

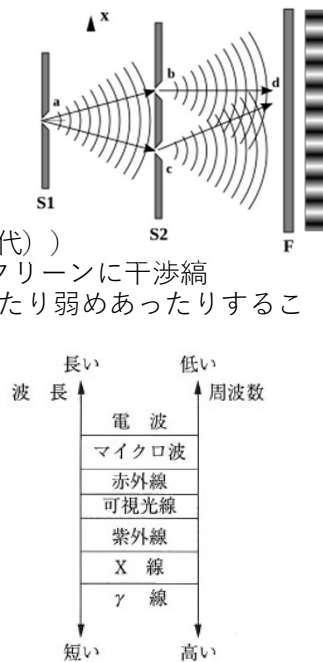
オプトエレクトロニクス

- Opto-electronics (光 + 電子工学)
- 光と電子の相互作用を利用した工学：
LED、レーザー、光センサ、太陽電池

68

光の二重性

- 光って何？
- 光は波（ヤングの干渉実験（1800年代））
→ 光を2つのスリットに通すと、スクリーンに干渉縞
→ 波どうしが重なり合って強めあったり弱めあったりすること
で生じる現象
- 光が波だとしたら媒体は？
- 光は電磁波
- マクスウェルの電磁気方程式
電場と磁場の変化が互いを
生み出しながら空間を伝わる
→ 速度を計算すると光速

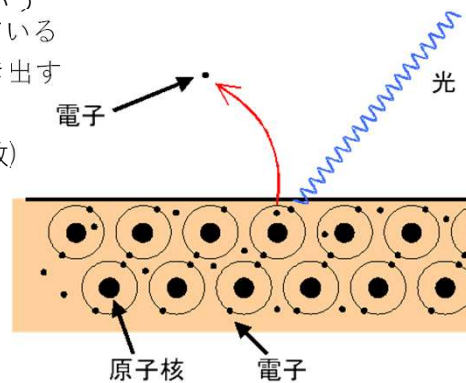


69

光の二重性

- 光が波だとしたら説明できない現象
- 光電効果：光を当てると金属から電子が飛び出る
- アインシュタイン「光は粒としてふるまう」
- 光は光子 (photon) というという
エネルギーのかたまりでできている
- 1個の光子が1個の電子をたたき出す
- 光子のエネルギーは色に依存
- $E = h\nu$ (h プランク定数、 ν 周波数)

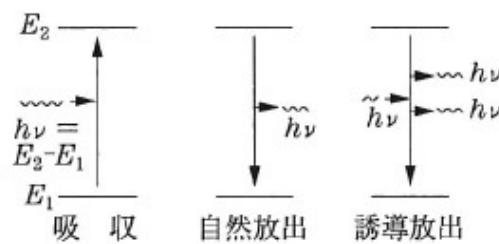
- 光は波でもあり、粒でもある



70

レーザー

- Laser (light amplification by stimulated emission of radiation)
誘導放出による光の増幅
- 誘導放出：ある励起された原子に、同じエネルギーの光を当てると、それに「刺激されて」同じ光子がもう1つ放出
- 反射鏡によって増幅



71

レーザー材料

- 固体レーザー：非常に大きなピーク出力を得ることができる
- 液体レーザー：波長を変化させることが可能
- 半導体レーザー：pn接合、小型・軽量で効率が良い

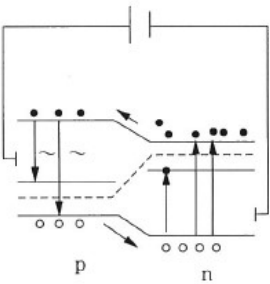
表 7.2 おもなレーザー材料と特性

種 類	名 称	材 料	発振波長 (μm)
気体レーザー	ヘリウムネオンレーザー	He, Ne	0.63, 1.15, 3.39
	アルゴンレーザー	Ar	0.514 5, 0.488 0, 0.476 5, 0.457 9
	クリプトンレーザー	Kr	0.647 1, 0.568 2, 0.530 9, 0.476 2
	炭酸ガスレーザー	He, N ₂ , CO ₂	10.6
	エキシマレーザー	希ガス, ハロゲンガス	0.193 (Ar, F), 0.249 (Kr, F)
固体レーザー	窒素レーザー	N ₂	0.308 (Xe, Cl), 0.353 (Xe, F)
	ルビーレーザー	Al ₂ O ₃ , Cr ₃	0.694
	ガラスレーザー	ケイ酸ガラス, リン酸ガラス	1.054~1.062
	YAG レーザ	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ , Nd ³⁺	1.064
液体レーザー	色素レーザー	色素	広範囲(色素の種類により異なる)
半導体レーザー	InGaAsP 系レーザー	InGaAsP	1.15~1.65
	AlGaAs 系レーザー	AlGaAs	0.68~0.89
	InGaAlP 系レーザー	InGaAlP	0.58~0.65

72

LED (light emitting diode)

- pn接合半導体を用いた発光素子
- 再結合により発光
- バンドギャップに相当する波長の光



- LEDに必要なギャップ
- 青：
- 緑：
- 赤：
- 赤外：

表 7.3

特性など	発光ダイオード	半導体レーザー
発光メカニズム	自然放出	誘導放出
スペクトル幅	30~150 nm	5 nm 以下
出力	1 mW 程度 (低出力)	1~100 mW (高出力)
構造	光共振器構造なし	光共振器構造あり
用途	ディスプレイ, 光通信	光通信, 光記録ほか

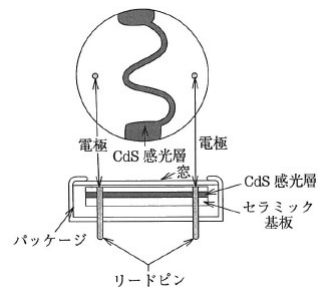
表 7.4 おもな発光ダイオードの材料

発光色	発光成質	発光波長 (nm)	おもな用途
青	SiC	470	ランプ, ディスプレイ
緑	GaP	563	ランプ, ディスプレイ
赤	GaAs ₂ P _{1-x}	650	ランプ, ディスプレイ
赤外	AlSb	775	光通信
	GaAs	940	リモコン
	Ga _x In _{1-x} As _y P _{1-y}	1 100~1 550	光通信

73

光導電材料

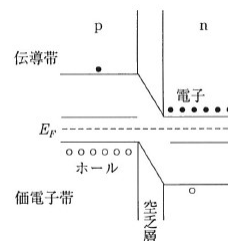
- 光導電性：光の照射により電気抵抗が変わる性質
- CdS
- 半導体はエネルギーギャップより大きなエネルギーを持つ光を当てると、自由に移動できる電子と正孔が発生し、キャリアが増加する



74

ホトダイオード

- 半導体のpn接合面を利用した光起電力型の受光デバイス
- 光が照射
 - pn接合面にできた空乏層で電子・正孔のペアが生成
 - 空乏層電界によって電子はn形領域に、正孔はp形領域に移動
 - 起電力が発生

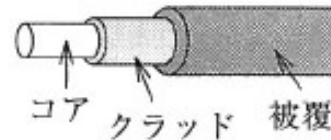


75

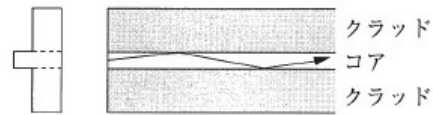
光ファイバ

- 長距離伝送、高速通信、大容量

- コア：屈折率の高いガラス
- クラッド：屈折率の低いガラス



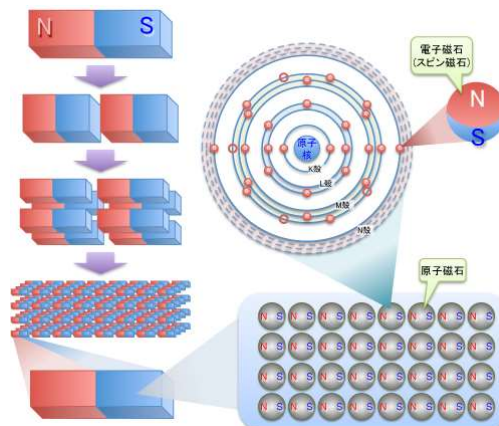
- 全反射
- コアがクラッドより屈折率が高い
- 光が斜めにクラッドとの境界に当たると全反射して戻ってくる
- 光が閉じもめられて進む



76

磁性材料

- 磁性：物質が磁場に応答して磁力を帯びる性質
- 磁性材料：磁石になったり磁石に引き寄せられるといった性質を持つ材料



77

磁性材料

- 材料の磁性は①**電子のスピン**と②**軌道運動**によって生じる。不対電子が多い原子や分子では磁性が現れやすい
- アンペールの法則：電流により磁場が発生する
- 磁気モーメント：電流Iがループを作る→磁界が発生→磁石として考えることができる。その磁石の強さと向き（磁場が出る方向）
- ボーア磁子：電子1個が持つ磁気モーメント

78

常磁性

- 常磁性：磁石にはつかないものの、引き付けられるように弱く磁化する性質
- 通常は磁気モーメントの向きがランダム
- 外部磁界がないと磁気モーメント同士が打ち消し合う
- 外部磁界により磁気モーメントが外部磁界の向きに揃い磁性を表す（磁化する）
- 磁化率：外部磁界の強さに対して磁化する割合
- **キュリーの法則：磁化率は温度と反比例する**
- パウリ常磁性：温度に依存せず磁化率がほぼ同じ

79

反磁性

- 反磁性：外部磁場をかけると、物質がその磁場を打ち消すような磁気モーメントを生じる性質。磁石に反発するように弱く磁化する性質
- 原子核の周りの電子は、スピンや軌道運動により、原子に磁気モーメントをもたらす
- 外部磁場を加えると、電子の軌道運動が変化し、それに反発するように誘導起電力が生じる
- その結果、磁場を打ち消す方向に磁気モーメントが現れる。
- 磁化率は負

80

強磁性

- 強磁性：物質内の磁気モーメントに強い相互作用が働く（磁気モーメントの向きが揃っているため外部磁界がなくても磁性を現す）磁石につくほど強く磁化する性質、磁石として使える
- ワイスの仮説：各スピンは周囲のスピンから影響される
- 内部磁界（ワイス磁界）：強い相互作用を生み出す仮想的な磁界→ワイス磁界により物質内の磁気モーメントが揃う（自発磁化）
- キュリー温度：強磁性体が強磁性を失って常磁性に代わる転移点の温度

81

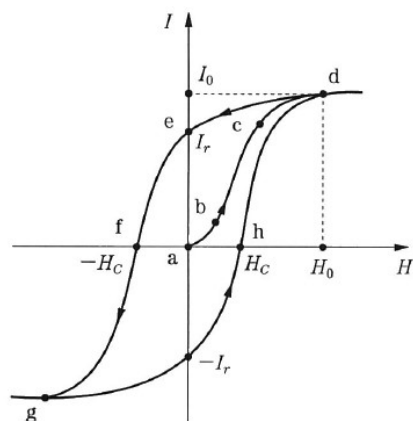
反強磁性とフェリ磁性

- どちらも、磁気モーメントが打ち消し合うように並ぶ
- 反強磁性：磁気モーメントが互いに逆向きに整列し**磁化はゼロ**
- ネール温度：ある温度を超えると**磁気モーメントが乱れ常磁性**になる
- フェリ磁性：磁気モーメントが互いに逆向きに整列するが、モーメントの大きさが異なるため完全には打ち消されず、磁化が残る（磁石として使える）
- キュリー温度で磁気モーメントが乱れ常磁性になる

82

磁化曲線

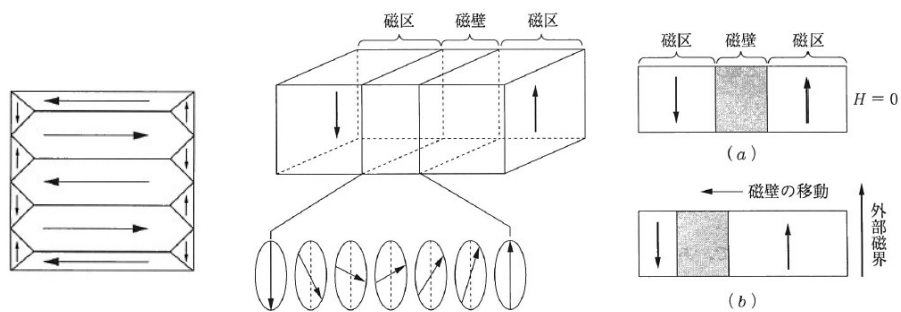
- 強磁性体の磁化曲線
- d点：飽和磁化
- e点：残留磁化
- f点：保磁力



83

磁区

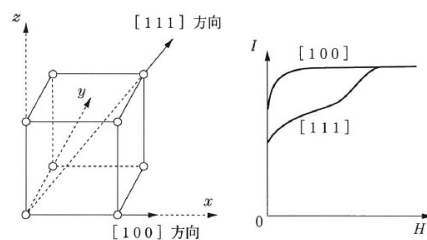
- 磁気モーメントが同じ方向に揃っている小さな領域
- 磁壁：磁区と磁区の境界、磁気モーメントが徐々に変わる中間領域
- 外部電界により磁壁が移動し磁化する



84

磁気異方性

- 磁区構造は結晶構造に密接に関係する
- 磁化しやすい方向としない方向がある：**磁気異方性**
- Fe：110方向→磁化されやすい
111方向→磁化されにくい
- Ni：111方向→磁化されやすい
110方向→磁化されにくい
- 外部磁界がない時は自発磁化は安定な状態を取るような方向に向く



85

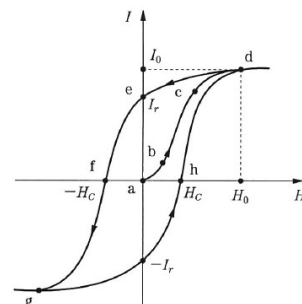
磁気ひずみ

- 磁化すると形状が変わる現象
- 磁化は結晶構造に影響を与える→形の変化として現れる（結晶構造そのものが変化するわけではないが、結合距離や方向がわずかに変化する）

86

ヒステリシス損と渦電流損

- 磁性体では、磁化の向きを変えると磁気モーメントの向きが変化、磁壁が動く
- この動きにエネルギーが必要で、発熱という形でエネルギーが失われる
- ヒステリシス曲線との関係
- ループの面積が大きいほど損失が大きい
- ループの面積：磁化の向きを反転させ、戻した時のエネルギーの損失
- 渦電流損
- 交流磁界→誘導起電力→渦電流→ジュール熱
- 磁場の変化により金属の中に電流が発生、ジュール熱となる
- 高速で頻繁に磁化の向きを変えなければならぬ利用先では不向き



87

各種磁性材料

- 実用なのは強磁性体、フェリ磁性
- 軟質磁性材料と硬質磁性材料に分類
- 軟質磁性材料：磁化されやすい物質。透磁率が大きく、保磁力と残留磁化が小さい
- さかんに磁束の向き/オンオフを切り替える機器の鉄心材料に利用される：ヒステリシス損と渦電流損が少ないことが要求
- 磁化しやすい→磁壁が移動しやすい、不純物が少ない、均一、内部にひずみが少ない
- ケイ素鋼
- パーマロイ
- フェライト

88

各種磁性材料

- 硬質磁性材料：保磁力、残留磁化、飽和磁化が大きい
- 発電機、モータ、スピーカ、MRIなどの永久磁石
別名：永久磁石材料
- 保磁力を高める→磁壁の移動を抑える→材料を微粒子化、不純物を混ぜる、格子欠陥を形成、ひずみを与える
- 析出合金
- フェライト
- 希土類コバルト磁石
- ネオジム

89

- 導電材料
 - 抵抗材料
 - 半導体材料
 - 誘電体材料
 - 磁性材料
 - 超電導材料
 - オプトエレクトロニクス材料
 - 炭素材料
- これらの単元の中で、自分の研究に近いものを選び
 1. 原理などの基礎理論（導電材料ならオームの法則、半導体ならバンド構造など）
 2. 材料の作り方
 3. 実際の応用例（商品名だけでなく、どのように使われているのかまで具体的に）
 などを調べてレポートにしてください。A4 2枚以上
 〆7月28日

90

超伝導材料

- 金属の抵抗：熱振動、原子配列の乱れ、不純物
 - 温度を下げ熱振動を抑えると抵抗が下がる
- 1910年頃、温度変化に伴うHgの電気抵抗の変化を測定
 - 液体Heを用いて4Kまで温度を下げると電気抵抗が0となる
 - 超伝導（Superconductivity）
 - 臨界温度
- 純金属（Pb、Sn、Inなど）
 - 合金（Pb-Bi、NbN）
- 電圧降下やジュール熱によるロスがない→様々な応用

91

超伝導の原理

- BCS理論
- 低温状態
- クーパー対：2つの電子が1組の電子対を形成

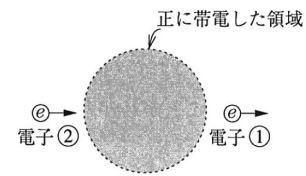


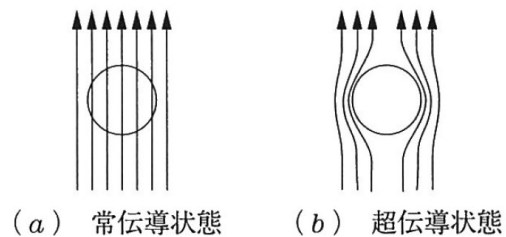
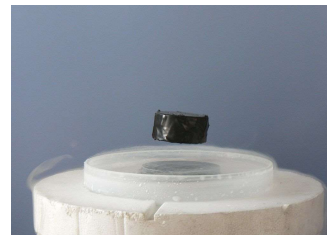
図 6.1 電子間引力の発生機構

- 低温状態では、電子がフェルミレベル付近にクーパー対を形成
- クーパー対は秩序ある電子の集団としてふるまう→バンド構造が変化
- フェルミレベル付近に 2Δ のエネルギーギャップが現れる
- 超伝導体に 2Δ のエネルギーが加わると常伝導になる

92

マイスナー効果

- 超伝導体の内部に磁場が侵入できない
- 磁界を打ち消す方向に表面電流が流れる
- 外部磁界に逆らう向きの磁化
- 磁石を近づけると反発して浮く



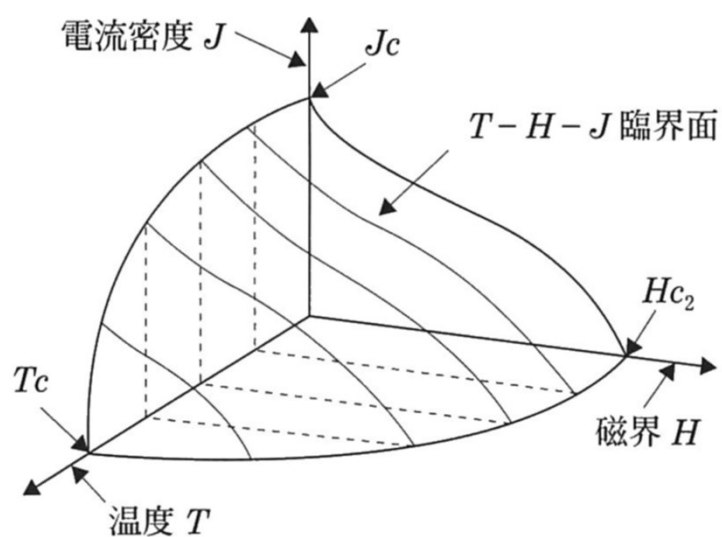
93

臨界磁界と超伝導体の種類

- 超伝導体は反磁性
- 第1種超伝導体
- 純金属
- 臨界磁界 H_c を超えると常伝導に戻り、磁化はゼロになる
- 第2種超伝導体
- 合金
- 臨界磁界 H_{c1} を超えると磁束が侵入、磁束が侵入した部分は常伝導になる：超伝導と常伝導が共存する混合状態
- 臨界磁界 H_{c2} を超えると超伝導は完全に消失

94

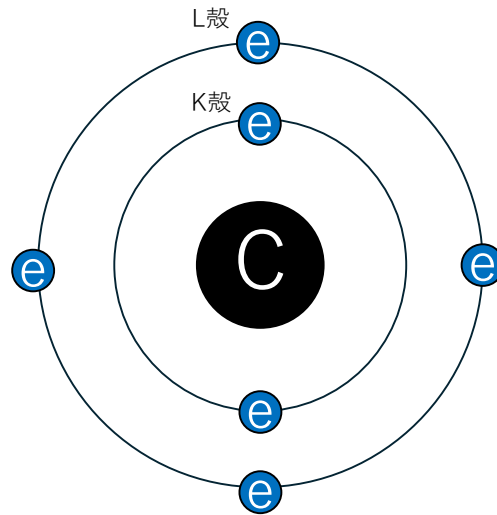
臨界三値



95

炭素

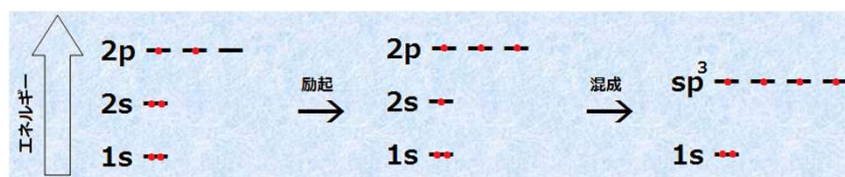
- 元素記号C
- 原子番号6
- 原子量12
- 中性子6、電子6



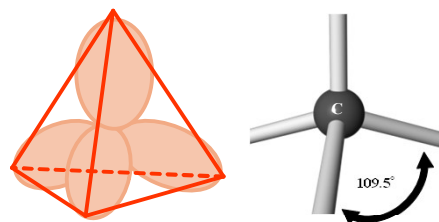
96

炭素の結合 sp^3

- 2s軌道と2p軌道がすべて重なり、4つの混成軌道を形成



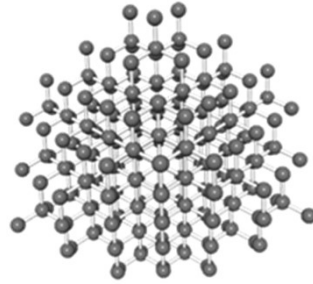
- 正四面体



97

sp^3 結合の炭素

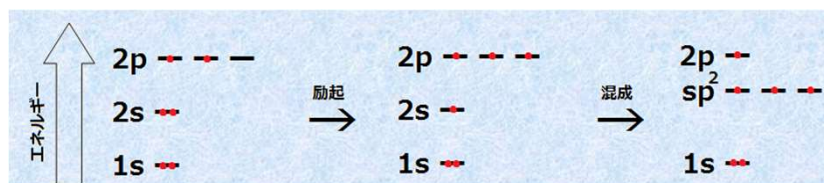
- ダイヤモンド
- sp^3 混成軌道による共有結合
- 絶縁体
 - 置換、ドーピングにより導電性を持たせることも
- 高い熱伝導率
- 高温高圧環境下で人工的合成可
 - 1000°C以上、0.5GPa
- 研磨材・切削工具
- 放熱材料
- ワイドギャップ半導体



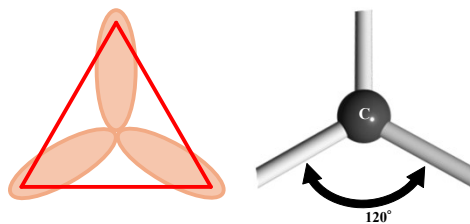
98

炭素の結合 sp^2

- 2s軌道と2つの2p軌道が重なり、3つの混成軌道を形成



- 正三角形

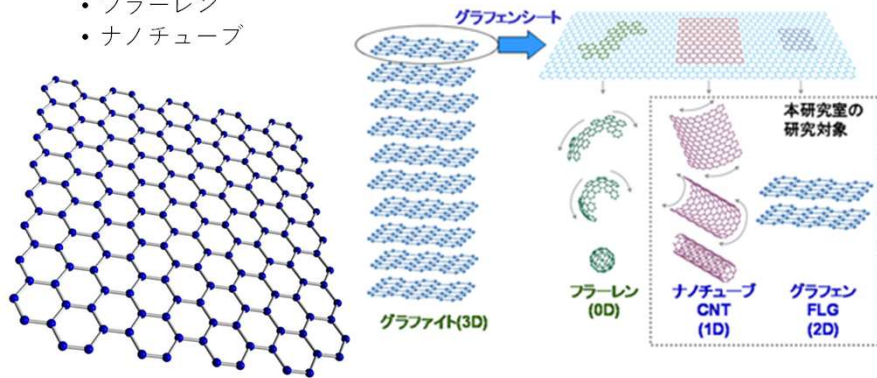


99

sp^2 結合の炭素

- 黒鉛（グラファイト）をベースに様々な構造物

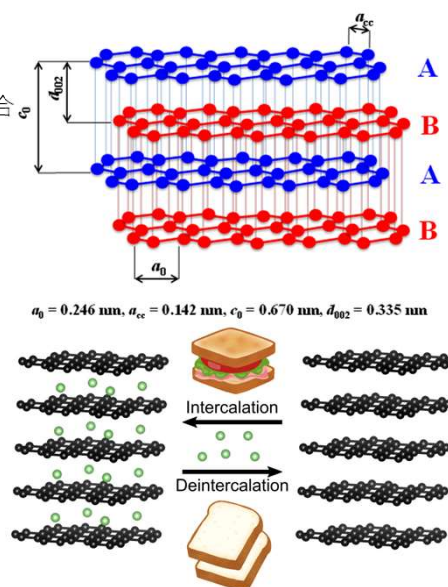
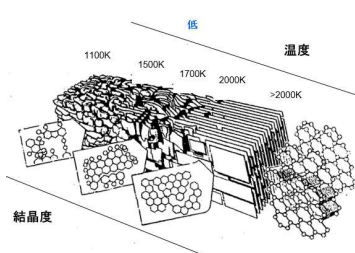
- 黒鉛
- グラフェン
- フラーレン
- ナノチューブ



100

sp^2 結合の炭素

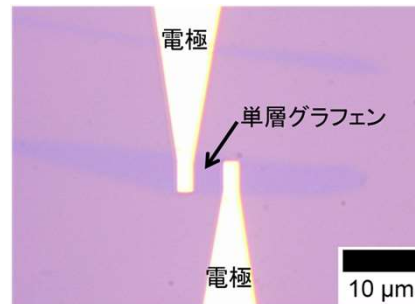
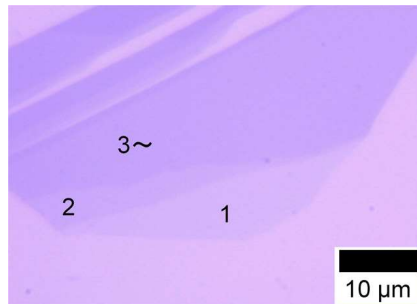
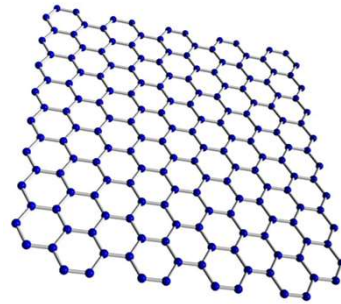
- 黒鉛
 - sp 混成軌道と p 軌道による共有結合
 - p 軌道電子が自由電子に近い役割
 - 黒鉛：異方性
- 黒鉛の合成
 - 有機物を $400\sim 600^\circ\text{C}$ で炭素化
 - 2000°C 以上の高温で黒鉛化
- 黒鉛の利用
 - 鉛筆、電磁波シールド、LIB負極



101

sp^2 結合の炭素

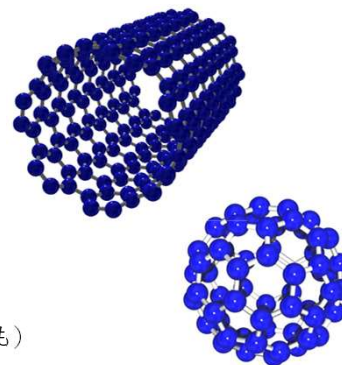
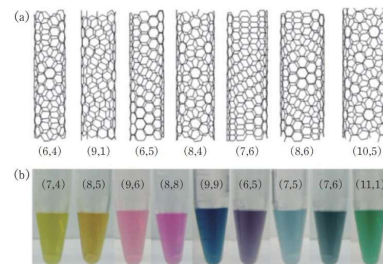
- グラフェン
 - 黒鉛からスコッチテープで剥がす
 - 化学気相成長法 (CVD)
 - バリステック伝導 (高い移動度)
 - 原子1層分の厚み (可視光透過率97%)
 - トランジスタ、透明導電膜
 - 大面積グラフェンの合成が困難



102

sp^2 結合の炭素

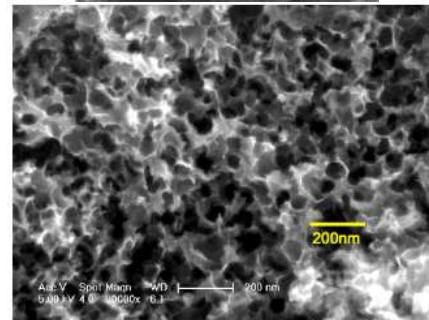
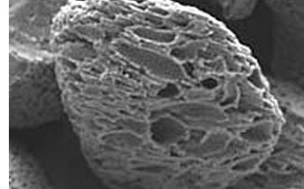
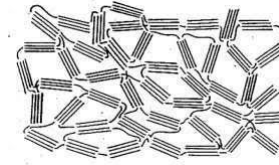
- カーボンナノチューブ
 - グラフェンシートを丸めた構造
 - 丸める方向 (カイラリティ) により金属～半導体まで様々な電気特性
 - バリステック伝導
 - トランジスタ、透明導電膜、導電性インク
 - エネルギーデバイス材料
 - 高強度複合材料、ドラッグデリバリー
 - 単一構造のCNTを合成することは至難
- カーボンナノファイバー
 - 直径100 μ ぐらいの繊維状物質
 - 高強度複合材料
- フラーレン
 - C60サッカーボールと同じ幾何学構造
 - 抗酸化作用 (化粧品)
 - 潤滑剤
 - 金属原子を内包させ特性を変化 (超伝導も)



103

sp^2 結合の炭素

- 多孔質炭素（活性炭）
 - 多孔質構造により大きな表面積
→2000m²/g 高い二重層容量
- 高い耐電圧、化学的安定性
- 優れたイオン吸着特性
→脱臭、除湿フィルター
→電気二重層キャパシタ



104

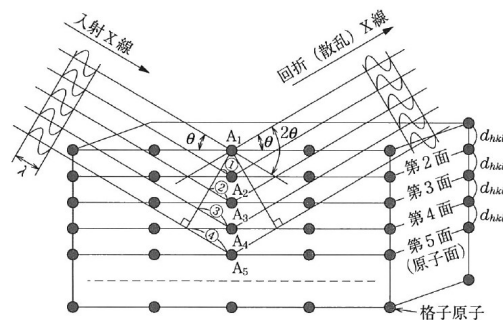
X線回折

- 結晶にX線を照射すると原子面で散乱されるが、特定の角度で入射すると（散乱されたX線同士が干渉し）回折する
→入射X線と回折X線のなす角 2θ から結晶構造の様々な情報を知ることができる

- ブラッグの法則

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

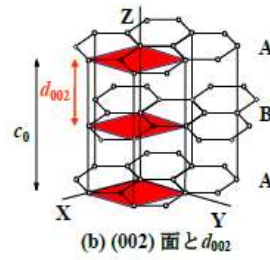
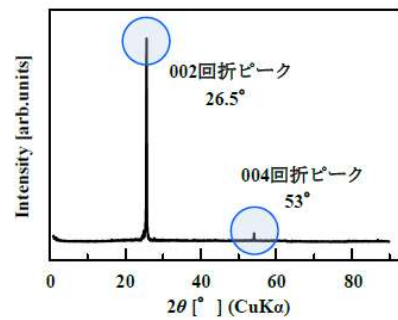
λ : X線の波長
(一般的にCuK α 線1.54 Å)
 d : 結晶面間の距離
 θ : 回折角



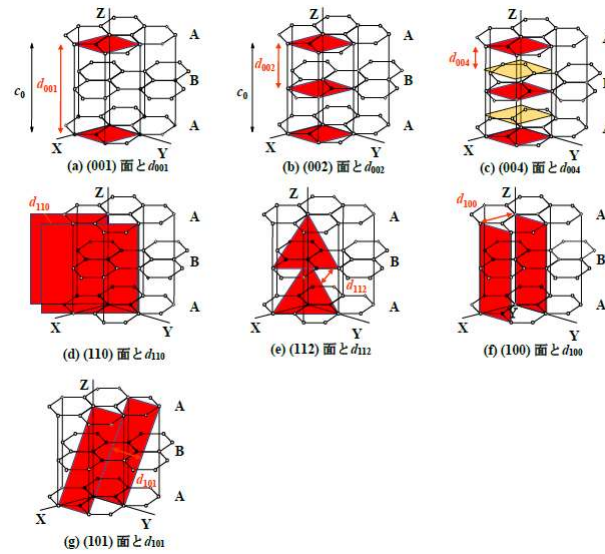
105

X線回折

- 炭素（グラファイト）の場合、
 $2\theta = 26.5^\circ$ (002)面からの回折X線が強く観測される
- ブラッグの法則に代入すると、002面間の距離がわかる



106



107

X線回折でわかること

- 結晶の面間距離
- 結晶構造の種類（立方晶、六方晶、斜方晶など）
- 格子定数（面間の距離と結晶格子の種類から）
- 結晶粒径（シュエラーの式）

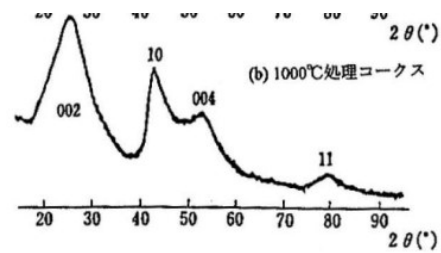
$$D = K\lambda / \beta \cos \theta$$

D：結晶子のサイズ

K：形状因子(通常0.9)

β ：ピークの半値幅 (rad)

- 結晶性の良し悪し
(ピークがシャープかどうか)



108

電子顕微鏡

- 見る：反射した光を目で認識
- 可視光(400~700nm)の波長より小さい構造は見えにくい

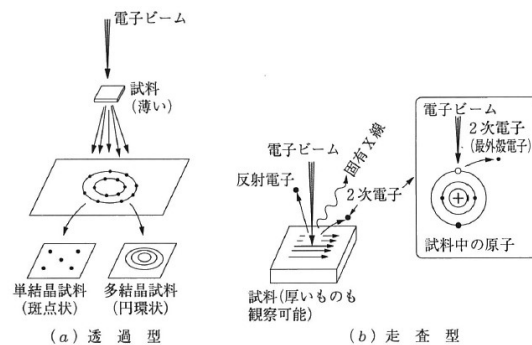
- 電子の波長は非常に短い(nm以下も観察できる)

透過型

- 透過電子
- 原子配列や結晶構造

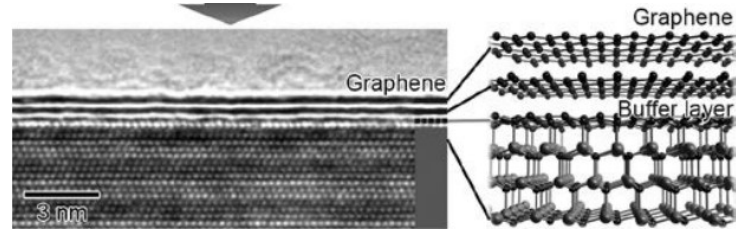
走査型

- 二次電子
- 表面の凹凸

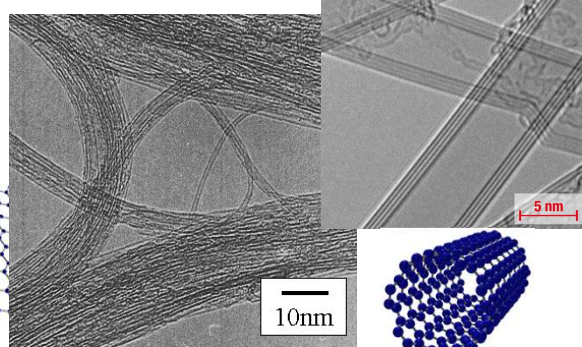
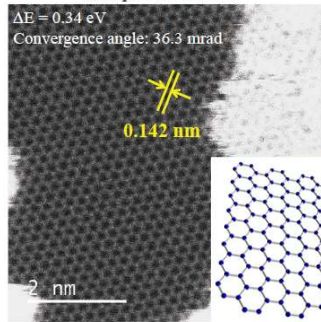


109

透過型電子顕微鏡

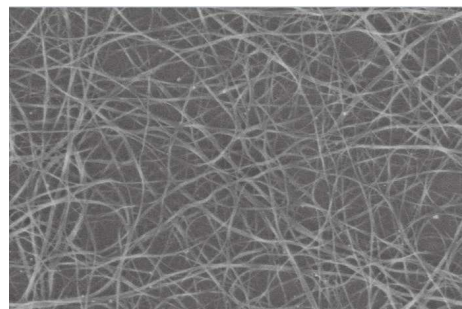
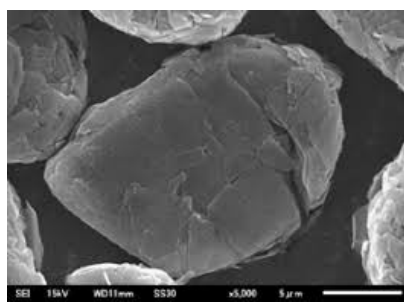


Sample : グラフェン



110

走査型電子顕微鏡



111

原子間力顕微鏡

- nm単位の細いチップで材料表面をなぞる
材料表面の凹凸を可視化する
- 導電性不要
- 待機中でも測定可能
- 表面物性の評価も可能
 - 粘着力、摩擦力、弾性、電気伝導性

