

増補改訂版

# レーザープロセス技術

— 基礎から実際まで —

永井 治彦 著

オプトロニクス社

## 増補改訂にあたって

初版から8年が経ち、レーザプロセスの技術と実用化応用はさらに拡大・発展した。この間に、半導体レーザ励起による固体レーザの改良・改善が進み、実用化応用が促進され、さらにファイバーレーザや薄ディスクレーザ、セラミックレーザ、フェムト秒レーザなど新しいプロセス用レーザの登場、また半導体レーザによる直接加工や高調波レーザビームによる短波長加工など、主に固体材料レーザの分野で、新しいプロセス用レーザや応用技術の開発が展開された。

改訂版では、初版での記述に追加説明や補正を加えるとともに、これら新たに登場したレーザや応用技術を取り上げ、固体材料レーザ関連の内容を拡大・増補した。

改訂にあたり、お世話になりました(株)オプトロニクス社・取締役編集長の川尻多加志様、同編集部・宮崎尚樹様に御礼申し上げます。

2008年10月10日

永井治彦

## まえがき (初版より)

レーザー発振の原理は、“光”と“物質”との相互作用に基づいている。これを構成要素で具体的に表すならば、“光”は光共振器に対応し、“物質”は気体、固体、半導体などのレーザー媒質に相当する。レーザーの語源(LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)が示すように、媒質からの放射(輻射)の誘導放出により光共振器内を往復する光が増幅される、この相互作用によりレーザー光が生まれる。

レーザープロセス技術はレーザー光を利用する技術であり、広い意味での“レーザー光による物質処理”技術である。つまり、レーザー光固有の特性である指向性、単色性、集光性を活用し、各種の物理的・化学的变化を生ぜしめるプロセスである。レーザー光固有の特性が従来の光にない優れた特性であるがために、広範な分野で新しい物質処理プロセスが開拓されている。

レーザー加工は物質処理の代表的プロセスである。レーザー加工では、CO<sub>2</sub>レーザーやYAGレーザーによる熱処理プロセスからエキシマレーザーによる光化学処理プロセス、さらにフェムト秒レーザーによる理想的な非熱処理プロセスへとその範囲が拡大されている。レーザー加工の第一段階は、各種の材料や部品の形状、構造、姿を用途に適した形態に変える熱加工であった。切断、穴あけ、微小除去、溶接・はんだ付け、表面焼入れなどのレーザー熱加工がその例である。レーザー加工の第二段階では、エキシマレーザーの誕生とともに短波長光による光化学処理プロセスが開拓され、材料、部品、デバイスなどの性質や特性を変える加工、あるいは新材料や新デバイスの創出にまで拡大発展し、レーザープロセッシングと呼ばれることが多くなってきた。熱処理プロセスであるクラディングや合金化、半導体のエッチングやドーピング、CVDやアブレーションによる薄膜形成などがその例である。

一方、材料、部品、デバイスといった単体の視点ではなく、製品製造の生産性の向上や低コスト化、微細化、高効率化の視点から、生産の高度化や生

産プロセスの形態変化（新生産プロセス）を図る革新技術にレーザープロセス技術が浸透しつつある。半導体製造工程におけるレーザーリソグラフィ、高密度プリント基板の穴あけ、液晶ポリシリコンTFTのアニーリング、レーザーウラン濃縮などがこれに相当する例である。

本書「レーザープロセス技術」は、このような広範な応用分野を熱処理プロセスと光化学処理プロセスとに大別し、プロセス用レーザーおよびレーザープロセスすなわち“レーザー光による物質処理”について、基礎から実際まで網羅した内容となっている。また、これらの分類の両方に跨った概念のレーザーアプリケーションやこれらの分類に必ずしも入れられないレーザーウラン濃縮もとり上げている。応用例は、実用化を優先基準として採り上げた。

本書は、このような広範な分野を体系的に把握することを第一の狙いとしてまとめられた。このため、厳密性をやや犠牲にしても、実際的立場からの平易な表現に努めたつもりであり、また、基礎理論や式の導出過程は必ずしも丁寧には説明されていない箇所もある。その際は、参考文献を付記した。

本書は、筆者が三菱電機（株）に入社以来、中央研究所（現・先端技術総合研究所）および応用機器研究所（現・産業システム研究所）での研究・開発活動を通じて得た知識や知見を土台としており、この間の共同研究者および事業化場所の名古屋製作所と伊丹製作所（現・系統変電・交通システム事業所）の関係各位に深く感謝申し上げます。

また、本書は、筆者が九州大学大学院の非常勤講師および九州大学先端科学技術共同研究センターの客員教授を勤めた際に作成した資料をもとに纏められたもので、学生時代レーザーに関する薫陶を受け、本書作成の基礎を授かりました九州大学名誉教授・宮副泰先生および本書出版の機会を与えて戴きました九州大学大学院・前田三男教授に厚く御礼申し上げます。

出版にあたり、お世話になりました（株）オプトロニクス社取締役編集長・川尻多加志様、同編集部・加納久裕様に御礼申し上げます。

2000年8月29日

永井治彦

# — 目 次 —

<b>第1章 レーザプロセスとは？</b> .....	1
<b>第2章 プロセス用レーザの基礎</b> .....	5
2.1 レーザ発振とレーザ光 .....	7
2.1.1 レーザ発振 .....	7
(a) 自然放出と誘導放出 .....	7
(b) 反転分布と光の増幅 .....	9
(c) 光共振器と誘導放出 .....	13
(d) 発振 .....	14
2.1.2 レーザ光の特性 .....	17
(a) 単色性 .....	17
(b) 指向性と集光性 .....	18
2.2 光共振器とモード .....	20
2.2.1 安定形共振器とモード .....	28
2.2.2 不安定形共振器とモード .....	35
2.2.3 ハイブリッド形共振器 .....	42
2.3 レーザビームの伝搬と集光 .....	42
2.4 レーザビームの制御 .....	46
2.4.1 ビームの空間制御 .....	46
(a) 発振横モードの制御 .....	46
(b) ビームの伝送と方向制御 .....	49
(c) ビームの集光と整形 .....	51

2.4.2	ビームの時間制御	53
	(a) 励起媒質の制御	53
	(b) 共振器の制御	54
2.4.3	ビームの偏光制御	57
2.5	レーザービームの品質評価	58

### 第3章 レーザプロセスの基礎 .....63

3.1	物質によるレーザー光の吸収と熱拡散	64
3.2	プラズマの生成とレーザー光の吸収	68
3.3	熱処理プロセス	71
3.4	光化学処理プロセス	75
3.5	レーザーアブレーション	79
	3.5.1 短波長レーザーアブレーション	81
	3.5.2 超短パルスレーザーアブレーション	81

### 第4章 プロセス用レーザー .....84

4.1	気体レーザー	85
	4.1.1 CO <sub>2</sub> レーザー	85
	(a) 励起と緩和	86
	(b) 放電励起のCO <sub>2</sub> レーザーの構造	90
	(c) 励起用放電と電源回路	93
	(d) CO <sub>2</sub> レーザー用共振器とモード	96
	(e) CO <sub>2</sub> レーザーの偏光	96
	(f) 出力特性	99
	4.1.2 TEA CO <sub>2</sub> レーザー	102
	(a) 励起と緩和	103

(b) TEA CO <sub>2</sub> レーザの構造と励起用電源 .....	103
(c) TEA CO <sub>2</sub> レーザ用共振器 .....	106
4.1.3 エキシマレーザ .....	106
(a) エキシマレーザの原理 .....	107
(b) 励起方式 .....	109
(c) 予備電離方式 .....	110
(d) 放電励起回路方式 .....	112
(e) エキシマレーザ装置 .....	114
(f) エキシマレーザの特性 .....	117
4.1.4 金属蒸気レーザ .....	118
(a) 銅蒸気レーザ .....	119
(b) He-Cd <sup>+</sup> レーザ .....	121
4.1.5 Ar <sup>+</sup> レーザ .....	122
(a) 励起と緩和 .....	122
(b) レーザ管 .....	123
4.2 固体レーザ .....	126
4.2.1 固体レーザのエネルギー準位 .....	127
(a) ルビーレーザ .....	129
(b) Nd:YAG レーザ .....	130
(c) Nd:YVO <sub>4</sub> レーザ .....	133
(d) Yb:YAG レーザ .....	133
(e) Yb:石英ガラスレーザ .....	136
4.2.2 固体レーザの材料 .....	138
4.2.3 固体レーザの構造 .....	144
4.2.4 固体レーザ用共振器 .....	146
4.2.5 固体レーザの動作特性 .....	147
(a) 固体レーザの発振形態 .....	147
(b) 固体レーザの出力特性 .....	149

4.2.6	固体レーザーの冷却	151
4.2.7	スラブレザー	151
4.2.8	LD励起固体レーザー	152
4.2.9	薄ディスクレーザー	155
4.2.10	セラミックレーザー	158
4.2.11	波長可変固体レーザー	159
4.3	高出力半導体レーザー	160
4.4	ファイバーレーザー	164
4.4.1	励起方法	167
4.4.2	ファイバーレーザー用光共振器	170
4.4.3	ファイバーレーザーの高出力化	172
4.4.4	シングルモード高出力化	175
4.4.5	フォトニック結晶ファイバーレーザー	176
4.5	フェムト秒レーザー	178
4.6	光高調波の発生	184

## 第5章 レーザプロセスの実際

5.1	レーザー加工機構	193
5.2	熱処理プロセス	200
	(a) レーザ熱加工の特徴	200
	(b) YAGレーザービームとCO <sub>2</sub> レーザービームの特性	201
	(c) レーザ熱加工の適用分野	203
5.2.1	除去加工	207
	(a) レーザ切断・穴あけ	207
	(b) 微小除去	217
5.2.2	接合加工	225
5.2.3	表面改質	231



(b)	TEA CO <sub>2</sub> レーザーの構造と励起用電源	103
(c)	TEA CO <sub>2</sub> レーザー用共振器	106
4.1.3	エキシマレーザー	106
(a)	エキシマレーザーの原理	107
(b)	励起方式	109
(c)	予備電離方式	110
(d)	放電励起回路方式	112
(e)	エキシマレーザー装置	114
(f)	エキシマレーザーの特性	117
4.1.4	金属蒸気レーザー	118
(a)	銅蒸気レーザー	119
(b)	He-Cd <sup>+</sup> レーザー	121
4.1.5	Ar <sup>+</sup> レーザー	122
(a)	励起と緩和	122
(b)	レーザー管	123
4.2	固体レーザー	126
4.2.1	固体レーザーのエネルギー準位	127
(a)	ルビーレーザー	129
(b)	Nd:YAGレーザー	130
(c)	Nd:YVO <sub>4</sub> レーザー	133
(d)	Yb:YAGレーザー	133
(e)	Yb:石英ガラスレーザー	136
4.2.2	固体レーザーの材料	138
4.2.3	固体レーザーの構造	144
4.2.4	固体レーザー用共振器	146
4.2.5	固体レーザーの動作特性	147
(a)	固体レーザーの発振形態	147
(b)	固体レーザーの出力特性	149

4.2.6	固体レーザーの冷却	151
4.2.7	スラブレーザー	151
4.2.8	LD励起固体レーザー	152
4.2.9	薄ディスクレーザー	155
4.2.10	セラミックレーザー	158
4.2.11	波長可変固体レーザー	159
4.3	高出力半導体レーザー	160
4.4	ファイバーレーザー	164
4.4.1	励起方法	167
4.4.2	ファイバーレーザー用光共振器	170
4.4.3	ファイバーレーザーの高出力化	172
4.4.4	シングルモード高出力化	175
4.4.5	フォトニック結晶ファイバーレーザー	176
4.5	フェムト秒レーザー	178
4.6	光高調波の発生	184

## 第5章 レーザプロセスの実際

5.1	レーザー加工機構	193
5.2	熱処理プロセス	200
	(a) レーザ熱加工の特徴	200
	(b) YAGレーザービームとCO <sub>2</sub> レーザービームの特性	201
	(c) レーザ熱加工の適用分野	203
5.2.1	除去加工	207
	(a) レーザ切断・穴あけ	207
	(b) 微小除去	217
5.2.2	接合加工	225
5.2.3	表面改質	231

5.3	光化学処理プロセス	233
5.3.1	アブレーション加工	235
(a)	穴開け	235
(b)	配線・線材の加工	239
(c)	マーキング	240
(d)	薄膜形成	241
5.3.2	リソグラフィ	243
5.3.3	アニーリング	245
5.3.4	表面改質	247
5.3.5	CVDによる薄膜形成	248
5.3.6	エッチング	250
5.3.7	ドーピング	251
5.3.8	医療分野への応用	252
5.3.9	F <sub>2</sub> レーザーの応用	253
5.4	超短パルス処理プロセス	253
5.4.1	超短パルスの効果	254
5.4.2	超短パルス加工現象	256
5.4.3	超短パルスレーザー加工の応用	257
(a)	フェムト秒レーザーによる表面加工	257
(b)	フェムト秒レーザーによる内部加工	259
(c)	ピコ秒レーザーによる加工	260
5.5	レーザープロセスの新しい展開	260
5.5.1	LD直接加工	261
5.5.2	ファイバーレーザー加工	262
5.5.3	レーザー切断	263
5.6	レーザー同位体分離	265
■	参考図書	273
■	索引	275

## レーザープロセスとは？

「レーザープロセス」とは、広い意味での“レーザーによる物質処理”を意味する。レーザー光固有の特性すなわち指向性、単色性、集光性（高エネルギー密度）を利用し、各種の物理的・化学的変化を生ぜしめるプロセスである<sup>1)</sup>。

歴史的な推移から見ると、図1.1に示すように、レーザープロセスは“レーザー加工”に始まり、次に“レーザープロセッシング”，更に“レーザープロセス”へと、その応用範囲を拡大し、発展してきた。これらの言葉は必ずしも厳密に定義されている訳ではないが、その概念は下記のように分類されよう。

### ①レーザー加工 (Laser material processing)

材料・部品の形状、構造、姿を用途に適した形態に変える加工で、例として切断、穴あけ、微小除去、溶接・はんだ付け、表面焼き入れなどが挙げられる。レーザー熱加工と呼ばれる場合もある。

### ②レーザープロセッシング (Laser processing)

①に加えて、材料・部品やデバイスの性質、特性を変える加工、さらには新材料・新デバイスの創出まで含む。例としてクラディング、合金化等の表面改質、半導体のエッチングやドーピング、CVD (Chemical Vapor Deposition) やアブレーションによる薄膜形成などまで範囲が広がる。

### ③レーザープロセス (Laser process)

②を含めてさらに、生産性の向上や低コスト化、微細化、高効率化など、生産の高度化や生産プロセスの形態変化（新生産プロセス）を促進する技術までも含む。例として鉄鋼板の連続溶接、プリント基板の穴あけ、

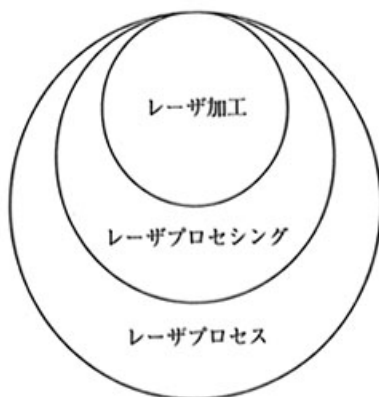


図1.1 レーザプロセス技術の推移

DRAM製造工程における光リソグラフィー、液晶ポリシリコンTFTの低温アニーリング、レーザーウラン濃縮等へと範囲が広がる。

表1.1は、時間的には上記したような推移で発展してきたレーザープロセスを、技術的観点から（イ）熱処理プロセス、（ロ）光化学処理プロセス、（ハ）レーザーアブレーション、（ニ）レーザー同位体分離の4つのプロセスに分類したものである。

レーザー光が材料や部品に照射され、吸収されると、照射された部位の温度が上昇する。照射された部位の熱放散よりエネルギーの供給が勝っていればその部分の温度がさらに上昇し、溶融状態に到る。さらに温度が上昇すれば気化状態となり、蒸発飛散する。熱処理プロセスはこの現象を利用した加工法である。表面焼き入れは溶融する直前の状態まで、切断、接合加工、クラディング等の表面改質は溶融状態まで、穴あけや微小除去は気化状態に到るまでレーザービームを照射し、温度を上昇させることにより実現される加工である。

一般に、光が物質に吸収されるプロセスは極めて早いので、このような相

表 1.1 レーザプロセスの分類

<b>熱処理プロセス</b>			
除去加工	レーザー切断	Laser Cutting	CO <sub>2</sub> レーザー, YAGレーザー
	レーザー穴あけ	Laser Drilling	CO <sub>2</sub> レーザー, YAGレーザー
	微小除去		
	レーザートリミング	Laser Trimming	YAGレーザー, CO <sub>2</sub> レーザー
	レーザーリペアリング	Laser Repairing	YAGレーザー
接合加工	レーザーマーキング	Laser Marking	YAGレーザー, CO <sub>2</sub> レーザー
	レーザースクライビング	Laser Scribing	YAGレーザー, CO <sub>2</sub> レーザー
	レーザー溶接	Laser Welding	CO <sub>2</sub> レーザー, YAGレーザー
	レーザーはんだ付け	Laser Soldering	YAGレーザー
	レーザー表面焼き入れ (硬化)	Laser Hardening	CO <sub>2</sub> レーザー
表面改質	レーザークラディング	Laser Cladding	CO <sub>2</sub> レーザー
	レーザー合金化	Laser Alloying	CO <sub>2</sub> レーザー
	レーザーグレーズング (アモルファス化)	Laser Glazing	CO <sub>2</sub> レーザー
	レーザー加熱	Laser Physical Vapor Deposition	TEA CO <sub>2</sub> レーザー, YAGレーザー, エキシマレーザー
	レーザーPVD		
<b>光化学処理プロセス</b>			
	レーザー穴あけ	Laser Drilling	エキシマレーザー
	レーザー表面改質	Laser Surface Modification	エキシマレーザー
	レーザーCVD	Laser Chemical Vapor Deposition	エキシマレーザー
	レーザーリペアリング	Laser Repairing	YAGレーザー, YAG高調波 エキシマレーザー
	レーザーリソグラフィ	Laser Lithography	エキシマレーザー
	レーザーアニーリング	Laser Annealing	エキシマレーザー, YAG・SHG
	レーザーエッチング	Laser Etching	エキシマレーザー
	レーザードーピング	Laser Doping	エキシマレーザー
	レーザー合金化	Laser Alloying	
<b>レーザーアブレーション</b>			
		Laser Ablation	エキシマレーザー, フェムト秒レーザー
<b>レーザー同位体分離</b>			
		Laser Isotope Separation	銅蒸気レーザー+色素レーザー TEA CO <sub>2</sub> レーザー

移行のプロセスは、照射するレーザー光のパルス幅に大きく依存する。レーザー光のパルス幅が狭くなり、せん頭値が高くなるにつれ、気化状態に移行し易

くなる。従って、加工の種類に応じて連続照射にするかパルス照射にするか、あるいはより狭い幅のパルスにするか等の選定がレーザー加工では大変重要である。

アブレーションには“除去”の意味がある。アブレーション加工は極めて狭いパルス幅のレーザー光を照射し、短時間の内に蒸発・飛散まで移行させる加工法で、熔融させない表面焼き入れとは対極に位置する加工法である。熱処理プロセスの中でも、穴あけやトリミング、リベアリング、マーキング、スクライビングなどはパルスレーザーによる物質の蒸発を利用した除去加工で、アブレーション加工の範疇に属する。しかし、“アブレーション”という言葉はこれら加工の後に出て来た概念なので、ここでは熱処理プロセスに入れておく。

光化学処理プロセスは、気体あるいは固体の光化学反応を伴って行う処理プロセスである。気体の場合は、レーザー光の吸収、励起、電離あるいは解離等の過程に気体中での光化学反応が介在する。固体の場合は、高分子や半導体などの材料において解離や電離、化学変化が介在した処理プロセスとなる。光化学処理プロセスの中にも、エキシマレーザーを利用した穴あけやクリーニングなどのようにアブレーションと呼ばれる範疇に入る加工とオーバーラップする加工もある。

このような4つの処理プロセスは必ずしも理論的に把握・解明されておらず、明確な境界が引かれている訳ではない。

## 第1章 参考文献

- 1) 村岡克紀, 前田三男: レーザー応用計測 (産業図書, 1995) 213.

## プロセス用レーザの基礎

レーザは波長域からみれば、図2.1に示すように、電磁波の一領域を占める。赤外線（サブミリ波・遠赤外を含む）から可視光、紫外域にわたって多数の発振線が観測されているが、さらに真空紫外、軟X線、X線へと波長域が広がっている。

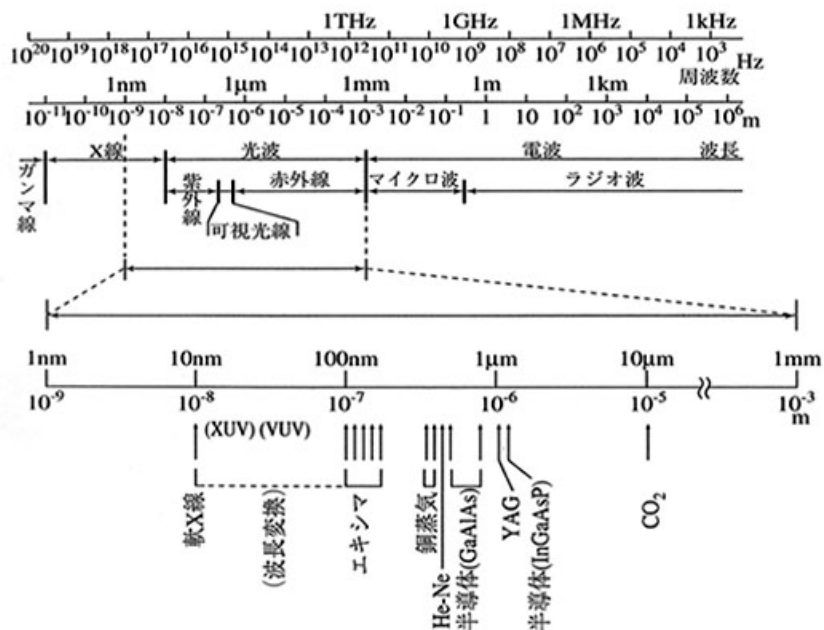


図2.1 電磁波の名称とレーザの波長域