

2020版

薄膜作製応用 ハンドブック

Handbook of Thin Film Fabrication and Application
2020 Edition

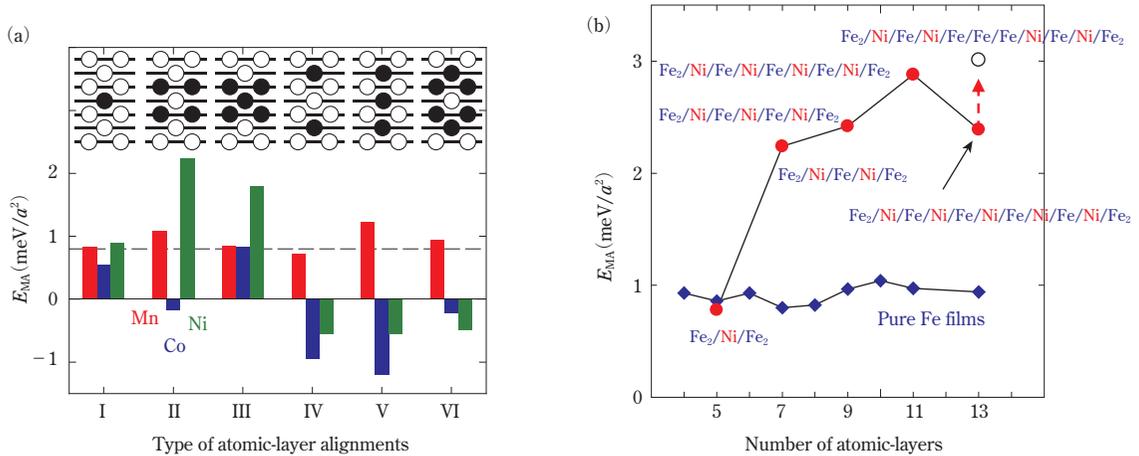
監修
権田 俊一

編集委員
酒井 忠司
田畑 仁
八瀬 清志

編集協力委員
宮崎 照宣

NTS

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。



(a) bcc の原子層配列で積層した 7 原子層薄膜の E_{MA} 。点線は純 Fe 薄膜の、赤色、青色、緑色の棒はそれぞれ Mn、Co、Ni 原子層を含む多層薄膜の E_{MA} を示している。挿入模式図はそれぞれの原子層配列を、白丸と黒丸は Fe 原子と他の 3d (Mn, Co, Ni) 原子を表す。(b) タイプ II 配列 (Fe₂/Ni/Fe/Ni/Fe₂) を基とした Fe-Ni 多層膜の E_{MA} に対する原子層数依存性。ひし形印(青)は純 Fe 薄膜の E_{MA} を表し、原子層数の依存性がほとんど見られていない。13 原子層の原子層配列に対して薄膜の中心にある Ni 原子層を Fe 原子層に置換した系 (Fe₂/Ni/Fe/Ni/Fe/Ni/Fe/Ni/Fe/Ni/Fe₂) の E_{MA} を白丸(赤)で示す

図 1 Fe 基多層薄膜の結晶磁気異方性エネルギー (E_{MA}) (p.31)

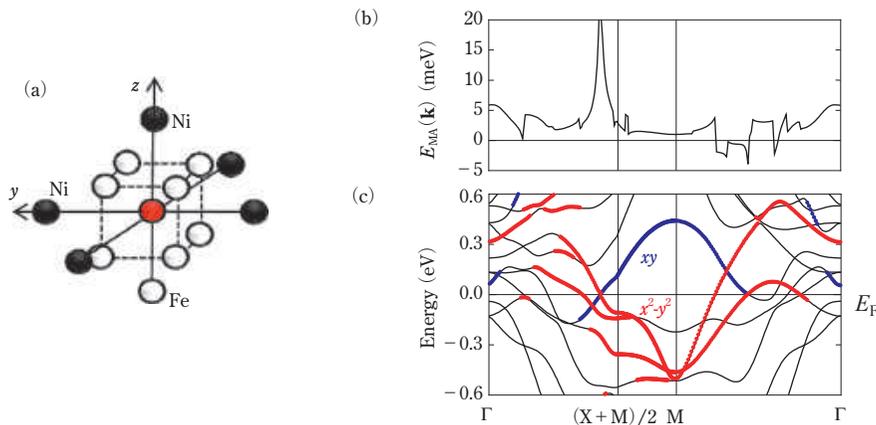


図 2 (a) タイプ II 配列 (Fe₂/Ni/Fe/Ni/Fe₂) における Ni 原子(赤丸)周りの原子配置 (b) 結晶磁気異方性エネルギー (E_{MA}) の k 空間依存性 (c) マイナーティースピン状態のバンド構造 (c) の赤丸と青丸は原子(MT)内で 5%以上の波動関数の重みがある $d(x^2-y^2)$ 軌道と $d(xy)$ 軌道をそれぞれ表している (p.31)

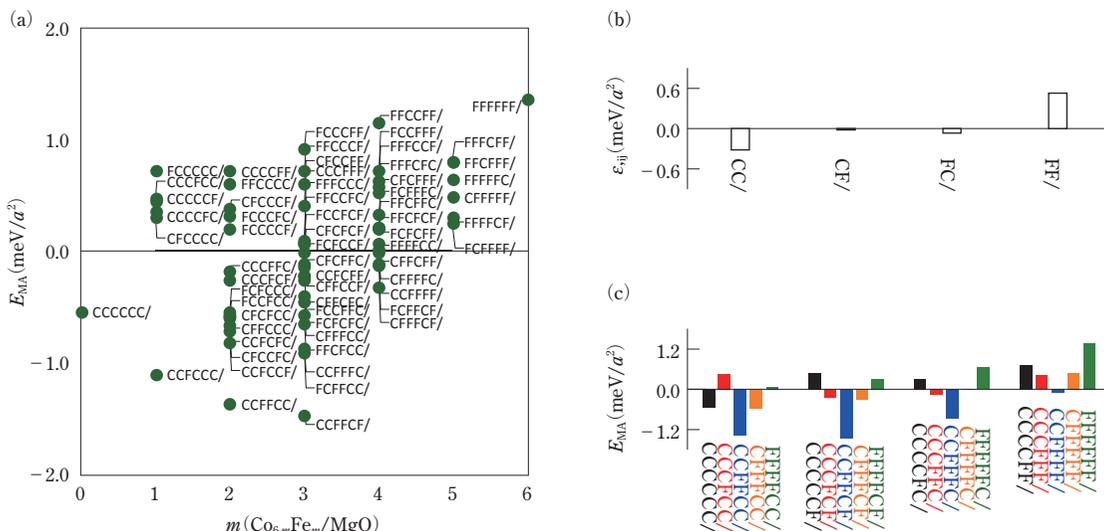


図3 (a) MgO (001) 上の6原子層 Co-Fe 多層膜 ($2^6=64$ 通りの原子層配列) に対する結晶磁気異方性エネルギー (E_{MA}) の第一原理計算結果 (a): 図中の記号 C と F はそれぞれ Co と Fe 原子層を, 最左側が表面層を, 最右側が MgO 側の界面層を表している。(b) クラスター展開法 (CEM) と LASSO を用いた機械学習により抽出した E_{MA} のエネルギー寄与 $[\epsilon_{ij} (ij=C \text{ or } F)]$ (b): 界面第2原子層までの原子層配列依存性を棒グラフで示す。(c) (b) の界面原子層配列をもつ多層薄膜に対する E_{MA} の第一原理計算 (DFT) の値 (p.33)

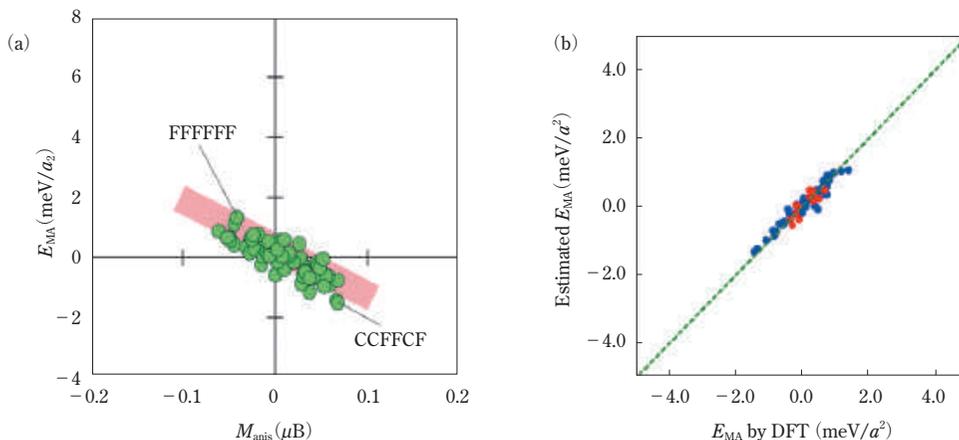
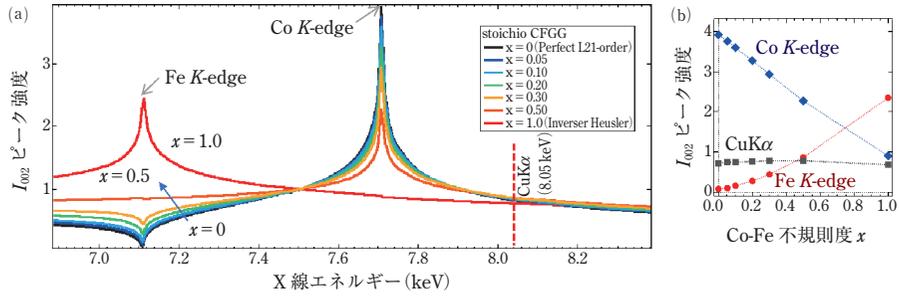


図4 (a) 第一原理計算 (DFT) で得られた結晶磁気異方性エネルギー (E_{MA}) と全軌道磁気モーメント異方性 (M_{anis}) の関係 (b) LASSO を用いて, E_{MA} を各原子層における Co 原子と Fe 原子の軌道磁気モーメントの大きさと異方性で線形回帰した結果横軸と縦軸はそれぞれ第一原理計算 (DFT) と LASSO で予測した E_{MA} を, また青丸と赤印はトレーニングデータセットとテストデータセットの結果を示す (p.34)



Co と Fe のディソーダー量 x を変えた場合のシミュレーション結果を示す。 $x=0$ が完全な L2₁ 構造, $x=0.50$ が完全なランダム状態であり, D03 構造である。(b)Co と Fe の K 吸収端エネルギーおよび Cu K α 線エネルギーにおける I_{002} の CoFe 不規則度依存性。

図 7 (a) $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ における I_{002} の X 線エネルギー依存性のシミュレーション結果 (p.147)

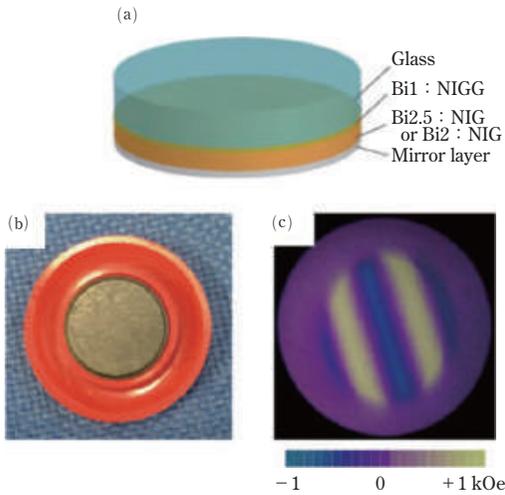


図 27 カラー表示ができる磁気光学イメージングプレートの(a)構造。(b)フェライト磁石とその磁界の(c)カラーイメージング像⁵⁶⁾ (p.197)

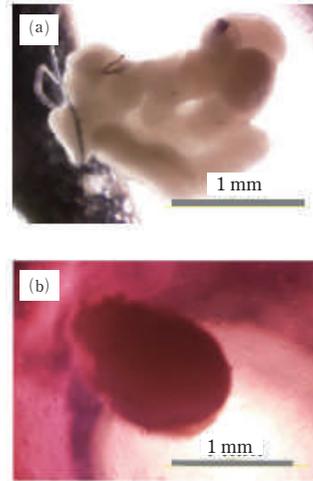
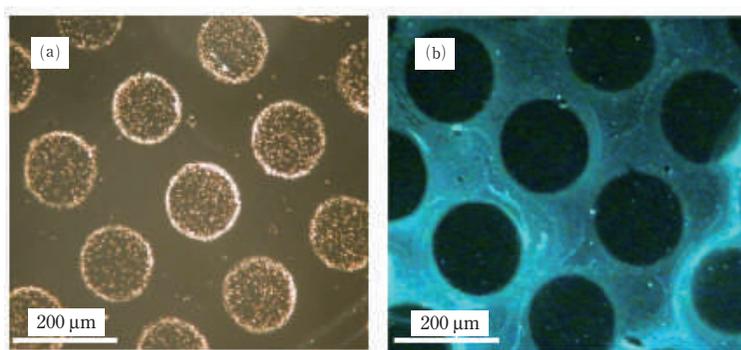


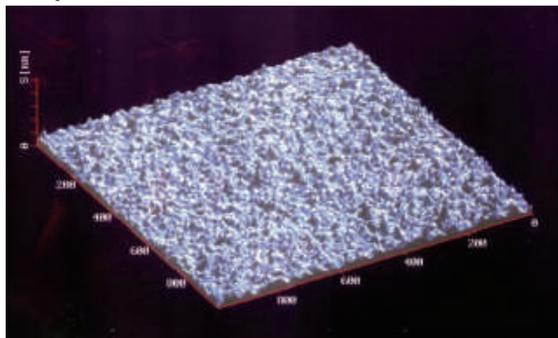
図 8 hMSC 細胞培養開始から(a)7 日後, および(b)30 日後の顕微鏡写真 (p.274)



磁性微粒子は超親水領域に、蛍光微粒子は超はっ水領域に集積。

図 10 超はっ水/超親水マイクロパターンを利用した(a)磁性微粒子, および (b)蛍光微粒子の選択的集積化(p.275)

(a) as-polished 基板



(b)ステップ基板

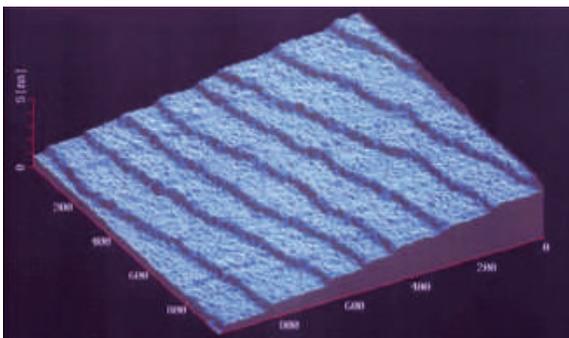
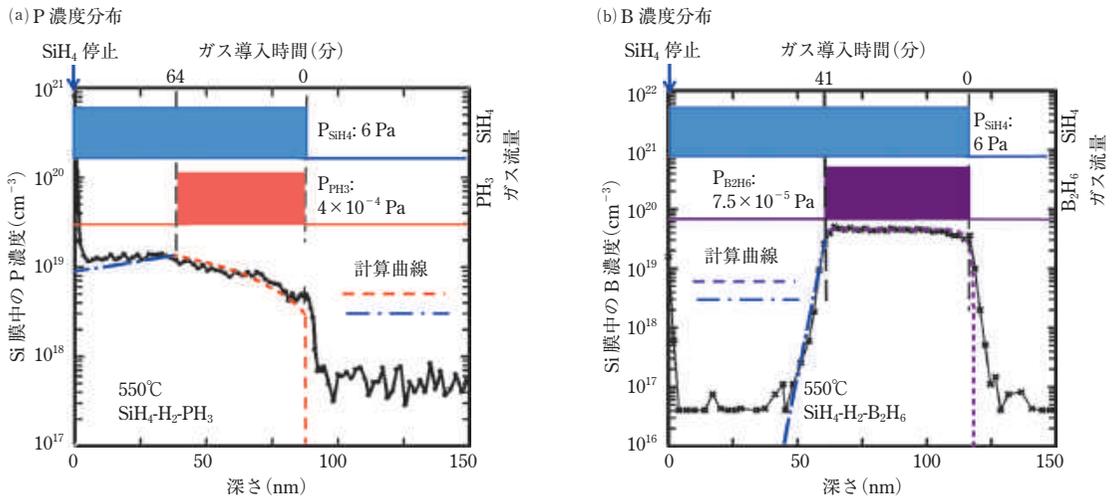
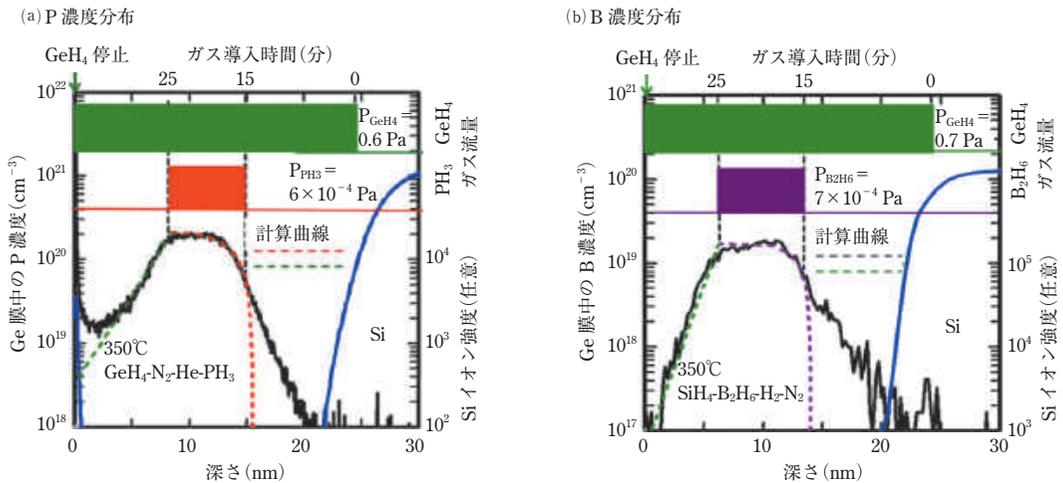


図 17 チタン酸ストロンチウム基板表面の AFM 像 (p.311)



計算曲線は、表1の式(3)と式(6)において、(a) $Q_D(0) = 3.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $k_p = 9 \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, $k_{-p} = 0 \text{ min}^{-1}$, $k_{\text{INC-P}} = 0.007 \text{ min}^{-1}$, (b) $k_B = 125 \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, $k_{-B} = 0 \text{ min}^{-1}$, $k_{\text{INC-B}} = 0.7 \text{ min}^{-1}$ を仮定した。表1の式(5)で示される SiH_4 の表面吸着・反応定数は本章第1節図3に示される値を用いた。

図2 Si(100)上Siエピタキシャル成長膜中の(a)P濃度分布と(b)B濃度分布(p.388)



計算曲線は、表1の式(3)と式(6)において、(a) $k_p = 40 \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, $k_{-p} = 0 \text{ min}^{-1}$, $k_{\text{INC-P}} = 0.35 \text{ min}^{-1}$, (b) $k_B = 2.8 \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, $k_{-B} = 0 \text{ min}^{-1}$, $k_{\text{INC-B}} = 0.7 \text{ min}^{-1}$ を仮定した。表1の式(5)で示される GeH_4 表面吸着・反応定数は本章第1節図4に示される値を用いた。Siイオン強度は $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ パッファ層からのものである。ドーパントガス導入前の不純物濃度の立下り部分は、SIMSにおけるノックオン効果によるものである。

図3 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}(100)$ 上Geエピタキシャル成長膜中の(a)P濃度分布と(b)B濃度分布(p.389)

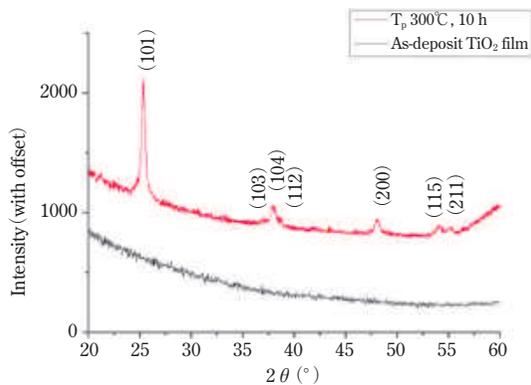


図 6 大気プラズマ CVD により形成された酸化チタン薄膜の皮膜形成直後及び後熱処理後の X 線回折結果 (p.424)

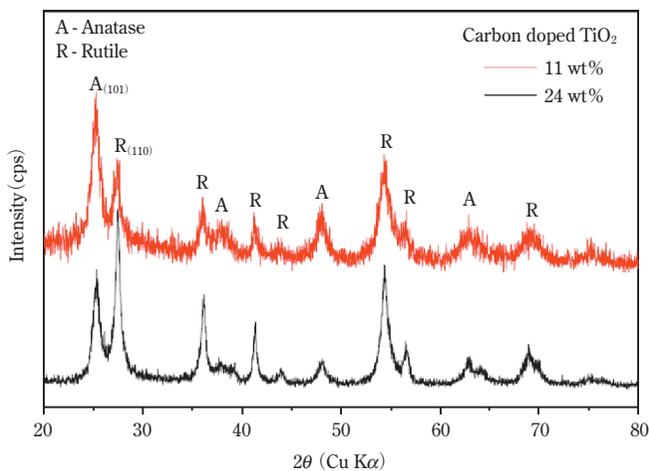


図 14 減圧熱プラズマ CVD により形成された酸化チタンの X 線回折結果 (p.427)

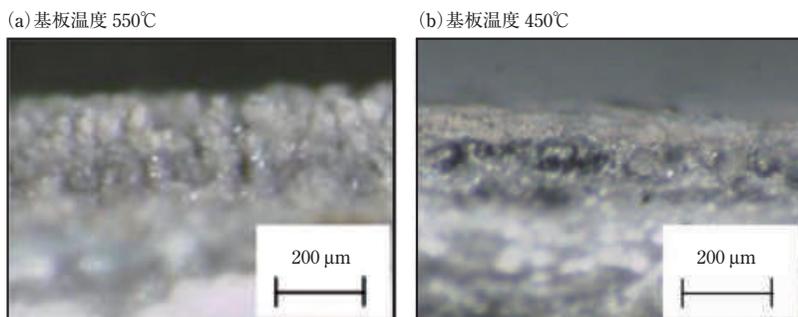


図 17 大気熱プラズマ CVD により形成された酸化チタン薄膜の光学顕微鏡による破断面観察結果 (p.428)

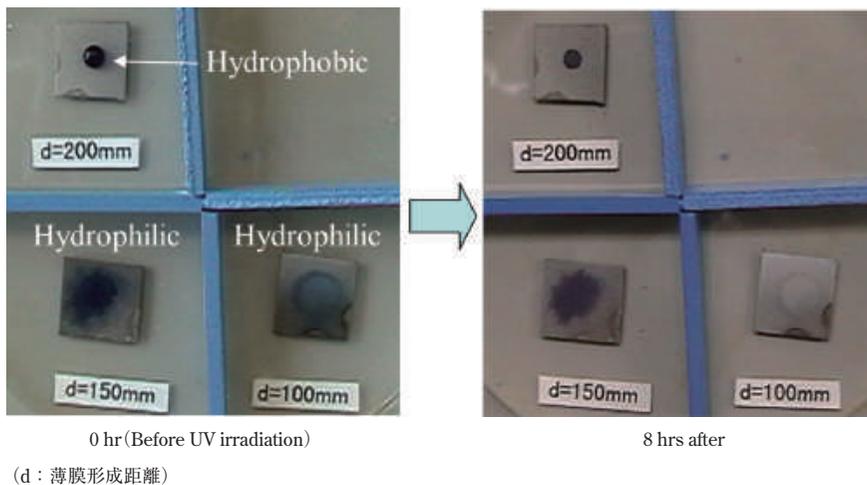


図 19 メチレンブルー脱色試験結果 (p.429)

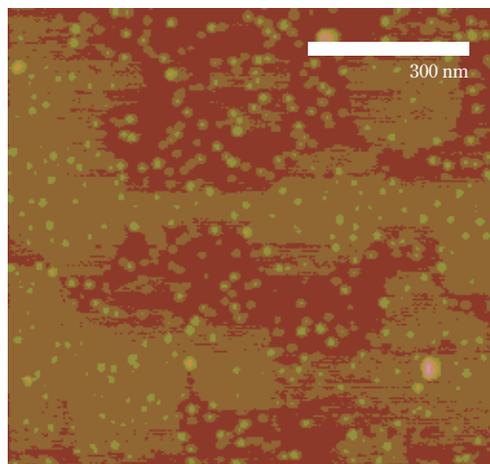


図 1 GaAs(001)基板上に成長した高密度 InAs ドットの原子間力顕微鏡像 (p.443)

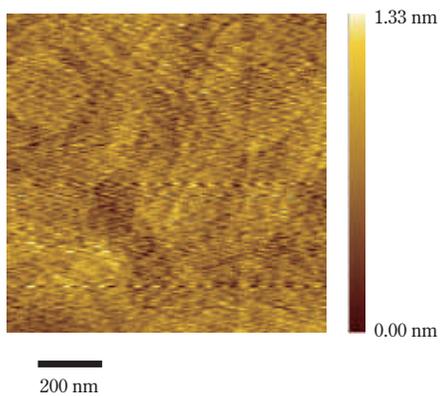


図 4 Mg 組成が 0.92 の ZnMgO の表面 AFM 像 (p.447)

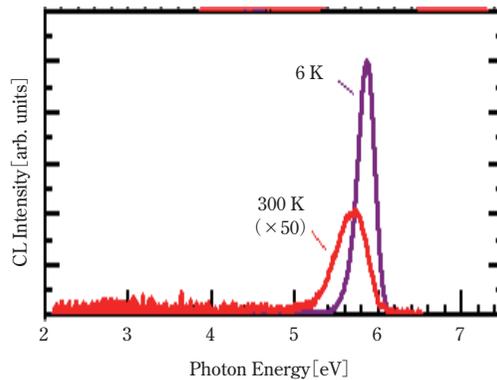


図 5 Mg 組成が 0.92 の ZnMgO の CL スペクトル (p.448)

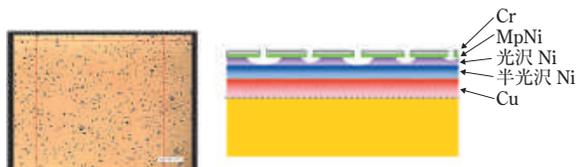


めっき断面構成

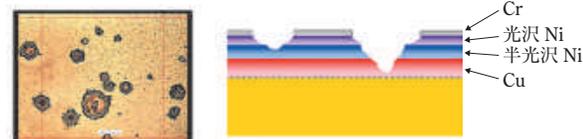


半光沢～光沢ニッケル間に TRI-ストライクニッケルを施す仕様もある

- ①マイクロポーラスによる腐食の分散
- ②電位コントロールによる光沢Niめっき層の自己犠牲腐食
電位(貴)半光沢Ni>マイクロポーラスNi>光沢Ni



i. CASS 試験後の表面(マイクロポーラスニッケル層が入っためっき構成・電位コントロール有り)



ii. CASS 試験後の表面(マイクロポーラスニッケル層無しのめっき構成)

図6 車載外装裝飾部品のめっき構成と防食メカニズム (p.513)

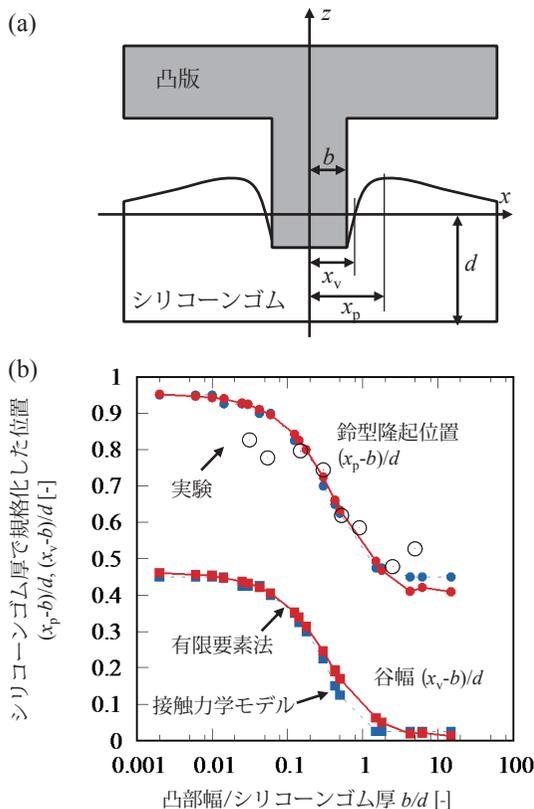


図4 有限厚みのシリコンゴムが平坦圧子によって受ける変形の(a)モデルと(b)代表量の計算結果 (p.536)

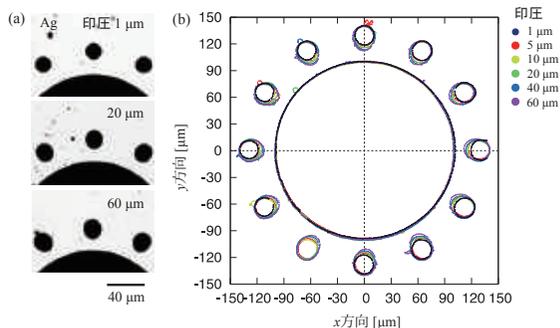


図6 反転オフセット印刷における(a)寸法インテグリティ悪化例と(b)そのパターン外縁の変化(ひずみ近接効果) (p.537)

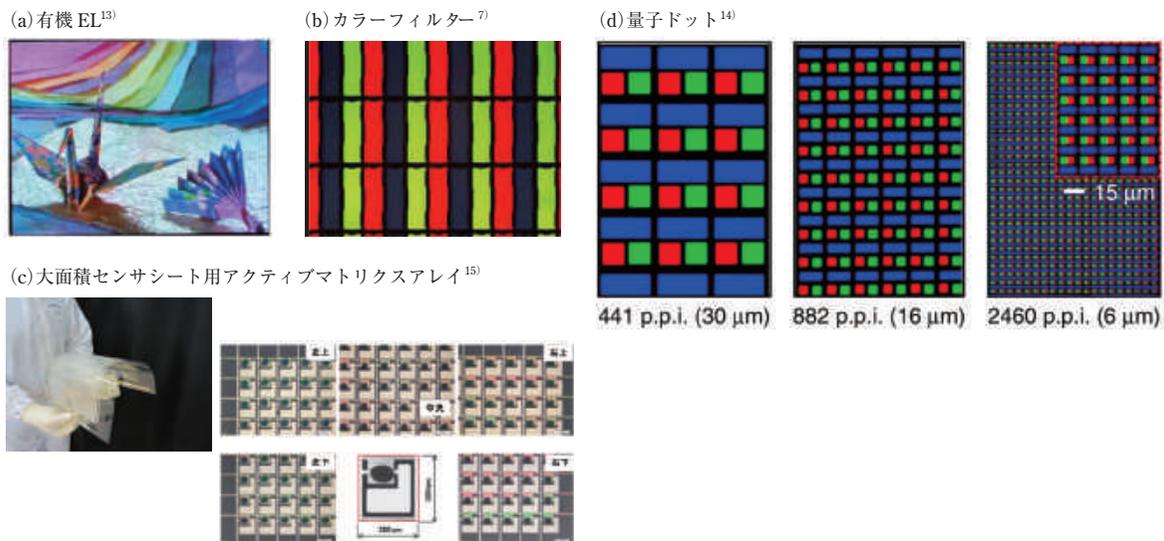
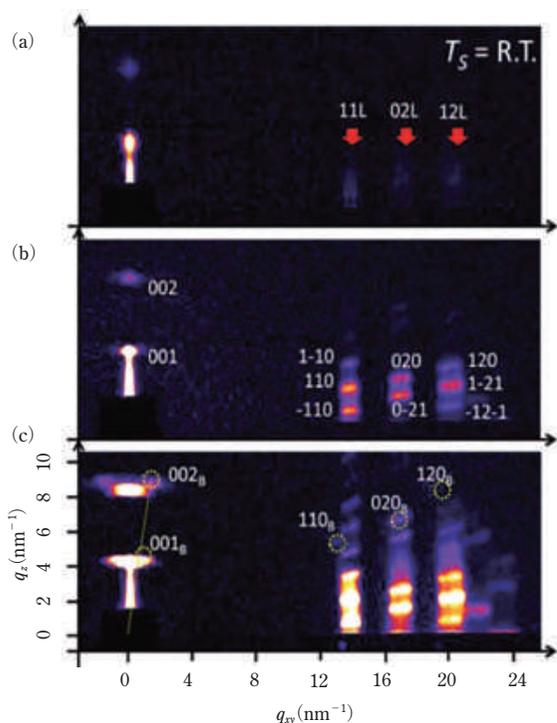
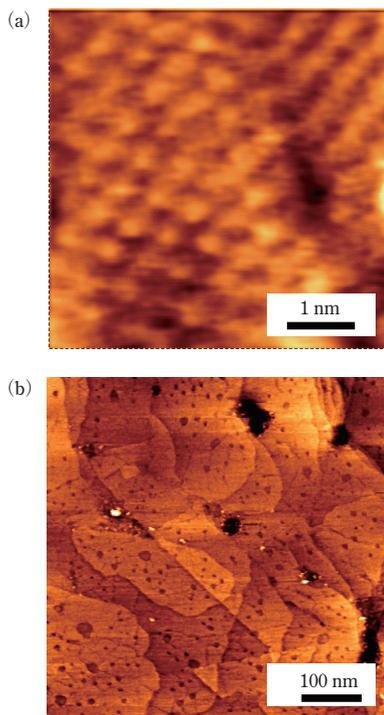


図 7 反転オフセット印刷の応用例 (p.538)



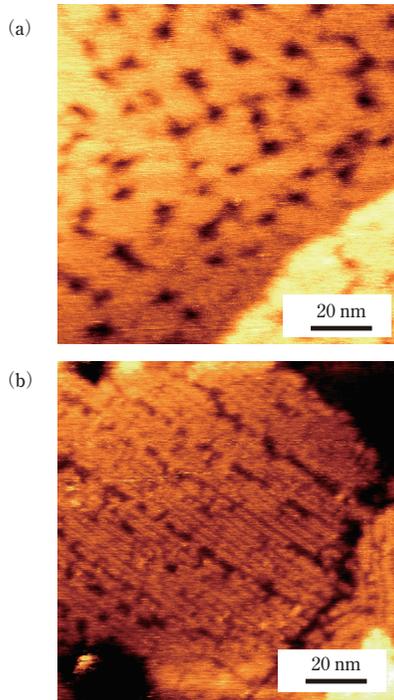
(a)~(c)の違いは膜厚を表す。(a)1.0 nm, (b)2.0 nm, (c)10 nm。

図 10 SiO₂ 基板上に蒸着したペンタセン薄膜の形成過程の *in situ* 2次元 X 線回折パターン (p.547)



(a) 金(111)面に吸着した decanethiol SAM, (b) Dodecanethiol-SAM

図 3 金-チオール SAM の STM 像 (p.555)



(a) BT-SAM, (b) BSe-SAM

図 6 セレン系 SAM の STM 像 (p.557)

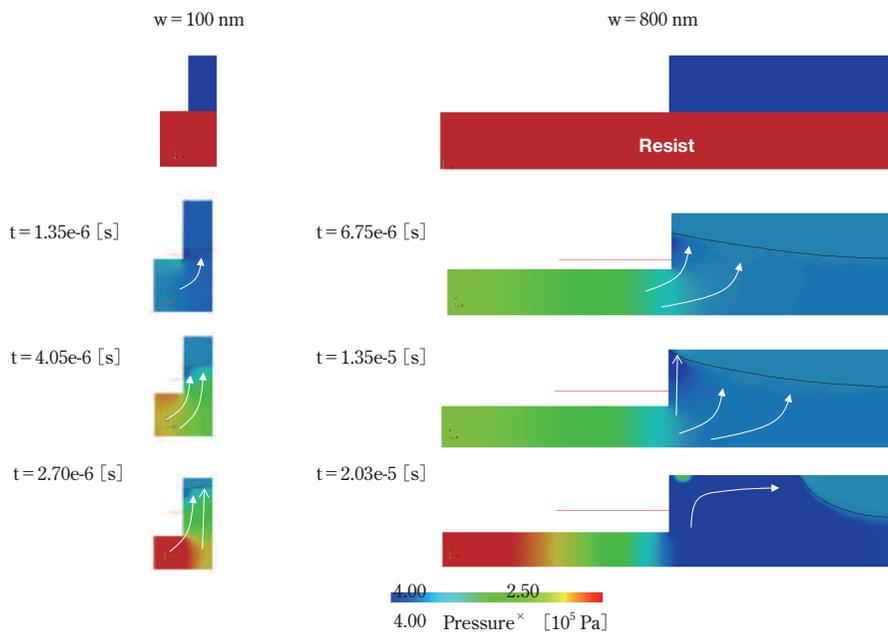


図 11 樹脂充填過程の数値シミュレーション例 (p.604)

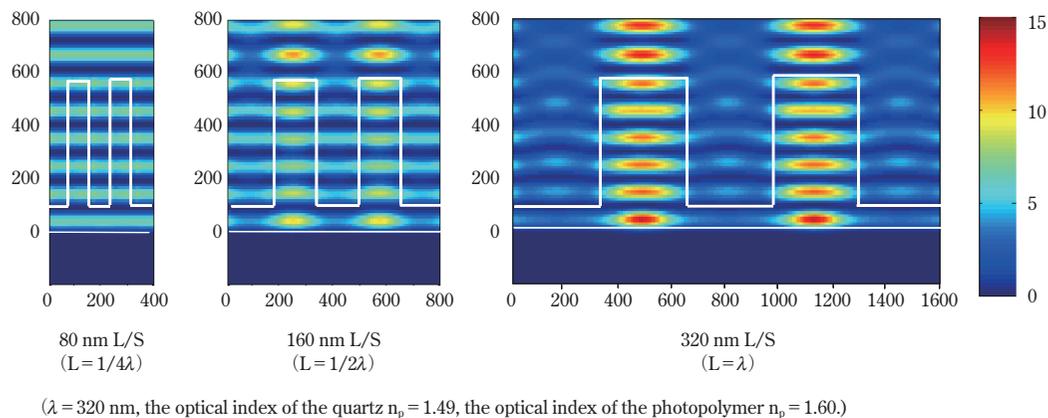
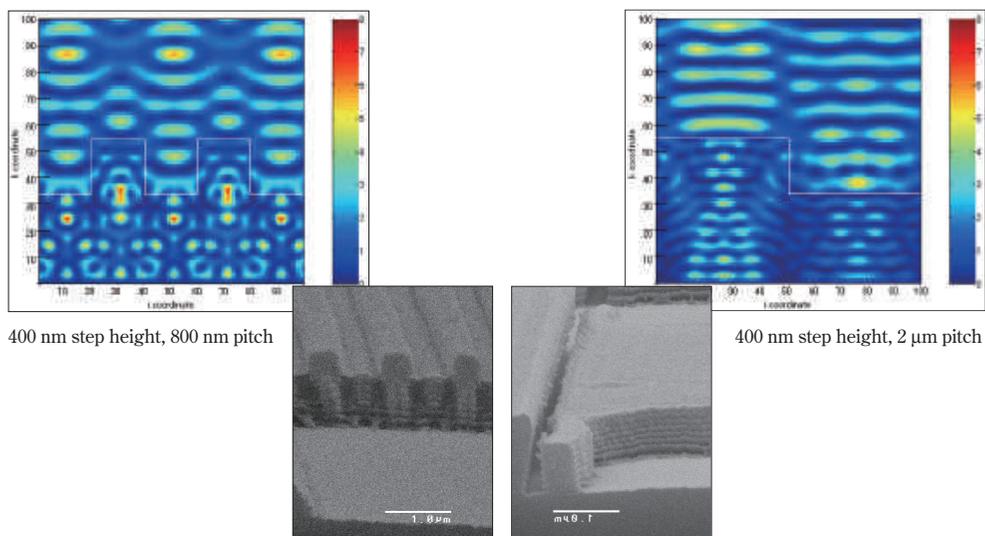


図 15 光強度分布の線幅依存性 (p.605)



$n = 1.67$, $\lambda = 365$ nm, residual layer height 680 nm

図 16 露光プロセスで生じた光干渉による欠陥例 (p.606)

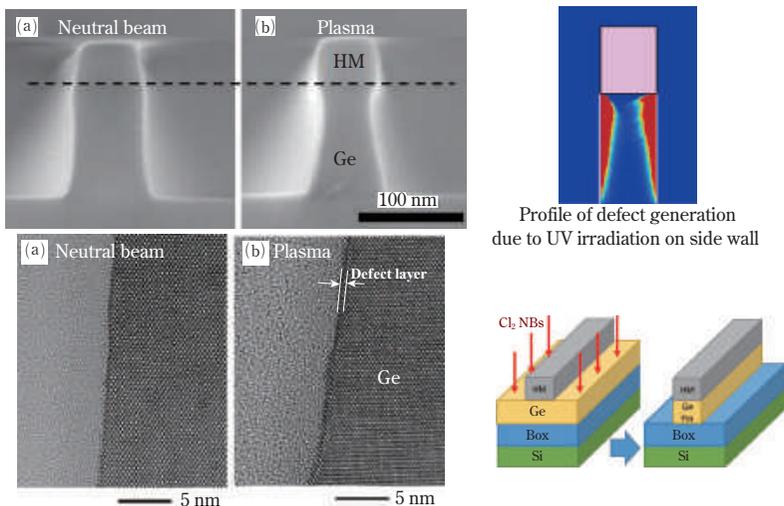


図 12 ゲルマニウムフィン型チャンネル構造エッチング形状((a)中性粒子ビーム, (b)プラズマエッチング)と, プラズマエッチングにおける側壁欠陥生成プロファイル(p.648)

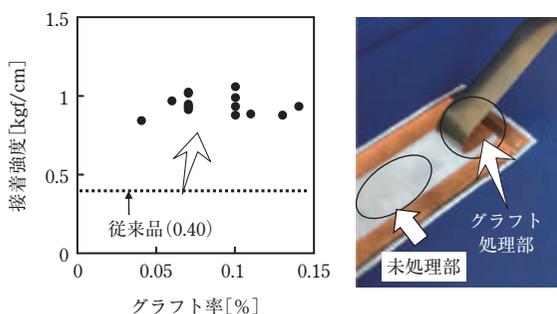
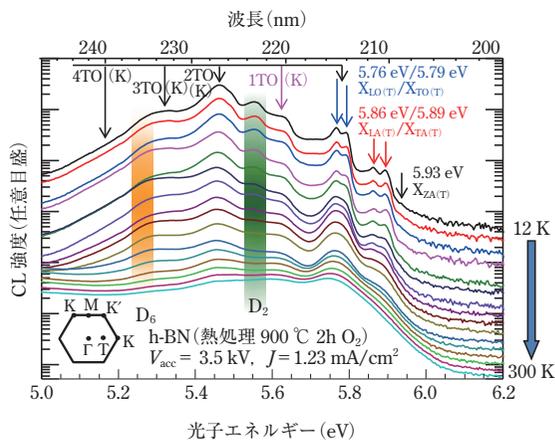


図 2 グラフト処理後のフッ素樹脂基板と銅薄膜との接着強度の関係 (p.663)



Copyright 2018 AIP Publishing LLC.

図 7 間接遷移型六方晶(hexagonal) BN 微結晶の CL スペクトル温度依存性¹²⁾(p.746)

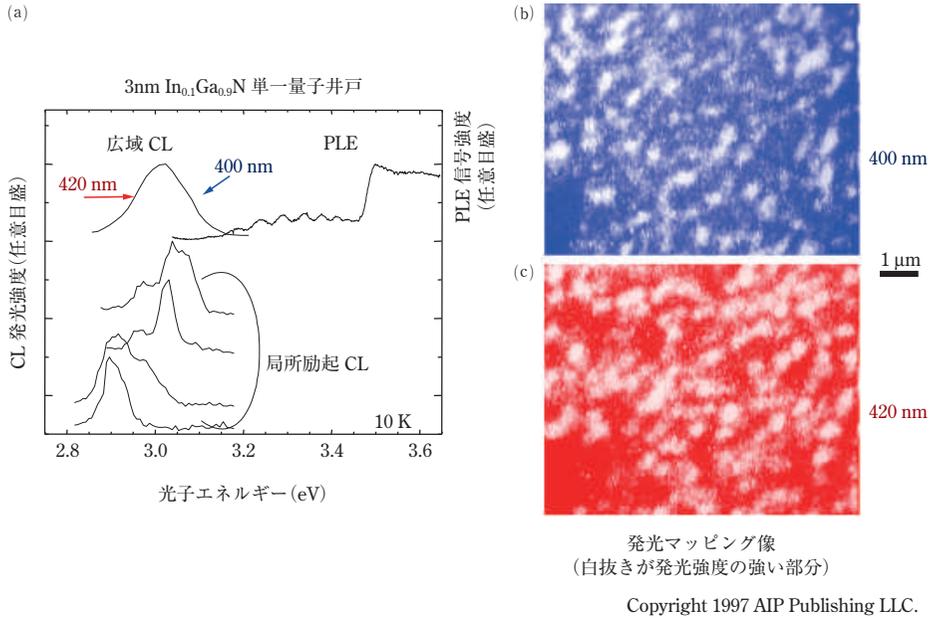


図 10 3 nm 厚の In_{0.1}Ga_{0.9}N 単一量子井戸構造の 10 K における, (a)広域および局所励起 CL スペクトルと広域 PLE 信号, および(b) 400 nm, (c) 420 nm における単色 CL 強度像¹⁶⁾ (p.749)

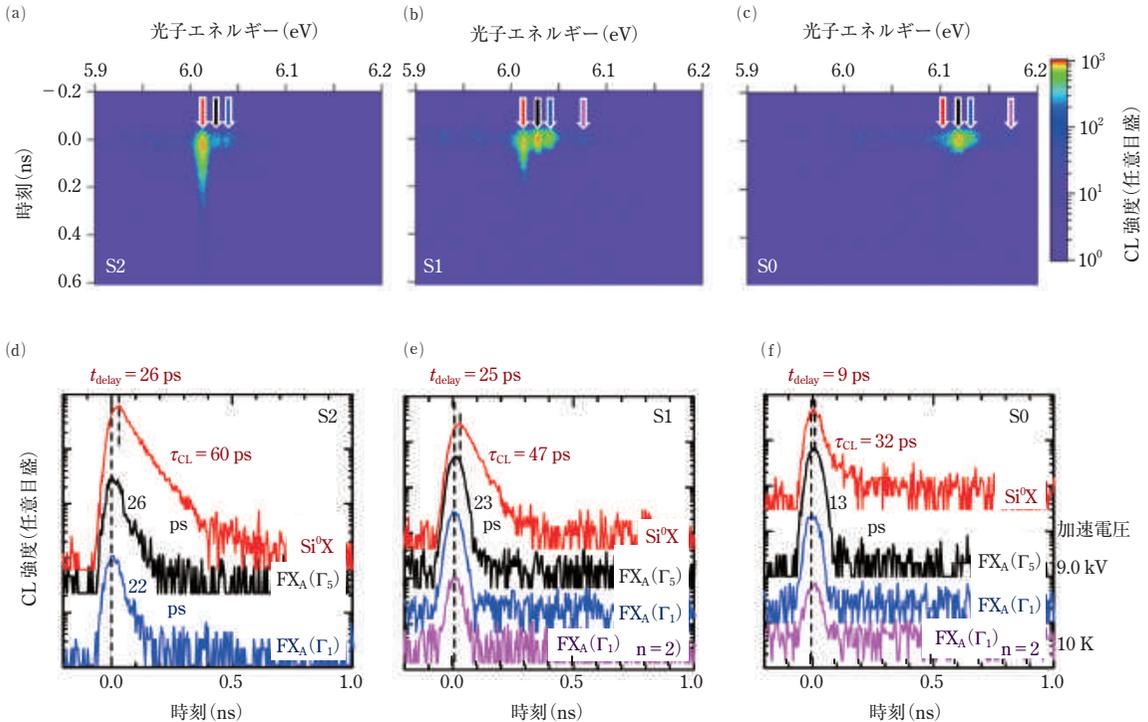


図 13 AIN エピタキシャル薄膜の(a)~(c)ストリークカメライメージ, (d)~(f)矢印で示した各ピークエネルギーでの単色 TRCL 強度信号 (測定温度 10 K, 電子線加速電圧 9.0 kV)²²⁾ (p.751)

Copyright 2013 AIP Publishing LLC.

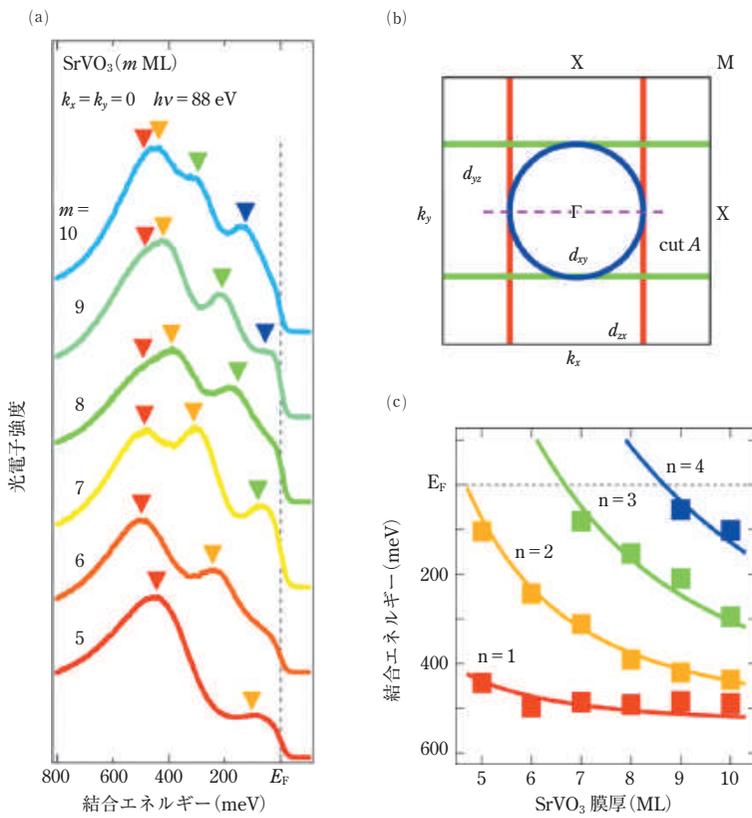
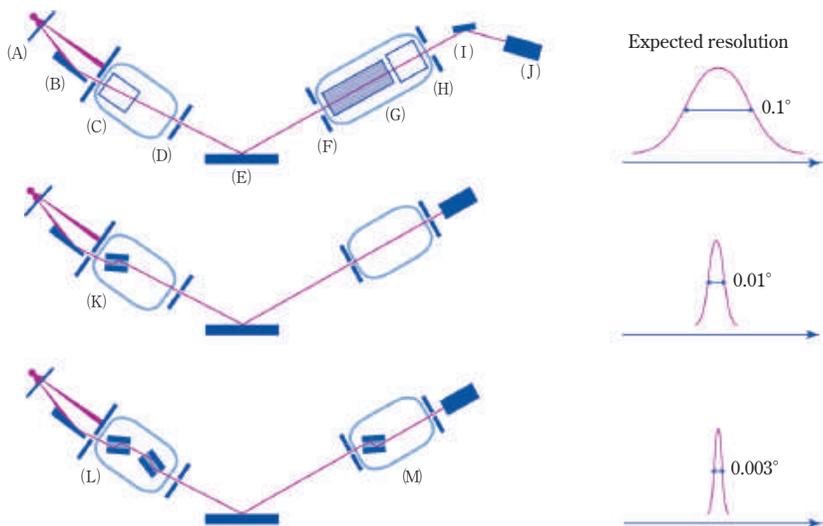


図 5 (a) SrVO₃/Nb:SrTiO₃ (001) 量子井戸構造における Γ 点の ARPES スペクトル, (b) ブリルアンゾーンとフェルミ面, (c) 量子化準位の SrVO₃ 膜厚依存性。四角が実験値, 実線が位相シフト量子化則による理論計算の結果を示す (p.765)



(A) X線源, (B) 放物面多層膜ミラー, (C) ソラースリット, (D) 出射スリット, (E) 試料, (F)(G) 受光スリット, (H) ソラーアナライザー, (I) 平板モノクロメータ, (J) シンチレーション検出器, (K) 2結晶モノクロメータ, (L) 4結晶モノクロメータ, (M) 2結晶アナライザー

図3 典型的な薄膜分析用光学系(上から分解能順) (p.773)

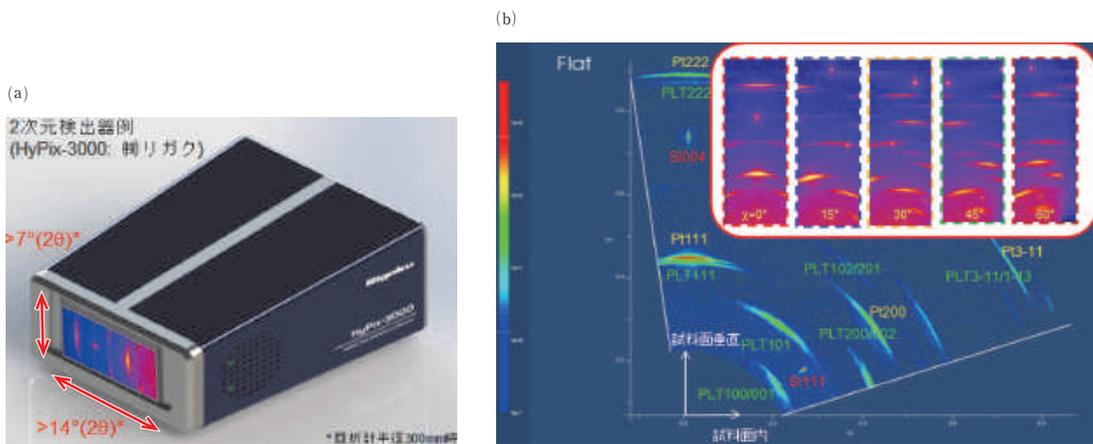


図6 (a)ハイブリッドピクセルアレイ型2次元検出器(図中の回折像はイメージ), (b) HyPix-3000 検出器を用いて試料を χ 軸に沿って傾斜させながら (Pb, La)TiO₃ 薄膜において測定された広域逆格子空間マッピング測定例 (p.775)

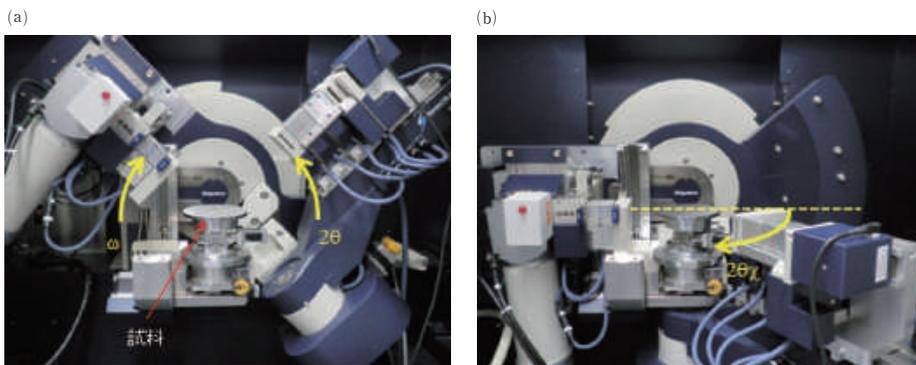


図 12 (a) 4 軸計を用いた 2θ - ω 配置, (b) 5 軸計を用いた面内 X 線回折配置 (p.779)

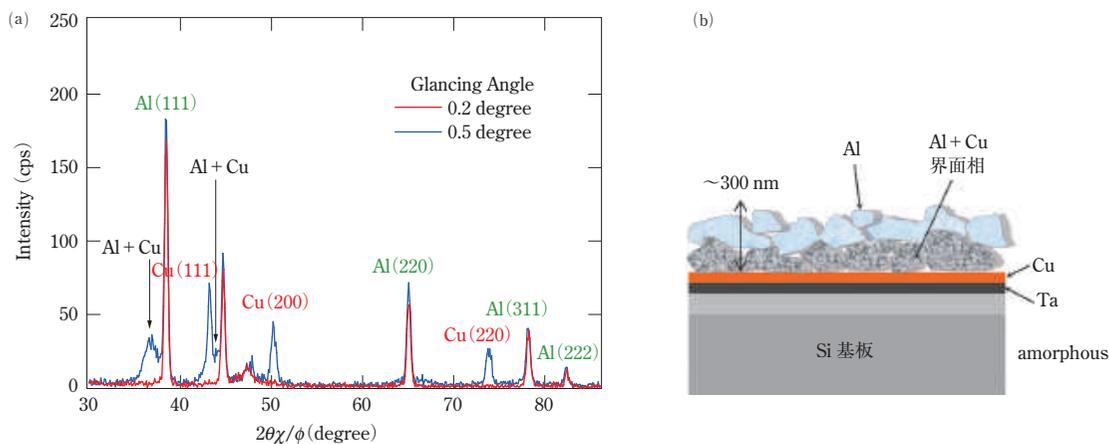


図 14 (a) Al/Cu 薄膜における面内 X 線回折プロファイルの入射角度依存性, (b) 結果の考察から想定される試料断面の構造 (p.780)

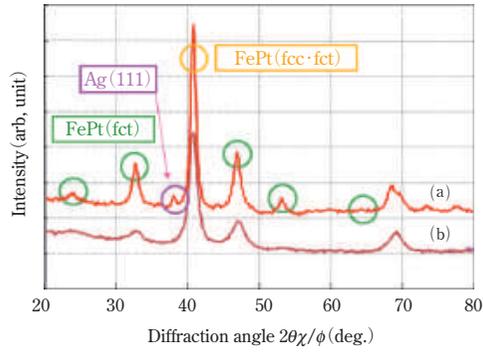


図 16 (a)膜厚 1 nm の Ag 薄膜を表面に有する FePt 試料からの回折, (b) Ag 薄膜を有さない試料・同じ構造の試料からの回折 (p.781)

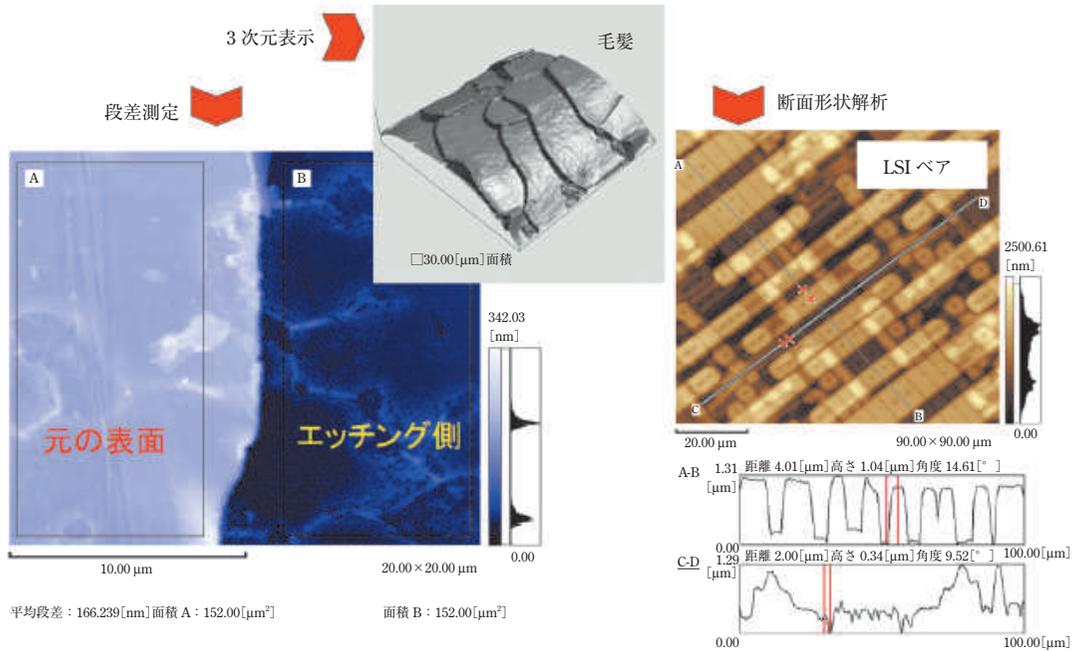


図 3 画像データ例 (p.806)

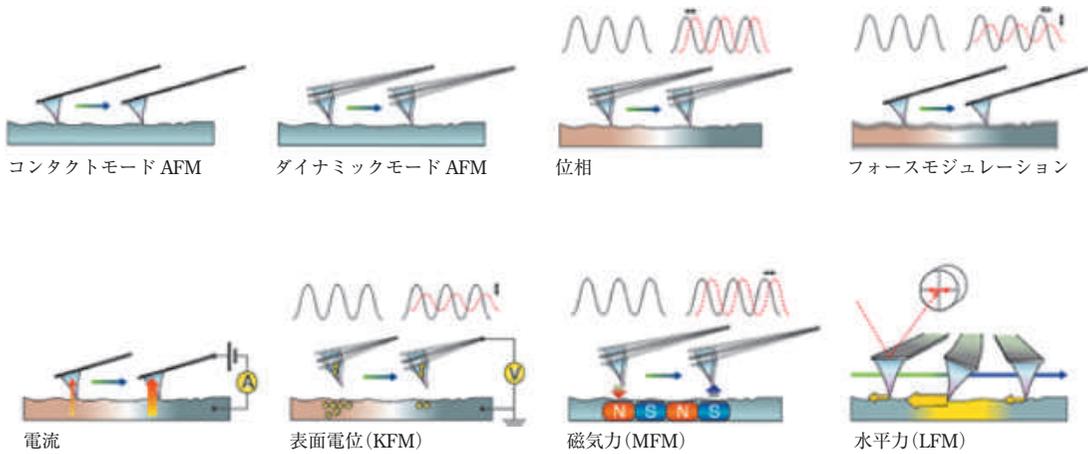


図 4 AFM および各種観察モード (p.807)

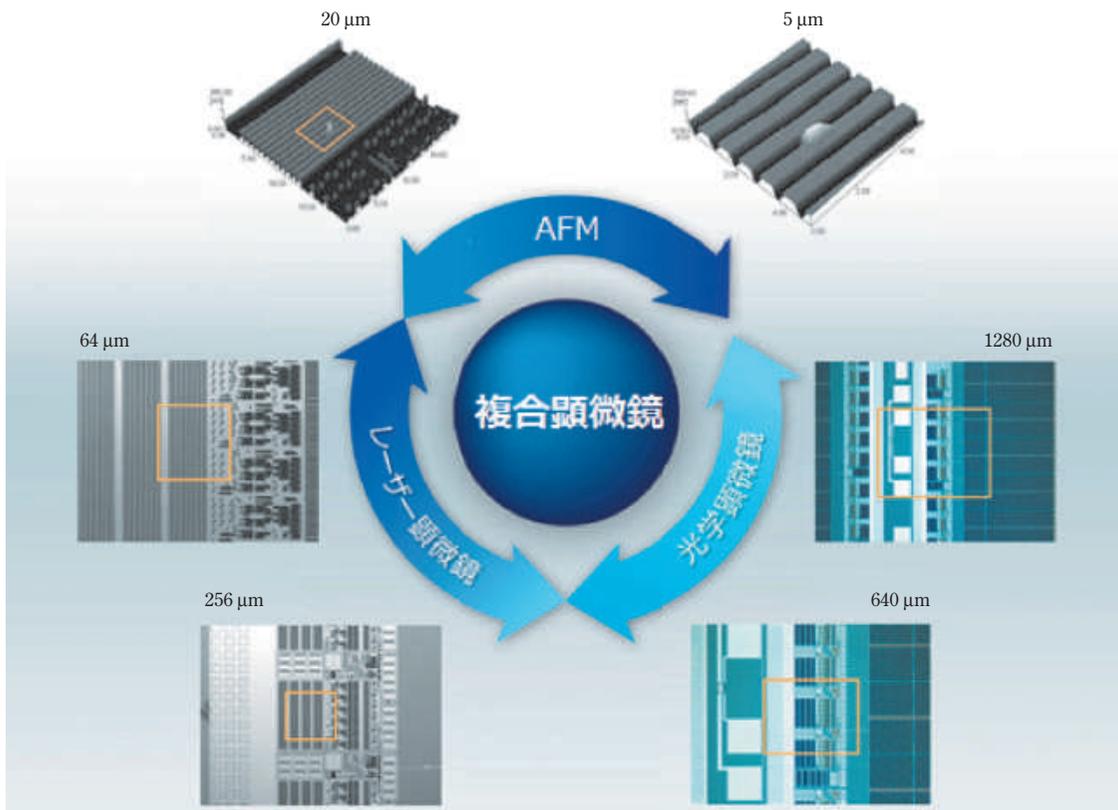


図 5 複合顕微鏡 (p.808)

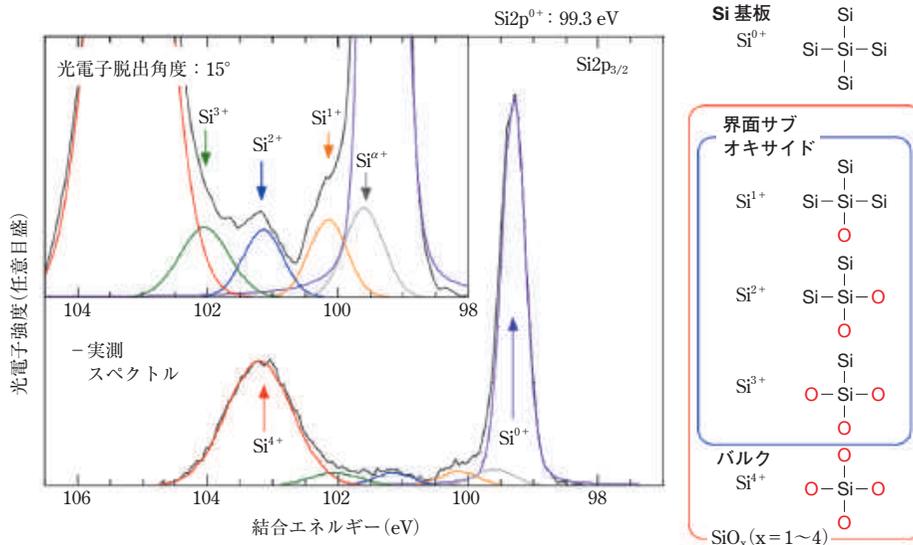


図4 850°C熱酸化 SiO₂(1.0 nm)/Si(100)構造における Si_{2p_{3/2}} 内殻光電子スペクトルと、その波形分離によるバルク酸化膜成分および界面サブオキサイド成分の抽出 (p.870)

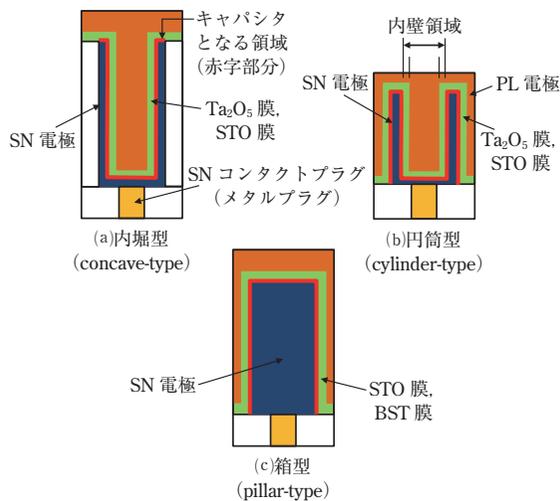


図3 蓄積電極構造の変化 (p.934)

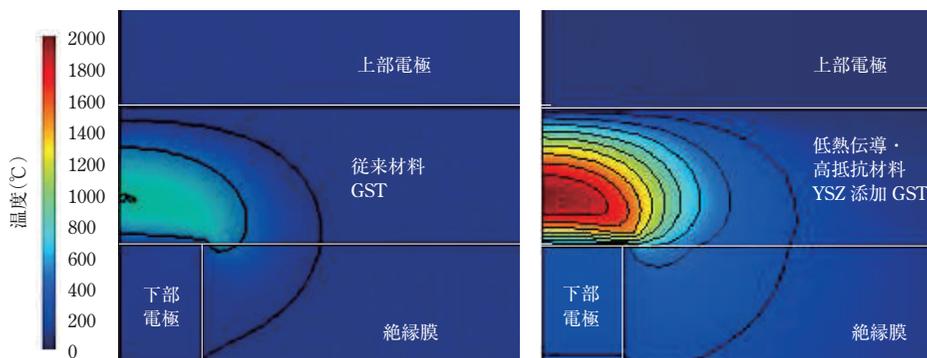


図 8 相変化メモリのリセットパルス印加時の温度シミュレーション⁶⁾ (p.957)

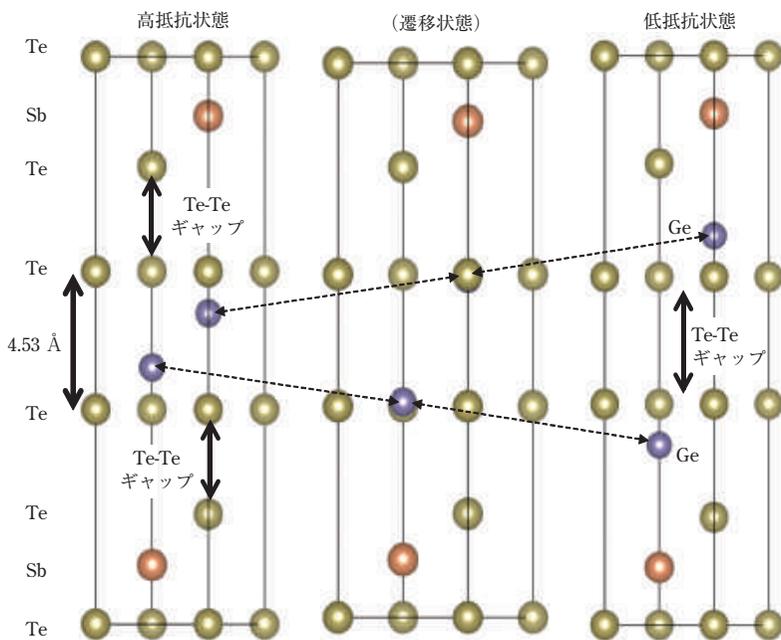


図 12 GeTe/Sb₂Te₃ 超格子の結晶構造と抵抗状態、および Ge の原子移動 (p.960)

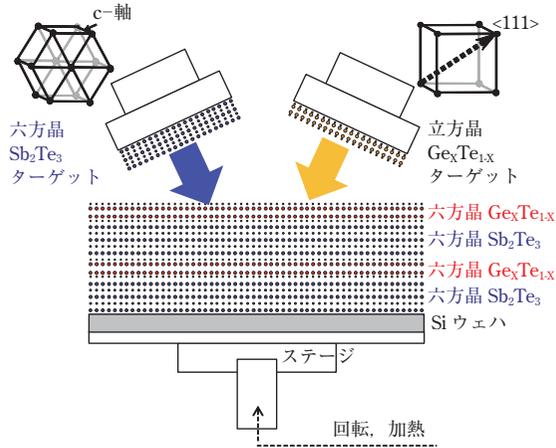


図 13 マルチカソード PVD による $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 超格子の成膜 (p.960)

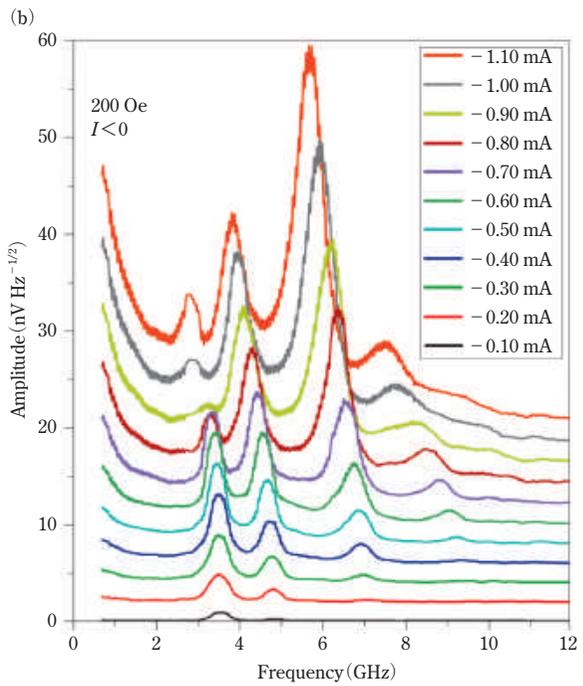
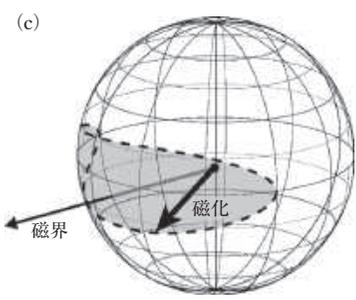
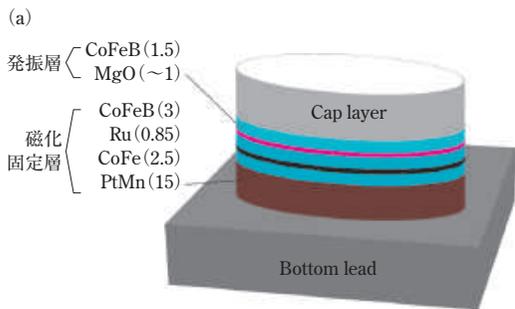
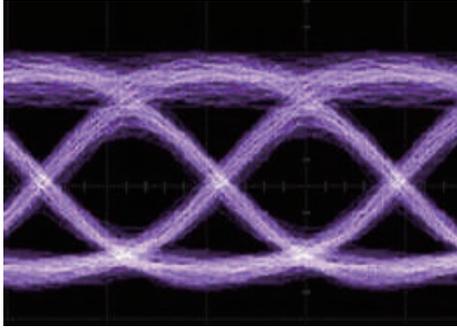


図 2 (a) 試料の断面模式図, (b) 発振スペクトルの測定結果⁸⁾, (c) 面内発振モードの模式図 (p.1034)

(a) 56 Gbit/s NRZ



(b) 112 Gbit/s PAM-4

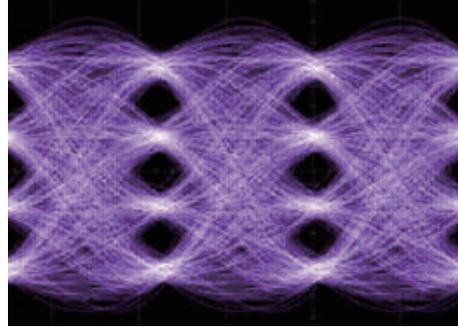


図4 ハイブリッド EO 変調器を使った光信号発生 (p.1072)

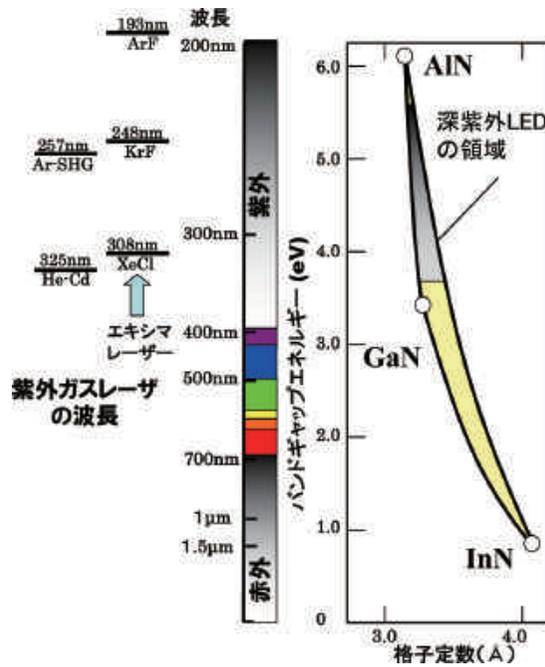


図2 ウルツ鉱結晶 AlGaInN 系半導体のバンドギャップエネルギーと対応する発光波長 (p.1088)

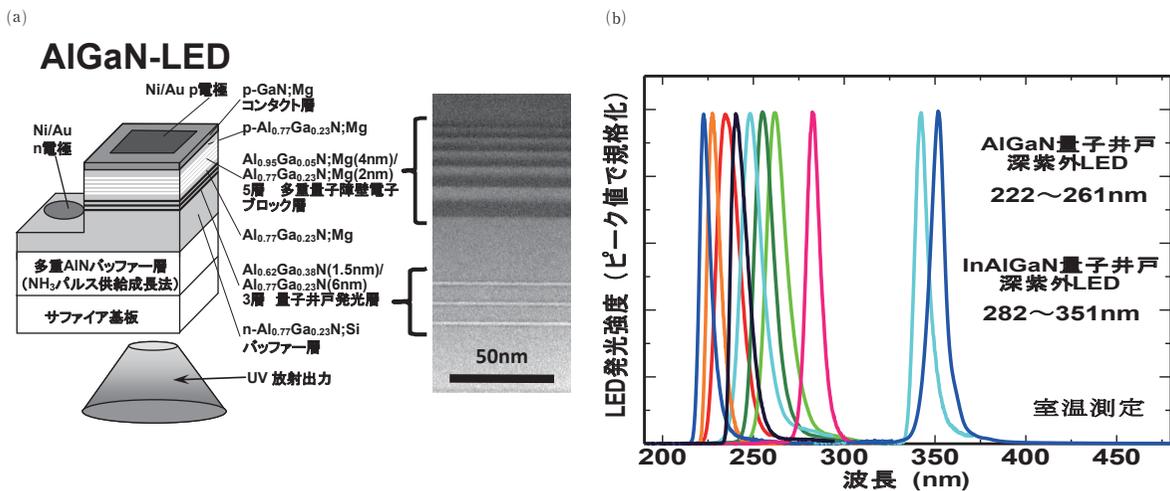


図4 AlGaIn系深紫外LEDの(a)構造と、(b)動作スペクトル²⁾(p.1090)

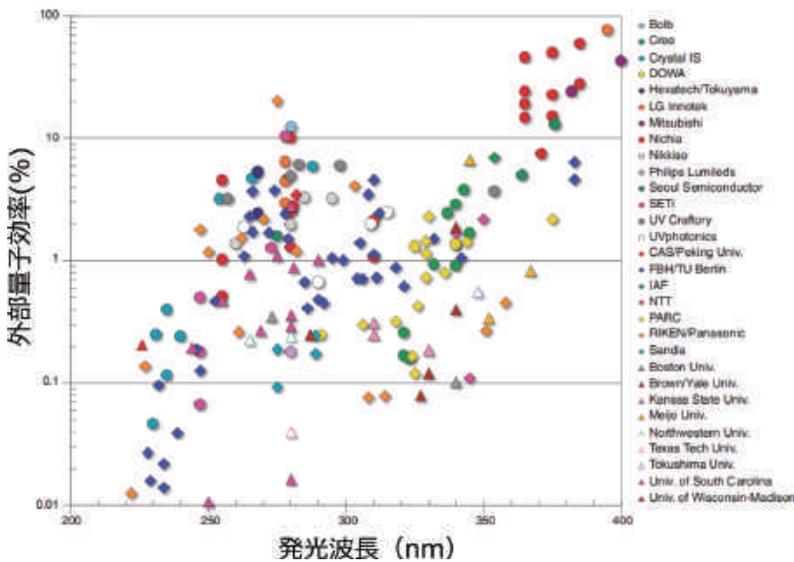


図8 報告されている深紫外LEDの外部量子効率²⁵⁾(p.1091)

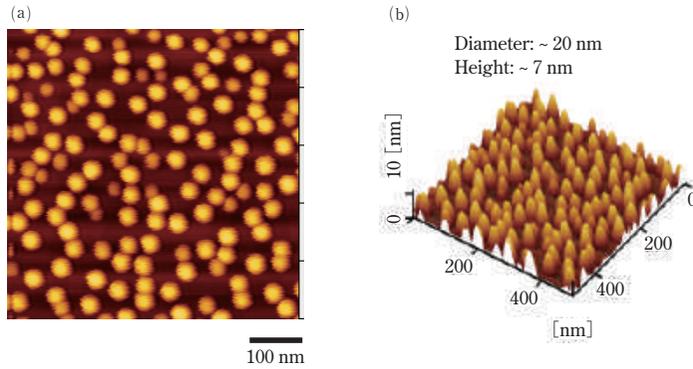


図3 GaAs 基板上に自己形成的に作製された InAs 量子ドットの原子間力顕微鏡による構造観察結果(a)面内のスキャン図, (b)高さを立体的に示した斜視図 (p.1107)

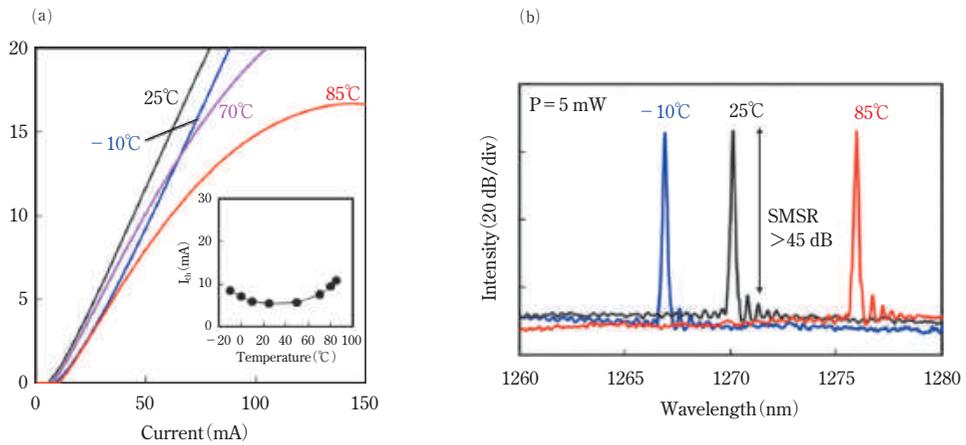


図7 通信波長帯 InAs 量子ドット DFB レーザの(a)電流-光出力特性と(b)発振スペクトル (p.1109)

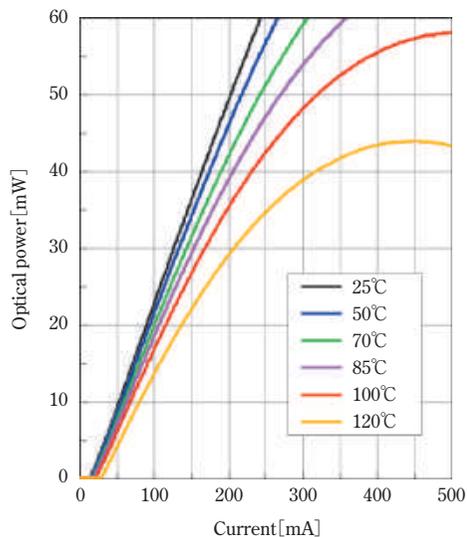
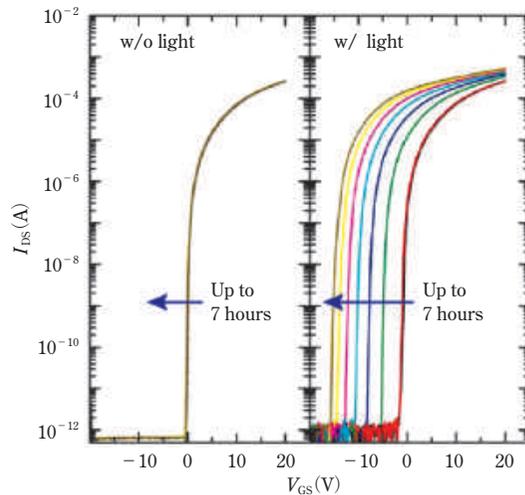
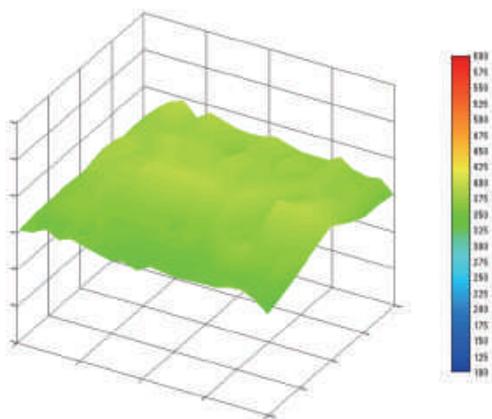


図 8 シリコンフォトニクス応用向けに開発された、温度依存性が小さく光出力の高い量子ドットレーザの電流-光出力特性 (p.1110)

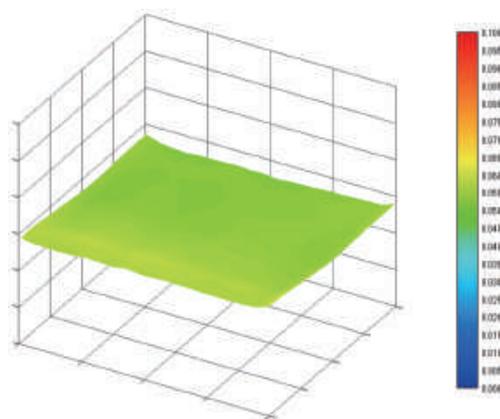


(Wiley-VCH の許可により、文献⁵⁾より転載)

図 2 a-IGZO TFT における NBS 試験 (左) と NBIS 試験 (右) (p.1140)



(a) 膜厚分布 : $\pm 8.3\%$

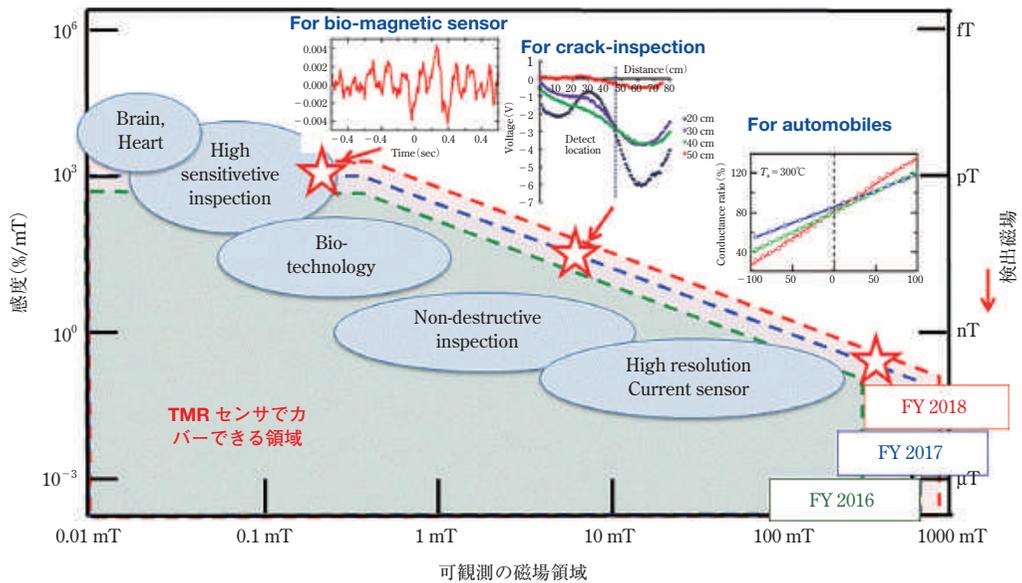


(b) シート抵抗分布 : $\pm 7.8\%$

図 6 10.5 世代スパッタリング装置における Cu の膜厚分布とシート抵抗分布¹³⁾ (p.1160)

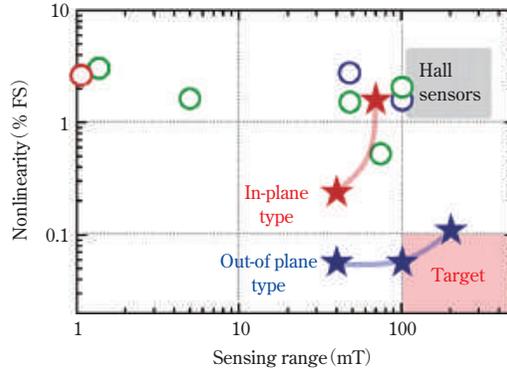


図3 パネル製造元から α -IGZO TFTの発明元に寄贈された製品として市場を席巻する65インチ4k AM-OLEDテレビ (p.1171)



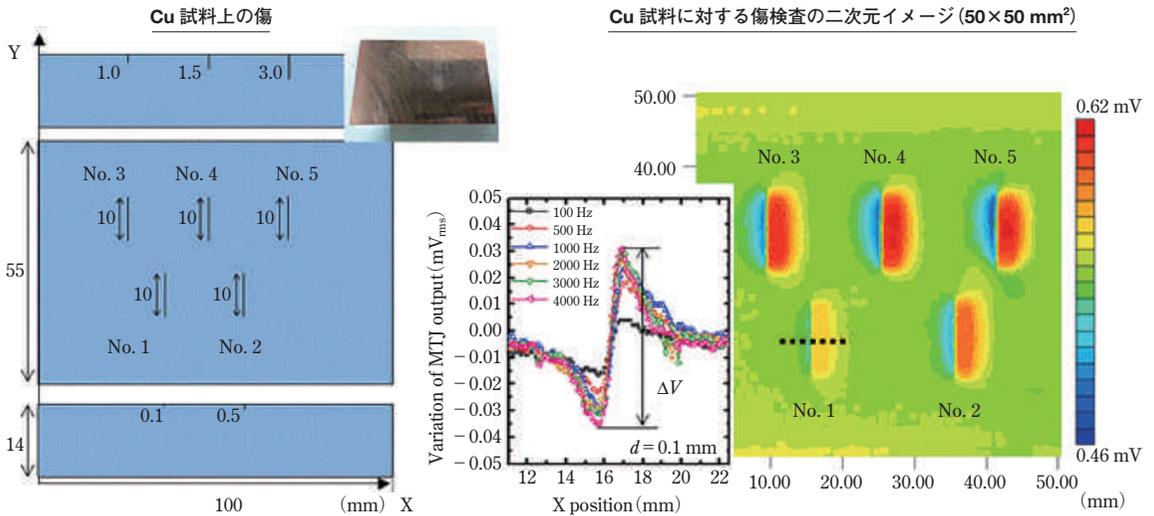
内挿図はそれぞれの点で示した数値算出の元になった実験結果。左から脳磁場測定³⁶⁾、非破壊検査³⁷⁾、電流センサ³⁸⁾の代表的な結果である。

図3 縦軸がセンサ感度、横軸はセンサがカバーしている測定磁場範囲のプロット (p.1268)



Target 値は企業からの情報による。従来のタイプの素子では特に非線形性が不足していたが, out-of-plane type の素子では目標をクリアしている。

図 4 非線形性とダイナミックレンジの関係 (p.1269)



左図は意図的に傷を施した測定用の試料。右図はこの試料に対する渦電流のマッピング。

図 6 渦電流探傷法による測定結果の一例 (p.1270)

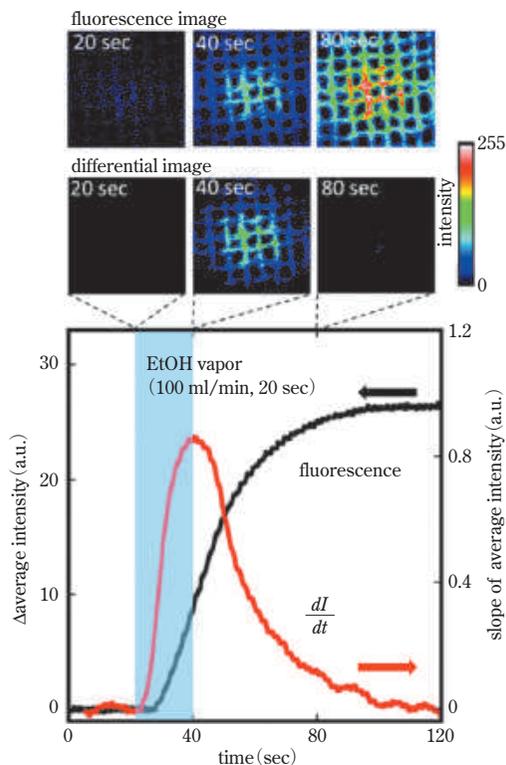


図 7 バイオ蛍光法を用いたエタノールガス (50 ppm) の可視化計測での蛍光強度の経時変化と同結果を移動平均後に微分解析を行った結果, 挿入画像: 蛍光画像と微分解析画像⁴⁶⁾ (p.1293)

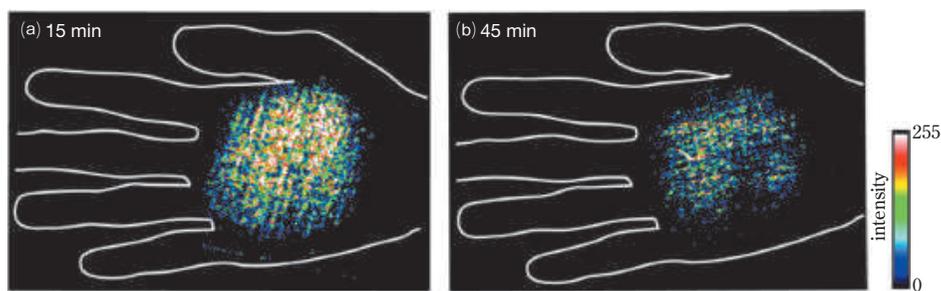
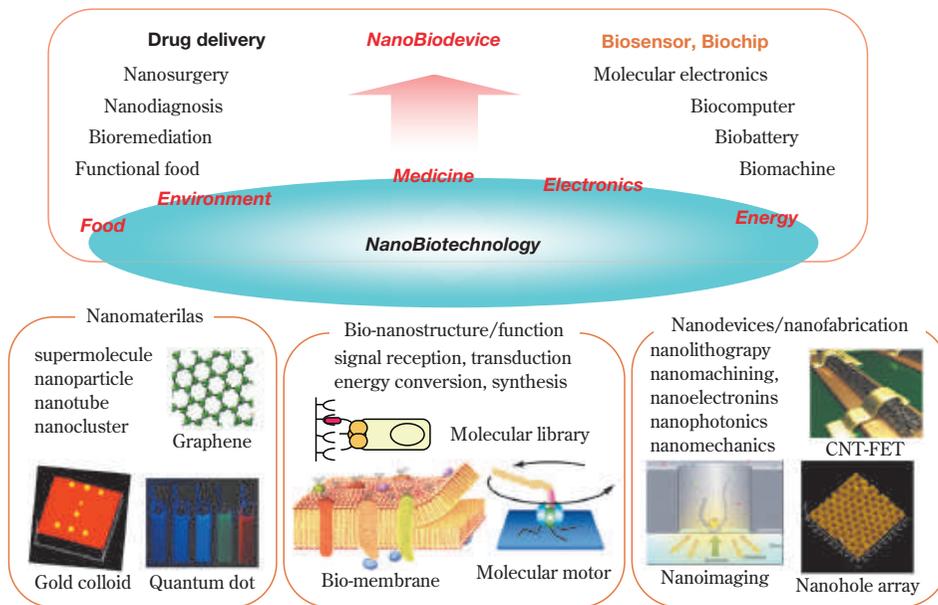


図 8 飲酒後の被験者における皮膚由来のエタノールガスの可視化画像 (a: 15 分後, b: 45 分後)⁴⁶⁾ (p.1294)



(文献 1) の fig. 1.1 を一部改変)

図 4 ナノバイオテクノロジーとバイオセンサ¹⁾ (p.1304)

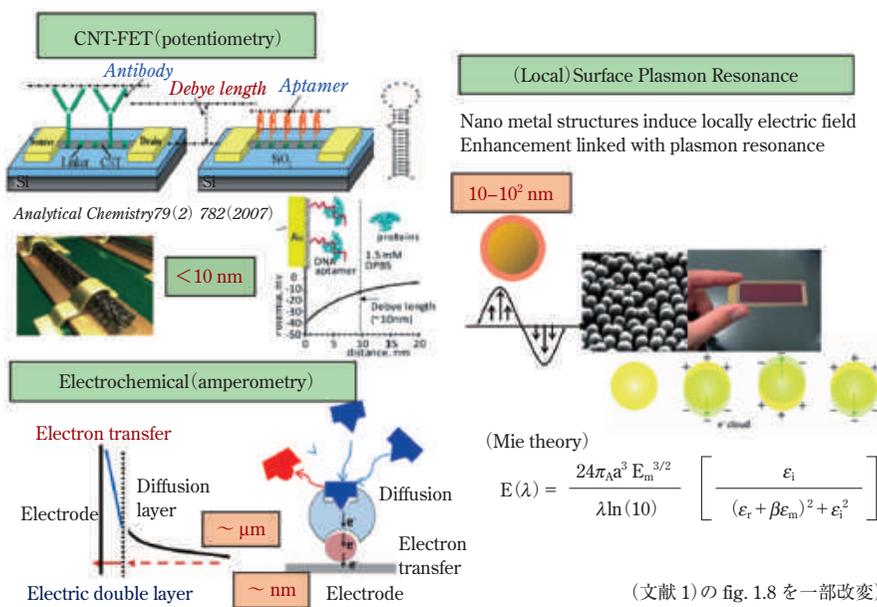
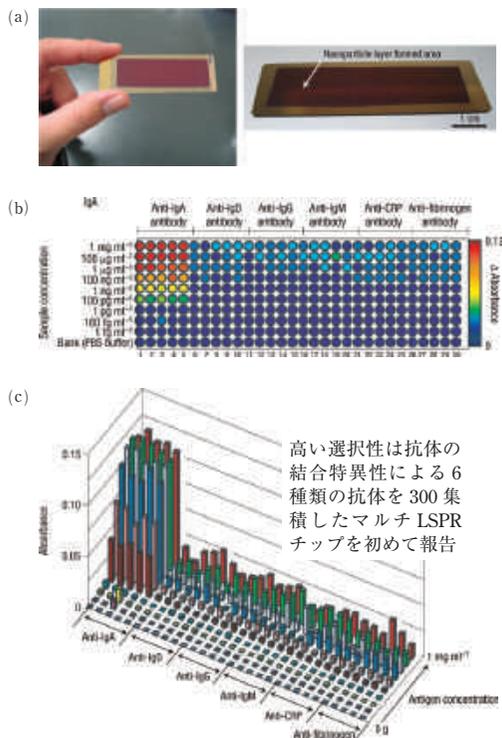


図 5 ナノテクノロジーとバイオセンサ¹⁾ (p.1305)



(a)作成した局在プラズモン共鳴チップの写真,(b)300個の抗体センサーアレイの配置,(c)応答の様子

図6 局在プラズモン共鳴チップを用いた抗体アレイ³⁾
(p.1305)

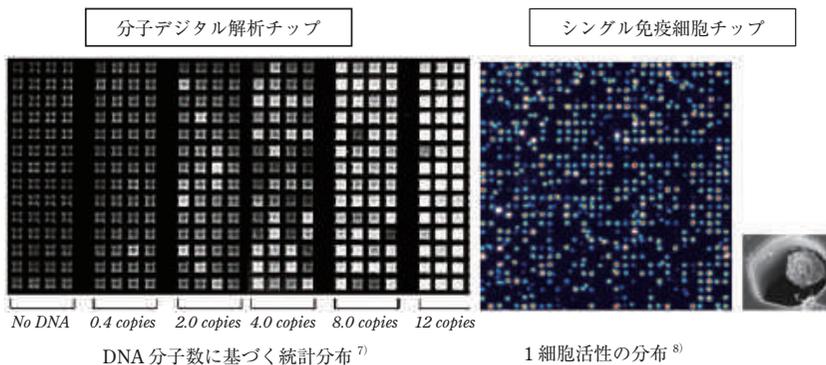


図7 デジタルバイオデバイス(p.1306)

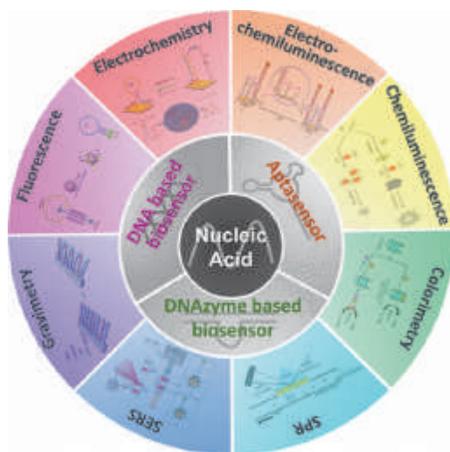


図 10 核酸センサの組み立て原理¹⁰⁾ (p.1308)

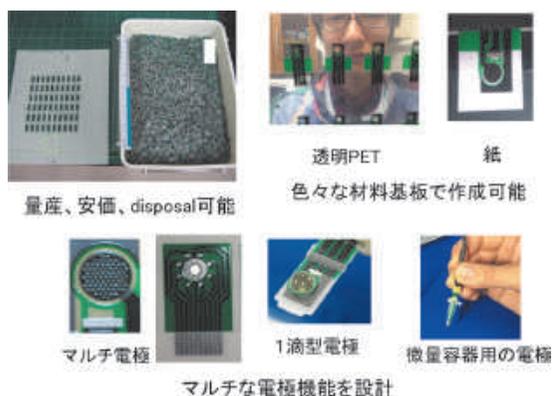


図 13 印刷電極を用いるセンサの優位性¹³⁾ (p.1309)

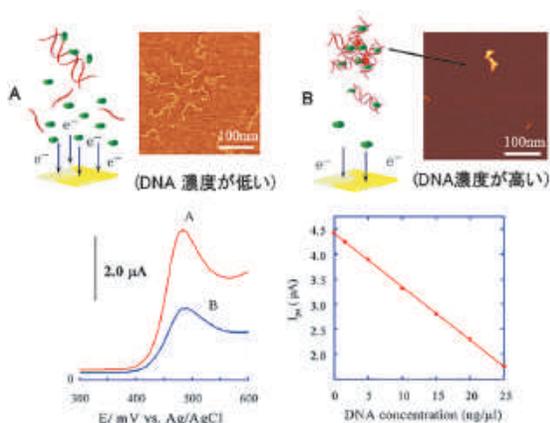


図 14 電気化学遺伝子計測法の例¹³⁾ (p.1309)

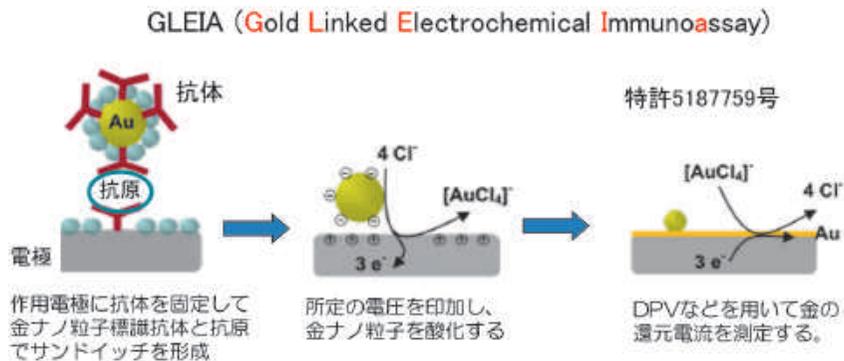


図 15 金ナノ粒子を用いた電気化学免疫アッセイ¹³⁾ (p.1310)

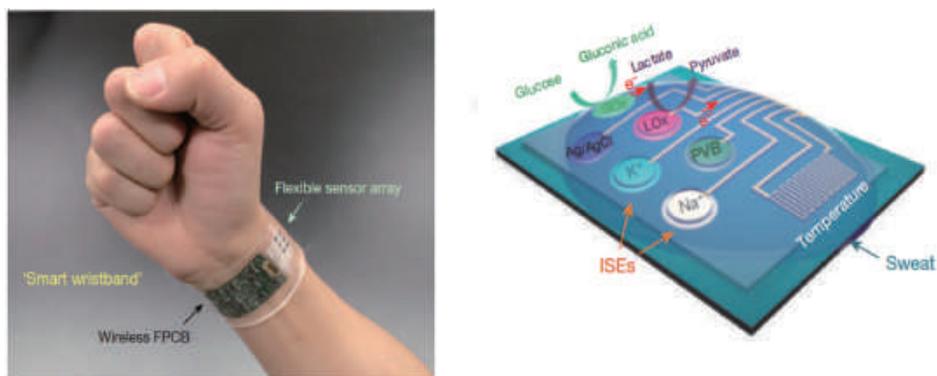


図 17 時計型ウェアラブルバイオセンサの例¹⁴⁾ (p.1311)

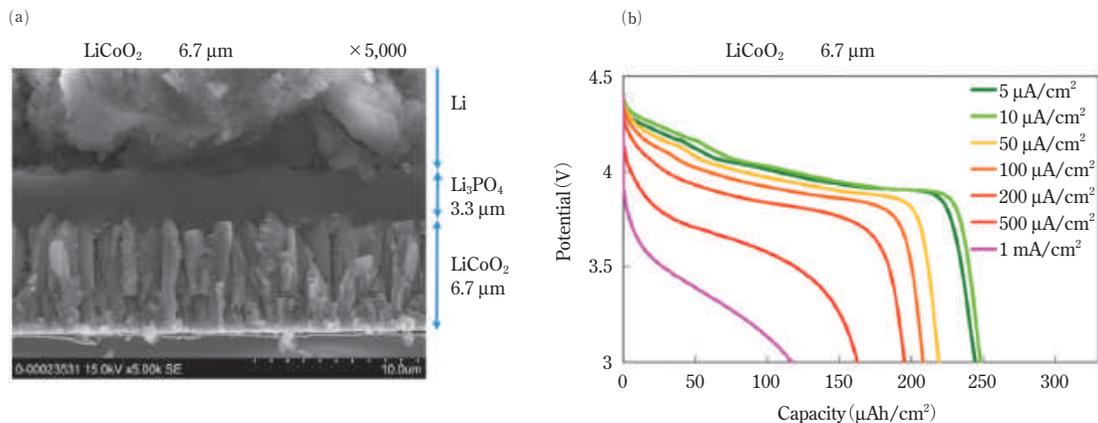


図3 (003) 配向した膜厚 6.7 μm の LiCoO_2 を正極に用いた薄膜電池 ($\text{Li}/\text{Li}_3\text{PO}_4/\text{LiCoO}_2$) の(a)断面 SEM と(b)電池特性¹³⁾ (p.1368)

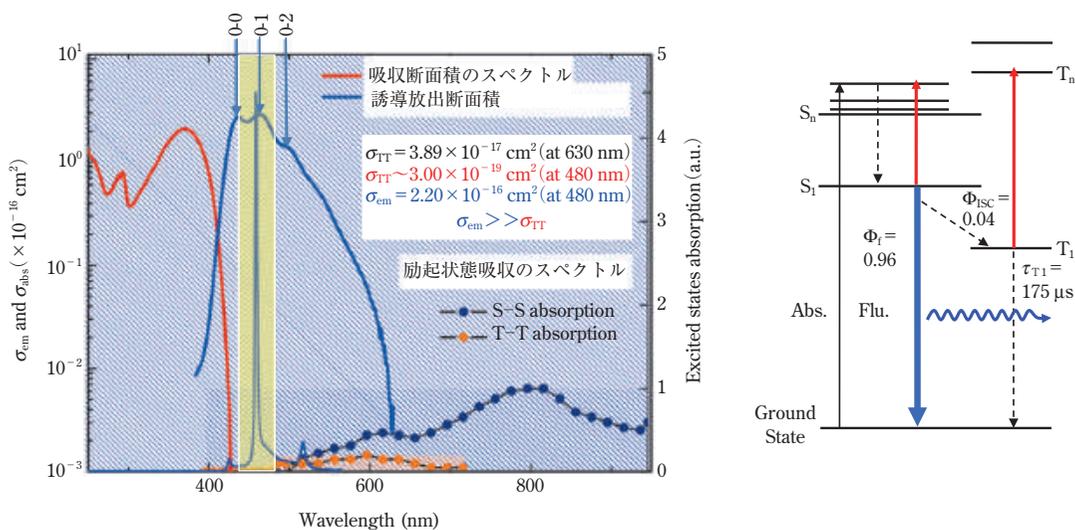


図3 6wt%-BSB-Cz:CBP 共蒸着薄膜の吸収断面積のスペクトル, 誘導放出断面積と励起状態吸収(S-S, T-T)のスペクトル(p.1392)

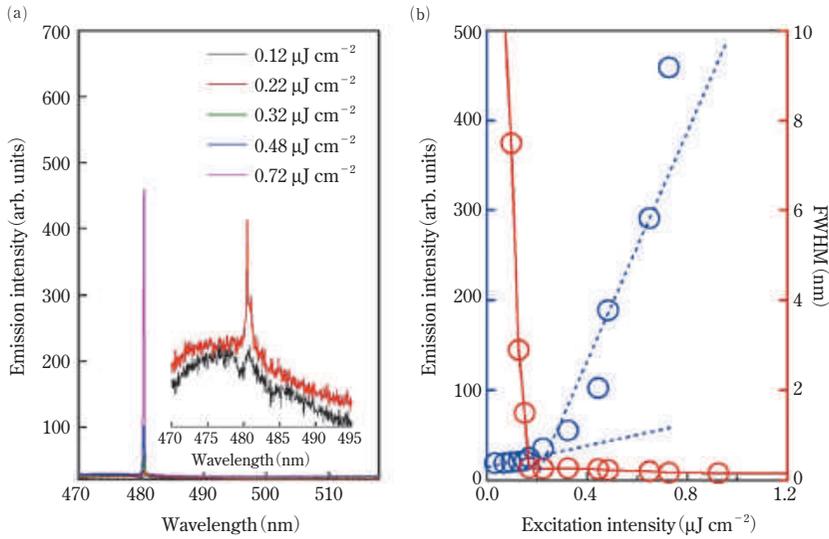


図 5 (a) 1+2 次 DFB レーザ素子の閾値前後での発振スペクトル, (b) 励起パワーに対する発光強度と発光半値半幅 (FWHM) 特性 (p.1393)

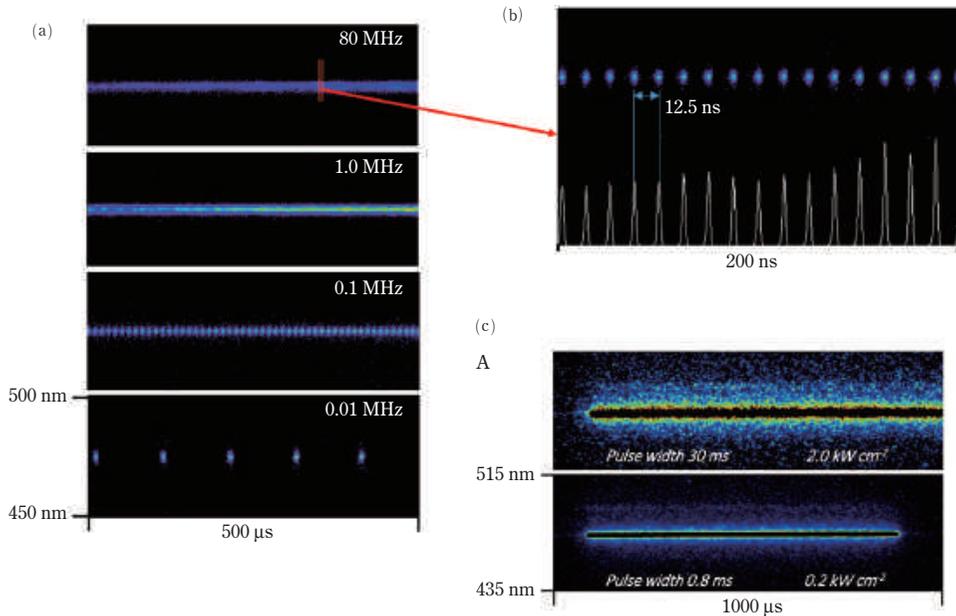


図 6 1+2 次の DFB レーザ素子における発振特性。(a) 励起の繰り返し周波数を 0.01 MHz から 80 MHz で変化させた場合。(b) 80 MHz における発振特性。(c) quasi-CW レーザ発振特性 (30 ms (上), 0.8 ms (下)) (p.1394)

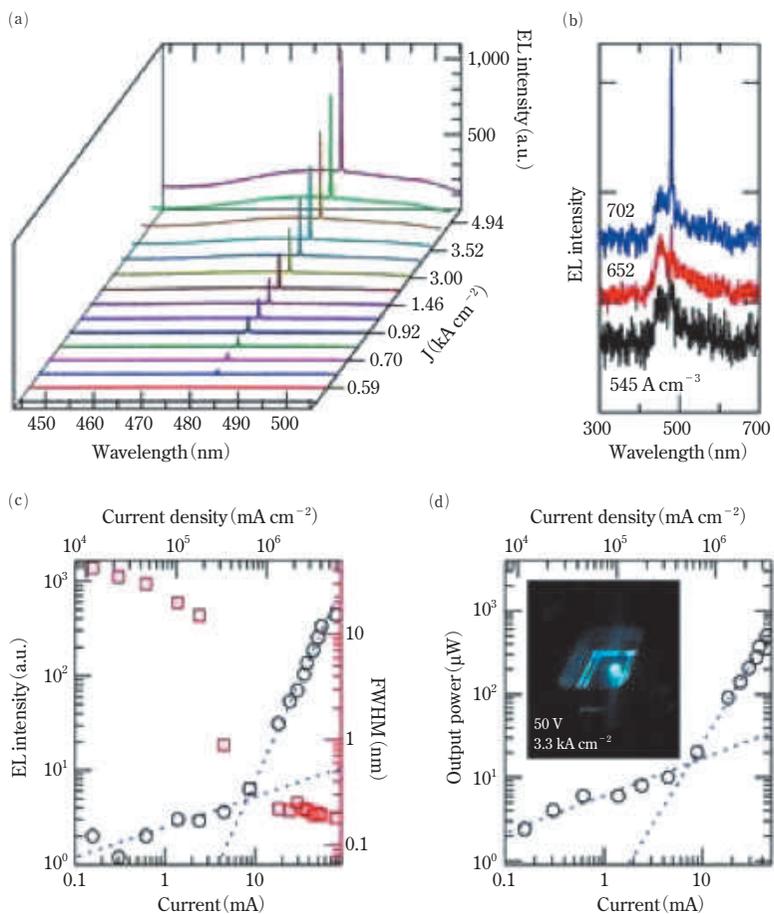


図 8 電流励起下における OSLED のレーザ発振特性 (p.1395)

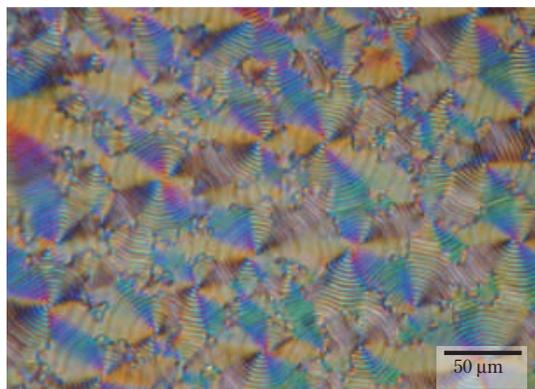


図 3 キラルネマチック液晶の指紋状光学模様を示す POM 写真 (p.1399)

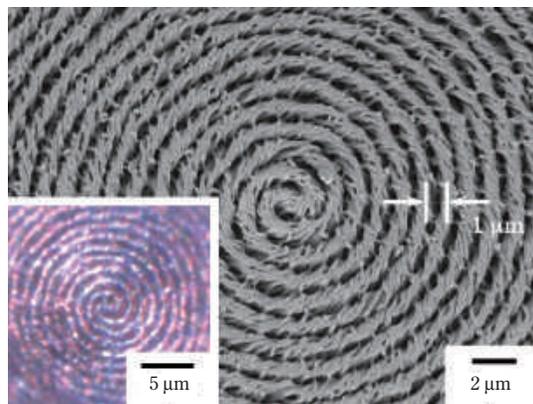


図 4 形態保持炭素化法により調製したヘリカルグラファイトの POM 写真 (差し込み図) と SEM 写真 (p.1400)

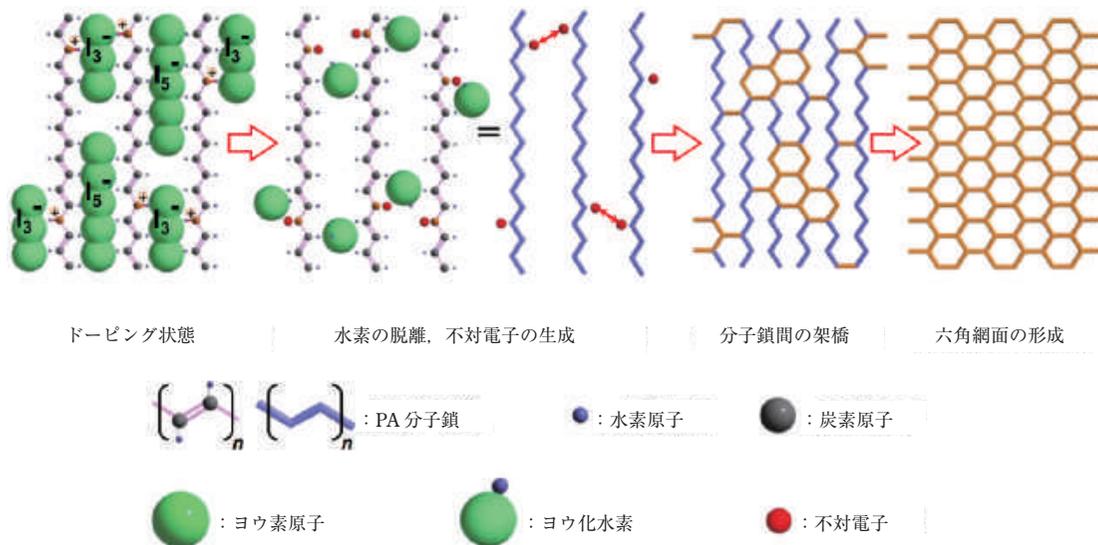


図5 ヨウ素ドーピングしたヘリカルポリアセチレンの熱処理により得られるヘリカルグラファイトの形成メカニズム (p.1400)

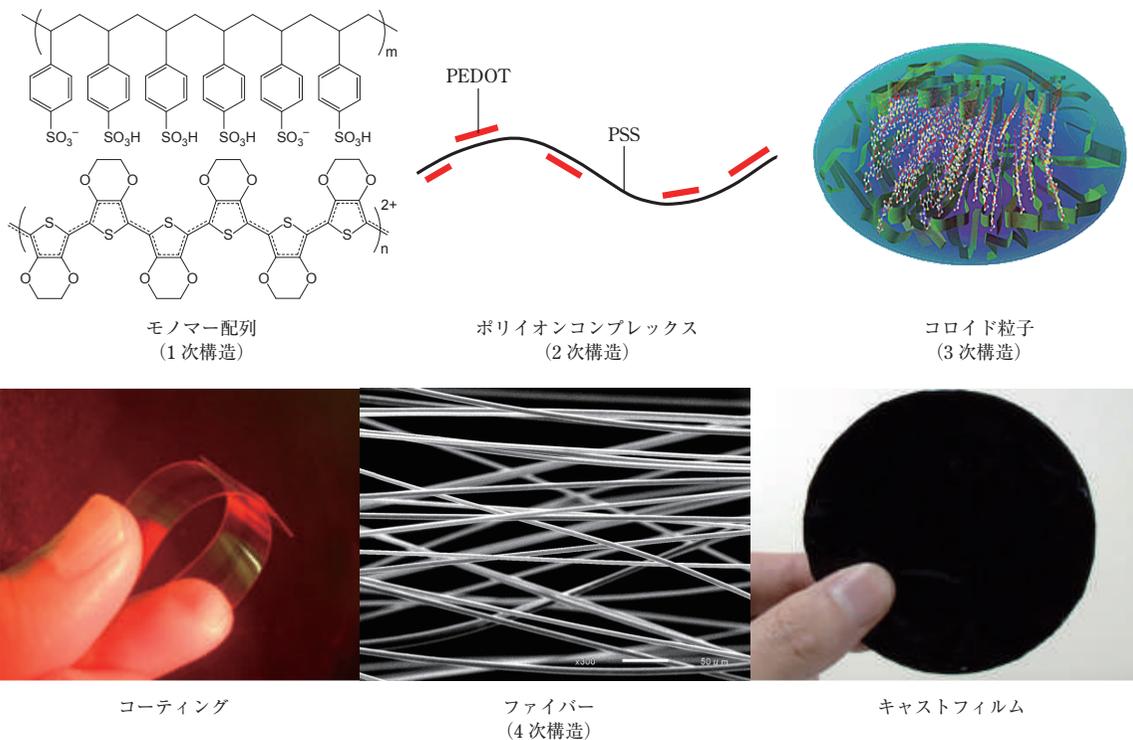


図1 PEDOT:PSSの階層構造 (p.1410)

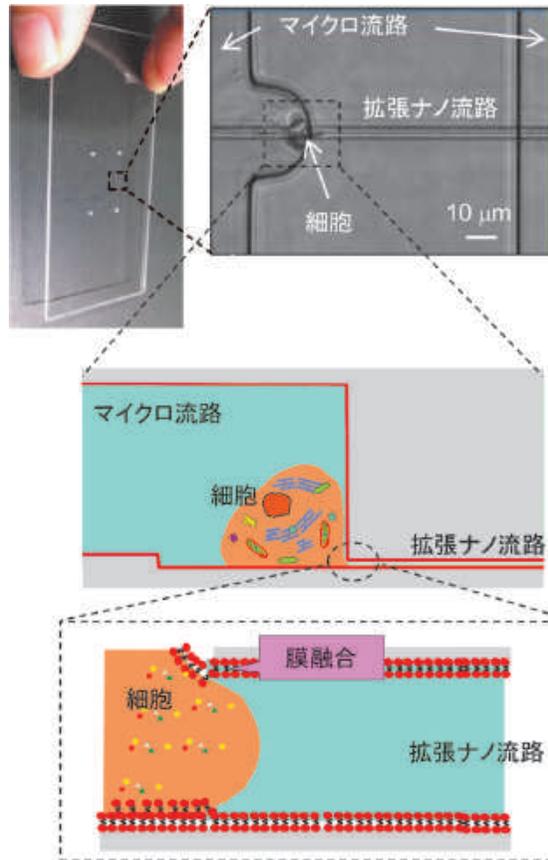


図 4 単一生細胞サンプリングデバイス (p.1431)

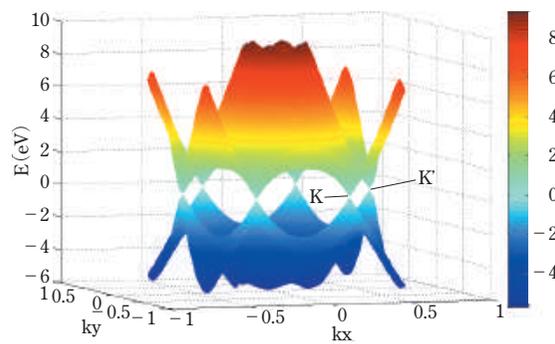


図 1 グラフェンの電子状態 (p.1462)

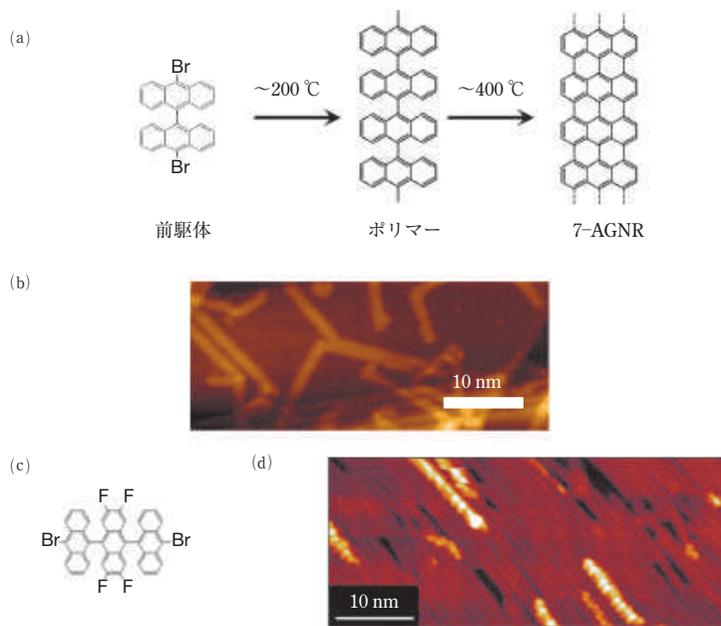


図 3 (a) グラフェンナリボンの合成スキーム, (b) グラフェンナリボンの STM 像, (c) フッ素原子をエッジの一部にもつ前駆体, (d) (c) の前駆体を用いて得られた局所配向 GNR (p.1463)

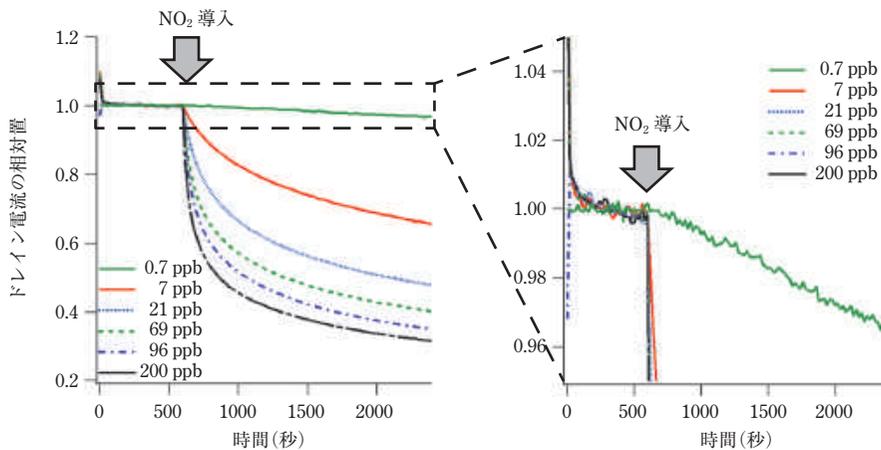


図 10 センサの応答の NO₂ 濃度依存性 (p.1467)

発刊にあたって

薄膜は文字通り、薄い膜のことで物質・材料の形態の一種である。薄膜は紀元前の昔から装飾に使われるなど、人々の生活と密接な関係を持ってきた。

20世紀に入って人々は薄膜をより機能的に使うようになり、応用面の広がりとともに材料、作製法、評価法も一段と進展し、カバーする範囲も大幅に広がったが、それとともに専門化、細分化も進み、全体を俯瞰的に見てそれぞれの良さを引出し、自分が必要とする分野に持ってくる相互補完的な仕事をするのも容易ではなくなってきた。

これを解決するひとつの手立てとして、関連事項を一つにまとめたハンドブックの活用がある。「薄膜の作製・評価とその応用技術ハンドブック」を監修し、(株)フジ・テクノシステムから出版したのは1984年のことである。その時の担当者吉田隆氏がその後(株)エヌ・ティー・エスを立ち上げた。新たな視点も加えて「薄膜作製応用ハンドブック」を監修し、エヌ・ティー・エスから第1版を出版したのが1995年である。薄膜技術の目覚ましい進展を踏まえ、第2版を2003年に出版した。これらの企画・編集作業は松風まさみ氏が注力してくれた。

21世紀に入ってすでに20年が経過した。この時期の変化の顕著な点はコンピュータの進歩つまり情報処理能力の格段の進展と、情報伝送能力の進展で、最大通信速度1 Gbit/sの第4世代(4G)から10 Gbit/sの第5世代(5G)に入ろうとしている。これらは人工知能(AI)の進展をもたらし、また人とモノを結ぶIoT(Internet of Things)が多くの場所で用いられるようになった。

これらをもたらした原動力の一つは薄膜技術の進歩であるが、これらはまた薄膜技術に多くの変化をもたらしている。薄膜に用いる物質・材料の開発には第一原理計算や人工知能を用いて最適材料を探索するマテリアルズインフォマティクスが活用されるようになり、薄膜の生産工程で用いられる成膜装置にはIoTが利用され、装置管理や作製過程の監視などに役立っている。そこでまたIoTに利用できる薄膜の研究が行われるようになるなど、お互いの関係も深くなっていく。

そこでこれらの薄膜技術の進展や新しい応用分野を取り入れたハンドブック第3版を

出版することになった。それがこの「2020 版 薄膜作製応用ハンドブック」である。編集委員も一部若返り，新しい時代の目線で監修・編集を行ったつもりである。

このハンドブックが薄膜に携わる人々のみならず，薄膜を利用する人々の目となり，力となることを，心から願うものである。

2020 年 1 月

監修者 権田 俊一

監修者・編集委員・執筆者一覧

【監修者】

権田 俊一 大阪大学名誉教授

【編集委員】(五十音順)

酒井 忠司 東京工業大学工学院 特任教授

田畑 仁 東京大学大学院工学系研究科 教授

八瀬 清志 国立研究開発法人産業技術総合研究所材料・化学領域 招聘研究員

【編集協力委員】

宮崎 照宣 東北大学名誉教授

【執筆者】(執筆順)

権田 俊一 大阪大学名誉教授

近藤 高志 東京大学先端科学技術研究センター 教授/副所長

田畑 仁 東京大学大学院工学系研究科 教授

小口 多美夫 大阪大学産業科学研究所 教授

中村 浩次 三重大学大学院工学研究科 教授

勝本 信吾 東京大学物性研究所 教授

大見 俊一郎 東京工業大学工学院 准教授

工藤 聡也 東京工業大学工学院/日本学術振興会 特別研究員

神野 伊策 神戸大学大学院工学研究科 教授

喜久田 寿郎 富山大学学術研究部 准教授

宮崎 照宣 東北大学名誉教授

久保田 均 国立研究開発法人産業技術総合研究所スピントロニクス研究センター 総括研究主幹

湯浅 新治 国立研究開発法人産業技術総合研究所スピントロニクス研究センター 研究センター長

桜庭 裕弥 国立研究開発法人物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点 グループリーダー

矢口 裕之 埼玉大学大学院理工学研究科 教授

市野 邦男 鳥取大学学術研究院工学系部門 教授

山田 実 金沢大学名誉教授

内田 裕久 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 教授

井上 光輝 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 教授

金光 義彦 京都大学化学研究所 教授

佐々木 信也 東京理科大学工学部 教授

藤田 大介 国立研究開発法人物質・材料研究機構先端材料解析研究拠点 拠点長

工藤 昭彦 東京理科大学理学部 教授

高井 治 関東学院大学材料・表面工学研究所 所長

坂入 正敏 北海道大学大学院工学研究院 准教授

有馬 健太 大阪大学大学院工学研究科 准教授

林 和孝	AGC 株式会社 材料融合研究所 シニアマネージャー
飯宮澤 信太郎	早稲田大学理工学術院総合研究所 招聘研究員
望月 圭介	株式会社信光社結晶開発部 部長
西 睦夫	東洋紡株式会社研究開発企画管理部 主席部員
朝日 一	大阪大学産業科学研究所名誉教授/特任教授
星 陽一	東京工芸大学名誉教授
臼井 博明	東京農工大学大学院工学研究院 教授
松木 伸行	神奈川大学工学部 准教授
大久保 勇男	国立研究開発法人物質・材料研究機構機能性材料研究拠点センサ・アクチュエータ研究開発センター 主任研究員
室田 淳一	東北大学名誉教授
松永 範昭	アプライドマテリアルズジャパン株式会社グローバルアカウント事業部 技術本部長
国井 泰夫	株式会社 KOKUSAI ELECTRIC ビジネス開発統括本部マーケティング戦略室 シニア・スペシャリスト
由上 二郎	株式会社 KOKUSAI ELECTRIC ビジネス開発統括本部マーケティング戦略室 シニア・スペシャリスト
芦原 洋司	株式会社 KOKUSAI ELECTRIC ビジネス開発統括本部マーケティング戦略室 担当部長
大下 祥雄	豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター 教授
町田 英明	気相成長株式会社本社研究所 代表取締役
宮崎 誠一	名古屋大学大学院工学研究科 教授
傍島 靖	岐阜大学工学部 准教授
伊藤 貴司	岐阜大学工学部 教授
平松 美根男	名城大学理工学部 教授
安藤 康高	足利大学工学部 教授
白藤 立	大阪市立大学大学院工学研究科 教授
福井 孝志	北海道大学名誉教授
藤田 静雄	京都大学大学院工学研究科 教授
吉田 政次	(元)日本電気株式会社基礎研究所材料研究部 担当部長
松本 祐司	東北大学大学院工学研究科 教授
丸山 伸伍	東北大学大学院工学研究科 助教
百瀬 健	東京大学大学院工学系研究科 講師
矢野 満明	大阪工業大学工学部 教授
佐々 誠彦	大阪工業大学工学部 教授
小池 一步	大阪工業大学工学部 教授
西 眞一	国立研究開発法人産業技術総合研究所センシングシステム研究センター 開発部長
幸塚 広光	関西大学化学生命工学部 教授
渡邊 充広	関東学院大学総合研究推進機構材料・表面工学研究所 副所長/教授
本間 英夫	関東学院大学総合研究推進機構材料・表面工学研究所 顧問/特別荣誉教授
都倉 勇貴	慶應義塾大学大学院理工学研究科
白鳥 世明	慶應義塾大学理工学研究科 教授
峯廻 洋美	国立研究開発法人産業技術総合研究所電子光技術研究部門 主任研究員
日下 靖之	国立研究開発法人産業技術総合研究所センシングシステム研究センター 主任研究員
吉本 則之	岩手大学理工学部 教授
久保野 敦史	静岡大学工学部 教授

松原 亮介	静岡大学工学部 助教
杉村 博之	京都大学大学院工学研究科 教授
小木曾 真樹	国立研究開発法人産業技術総合研究所機能化学研究部門 主任研究員
上野 巧	信州大学ファイバーイノベーション・インキュベータ 特任教授
下川 房男	香川大学創造工学部 教授
篠田 和典	株式会社日立製作所研究開発グループエレクトロニクスイノベーションセンタナノプロセス研究部 主任研究員
平井 義彦	大阪府立大学大学院工学研究科 教授
近藤 誠一	日立化成株式会社研磨材料開発部 部長
堀田 将	北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 教授
寒川 誠二	東北大学流体科学研究所 教授
冲原 伸一朗	光産業創成大学院大学光産業創成研究科 准教授
瀬古 典明	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学部門高崎量子応用研究所 先端機能材料部 プロジェクトリーダー/上席研究員
植木 悠二	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学部門高崎量子応用研究所 先端機能材料部 主幹研究員
松井 真二	兵庫県立大学名誉教授
黒井 隆	日新イオン機器株式会社新事業推進部テクニカルマーケティンググループ グループ長
深谷 有喜	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター 研究主幹
城戸 義明	立命館大学理工学部 特任教授/名誉教授
上殿 明良	筑波大学数理物質系 教授
秩父 重英	東北大学多元物質科学研究所計測研究部門 教授
石谷 善博	千葉大学大学院工学研究院 教授
組頭 広志	東北大学多元物質科学研究所 教授
斎藤 啓介	Rigaku Americas Corporation Product Manager, X-ray Diffraction
大田 晃生	名古屋大学大学院工学研究科 助教
菅原 康弘	大阪大学大学院工学研究科 教授
中島 秀郎	株式会社島津製作所分析計測事業部 X線/表面ビジネスユニット プロダクトマネージャー
粉川 良平	株式会社島津製作所分析計測事業部事業企画部 マネージャー
小野田 有吾	株式会社日立ハイテクサイエンス BT 設計部
柳川 香織	株式会社日立ハイテクノロジーズ評価解析企画部
藤井 岳直	株式会社島津製作所分析計測事業部グローバルアプリケーション開発センター 係長
保田 英洋	大阪大学超高圧電子顕微鏡センター センター長/教授
東 康史	国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター物質計測標準研究部門 主任研究員
田中 彰博	@ESCA research 代表
大川 登志郎	シエンタ オミクロン株式会社
大岩 烈	シエンタ オミクロン株式会社
梅澤 憲司	大阪府立大学高等教育推進機構工学研究科 教授
本多 信一	兵庫県立大学大学院工学研究科 教授
吉信 淳	東京大学物性研究所 教授
桑畑 進	大阪大学大学院工学研究科 教授
吉本 惣一郎	熊本大学大学院先端科学研究部 准教授
最上 徹	国立研究開発法人産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門招聘研究員
鳥海 明	東京大学名誉教授

高木 信一	東京大学大学院工学系研究科 教授
稗田 克彦	JSR 株式会社 研究開発担当役員付
三谷 祐一郎	キオクシア株式会社メモリ技術研究所デバイス技術開発センター グループ長
山川 晃司	キオクシア株式会社メモリ技術研究所
斉藤 好昭	東北大学工学部 教授
高浦 則克	株式会社日立製作所研究開発グループエレクトロニクスイノベーションセンタ 主管研究員
秋永 広幸	国立研究開発法人産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門 総括研究主幹
島 久	国立研究開発法人産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門 主任研究員
内藤 泰久	国立研究開発法人産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門 主任研究員
小椋 厚志	明治大学理工学部 教授
原 直紀	株式会社富士通研究所デバイス&マテリアル研究センター 特任研究員
本城 和彦	電気通信大学名誉教授
大村 一郎	九州工業大学生命体工学研究科 教授
木本 恒暢	京都大学大学院工学研究科 教授
葛原 正明	福井大学大学院工学研究科 教授
牧野 俊晴	国立研究開発法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター 研究チーム長
田中 三郎	豊橋技術科学大学 EIIRIS(エレクトロニクス先端融合研究所) 教授
日高 睦夫	国立研究開発法人産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門 招聘研究員
波多野 睦子	東京工業大学工学院 教授
國分 崇生	株式会社ニコン TOP プロジェクト/研究開発本部材料・要素技術研究所第一研究課 主幹研究員
高橋 浩	上智大学理工学部 教授
横山 士吉	九州大学先導物質化学研究所 教授
堀川 剛	国立研究開発法人産業技術総合研究所電子光技術研究部門 上級主任研究員/技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 主幹研究員
志村 大輔	技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 主幹研究員
鄭 錫煥	技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 主幹研究員
岡山 秀彰	技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 主幹研究員
伴 雄三郎	大陽日酸 CSE 株式会社 常務取締役
平山 秀樹	国立研究開発法人理化学研究所平山量子光素子研究室 主任研究員
宮本 智之	東京工業大学未来産業技術研究所 准教授
西 研一	株式会社 QD レーザレーザデバイス事業部 技術部長
武政 敬三	株式会社 QD レーザレーザデバイス事業部 執行役員/事業部長
菅原 充	株式会社 QD レーザ 代表取締役社長
De Zoysa Menaka	京都大学大学院工学研究科 講師
吉田 昌宏	京都大学大学院工学研究科
石崎 賢司	京都大学大学院工学研究科 准教授
野田 進	京都大学大学院工学研究科 教授
渡辺 恭志	株式会社ブルックマンテクノロジー リサーチフェロー/静岡大学電子工学研究所 客員教授
黒田 理人	東北大学大学院工学研究科 准教授
太田 裕道	北海道大学電子科学研究所 教授
細野 秀雄	東京工業大学元素戦略研究センター センター長/特命教授
井手 啓介	東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所 助教
片瀬 貴義	東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所 准教授

野村 研二	University of California San Diego Department of Electrical and Computer Engineering Assistant professor
雲見 日出也	東京工業大学元素戦略研究センター 特任教授
神谷 利夫	東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所 教授/所長
中村 卓	株式会社ジャパンディスプレイ R&D 統括部デバイス開発部 課長
小林 大士	株式会社アルバック超材料研究所 室長
平松 雅人	株式会社 JOLED パネル事業本部生産統括部能美技術部 アソシエイトテクニカルスペシャリスト
大観 光徳	鳥取大学工学部 教授
清水 貴央	日本放送協会放送技術研究所新機能デバイス研究部 上級研究員
北川 雅俊	大阪大学センター・オブ・イノベーション(COI)研究推進機構/大学院工学研究科 特任教授
高岸 雅幸	株式会社東芝研究開発本部研究開発センターバックエンドデバイス技術ラボラトリー フェロー
前田 知幸	株式会社東芝研究開発本部研究開発センターバックエンドデバイス技術ラボラトリー 主任研究員
宮川 直康	パナソニック株式会社 イノベーション推進部門要素技術開発センターストレージ開発室 ディスク技術担当主監
立花 淳一	ソニーストレージメディアソリューションズ株式会社テープメディア部 シニアテープデザインエンジニア
野崎 隆行	国立研究開発法人産業技術総合研究所スピントロニクス研究センター 研究チーム長
與田 博明	Spin-Orbitronics Technologies, Inc. 代表取締役社長/技術責任者
大沢 裕一	Spin-Orbitronics Technologies, Inc. 取締役
加藤 侑志	Spin-Orbitronics Technologies, Inc. 取締役
下村 尚治	キオクシア株式会社メモリ技術研究所デバイス技術研究開発センター新規メモリ開発部新規メモリ技術第一担当 主幹
深見 俊輔	東北大学電気通信研究所 准教授
林 将光	東京大学大学院理学系研究科 准教授
島ノ江 憲剛	九州大学大学院総合理工学研究院 教授
渡邊 賢	九州大学大学院総合理工学研究院 准教授
末松 昂一	九州大学大学院総合理工学研究院 助教
年吉 洋	東京大学生産技術研究所 教授
中谷 友也	国立研究開発法人物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点 主任研究員
安藤 康夫	東北大学大学院工学研究科 教授
石田 謙司	神戸大学工学研究科 教授
荒川 貴博	東京医科歯科大学生体材料工学研究所 講師
三林 浩二	東京医科歯科大学生体材料工学研究所 教授
都甲 潔	九州大学高等研究院 特別主幹教授
民谷 栄一	大阪大学大学院工学研究科 教授/ 産総研・阪大先端フォトンクス・バイオセンシングオープンイノベーションラボラトリー ラボ長
関谷 毅	大阪大学産業科学研究所 教授
吉河 訓太	株式会社カネカ太陽電池・薄膜研究所 課長/基幹研究員
榎屋 勝巳	出光興産株式会社エネルギーソリューション事業部 アドバイザー
荒川 裕則	東京理科大学名誉教授
池上 和志	桐蔭横浜大学医用工学部 准教授
阿部 竜	京都大学大学院工学研究科 教授
桑田 直明	国立研究開発法人物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究拠点 主幹研究員
西村 靖雄	国立研究開発法人産業技術総合研究所電池技術研究部門 主任研究員

松方 正彦	早稲田大学先進理工学研究科 教授
酒井 求	早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構 次席研究員
安達 千波矢	九州大学工学研究院 教授
赤木 和夫	立命館大学総合科学技術研究機構 特別招聘研究教授
堤 直人	京都工芸繊維大学法人本部 理事・副学長
奥崎 秀典	山梨大学大学院総合研究部 教授
勝山 直哉	山梨大学大学院医工農総合教育部
岡本 敏宏	東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授
尾坂 格	広島大学大学院工学研究科 教授
中村 雅一	奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 教授
森川 響二郎	東京大学大学院工学系研究科 助教
北森 武彦	東京大学大学院工学系研究科 教授
一木 隆範	東京大学大学院工学系研究科 教授/専攻長
竹原 宏明	東京大学大学院工学系研究科 助教
玉田 薫	九州大学先導物質化学研究所 教授
山下 一郎	大阪大学大学院工学研究科 特任教授
内田 勇氣	九州大学大学院総合理工学府
吾郷 浩樹	九州大学グローバルイノベーションセンター 教授
佐藤 信太郎	株式会社富士通研究所デバイス&マテリアル研究センター次世代材料プロジェクト プロジェクト ディレクター

目次

- ◎口 絵
- ◎発刊にあたって
- ◎監修者・編集委員・執筆者一覧

第 1 編 薄膜材料の特性と特徴

第 1 章 薄膜の特性と特徴

第 1 節 薄膜とは	<権田 俊一>…… 5
薄膜の定義と表現／薄膜の歴史／機能をもつ工学薄膜の展開／21 世紀の進展	
第 2 節 薄膜の特徴	<近藤 高志>…… 12
薄膜が選択される理由／薄膜特性の起源	
第 3 節 薄膜の作製方法	<近藤 高志>…… 14
各種の薄膜作製法／気相堆積のプロセス／基板上での薄膜堆積の微視的過程／薄膜の成長様式／エピタキシー	
第 4 節 薄膜の特性と評価	<田畑 仁>…… 22
薄膜とは／薄膜の特性とその評価	
第 5 節 第一原理計算と機械学習による薄膜設計(磁性薄膜系を中心に)	<小口 多美夫／中村 浩次>…… 29
第一原理計算の概要(手法の開発経緯を中心に)／第一原理計算の表面・薄膜系への応用／磁気配置による磁気異方性／第一原理計算の現状と機械学習／第一原理計算と機械学習との組合せによる薄膜設計	

第 2 章 薄膜材料の電気特性

第 1 節 電気伝導	<勝本 信吾>…… 39
電気伝導と測定／古典的電気伝導／薄膜構造の効果／量子伝導／単電子帯電効果	
第 2 節 電流磁気効果	<勝本 信吾>…… 55
磁場と電気伝導／2 次元系における結晶異方性の効果／2 次元系のサイクロトロン運動と関連する伝導現象	
第 3 節 熱電効果	<勝本 信吾>…… 64
熱電効果の線形係数／熱電素子／キャリア分布と熱電係数／薄膜効果／熱電係数の測定	

第4節 ピエゾ抵抗 <勝本 信吾>…… 74

ピエゾ抵抗係数/体積効果とピエゾ抵抗/ダイヤモンド型, 閃亜鉛鉱型結晶のピエゾ抵抗係数/
ピエゾ抵抗テンソルの計算モデル/低次元電子系とピエゾ抵抗効果/細線構造の巨大圧力応答/
圧力印加相転移によるピエゾ抵抗

第3章 薄膜材料の誘電特性

第1節 誘電率・分極 <大見 俊一郎/工藤 聡也>…… 83

誘電体の分類/誘電率/分極/誘電率の交流特性

第2節 圧電効果 <神野 伊策>…… 91

圧電材料/圧電効果と圧電定数/圧電材料の薄膜化

第3節 強誘電体 <喜久田 寿郎>…… 98

強誘電ドメイン構造/ドメインスイッチング/自発分極/強誘電相転移の現象論

第4章 薄膜材料の固液界面特性 <田畑 仁>…… 113

電気二重層(静的固液界面の性質)/電解質溶液論(デバイ長の算出)

第5章 薄膜材料の磁気特性

第1節 磁性薄膜の分類 <宮崎 照宣>…… 119

第2節 軟磁性薄膜 <宮崎 照宣>…… 122

ソフト磁性材料開発のアプローチと開発の経緯/結晶質薄膜/アモルファスおよび微結晶薄膜/
グラニューラー薄膜/複合薄膜

第3節 磁気抵抗効果 <久保田 均/湯浅 新治/宮崎 照宣>…… 130

強磁性金属における異方性磁気抵抗効果/金属人工格子・多層膜における巨大磁気抵抗効果/強
磁性トンネル接合におけるトンネル磁気抵抗効果

第4節 ホイスラー合金薄膜 <桜庭 裕弥>…… 142

ホイスラー合金の構造とスピン分極率/ホイスラー合金単結晶薄膜の作製法/ホイスラー合金薄
膜の原子規則度の評価方法

第6章 薄膜材料の光学特性

第1節 透過・反射 <矢口 裕之>…… 153

薄膜の光学

第2節 吸収 <市野 邦男>…… 164

薄膜における光吸収のメカニズムによる分類/半導体(結晶)における吸収

第3節 発光 <市野 邦男>…… 170

薄膜における発光のメカニズムによる分類/原子, イオンのエネルギー準位に基づく発光/分子
のエネルギー準位に基づく発光/半導体(結晶)のエネルギー準位に基づく発光

第4節 電気光学効果 <山田 実>…… 178

電気光学効果とは／強誘電体材料での屈折率変化の表現／ポッケルス効果／カー効果／フランク・ケルディッシュ効果／量子閉じ込め構造での電界効果／非常に薄い薄膜での電気光学効果／電気光学効果の応用

第5節 磁気光学効果 <内田 裕久／井上 光輝>…… 184

磁気光学効果の基礎／磁気光学材料／磁気光学効果のエンハンスメント／磁気光学効果の観察・測定法／磁気光学効果の応用

第6節 光伝導・光起電力 <金光 義彦>…… 200

光伝導／光起電力

第7章 薄膜材料の力学特性

第1節 応力・ひずみ <佐々木 信也>…… 209

内部応力／内部応力測定法／内部応力の制御

第2節 ヤング率と硬さ <佐々木 信也>…… 214

ナノインデンテーション／AFMによるインデンテーション／レーザ励起表面弾性波法

第3節 密着性 <佐々木 信也>…… 222

密着性と付着力／密着性の評価／密着性の向上

第4節 トライボロジー <佐々木 信也>…… 230

トライボロジーの基礎メカニズム／トライボロジー用途に求められる特性／トライボマテリアルとしてのDLC

第8章 薄膜材料の化学特性

第1節 表面反応 <藤田 大介>…… 239

シリコンの熱酸化／シリコン系の窒化／金属の高温酸化

第2節 光触媒 <工藤 昭彦>…… 247

光触媒とは／半導体光触媒反応の基礎(水分解の場合)／人工光合成光触媒反応／環境浄化型光触媒反応

第3節 腐食性・耐食性 <高井 治>…… 257

腐食性／耐食性

第4節 超はっ水性・超親水性 <高井 治>…… 269

はっ水性・親水性の基礎／はっ水性・親水性薄膜の形成法と応用／超はっ水薄膜表面を利用する3次元立体的細胞培養法の開発／超はっ水/超親水パターン化構造の形成とマイクロ/ナノ集積への応用

第2編 薄膜の作製と加工

第1章 基板と表面処理

第1節 金属基板	<坂入 正敏>…… 281
ステンレス鋼基板／非鉄材料	
第2節 半導体基板(Si, Ge, SiC)	<有馬 健太>…… 290
Si基板の表面処理／Ge基板の表面処理／SiC基板の表面処理	
第3節 絶縁体基板	
1. ガラス基板	<林 和孝>…… 298
ガラス材料の特徴／ガラス基板への要求項目／各種基板ガラスの種類および製造法／ガラス基板の代表的用途	
2. 酸化物単結晶基板	<宮澤 信太郎／望月 圭介>…… 305
異種材料における格子整合度と薄膜成長形態／GaN用酸化物単結晶基板結晶／これからの基板開発	
第4節 プラスチック基板	<西 睦夫>…… 314
プラスチックとは／基板に期待される役割／プラスチック基板の特性と機能／プラスチック基板の開発動向	

第2章 PVD法

第1節 真空蒸着法	<矢口 裕之>…… 325
真空蒸着を行うための真空の必要性／真空蒸着における3つの過程／真空蒸着装置／化合物の真空蒸着	
第2節 分子線エピタキシー法(MBE法)	<朝日 一>…… 330
MBEの原理と特徴／固体ソースMBE装置とMBE成長／ガスソースMBE装置と成長過程／Ⅲ-V族化合物半導体のMBE／Si系半導体のMBE／Ⅱ-VI族化合物半導体のMBE／酸化物半導体のMBE／シリサイド、金属間化合物、絶縁物のMBE／新物質のMBE	
第3節 スパッタ法による薄膜作製技術	<星 陽一>…… 347
スパッタ法による薄膜の堆積過程／薄膜堆積のための各種スパッタ法	
第4節 イオン化蒸着法	<臼井 博明>…… 365
イオンを用いた成膜法／薄膜形成におけるイオンの役割／イオンを用いた薄膜形成	
第5節 レーザ堆積法(レーザアブレーション法)	<松木 伸行／大久保 勇男>…… 372
レーザ堆積の手法開発およびレーザ堆積を用いた新材料創製の歴史概観／レーザ堆積装置の基本構成とその発展／レーザアブレーション過程／研究応用例／情報科学との融合による新材料探索への展開	

第3章 CVD法

第1節 熱CVD法

1. 熱CVD法の原理 <室田 淳一>…… 383
原料ガスの気相中での輸送と表面反応/原料ガスの表面吸着と反応
2. シリコン系半導体膜 <室田 淳一>…… 387
反応雰囲気の高清浄化によるエピタキシャル成長の低温化/Si(100)表面の吸着水素の脱離と成長表面の平坦化/Si(100)上でのSi-Ge系エピタキシャル成長と不純物ドーピング
3. 金属膜 <松永 範昭>…… 392
熱CVD装置の概要/タンゲステン(W)薄膜の形成/熱CVD-TiN成膜/Co薄膜の成膜技術と配線応用
4. 絶縁膜 <国井 泰夫/由上 二郎/芦原 洋司>…… 399
低温CVD系SiO₂系膜/中・高温CVD系SiO₂系膜/中・高温CVD系SiN系膜
5. ポストスケーリング用材料(有機分子を原料とした熱CVD) <大下 祥雄/町田 英明>…… 403
Ge_{1-x}Sn_xおよびMoS₂薄膜堆積/MoS₂薄膜形成

第2節 プラズマCVD法

1. 総論(原理・特徴, 装置) <宮崎 誠一>…… 408
2. シリコン系薄膜 <傍島 靖/伊藤 貴司>…… 412
a-Si:H, μc-Si:Hの膜成長過程/高速製膜の必要性和高速製膜の実際/OES測定による電子温度T_eの推定/高速製膜μc-Si:Hにおける膜内欠陥密度分布
3. カーボン系薄膜・構造体 <平松 美根男>…… 417
ダイヤモンド薄膜の合成には大量の水素原子が必要/カーボンナノチューブやグラフェンの製造には触媒金属が必要/DLC膜の作製にはイオン衝撃が重要
4. 機能性酸化物薄膜(Ti酸化物系) <安藤 康高>…… 422
熱プラズマと低温プラズマ/減圧低温プラズマCVD/大気圧低温プラズマCVD/熱プラズマCVD
5. 有機・バイオ応用膜 <白藤 立>…… 431
プラズマを用いた有機膜

第3節 MOCVD法

1. MOCVD法の原理 <福井 孝志>…… 436
MOCVD用原料/MOCVD装置/結晶成長機構
2. III-V族 <福井 孝志>…… 441
GaAs系/InP系/GaN系/立体構造の選択成長/量子ナノ構造
3. II-VI族および酸化物半導体 <藤田 静雄>…… 445
II-VI族半導体のMOCVD/酸化物半導体のMOCVD/ミストCVD
4. 酸化物(超伝導酸化物・強誘電性酸化物) <吉田 政次>…… 449
超伝導酸化物薄膜/強誘電性酸化物薄膜/強誘電体薄膜のALD

第4節 ALD法

- ALD法の原理/ALD法の原料/最新ALD法の状況 <町田 英明>…… 455

第4章 液相薄膜堆積法

第1節 VLS 薄膜・結晶成長法	＜松本 祐司／丸山 伸伍＞……	463
原理と成長方法／VLS 成長の最近の研究展開		
第2節 超臨界流体薄膜堆積法	＜百瀬 健＞……	470
超臨界流体／製膜原理と均一製膜／埋め込み／デバイス応用／製膜装置		
第3節 塗布法	＜矢野 満明／佐々 誠彦／小池 一步＞……	477
塗布法の概要／酸化亜鉛薄膜／酸化タングステン薄膜		
第4節 インクジェット法	＜西 眞一＞……	484
インクジェット技術の進歩／インクジェット法による薄膜形成技術の特長／エレクトロニクスデバイスへの応用／3D 造形技術への応用／国際標準化の動き／TC-119／今後の展開／新たな基礎研究		
第5節 ゾル-ゲル法による薄膜作製	＜幸塚 広光＞……	495
工程の概要／膜厚について／基材について／薄膜の表面粗さについて／薄膜の多孔性と緻密性について／薄膜の面内応力について／常圧成膜であることについて		
第6節 めっき法	＜渡邊 充広／本間 英夫＞……	505
めっきの基礎／各種機能における代表的なめっき／プラスチックへのめっき／エレクトロニクスにおけるめっき		

第5章 有機・高分子・生体関連薄膜作製法

第1節 ウェット作製プロセス		
1. スピンコート・LB 法	＜都倉 勇貴／白鳥 世明＞……	521
スピンコーティング／LB 法		
2. インクジェット印刷による薄膜作製	＜峯廻 洋美＞……	528
ダブルショット・インクジェット印刷法の概要と薄膜形成例／結晶成長制御による単結晶薄膜の印刷形成		
3. 印刷	＜日下 靖之＞……	533
有版印刷法の概要／反転オフセット印刷／応用例		
第2節 ドライ作製プロセス		
1. 真空蒸着法	＜吉本 則之＞……	540
真空蒸着法の概要／有機薄膜の真空蒸着／アルカリハライド基板上的有機薄膜のエピタキシー		
2. 蒸着重合	＜久保野 敦史／松原 亮介＞……	548
重合機構による蒸着重合法の分類／蒸着重合成膜技術の展開／蒸着重合高分子薄膜の応用		
第3節 ソフトマテリアルの自己組織化		
1. 自己集積化によるチオール系単分子膜形成	＜杉村 博之＞……	554
自己集積化による単分子膜形成／有機硫黄分子の金表面への吸着と SAM 形成／有機 Se 系 SAM／アルカンチオール SAM の赤外線吸収スペクトル		
2. 自己組織化ナノ構造体	＜小木曾 真樹＞……	560
チューブ状自己組織化ナノ構造体(有機ナノチューブ)／チューブ状自己組織化ナノ構造体(金属錯体型有機ナノチューブ)／中空球状自己組織化ナノ構造体(有機ナノカプセル)		

第6章 パターン化技術

第1節 リソグラフィ <上野 巧>…… 567

リソグラフィの動向/KrFエキシマレーザ(248 nm)リソグラフィ/ArFエキシマレーザ(193 nm)リソグラフィ/高解像度化技術/EUV(13.5 nm)リソグラフィ/電子線リソグラフィ

第2節 レジスト <上野 巧>…… 574

リソグラフィの動向とレジスト/KrF(248 nm)リソグラフィ用レジスト/ArF(193 nm)リソグラフィ用レジスト/EUV(extreme ultraviolet: 13.5 nm)リソグラフィ用レジスト/電子線レジスト

第3節 エッチング

1. ウェットエッチングとドライエッチング <下川 房男>…… 581

ウェットエッチング/ドライエッチング

2. 原子層エッチング <篠田 和典>…… 591

原子層エッチングの概要/原子層エッチングの各種手法

第4節 ナノインプリンティング <平井 義彦>…… 599

ナノインプリンティング/熱ナノインプリント/光ナノインプリント/モールド技術/装置・材料・プロセス技術と応用/今後の展開

第7章 薄膜の加工/改質技術

第1節 研磨平坦化(CMP)技術 <近藤 誠一>…… 621

半導体プロセスへのCMP技術の導入/CMPの分類と平坦化の課題/CMP装置と研磨プロセス/CMPスラリー/Cu配線のバリアメタル膜の積層化/メタルCMPにおけるガルバニック腐食の課題

第2節 (再)結晶化アニール技術 <堀田 将>…… 629

(再)結晶化アニール技術の概要/基本技術/レーザによる溶融結晶化技術/固相結晶化技術

第3節 原子層無損傷プラズマエッチング技術 <寒川 誠二>…… 643

プラズマエッチングとは/中性粒子ビーム源とプラズマエッチングにおける紫外線照射効果/22 nm世代以降の縦型フィントランジスタへの応用/無欠陥ナノ構造の作製とその特性/原子層レベル表面化学反応の制御

第4節 レーザ加工・改質 <沖原 伸一郎>…… 653

薄膜加工・改質におけるレーザ加工

第5節 電子線・放射線による加工・改質 <瀬古 典明/植木 悠二>…… 660

電子線のエネルギーと透過力/電子線による材料加工

第6節 ビーム加工 <松井 真二>…… 666

電子ビームリソグラフィ/集束イオンビーム技術/ビーム励起表面反応

第7節 イオン注入 <黒井 隆>…… 678

イオン注入の特徴/イオン注入装置/イオン注入のアプリケーション/イオン注入技術の新しい応用

第8節 SPM加工 <杉村 博之>…… 683

化学反応を介した表面ナノ加工/局所的電気化学反応誘起とSPMナノ加工/可逆的酸化還元ナノ化学変換/単分子膜レジストを用いた走査型プローブリソグラフィ

第3編 薄膜・表面・界面の分析・評価

第1章 薄膜・表面・界面の分析評価法

第1節 電子線	<深谷 有喜>…… 697
電子線の特性/電子線を用いた実験手法	
第2節 イオンビーム	<城戸 義明>…… 705
SIMS/PIXE/RBS/ISS	
第3節 陽電子消滅法	<上殿 明良>…… 727
陽電子消滅の原理/原子層堆積法により GaN 上に形成した Al ₂ O ₃ の評価	
第4節 吸収・反射・発光	<秩父 重英>…… 739
光吸収・光反射/発光/空間分解および時間分解発光計測	
第5節 赤外分光とラマン散乱分光	<石谷 善博>…… 753
赤外分光とラマン散乱分光の物理/赤外分光/ラマン散乱分光	
第6節 放射光を用いた薄膜の電子状態評価	<組頭 広志>…… 761
酸化ナノ構造の放射光解析/酸化ナノ構造材料への応用における課題と課題解決のための実験装置/酸化量子井戸構造を用いた強相関電子の2次元閉じこめ/強相関デバイスにおける表面キャリア注入時の界面電子状態解析	
第7節 薄膜のX線回折	<斎藤 啓介>…… 771
光学系の選択/測定手法	
第8節 光電子分光(XPS, UPS)	<宮崎 誠一/大田 晃生>…… 782
分析手法の分類と歴史/測定原理/内殻光電子信号とスピン軌道相互作用/内殻光電子とオージェ電子の違い/光電子脱出深さ(非弾性平均自由行程)/光電子強度および光電子脱出角依存性/バックグラウンドの発生および除去/プラズモン/組成元素の定量分析/極薄膜の膜厚評価/化学結合状態の決定・定量評価/内殻光電子エネルギー損失スペクトルによる極薄絶縁膜のエネルギーバンドギャップの測定/価電子帯不連続量の決定バンド不連続の測定法/光電子カットオフエネルギーによる仕事関数および電子親和力評価/光電子収率分光法(PYS; total photoelectron yield spectroscopy)	
第9節 走査プローブ顕微鏡	<菅原 康弘>…… 796
STMの動作原理/STMの観察例: Si(111)7×7再構成表面/AFMの動作原理/AFMの動作方式	

第2章 薄膜分析・評価対象各論

第1節 膜厚分析

1. 原子間力顕微鏡(AFM)	<中島 秀郎/粉川 良平>…… 805
原理/測定法/AFMの発展・展開	
2. 白色干渉法	<小野田 有吾/柳川 香織>…… 809
白色干渉法の原理/層断面解析の測定例	

3. レーザ走査型顕微鏡	<藤井 岳直>…… 813
薄膜への応用/LSMの最新技術	
4. SEM/TEMによる膜厚測定	<保田 英洋>…… 818
FIB-SEM複合機による断面試料作製方法と膜厚測定	
5. X線光電子分光法, X線反射率法	<東 康史>…… 824
原理/測定法の特徴, 注意点	
第2節 組成分析	<田中 彰博/大川 登志郎/大岩 烈>…… 828
薄膜・表面・界面の分析と Lambert-Beer の法則(散乱断面積)/特性 X 線や単色化 X 線による励起と定性分析(想定外 X 線による励起の問題)/XPS の定量分析(励起断面積・放出方位分布・マトリクス効果・検出器・計数機)/X 線・電子線による内殻励起と定性分析/イオンによる励起と定性分析/オージェ電子分光法の定量分析/その他の手法(ESD, PSD, SIMS, SNMS, ISS, RBS)/膜構造測定と深さ方向分析(Sputter Depth Profiling と Thickogram)/極薄表面構造の解析と HAXPES による界面計測の拡張	
第3節 形態分析(粒子ビームを用いた分析)	<梅澤 憲司/本多 信一>…… 851
オージェ電子分光法(AES: Auger Electron Spectroscopy)/低速イオン散乱分光法(LEIS: Low Energy Ion Beam Scattering)/低速原子散乱分光法(LEAS: Low Energy Atom Scattering Spectroscopy)/透過電子顕微鏡(TEM: Transmission Electron Microscope)/走査電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)	
第4節 結晶性(RHEED法を中心として)	<深谷 有喜>…… 858
RHEED の特徴/RHEED パターンから得られる情報/RHEED 強度から得られる情報	
第5節 化学結合状態	<宮崎 誠一>…… 867
特性 X 線, 蛍光 X 線, X 線吸収を利用する分析/入射電子線の非弾性散乱を利用した化学結合状態分析/電子放出を利用した化学結合状態分析/化学結合・格子における固有振動(フォノン)による状態分析	
第6節 薄膜の機械的特性評価	<佐々木 信也>…… 875
トライボロジー特性の評価/トライボロジー特性の評価試験機/留意すべきこと	
第7節 薄膜の表面・界面制御と信頼性	<吉信 淳>…… 883
原子スケールで制御された薄膜における表面界面制御とその評価	
第8節 電気化学特性	
1. 薄膜材料の電気化学測定	<桑畑 進>…… 889
電気化学反応の基礎/電気化学計測/サイクリックボルタンメトリー/薄膜のサイクリックボルタンメトリー(可逆系)/薄膜のサイクリックボルタンメトリー(非可逆系)/サイクリックボルタンメトリーへの電気二重層容量の影響/電気化学的活性を有する薄膜の電気化学的分析法の実例	
2. 単分子膜・薄膜材料の電気化学特性と分子レベル構造解析	<吉本 惣一郎>…… 898
自己組織化単分子膜/金属錯体の電気化学挙動	

第4編 薄膜技術の応用と展望

第1章 電子デバイス

第1節 LSI

1. MOSFET 用薄膜と展望	<最上 徹>…… 913
MOSFET 用薄膜とデバイススケーリング則/MOSFET 構造の進化/MOSFET 用シリサイド膜と LSI 用金属膜/技術展望	
2. ゲート絶縁膜	<鳥海 明>…… 918
先端 Si-CMOS/ゲートスタック形成プロセス/HK ゲートスタックの特徴的振る舞い/Non-Si FET/今後の展開	
3. MOS チャンネル用新材料	<高木 信一>…… 924
新 MOS チャンネル材料の必要性/SiGe/Ge/GeSn/III-V 族化合物半導体/2 次元材料	
4. メモリセル用薄膜: DRAM キャパシタ用薄膜	<稗田 克彦>…… 930
DRAM の基本動作原理/メモリセル構造の変遷: リーク電流の低減と蓄積容量(C_s)の確保/キャパシタ材料とキャパシタ薄膜作製プロセス/Gb 世代における高誘電体キャパシタ絶縁膜の作製プロセスとその課題/1X nm, 1Y nm, 1Z nm 世代における DRAM キャパシタの技術動向とその課題/塗布法を用いた抵抗変化素子の作製	
5. 3 次元フラッシュメモリ用薄膜	<三谷 祐一郎>…… 940
トンネル膜/電荷蓄積層膜(チャージトラップ膜)/ポリシリコンチャンネル/今後の課題	
6. FeRAM 用キャパシタ薄膜: PZT 系	<山川 晃司>…… 944
FeRAM の動作原理/強誘電体キャパシタ材料と FeRAM の作製プロセス/FeRAM 用キャパシタの課題と動向	
7. MRAM 用強磁性トンネル接合薄膜	<斉藤 好昭>…… 948
MRAM のセル構造と動作原理/MTJ 膜構造/薄膜作製装置と作製プロセス/今後の展望と課題	
8. 相変化メモリ	<高浦 則克>…… 955
相変化メモリの動作原理/相変化材料の成膜技術/相変化メモリのメモリセル構造/相変化メモリの動向と課題	
9. 不揮発性メモリおよび人工知能用 ReRAM	<秋永 広幸/島 久/内藤 泰久>…… 962
ReRAM の動作原理とメモリ動作の特徴/不揮発性アナログ抵抗変化素子としての応用/まとめ: 成膜技術開発の必要性	
10. SOI	<小椋 厚志>…… 968
SOI 基板の製造方法/SOI デバイス	

第2節 化合物電子デバイス

1. 高電子移動度トランジスタ(HEMT)	<原 直紀>…… 975
素子構造と動作原理/HEMT の高性能化/HEMT の応用例	
2. ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)	<本城 和彦>…… 980
動作原理/薄膜半導体中の電子走行時間/実際のデバイス構造/HBT の回路応用	

第3節 パワーデバイス

1. シリコンパワー素子	<大村 一郎>…… 988
低圧パワー MOSFET/高圧パワー MOSFET/IGBT/シリコンパワー素子の今後について	
2. 炭化ケイ素(SiC)パワーデバイス	<木本 恒暢>…… 992
SiC 半導体材料/SiC パワーデバイスの特徴/SiC パワーダイオード/SiC パワースイッチングデバイス	
3. ガリウムナイトライド(GaN)	<葛原 正明>…… 1000
AlGaN/GaN HEMTの動作原理とノーマリーオフ動作/AlGaN/GaN HEMTの高耐圧化/縦型 GaN トランジスタへの期待と課題	
4. ダイヤモンド	<牧野 俊晴>…… 1005
ダイヤモンドの材料物性/高濃度不純物ドーピングによる n 型・p 型伝導制御/ショットキー pn ダイオード/反転層型 MOSFET	
5. 酸化ガリウム	<藤田 静雄>…… 1011
酸化ガリウムの特徴/ β 型酸化ガリウムを用いたデバイス/ α 型酸化ガリウムを用いたデバイス/その他の結晶形を用いたデバイス	

第4節 量子効果デバイス

1. SQUID	<田中 三郎>…… 1014
動作原理/FLL 回路/LTS-SQUID と HTS-SQUID/感 度	
2. 超伝導量子集積素子	<日高 睦夫>…… 1020
超伝導体の巨視的量子効果/デジタル回路/量子アニーリング回路/ゲート方式量子コンピュータ	
3. ダイヤモンド量子センサ	<波多野 睦子>…… 1024
NV センタの電子スピンの特徴と高感度センサの原理/NV センタの形成方法/高感度な計測とその応用例	
4. スピントルク発振素子	<久保田 均>…… 1032
スピントルクが誘起する磁化の発振/種々のタイプのスピントルク発振素子/スピントルク発振素子の応用	

第2章 光部品

第1節 光学多層膜光部品

1. 反射防止膜	<國分 崇生>…… 1045
光学薄膜の特性計算/単層反射防止膜/2層反射防止膜/3層反射防止膜/4層反射防止膜/等価膜と多層反射防止膜/超低屈折率材料の出現と反射防止膜	
2. ミラーおよびフィルタ	<國分 崇生>…… 1051
反射増強膜(ミラー類)/波長分割膜(フィルタ類)/光路・光量分割膜(ビームスプリッター類)/その他の光学薄膜	
3. 光学薄膜の評価方法	<國分 崇生>…… 1057
光学特性の測定と評価/レーザ耐久性の測定	

第2節 光導波路デバイス

1. 石英系光導波路デバイス <高橋 浩>……1062
 石英系光導波路の作製方法と伝搬特性/AWG 波長合成分波器/光スイッチ/コヒーレント検波回路
2. 有機光導波路デバイス(高速光変調に向けて) <横山 士吉>……1067
 EO ポリマー光導波路変調器/EO ポリマー/高性能 EO ポリマー変調器/ハイブリッド EO 変調器による 100 Gbit/s OOK
3. シリコンフォトニクス <堀川 剛/志村 大輔/鄭 錫煥/岡山 秀彰/最上 徹>……1074
 シリコンフォトニクス素子の構造と性能/技術展望

第3節 発光ダイオード

1. 発光ダイオード <伴 雄三郎>……1079
 基本構造および発光原理/発光出力(発光効率)/発光波長/作製方法/代表的な各種 LED/その他特殊 LED
2. 深紫外発光ダイオード <平山 秀樹>……1088
 深紫外発光ダイオード(LED)とは/深紫外 LED の応用分野と現状/深紫外 LED の開発の経緯と効率の向上/光取り出し効率の向上と今後の展望

第4節 半導体レーザ

1. ダブルヘテロレーザ <宮本 智之>……1093
 ダブルヘテロレーザとは/半導体レーザの歴史/キャリア注入/発光・光増幅および発振/ダブルヘテロレーザの構造/光閉じ込め構造/ダブルヘテロ構造の役割/半導体レーザの材料と波長帯, 薄膜製作/半導体レーザの特性
2. 面発光レーザ <宮本 智之>……1100
 面発光レーザとは/面発光レーザの基本構成・基本特性/面発光レーザの応用領域
3. 量子ドットレーザ <西 研一/武政 敬三/菅原 充>……1106
 半導体量子ドットの作製および材料特性/量子ドットを活性層とする半導体レーザ
4. フォトニック結晶レーザ(高ビーム品質・高出力) <De Zoysa Menaka /吉田 昌宏/石崎 賢司/野田 進>……1113
 重格子フォトニック結晶共振器構造/重格子フォトニック結晶レーザの作製/重格子フォトニック結晶レーザの特性評価

第5節 半導体受光デバイス

光電変換/フォトダイオード/暗電流/ノイズ/解像度

第6節 イメージセンサ

イメージセンサの基本構造と光学系/イメージセンサの動作原理および方式/イメージセンサの性能と技術動向

第7節 透明導電膜

1. 透明導電膜(ITO を中心に) <太田 裕道/細野 秀雄>……1133
 電気伝導機構/低抵抗化へのチャレンジ/アモルファス ITO 薄膜/超平たん ITO 薄膜
2. アモルファス酸化物半導体: a-In-Ga-Zn-O <井手 啓介/片瀬 貴義/野村 研二/雲見 日出也/細野 秀雄/神谷 利夫>……1138
 アモルファス酸化物半導体の歴史とその特徴/高移動度の起源: 電子構造/動作不安定性/a-IGZO 中の欠陥種/製膜条件・アニールの効果

第3章 ディスプレイ

第1節 LCD

1. センサ内蔵 LCD <中村 卓>…… 1147
はじめに(TFT-LCD)/多機能化(センサ内蔵 LCD)
2. アモルファス Si TFT <小林 大士>…… 1155
アモルファス Si TFT の構造/アモルファス Si TFT の製造工程
3. 低温多結晶 Si TFT <平松 雅人>…… 1162
エキシマレーザアニールプロセス/その他の結晶化プロセス/レーザ結晶化 poly-Si TFT の問題点/量産を見据えた poly-Si TFT の進化像
4. 酸化物半導体 TFT を用いた平面ディスプレイ <雲見 日出也>…… 1167
平面ディスプレイ用 TFT の技術課題/酸化物半導体 TFT の歴史, 特徴と応用/酸化物半導体 TFT が駆動する平面ディスプレイの研究開発

第2節 薄膜 EL ディスプレイ

1. 無機 EL <大観 光徳>…… 1172
無機薄膜 EL 素子の動作原理と素子構造/薄膜 EL ディスプレイの硫化物発光層材料と薄膜作製方法/薄膜発光層/厚膜絶縁層ハイブリッド型 EL 素子
2. 有機 EL <清水 貴央>…… 1178
有機 EL ディスプレイの特徴/画素駆動用トランジスタ/有機 EL デバイス/フレキシブル有機 EL ディスプレイ/フレキシブル有機 EL ディスプレイの課題

第3節 PDP

<北川 雅俊>…… 1183

PDP の構造と原理/PDP の実際と課題/構成する材料と薄膜/PDP の進化と薄膜技術

第4章 記 録

第1節 HDD

<高岸 雅幸/前田 知幸>…… 1195

記録・再生ヘッド用薄膜磁性材料/磁気記録媒体

第2節 記録型光ディスク

<宮川 直康>…… 1201

書き換え型光ディスク/追記型光ディスク/今後の展望とまとめ

第3節 薄膜テープ

<立花 淳一>…… 1209

蒸着テープ/スパッタテープ

第4節 磁気抵抗効果メモリ

1. 不揮発性メモリ STT-MRAM <湯浅 新治>…… 1216
磁気トンネル接合 MTJ と不揮発性メモリ MRAM/スピン移行トルクと STT-MRAM/面内磁化 STT-MRAM と垂直磁化 STT-MRAM
2. VT(voltage torque)-MRAM <野崎 隆行>…… 1222
VCMA 効果の概要/VCMA 効果を利用した磁化反転制御法/VT-MRAM 実現に向けた課題

3. SOT-MRAM および voltage-control spintronics memory(面内磁化方式の MTJ 素子を用いて)

＜與田 博明／大沢 裕一／加藤 侑志／下村 尚治＞…… 1228

スピントロニクス物理による書き込みエネルギー低減／スピントロニクスメモリの応用例

4. SOT-MRAM

＜深見 俊輔／林 将光＞…… 1235

5. レーストラックメモリ

＜林 将光＞…… 1238

第5章 センサ

第1節 薄膜ガスセンサ

＜島ノ江 憲剛／渡邊 賢／末松 昂一＞…… 1243

半導体ガスセンサ／固体電解質ガスセンサ／薄膜ガスセンサの今後の展開

第2節 力学センサ

＜年吉 洋＞…… 1250

静電容量センサの原理／静電容量検出機構の構成例／静電駆動力による零位法／薄膜プロセスによる可変容量の製法／加速度センサ／シリコン・マイクロフォン／ジャイロスコープ／集積化 MEMS 技術

第3節 磁気センサ

1. 磁気記録再生ヘッド

＜中谷 友也／湯浅 新治＞…… 1260

再生ヘッドの概要／サイドシールド構造／TMR センサ／CPP-GMR センサ／新規再生ヘッド構造

2. TMR 磁気センサ

＜安藤 康夫＞…… 1267

磁気抵抗素子を用いた高感度磁気センサ／TMR センサの非破壊検査応用／TMR センサの多様な応用

3. TMR を用いた心磁、脳磁センサ

＜安藤 康夫＞…… 1273

強磁性トンネル磁気抵抗効果(TMR)素子センサ／TMR 素子による心磁図測定／TMR 素子による脳磁図測定／TMR 高感度生体磁気センサの将来展望

第4節 赤外線センサ

＜石田 謙司＞…… 1279

赤外線の放射とスペクトル／赤外線センサの種類と材料／赤外線センサの性能評価指数／赤外線センサ利用における周辺薄膜技術

第5節 においセンサ

＜荒川 貴博／三林 浩二＞…… 1286

におい計測のための生化学式ガスセンサ「バイオスニファ」／生体由来のにおい成分計測用センサ／においの可視化計測技術

第6節 味覚センサ

＜都甲 潔＞…… 1296

味覚センサの原理／基本味応答／食品の味

第7節 バイオセンサ

＜民谷 栄一＞…… 1302

バイオセンサ開発の変遷／ナノテクノロジーとバイオセンサ／マイクロ流体デバイスとバイオセンサ／遺伝子センサの開発動向／バイオセンサの実用化への展開／IoT と連携するバイオセンサ／今後の展開

第8節 フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクス

＜関谷 毅＞…… 1313

背景と目的／フレキシブルエレクトロニクス／フレキシブルエレクトロニクスの具体的事例／ストレッチャブルエレクトロニクス／課題と将来展望

第6章 環境・エネルギー

第1節 シリコン太陽電池	<吉河 訓太>…… 1323
シリコン太陽電池について/高効率化に必要な要素/結晶シリコン太陽電池(PERC)/薄膜シリコン太陽電池/ヘテロ接合太陽電池/さらなる高効率に向けて	
第2節 CIS系薄膜太陽電池	<榎屋 勝巳>…… 1330
CIS系薄膜太陽電池技術の歴史的経緯/CIS系薄膜太陽電池技術の目指す方向性	
第3節 色素増感太陽電池	<荒川 裕則>…… 1338
色素増感太陽電池の基本構造とその作製法/色素増感太陽電池の性能/高性能化への課題/環境発電デバイスとしての実用化	
第4節 有機無機ペロブスカイト太陽電池	<池上 和志>…… 1348
ペロブスカイト太陽電池の基本的構造/ペロブスカイト太陽電池の特徴/ペロブスカイト太陽電池の層構成とペロブスカイト層の製膜/プラスチック基板に作る太陽電池の作製/ペロブスカイトモジュール製造に向けた薄膜作製法の開発	
第5節 人工光合成(水の分解による水素製造)	<阿部 竜>…… 1357
研究の歴史/太陽光水素製造の実用化に向けて:可視光利用の必然性と難しさ/植物の光合成を模倣した2段階可視光励起型水分解/新規可視光応答型酸ハロゲン化物系半導体	
第6節 二次電池	<桑田 直明>…… 1365
薄膜電池の構造/リチウムイオン電池の原理/薄膜電池の実用化/正極薄膜/固体電解質薄膜/負極薄膜	
第7節 燃料電池	<西村 靖雄>…… 1372
燃料電池の原理と基本構成/燃料電池の種類と特徴/補機(周辺機器類)の仕様の共通化,小型システム開発,新たな補機導入などの効果/解析・評価技術/成果や共通の技術課題などの共有化	
第8節 ゼオライト分離膜	<松方 正彦/酒井 求>…… 1379
ゼオライトの構造的特徴/ゼオライトの薄膜化/有機溶剤脱水プロセス/化学産業におけるゼオライト膜の開発展開	

第7章 有機・バイオデバイス

第1節 有機発光素子(有機薄膜導波路固体レーザ)	<安達 千波矢>…… 1389
有機薄膜固体レーザの歴史/レーザ活性材料/レーザ発振特性/電流励起有機半導体レーザ	
第2節 π共役高分子薄膜	
1. 階層制御ポリマー	<赤木 和夫>…… 1397
ヘリカルポリアセチレン/ヘリカルポリアセチレンの形態制御/ヘリカルポリアセチレンの炭素化・グラファイト化	
2. フォトリフラクティブポリマー	<堤 直人>…… 1402
フォトリフラクティブ現象および機構/フォトリフラクティブ材料/フォトリフラクティブ複合体/ESRとPYSから見たフォトリフラクティブ性/研究の応用と今後の展開	
3. 導電性高分子	<奥崎 秀典/勝山 直哉>…… 1410
電気・光学特性/フィルムスピーカーへの応用	

第3節 有機半導体トランジスタ

1. 低分子系半導体 <岡本 敏宏>……1414
無機半導体と有機半導体の違い／有機半導体における伝導機構／産業応用を指向した高移動度を有する有機半導体材料のための分子設計指針／まとめと今後の展望
2. π 共役高分子 <尾坂 格>……1419
ポリチオフェン系材料／ドナー・アクセプタ型高分子半導体
3. デバイス構造とキャリア移動度の支配要因 <中村 雅一>……1424
有機半導体トランジスタの構造／分子軌道とキャリア輸送バンド／有機半導体におけるキャリア輸送機構と移動度／その他の特性支配要因

第4節 バイオデバイス

1. マイクロ・拡張ナノ化学デバイス <森川 響二郎／北森 武彦>……1428
マイクロ・拡張ナノ化学デバイスの作製法／主なマイクロ・拡張ナノ化学デバイス
2. 次世代診断デバイスの表面処理技術 <一木 隆範／竹原 宏明>……1433
miRNA 診断デバイスの表面処理技術／エクソソーム分析デバイスの表面処理技術
3. プラズモンバイオセンサ <玉田 薫>……1438
伝搬型プラズモンセンサ／局在型プラズモンセンサ
4. バイオナノプロセス：バイオ分子応用ナノ構造作製 <山下 一郎>……1444
はじめに：バイオとナノテクノロジー／タンパク質とデバイス表面／デバイス応用：特定材料面へのナノ粒子内包生体分子配置／2次元配列の応用

第8章 2次元材料・デバイス

- 第1節 グラフェンをはじめとする2次元材料の合成法 <内田 勇気／吾郷 浩樹>……1455
2次元材料の作製法／グラフェンのCVD成長／グラフェンの単結晶化に向けた取り組み／TMDCのCVD成長／h-BNのCVD成長／ヘテロ構造の作製
- 第2節 グラフェンのデバイス応用 <佐藤 信太郎>……1462
グラフェンのトランジスタ応用／グラフェンの配線応用／グラフェンのセンサ応用

- ◎キーワード索引
- ◎評価方法と評価対象一覧
- ◎略語一覧

※本書に記載されている会社名、製品名、サービス名は各社の登録商標または商標です。なお、必ずしも商標表示(®、TM)を付記していません。

第1編

薄膜材料の特性と特徴

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

第1章

薄膜の特性と特徴

第1節	薄膜とは	5
第2節	薄膜の特徴	12
第3節	薄膜の作製方法	14
第4節	薄膜の特性と評価	22
第5節	第一原理計算と機械学習による薄膜設計 (磁性薄膜系を中心に)	29

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

第1節

薄膜とは

1. 薄膜の定義と表現

薄膜とは、文字どおり薄い膜のことで、物質の形態の1つである。薄さの尺度は、薄い方は1原子層から、厚い方はややあいまいで1 μm から10 μm くらいまでの幅がある。これ以上の厚さの場合は厚膜という場合もある。これは形状による膜厚を用いた薄膜の定義であるが、ほかに質量膜厚、物性膜厚などの表現も用いられる¹⁾。物性膜厚には、電気的特性を反映した電気的膜厚や、形状膜厚に構成材料の屈折率を乗じた光学膜厚などがある。

薄膜が存在する形態としては、それ自身が単独に存在する(いわゆる自由空間に浮いている—free standing—自立膜)場合と、薄膜が基板上に存在する場合がある。存在形態は並行平板のものが多く、ほかの形態もいろいろある。形態は基板の形状によって決まることが多いが、厚さに分布をもたせたものもあり、電子デバイスで行われているように深い穴状の内部に薄膜をつける場合もある。そのほか、球状のものや、装飾品のような複雑な形状のものに薄膜を形成するなど種々のケースがある。

薄膜に用いる材料には指定はない。さまざまな元素、さまざまな原子分子、さまざまな材料が薄膜に用いられる。したがって、薄膜の呼び方は材料の名をつけて呼ぶことも多い。例えば、無機薄膜、ダイヤモンド薄膜、シリコン薄膜、有機薄膜、高分子薄膜など。名前はこのほか、その薄膜に期待される特性に関連してつけられる場合も多い。例えば、半導体薄膜、導電膜、絶縁膜、超伝導薄膜のように電気特性に、磁性薄膜のように磁気特性に、はっ水膜、親水膜のように表面状態に関係した呼び方など、さまざまである。

材料の構造、原子の並び方についても種々のものがある。原子の並び方では、単結晶、多結晶、非晶質(アモルファス)などいろいろなのものがつくられている。基板の結晶方位と全く無関係な方位をもつ

薄膜をレオタキシャル膜、基板の方位を受け継いだ方位をもつ薄膜をエピタキシャル膜と呼ぶ。

1つの薄膜中では、材料・物質は1種類であることが多いが、堆積中のある位置から組成を急に変えることもよく行われる。多層膜、半導体超格子、人工格子などはこのような構造のものをいう。1つの薄膜中で徐々に組成を変えたものも作製される。これは半導体では結晶基板上に格子定数の違う薄膜結晶を成長させる場合によく行われているが、新しい機能の発現を意図する場合もあり、これには傾斜機能材料という呼び方も用いられている。

2. 薄膜の歴史

薄膜の歴史について、ここでは金原繁先生にならい²⁾、3つの時代に分けて考えてみよう。最初は「装飾としての薄膜」の時代、次は「自然現象としての薄膜」の時代、そして「機能を持った薄膜」の時代である。時代が変わると前の時代のものがなくなるわけではなく、それは受け継がれながら、新しいものが入ってくる。例えば、装飾としての薄膜は現代でもしっかりと使われている。別の表現を使えば、装飾の時代、科学の時代、工学の時代となる。現代はこれらがすべて混じった時代である。歴史事象については文献1)に詳しい。

まずは「装飾としての薄膜」の時代。この時代は紀元前2~3世紀から16世紀くらいまでである。紀元前2~3世紀には、指輪や首飾りの装飾に金の薄膜が使われていたが、この作製法の1つは電池を用いた電気化学的なめっき法だったようだ。図1に1932年にメソポタミアで発見されたバグダッド電池の概要を示す³⁾。高さ10 cmほどの粘土の壺の中に、底のある銅の円筒があり、その中に鉄の棒を固定し、アスファルトで口をふさいである。銅の円筒の中の電解質はなくなっていて、何が入っていたかは不明であるが、ワインや酢を入れると電圧0.4~0.8 Vで電流が流れたという。この時代に電気化学

第1編 薄膜材料の特性と特徴

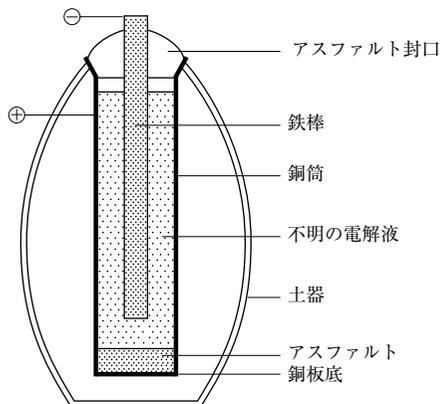


図1 紀元前 2~3 世紀のバグダッド電池³⁾

反応による薄膜の作製という一見近代的な方法が使われていたのは興味深い。

金めっきのほかの方法としては金アマルガムを銅材などに塗布して加熱し、水銀を蒸発させて金の薄膜にするという方法がある。この方法は飛鳥寺や東大寺の大仏に使われたという。

また金や銀をたたいて伸ばし(延伸法)、厚さ 0.5 μm 以下 (0.1 μm 以下も作製可能) の金箔や銀箔にし、これを接着剤で板状のものに張りつけるという方法がある。これはまず自立膜を作り、次に基板上につけるもので、やや特殊な作製法である。この方法は中国大陸で行われ、日本に伝えられて奈良時代末期ころに定着したのではなかといわれている。金箔は金閣寺壁面などに使われた。古くは、図2⁴⁾に示すように、手打ちで伸ばしたが、現在はロール圧延機で延ばしたり(延べ金)、打ち機で延ばす(澄打ち)方法が用いられている。このほか、原材料を水に溶かして基板に塗布する方法も古くから使われ



図2 金箔作製(手打ち時代の絵図)⁴⁾

た。装飾としての薄膜はもちろん現在も盛んで、その後開発されたほかの材料、ほかの薄膜作製方法も用いられている。

次は「自然現象としての薄膜」の時代で、17~19世紀前半くらいまでの期間である。この時代は天然・自然の薄膜が研究対象となった。例えば、薄く劈開した雲母などである。薄膜の色が膜の厚さに関係するというのは Hooke や Newton が予想していたが、膜の厚さを正確に決めることが当時は困難であった。Newton は図3(1)に示すように、突レンズを平板ガラス上に置いたときに中心近くに見える薄い空気膜に注目してこの問題を克服し、色の原因を究明した⁵⁾。図3(2)は、レンズの上から見られるいわゆるニュートン環である。それは光の本性の中に周期的なものがあることを示すもので、19世紀初めの光の波動論の確立に大きな役割を果たした。

3つ目が「機能をもつ薄膜」の時代で、19世紀中ごろから現代に至っている。薄膜作製に関する諸現象が発見されたのも19世紀後半である。スパッタリング現象に関する諸現象の発見や観察、Wright による薄膜作製への応用⁶⁾も1850~70年代にかけてなされているし、真空蒸着の現象の発見や応用⁷⁾も1880年代までになされている。Mond らによる CVD を用いた薄膜の作製は1890年に報告⁸⁾されているから、主要な作製法の原型は19世紀にできていたといえよう。

20世紀に入ってからは、応用と結びついて作製法が開発・改善され、それがまた新しい応用につながっていった。これらについては次の項で述べよう。

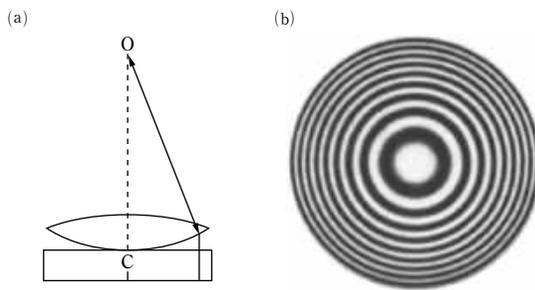


図3 ニュートンの(a)空気層薄膜と(b)ニュートン環

3. 機能をもつ工学薄膜の展開

19世紀から薄膜の展開を引っ張ったのは、光学薄膜である。反射防止膜は19世紀なかばころから用いられた。研磨後のレンズ表面を処理して反射を減らす最初の試みは、1817年にFraunhoferによって行われた。彼はガラスを強い酸に浸して表面に薄膜を作る方法を考え出した。この目的のための化学処理による薄膜作製は1930年ころまで行われたが、油拡散ポンプが開発され真空蒸着が使えるようになると、真空蒸着がそれに取って代わった⁹⁾。1934年には水晶の上にKBrなどを蒸着してその光学的性質が調べられ、またガラスの上にZnSを蒸着して半透鏡が作られている。これはその後低屈折率のMgF₂と組み合わせ多層膜として広く使われるようになった。多層薄膜の光学的特性の計算法も確立された。薄膜はレンズやミラーといった光学製品には欠かせないものになっている。

作製法は真空蒸着法が主であるが、スパッタリングやイオンアシスト法も適宜使用されている。多層薄膜作製法や膜厚制御法が開発・改善され、多数の光学薄膜作製のため、その量産技術も進歩している(現在の状況は、本書第4編2章「光部品」参照)。

薄膜作製技術の進展とともに、薄膜形成機構の研究も進展した。1930年代から40年代にかけて、薄膜形成過程のモデルとして、島状成長(Volmer-Weber)モデル、単層成長(Frank-van der Merwe)モデル、単層上島状(SK; Stranski-Krastanov)モデルという3つのモデルが実験観測と対応づけられている。SKモデルでの成長は現在量子ドットの作製法として活用されている。

薄膜作製の1つにエピタキシー(epitaxy)がある。epiはonを意味し、taxyはarrange, orderを意味する。つまりエピタキシーは適当な方位をもつ単結晶基板の上に結晶軸をそろえて結晶を成長させることを意味している。この名がつけられてのは、1928年だが、実際にこの作製法が活用されるようになったのは電子デバイス、光デバイスで必要にされるようになってからである。

基材に、耐食、耐熱、耐摩耗、耐酸化といった表面改質を行うためにも、薄膜技術が使われる。真空を利用する作製技術では、スパッタリング法、イオン注入法、イオン化蒸着法(イオンプレーティング

法)など、比較的高いエネルギーをもった粒子を基板に入射させるものが多い。イオン注入は半導体への試みが1952年に行われている¹⁰⁾が、そのほかの材料に対しても耐食性の向上などを目的として利用され、技術が進展している。インプレーティングは直流放電を利用した方法がMattoxにより1964年に開発された¹¹⁾。その後、高周波コイルを用いたいわゆる高周波イオンプレーティングがMurayamaにより1974年に開発された。これらは表面改質技術に広く使われているが、その他電子技術、材料創成などそれ以外の応用にも広く利用されている。

電子デバイス、特に半導体デバイスでは、薄膜技術を多様に使いこなしている。トランジスタの発明後、個別素子の接合構造の作製法としては、初めは単結晶引き上げの途中でドーパントを追加する方法や合金法が用いられたが、その後基板の一部にほかの元素を入れる拡散という手法が用いられるようになった。Kirbyの集積回路の試作やNoissのプレーナ集積回路の開発により、多数のトランジスタを1枚の基板に組み込んだデバイスが作られるようになった。その一例を図4に示す¹²⁾。ゲートとチャネルの間や、素子間分離に使われるシリコン酸化膜(SiO₂)は、性能・構造の点で願ってもない相手であるが、これはFroschにより1957年に報告されている¹³⁾。表面パッシベーションや絶縁のためにはSiO₂のほかSi₃N₄が使われ、これらの作製にはCVDやプラズマCVDが用いられる。多結晶SiはMOSデバイスのゲート電極材料などに、金属薄膜(Alなど)は電極や配線のために用いられる。これらの作製のために、真空蒸着、スパッタ、部分的に異種元素(ドーパント)を導入するためのイオン注入など、さまざまな薄膜作製手法が用いられるようになった(現在の状況は、本書第4編1章「電子デバイス」参照)。

光デバイス、特に半導体発光デバイスでは、化合物半導体は不可欠の材料であるが、この開発のためには、薄膜結晶成長技術のエピタキシー技術の発展が大きな役割を演じた。半導体レーザを例にとると、このデバイスはpn接合を用いて光を出すのが、開発当初の1962年から数年は接合の作製に拡散が使われた。しかし、これでは室温でのレーザ発振は不可能であった。Nelsonは今日、Nelson法と呼ばれる液相エピタキシー法(LPE)を開発し、接合部の結晶品質を高めた¹⁴⁾。LPEはさらに改善され、材料

第1編 薄膜材料の特性と特徴

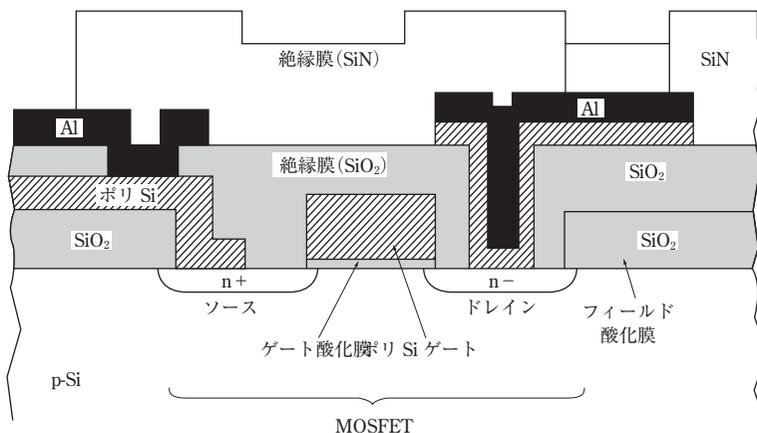


図4 MOSFETの断面構造の模式図¹²⁾

も GaAs と AlGaAs という格子定数がほぼ同じであるペアにも恵まれ、良質のヘテロ接合の作製が可能になった。このため、1970年には Alferov や Hayashi ら¹⁵⁾により室温連続発振が達成された。このレーザは寿命が短かったため、その後も長寿命化のため、多大な努力が続けられた。この努力の多くはエピタキシャル技術という薄膜作製技術の改良に向けられ、数年かかって寿命1万時間が達成された。液相エピタキシーは当時は重要な成長法であったが、近年はほかの成長法に押されてほとんど使われなくなっている。歴史的観点から図5にLPE装置の図を載せておこう¹⁶⁾。1970年ころ Arthur¹⁷⁾や Cho によって始められた分子線エピタキシー(MBE)技術はその後成熟し、量子井戸レーザが作られた。Manasevit ら¹⁸⁾により始められた有機金属化学気相エピタキシー(MOVPE)は量産性に優れているため、レーザやほかのデバイスの量産装置として活用されている。また、青色半導体発光素子の材料 GaN 系の単結晶薄膜成長は MOVPE がなければ実現できないものであった。このように、半導体レーザの進歩には薄膜成長技術がそのカギを握ったのである。

その後、量子デバイスのように、局所的にごく微小の面積に薄膜を堆積する必要性が高まってきた。Eigler が走査トンネル顕微鏡 (STM) を用い、低温に保った Ni 表面上に Xe 原子を置いて文字を書いた研究¹⁹⁾をきっかけに、STM や原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた堆積法が行われるようになった(現在の状況は、本書第4編2章「光部品」参照)。

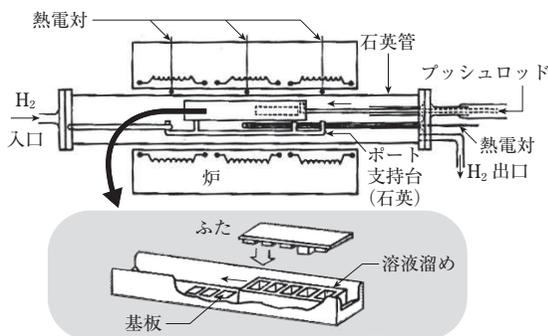


図5 液相エピタキシャル装置¹⁶⁾

ディスプレイは、人間と機械の接点(マン・マシン・インターフェイス)を視覚とするとき、なくてはならない重要な装置である。ディスプレイには、発光現象を利用するアクティブ・ディスプレイと、周囲または別の光源からの光反射、あるいは光透過を利用したパッシブ・ディスプレイがある。前者の代表的なものはブラウン管だろう。図6に示すように²⁰⁾、ガラス管の片方の端面を大きな平面にしてマトリクス状に蛍光体をつけ、内部は真空にしよう片方の端で電子を発生し、蛍光面に衝突させて発光させるというもの。奥行きが長く、重量も大きくなりやすい。パッシブ・ディスプレイの代表的なものは液晶ディスプレイ (LCD : liquid crystal display) だろう。液晶は文字どおり液体と結晶の状態を合わせもつ物質である。この言葉を最初に使ったのは Lehmann で 1888 年のことである。しかし、ディスプレイとして使われるようになるまでには長い研究

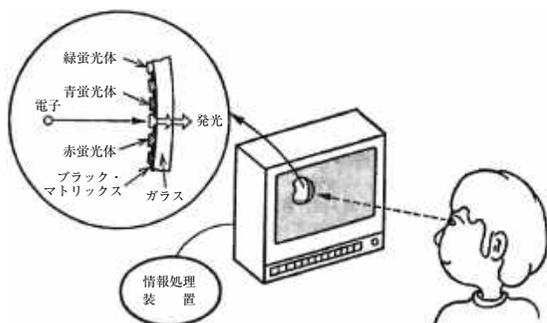


図6 ブラウン管ディスプレイ²⁰⁾

開発期間が必要だった。図6を載せた1984年の本²⁰⁾には、LCDの例として電卓の上部の狭いスペースに数字表示したものが載っていて、この時代はブラウン管の方が存在感があった(現在の状況は、本書第4編3章「ディスプレイ」参照)。

記録媒体としてはいろいろあるが、磁性薄膜はこのなかでも大きな位置を占める。薄膜テープはポピュラーな記録媒体としてよく使われてきたが、この薄膜作製方法としてはスパッタリング法、真空蒸着法、イオン化蒸着法のほか湿式めっき法も用いられた。蒸着強磁性膜ではビームの基板への入射角度が磁気異性に影響を与えるので、高速で送られるテープに、入射角に注意して蒸着を行う特別な方法が開発されている。本書では、「記録」の章で、磁気抵抗効果メモリについての記述が多くなっている。これは1980年代にBaibichらによって報告された巨大磁気抵抗効果、1990年代にMiyazakiら²¹⁾によって報告されたトンネル磁気抵抗効果の研究によるところが大きい(現在の状況は、本書第4編4章「記録」参照)。

センサは、いろいろな情報を電気信号に変換するデバイスである。そこで使われる物理現象(例えば、温度センサは熱電効果など、圧力センサはピエゾ効果など)は19世紀に発見されたものが多い。例えば、熱起電力の発見は1821年、Seebeckによるものである。センサの開発は、効果の大きい材料を見つけ、感度が高くなる構造を考え、それを電気回路といかに結びつけるかということにかかっている。本書前版(2003年)では、ガス、力学、磁気、赤外線、において、バイオのセンサを取り上げたが、今回は味覚センサが加わった。人間がもつ微妙な感覚を数値化するという新たなセンサが利用される時代になっ

たといえよう(現在の状況は、本書第4編5章「センサ」参照)。

環境・エネルギー関係では、アモルファスシリコン太陽電池が開発されたが、この作製には1969年にStarling, Chittickらによって始められた²²⁾プラズマCVD法が試みられた。そしてSpearらはこの方法を用いて1975年にa-Si:Hの価電子制御に成功している。これを契機に半導体デバイスへの応用研究もさかんになった。レーザーアブレーション技術は1965年にSmithやTurner²³⁾らにより開発が行われていたが、その有用性が認識され広く使われるようになったのは、1986年に高温超伝導体が発見され、その薄膜化の研究が盛んになってからである。2019年にノーベル賞を受けたA. Yoshinoのリチウムイオン電池の実用化の研究も1980年代に行われている(現在の状況は、本書第4編6章「環境・エネルギー」参照)。

有機・バイオデバイス関連では、有機薄膜の機能性、有用性の拡大につれて関連する作製技術、例えば真空蒸着法や、水面に有機分子の単分子層を形成し順次固体表面上に移し取って積み重ねるLB(Langmuir-Blodgett)法²⁴⁾などが使われるようになった。有機材料を用いたデバイス研究も1980年代から盛んに行われた。発光素子、レーザー、トランジスタ、センサなどが実用レベルになったのは、この時代の研究が役立っている(現在の状況は、本書第4編7章「有機・バイオデバイス」参照)。

4. 21世紀の進展

21世紀に入って20年が経過した。この間に目につくのは、情報処理能力と情報伝送能力の増大である。演算速度1京回/sの世界最速を誇った電子計算機「京」はすでに引退し、その100倍の能力をもつ次の計算機「富岳」が間もなく運用開始されようとしている。情報伝送は移動通信システムが、最大通信速度1Gbit/s台の第4世代(4G)から10Gbit/s台の第5世代(5G)に入ろうとしている。これらの進化は薄膜の世界にも大きな影響をもたらしている。

計算能力の増大は人工知能(AI)の発展を促し、多くの情報から目的を実現するための情報を得ることができるようになった。計算機を用いて材料を設計することは、もちろん前世紀から試みられてきた。図7は1999年当時考えられていた計算機利用材料

第1編 薄膜材料の特性と特徴

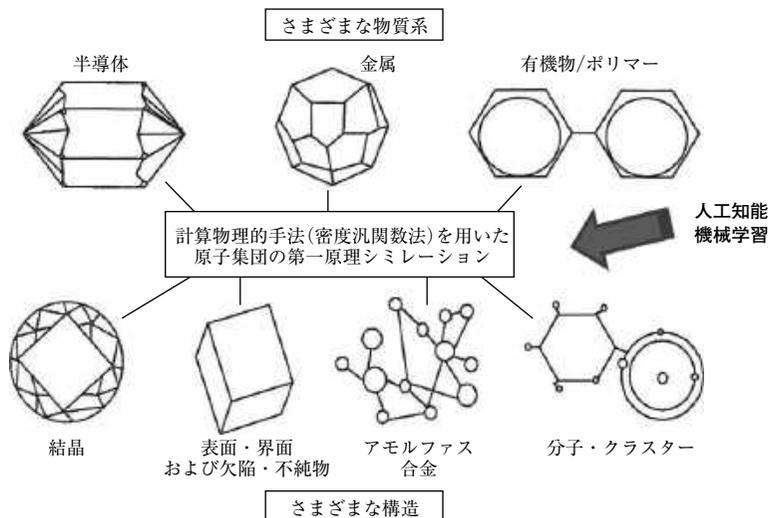


図7 計算物理的手法²⁵⁾に人工知能、機械学習の手法が加わる

開発のプログラムの一例²⁵⁾で、計算物理の利用が主になっている。マテリアル・デザインと言っていた時代である。その後、これに加えて必要とする特性をもつようにさまざまな情報を集めて解析・機械学習し、これを薄膜材料の開発に生かしていくようになった。呼び方もマテリアルズインフォマティクスというのが一般的になりつつある(本書では本章5節)。文献26)は、応用物理学会の雑誌「応用物理」の基礎講座「マテリアルズインフォマティクス」であるが、そこには、「人工知能学会とのコラボ企画」とあるのが、時代の流れを示している。

情報伝送能力の増大は、IoT(Internet of Things)の利用を促進した。生産に使用される薄膜製造装置は装置メーカーに直結され、常時運転状況が把握され、異常の予兆があれば、すぐに対応できるようになった。また状況把握のためには、種々のセンサ、電子機器が必要である。これらは必要なときに電源を入れて使うというのではなく、常時使用状態にあるという環境下で用いられる。そこで、この環境に対応できる薄膜を作ろうという研究も行われるようになった。

これらの進化を支えているのは、電子デバイスをはじめとする種々のデバイス群である。シリコン集積回路はムーアの法則に従って、微細化、集積度増大が続いてきたが、限界が見えてきている。これを乗り越えるための種々の試みがなされているが、これについては本書のデバイスの章を参照されたい。

電子デバイスのもう1つの変化は、パワーデバイスの進展である。大きいパワーを小さい体積で高効率で扱うことができるため、新幹線車両の電気制御部分の省スペース化、軽量化や、エアコンの省電力化などに役立っている。

有機薄膜の進展も目覚ましい。無機薄膜で作られていたいろいろなデバイスのかかりのものが有機材料でできるようになった。いろいろ特徴があるが、無機材料ではちょっと難しく真似しにくい対象がある。フレキシブルなディスプレイとか、肌に接着できるセンサなどは、有機薄膜の活躍の場であろう。

最後に、スマートフォン(スマホ)と薄膜技術との関連を見てみよう。スマホの構造を見ると、まず目立つのは表面にあるディスプレイ²⁷⁾、内部にはもちろんCPU(電子デバイス)、カメラのレンズ、受光素子(光部品)、さらにSDカードなどの記録デバイス、バッテリー(エネルギー)、タッチパネルや回転や方向を知るためのジャイロセンサ、加速度センサ(センサ)、多くの有機薄膜、そして通信用のモデム、スピーカー、マイク、アンテナなどが使用されている。下線で示した項目は、本書第4編の応用で取り上げたほとんどすべての項目である。薄膜技術がなければ、スマホは存在しえないというのは明らかであろう。

5. おわりに

このように見てくると、薄膜技術そのものの開発や発展もちろん大いにあるが、応用、使用環境との関連での技術発展も大きい比重を占める。応用面は高度情報社会の発展など社会的要請と密接な関連をもっており、この意味で近年の薄膜技術は社会生活との関連において発展する性格が強いものといえよう。

文 献

- 1) 金原榮・監修：薄膜工学第3版，日本学術振興会 131 委員会編，丸善(2016)。
- 2) 金原榮・監修：薄膜工学第2版，日本学術振興会 131 委員会編，丸善(2003)。
- 3) 竹原善一郎：電池—その化学と材料，大日本図書，12(1988)。
- 4) 金沢・箔一箔巧館パンフレット。
- 5) 広重徹：物理学史 I，培風館，45(1968)。
- 6) A. W. Wright: *Am. J. Sci. Arts*, **13**, 49(1877)。
- 7) R. Nahrwolt: *Wied. Ann.*, **31**, 467(1887)。
- 8) L. Mond et al.: *J. Chem. Soc.*, **57**, 749(1890)。
- 9) 鶴田匡夫：続・光の鉛筆，新技術コミュニケーションズ，228(1988)。
- 10) R. Ohl: *Bell System Tech. J.*, **31**, 104(1962)。
- 11) D. M. Mattox: *Electrochemical Technology*, **2**, 295(1964)。
- 12) S. M. Sze: *Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons (1985)。
- 13) C. J. Frosch and L. Derick: *J. Electrochem. Soc.*, **104**, 507(1957)。
- 14) H. Nelson: *RCA Rev.*, **24**, 603(1963)。
- 15) I. Hayashi et al.: *Appl. Phys. Lett.*, **17**, 109(1970)。
- 16) 権田俊一：固体物理，**11**(10), 43(1976)。
- 17) J. R. Arthur and J. J. LiPore: *J. Vac. Sci. Tech.*, **6**, 545(1969)。
- 18) H. M. Manasevit and W. I. Simpson: *J. Electrochem. Soc.*, **116**, 1725(1969)。
- 19) D. M. Eigler and E. K. Schweizer: *Nature*, **344**, 542(1990)。
- 20) 権田俊一，世古淳也：オプトエレクトロニクス一問一答，オーム社，67(1984)。
- 21) T. Miyazaki and N. Tezuka: *J. Magn. Magn. Mater.*, **139**, L231(1995)。
- 22) R. C. Chittick et al.: *J. Electrochem. Soc.*, **116**, 77(1969)。
- 23) H. M. Smith and A. F. Turner: *Appl. Opt.*, **4**, 329(1965)。
- 24) K. B. Blodgett: *J. Am. Chem. Soc.*, **57**, 1007(1935)。
- 25) 社団法人電子工業振興協会編：コンピュータ支援電子材料設計調査研究報告書(1999)。
- 26) 畑中美穂：応用物理，**88**，679(2019)。
- 27) 小村真一：応用物理，**88**，683(2019)。

ハンドブック 2003 年版

権田俊一監修：21 世紀版薄膜作製応用ハンドブック，エス・ティー・エス(2003)。

<権田 俊一>

キーワード

めっき法，延伸法，真空蒸着法，スパッタリング，エピタキシー，イオン化蒸着法，分子線エピタキシー，有機金属化学気相エピタキシー，レーザーアブレーション，IoT

この先をご覧いただくには、パスワードが必要です。

制限つきPDFで全ページをご覧いただけます。
(制限内容：閲覧期間の設定、コピーやプリントの禁止など)

- ・ PDFの閲覧

「パスワード」と「専用のビューア」（無料）が必要です。
費用は一切かかりません。

※WindowsのPCでのみご覧いただけます。予めご了承ください。

- ・ パスワード ※電子試読ページよりお申込みください
<https://www.nts-book.com/ntsの電子試読>
ページ下部にお申込みフォームがあります。

右のQRコードからも
電子試読ページにアクセス
いただけます。



- ・ ビューアのダウンロード

PDFは、株式会社スカイコムの SkyPDF Viewer（無償のPDFビューア）をダウンロードしてご覧いただけます。

※Adobe Acrobat Readerなど他のPDF閲覧アプリケーションではご覧になれません。

SkyPDF Viewer 無償ダウンロード：
<https://www.skycom.jp/free/>