



●翻訳にあたって <廣瀬 千秋>

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 第1章 ナノテクノロジー | 1 |
| I. 序 | 2 |
| 第2章 次世代のコンピュータおよびコミュニケーションのための ナノエレクトロニクス | 7 |
| I. 序論 | 8 |
| A. 集積回路革命 | 8 |
| B. 集積回路の応用 | 14 |
| C. 展望 | 16 |
| II. VLSI 企画 “1 個の素子ではなく 10 億個の素子を” | 17 |
| A. MOS テクノロジー | 19 |
| B. CMOS の設計 | 25 |
| III. CMOS の限界性能：乗り越えなければならない目標 | 44 |
| A. IC あるいはダイの成長 | 44 |
| B. VLSI の縮小と大きな数による専制支配 | 46 |
| IV. 予想される代替テクノロジーと CMOS との比較 | 55 |
| A. 単電子トランジスタ (SET) | 58 |
| B. 電子導波路 | 63 |
| C. ジョセフソン接合 | 70 |
| V. 結び | 75 |

第3章 動くナノ構造体：ナノメートルサイズの物体を動かすための マイクロ計器

| | |
|--------------------------------------|-----|
| I. 序論 | 84 |
| A. MEMS 入門 | 86 |
| B. MEMS に関する文献について | 91 |
| C. この本における本章の位置づけ | 92 |
| D. この章の構成 | 93 |
| II. マイクロ計器およびマイクロシステムのアーキテクチャ | 95 |
| システムアーキテクチャ | 95 |
| III. コンパクトな容量マイクロアクチュエータとスケーリング則 | 102 |
| A. 平行板容量マイクロアクチュエータ | 102 |
| B. 交互咬合電極容量マイクロアクチュエータ | 105 |
| C. ねじれ容量マイクロアクチュエータ | 106 |
| 1. ねじれ容量マイクロアクチュエータ：平行板電極 | 107 |
| 2. ねじれ容量マイクロアクチュエータ：交互咬合電極 | 107 |
| D. マイクロアクチュエータの設計における課題 | 112 |
| IV. 3次元マイクロアクチュエータにおけるマイクロ構造体に関連した課題 | 113 |
| V. 単結晶シリコンプロセス | 118 |
| A. 単結晶シリコン：電子的および機械的材料 | 118 |
| B. 単結晶の反応性エッチングと金属化 (SCREAM) プロセス | 119 |
| VI. 周波数のスケーリングおよび入れ子式マイクロアクチュエータ | 124 |
| VII. 電気機械的チューニング, 非線形 MEMS と Q 値 | 125 |
| VIII. 単結晶シリコンカンチレバーと先端子 | 131 |
| A. カンチレバーおよび先端子入門 | 131 |
| B. ねじれカンチレバー | 132 |
| C. 先端子, プロブおよびグリッパーの集積体 | 132 |
| IX. アレイアーキテクチャとナノメートルスケールマニピュレータ | 134 |
| A. アレイアーキテクチャ | 134 |
| B. ナノメートルスケールのマニピュレータとマイクロロボット | 136 |
| X. マイクロ装置, マイクロマシンおよびナノメートルスケーリング | 140 |
| XI. まとめと結論 | 144 |

第4章 汎用リソグラフィの限界

| | |
|-----------------|-----|
| I. 高解像度リソグラフィ入門 | 152 |
|-----------------|-----|

| | |
|-----------------------------------|-----|
| A. 高解像度リソグラフィ：動くターゲット | 152 |
| B. 汎用技術 vs. 特用技術および実験段階の技術 | 153 |
| II. 実験室用の汎用高解像度リソグラフィの限界 | 156 |
| A. 集光電子ビームリソグラフィおよび集光イオンビームリソグラフィ | 156 |
| 1. 限界解像度 | 156 |
| 2. 順次描画ツールの限界スループット | 162 |
| B. 画像転写における限界 | 164 |
| III. ナノ構造形成で製作した構造体の例 | 166 |
| A. ディープサブミクロン (DSM) 電界効果トランジスタ | 166 |
| B. 表面ゲート量子デバイス | 168 |
| C. 量子ドットと量子細線 | 169 |
| D. 回折格子 | 169 |
| E. X線顕微鏡用のゾーンプレート | 170 |
| F. プロトタイプマスクの製作 | 172 |
| 1. 膜に担持された透過型マスク | 172 |
| 2. フリースタANDING透過マスク | 174 |
| IV. 開発および生産に対するリソグラフィからの要請 | 175 |
| A. VLSI および PIC の動向 | 175 |
| B. 光描画技術の拡張と限界 | 179 |
| C. 新規ツールの必要性 | 179 |
| V. 21世紀の高スループット代替リソグラフィ | 180 |
| A. 電子ビームシステムの役割 | 180 |
| B. X線近接描画 (XRPP) | 181 |
| C. イオン投射リソグラフィ | 184 |
| D. 極紫外線リソグラフィ (EUVL) | 184 |
| VI. 研究用の汎用リソグラフィにおけるトレンド | 186 |
| A. ベクトル走査電子ビームシステム | 186 |
| B. 電子ビームマイクロカラムと先端子 (tip) アレイシステム | 188 |
| C. 並列描画用の AFM チップアレイ | 188 |
| VII. まとめ | 189 |

第5章 原子制御したナノ構造体の構築とデバイスへの応用

| | |
|-------------------------------------------|-----|
| I. 序論 | 196 |
| II. 原子制御したデバイス構造の構築 | 199 |
| A. 表面および界面の粗さ：TEM, RHEED, STM/AFM による特性評価 | 199 |

| | |
|-------------------------------------------|-----|
| B. 界面の粗さおよびサイズ揺らぎがナノ構造体の電子的特性に及ぼす影響 | 204 |
| C. 膜厚および組成の巨視的な変動 | 205 |
| III. エネルギー準位の制御とフォトリソグラフィデバイス | 206 |
| A. 界面粗さと発光スペクトル | 206 |
| B. 吸収スペクトルとシュタルクモジュレータ/ワニエ・シュタルクモジュレータ | 209 |
| C. レーザダイオードとインジェクションモジュレータ | 210 |
| D. サブバンド間遷移を利用した光デバイス | 212 |
| IV. 電界効果トランジスタおよび2D/1D電子の伝導 | 214 |
| A. ゲート長の短縮とFETの究極速度 | 215 |
| B. HEMT構造体上ゲート絶縁層の厚さおよび不純物プロファイルの制御 | 216 |
| C. 井戸幅の効果および粗さによる散乱の効果 | 217 |
| D. チャネル幅の縮小と量子細線内の輸送 | 220 |
| V. 二重障壁および関連デバイスにおける共鳴トンネル効果 | 222 |
| A. 共鳴トンネルダイオードのピーク電流と障壁の厚さ | 222 |
| B. 共鳴トンネルダイオードおよび超格子構造において井戸幅の変動により生起する効果 | 224 |
| C. 共鳴トンネルダイオードおよび超格子構造における界面粗さと輸送 | 224 |
| VI. まとめと展望 | 225 |
| A. 膜厚と界面粗さの制御 | 225 |
| B. 10 nmスケールの量子細線および量子ドットの成長 | 226 |
| 1. エッジ量子細線 | 226 |
| 2. 溝量子細線とリッジ量子細線 | 227 |
| 3. 自己組織化量子ドットと関連構造体 | 229 |
| 4. その他のアプローチとその展望 | 231 |
| C. 結び | 233 |

第6章 半導体ナノ結晶およびナノ結晶材料における化学からのアプローチ

| | |
|-------------------|-----|
| I. 序論 | 242 |
| A. ナノサイエンス | 242 |
| B. 化学合成 | 243 |
| C. 物理的サイズの範囲 | 245 |
| II. 電子的特性および光学的特性 | 247 |
| A. 直接バンドギャップのCdSe | 247 |
| 1. 体積閉じ込め状態 | 247 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 2. 表面状態 | 250 |
| B. タマネギ形ナノ結晶 | 251 |
| C. シリコンの間接バンドギャップ | 251 |
| III. 構造相転移 | 255 |
| A. 融解 | 255 |
| B. 固体-固体相転移 | 255 |
| IV. 材料とデバイス | 257 |
| A. “ウェット”ナノ結晶膜、および多孔質シリコン | 257 |
| B. ナノ結晶発光ダイオード | 259 |
| C. ナノ結晶の自己組織化 | 260 |
| V. 結び | 262 |

第7章 カーボン材料におけるナノテクノロジー

| | |
|----------------------------------|-----|
| I. 序論 | 268 |
| II. ナノ構造体としてのフラーレン | 270 |
| A. 構造特性 | 270 |
| 1. C ₆₀ の構造 | 271 |
| 2. C ₇₀ および高次フラーレンの構造 | 273 |
| 3. メタロフラーレンの構造 | 273 |
| 4. メタルコートしたフラーレン類 | 276 |
| B. 合成法 | 277 |
| C. フラーレン関連ナノ構造体アレイの形成 | 278 |
| 1. C ₆₀ 結晶 | 278 |
| 2. C ₇₀ 結晶 | 280 |
| 3. 高分子量フラーレンの結晶相 | 281 |
| 4. 表面に吸着したフラーレン | 282 |
| 5. フラーレンのインターカレートアレイ | 283 |
| D. 電子特性 | 284 |
| III. ナノ構造体としてのカーボン細管 | 286 |
| A. カーボンナノチューブの観察 | 286 |
| B. カーボンナノチューブの構造 | 289 |
| C. カーボンナノチューブの電子構造 | 292 |
| D. ナノチューブ接合のトンネル伝導 | 294 |
| E. カーボンナノチューブの電子構造に関する実験的研究 | 295 |
| IV. 炭素タマネギ | 297 |

| | |
|------------------------------------------------------|------------|
| V. 応用の可能性あれこれ | 298 |
| 第 8 章 マイクロ構造体およびナノ構造体における自己組織化と自己組織化単層膜 | 307 |
| I. 序論 | 308 |
| II. 自己組織化 | 308 |
| III. 自己組織化単層膜 | 309 |
| A. 一般的な構造 | 311 |
| B. 原子スケールで見た構造 | 313 |
| C. SAM に生じる欠陥 | 314 |
| IV. 単層膜表面に対する SAM 描画 | 314 |
| A. マイクロ密着描画法 | 315 |
| B. 電子ビーム描画と STM 描画 | 318 |
| C. 他の SAM 描画法 | 319 |
| V. SAM の用途 | 322 |
| A. 表面の不動態化：腐食からの保護 | 322 |
| B. SAM 画像をレジストに使用した加工 | 322 |
| C. 曲がった表面の加工 | 326 |
| D. SAM 描画した表面上への方向性を持たせた材料集積 | 326 |
| E. 光学システム | 327 |
| F. コロイドの加工 | 328 |
| G. その他の応用 | 329 |
| VI. 当面の課題 | 330 |
| VII. まとめ/結び | 332 |
| 第 9 章 厳密に構造制御された高分子の生体触媒合成 | 341 |
| I. 序論 | 342 |
| II. 構造タンパク質の発現 | 347 |
| A. 絹 | 347 |
| B. コラーゲン | 348 |
| C. エラスチン | 349 |
| D. 接着タンパク質 | 349 |
| E. ウイルスタンパク質 | 350 |
| F. コイルドコイルタンパク質 | 351 |

| | |
|----------------------------------------------------------|-----|
| III. 明確 (WELL-DEFINED) なポリペプチドの新規 (DE NOVO) な設計と合成 | 352 |
| A. 設計の方法論 | 352 |
| B. 折りたたみ β -シートタンパク質 | 353 |
| C. 単分散の α -らせんタンパク質 | 356 |
| IV. 人工アミノ酸のタンパク質組み込み | 358 |
| A. 方法論 | 358 |
| B. セレノメチオニンの組み込み | 361 |
| C. 含フッ素ポリペプチド | 361 |
| D. 電気活性置換基 | 362 |
| E. ポリペプチド構造の変形 | 363 |
| V. ハイブリッド人工タンパク質 | 364 |
| A. 設計指針 | 364 |
| B. 実験結果 | 365 |

第 10 章 原子分光：光を使って原子を並べる

| | |
|--------------------------------------|-----|
| I. 序論 | 372 |
| II. 原子の操作 | 374 |
| A. 光の力に関する基礎的事項 | 374 |
| B. レーザによる原子の集束に関して最初に行われたアプローチ | 376 |
| C. レンズアレイ、チャネリングおよび光学回折格子 | 377 |
| D. 原子ミラーおよびマスク | 378 |
| E. レーザビームまたはマイクロ構築回折格子からの原子の散乱 | 379 |
| III. 原子光学を用いたナノ構築における最近の研究 | 380 |
| A. ナトリウム | 380 |
| B. クロム | 383 |
| C. アルミニウム | 383 |
| D. プロセスのモデル化 | 385 |
| IV. 将来の展望 | 386 |
| A. 他の材料 | 387 |
| B. より一般的な画像の描画 | 388 |

| | | |
|---------------|----------------------------|-----|
| 第 11 章 | ボトムアップ法：原子からものを構築する | 393 |
| 第 12 章 | ナノメートルスケール磁石の物性 | 405 |
| I. | メゾスコピック磁性 | 406 |
| A. | 序論 | 406 |
| B. | 熱活性化動特性：形状工学 | 407 |
| C. | 磁化が示す量子力学的トンネリング | 408 |
| II. | 走査トンネル顕微鏡を使ってマイクロ構築した磁石 | 410 |
| A. | 構築と構造評価 | 410 |
| B. | 磁気特性の測定 | 412 |
| 1. | 小型のホール効果検出器 | 412 |
| 2. | 集積 DC SQUID マイクロ磁化率計測 | 413 |
| C. | メゾスコピック磁性構造体の安定性 | 416 |
| III. | リソグラフィ法で調製した磁石 | 417 |
| A. | 磁気記録技術 | 417 |
| B. | 表面の影響 | 418 |
| C. | スイッチング | 418 |
| IV. | 生物磁石 | 422 |
| A. | 天然および人造タンパク質 | 422 |
| B. | 古典力学的な特性と相互作用 | 424 |
| C. | 量子的な磁気現象 | 426 |
| V. | Micromagnetism の時空的研究 | 426 |
| A. | 時間分解情報および空間分解情報 | 426 |
| B. | 動的磁性の超高速プローブ | 428 |
| 1. | ピコ秒パルス化された磁場 | 428 |
| 2. | フェムト秒近接場光走査顕微法 | 429 |
| 3. | フェムト秒ファラデー分光 | 431 |
| VI. | 結びと将来展望 | 433 |
| 第 13 章 | 量子ドットにおける単一電子輸送 | 437 |
| I. | 序論 | 438 |
| A. | 章の概要 | 439 |
| B. | 電荷の量子トンネリング | 439 |

| | | |
|------|----------------------|-----|
| C. | 量子化されたエネルギー準位 | 442 |
| II. | 歴史、製作法、および測定技術 | 443 |
| A. | 金属における単一電子効果 | 443 |
| B. | 半導体における量子閉塞 | 444 |
| III. | 量子ドットにおける電子輸送の理論 | 448 |
| A. | クーロン振動の周期 | 448 |
| B. | クーロン振動の振幅と線形 | 451 |
| C. | 非線形輸送 | 456 |
| D. | 他の理論的研究の概略 | 457 |
| IV. | 量子ドットにおける電子輸送の実験 | 458 |
| A. | 線形応答クーロン振動 | 459 |
| B. | 非線形輸送領域 | 465 |
| V. | 高磁場中の量子ドット | 469 |
| A. | 高磁場下の小数電子ドット | 469 |
| B. | 量子ホール効果領域に置かれた多電子ドット | 472 |
| C. | 未解決の問題あれこれ | 478 |
| VI. | 量子ドットにおける交番輸送 | 479 |
| A. | 時間スケールと作動領域 | 479 |
| B. | 単一電子ターンスタイル | 481 |
| C. | 光子介在トンネリング | 483 |
| D. | 理論と今後の実験 | 485 |
| VII. | 応用と将来の方向性 | 486 |
| A. | 応用について | 486 |
| B. | 縮小されたデバイスの創製 | 488 |
| C. | 今後に残された仕事－多ドット系 | 489 |

第 14 章 バリステックナノ構造体におけるカオス 497

| | | |
|-----------------|----------------|-----|
| 第 I 部-理論 | 498 | |
| I. | 序論 | 498 |
| II. | 予備的な概念 | 500 |
| A. | コヒーレントバリステック領域 | 500 |
| B. | 相互作用のない粒子 | 501 |
| C. | コンダクタンスは透過である！ | 502 |
| D. | 開放系における古典カオス | 503 |
| III. | 古典的サイズ効果 | 505 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| A. 曲がり抵抗 | 506 |
| B. コリメーション (平行化) | 507 |
| C. ホール抵抗のクエンチング | 509 |
| D. 短い経路の重要性 | 511 |
| E. ナノ構造体における古典的カオス観測の困難性 | 511 |
| IV. 開放系における量子輸送 | 512 |
| A. 細線内のサブバンド | 513 |
| B. 量子輸送効果の形状 | 515 |
| 1. 基本的な半古典的理論 | 515 |
| 2. 平均コンダクタンス | 517 |
| 3. コンダクタンスの揺らぎ | 523 |
| 4. 半古典理論の難点 | 529 |
| C. 量子輸送効果の大きさ | 530 |
| 1. 不変 S 行列を使ったランダム行列理論 | 531 |
| 2. コンダクタンスに対する計算の結果 | 532 |
| 3. 位相の破れ | 536 |
| 4. 短い経路：非不変ランダム行列理論 | 540 |
| V. その他の系 | 541 |
| A. アンチドットアレイにおける量子輸送 | 541 |
| B. 近閉鎖系における量子輸送 | 542 |
| C. 熱力学：軌道磁性 | 543 |
| D. 量子井戸のトンネリング | 544 |
| VI. 要約と今後の方向 | 545 |
| 第 II 部-実験 | 546 |
| I. 序論 | 546 |
| 古典カオスと量子カオスの対比 | 547 |
| II. 基本的な概念 | 549 |
| バリスティックナノ構造体 | 549 |
| III. バリスティックナノ構造体のコンダクタンスの形状依存 | 555 |
| IV. コンダクタンス揺らぎ | 560 |
| V. コヒーレント後方散乱と弱局在 | 565 |
| VI. 結び | 571 |

| | |
|----------------------------------------------------|------------|
| 第 15 章 InAs/AlSb 材料系における半導体および超伝導特性の物理とデバイス | 581 |
| I. 序論 | 582 |
| A. なぜ InAs なのか | 583 |
| B. バンドオフセットと格子整合：なぜ AlSb 障壁が良いのか | 584 |
| II. 1次元細線における量子化コンダクタンス | 586 |
| A. 背景にあるもの：GaAs 構造体の量子化コンダクタンス | 586 |
| 強靱な量子化コンダクタンスの達成：InAs 量子井戸における実例 | 588 |
| B. InAs-Al(Ga)Sb スプリットゲート：基本的な構造 | 589 |
| C. サブバンド間隔と温度依存性 | 591 |
| D. コンダクタンス特性の劣化：不純物の効果 | 595 |
| 1. 不純物コンフィギュレーションの制御：前測定バイアシングの効果 | 595 |
| 2. 量子化コンダクタンスに対する不純物の影響 | 597 |
| E. 量子化コンダクタンスの長さ依存性 | 597 |
| InAs 狭隘化における量子化コンダクタンスの崩壊：長さの限界 | 600 |
| F. 将来の方向 | 601 |
| 1. 正常な電子輸送とその限界 | 601 |
| 2. 新しい方向：超伝導点接点 | 602 |
| III. 超伝導体-半導体ヘテロ構造体 | 603 |
| A. 半導体で結合した超伝導弱結合 | 603 |
| 1. 基本的な電流-位相関係および位相-電圧関係への手引 | 604 |
| 2. 簡単な歴史 | 606 |
| 3. InAs-AlSb 量子井戸について | 608 |
| B. Andreev 反射 | 608 |
| 1. 前置き：半導体カップリングによる弱結合は“クリーンな”弱結合である | 608 |
| 2. 基本的概念 | 610 |
| 3. 定常超伝導電流という位相コヒーレンス現象 | 611 |
| C. ノンゼロバイアス | 614 |
| D. InAs/AlSb 量子井戸カップル形弱結合に関する最近のいくつかの研究成果 | 616 |
| 1. 構造体：単一ギャップ構造体 vs. 多重ギャップ格子構造体 | 616 |
| 2. 温度依存性 | 618 |
| 3. 磁場依存性 | 620 |
| IV. InAs-AlSb 材料系：テクノロジーと基本的な特性 | 623 |
| A. MBE 成長 | 623 |
| B. ドーピング、欠陥、および移動度 | 624 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 1. 普通の意味での(Te)ドナーと変調ドーピング | 625 |
| 2. 表面状態ドナー..... | 625 |
| 3. 界面近傍の深いドナー..... | 626 |
| 4. 電子の移動度..... | 627 |
| C. 基板の選択と転位 | 628 |
| D. InAs-金属界面 | 630 |
| V. 結び | 631 |

●索引