

第2版

応用物理ハンドブック

応用物理学会
編

丸善株式会社

第2版の編集にあたって

本ハンドブック出版の目的は、初版において当時の辻内順平 応用物理学会長，田幸敏治「応用物理ハンドブック委員会」委員長，生駒俊明 編集委員長が記述しているように，応用物理という，広範・多岐でかつ漠としたところのある学問分野における啓蒙活動の一つであり，この点は今でも変りはない．この目的は初版においてある程度達成されたと思われる．しかし，同時に常に進歩・発展している分野の書物であるから，変化に応じた改訂を繰り返し，陳腐化を防ぐことが必要で，それがこの第2版の趣旨である．

「応用物理ハンドブック」の初版が会長，両委員長，そのほか応用物理学会関係者と丸善出版事業部の協力のもとで出版されたのは1990年である．予想される読者の多数を占めると思われた当時の応用物理学会会員数は約17000人であった．2002年3月現在，この数は22000人であるから，この12年間に5000人近くも増えたことになり，読者の数や年齢層にも変化が生じたと思われる．会員数の増加に加えて，応用物理学という学問の内容にも大きな変化があった．応用物理学は，あらゆる技術の基礎学問であるとともに，それ自身が常に最先端の学術的，技術的成果を取り込み，集大成しなくてはならない宿命をもっている．それらの変化を取り入れて，このハンドブックを改訂し続けることは応用物理学の使命といって過言でない．この第2版のハンドブック出版の仕事は，いわばその学会の使命というより，むしろ業務の一環として10年後の改訂をめどに初版の出版のすぐ後から始まったともいえる．しかし，応用物理の内容やカバーする領域の変化は大きいうえに，きわめて多岐にわたるので，いかに人材豊富な学会といえども，適当な研究者を選び，執筆を依頼して原稿完成に至るのは容易ではなく，予想外に時間をとる事業となった．第2版の当初計画では，1999年ないし2000年出版の予定であった．それが2年の遅れを出したのは，編集委員会の怠慢といわれても仕方がないが，多忙を極める第一線の応用物理研究者に執筆を依頼して，少しでも先端的で高いレベルの内容を維持したいという意向の結果であ

り、この出版で学会の責任は一応果たしたことになるのではないかと考える。学会委員、その他の読者のご寛恕を賜りたい。

この第 2 版は、かなり大幅な改訂で、執筆者も大きく入れ替えてあり、全面改訂に近いといってよいほどである。有機分子材料・バイオ関連技術という章の新設のほか、一部をあげても、位相共役素子、光情報機器、微細光波現象、画像関連技術、半導体レーザ、超高速光技術、高温超伝導材料、超伝導素子応用、走査プローブ顕微鏡、薄膜成長のシミュレーション、量子ナノ構造、メゾスコピック構造の物性、半導体評価技術、MOS 構造応用デバイス、半導体光デバイス、プロセスシミュレーション、極薄ゲート絶縁膜、強誘電体薄膜、酸化物ガラス、スピニエレクトロニクス材料、微小重力環境技術など多くの節や項目の追加があり、編集企画担当者の意気込みを感じていただければ幸いである。

最終の編集委員会は 2001 年 8 月に行われ、編集作業は終了した。編集委員ならびに執筆者各位のご尽力に感謝申し上げる。

最後に、この出版に最大限の努力を傾けられ、編集委員と執筆者を督励して出版にこぎつけてくださった丸善出版事業部の方々に厚く御礼申し上げたい。

2002 年 3 月

「第 2 版 応用物理ハンドブック」編集委員会

委員長 金 原 粲

「応用物理ハンドブック」委員会

委員長 田幸敏治 東京工業大学名誉教授

委員 金原 粲 金沢工業大学

「第2版 応用物理ハンドブック」編集委員会

編集委員長 金原 粲 金沢工業大学

編集委員

芦田 佐吉*	株式会社 山寿セラミックス
雨宮 好仁	北海道大学工学研究科
有田 睦信*	有限会社 学際科学技術総合研究所
生嶋 明*	豊田工業大学大学院工学研究科
一村 信吾	独立行政法人 産業技術総合研究所
魚住 清彦*	青山学院大学理工学部
宇佐美誠二*	神奈川工科大学
大津 元一*	東京工業大学大学院総合理工学研究科
岡路 正博*	独立行政法人 産業技術総合研究所
岡本 博明	大阪大学大学院基礎工学研究科
奥田 雄一	東京工業大学大学院理工学研究科
奥村 次徳	東京都立大学大学院工学研究科
小野 雅敏*	特別認可法人 情報処理振興事業協会
小原 春彦	独立行政法人 産業技術総合研究所
河田 聡	大阪大学大学院工学研究科
北沢 宏一*	東京大学大学院新領域創成科学研究科
金原 粲	金沢工業大学
工藤 一浩	千葉大学工学部
國分 泰雄	横浜国立大学工学研究院
小山二三夫	東京工業大学精密工学研究所
権藤 靖夫*	横浜国立大学名誉教授
重川 秀実	筑波大学物理工学系
重里 有三	青山学院大学理工学部
下山 淳一	東京大学工学部
竹添 秀男*	東京工業大学大学院理工学研究科
田中 一宜*	独立行政法人 産業技術総合研究所

田 中 啓 司	北海道大学大学院工学研究科
内 藤 方 夫	日本電信電話株式会社物性科学基礎研究所
中 山 諭	日本電信電話株式会社通信エネルギー研究所
長谷川英機*	北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター
平 川 一 彦	東京大学生産技術研究所
本 田 捷 夫*	千葉大学工学部
本 間 芳 和	日本電信電話株式会社物性科学基礎研究所
三 木 幸 信	独立行政法人 産業技術総合研究所
宮澤信太郎	株式会社 信光社
宮 島 英 紀	慶應義塾大学理工学部
宮 前 博	コニカ株式会社
松 村 正 清*	株式会社 液晶先端技術開発センター
望 月 康 則	日本電気株式会社シリコンシステム研究所
山 本 恵 彦	筑波大学物理工学系

(五十音順, *は章担当責任者, 2002 年 3 月現在)

執筆者一覧

青砥なほみ	石橋 忠夫	宇田 応之	岡田 益男	加藤義章
青野 正和	石山 和志	内田 龍男	岡田 安正	金森照寿
赤澤 正道	磯谷 順一	江刺 正喜	岡野 達雄	金谷 正敏
浅井 哲也	市川 昌和	榎本 陽一	岡本 博明	金子 尚史
朝倉 清高	一村 信吾	遠藤 裕久	岡山 重夫	狩野 覚
浅田 雅洋	伊藤 厚子	遠藤 康夫	小川 智哉	河合 壯
朝日 一	伊藤 弘昌	近江 和昭	沖野 芳弘	川崎 雅司
芦田 佐吉	伊藤 正時	大岩 彰	奥居 徳昌	川副 博司
安達 定雄	糸崎 秀夫	大崎 博之	奥田 雄一	河田 聡
安達 洋	稲川幸之助	大島 忠平	奥村 次徳	川田 善正
阿知波洋次	井上 廉	大路 譲	奥村 豊彦	河津 璋
天野 利昌	井上 光輝	大隅 一政	尾崎 肇	菅野 允
雨宮 好仁	猪川 洋	大谷 成元	小田 俊理	岸野 克己
荒井 賢一	井野 正三	大塚 泰一郎	小原 春彦	北島 洋
荒川 一郎	茨木 伸樹	大津 元一	織原 弘三	北村 孝司
有田 睦信	今井 秀孝	大泊 巖	香川 俊明	北森 俊行
有本 由弘	今村 修武	大苗 敦	梶川 浩太郎	木村 茂行
栗野 祐二	入沢 寿美	大橋 弘通	柏木 邦宏	桐木 俊彦
安藤 利典	岩本 光正	大森 保治	春日 壽夫	櫛引 淳一
家 正則	上野 照剛	大森 裕	春日 正伸	葛原 正明
生垣 哲朗	上野 信雄	大柳 宏之	交久瀬 五雄	工藤 一浩
井澤 靖和	魚住 清彦	岡崎 信次	勝 亦 徹	工藤 成史
石川 正俊	宇佐美 誠二	岡路 正博	河東田 隆	久保野 敦史
石川 正道	碓井 彰	岡田 修司	加藤 正明	久米 英浩

黒田和明	澤邊厚仁	寺尾元康	馬場 茂	松重和美
黒田和男	品田賢宏	寺嶋孝仁	早坂伸夫	松田維人
黒田隆男	篠木藤敏	寺前紀夫	原 正彦	松本宏一
小池和幸	柴田英毅	土居正治	伴野靖太郎	松本弘一
合志陽一	渋谷真人	戸叶一正	樋口久幸	三位信夫
河野彰夫	嶋田寿一	徳本洋志	日比野倫夫	三浦 登
肥塚裕至	清水立生	都甲 潔	日比谷孟俊	三浦康弘
小澤口治樹	志水隆一	富江敏尚	平川一彦	水戸郁夫
腰塚直己	下山淳一	富取正彦	平松和政	南 茂夫
後藤敬典	東海林 彰	虎溪久良	広川吉之助	宮崎照宣
後藤顕也	末高 洽	内藤方夫	廣瀬和之	宮澤信太郎
小長井 誠	末宗幾夫	中川清司	福田承生	宮島英紀
小林喬郎	杉田 愼	中沢正敏	福谷克之	村岡克紀
小林 猛	杉 道夫	中沢正隆	福村知昭	村上 宏
小林正典	須藤昭一	中島健介	藤原裕之	村上雅人
小間 篤	瀬恒謙太郎	中嶋定夫	二本正昭	村田好正
小松啓郎	高井幹夫	中島信一	淵上宏幸	村山順一郎
古室昌徳	高崎金剛	中瀬 真	古屋一仁	村山洋一
小山二三夫	高須新一郎	中段和宏	別府達郎	毛利信男
近藤道雄	高瀬 弘	中塚勝人	宝川幸司	望月康則
権藤靖夫	高梨弘毅	中西八郎	宝野和博	本久順一
斉木 篤	高橋由夫	中村 収	保坂純男	森江 隆
斎藤邦樹	竹添秀男	中村和夫	細川直吉	森垣和夫
斉藤徳郎	田島道夫	中村貴義	干川圭吾	森 健彦
酒井徹志	田中一宜	中村慶久	星 肇	森田慎三
榊 裕之	田中啓司	中本高道	細野秀雄	森村正直
坂谷忠夫	田中 充	中山 諭	堀田和明	諸川 滋
坂本泰彦	谷川庄一郎	中山喜萬	堀内俊寿	八百隆文
匂坂康男	田畑三郎	那須三郎	堀上 徹	八尾 誠
櫻井弘久	田部道晴	西 謙二	堀越佳治	八木克道
佐々木孝友	樽茶清悟	西沢紘一	本田捷夫	八木健彦
佐藤勝昭	辻 泰	西嶋光昭	本間禎一	矢口博久
佐藤英行	津田信哉	西田信男	本間芳和	安岡弘志
寒川誠二	土屋敏章	西部 徹	前川隆雄	安田幸夫
澤木宣彦	筒井哲夫	長谷川英機	前多 正	八瀬清志
沢田嗣郎	鶴田匡夫	秦 信宏	松井純爾	山内良三

山岡 亜 夫	山 口 貢	山 下 努	山 本 恵 彦	吉 沢 克 仁
山 口 一 郎	山 崎 聡	山 下 幹 雄	山 本 裕 久	吉 田 貞 史
山口十六夫	山 崎 大 輔	山 添 昇	山 本 庸 介	吉 野 勝 美
山 口 博 司	山 崎 鉄 夫	山 田 公	山 本 喜 久	芳 野 俊 彦
山 口 益 弘	山 下 一 郎	山 本 公 明	吉 川 彰	米 原 隆 夫

(五十音順)

目 次

第 1 章 光 技 術	[編集委員 本田捷夫*・河田 聡・宮前 博] 1
1.1 光 学 基 礎	[鶴田匡夫] 2
1.1.1 幾 何 光 学	2
1.1.2 物 理 光 学	2
1.2 光学材料, 光学素子	4
1.2.1 光 学 材 料	[虎溪久良] 4
1.2.2 光 学 素 子 1	[桐木俊彦] 6
1.2.3 光 学 素 子 2	[山本公明] 9
1.2.4 動的光制御素子	[西田信夫] 10
1.2.5 位相共役 (光学) 素子	[a 黒田和男 ; b, c 川田善正] 13
1.3 結 像 機 器	16
1.3.1 カ メ ラ	[高瀬 弘] 16
1.3.2 光 学 顕 微 鏡	[中村 収] 17
1.3.3 望 遠 鏡	[家 正則] 20
1.3.4 投影露光装置	[渋谷真人] 21
1.4 分 光 技 術	23
1.4.1 分 光 素 子	[南 茂夫] 23
1.4.2 分 光 器	[南 茂夫] 26
1.4.3 先端分光技術	[寺前紀夫] 27
1.5 偏光解析技術 (エリプソメトリ)	[山口十六夫] 27
1.5.1 エリプソメトリ計測技術	27
1.5.2 エリプソメトリ解析技術	28
1.6 感光材料, 光メモリ材料, 光センサ	30
1.6.1 感 光 材 料	[a 三位信夫 ; b 山岡亜夫 ; c 北村孝司] 30
1.6.2 光 メ モ リ 材 料	[沖野芳弘] 33
1.6.3 光 セ ン サ	[久米英浩] 36
1.7 光情報機器, 装置, システム	40
1.7.1 光メモリシステム	[後藤顕也] 40
1.7.2 レーザプリンタ	[安藤利典] 42
1.8 光 応 用 計 測	42
1.8.1 形状, 変位, 変形, 振動, 速度の計測	[山口一郎] 42
1.8.2 光ファイバ応用計測	[芳野俊彦] 46
1.8.3 スペクトル応用計測	[河田 聡] 49
1.8.4 レーザ励起計測	[沢田嗣郎] 52
1.9 微細光波現象とその応用	54
1.9.1 近 接 場 光 学	[a 河田 聡 ; b, c 大津元一] 54
1.9.2 レーザトラッピング	[河田 聡] 57
1.10 光 情 報 処 理	[石川正俊] 58
1.10.1 光コンピューティング	58
1.10.2 光インターコネクションとスマートピクセル	58
1.10.3 光 ス イ ッ チ	59
1.11 画像関連技術	59
1.11.1 撮像デバイス	[黒田隆男] 59
1.11.2 表示デバイス	[村上 宏・諸川 滋] 62
1.11.3 立 体 像 表 示	[本田捷夫] 66
1.11.4 画像処理・特殊イメージング法	[本田捷夫] 69
1.12 視 覚 光 学	[矢口博久] 71
1.12.1 生 理 光 学	71
1.12.2 測 色・色 彩	73
1.12.3 光 源・測 光	75

第2章 量子エレクトロニクス [編集委員 大津元一*・小山二三夫] 81

2.1 量子エレクトロニクスの基礎 [山本喜久] 82	2.5 光 導 波 113
2.1.1 密度行列と電磁場の量子化 82	2.5.1 光 ファイバ [山内良三] 113
2.1.2 自然放出と誘導放出 83	2.5.2 石英系導波路デバイス [大森保治] 116
2.1.3 レーザの基礎 84	2.5.3 光 変 調 器 [土居正治] 118
2.1.4 非線形効果 85	2.5.4 微小光学素子 [西沢紘一] 120
2.2 ビーム光学とレーザ共振器 [古屋一仁] 86	2.6 光 制 御 121
2.2.1 ガウスビーム波 86	2.6.1 光 ス イ ッ チ [小松啓郎] 121
2.2.2 レーザ共振器 87	2.6.2 非線形光学 [伊藤弘昌] 123
2.3 各種レーザ 90	2.7 光 増 幅 124
2.3.1 固体レーザ [小林喬郎] 90	2.7.1 光ファイバ増幅器 [須藤昭一] 124
2.3.2 色素レーザ [山下幹雄] 92	2.7.2 半導体光増幅器 [小山二三夫] 127
2.3.3 気体レーザ [堀田和明] 94	2.8 超高速光技術 129
2.3.4 エクシマレーザ [狩野 覚] 102	2.8.1 超短光パルス発生 [山下幹雄] 129
2.4 半導体レーザ 103	2.8.2 光 ソ リ ト ン [中沢正隆] 132
2.4.1 化合物半導体材料 [岸野克己] 103	2.9 レーザ応用 135
2.4.2 量子井戸レーザ [浅田雅洋] 106	2.9.1 レーザ同位体分離・光プロセス [井澤靖和] 135
2.4.3 通信用半導体レーザ [水戸郁夫] 108	2.9.2 高出力レーザ [加藤義章] 137
2.4.4 短波長半導体レーザ [岸野克己] 110	2.9.3 光 通 信 [中川清司] 138
2.4.5 面発光レーザ [小山二三夫] 113	2.9.4 光 メ モ リ [後藤顕也] 140

第3章 超 伝 導 [編集委員 北沢宏一*・内藤方夫・小原春彦・下山淳一] 149

3.1 超伝導の基礎 150	3.3.4 輸送システム関連技術 [大崎博之] 180
3.1.1 超伝導の現象論と微視的理論 [大塚泰一郎] 150	3.3.5 医療/加速器関連技術 [山口 貢] 182
3.1.2 第2種超伝導体と磁束 [小原春彦] 156	3.3.6 小型機器および実験周辺機器 [村上雅人] 184
3.1.3 高温超伝導の発現機構 [内藤方夫] 159	3.4 超伝導素子応用 186
3.2 超伝導材料の概要 162	3.4.1 超伝導素子応用の概観 [中島健介・山下 努] 186
3.2.1 超 伝 導 物 質 [下山淳一] 162	3.4.2 ジョゼフソン素子 [篠木藤敏] 187
3.2.2 線材・バルクプロセス [戸叶一正] 166	3.4.3 SQUID 磁気センサ [糸崎秀夫] 196
3.2.3 薄膜プロセス [内藤方夫] 169	3.4.4 電 圧 標 準 [坂本泰彦] 198
3.3 超伝導パワー応用 174	3.4.5 論理素子およびメモリ素子 [東海林彰] 199
3.3.1 超伝導パワー応用の概観 [堀上 徹] 174	3.4.6 超伝導三端子素子 [小林 猛] 200
3.3.2 超伝導マグネット [井上 廉] 177	3.4.7 マイクロ波受動素子 [瀬恒謙太郎] 202
3.3.3 エネルギー関連技術 [腰塚直己] 178	3.4.8 そ の 他 [榎本陽一] 203

第4章 物理分析技術 [編集委員 小野雅敏*・一村信吾・本間芳和] 207

4.1 荷電粒子ビーム基礎技術 208	4.1.4 荷電粒子検出技術 [後藤敬典] 213
4.1.1 ビーム源 [安達 洋一] 208	4.1.5 質 量 分 析 法 [交久瀬五雄] 215
4.1.2 放 射 光 [山崎鉄夫] 209	4.2 電子線の利用 218
4.1.3 荷電粒子光学 [古室昌徳] 212	4.2.1 透過電子顕微鏡 [日比野倫夫] 218

4.2.2	走査型電子顕微鏡	〔岡山重夫〕	220	4.5.2	光ルミネッセンス		251
4.2.3	電子線マイクロプローブ X 線分析法			4.5.3	吸 光 分 光 法	〔末高 治〕	251
		〔村山順一郎〕	223	4.5.4	ラマン分光法	〔中島信一〕	252
4.2.4	カソードルミネッセンス	〔奥村豊彦〕	227	4.5.5	LIF	〔村岡克紀〕	253
4.3	イオン利用		229	4.5.6	X 線回折法 (X 線回折による結晶解析)		
4.3.1	2 次イオン質量分析法	〔本間芳和〕	229			〔岡田安正〕	255
4.3.2	SNMS および光イオン化質量分析法	〔一村信吾〕	231	4.5.7	EXAFS	〔大柳宏之〕	257
4.3.3	ラザフォード後方散乱分析法および MEIS			4.5.8	蛍光 X 線分析	〔合志陽一〕	260
		〔高井幹夫〕	234	4.5.9	X 線顕微鏡	〔富江敏尚〕	262
4.3.4	粒子励起 X 線分光法	〔宇田応之〕	237	4.6	電 磁 場 利 用		264
4.3.5	SCANIR (粒子線衝撃光放射分析)			4.6.1	核 磁 気 共 鳴	〔安岡弘志〕	264
		〔志水隆一・山口博司〕	238	4.6.2	電子スピン共鳴	〔磯谷順一〕	265
4.4	放射線源とその応用		240	4.6.3	メスバウアー法	〔伊藤厚子〕	267
4.4.1	放 射 線	〔山崎鉄夫〕	240	4.6.4	放射光による核共鳴散乱	〔那須三郎〕	268
4.4.2	中性子回折法	〔遠藤康夫〕	243	4.7	音 波 利 用	〔櫛引淳一〕	272
4.4.3	放射線分析法	〔加藤正明〕	245	4.7.1	超音波スペクトロスコピー		272
4.4.4	陽電子消滅法	〔谷川庄一郎〕	246	4.7.2	超音波顕微鏡		274
4.5	光・X 線利用		248	4.7.3	アコースティックエミッション		276
4.5.1	発 光 分 光 法	〔広川吉之助〕	248	4.7.4	光 音 響 分 光		276

第 5 章 表 面 —————〔編集委員 宇佐美誠二*・山本恵彦・重川秀実〕283

5.1	表面原子構造		284	5.3.8	反射赤外分光法	〔伊藤正時〕	312
5.1.1	原 子 配 列	〔村田好正〕	284	5.3.9	原子線回折法	〔山本恵彦〕	314
5.1.2	表面原子振動	〔大島忠平〕	288	5.3.10	内部状態測定法	〔福谷克之〕	316
5.2	表面電子状態		290	5.3.11	表面分析法一覧表	〔中沢正敏〕	317
5.2.1	表面準位と界面準位	〔匂坂康男〕	290	5.4	吸 着		317
5.2.2	仕 事 関 数	〔山本恵彦〕	294	5.4.1	物 理 吸 着	〔荒川一郎〕	317
5.3	表面解析法		295	5.4.2	化 学 吸 着	〔西嶋光昭〕	320
5.3.1	低速電子線回折法と反射高速電子線回折法			5.4.3	表 面 拡 散	〔市川昌和〕	325
		〔河津 璋〕	295	5.5	脱 離		325
5.3.2	オージェ電子分光法, 電子エネルギー損失分光法			5.5.1	熱 脱 離	〔荒川一郎〕	325
		〔小間 篤〕	297	5.5.2	電子刺激脱離	〔荒川一郎〕	327
5.3.3	紫外光電子分光法, 軟 X 線光電子分光法			5.5.3	光 刺 激 脱 離	〔村田好正〕	328
		〔中沢正敏〕	300	5.5.4	電 界 蒸 発	〔富取正彦〕	331
5.3.4	電界放射顕微鏡, 電界イオン顕微鏡, アトム プローブ電界イオン顕微鏡	〔宝野和博〕	301	5.6	表面の巨視物性 (トライボロジー)	〔河野彰夫〕	332
5.3.5	走査型プローブ顕微鏡 (SPM)	〔徳本洋志〕	306	5.6.1	表面の熱力学		332
5.3.6	イオン散乱分光法	〔青野正和〕	308	5.6.2	実在表面の力学的性質		332
5.3.7	XAFS および ELNES			5.6.3	表面損傷とその防止法		335
		〔a 朝倉清高; b 生垣哲郎〕	311				

第6章 薄膜 ————— [編集委員 魚住清彦*・重里有三] 341

6.1 薄膜形成法 —————	342	6.2.4 炭素系薄膜 — [a 澤邊厚仁; b 阿知波洋次]	376
6.1.1 真空蒸着法 ————— [稲川幸之助]	342	6.3 薄膜の物性 —————	381
6.1.2 スパッタリング法 ————— [細川直吉]	346	6.3.1 機械的性質 ————— [馬場 茂]	381
6.1.3 イオンプレーティング — [村山洋一・柏木邦宏]	349	6.3.2 電氣的性質 ————— [魚住清彦]	383
6.1.4 ガスクラスタイオンビーム法 — [山田 公]	355	6.3.3 磁氣的性質 ————— [権藤靖夫]	385
6.1.5 化学蒸着法 (CVD 法) ————— [安田幸夫]	357	6.3.4 光學的性質 ————— [吉田貞史]	386
6.2 薄膜の構造 —————	361	6.4 薄膜評価法 —————	389
6.2.1 金 属 ————— [a 八木克道; b 井野正三]	361	6.4.1 偏光解析法 ————— [山口十六夫]	389
6.2.2 半 導 体 ————— [安田幸夫]	364	6.4.2 X 線回折法 ————— [坂谷忠夫]	391
6.2.3 セラミック膜 ————— [田畑三郎]	370	6.4.3 膜厚測定法 ————— [魚住清彦]	394

第7章 結晶成長, 評価技術 ————— [編集委員 芦田佐吉*・宮澤信太郎] 401

7.1 結晶成長の基礎 —————	402	7.3.5 原子層エピタキシー (ALE), 化合物半導体	
7.1.1 結晶成長概論 ————— [宮澤信太郎]	402		[堀越佳治] 443
7.1.2 相図の読み方 ————— [芦田佐吉]	408	7.3.6 レーザ蒸着法; 酸化物/半導体系	
7.2 バルク結晶成長 —————	412		[福村知昭・川崎雅司] 444
7.2.1 水溶液晶出法 ————— [佐々木孝友]	412	7.3.7 グラフォエピタキシー ————— [宮澤信太郎]	445
7.2.2 フラックス法 ————— [芦田佐吉]	414	7.3.8 薄膜成長のシミュレーション — [入沢寿美]	447
7.2.3 ブリッジマン法 (化合物半導体/酸化物)		7.4 結晶評価技術 —————	449
	[勝亦 徹] 416	7.4.1 結晶光学の基礎 ————— [宮澤信太郎]	449
7.2.4 引 上 げ 法 — [a 干川圭吾; b, c 福田承生]	418	7.4.2 バルク結晶の光学的評価 (消光比による評価)	
7.2.5 フローティング法 ————— [木村 茂]	422		[宮澤信太郎] 459
7.2.6 水 熱 合 成 法 ————— [伴野靖太郎]	423	7.4.3 結晶構造の基礎 ————— [大隅一政]	461
7.2.7 気 相 輸 送 法 ————— [春日正伸]	424	7.4.4 X 線回折による結晶評価 ————— [松井純爾]	467
7.2.8 特 殊 な 方 法 — [a 芦田佐吉; b 福田承生;		7.4.5 結晶欠陥評価 — [a 奥村次徳; b 小川智哉]	473
c 吉川 彰; d 金谷正敏; e, f 芦田佐吉]	425	7.4.6 エッチング法による結晶評価法	
7.3 薄膜結晶成長法 —————	430		[a 芦田佐吉; b 安達定雄] 476
7.3.1 液相エピタキシー — [a 天野利昌; b 宮澤信太郎]	430	7.5 素子化技術 ————— [高須新一郎]	479
7.3.2 気相成長法 (VPE 法) ————— [碓井 彰]	432	7.5.1 結晶加工概論 —————	479
7.3.3 MOCVD ————— [a 平松和政; b 小田俊理]	436	7.5.2 切断, 研磨, 洗浄処理 (含アングルラップ) —	484
7.3.4 分子線エピタキシー法 (MBE)		7.5.3 特殊な加工と実際, 球状, 円柱状 —————	487
	[a 朝日 一; b 寺嶋孝仁] 439		

第8章 半導体の基礎物性 ————— [編集委員 長谷川英機*・平川一彦・奥村次徳] 495

8.1 半導体の特徴と歴史 ————— [長谷川英機]	496	8.2.1 結 晶 構 造 —————	500
8.1.1 半導体材料の定義と基本的性質 —————	496	8.2.2 エネルギー帯 —————	504
8.1.2 半導体材料の分類 —————	498	8.2.3 半導体物性制御 —————	508
8.1.3 半 導 体 の 歴 史 —————	499	8.3 電 子 物 性 —————	509
8.2 結晶構造とエネルギー帯 ————— [奥村次徳]	500	8.3.1 不 純 物 準 位 ————— [大泊 巖・品田賢宏]	509

8.3.2	キャリアのエネルギー分布と空間分布	8.6.5	表面再結合	533
	—— [大泊 徹・品田賢宏] 511	8.7	超薄膜ヘテロ構造	533
8.3.3	キャリア輸送現象	8.7.1	超薄膜ヘテロ構造の電子状態	
	—— [澤木宣彦] 512		—— [榊 裕之・平川一彦] 533	
8.3.4	キャリアの捕獲と再結合	8.7.2	超薄膜ヘテロ構造の電気的性質	536
	—— [澤木宣彦] 515	8.7.3	超薄膜ヘテロ構造の光学的性質	539
8.4	光 物 性	8.8	量子ナノ構造	542
	—— [末宗幾夫] 516	8.8.1	メゾスコピック構造の物性 (電子波干渉など)	
8.4.1	光吸収と発光		—— [中村和夫] 542	
8.4.2	光 伝 導	8.8.2	量子細線構造の物性	544
	—— 520	8.8.3	量子ドット構造の物性	545
8.4.3	透過, 屈折, 散乱	8.9	半導体評価技術	548
8.5	熱電効果と圧電効果	8.9.1	電気的性質の評価	548
	—— [尾崎 肇] 522	8.9.2	光学的手法による評価	559
8.5.1	熱 電 効 果	8.9.3	表面・界面電子状態の評価	563
	—— 522	8.9.4	ナノメートル領域の物性評価	565
8.5.2	熱 電 子 放 出	8.9.5	熱的手法による評価	567
	—— 523			
8.5.3	圧 電 効 果			
	—— 524			
8.6	表面・界面物性			
	—— [長谷川英機] 525			
8.6.1	半導体表面の構造と電子状態			
	—— 525			
8.6.2	ヘテロ接合界面のバンド不連続			
	—— 526			
8.6.3	金属と半導体との接触			
	—— 529			
8.6.4	絶縁膜と半導体との界面			
	—— 531			
第 9 章 半導体デバイス		[編集委員 松村正清*・雨宮好仁・國分泰雄] 575		
9.1	半導体デバイスの概要	9.4.7	実用 MOS トランジスタ	603
	—— [雨宮好仁] 576	9.5	MOS 構造応用デバイス	604
9.2	ダイオード	9.5.1	不揮発性メモリデバイス	604
	—— [田部道晴] 576	9.5.2	電荷転送デバイス	605
9.2.1	ダイオードの分類	9.5.3	薄膜トランジスタ (TFT)	606
	—— 576		[西部 徹・茨木伸樹] 606	
9.2.2	pn 接合ダイオードの整流性	9.6	MES FET と接合型 FET	608
	—— 577	9.6.1	MES FET の構造	608
9.2.3	pn 接合ダイオードの 2 次的効果と静特性	9.6.2	MES FET の基本特性と等価回路	608
	—— 578	9.6.3	MES FET における様々な効果	609
9.2.4	pn 接合の容量	9.6.4	低雑音 GaAs MES FET, 高出力 GaAs MES	
	—— 579		FET, 混晶による MES FET	609
9.2.5	pn 接合ダイオードの動特性	9.6.5	接合型 FET (JFET), 静電誘導トランジスタ	
	—— 580		(SIT)	611
9.2.6	ショットキー・ダイオード	9.7	ヘテロ構造トランジスタ	611
	—— 581	9.7.1	ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT)	
9.2.7	負性抵抗ダイオードと能動 2 端子素子		—— [石橋忠夫] 611	
	—— 582	9.7.2	ヘテロ接合電界効果トランジスタ	613
9.3	バイポーラトランジスタ		[栗野裕二] 613	
	—— [樋口久幸] 584	9.8	半 導 体 LSI	616
9.3.1	基 本 動 作	9.8.1	集積回路の概要	616
	—— 584	9.8.2	LSI プ ロ セ ス	618
9.3.2	小 信 号 特 性	9.8.3	様 々 な LSI	620
	—— 587	9.9	サイ リ ス タ	625
9.3.3	高 周 波 動 作	9.9.1	基本構造と特性	625
	—— 588	9.9.2	MOS ゲートとサイリスタの複合化	627
9.3.4	雑 音			
	—— 588			
9.3.5	各 種 の 効 果			
	—— 589			
9.3.6	大振幅スイッチング動作			
	—— 590			
9.3.7	実用バイポーラトランジスタ			
	—— 591			
9.4	MOS トランジスタ			
	—— [土屋敏章] 592			
9.4.1	MOS 構造の概要			
	—— 592			
9.4.2	基 本 特 性			
	—— 595			
9.4.3	高 周 波 動 作			
	—— 598			
9.4.4	雑 音			
	—— 599			
9.4.5	各 種 の 効 果			
	—— 599			
9.4.6	微細化とスケールリング			
	—— 600			

9.10 量子効果デバイス	[本久順一] 627	9.11.4 受光デバイス	[香川俊明] 639
9.10.1 メソスコピック系における量子効果と電子伝導	627	9.11.5 固体撮像デバイス	[織原弘三] 640
9.10.2 共鳴トンネルデバイス	628	9.11.6 電子ディスプレイ	[西部 徹・茨木伸樹] 641
9.10.3 電子波干渉デバイス	629	9.12 半導体センサとトランスデューサ	643
9.10.4 単電子デバイス (クーロン・ブロッケード現象)	631	9.12.1 磁電効果デバイス	[赤澤正道] 643
9.10.5 速度変調トランジスタ	632	9.12.2 熱電効果デバイス	[赤澤正道] 644
9.10.6 む す び	632	9.12.3 圧力検出デバイス	[前川隆雄] 644
9.11 半導体光デバイス	633	9.12.4 放射線検出デバイス	[赤澤正道] 645
9.11.1 発光ダイオード	[別府達郎] 633	9.12.5 化学量検出デバイス	[山添 昇] 646
9.11.2 レーザダイオード	637	9.12.6 インテリジェントセンサ	[浅井哲也] 647
9.11.3 太 陽 電 池	[小長井誠] 637	9.13 半導体マイクロ構造デバイス	648
		9.13.1 マイクロマシンデバイス	[江刺正喜] 648
		9.13.2 真空マイクロエミッタデバイス	[大橋弘通] 649
第 10 章 半導体製造技術			
		[編集委員 有田睦信*・中山 諭・望月康則] 655	
10.1 概 説	[酒井徹志] 656	10.7 薄膜形成技術	703
10.1.1 半導体プロセス技術の発展	656	10.7.1 技 術 の 分 類	[有田睦信] 703
10.1.2 素子形成技術	660	10.7.2 シ リ コ ン 膜	[a, b 高崎金剛; c 有田睦信] 703
10.2 プロセス管理・評価	663	10.7.3 薄膜ゲート絶縁膜	[大路 譲] 705
10.2.1 プロセス評価	[北島 洋] 663	10.7.4 Siの酸化・窒化	[中山 諭] 708
10.2.2 プロセス管理	[北島 洋] 665	10.7.5 強誘電性薄膜	[大谷成元] 709
10.2.3 プロセス環境	[斉木 篤] 667	10.7.6 層 間 絶 縁 膜	[早坂伸夫] 710
10.2.4 安 全 管 理	[斎藤邦樹] 668	10.7.7 金 属 膜	[有田睦信] 713
10.3 プロセスシミュレーション技術	[西 謙二] 669	10.8 リソグラフィ技術	716
10.3.1 概 要	669	10.8.1 技 術 の 分 類	[岡崎信次] 716
10.3.2 原理とモデル	670	10.8.2 光リソグラフィ技術	[岡崎信次] 718
10.3.3 プロセスシミュレーションの実際	674	10.8.3 電子ビーム露光	[斉藤徳郎] 721
10.4 素子間分離技術	677	10.8.4 X 線 露 光	[松田維人] 722
10.4.1 技 術 の 分 類	[有田睦信] 677	10.8.5 レジスト材料	[中瀬 真] 723
10.4.2 選択酸化分離	[猪川 洋] 678	10.9 プラズマエッチング技術	[寒川誠二] 726
10.4.3 埋 込 み 分 離	[猪川 洋] 679	10.9.1 プラズマエッチングとは	726
10.4.4 SOI	[a 米原隆夫・近江和明; b 中嶋定夫] 680	10.9.2 プラズマエッチング機構	727
10.5 電極多層配線技術	684	10.9.3 プラズマエッチング装置	729
10.5.1 技 術 の 分 類	[有田睦信] 684	10.9.4 チャージアップダメージの抑制	731
10.5.2 配線のスケーリング	[柴田英毅] 685	10.9.5 高密度プラズマ生成における放電周波数の効果	732
10.5.3 シリコンオーミックコンタクト形成	[有田睦信] 690		
10.5.4 ブ ラ グ 形 成	[有田睦信] 692	10.9.6 ガス構造最適化による高精度エッチング	734
10.5.5 平 坦 化	[有本由弘] 693	10.9.7 ま と め	735
10.5.6 金属配線の信頼性	[金子尚史] 697	10.10 不純物拡散技術	[山本裕久] 735
10.6 洗浄・ウェットエッチング技術	[青砥なほみ] 699	10.10.1 技 術 の 分 類	735
10.6.1 技 術 の 分 類	699	10.10.2 不純物拡散の原理	736
10.6.2 洗 浄	699	10.10.3 実際の不純物拡散プロファイル	737
10.6.3 ウェットエッチング	702	10.10.4 熱拡散による不純物拡散	737

10.10.5 イオン注入による不純物拡散	738	10.11.5 薄 膜 形 成	744
10.10.6 極浅接合のための新しい不純物拡散	739	10.12 実 装 技 術	[春日壽夫] 745
10.11 化合物半導体プロセス技術		10.12.1 パッケージの役割	745
—— [望月康則・前多 正・葛原正明]	739	10.12.2 パッケージの分類	745
10.11.1 素子形成プロセス	739	10.12.3 パッケージ組立工程	746
10.11.2 ドーピング技術	740	10.12.4 今 後 の 動 向	749
10.11.3 電 極 形 成	742	10.12.5 技 術 動 向	749
10.11.4 エ ッ チ ン グ	743		

第 11 章 アモルファス半導体 [編集委員 田中一宜*・田中啓司・岡本博明] 761

11.1 基 礎 物 性	[森垣和夫] 762	11.3.7 微結晶 Si 系薄膜	[近藤道雄] 794
11.1.1 構造の乱れと電子状態	762	11.4 カルコゲナイド系材料	797
11.1.2 移動度端, 移動度ギャップ	764	11.4.1 構造と電子状態	[清水立生] 797
11.1.3 光 物 性	765	11.4.2 構造欠陥と不純物	[清水立生] 798
11.1.4 輸 送 現 象	769	11.4.3 光 誘 起 現 象	[田中啓司] 801
11.2 作 製 法 概 要	773	11.5 酸化物ガラス	[細野秀雄・川副博司] 803
11.2.1 アモルファス構造と熱力学的考察	[田中一宜] 773	11.5.1 構造と電子物性	803
11.2.2 液 相 凍 結 法	[田中一宜] 774	11.5.2 欠陥と光誘起現象	804
11.2.3 気 相 凍 結 法	[田中一宜] 775	11.6 応 用 技 術	805
11.2.4 成長モニタリング法	[藤原裕之] 776	11.6.1 概 要	[嶋田寿一] 805
11.3 アモルファス Si 系材料	777	11.6.2 太 陽 電 池	805
11.3.1 水素化アモルファスシリコン	[田中一宜] 777	11.6.3 電 子 写 真	[中山喜萬] 805
11.3.2 価 電 子 制 御	[岡本博明] 779	11.6.4 撮 像 管	807
11.3.3 局在準位と評価法 [a, b, d 秦 信宏; c 山崎 聡]	782	11.6.5 薄膜トランジスタと薄膜ダイオード	807
11.3.4 光 劣 化 現 象	[清水立生] 785	11.6.6 各 種 セ ン サ	[津田信哉] 807
11.3.5 多層膜 (人工格子) の物性	[岡本博明] 788	11.6.7 光 メ モ リ	[寺尾元康] 808
11.3.6 多 元 系 材 料	[岡本博明] 791	11.6.8 光 フ ァ イ バ	[金森照寿] 811

第 12 章 磁 性 材 料 [編集委員 権藤靖夫*・宮島英紀] 819

12.1 磁性材料の基礎	[宮島英紀] 820	12.3.2 フェライト系磁石	836
12.1.1 単位系と磁気量の換算	820	12.3.3 希 土 類 磁 石	837
12.1.2 磁 化	820	12.4 磁 性 薄 膜	[高梨弘毅] 842
12.1.3 磁 気 異 方 性	822	12.4.1 磁 性 薄 膜	842
12.1.4 磁 歪	824	12.4.2 人工格子膜・積層膜	844
12.1.5 磁 区	825	12.5 磁気抵抗・スピンエレクトロニクス材料	846
12.1.6 磁 化 過 程	826	12.5.1 電 流 磁 気 効 果	[佐藤英行] 846
12.2 ソフト磁性材料	[吉沢克仁] 828	12.5.2 巨大磁気抵抗材料	[佐藤英行] 847
12.2.1 金属系ソフト磁性材料	828	12.5.3 スピンエレクトロニクス	[宮崎照宣] 850
12.2.2 フェライト系ソフト磁性材料	832	12.6 磁 気 光 学 材 料	[佐藤勝昭] 852
12.2.3 アモルファス・ナノ結晶ソフト磁性材料	833	12.6.1 磁気光学効果の基礎	852
12.3 ハード磁性材料	[岡田益男] 836	12.6.2 磁 気 光 学 材 料	854
12.3.1 金 属 磁 石	836	12.7 磁 気 記 録	855

12.7.1 磁 気 記 録	— [中村慶久] 855	12.9 磁 気 応 用	— 875
12.7.2 光 磁 気 記 録	— [今村修武] 862	12.9.1 電 力 用 材 料	— [荒井賢一・石山和志] 875
12.7.3 磁 気 パ ブ ル	— [杉田 愼] 866	12.9.2 スイッチング素子用磁性材料	— [荒井賢一・石山和志] 877
12.8 磁 区 観 察 法	— 869	12.9.3 磁 気 セ ン サ	— [荒井賢一・石山和志] 877
12.8.1 磁区観察法概説	— [二本正昭] 869	12.9.4 磁 歪 材 料	— [井上光輝] 878
12.8.2 磁気力顕微法 (MFM)	— [保坂純男] 871	12.9.5 磁 性 流 体	— [中塚勝人] 879
12.8.3 ローレンツ電子顕微鏡	— [高橋由夫] 874	12.9.6 生 体 磁 気	— [上野照剛] 880
12.8.4 スピン偏極走査電子顕微鏡	— [小池和幸] 874		

第 13 章 有機分子材料・バイオ関連技術 — [編集委員 竹添秀男*・工藤一浩] 887

13.1 有機材料物性	— 888	13.3 有機機能材料・デバイス	— 918
13.1.1 低 分 子 材 料	— [中村貴義] 888	13.3.1 光機能材料・デバイス	— [a 中西八郎・岡田修司; b 小澤口治樹] 918
13.1.2 高 分 子 材 料	— [松重和美] 889	13.3.2 電子機能材料・デバイス	— [a 淵上宏幸・肥塚裕至; b 岩本光正; c 大森 裕; d 森 健彦] 921
13.1.3 液晶分子材料	— [竹添秀男] 892	13.3.3 電気光学デバイス	— [a 筒井哲夫; b 内田龍男] 925
13.2 有機薄膜作製・評価技術	— 894	13.3.4 センサデバイス	— [a 中本高道; b 都甲 潔] 931
13.2.1 湿 式 成 膜 法	— [a 三浦康弘・杉 道夫; b 吉野勝美・河合 壯; c 原 正彦] 894	13.4 生物・生体・医用工学	— 934
13.2.2 乾 式 成 膜 法	— [a 久保野敦史・奥居徳昌; b 星 肇; c 森田慎三] 898	13.4.1 生体機能の基礎	— [工藤成史] 934
13.2.3 薄膜評価技術	— [a 八瀬清志; b 堀内俊寿; c 上野信雄; d 梶川浩太郎; e 工藤一浩] 905	13.4.2 生体機能測定	— [山下一郎] 936
		13.4.3 医 用 工 学	— [山口益弘] 938

第 14 章 計 測 技 術 — [編集委員 岡路正博*・三木幸信] 947

14.1 計測システムの設計	— [森村正直] 948	14.3.1 国際単位系 (SI)	— [今井秀孝] 973
14.1.1 測定誤差の要因と性質	— 948	14.3.2 基本単位とその実現	— [中段和宏] 975
14.1.2 測定誤差の軽減対策	— 949	14.3.3 基礎物理定数の推奨値	— [大苗 敦・田中 充] 977
14.1.3 高信頼度計測システムの設計法	— 950	14.4 物理量の計測技術	— 979
14.2 計測システムの要素	— 951	14.4.1 幾 何 学 量	— [松本弘一] 979
14.2.1 センシング条件と極端条件	— [黒田和明] 951	14.4.2 運 動 学 量	— [山崎大輔] 982
14.2.2 センサとトランスデューサ	— [森村正直] 954	14.4.3 力 学 量	— [大岩 彰] 984
14.2.3 信号処理システム	— [南 茂夫] 959	14.4.4 熱 力 学 温 度	— [櫻井弘久] 987
14.2.4 データ処理と評価	— [南 茂夫] 966	14.4.5 熱 学 量	— [岡路正博] 989
14.2.5 計測のための制御技術	— [北森俊行] 971	14.4.6 電 磁 気 量	— [菅野 允] 994
14.3 物理量の単位と標準	— 973		

第 15 章 極端環境技術 — [編集委員 生嶋 明*・奥田雄一] 1001

15.1 低 温 技 術	— [奥田雄一・松本宏一] 1002	15.2.1 超臨界流体の研究	— 1013
15.1.1 低 温 生 成	— 1002	15.2.2 超高温液体研究	— 1017
15.1.2 低温における温度測定	— 1011	15.3 強 磁 場 技 術	— [三浦 登] 1018
15.1.3 測 定 技 術	— 1013	15.3.1 強磁場の発生	— 1019
15.2 高温での物性測定	— [遠藤裕久・八尾 誠] 1013	15.3.2 磁場強度の測定	— 1026

15.3.3 強磁場下の物性測定	1027	15.5.4 測定技術	[辻 泰] 1045
15.4 高 圧 技 術	1029	15.5.5 真 空 材 料	[本間禎一] 1049
15.4.1 は じ め に	[八木健彦] 1029	15.5.6 部品と可動機構	[岡野達雄・本間禎一] 1052
15.4.2 高圧力の発生	[八木健彦] 1030	15.6 微小重力環境技術	1054
15.4.3 高圧力の測定	[八木健彦] 1035	15.6.1 は じ め に	[日比谷孟俊] 1054
15.4.4 高圧下の物性測定技術	[毛利信男] 1037	15.6.2 微小重力概論	[石川正道] 1054
15.5 超高真空技術	1039	15.6.3 微小重力発生手段	[石川正道] 1057
15.5.1 は じ め に	[辻 泰] 1039	15.6.4 微小重力実験例	
15.5.2 真 空 の 基 礎	[岡野達雄] 1040		[a-c 日比谷孟俊 ; d, e 石川正道] 1058
15.5.3 排 気 技 術	[小林正典] 1041		

(* は章担当責任者)

和 文 索 引	1073
---------	------

記 号 索 引	1091
---------	------

