積 50

【こ】

構造体層 199
 光沢ワット浴 143
 高ドーズ・イオン注入 92
 高誘電率絶縁膜 46
 極狭ゲート・スタック構造
 90
 国際半導体技術ロード
 マップ 41
 コソルベント 30, 129
 固体表面 29
 孤立レジストライン 71
 コンタクトホール 47

【さ】

細孔 34
 細孔改質 120
 細孔凝集 123, 192
 細孔形成 119
 細孔内吸着 122
 細孔内洗浄 119
 再生セルロース繊維 135
 最大ストレス 68
 材料接合技術 56
 酢酸イソアミル 28
 サテンめっき 140
 サリサイドプロセス 47
 残留応力 167

【し】

シード層 50
 シーム 190
 自己形成バリア 50
 自己整合プロセス 47
 支持電解質 141
 自由体積 114
 シュミット数 35
 状態効果 13
 状態図 1
 蒸着法 163
 触媒担持 127, 155
 シリコンウェーハプロセス
 42

シリコン熱酸化膜 116
 シリコンロス 91
 シリル化 98, 116
 真空蒸着 164
 親水性 30

【す】

垂直型膜堆積法 181
 水平型膜堆積法 181
 スーパーフィリング 50
 スケーリング 40, 41
 スケーリング則 40
 ステッキング
 27, 57, 66, 80, 207
 スパッタリング 164
 スピンオンベーク 48
 スピンコート 117
 スピン方式エッチング 201
 スプレー方式エッチング 201
 スリットヤーン 135

【せ】

生体模倣構造 63
 成膜 55
 赤外吸収 99, 119, 122
 絶縁キャップ膜堆積 51
 絶縁膜 177
 セルフアラインプロセス 47

洗浄 28

【そ】

層間絶縁膜堆積 48
 双極子モーメント
 11, 30, 112
 相図 1
 相溶剤 208
 ソース/ドレイン拡張部 92
 疎水性合成繊維 128
 疎水性・親油性 30
 ゴル・ゲルプロセス 114
 ゴル・ゲル法 163

【た】

ターボ分子ポンプ 119
 ダイアフラム
 57, 108, 178, 207
 ダイシング 55
 堆積速度 169, 189
 堆積深さ 189
 多孔質薄膜 112
 多孔質 low- k 膜 99
 多孔触媒 190
 多成分成膜 174
 多層吸着 17, 123, 191
 多層配線構造 42
 多層配線工程 90, 97
 多層 Cu 配線 176
 ダマシゲート 46
 ダマシン法 48, 98, 177
 段差被覆性 167, 171, 188
 弾性支持 178
 短 TAT 86

【ち】

地球温暖化係数 79
 中空構造 81, 108
 超低誘電率膜 98
 超臨界改質 89
 超臨界乾燥 28, 70, 80, 116
 超臨界状態 2, 4
 超臨界水 23

超臨界ナノプレーティング 141
 超臨界流体 2
 超臨界流体エッチング 204
 超臨界流体析出法 140
 超臨界 CO₂ 10
 超臨界 He 79
 超臨界 HFE 流体 102
 直接接合 56
 苧 麻 136

【つ, て】

つきまわり 165
 ディープエッチング 200
 低温化 167
 ディップ方式エッチング 201
 低誘電率絶縁膜 48, 112
 低誘電率塗布ガラス 112
 低誘電率膜 97
 テトラメチルジシラザン 116
 デュアルダマシン 49
 電解めっき 50
 電解 SNP 法 142
 電気バイオピンセット構造 64
 電極層 50
 電子線マイクロアナライザ 131
 電磁波シールド材 131, 135
 テンプレート 113
 テンプレート除去 118

【と】

倒壊ストレス 68
 凍結乾燥 70
 動粘性係数 21
 動粘度 21
 等方性エッチング 202
 等方性多孔構造 152
 銅めっきアラミド素織 133
 ドーパントロス 91
 塗布バーク 48
 塗布法 166

ドライアイス 2
 ドライエッチング 98, 200
 ドライエッチング残渣 105
 ドラッグデリバリー MEMS 63
 トランジスタ形成工程 90, 91
 トリクレン 129
 トレンチ 49, 167, 177
 トレンチファースト 50

【な行】

内部応力 167
 ナイロン 134
 ナノドメイン 117
 ナノパターンドメディア 190
 二次粒子 115
 ニッケルめっき浴 143
 熱応力 168
 ネットワーク化 115
 ノジュール 152

【は】

パークレン 129
 バーズピーク 44
 パーティクル除去 32, 105
 ハードマスクプロセス 50
 パーフルオロカーボン 79
 配位子 131, 183
 バイオ MEMS 63
 配線溝 49
 配線溝エッチング 49
 配線工程 48, 90, 97
 配線層間絶縁膜 111
 ハイドロフロロエーテル 79
 薄膜 163
 パターン倒れ 65
 蜂の巣状多孔構造 152
 バックエンドプロセス 42
 バッチ式装置 180
 発展型 SNP 技術 158
 バリアメタル 50
 バルクマイクロプロセス 56

バルクマイクロマシニング 199
 反射防止膜 100
 半導体集積回路 40
 反応性イオンエッチング 47, 202
 汎用性繊維 134

【ひ】

ピア埋込み性 192
 ピアファースト 50
 ピアホール 101, 139, 177, 206
 ピアホールエッチング 49
 ビーム 108, 207
 ピール強度 138
 光 MEMS 用導波路 179
 ひずみ Si チャネル 45
 ピニング効果 167
 表面活性化接合 56
 表面吸着 16
 表面張力 18
 表面マイクロプロセス 56
 表面マイクロマシニング 56, 199
 ピラニア処理 69
 ピリジン錯体 206
 ピンホール 145

【ふ】

フィブリル化 135
 フォトニックデバイス 190
 フォトレジスト 50, 92
 フォトレジスト剥離 92, 102
 副生成物 184
 フッ化水素 206
 フッ酸処理 69
 物質の三態 1
 物質流束 34
 沸点 4
 物理的気相堆積法 163
 フラクタル構造 115

プラズマアッシング	92, 122	ポリエチレンテレフタ		癒着	27, 80
プラズマ酸素アッシング	92	レート	128	溶解度パラメータ	12, 30
プラズマダメージ	98, 113	ポリシリコン CVD	47	陽極接合	56
フラッシュメモリ	44	ポリテトラフルオロエチ		溶体急速膨張法	170
プラントル数	37	レン	137	溶媒作用	11
ブリッジ	167, 178	ポリプロピレン	128	溶剤染色	129
プリント基板	137	ポリプロピレン繊維	134	溶媒和	11
フルオロ化合物	24	ポロジェン	118		
ブレイクスルーエッチング	101			【ら, り】	
フロー式装置	180	【ま行】		ラウール則	10
ブロックコポリマー	117	マイクロマシニング	176, 199	ラングミュア吸着等温式	17
プロパン	24	マイクロ TAS	63	ラングミュア・ヒンシェル	
フロントエンドプロセス	42	マランゴニー乾燥法	108	ウッド型	184
分極率	112	マイクロボア	123	リーク電流	116
分散相	140	ミセル	31	リカンド	131
		密閉式成膜装置	179	リソグラフィ	55, 160
【へ, ほ】		ムーアの法則	41	硫酸/過酸化水素処理	92
米国半導体産業協会	41	無極性溶媒	30	流通式成膜装置	179
ヘキサメチルジシラザン	116	無電解めっき	140	流通式装置	180
ベクトラン	136	無電解 Ni-P めっき	151	リヨセル	135
ベクレ数	33	無電解 SNP 法	142, 151	リリース	202
ポアシール形成	99	メソポーラスシリカ	117	臨界圧力	13
ポイズンド・ピア	50	メタノール	24	臨界温度	4
ポイド	190	メタライズ技術	126	臨界点	2
芳香族ポリアミド繊維	132	メタルハードマスク	50	臨界点乾燥法	26
ホール・ベッチの関係式	146	めっき核づけ	132	リンケイ酸ガラス	178
ボッシュ法	61, 203	めっき膜改質	160		
ホットエレクトロン	47	メニスカス	26, 68, 191	【れ, ろ】	
ホットホルダ	78, 84	毛細管力	67	レイノルズ数	34
ボトムアップ	50, 52	モディファイア	30	レジスト	50, 92
ボトムアップ埋込み	52	モル融解熱	13	レジスト剥離	92
ボトムアップ成長	159			レジストパターン	66
ボトムアップめっき	50	【や行】		レベリング	147
ポリイミド	155	ヤング・ラプラスの式	27	レベリング効果	145, 158
ポリエステル	134	有機金属錯体	183	連続相	140
ポリエチレンオキシドアル		誘電体キャパシタ	178	ロジック集積回路	42
キルエーテル	142	誘電体経時破壊	116		
ポリエチレングリコール	129	誘電率	30		

【A】

ALD

50

ArF レーザ露光用レジスト

77

as-received

119

[B]	
BARC	101
BEOL	42, 48, 90, 97
BEP	42
BET の多層吸着等温式	188
[C]	
CFD	140
Chrastil 則	14
CMOS	42, 44
CMP	47, 51
CoWP キャップ堆積	51
critical point	3
Cu 析出反応	185
Cu 配線	48
CVD	47, 164, 165
C/W エマルジョン	142
C ₂ H _F ₅	24
[D]	
DD	49
deep RIE	202
Deep RIE エッチング	178
DRAM	44
Dρ 積	20, 173
[E~G]	
e-テキスタイル	135
EM	51, 160
EPMA	131
EUV リソグラフィ	110
FEOL	42, 44, 90, 91
FEP	42
FT-IR	122
F ₂ レーザ露光レジスト	77
GWP	79
[H~K]	
HFЕ	79
HFЕ 超臨界乾燥	83
high-k 絶縁膜	46

high-k/メタルゲート技術	
	46
HL 脱離反応	185
HMDS	116
H ₂ 解離吸着反応	185
IPA 蒸気乾燥	108, 207
ITRS	41, 53
ITWG	41
KrF レーザ露光用レジスト	77
[L~N]	
LCP	137
LDD	47
LH 型	184
LOCOS	44
low-k 膜	48, 97, 112
low-k レジスト剥離	101
LSI	40
Lyocell	135
Maxwell-Garnet 有効媒質 近似	119
MEMS	159
MOSFET	40
M-SNP	158
MSQ 系多孔質 low-k 薄膜	121
n ウェル	45
N ₂ O	25
[O, P]	
O ₂ プラズマ処理	99
p ウェル	45
PBO 繊維	132
PCB	137
Pd コロイド法	138
Pd/γ-アルミナ/アルマイト 傾斜複合皮膜	152
PEG	129
PET	128
PFC	79
PP	128

PRTR	24
PSG	178
PTFE	137
PVD	164
[R]	
RESS 法	170, 194
RIE	47, 202
[S]	
salicide プロセス	47
SCFD	140
SC1	92
SFT-CD	140
SF ₆	24
Si パターン	66
SIA	41
SiO ₂	178
SNP	141
SOG	112
SOI	45
STI	45, 90
[T~W]	
TDDB	46, 51, 116
TEOS	102, 195, 208
tie line	5
TMAH	76
TMCS	116, 122
TMDS	116
TSV	60
ultra low-k 膜	98
W-CVD	48
~~~~~	
β-ジケトン錯体	195
βジケトン配位子	206
γ-アルミナ	152
~~~~~	
0 次反応	187
1 次反応	187

—— 編著者・著者略歴* および執筆分担 ——

こんどう えいいち

近藤 英一 (1章, 2.2.4項, 5章, 7章)
 1985年 早稲田大学理工学部金属工学科卒業
 1987年 早稲田大学大学院博士前期課程修了
 (資源および金属工学専攻)
 1987年 川崎製鐵株式会社(現 JFEスチール
 株式会社)勤務
 1994年 川崎製鐵株式会社ハイテク研究所
 主任研究員
 1995年 博士(工学)(京都大学)
 1996年 IMEC(ベルギー)研究員
 1997年 IMEC エキスパート研究員
 1998年 九州工業大学助教授
 2000年 山梨大学助教授
 2007年 山梨大学教授
 現在に至る

うちだ ひろし

内田 寛 (7章, 8章)
 1995年 上智大学理工学部化学科卒業
 1997年 上智大学大学院博士前期課程修了
 (応用化学専攻)
 2000年 東京工業大学大学院博士後期課程満期
 退学(無機材料工学専攻)
 2000年 上智大学助手
 2001年 博士(工学)(東京工業大学)
 2006年 米国テキサス大学オースチン校研究員
 2007年 上智大学助教
 2010年 上智大学准教授
 現在に至る

なまつ ひでお

生津 英夫 (3章, 4.3.3項)
 1977年 早稲田大学理工学部応用化学科卒業
 1979年 早稲田大学大学院修士課程修了
 (応用化学専攻)
 1979年 日本電信電話公社(現 NTT)研究所
 勤務
 1993年 博士(工学)(早稲田大学)
 2005年 NTT アドバンステクノロジー株式会社
 勤務
 現在に至る

うえの かずよし

上野 和良 (2.1節)
 1982年 東北大学工学部応用物理学科卒業
 1984年 東北大学大学院博士前期課程修了
 (応用物理学専攻)
 1984年 日本電気株式会社および NEC エレク
 トロニクス株式会社(現 ルネサス エレク
 トロニクス株式会社)勤務
 1991年 工学博士(東北大学)
 2006年 芝浦工業大学教授
 現在に至る

そお まさと

曾根 正人 (6.2節, 6.3節)
 1991年 東京工業大学工学部高分子工学科卒業
 1993年 東京工業大学大学院博士前期課程修了
 (高分子工学専攻)
 1996年 東京工業大学大学院博士後期課程修了
 (高分子工学専攻)
 博士(工学)
 1996年 日本石油株式会社(現 JX日鉱日石エネ
 ルギー株式会社)勤務
 2000年 東京農工大学助手
 2005年 東京工業大学精密工学研究所准教授
 現在に至る

はっとり たけし

服部 毅 (3.3.1項, 4章, 8.3節)
 1969年 上智大学理工学部電気電子工学科卒業
 1971年 上智大学大学院修士課程修了
 (電気電子工学専攻)
 1971年 ソニー株式会社勤務
 1973年 米国スタンフォード大学集積回路研究所
 兼務(1974年まで)
 1975年 米国スタンフォード大学大学院 D.Eng.
 課程修了(電気工学(半導体工学)専攻)
 1980年 工学博士(上智大学)
 2005年 米国 The Electrochemical Society
 フェロー
 2007年 Hattori Consulting International
 代表
 現在に至る

* 編著者以降、著者表記は五十音順。

ほり てるお
堀 照夫 (6.1 節)

1969 年 福井大学工学部繊維染科学科卒業
1971 年 福井大学大学院修士課程修了
(繊維染科学専攻)

1974 年 スイス連邦工科大学 (ETH) 大学院博士
課程前期修了 (工業化学専攻)
Ph.D.

1975 年 福井大学助手
1979 年 福井大学講師
1981 年 福井大学助教授
1995 年 福井大学教授
2001 年 福井大学評議員兼任 (現在まで)
2001 年 福井大学地域共同研究センター長兼任
(2004 年まで)

2004 年 日本学術振興会繊維・高分子機能加工
120 委員会委員長 (2008 年まで)

2004 年 福井大学学長補佐兼任 (産学連携担当,
2007 年まで)

2007 年 福井大学副学長兼任 (国際交流担当, 2010
年まで)

2012 年 福井大学産学官連携本部特命教授
現在に至る

もりぐち まこと
森口 誠 (2.2 節, 3.3.1 項)

1993 年 東京理科大学理工学部電気工学科卒業
1993 年 オムロン株式会社勤務
2001 年 東北大学未来科学技術共同研究センター
兼務 (2003 年まで)
現在に至る

半導体・MEMSのための超臨界流体

Supercritical Fluid Technology in MEMS and Semiconductor Processing

© Kondo, Ueno, Uchida, Sone, Namatsu, Hattori, Hori, Moriguchi 2012

2012年9月28日 初版第1刷発行

★

検印省略

編著者 近藤英一
著者 上野和良
内田寛
曾根正人
生津英夫
服部毅
堀照夫
森口誠
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00837-1 (金) (製本:愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします