

材料科学 期末試験対策総合資料

長野高専 電気電子工学科 5 年 XX 番 氏名

2025 年 7 月 30 日

1 オプトエレクトロニクス材料：発光ダイオード (LED) の動作原理

発光ダイオード (LED) は、現代の照明、ディスプレイ、通信技術に不可欠なデバイスです。その動作は、半導体物理学の基本原則に基づいています。ここでは、LED がどのようにして電気エネルギーを光エネルギーに変換するのか、その一連のプロセスを詳細に解説します。

1.1 基礎構造：pn 接合と空乏層

LED の心臓部は、**pn 接合**と呼ばれる構造です。これは、正孔（ホール）を多数キャリア（電荷を運ぶ主要な粒子）とする **p 型半導体**と、電子を多数キャリアとする **n 型半導体**を接合して作られます [1]。

接合が形成されると、濃度差によって拡散が生じます。n 型領域の豊富な電子は p 型領域へ、p 型領域の豊富な正孔は n 型領域へと移動します。この拡散の結果、接合界面付近ではキャリアが互いに打ち消し合って消滅します。電子が去った n 型側にはプラスに帯電したドナーイオンが、正孔が去った p 型側にはマイナスに帯電したアクセプターイオンが残されます。これらの動けないイオンが存在する領域は、移動可能なキャリアが枯渇しているため、**空乏層**（くうぼうそう）と呼ばれます [1]。

空乏層内に生じた正負の電荷の分離は、n 型側から p 型側に向かう内部電界を形成します。この電界は、さらなるキャリアの拡散を妨げる電位障壁として機能し、最終的に拡散と電界によるドリフトが釣り合った平衡状態に達します。

1.2 デバイスの活性化：順バイアスによるキャリア注入

LED を発光させるには、外部から電圧を印加する必要があります。p 型側に正極、n 型側に負極を接続する電圧の印-加方法を**順バイアス**（じゅんバイアス）と呼びます [1]。

順バイアス電圧を印加すると、その外部電界が内部電界を打ち消す方向に作用します。これにより、pn 接合の電位障壁が低くなり、空乏層の幅が狭まります [2]。障壁が十分に低くなると、多数キャリアは再び接合を越えて移動を開始します。n 型領域の電子は p 型領域へ、p 型領域の正孔は n 型領域へと大量に注入されます。この注入されたキャリア（注入キャリア）は、移動先の領域では少数キャリアとなり、デバイス内に電流が流れる原因となります [2]。

1.3 「発光」プロセス：放射再結合

p 型領域に注入された電子と、n 型領域に注入された正孔は、接合界面付近で互いに引き寄せられ、再結合（さいけつごう）します。これは、伝導帯にいた電子が価電子帯の正孔に落ち込み、消滅する現象です [1]。

この再結合の際、電子はエネルギーを放出します。このエネルギーの放出形態が、LED の性能を決定づける重要な要素です。特定の半導体材料では、このエネルギーが効率的に光子（こうし）、すなわち光の粒子として放出されます。このプロセスを放射再結合と呼びます [1]。一方で、エネルギーが熱（格子振動）として失われる過程は非放射再結合と呼ばれ、発光効率を低下させる要因となります。

1.4 色の決定要因：バンドギャップ (E_g) の役割

放出される光子のエネルギー、すなわち光の色（波長）は、半導体材料固有のバンドギャップ (E_g) によって決まります。バンドギャップとは、電子が存在できない禁制帯のエネルギー幅、具体的には価電子帯の最上部から伝導帯の最下部までのエネルギー差を指します [1]。

電子が伝導帯から価電子帯へ再結合する際に放出するエネルギーは、このバンドギャップの大きさにほぼ等しくなります。光子のエネルギー E と波長 λ の関係は、 $E = hc/\lambda$ (h はプランク定数、 c は光速) で与えられるため、バンドギャップが大きい材料ほどエネルギーの大きい、すなわち波長の短い光（例：青色、紫外光）を放出し、バンドギャップが小さい材料ほど波長の長い光（例：赤色、赤外光）を放出します [4]。

この関係は、試験の計算問題で重要となる以下の近似式で表されます。

$$\lambda(\text{nm}) \approx \frac{1240}{E_g(\text{eV})}$$

この式により、材料のバンドギャップが分かれば、発光色を予測することができます [6]。例えば、講義資料の表にあるように、緑色 LED には GaP、赤色 LED には GaAsP といった異なる材料が用いられるのは、それぞれが望みの波長に対応するバンドギャップを持つためです [1]。

しかし、単にバンドギャップが適切であるだけでは、効率的な LED にはなりません。放射再結合の効率が極めて重要です。電子と正孔の再結合には、エネルギーだけでなく運動量も保存される必要があります。直接遷移型半導体（例：GaAs、GaN）では、伝導帯の底と価電子帯の頂上と同じ運動量空間に位置するため、電子は直接正孔と再結合し、効率よく光子を放出できます。

対照的に、間接遷移型半導体（例：Si、Ge）では、両者の運動量空間上の位置がずれています。そのため、再結合には光子だけでなく、格子の量子化された振動であるフォノンの助けを借りて運動量を調整する必要があります [4]。この余分な粒子が関与するプロセスは発生確率が低く、エネルギーの大部分は熱として失われます。これが、電子産業の主役であるシリコンが LED 材料として使われない根本的な理由であり、高効率な発光を実現するために、ガリウム、ヒ素、リン、窒素などを組み合わせた高価な化合物半導体が必要とされる背景です [3]。

2 磁性材料：原子の磁気から応用材料まで

磁性材料は、モーターや発電機、データストレージなど、現代社会の基盤技術を支える重要な物質群です。その性質は、原子レベルの微視的な振る舞いから、材料全体としての巨視的な特性まで、階層的に理解する必要があります。

2.1 磁性の根源：原子の磁気モーメント

物質の磁性は、原子が持つ**磁気モーメント**に由来します。これは、原子を微小な磁石と見なしたときの、その強さと向きを表すベクトル量です。磁気モーメントの起源は、主に以下の二つです [1]。

1. **電子のスピン**：電子は、自転に似た**スピン**と呼ばれる量子力学的な性質を持ち、それ自体が磁気モーメントを生み出します。対になっていない**不対電子**が存在する場合、そのスピンが打ち消されずに残り、原子の磁性の主な源となります [1]。電子 1 個のスピンが持つ磁気モーメントの基本単位を**ボーア磁子**と呼びます。
2. **電子の軌道運動**：原子核の周りを電子が運動することは、微小な円電流ループと見なせます。アンペールの法則により、電流は磁場を生成するため、この軌道運動も磁気モーメントを生み出します [1]。

2.2 磁性の分類

個々の原子が持つ磁気モーメントが、物質中で集合的にどのように振る舞うかによって、磁性は主に 5 つの種類に分類されます。

表 1 磁性の分類

特徴	常磁性 (Paramagnetism)	反磁性 (Diamagnetism)	強磁性 (Ferromagnetism)	反強磁性 (Antiferromagnetism)	フェリ磁性 (Ferrimagnetism)
スピン配列	ランダム	(誘起)	平行配列	反平行・等大	反平行・不等大
外部磁場への応答	弱く引かれる	弱く反発	強く引かれる	弱い応答	強く引かれる
磁化率 χ	小さく正	小さく負	大きく正	小さく正	大きく正
温度依存性	キュリー則	ほぼ不変	キュリー温度以上で常磁性	ネール温度以上で常磁性	キュリー温度以上で常磁性
代表物質	Al, O ₂ , Pt	Cu, H ₂ O, Si	Fe, Co, Ni	MnO, Cr	フェライト (Fe ₃ O ₄)

- **常磁性**：各原子の磁気モーメントは熱エネルギーによってランダムな方向を向いており、全体としての磁化はゼロです。外部磁場をかけると、モーメントが磁場の方向にわずかに整列し、弱く引き付けられます。磁場を取り除くと元のランダムな状態に戻ります [1]。
- **反磁性**：すべての物質が持つ普遍的な性質です。外部磁場をかけると、電子の軌道運動が変化し、外部磁場を打ち消す向きに微弱な磁気モーメントが誘起されます。これにより、磁場に対して弱く反発します [1]。
- **強磁性**：量子力学的な交換相互作用（ワイス磁界という仮想的な内部磁界で説明される）により、隣接する原子の磁気モーメントが自発的に同じ向きに整列します。これにより、外部磁場がなくても大きな自発磁化を持ちます。この性質は、ある温度（キュリー温度）以上になると失われ、常磁性体となります [1]。
- **反強磁性**：隣接する原子の磁気モーメントが、同じ大きさで互いに逆向きに整列します。その結果、磁化が完全に打ち消し合い、全体としての正味の磁化はゼロになります。ネール温度以上で常磁性体になります [1]。
- **フェリ磁性**：反強磁性と同様に、隣接する磁気モーメントが逆向きに整列しますが、その大きさが異なります。そのため、磁化が完全には打ち消されず、強磁性体と同様に正味の自発磁化を持ちます。フェライトなどがこの例です [1]。

2.3 強磁性体の指紋：ヒステリシス曲線

強磁性体やフェリ磁性体の最も特徴的な性質は、磁化曲線、特にヒステリシス曲線に現れます。これは、外部磁場 H を変化させたときの材料の磁化 M （または磁束密度 B ）の変化を示したグラフで

あり、材料の磁気的な「履歴」を可視化するものです [1]。

1. **初期磁化曲線**：磁化されていない状態から磁場をかけていくと、磁化は $a \rightarrow d$ の経路をたどります。磁場を強くすると、やがてすべての磁気モーメントが磁場の向きに揃い、磁化はそれ以上増加しなくなります。この状態を**飽和磁化**（ほうわじか, M_s ）と呼びます。
2. **残留磁化**：飽和させた後、外部磁場をゼロに戻しても ($d \rightarrow e$)、磁化はゼロにはならず、ある値を保ちます。この $H=0$ での磁化を**残留磁化**（ざんりゅうじか, M_r ）と呼び、物質がどれだけ磁気を保持できるかを示します。
3. **保磁力**：磁化をゼロにするためには、逆向きの磁場をかける必要があります ($e \rightarrow f$)。磁化がゼロになる時の逆向き磁場の強さを**保磁力**（ほじりょく, H_c ）と呼び、磁化の消えにくさ、すなわち磁気的な硬さを示します。

このヒステリシスループが囲む面積は、磁化の向きを 1 サイクル変化させるのに必要なエネルギーに比例し、ヒステリシス損として熱に変わります [1]。

2.4 機能による分類：軟質磁性材料と硬質磁性材料

ヒステリシス曲線の形状によって、磁性材料は実用上、二つのカテゴリに大別されます。この分類は、材料内部の**磁区**（磁気モーメントが同じ向きに揃った微小領域）と、その境界である**磁壁**の動きやすさによって決まります。

表 2 軟質磁性材料と硬質磁性材料

特性	軟質磁性材料 (Soft)	硬質磁性材料 (Hard)
保磁力 (H_c)	小さい	大きい
残留磁化 (M_r)	小さい	大きい
透磁率 (μ)	大きい	小さい
ヒステリシス損	小さい	大きい
磁壁の動きやすさ	動きやすい	動きにくい（ピン止め）
主な機能	磁束の通路、エネルギー変換	安定した磁場の供給源
応用例	トランス鉄心、モーター鉄心	永久磁石（モーター、HDD）
代表材料	ケイ素鋼, パーマロイ	フェライト磁石, 希土類磁石

- **軟質磁性材料**：保磁力が小さく、透磁率が大きい材料です。これは、小さい外部磁場で容易に磁化・消磁できることを意味します。変圧器の鉄心のように、交流磁場で磁化の向きが高速に反転する用途では、ヒステリシス損や渦電流損を最小限に抑える必要があるため、ループ面積の小さい軟質材料が不可欠です。これを実現するには、磁壁がスムーズに移動できるよう、結晶の純度を高め、内部の歪みをなくすることが重要です [1]。
- **硬質磁性材料**：保磁力と残留磁化が共に大きい材料で、**永久磁石**とも呼ばれます。一度磁化さ

れると、その磁気を強く保持し、外部の反磁場（磁化を弱める磁場）に対して高い耐性を持ちます。電気自動車のモーターやハードディスクドライブのアクチュエータなど、強力で安定した磁場が必要な用途に用いられます。この特性は、材料の微細構造（微粒子化、不純物の析出、格子欠陥の導入など）を制御して、磁壁の動きを意図的に妨げる（ピン止めする）ことによって達成されます [1]。

このように、磁性材料の設計は、その応用目的から逆算されます。変圧器にはエネルギー損失の少ない「磁氣的に柔らかい」材料が、モーターには磁気を強力に保持する「磁氣的に硬い」材料が求められます。この要求の違いが、材料の組成や微細構造の制御へと繋がり、ヒステリシス曲線の形状を意図的にデザインする材料工学の核心をなしています。

3 超伝導材料：ゼロ抵抗と完全反磁性の世界

超伝導は、特定の物質を極低温に冷却した際に現れる、電気抵抗が完全にゼロになる現象です。この驚異的な性質は、エネルギー損失のない送電や強力な電磁石など、未来技術への大きな可能性を秘めています。

3.1 超伝導の二大特性：ゼロ抵抗とマイスナー効果

超伝導状態は、二つの独立した、しかし決定的に重要な現象によって定義されます。

1. **ゼロ電気抵抗**：物質を冷却していくと、ある**臨界温度**（りんかいおんど, T_c ）で電気抵抗が測定不可能なレベルまで、すなわち完全にゼロになります [1]。これは、一度流し始めた電流が、外部からのエネルギー供給なしに永久に流れ続ける「永久電流」を可能にし、ジュール熱によるエネルギー損失が一切発生しないことを意味します。
2. **マイスナー効果**：超伝導体は、単なる「完璧な導体」ではありません。超伝導状態にある物質は、外部から磁場をかけられると、その磁場を内部から完全に排除しようとします。この現象を**マイスナー効果**と呼び、**完全反磁性**とも言われます [1]。この磁場排除は、超伝導体の表面に外部磁場を打ち消すような**遮蔽電流**（しゃへいでんりゅう）が自発的に流れることで実現されます [13]。この効果は、磁石が超伝導体の上で浮上する磁気浮上の原理です。マイスナー効果は、先に磁場をかけた状態で臨界温度以下に冷却した場合でも発生し、内部にあった磁場が外に押し出されます。これは、電磁誘導の法則だけでは説明できない、超伝導に固有の量子現象です [15]。

3.2 微視的メカニズム：BCS 理論

なぜ電子は抵抗なく流れることができるのか。この謎を解き明かしたのが、バーディーン、クーパー、シュリファーによる **BCS 理論**です [1]。

- **クーパー対の形成**：BCS 理論の核心は、**クーパー対**（クーパーつい）と呼ばれる電子対の形成

です [1]。通常、マイナスの電荷を持つ電子同士はクーロン力で反発し合います。しかし、極低温の金属結晶中では、この反発力に打ち勝つ間接的な引力が働きます。

- **フォノンを介した引力**：この引力は、結晶格子（プラスのイオンの集まり）の振動を介して生まれます。一つの電子が結晶格子中を通過すると、そのマイナス電荷が周囲のプラスイオンを引き寄せ、格子にわずかな歪みを生み出します。この格子の歪みは、量子化された波（フォノン）として伝播します。このフォノンが、後から来る別の電子を引き寄せることで、結果的に電子間に引力が働いているかのような状況が生まれるのです [18]。
- **集団的な振る舞い**：こうして形成されたクーパー対は、個々の電子（フェルミ粒子）とは異なり、ボース粒子のように振る舞います。これにより、多数のクーパー対が同じエネルギー状態に凝縮し、一つの巨大な量子的な波として、結晶中の不純物や格子振動に散乱されることなく、集団で整然と流れることができます。これがゼロ抵抗の起源です。また、この凝縮状態が形成されると、フェルミ準位にエネルギーギャップが開き、クーパー対を壊して通常の電子に戻すには、このギャップ以上のエネルギーが必要となります [1]。

3.3 超伝導体の種類：第一種と第二種

超伝導体は、外部磁場に対する応答の違いから、**第一種超伝導体**と**第二種超伝導体**に分類されます。

- **第一種超伝導体**：
 - **振る舞い**：一つの臨界磁場（りんかいじば, H_c ）を持ちます。外部磁場が H_c に達するまでは完全なマイスナー効果を示しますが、 H_c を超えると超伝導状態は突然完全に破壊され、磁場が内部に侵入して常伝導状態に戻ります [1]。
 - **物質**：主に鉛 (Pb)、スズ (Sn)、水銀 (Hg) などの純金属に見られます [1]。
- **第二種超伝導体**：
 - **振る舞い**：二つの臨界磁場、下部臨界磁場（かぶりんかいじば, H_{c1} ）と上部臨界磁場（じょうぶりんかいじば, H_{c2} ）を持ちます [1]。
 - * $H < H_{c1}$ ：第一種と同様に、完全なマイスナー効果を示します。
 - * $H_{c1} < H < H_{c2}$ ：混合状態（こんごうじょうたい）と呼ばれる特有の状態になります。この状態では、磁場が磁束量子（じそくりょうし）または渦糸（vortex）と呼ばれる、磁束が通る管状の常伝導領域として、超伝導体内部への侵入を開始します。磁束量子の周りの領域は超伝導状態を保っています [1]。
 - * $H > H_{c2}$ ：超伝導状態は完全に破壊され、常伝導状態に戻ります。
 - **物質**：ニオブチタン (NbTi) のような合金や、高温超伝導体として知られる酸化物セラミックスなど、多くの実用的な超伝導体が含まれます [1]。

この分類は、技術的な応用を考える上で極めて重要です。第一種超伝導体の臨界磁場 H_c は非常に低いため、強力な電磁石を作ることはできません。なぜなら、コイル自身が発生させる強い磁場によって超伝導状態が壊れてしまうからです。

一方で、第二種超伝導体は、混合状態において磁場の部分的な侵入を許容することで、はるかに高

い磁場 (H_{c2} は H_c の数百倍から数千倍にもなる) の中でも超伝導状態を維持できます。磁束量子が侵入しても、その周囲の大部分はまだゼロ抵抗で電流を流せるため、強力な磁場を発生させることが可能です。この特性こそが、MRI 装置やリニアモーターカー、粒子加速器などで使われる超伝導電磁石を実現させているのであり、現代の超伝導技術のほとんどが第二種超伝導体を利用している理由です。

4 炭素材料：混成軌道が織りなす多様な構造

炭素は、その特異な電子的性質により、ダイヤモンド、グラファイト、フラーレン、カーボンナノチューブといった、驚くほど多様な構造（同素体）と物性を持つ材料を形成します。この多様性の根源は、炭素原子が形成する**混成軌道**（こんせいきどう）にあります。

4.1 sp^3 混成軌道：ダイヤモンドの正四面体構造

ダイヤモンドの類まれな硬さと電気的絶縁性は、 **sp^3 混成**と呼ばれる結合様式に由来します [1]。

- **メカニズム**：炭素原子の基底状態の電子配置は、2s 軌道に 2 個、2p 軌道に 2 個の電子を持っています。結合を形成する際、2s 軌道から 1 個の電子が空の 2p 軌道に昇位します。その後、1 つの 2s 軌道と 3 つの 2p 軌道が数学的に混合（混成）され、エネルギー的に等価な 4 つの新しい **sp^3 混成軌道**が形成されます [1]。これらの軌道は、互いの反発を最小にするため、正四面体の頂点方向を向き、軌道間の角度は 109.5° となります [1]。
- **構造と物性**：各炭素原子は、この 4 つの **sp^3 混成軌道**を用いて、隣接する 4 つの炭素原子とそれぞれ強力な共有結合（シグマ結合）を形成します。これにより、すべての原子が三次元的に固く結びついた、非常に安定で剛直なネットワーク構造が生まれます。価電子はすべてこの局在した結合に使われているため、自由に動ける電子が存在せず、ダイヤモンドは優れた**絶縁体**となります。この強固な結合ネットワークが、既知の物質の中で最高の硬度と高い熱伝導率をもたらすのです [1]。

4.2 sp^2 混成軌道：グラファイトの層状構造

鉛筆の芯やリチウムイオン電池の負極に使われるグラファイト（黒鉛）は、ダイヤモンドとは全く異なる物性を示します。その理由は **sp^2 混成**にあります [1]。

- **メカニズム**： **sp^2 混成**では、1 つの 2s 軌道と 2 つの 2p 軌道が混成し、3 つの等価な **sp^2 混成軌道**を形成します。これらの軌道は同一平面上に存在し、互いに 120° の角度をなす**正三角形**の配置を取ります。このとき、1 つの 2p 軌道は混成に関与せず、 **sp^2 軌道**が作る平面に対して垂直な向きに残ります [1]。
- **構造と物性**：各炭素原子は、3 つの **sp^2 混成軌道**を使って、同一平面上の 3 つの隣接炭素原子と強力なシグマ結合を形成します。これにより、蜂の巣のような六角形格子からなる平面シート、すなわち**グラフェンシート**が作られます [1]。一方、混成に関与しなかった p 軌道は、シー

トの上下に広がり、隣接する原子の p 軌道と重なり合って、シート全体に非局在化した π 電子系を形成します。この π 電子はシート内を自由に動き回ることができるため、グラファイトは電気をよく通します。

グラファイトの全体構造は、このグラフェンシートが多数積み重なった層状構造をしています。シート内の原子間結合は非常に強いですが、シートとシートの間を結びつけているのは弱いファンデルワールス力のみです。そのため、シート間は容易に滑り、これがグラファイトの柔らかさや潤滑性の原因となります。このように、電気伝導性や機械的強度が方向に強く依存する性質を異方性（いほうせい）と呼びます [1]。

炭素材料の物性を理解する上で、この混成軌道の概念は中心的な役割を果たします。物質の巨視的な特性（硬いか柔らかいか、電気を通すか通さないか）は、原子レベルの結合様式、すなわち電子軌道の幾何学的配置と電子の局在・非局在の度合いによって直接的に決定されます。この原理は、グラフェンシートを丸めて作られるカーボンナノチューブや、球状に閉じたフラーレンといった、他の sp^2 炭素材料のユニークな性質を理解する上でも同様に適用されます。

5 主要な材料解析手法：物質構造を探る眼

材料の優れた特性を理解し、さらに新しい機能を持つ材料を開発するためには、その微細な構造を正確に知ることが不可欠です。ここでは、試験範囲で指定された 3 つの重要な解析手法について、その原理と、それによって何がわかるのかを解説します。

5.1 X 線回折（XRD）：結晶構造の解明

X 線回折（X-ray Diffraction, XRD）は、物質が結晶質か非晶質か、そして結晶質であればどのような原子配列を持つかを調べるための最も基本的な手法です。

- 原理：結晶に原子間距離と同程度の波長を持つ X 線を照射すると、X 線は各原子によって散乱されます。結晶中では原子が周期的に配列しているため、特定の方向（角度）に進む散乱 X 線は互いに強め合い（建設的干渉）、特定の方向にだけ強い回折 X 線が観測されます。この現象はブラッグの法則によって記述されます [1]。
- ブラッグの法則：

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

ここで、 n は整数（回折の次数）、 λ は X 線の波長、 d は結晶内の原子面の面間隔、 θ は X 線の入射角（ブラッグ角）です。この式は、異なる原子面で反射された X 線の経路差（ $2d \sin \theta$ ）が、波長の整数倍になるときにのみ、波が同位相で重なり合って強い回折が起こるという条件を示しています [1]。

- わかること：
 - 結晶構造の同定：得られる回折パターン（回折ピークの位置と強度）は物質固有のものであり、データベースと照合することで物質の種類を特定できます。
 - 格子定数：ピークが現れる角度 2θ からブラッグの法則を用いて面間隔 d を精密に計算し、

- 結晶格子の大きさと形（格子定数）を決定できます [1]。
- **結晶粒径**：回折ピークの幅（半値幅）は、結晶子の大きさに逆比例します。この関係を利用したシェラーの式を用いることで、ナノメートルオーダーの平均結晶粒径を見積もることができます [1]。
 - **結晶性**：ピークが鋭く（シャープで）強度が大きいほど、結晶性が良いことを示します。逆に、ピークが幅広く（ブロードで）弱い、あるいはハローパターンと呼ばれるなだらかなパターンが見られる場合は、結晶性が低い、非晶質（アモルファス）であることを示唆します [1]。

5.2 電子顕微鏡：ナノスケールの可視化

可視光の波長（数百 nm）よりもはるかに小さい構造を観察するためには、より波長の短いプローブが必要です。電子顕微鏡は、加速した電子ビーム（波長は pm オーダーにもなる）を用いることで、光学顕微鏡をはるかに超える高い分解能を達成します [1]。

- **走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）**：
 - **原理**：細く絞った電子ビームを試料表面で走査（スキャン）し、電子ビームと試料の相互作用によって発生する二次電子や反射電子を検出して、像を形成します [1]。二次電子の放出量は試料表面の凹凸や傾斜に敏感なため、表面形状を反映した像が得られます。
 - **わかること**：ミクロンからナノメートルスケールでの試料の表面の凹凸や形態を、非常に深い焦点深度で観察できます。そのため、立体感のある画像が得られるのが特徴です [1]。
- **透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope, TEM）**：
 - **原理**：電子ビームを、数 10 nm～100 nm 程度にまで極めて薄く加工した試料に透過させ、その透過電子を電磁レンズで拡大して結像させます [1]。
 - **わかること**：試料の内部構造を非常に高い分解能で観察できます。結晶の格子縞や、さらには個々の原子コラムを直接可視化することも可能で、原子配列、結晶欠陥（転位、積層欠陥など）、析出物の分布などを詳細に解析できます [1]。

5.3 原子間力顕微鏡（AFM）：表面を「触る」顕微鏡

原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope, AFM）は、探針と試料表面の間に働く原子間力を検出することで、表面形状を画像化する走査型プローブ顕微鏡の一種です。

- **原理**：先端が原子レベルで鋭いチップ（探針）を、カンチレバーと呼ばれる微小な板ばねの先端に取り付け、これを試料表面に近づけて走査します。チップと試料表面の原子の間に働く微弱な力（引力や斥力）によってカンチレバーがたわみます。このたわみ量を、カンチレバーの背面に当てたレーザー光の反射位置の変化としてフォトダイオードで検出し、コンピューターで処理することで、表面の三次元的な凹凸像を構築します [1]。
- **わかること**：

- 高分解能な表面形状：ナノメートルオーダー、時には原子レベルの分解能で表面の凹凸を測定できます [1]。
- 測定環境を選ばない：電子顕微鏡と異なり、真空を必要とせず、大気中や液中での観察が可能です [1]。
- 導電性が不要：電子ビームを使わないため、絶縁性の試料（高分子、セラミックス、生体試料など）でも、導電性コーティングなどの前処理なしでそのまま観察できます [1]。
- 表面物性の評価：探針と試料の相互作用を解析することで、形状だけでなく、摩擦力、粘着力、硬さ（弾性）、磁気力、電気伝導性といった局所的な物理特性をマッピングすることも可能です [1]。

表 3 解析手法の比較

解析手法	物理原理	プローブ	主要情報	主な要件
XRD	ブラッグの法則	X 線	結晶構造, 格子定数, 結晶性 (バルク平均)	粉末/バルク, 結晶性
SEM	二次電子・反射電子検出	電子ビーム	表面形状, 組成分布 (EDS)	固体, 真空, 導電性
TEM	電子ビーム透過	電子ビーム	内部構造, 原子配列, 欠陥 (局所)	極薄膜, 真空
AFM	原子間力検出	探針	表面形状 (原子分解能), 表面物性	平滑, 導電性不要, 大気/液中可

付録：重要用語集（穴埋め問題対策）

- **pn 接合 (pn-junction)**：p 型半導体と n 型半導体を接合した構造。ダイオードやトランジスタの基本。
- **順バイアス (forward bias)**：pn 接合の p 側に正、n 側に負の電圧を印加すること。電流が流れやすくなる。
- **再結合 (recombination)**：電子と正孔が出会って対消滅する現象。LED ではこのエネルギーが光になる。
- **バンドギャップ (bandgap)**：半導体や絶縁体における、電子が存在できないエネルギー帯（禁制帯）の幅。光の色を決める。
- **磁気モーメント (magnetic moment)**：原子が持つ磁石としての強さと向き。電子のスピンと軌道運動に由来する。
- **常磁性 (paramagnetism)**：磁場に弱く引き付けられる性質。磁場がなくなると磁性を失う。
- **反磁性 (diamagnetism)**：磁場に弱く反発する性質。すべての物質が持つ。

- 強磁性 (**ferromagnetism**) : 磁場に強く引き付けられ、磁化が残る性質。鉄、コバルト、ニッケルなど。
- 反強磁性 (**antiferromagnetism**) : 隣接スピンの向きが逆向きに揃い、全体の磁化がゼロになる性質。
- フェリ磁性 (**ferrimagnetism**) : 隣接スピンの向きが逆向きだが大きさが異なり、正味の磁化が残る性質。フェライトなど。
- ヒステリシス曲線 (**hysteresis loop**) : 強磁性体において、外部磁場 H と磁化 M の関係が示すループ状の曲線。
- 軟質磁性材料 (**soft magnetic material**) : 保磁力が小さく、容易に磁化・消磁できる材料。トランスの鉄心など。
- 硬質磁性材料 (**hard magnetic material**) : 保磁力が大きく、磁化が消えにくい材料。永久磁石。
- BCS 理論 (**BCS theory**) : フォノンを介した電子対 (クーパー対) の形成によって超伝導を説明する理論。
- マイスナー効果 (**Meissner effect**) : 超伝導体が内部の磁場を完全に排除する現象。完全反磁性。
- 第一種超伝導体 (**Type I superconductor**) : 臨界磁場 H_c で超伝導が完全に壊れる超伝導体。
- 第二種超伝導体 (**Type II superconductor**) : H_{c1} と H_{c2} の間の混合状態で、磁束の侵入を許しながら超伝導を保つ。
- 混成軌道 (**hybrid orbital**) : 原子が結合を作る際に形成される、複数の原子軌道が混ざり合った新しい軌道。
- sp^3 混成軌道 (**sp^3 hybrid orbital**) : 1 つの s 軌道と 3 つの p 軌道からなる混成軌道。正四面体構造を取り、ダイヤモンドを形成する。
- sp^2 混成軌道 (**sp^2 hybrid orbital**) : 1 つの s 軌道と 2 つの p 軌道からなる混成軌道。平面三角形構造を取り、グラファイトを形成する。
- X 線回折 (**X-ray diffraction**) : 結晶格子による X 線の回折現象を利用して、結晶構造を解析する手法。
- 電子顕微鏡 (**electron microscope**) : 波長の短い電子線を用いて、光学顕微鏡よりはるかに高い分解能で物質を観察する装置。
- 原子間力顕微鏡 (**atomic force microscope**) : 探針と試料の間に働く原子間力を利用して、表面の凹凸をナノスケールで測定する顕微鏡。

参考文献

- [1] R7 期末の範囲スライド.pdf
- [2] pn 接合の電気特性：順方向・逆方向バイアス | Semi journal, <https://semi-journal.jp/basics/beginner/bias.html>
- [3] LED の発光原理 | 東芝デバイス & ストレージ株式会社 | 日本, <https://toshiba.semicon-storage.com/jp/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/chap5/chap5-2.html>
- [4] LED が光るしくみ (4) - 光と色と - ココログ, <https://optica.cocolog-nifty.com/blog/>

2011/05/4-8467.html

- [5] 「発光ダイオード,LED」-ナノエレクトロニクス, <https://www.s-graphics.co.jp/nanoelectronics/kaitai/led/3.htm>
- [6] LED の発光波長 | 東芝デバイス & ストレージ株式会社 | 日本, <https://toshiba.semicon-storage.com/jp/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/chap5/chap5-3.html>
- [7] 発光ダイオードの動作原理 - 光センサセミナー | KODENSHI CORP., https://www.kodenshi.co.jp/top/seminar/vol_03/
- [8] 全く磁化の無い新しいハーフメタルの創製に成功 - 大阪大学 ResOU, https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2022/20220628_1
- [9] 電 磁 鋼 板 と 鉄 損 測 定 (第 1 回) | 学 び 情 報 詳 細 - TechEyesOnline, <https://www.techeyesonline.com/article/tech-column/detail/Reference-ElectricalSteelSheet-01/>
- [10] ハイブリッド車、電気自動車のモーター用磁石の製造におけるモリブデンの役割, <https://www.allied-material.co.jp/media/molybdenum/molybdenum-role>
- [11] モータにおける永久磁石の役割 | 種類と選定方法についても解説 - ユニテック株式会社, <https://www.unitec-mt.com/permanent-magnet/>
- [12] 超伝導体の特徴!! - Akimitsu Laboratory Homepage, https://www.okayama-u.ac.jp/user/akimitsu/achievements/study_sc_chara.html
- [13] www.nuee.nagoya-u.ac.jp, <https://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/yoshidalab/superconductor.html#:~:text=%E8%B6%85%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E4%BD%93%E3%81%AB%E7%A3%81%E5%A0%B4%E3%81%8C%E3%81%8B%E3%81%8B%E3%82%8B%E3%81%A8%E3%80%81%E8%B6%85%E4%BC%9D%E5%B0%8E,%E3%81%93%E3%82%8C%E3%81%8C%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%83%8A%E3%83%BC%E5%8A%B9%E6%9E%9C%E3%81%A7%E3%81%99%E3%80%82>
- [14] 電気抵抗ゼロと永久電流, https://pubdata.nikkan.co.jp/uploads/book/pdf_file5122da68130bd.pdf
- [15] マイスナー効果 - Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%83%8A%E3%83%BC%E5%8A%B9%E6%9E%9C>
- [16] マイスナー効果 - NeoMag 用語集, https://www.neomag.jp/mag_navi/glossary/glossary_main.php?title_name=%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%83%8A%E3%83%BC%E5%8A%B9%E6%9E%9C
- [17] 超伝導体とマイスナー効果、BCS 理論について - 化学徒の備忘録 (かがろく), <https://www.syero-chem.com/entry/2018/08/30/%E8%B6%85%E4%BC%9D%E5%B0%8E%E4%BD%93%E3%81%A8%E3%83%9E%E3%82%A4%E3%82%B9%E3%83%8A%E3%83%BC%E5%8A%B9%E6%9E%9C%E3%80%81BCS%E7%90%86%E8%AB%96%E3%81%AB%E3%81%A4%E3%81%84%E3%81%A6>
- [18] 補足説明, <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20010726/hosoku.html>
- [19] BCS 理論の概要, <https://www.px.tsukuba.ac.jp/~onoda/cmp/node77.html>

- [20] 超伝導 まとめ #物性物理 - Qiita, https://qiita.com/is_it_stable/items/72ee4ca408632e1137f5
- [21] 超伝導入門 - 日本加速器学会, <https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F16%2Fp240-250.pdf>
- [22] 超伝導体中の電子が一つの大きな波の様に運動できるようになります。この波は簡単に散乱要因を乗り越えることができるため、邪魔されずに運動することが可能となり、ゼロ抵抗が実現されます。、<https://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/yoshidalab/superconductor.html>
- [23] スピン三重項超伝導体 Sr₂ の 混合状態における弱磁場磁化異常 - 北海道大学 理学部 物理学科, <https://phys.sci.hokudai.ac.jp/LABS/kyokutei/syuuron/Thesis.pdf>
- [24] 混合状態について, <http://zairyo.susi.oita-u.ac.jp/kondolab/thonda/kiroku/mix.htm>
- [25] XRD(X 線回折装置) の原理と概要をわかりやすく説明 | Malvern Panalytical, <https://www.malvernpanalytical.com/jp/products/technology/xray-analysis/x-ray-diffraction>
- [26] X 線回折装置の原理、応用、最新技術とは - アズサイエンス, <https://azscience.jp/column/category/top05-sub17/>
- [27] X 線回折法の原理 - イビデンエンジニアリング株式会社, <https://www.ibieng.co.jp/analysis-solution/x0004/>
- [28] 走査型プローブ顕微鏡 (SPM) とは？ AFM・STM の違いと基本原理をわかりやすく解説, <https://bunseki-keisoku.com/article/normal/scanning-probe-microscope-afm-stm/>
- [29] 「原子間力顕微鏡 (AFM)」と「電子顕微鏡 (SEM)」の違いを調査, <https://www.pico-afm.com/comparison/sem.html>