

干渉計の組立と環境相および固液界面のその場観察

Assembling interferometers and in-situ observation of ambient phases and solid-liquid interfaces

¹木村勇氣、²村山健太、¹山崎智也、³真木孝雄

¹Yuki Kimura, ²Kenta Murayama, ¹Tomoya Yamazaki, ³Takao Maki

¹北海道大学低温科学研究所、²名古屋大学大学院工学研究科、³Free Optical R&D

¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

²Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya University

³Free Optical R&D

1. ねらい

干渉計を自ら組み立てることで原理を理解しながら、結晶成長の研究にどのように使えるかを学ぶ。また、干渉計を組み立てる際のポイントや光学部品の選定方法など、一般の教科書からは情報の得られ難い、より実践的な内容を学ぶ。

2. はじめに

光（電磁波）を物差しにした物理量の測定は、古くから非常に幅広い分野において行われてきた。例えば、ドップラーシフトを利用した速度測定、光の速度を基準にした時間測定、反射波を用いた距離測定など、光を用いることで様々な物理量を比較的容易に高い精度で求められる。特に、本テーマで扱う干渉法は、光束を二つ以上に分けて、再度重ね合わせた時の位相の違いを利用することで、光路長の違いや変化を分析する非常に強力な手法であるために、多分野にわたって利用されている。

干渉法は、波面のそろった二つ以上の光を重ね合わせる手法で、二つの光の位相が等しい波（光路長の違いが波長の整数倍の時）は強めあい、半波長ずれた波は打ち消し合うという、電磁波の性質を利用した手法である。一つの光源から出た光を二つに分け、片方を参照波とし、試料側を通るもう一方の波と重ね合わせた際に光路長の差から生じる干渉像を得ると、試料の状態変化（屈折率変化）に応じて光路長が変化するために干渉縞に変位が現れる。光源には、特にコヒーレンスの高い（可干渉性に優れた）レーザーを用いるのが簡便である。光路長とは、屈折率 n と距離 l の積として得られる量である。例えば、動く歩道を逆向きに進むことを考えると、動く歩道の速度が屈折率に相当する。いわば、光が進むときに感じる距離が光路長といえる。すなわち、屈折率が大きいと光路長も大きくなる。結晶の成長は、環境相の影響を敏感に反映するために、光を

用いた非接触の観察や測定は、結晶成長の研究において非常に効果的で、長年にわたり行われており、今も進化し続けている。本テーマでは、マッハツェンダー型とマイケルソン型の二つの基本的な干渉計の原理と特徴を知り、干渉計の解析方法を会得することで、結晶成長の研究に応用するための足掛かりをつかむ。

3. 干渉法

波長の整数倍に近づくと強めあい、その中間に近づくとつれ弱めあう、重ね合わせの原理を利用して、波長（周波数）や位相差を測定する手法を干渉法とよび、この原理を利用した機器を主に干渉計とよぶ。干渉法を用いた代表的な研究例としては、1805年のヤングの実験や、電子を用いた二重スリット実験による電磁波の粒子性と波動性の検証があげられる。

電磁波は、ある測定時間や空間内において、周波数が同じであり、位相差が一定となる同じ光としか干渉しないという特徴をもつ。そのため、同一光源の光を同じ強度の光に分けるのが基本となる。ここで、光の分割手段としては、ハーフミラーなどによる振幅分割に加えて、波面分割や偏光分割がある。光の周波数や位相差がランダムである場合には、時間平均によって干渉縞はならされてしまい、均一な強度分布からなるのっぺりとした像が得られることになる。

4. マッハツェンダー型干渉計（Mach-Zehnder type interferometer）

1890年代初めに L. Mach と L. Zehnder によって、別々に考えられた手法を用いた干渉

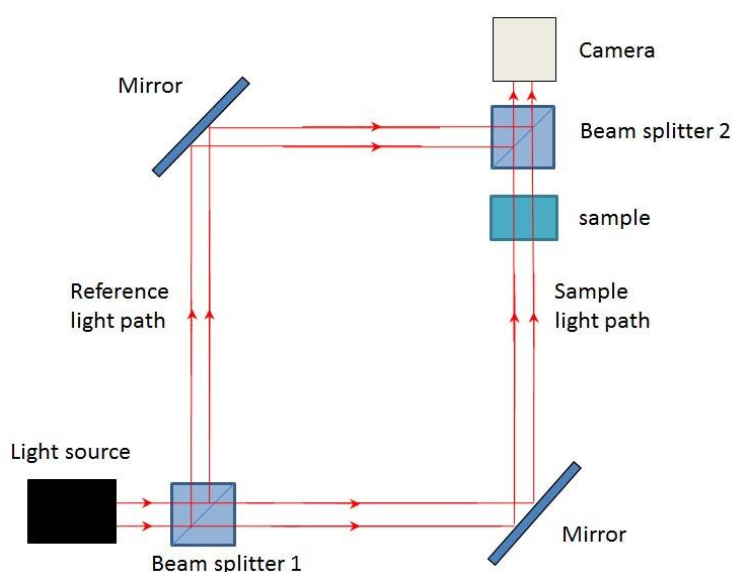


図 1. マッハツェンダー型干渉計の概念図。

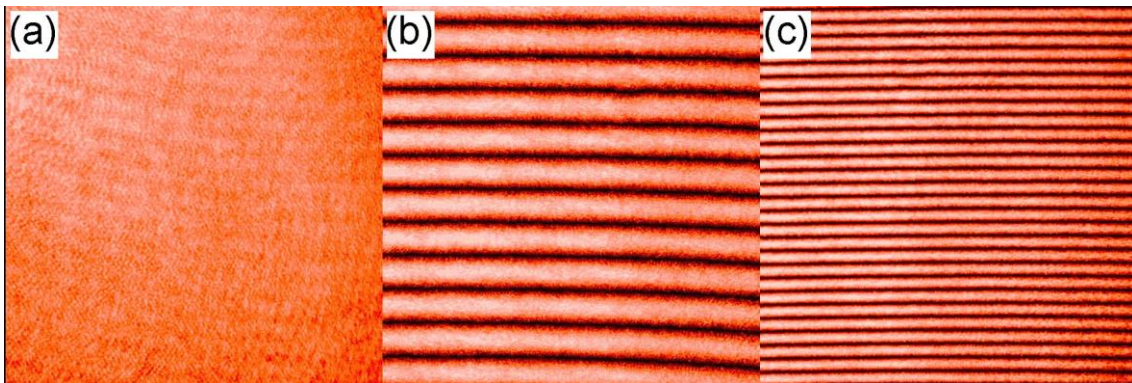


図2. マッハツェンダー型干渉計による生成した干渉像。(a) 二つに分けた光の光路長が等しい為に、均一なコントラストの像が得られている。無限遠とよぶ。(b) ミラーを傾けるなどして、像の上下方向に光路長の差を生じさせた状態。(c) さらに傾きを大きくし、光路長の差を増大させると、それに従って縞の間隔は狭くなる。

計である。図1に概念図を示す。光束を2つに分割し、一方の波面（光路）に対して他方の波面（光路）がどれだけ違っているかを調べる。基準となる波面は参照波面あるいは参照光と呼ばれる。図1の場合には、sampleを通過しない左側の光路を通る光が参照光となる。光源に波長 632.8 nm の He-Ne レーザーをコリメートした光を用いた例を図2に示す。最初のビームスプリッター(Beam splitter 1)で光束を二つに分け、二つ目のビームスプリッター (Beam splitter 2) で光を重ね合わせる。両者に光路長の差がない時には、図2aに示すように一様な輝度を持った像が得られる。ここで、一方のミラーを傾けて、画面上の上下で光路長に差が生じるようにすると、図2bに示すように、横縞が現れる。さらに傾けると、図2cに示すように縞は細くなる。この明暗一組の違いが 632.8 nm の光路長の差に対応している。ここで、図1に示すように試料 (sample) を入れると、光路長の差に応じて干渉縞に曲りが生じる。試料や環境が変化する様子を観察する際には、試料を入れることによる光路長変化に対応する物体 (ガラス板など) を参照光側に入れることで、光路長を等しくする。この物体をコンペンセータと呼ぶ。この干渉計を用いると、結晶周囲の濃度場や温度場を非接触で測定できる。

5. マイケルソン型干渉計 (Michelson type interferometer)

1880年代初頭にアルバート・エイブラハム・マイケルソン (Albert Abraham Michelson) によって考えられた手法を用いた干渉計である。マッハツェンダー型干渉計と原理は同様であり、大きな違いは反射光を干渉させる点にある。図3に示すように、参照ミラーと試料面をビームスプリッターから等価の距離におく。ここで、一般的には参照ミラーを参照面あるいは基準面と呼ぶ。例えば試料面に蒸着したり、結晶表面の場合には成長したりすると、その分光路長が短くなり、干渉縞は変位する。結晶表面にスパイラルや二

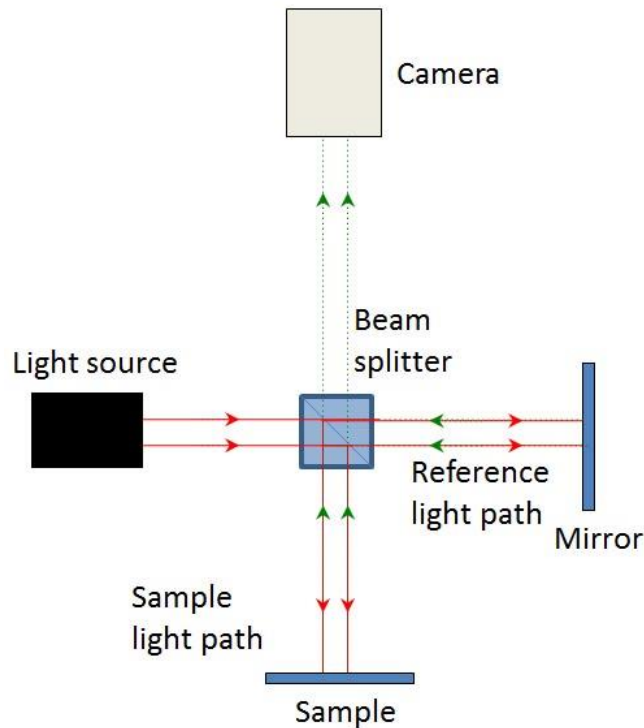


図 3. マイケルソン型干渉計の概念図。

次元成長島があると、高さの差異は干渉縞の変化となって現れる。これにより、表面形状を非接触で決定可能になる。

6. 干渉縞の解析方法

図 2b, c で観察されるような明暗の縞は等高線のように考えられ、ひと続きの縞は参照光に対して光路長が等しく変化していることを示している。縞の間隔は光源の波長とミラーを傾けるなどして作られた記録面上での光路差の勾配により決定される。この縞は、試料の状態が変化することで変位する。その時、縞の変位 Δd は式(1)に示す屈折率の変化 $\Delta n (= n_i - n)$ とその変化の距離 l および波長 λ に従う。マッハツェンダー型干渉計では、温度や濃度の状態変化によって屈折率 n_i が距離 l に渡って屈折率 n に変わることによって、干渉縞は式(1)に従って変位する。マイケルソン型干渉計で結晶表面を観察する場合には、結晶が r だけ成長することによって光路長が Δl 短くなる分、光の位相が変化し、干渉縞は式(2)に従って変位する。ここで、光は試料表面で反射するので、同じ光路を往復することになる。よって、光路長の変化 Δl は $2r$ に相当する。

$$\Delta d = \Delta n \frac{l}{\lambda} \quad (1)$$

$$\Delta d = n_i \frac{2r}{\lambda} \quad (2)$$

例えば、波長 632.8 nm のレーザーを用いた干渉計において、干渉縞が 1 本分変位したとすると、光路長の変化 Δnl は 6.328×10^{-7} m である。仮にマッハツェンダー型干渉計を用いて、 1×10^{-3} m (1 mm) の試料を用意したとすると、 $10^4 - 10^5$ オーダーの微小な変化を捉えられることになる。マイケルソン型干渉計では、溶液の屈折率が 1.5 あるとすると、 2.11×10^{-7} m 成長するごとに、縞が一本分変位する。例えば、1 nm/s の面成長速度で成長する結晶であれば、1 分ほどで結晶の成長速度を求めることができる。

7. 討論会での課題

今回は、2 班または 3 班に分かれて、それぞれマッハツェンダー型干渉計とマイケルソン干渉計の組み立てに取り組んでもらう。その後、マッハツェンダー型干渉計では、氷柱を試料位置に静置することで、氷柱の周囲の空気が冷やされて室温との間に作られる温度場の観察から試みる。その後、サイズの異なる氷柱を用いて、6 章で示した距離 l がいかに干渉縞の変位量に影響を与えるかを確かめる。マイケルソン型干渉計では、水溶液中に静置した塩素酸ナトリウムの結晶表面からの反射光を参照光と重ね合わせることで生じる干渉縞を観察する。ここで、温度を制御することで、この塩素酸ナトリウム結晶の成長速度と溶解速度の過飽和度依存性を求める。

さらに、時間がゆるせば、この塩素酸ナトリウム結晶と水溶液の界面をマッハツェンダー型干渉計で観察することで、濃度場を見ながら温度を変化させて、平衡温度を求める。