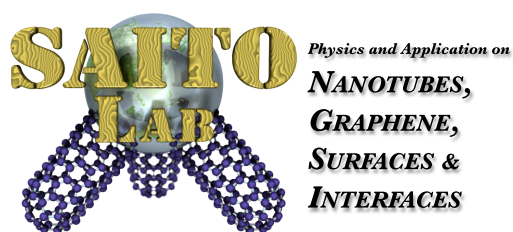


応用物理学実験 第二・第三
(IV) 反射高速電子回折の実験
実験手順書

実験室: 工学研究科三号館南棟 4階 462号室
担当教員居室: 工学研究科三号館南棟 4階 465号室



名古屋大学大学院 工学研究科
量子工学専攻 齋藤研究室

<http://www.surf.nuqe.nagoya-u.ac.jp/>

平成 27 年 4 月 1 日

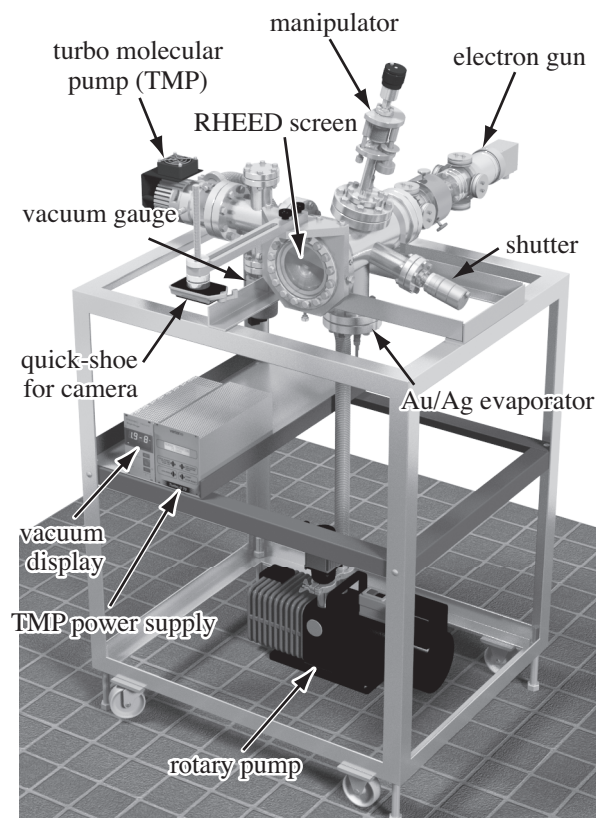
厳守事項

1. 実験室内での 飲食は厳禁。
2. 濡れた傘は実験室に持ち込まず、廊下に出しておくこと。
3. 欠席や遅刻はしないこと。10分を超える遅刻は欠席と見なし、その日の実験は受けられない。ただし、病欠や公欠、交通機関の遅延等、本人の責によらない事情がある場合は、第三者が発行した診断書、欠席届、遅延証明書などの書類の提出をもって後日補講を行う。5回のうち2回以上欠席の場合には、レポート提出を認めない。
4. 高電圧機器 (最大 12 kV) を用いて実験 するので、事故を起こさないよう装置の取り扱いには十分注意し、少しでも不明な点があったら必ず担当教員に確認すること。
5. 学生実験装置以外の装置類には手を触れないこと。

その他の注意事項

- 実験を行う前に手順書を良く読み、作業の内容を理解してから作業にかかること。不十分な知識で作業を行うと感電などの危険もあるので十分に注意する。
- 実験は A、B のグループに分けて行うことがあるが、装置は1台しかないので同時には実験できない。互いに協力しあって作業を進めること。
- 実験ノートは重要な記録である。グループ毎にノートを用意しているので、グループ員持ち回りで記録係を決めること。
- 実験は分担を決めて各人必ず何らかの役割を果たすこと、また自分の手が空いているときは他人の作業を観察すること。
- 実験データの解析はその日のうちに行うこと。次回実験では前回データを参考に作業する。
- 実験の日程の関係で、本手順書に沿ったスケジュールで実験を行うとは限らない。その場合には、逐次担当教員から指示するので、それに従うこと。

実験装置の各部の名称



注：上図では省略しているが、蛍光板周りには外光を遮蔽するための筒が、クイックシューにはデジタル一眼レフカメラが設置されている。

第1日目

1.1 既存の Si(111) 表面の観察

ここでは既に真空中に取り付けてある Si(111) 基板の表面の RHEED 観察を行う。この試料は前回実験グループが最後の実験を終えてから放置した物か、或は、新規のシリコンウェハを導入した物である。どのような試料かは担当教員の説明を聞くこと。

初回は電子銃の取扱などを担当教員が実際に操作しながら説明する。次回以降は各人が操作することになるので、手順を良く覚えておく。

1. 電子銃の起動

- 真空が 1×10^{-4} Pa 以下になっていることを確認して、高電圧電源及び5つのコイル用電源のスイッチを ON にする。
- フィラメントを指定値までゆっくりと上げる (流しすぎに注意)。
- ウェネルトを指定値まで上げる (この値は仮の値で、後で微調整する)。
- 電子銃高電圧の粗動つまみ (Coarse) を 10 kV にし、微動つまみ (Fine) で高電圧を指定値 (10.000 kV) までゆっくり上げる (この値が電子線の波長を決めるので正確に合わせる)。
- コイル用電源の AX と AY の電流値を指定値まであげる。
- DY を少し回して (約 0.3 A) 電子線が蛍光板に当たるように調整し、DX をスポットが左右の中心付近に来るように調整する。
- 蛍光板のスポットを見ながらウェネルトを調整し、スポット全体が均一で且つ最も明るくなるようにする。
- レンズを調整して最もスポットが小さくなるようにする。
- DX と DY を操作して試料からの反射回折が見えるようにする。
- 調整が完了したら、フィラメントを 1.2 A まで上げる (前項の調整前に上げて構わない)。
- 電子銃の電圧が変動している可能性があるため、再度値を確認し、ずれていたら修正する (電子銃の高電圧は随時調整すること)。

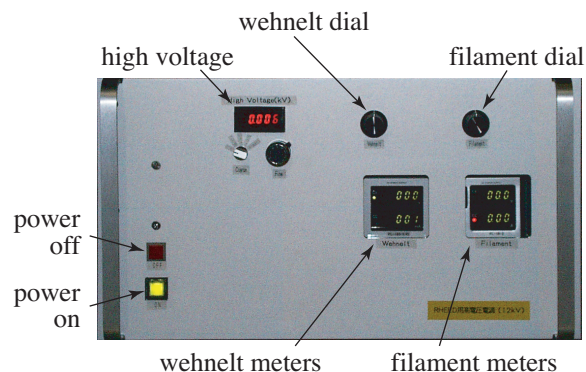


図 1.1: RHEED 高電圧電源の各部名称

2. 回折条件の調整

コンピュータと DX、DY のコイルを用いて RHEED パターンが見やすい状態に調整する。このとき、可能な限りパターンが左右対象になるように DX を微調整する。DY はパターンが最も明るくなるように調整する。回折条件は試料の加熱や通電に伴う電界によって容易にずれるので、パターンの確認や写真撮影毎に調整すること。

3. 写真の記録

RHEED 図形の記録はデジタル一眼レフカメラを用いて行う。カメラの基本的な調整・設定やコンピュータとの接続は教員が行う。写真撮影はコンピュータから行い、その場で画像確認、画像補正を行うことができる。撮影に際しては、適宜シャッタ速度をカメラ側で設定する必要がある。ファイル名は日付と時間で構成されたものになるので、実検ノートには撮影時間を記録し、その内容を具体的に記録する。撮影した写真はその場で人数分印刷する。

具体的な撮影手順、印刷手順は別途説明する。なお、希望があれば測定データファイルのコピーを行うので、USB メモリなどのメディアを持参して教員にその旨伝えること。

4. 電子銃の停止

- 次回以降の作業の参考にするため、電子銃の使用条件 (加速電圧、ウェネルト電圧、フィラメント電流、各コイルの電流) を記録する。
- 高電圧を 0 V にし (最初に Fine を 0 にしてから Coarse を 0 にする)、続いてウェネルトを 0 V、フィラメントを 0 A にする。
- コイル用電源の電流を全て 0 A に戻す。
- 高電圧電源および5台のコイル電源の電源を切る。

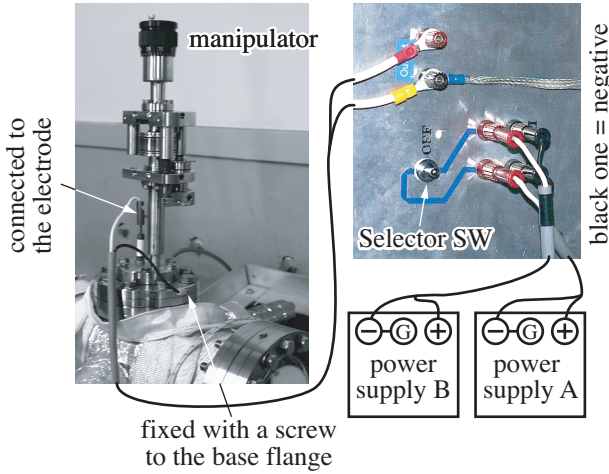


図 1.2: 試料加熱電源の各部名称

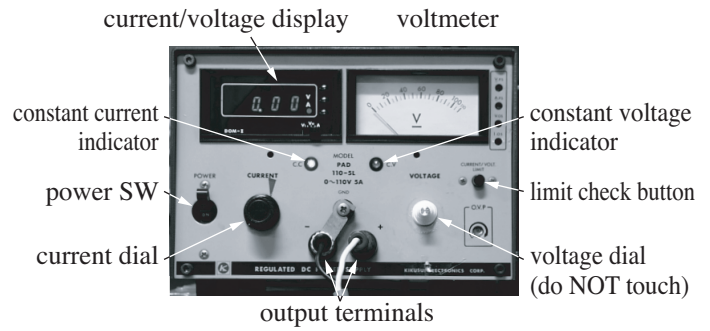


図 1.3: 試料加熱電源の各部名称

当教員が説明する。なお、放射温度計は精密な光学機器であるので乱暴な取扱は謹むこと。

1.2 Si 基板の温度校正

ここでは、半導体であるシリコンの温度-抵抗依存性を調べ、抵抗値から基板温度を見積もるためのグラフを作成する。ここで作成するグラフは本実験を通じて温度の基準となる。測定誤差を少なくするため同じ作業を2回行い(グループ分けをしている場合は、各1回)、その値を平均して以後の実験で用いる温度校正データとすること。なお、後述のバンドギャップの評価の結果がSiの値から大きくずれる場合には、一方のみのデータで温度校正を行った方がよいこともある。

1. 試料加熱電源の配線

試料加熱には2種類の電源を使い分ける。電源が入っていないことを確認し、図 1.2 の要領で配線を行う。

2. 試料の加熱

試料加熱を行う電源は図 1.3 のようになっている。試料加熱電流が5 A 以下のときは、切替スイッチを(LO)にして、電源 A のみで加熱を行う。試料が冷えているときには電流を流そうとしてもすぐに電流が流れず、定電圧表示ランプ(緑)が点灯する。このときには電流つまみを回さずにそのまま数秒待つ(そのままつまみを回し続けると突然大電流が流れてしまう)。30秒しても停電表示(赤)にならないときは、切替スイッチをA側にするのを忘れて高い可能性がある。

3. 試料抵抗値と温度の測定

試料に0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 [A] の電流を流し、それぞれの場合について電圧と基板温度(測定法は後述)を記録する。ただし、基板温度は電流が少ない場合には測定できない。また、電圧は時間とともに変化するので、ある程度安定した時点で測定を行うこと。測定中は真空度に常に注意し、 1×10^{-5} Pa を越えたら一旦加熱を中止して真空度が回復するまで待つ。

4. 基板温度測定法

基板温度測定は放射温度計を用いて行う。測定手順は担

5. 測定データの整理

加熱電流、基板抵抗値、温度を用いて図 1.4 に相当するグラフを描き¹、温度校正用データとする(温度の単位に注意!)。なお、抵抗 vs 温度のグラフは最小自乗法を用いて一次式に、抵抗 vs 電流のグラフは同じく最小自乗法を用いて二次式²にフィッティングすること。

1.3 本日の課題

次回実験までに以下の作業を行うこと。

- 400 °C~1300 °C の範囲をカバーするように基板温度校正グラフを作成せよ。
- R-T グラフの傾きからこの物質のバンドギャップ(単位 eV)を求め、参考資料と比較せよ(下記参照)。

真性半導体の電気抵抗

真性半導体(ドーパントがない半導体)の電気抵抗は

$$R \propto \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (1.1)$$

となることが知られている。ここで E_g 、 T はそれぞれ半導体のバンドギャップ、絶対温度である。半導体のバンドギャップは材料に固有の値で、半導体の性質の中でも非常に重要な物性の一つである。ほとんどの場合(本実験の場合も)半導体には n 型または p 型になるようにドーパントが入っているが、温度が十分に高い(> 約 300 °C) ときには真性半導体と見なすことができる。なお、ドーパントが入っていない半導体は室温ではほぼ絶縁体と同程度の抵抗値を示す。

¹電流-温度のグラフを作成しないのは、温度の逆数と抵抗値の対数との間には理論的に直線関係が存在するが、電流と抵抗値の間には理論式が存在せず外挿が困難であるからである。

²二次関数になるという理論は存在しない。あくまでも実験式としての関数である

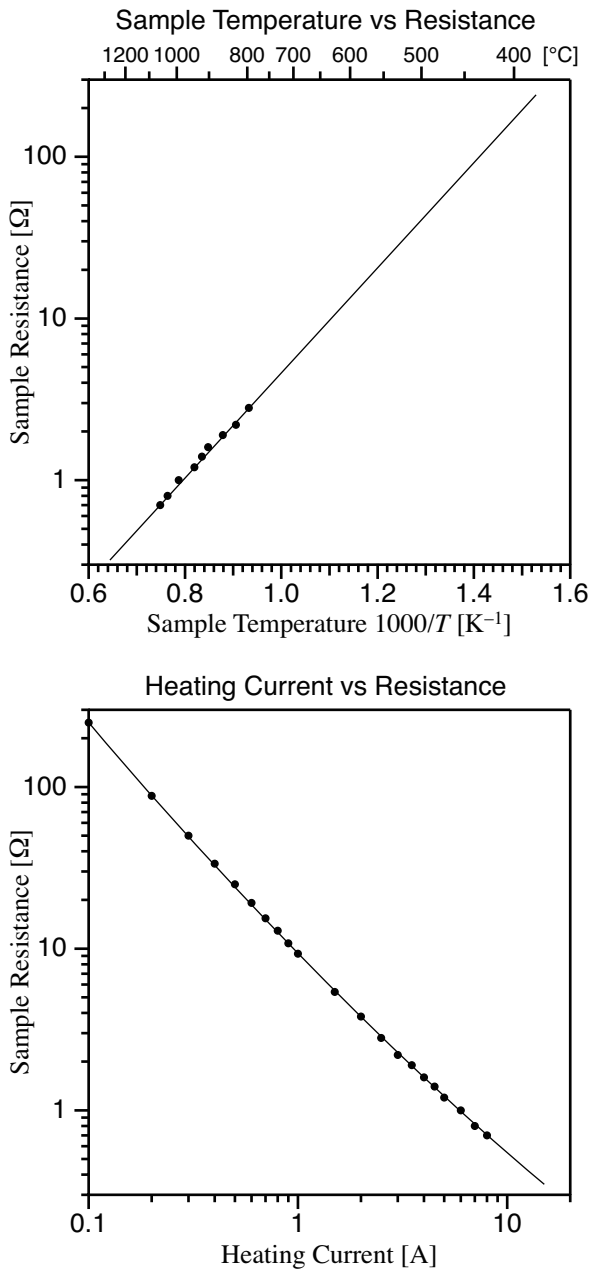


図 1.4: 試料温度較正グラフの例

参考資料

主な半導体材料の物性値を下記に示す。

● Si の物性値

- 質量数: 28.086
- 密度: 2329 kg/m³
- 格子定数 (結晶構造): 5.4307 Å (ダイヤモンド構造)
- 融点/沸点: 1410/2355 °C
- バンドギャップ: 1.206 eV (間接遷移)

● Ge の物性値

- 質量数: 72.59
- 密度: 5323 kg/m³
- 格子定数 (結晶構造): 5.65754 Å (ダイヤモンド構造)
- 融点/沸点: 937.45/2830 °C
- バンドギャップ: 0.785 eV (間接遷移)

● GaAs の物性値

- 質量数: 144.64
- 密度: 5320 kg/m³
- 格子定数 (結晶構造): 5.653 Å (閃亜鉛鉱 (Zinc-blende) 構造)
- バンドギャップ: 1.43 eV (直接遷移)

● GaN の物性値

- 質量数: 83.72
- 格子定数 (結晶構造): 3.189 Å (Wurtzite 構造)
- バンドギャップ: 3.5 eV (直接遷移)

● SiC の物性値

- 質量数: 40.097
- 密度: 3160 kg/m³
- 格子定数 (結晶構造): 4.359 Å (閃亜鉛鉱 (Zinc-blende) 構造 (3C))
- バンドギャップ: 2.23/3.0/3.3 eV (3C/6H/4H, 間接遷移)

第2日目

2.1 Si(111) 清浄表面の観察

ここでは、超高真空中で Si(111) 清浄表面を得て、その再配列構造である 7×7 構造を RHEED によって観察する。

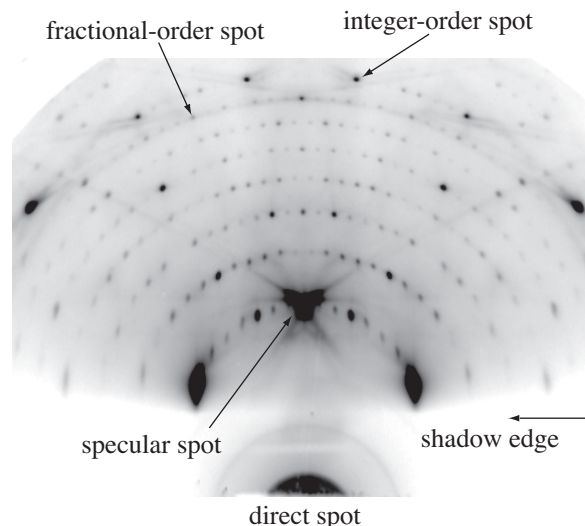


図 2.1: 清浄 Si(111) 7×7 表面の RHEED 図形の例

1. 電子銃の起動

前回同様 RHEED 電子銃を作動させ、蛍光板に RHEED パターンが写るよう電子銃と試料マニピュレータを調整する

2. 基板の清浄化 (フラッシング)

前回作成したグラフから基板温度 $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (K ではない!) のときの電流値を求める。求めた電流値より $1 \sim 2\text{ A}$ 程度低い電流値を目標値として基板を約 5 秒間加熱し、RHEED パターンが参考として与えられている清浄表面の RHEED パターン (図 2.1) に一致するかどうかを確認する。清浄なパターンと一致したらフラッシングは完了である (必要に応じて写真を撮影して比較すること)。清浄パターンが得られるまでこの作業を繰り返す。後日の実験のため、フラッシングを行ったときの条件 (加熱電流、フラッシング時間及び回数) を必ず記録しておくこと。また、用いた電流からフラッシング時の温度も求めておく。なお、Si の融点は約 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ であるので、過剰な電流を流しすぎないように十分に注意すること。基板が溶けてしまうと本日の実験が継続できないだけでなく、温度校正も再度行う必要がある。フラッシング作業の具体的手順は以下の通り。

- 2 つの加熱用電源の配線が試料加熱用になっており、電流つまみがいずれも 0 になっていることを確認。
- 電源の切替スイッチが電源 A (最大 5A) になっていることを確認。
- 2 つの電源のスイッチを入れる。
- 電源 B の電流確認ボタン (図 1.3 の limit check button) を押しながら電流つまみを約 1A に調整する。
- 電源 A を用いて試料に約 1A の電流を流す。
- 切替スイッチを一気に B に切り替える (途中で止めないように注意)。
- 電源 B を用いて目標の電流値まで速やかに且つ、絶対にオーバーしないように電流を流し、5 秒経過したら電流を 0 に戻す。

3. 清浄表面の RHEED パターンの観察と記録

試料マニピュレータを回転させてみてパターン変化を観察する。RHEED 条件下で逆格子ロッドがエwald球で切断されていることを確認する (全員がパターン観察を行うこと)。

回折条件を整えて RHEED パターンを記録する。

2.2 清浄表面の基板温度依存性

ここでは、Si(111) 清浄表面構造が基板温度によってどのように変化するかを観察する。変化を生じる温度 (相転移温度) がわかるように実験すること。

1. パターン変化の観察と記録

RHEED パターンを観察しながら基板温度をゆっくりと上げていき、RHEED パターンが大きく変化したところで基板加熱電流を保持する。その状態で RHEED パターンを記録、同時に加熱電流と真空度を記録する。加熱電流 5A までの範囲で変化が現れる毎に同様の操作を行う。最後に基板を室温に戻し、再度パターンを記録する。グループ分けしている場合には、上記作業を A、B 各グループでそれぞれ行う。

2. 電子銃の停止

前回同様、電子銃を停止し、試料加熱電源も OFF にする。

2.3 カメラ長の決定と逆格子変換の実習

試料が Si(111) 面であると仮定して、本日の実験で得られた RHEED パターンから実験装置のカメラ長を求める。具体的な手法に関しては、実験後の講義を参考にすること。

2.4 本日の課題

次回実験までに以下の作業を行うこと。

- RHEED 図形のうちの指定されたスポットに対して RHEED 図形→逆格子変換作業を行う。
- 変換された逆格子の単位胞の長さを求め、Si(111) の文献値と比較する。

第3日目

3.1 蒸着源の配線とガス出し

Ag、Auの蒸着源は外径3 mm、内径2 mmの窒化ホウ素(BN)製のつぼをタングステン線で巻いたもので、つぼの中に蒸着材料が入っている。このタングステン線に電流を流して加熱し、蒸着物を気化させて蒸着する(図3.1)。

実験前に蒸着源周辺に吸着している不純物を取り除くため、蒸着源を予備加熱してガス出しを行う必要がある。ガス出しが不十分であると不純物を蒸着してしまう可能性がある。

1. 蒸着源の配線

Ag蒸着源は奥側の電極と右側の電極との間に電流を流すようになっている。また、電源は試料加熱電源Bを流用する。このため、試料加熱用の配線(灰色)をはずし、蒸着用の配線(黒色)に付け替える。(作業時には必ず電源のスイッチを切ること!)

2. 電源の設定

蒸着源は定電圧モード(電圧指定)で駆動するため、電源の電圧つまみを0 Vに、電流つまみをほぼ半分(マーク位置)の位置に合わせる。これを忘れると電源ON時に蒸着源を破壊する可能性がある!

3. ガス出し

シャッタが閉じていることを確認し、真空計を見ながら真空度が 5×10^{-5} Paを越えないようゆっくりと電圧を指定値まであげ、その状態で1分間保つ。途中真空が悪化するようであれば一旦電圧を0 Vに戻して真空が落

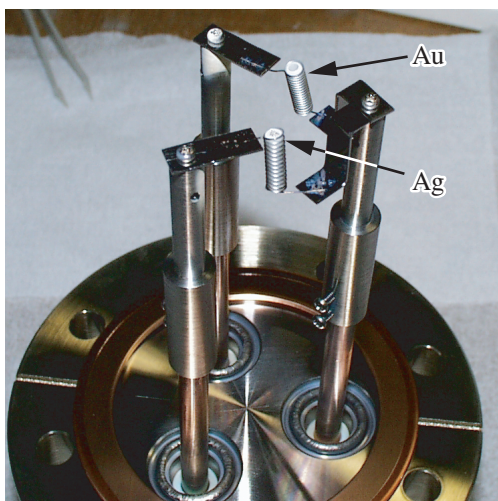


図 3.1: Ag および Au 蒸着源の写真

ち着くまで待ち、再度この作業を行う。1分間加熱しても真空が 5×10^{-5} Paを越えないようになったらガス出しは完了である。

4. Au 蒸着源のガス出し

上記の手順をAu(左側電極)に対しても行う。配線付け替えの際は、金属のコネクタ部が熱くなっている可能性があるため、必ず革手袋をはめて作業する。なお、ガス出しに用いる電圧はAgとは異なるので、注意すること。

5. 電子銃の準備

Ag、Au蒸着源のガス出しが完了したら、RHEED電子銃を起動してパターンが見える状態に調整する。

3.2 Ag 蒸着表面の観察

ここでは、2種類(室温および500°C)の基板温度でSi(111)清浄表面にAgを蒸着したときに表面構造がどのように変化するかを観察する。グループ分けを行っている場合には、AグループがAgの実験を、BグループがAu(次節)の実験を担当する。

1. 電子銃の起動

前回同様、電子銃を起動しRHEEDパターンが見える状態にする。

2. 基板の清浄化

加熱電源Bの配線を蒸着源から試料に変更し、電源の電流つまみを0 Aに、電圧つまみを最大に設定する。2.1節で行ったようにSi基板のフラッシングを行い、清浄表面を得る。また、このときのパターンを記録する。

3. Agの蒸着と蒸着中の変化の記録

- 加熱電源Bの配線を試料から蒸着源に変更し、電源の電圧つまみを0 Vに、電流つまみをほぼ半分(マーク位置)の位置に合わせる。
- 基板温度を設定する(500°Cのときのみ)。
- 真空に注意しながら蒸着源電源の電圧つまみを指定値まで30秒~1分程度かけてゆっくり上げる。この途中で真空が 5×10^{-5} Paより悪くなるようであれば、再度上記ガス出し作業を行う(ガス出し後は基板の清浄化も再度行うこと)。
- 指定値を保って30秒間待ち、シャッタを開ける(目盛はマイナス30度)。このとき、シャッタを回しすぎないように必ずシャッタの目盛を確認すること。
- シャッタを開けて蒸着を行う。蒸着時間は別途指定する。蒸着中は30秒毎に写真撮影を行う(蒸着源が明るくなっているので、シャッタ速度やフィラメント電流を適宜調整すること、ただしフィラメント電流は1.27 Aを上限とする)。

- 指定時間を経過したらシャッタを閉め(目盛0の位置)、蒸着源及び基板の加熱を停止する。このとき、シャッタを回しすぎないように必ずシャッタの目盛を確認すること。

4. Ag 蒸着後の表面の観察と記録

蒸着終了して基板温度を室温に戻した後、改めて写真撮影を行う。また、試料マニピュレータを操作して電子線の入射方位を変えたときにパターンがどのように変化するか観察(適宜記録)する。

基板を再びフラッシングして清浄表面に戻し、基板温度を変えた実験を行う。

3.3 Au 蒸着表面の観察

Agと同じ要領でAuの蒸着を行う。ただし、AgとAuの蒸着量が等しくなるように、Agの蒸着実験中に蒸着速度の計算を行っておくこと。蒸着速度の計算方法は下記を参照する。また、全ての実験が完了したら電子銃の停止作業を行い、試料加熱電源・蒸着源の電源を全てOFFにする。スイッチの切り忘れが無いよう注意すること。

3.4 討論の準備

次回(4日目)は討論である。以下の点に注意して討論に備えること。

- 自分たちの行った実験内容(どのような条件で何を行ったのか)を正確に把握する
- 加熱電流値や蒸着時間から基板温度、蒸着量を求めておく
- 特徴的なRHEED図形についてRHEED図形→逆格子変換を行う
- 逆格子から表面構造を考える
- 表面構造変化から表面で何が起こったのか、なぜそのような変化が起こったのかを考える

蒸着量の計算方法

蒸着量は蒸着材料の蒸気圧から計算することができる。蒸着物の蒸気圧を P とすると、単位面積・単位時間あたりに蒸発する原子の数 n は

$$n = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad (3.1)$$

となる。ここで、 m 、 k 、 T はそれぞれ原子の質量、ボルツマン定数、蒸着物の温度である。るつぼの口の面積を A とすると、単位時間あたりにるつぼから飛び出す原子の量 N_0 は

$$N_0 = nA = \frac{PA}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad (3.2)$$

である。ここで、るつぼ-基板間距離を r として、飛び出した蒸着物は半径 r の半球に均等に蒸着すると仮定する。単位時間あたりに半球上に飛来する原子の数は N_0 であるので、半球上の単位面積あたりに飛来する原子の量 N は

$$N = N_0/2\pi r^2 \quad (3.3)$$

と書くことができる。基板の単位胞の面積を U とし、単位胞あたり1個の原子が蒸着されたときに1層(monolayer:ML)と定義すると、蒸着速度 R は

$$R = NU \text{ [ML/s]} \quad (3.4)$$

となる。

参考のため、各種の値を下記に示す。

- Agの物性値

- 質量数: 107.868
- 密度: 10500 kg/m³
- 格子定数(結晶構造): 4.08626 Å (FCC)
- 融点/沸点: 961.93/2212 °C

- Auの物性値

- 質量数: 196.9665
- 密度: 19320 kg/m³
- 格子定数(結晶構造): 4.07833 Å (FCC)
- 融点/沸点: 1064.43/2807 °C

- 物理定数

- ボルツマン定数: 1.380662×10⁻²³ J/K
- 質量単位: 1.6605655×10⁻²⁷ kg
- 素電荷: 1.6021892×10⁻¹⁹ C
- プランク定数: 6.626176×10⁻³⁴ Js
- 光速: 2.99792458×10⁸ m/s
- アボガドロ数: 6.0221415×10²³

第5日目

5.1 自由実験

最終回は、蒸着源の組み合わせや蒸着量、基板温度などを自由に定めて蒸着や加熱を行い、表面がどのように変化するかを調べる。

前回の討論をふまえて、何を知りたいのか目的を明確にし、どのような結果が得られるかをある程度予想しながら行うこと。また、全体の実験時間を考慮して実験計画を立てること。

実験例

- 低温の基板に蒸着した後に基板温度を徐々にあげて、変化を観察する
- Auを蒸着した後にAgを蒸着する、或いはその逆
- 高温でAgまたはAuを蒸着して表面構造を変化させた後、室温でさらに蒸着を行う
- ドメインサイズの基板温度依存性を調べる
- 表面構造の蒸着量依存性を調べる

自由実験後には、得られたデータと事前予測を元に、簡単な討論を行う。

付録 A

A.1 主な真空ポンプの原理

A.1.1 ロータリポンプ

図 A.1 はロータリーポンプの原理図である。2枚のペーン(可動羽根板)がローテータと共に回転し、吸気口から空気を吸い込んで排気口へ送り出す。可動部分からの空気漏れを防ぐために一般的には油を用いている。このポンプは大気圧から使用することができるが、最大到達真空度は 10^{-1} Pa 程度が限界である。

A.1.2 ターボ分子ポンプ

図 A.2 はターボ分子ポンプの構造を示す図である。ガスタービンなどと同様に互いに向きの異なる可動羽根と固定羽根が何層かに重ねられており、可動羽根を数万 rpm (revolutions per minute) で回転させる(本実験で用いるものは 75000 rpm)。真空度が悪い ($> 10^{-3}$ Pa; 粘性流) ときには扇風機と同様の

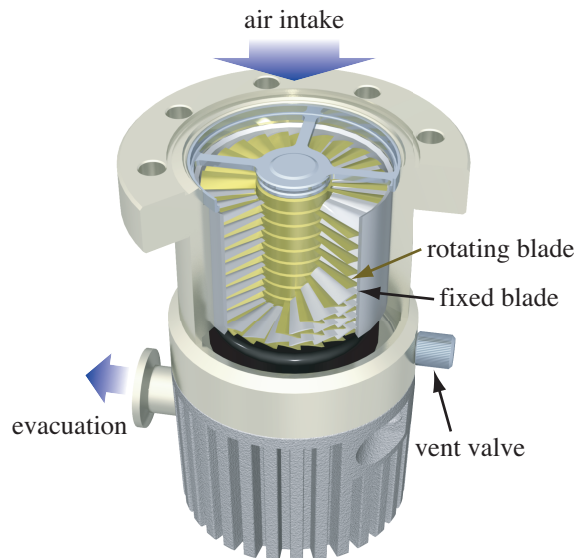


図 A.2: ターボ分子ポンプの動作原理

原理で気体を流すが、真空度が良くなって分子流の状態になると、たまたま羽根に飛来した分子に下方向の速度を与えて排気を行う。大気圧から使用することは可能であるが、後段を排気するためのロータリポンプなど補助ポンプが必要である。最大到達真空度は 10^{-7} Pa 程度である。

A.1.3 イオンポンプ

図 A.3 はイオンポンプの原理を示す図である。チタンでできた陰極とステンレスでできたハニカム状の陽極との間に数 kV の電圧を印加し、電界と同じ向きに数 K ガウスの磁場をかける。陰極から出た電子は磁場によって螺旋運動を行いながら陽極に向かうが、このとき容器内の気体をイオン化する。イオン化された気体分子は電界によって加速されて陰極に激しくぶつかり、陰極表面に蒸着されたチタンをスパッタ(叩き出し)する。スパッタされたチタン原子は周辺のスチンレス陽極などに堆積し、チタン薄膜を形成する。このチタン薄膜表面は活性なため、気体を一度吸着すると逃がさないという性質を持つ。チタン薄膜は堆積し続けるため陽極表面は常に活性なチタンで覆われ、吸着した気体分子はチタン薄膜に閉じ込められていく。このポンプの最大到達真空度は 10^{-9} Pa 以上にもなる。しかし、真空度が悪いと電極間で放電が起こってしまうため、 10^{-3} Pa 以下の真空になってからでないとう起動することができない。また、陰極表面を削りながら真空排気するため、真空が悪いところで長時間使用するとポンプ寿命を大幅に短くしてしまう。

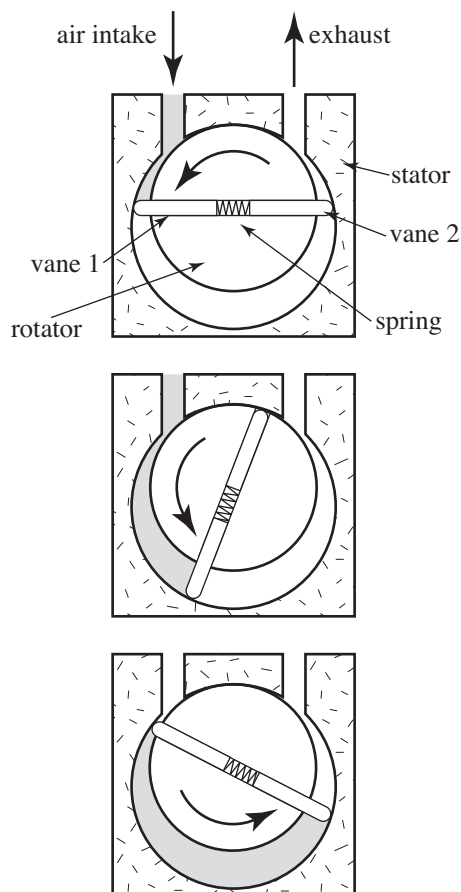


図 A.1: ロータリポンプの動作原理

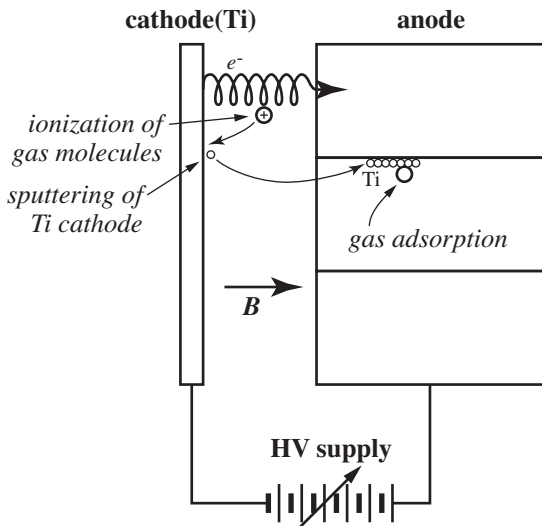


図 A.3: イオンポンプの動作原理

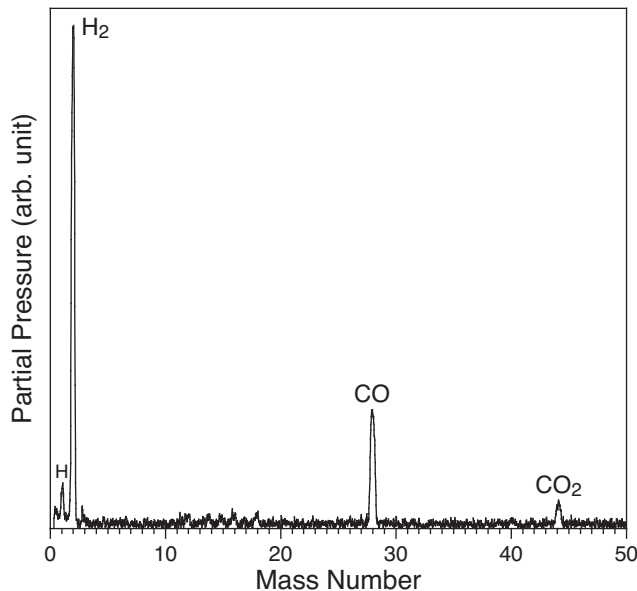


図 A.5: 超高真空中の残留ガス成分

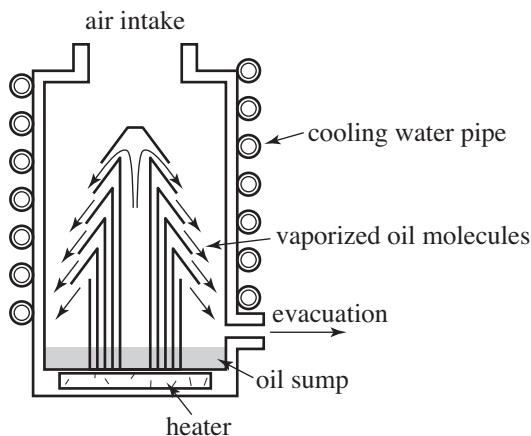


図 A.4: 油拡散ポンプの動作原理

A.1.5 その他のポンプ

真空ポンプには上記の他にもダイヤフラムポンプ、スクロールポンプ、チタンサブリメーションポンプ、ソーブションポンプ、クライオポンプなどさまざまなものがあり、用途に応じて使い分けられている。詳細はここでは述べないが、興味があれば参考文献やインターネットなどで検索してみると良い。

A.2 真空の質

良く知られているように大気の主成分は窒素と酸素である。しかし、真空ポンプで排気された真空容器中の残留ガス成分の構成比は大気のものとは大きく異なる。図 A.5 は超高真空 (1×10^{-7} Pa) 中の残留ガス成分を四重極質量分析器を用いて分析した結果を示すグラフである (学生実験装置のものではない)。横軸はガス分子の質量数、縦軸は各成分の分圧である。図から明らかなように質量数 2 すなわち H_2 が残留ガスの大半を占める。これは水素分子が真空ポンプで排気しにくいことに起因する。次に多いのは 28 であるが、これは N_2 ではなく CO によるものである (N_2 がある場合には N も同時に観察されるが、ここでは 12(=C) や 16(=O) の弱い信号は観察されるものの 7(=N) は観察できない)。ここではわずかしら観察されていないが、ベーキング (装置全体の焼き出し) が不足している場合には、 H_2O (=18) が顕著に現れることや、装置にリーク (漏れ) がある際には O_2 (=32) に信号が出ることも知られている。このように、真空中での実験を行う場合には単に真空度だけではなく残留ガスの構成成分にも考慮する必要がある。

A.1.4 油拡散ポンプ

図 A.4 は油拡散ポンプの構造を示す図である。容器内には傘状の金属板が配置されており、中には油が溜まっている。この油をヒータで加熱し、金属板に沿った油の気体の流れを作り出す。この流れによって気体分子を容器下部へ集め、排気口からロータリポンプなどで吸い出す。容器周囲の冷却水パイプは気化した油を再び液体に戻す役割を果たす。油を加熱したとき燃えないように、ロータリポンプなどである程度 (~ 1 Pa) 真空度を上げてからでないといけない。最大到達真空度は普通のもので 10^{-5} Pa 程度、油の気体対策をされたものは更に桁以上よい真空度を達成することが可能である。以前は油より蒸気圧の低い水銀を用いたものもあったが、現在は安全面から使われていない。また、最近は簡単に使えて油汚染の心配がないターボ分子ポンプの登場により、拡散ポンプが使われることは少なくなってきている。