



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Low energy electron transmission through layered materials and chiral organic films

Neu, P.S.

### Citation

Neu, P. S. (2024, June 12). *Low energy electron transmission through layered materials and chiral organic films*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3762501>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3762501>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# ZUSAMMENFASSUNG

Moleküle, Kristallstrukturen und Viren sind zu klein, um sie mit dem bloßen Auge zu sehen. Trotzdem haben sie großen Einfluss auf unser tägliches Leben. Um diesen Mikrokosmos in immer kleinerem Maßstab zu erforschen, wurden Mikroskope erfunden. Wenn wir an Mikroskope denken, meinen wir in der Regel optische Mikroskope. Elektronenmikroskope hingegen erlauben uns andere Eigenschaften und kleinere Längenskalen zu untersuchen als mit konventionellen Lichtmikroskopen möglich ist. In dieser Arbeit ziehen wir immer wieder Parallelen zwischen Elektronen- und Lichtwellen, da sich die Elektronen wie quantenmechanische Wellen verhalten.

Anstatt eine Probe mit Licht zu beleuchten und zu messen, was reflektiert oder transmittiert wird, schicken wir bei einem Elektronenmikroskop Elektronen auf die Probe und erfassen, wie diese reflektiert oder transmittiert werden. Diese Experimente führen wir in unserem niederenergetischen Elektronenmikroskop (englisch low-energy electron microscope, LEEM) durch. Anstatt die Farbe, d. h. die Wellenlänge des Lichts, zu messen, können wir die Elektronenenergie messen (und einstellen), welche mit der quantenmechanischen Wellenlänge des Elektrons zusammenhängt. Sowohl in der Licht- als auch in der Elektronenmikroskopie nennen wir die Messung der Intensität als Funktion der Wellenlänge ein Spektrum.

Die Spektren dünner Materialien in dieser Arbeit lassen sich größtenteils durch Interferenz verstehen. Ebenfalls ein Konzept, das wir aus der Optik kennen. Optische Interferenz beantwortet Fragen wie: Warum erscheinen Seifenblasen in allen Farben des Regenbogens, obwohl sie aus farbloser Seifenlösung hergestellt sind? Die Antwort ist, dass die Wanddicke einer Seifenblase einige 100 Nanometer beträgt, was der Wellenlänge des Lichts nahekommt. Wenn das Licht zwischen der Vorder- und der Rückseite der Seifenblasenwand hin- und her gespiegelt wird, werden einige Wellenlängen, die der (doppelten) optischen Weglänge entsprechen, bevorzugt durchgelassen, während andere Wellenlängen reflektiert werden. Das Gleiche gilt für unsere dünnen Proben und die Wellenlänge der Elektronen, wenn auch in einer Größenordnung von weniger als einem Nanometer. Wir benutzen hierfür Elektronen mit einer Energie zwischen 0 und 25 eV, was sehr niedrig für ein Elektronenmikroskop ist. Daher fiel die Wahl auf das niederenergetische Elektronenmikroskop.

Graphen, zum Beispiel, ist eine kristalline Schicht aus Kohlenstoff, die nur ein Atom dick ist. Wenn wir zwei Graphenschichten haben, interferiert die Wellenfunktion des Elektrons, das zwischen diesen Schichten hin und her prallt, genauso wie die Lichtwelle in einer

Seifenblasenwand. Indem wir die Elektronenenergie und somit die Elektronenwellenlänge variieren, können wir die Spektren messen und finden ein charakteristisches Reflexionsminimum und Transmissionsmaximum bei 2,5 eV über dem Vakuumniveau. Wenn weitere Graphenschichten hinzugefügt werden, spalten sich diese Extrema auf und ergeben einen spektralen Fingerabdruck der Schichtanzahl. Die Intensität und Breite dieser spektralen Merkmale hängen mit der Wahrscheinlichkeit zusammen, dass das Elektron inelastisch aus seiner Bahn geworfen wird. Diese inelastische Streuung wird durch die inelastische mittlere freie Weglänge quantifiziert, die wir in Kapitel 3 bestimmen. Die inelastische mittlere freie Weglänge gibt an, wie weit ein Elektron im Durchschnitt fliegt, bevor es auf etwas trifft und Energie verliert. Je öfter das Elektron zwischen den Schichten hin und her springt, ohne gestört zu werden, desto schärfer sind die Extrema im Spektrum. Um es mit optischen Begriffen auszudrücken: Die Finesse des optischen Resonators (in der Optik ist es das Licht, das zwischen zwei Spiegeln hin und her geworfen wird) nimmt mit der Lebensdauer des Resonanzzustands zu.

Wir wenden dieses Interferenzmodell auf verschiedene zweidimensionale Materialien an, die vom leitfähigen Graphen über das isolierende hexagonale Bornitrid (hBN) bis hin zum halbleitenden Molybdändisulfid ( $\text{MoS}_2$ ) reichen.  $\text{MoS}_2$  unterscheidet sich von Graphen und hBN, da sich die Molybdänatome in einer 2D-Schicht befinden, die von oben und unten durch je eine Schicht Schwefelatome umschlossen („gesandwich“) ist. Daher sind die Proben von zwei- und dreischichtigem  $\text{MoS}_2$ , die wir in Kapitel 5 messen, schon relativ dick im Vergleich zu drei Lagen Graphen. Der Vergleich mit berechneten Reflexions- und Transmissionspektren zeigt, dass wir die Wechselwirkungen mit Elektronen sogar in diesem recht komplizierten Material messen und modellieren können.

Ein weiteres zentrales Konzept in der Physik ist Symmetrie: Wir fragen uns, ob ein Elektron wissen kann, ob es auf die Vorder- oder die Rückseite der Probe trifft. Bei einer Probe, die nur aus Graphen besteht, sind die Vorder- und die Rückseite der Probe nicht zu unterscheiden. Bei einer Probe, die auf der einen Seite aus Graphen und auf der anderen Seite aus hexagonalem Bornitrid besteht, kann es jedoch einen Unterschied in der Elektronenreflexion geben. In Kapitel 4 betrachten wir eine solche Probe mit gebrochener Symmetrie und zeigen, dass inelastische Streuungen entscheidend sind, wenn sich die Reflexion von der Unter- und Oberseite unterscheiden soll.

Im letzten Kapitel befassen wir uns mit einer anderen Art von Symmetriebrechung. Ein chirales Objekt ist ein Objekt, das nicht so gedreht und/oder verschoben werden kann, dass es wie seine gespiegelte Version aussieht. Das typische Beispiel für Chiralität (aus dem Griechischen *cheir*=Hand) sind unsere Hände, die spiegelbildlich sind, sich aber offensichtlich voneinander unterscheiden. Auf der Ebene von Molekülen haben chirale Moleküle die gleiche chemische Zusammensetzung, aber eine andere dreidimensionale Anordnung. Bemerkenswerterweise spielt diese Anordnung bei biologischen Prozessen eine große Rolle.

In Kapitel 6 verwenden wir ultraviolettes (UV) Licht, um Elektronen aus einer mit chiralen Molekülen bedeckten Oberfläche herauszuschlagen (photoelektrischer Effekt). Wir untersuchen die Wechselwirkung zwischen der Händigkeit der Lichtpolarisation und der Händigkeit der chiralen organischen Moleküle. Kürzlich wurde publiziert, dass die Chiralität

der Moleküle an den Spin der durchgelassenen Elektronen koppelt und diese filtert: ein Phänomen, das als chirality-induced spin selectivity-Effekt (CISS-Effekt) bekannt ist. Wir demonstrieren an 400 nm langen Goldnanostäbchen, dass wir den Polarisationszustand des Lichts beliebig variieren können. Da die Größe der Goldnanostäbchen mit der UV-Wellenlänge vergleichbar ist, kann das elektrische Feld (der Lichtwelle) eine resonante Schwingung der Goldelektronen anregen, wenn es entlang der langen Achse der Stäbchen polarisiert ist. Diese Verstärkung des elektrischen Feldes führt zu einer verstärkten Elektronenemission.

Darüber hinaus demonstrieren wir die Photoemission von chiralen BINAP-Molekülen. Allerdings konnten wir keinen Unterschied zwischen den Anregungen durch Licht mit entgegengesetzter Chiralität feststellen. Möglicherweise war unsere Moleküllschicht nicht ausreichend geordnet. Aus der Kontrollmessung von achiralen Teilen der Probe folgern wir, dass unser Versuchsaufbau empfindlich genug ist, um einen Emissionsunterschied von 1% zwischen der Anregung mit rechts- und linksseitig zirkular polarisiertem Licht zu erkennen. Die Abbildung des CISS-Effekts mit einer Auflösung im Nanometerbereich, im Gegensatz zur Messung von Durchschnittswerten einer ganzen Probe, wird ein besseres Verständnis und den Bau besserer Instrumente, die diesen Effekt nutzen, ermöglichen.