

V46 - Faraday-Effekt an Halbleitern

Jan Herdieckerhoff
jan.herdieckerhoff@tu-dortmund.de

Karina Overhoff
karina.overhoff@tu-dortmund.de

Durchführung: 29.06.2020 , Abgabe:

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	3
2	Theorie	3
2.1	Halbleiter	3
2.2	Effektive Masse	3
2.3	Faraday-Effekt	3
3	Durchführung	4
3.1	Aufbau	4
3.2	Justierung	5
3.3	Messung	6
4	Auswertung	6
4.1	Kraftflussdichte	6
4.2	Effektive Masse mittels Faraday-Rotation	7
5	Diskussion	10
	Literatur	11

1 Ziel

In diesem Versuch soll die effektive Masse der Leitungselektronen von n-dotiertem Galliumarsenid mithilfe des Faraday-Effekts bestimmt werden.

2 Theorie

2.1 Halbleiter

2.2 Effektive Masse

Die effektive Masse wird eingeführt, damit Elektronen wie freie Ladungsträger behandelt werden können. Im Kristall erfahren Elektronen ein Potential. In einem äußeren elektrischen Feld ändert sich deswegen nicht nur die kinetische Energie des Elektrons, sondern auch die potentielle. Bei der effektiven Masse ist das Potential berücksichtigt. [1]

Die effektive Masse von Elektronen im Leitungsband bzw. von Löchern im Valenzband ([1]) ist gegeben durch

$$m_{\text{eff}} = \hbar^2 \cdot \left(\frac{d^2 E}{dk_i dk_j} \right)^{-1}.$$

Die effektive Masse hat Tensorcharakter und gibt die inverse Krümmung der Dispersionsrelation $E(k)$ an. [1]

2.3 Faraday-Effekt

Die Polarisationssebene von linear polarisiertem Licht in einem Medium wird gedreht, wenn das Licht parallel zu einem Magnetfeld durch das Material läuft. [2] Eine schematische Darstellung des Faraday-Effekts ist in Abb. 1 zu sehen.

Damit der Kristall die Polarisationssebene des linear polarisierten Lichts bei der Transmission drehen kann (zirkulare Doppelbrechung), muss die Phasengeschwindigkeit für links- und rechtszirkular polarisiertes Licht in dem Medium verschieden sein. Das bedeutet, dass die Brechungsindizes verschieden sind. [3]

Die Faraday-Rotation wird durch folgende Formel ([3]) berechnet

$$\theta_{\text{frei}} = \frac{e_0^3}{8 \pi^2 \epsilon_0 c^3 m_{\text{eff}}^2} \frac{NB}{n} \lambda^2 = \frac{\theta}{L}, \quad (1)$$

wobei e_0 die Elementarladung ist, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, c die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, m_{eff} die effektive Masse, N die Donatorenkonzentration, B die

Magnetfeldstärke, n der Brechungsindex, L die Probendicke und λ die Wellenlänge. Die Einheit der Faraday-Rotation ist rad/m .

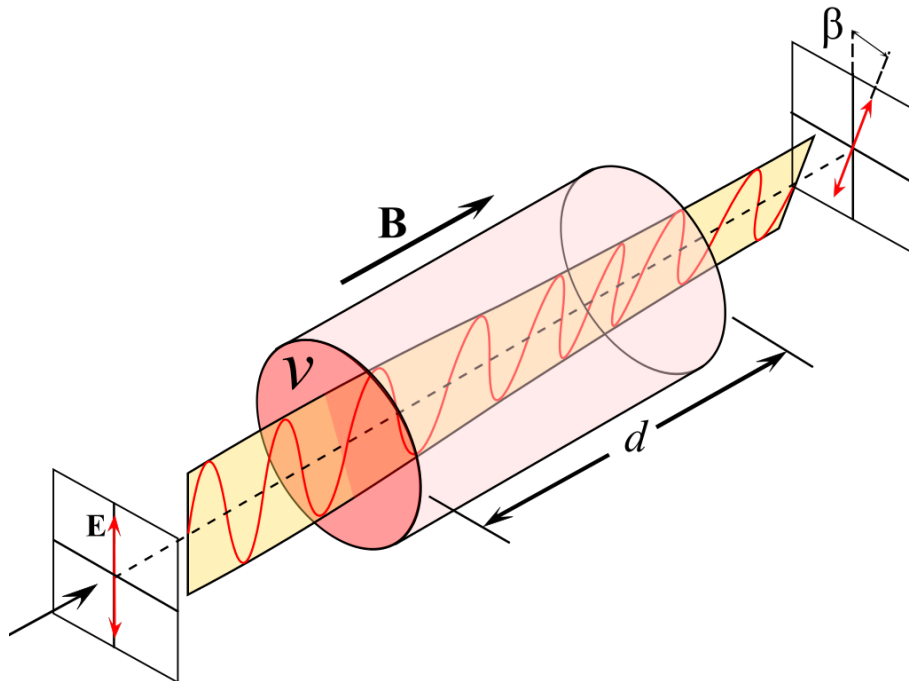


Abbildung 1: Zu sehen ist der Faraday-Effekt. Die rote Linie beschreibt das linear polarisierte Licht. In gelb ist die Polarisationssebene hervorgehoben. Das Medium der Länge d ist rötlich dargestellt. Hier bezeichnet β die Drehung der Polarisationssebene. [4]

$$\theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2L} \quad (2)$$

3 Durchführung

3.1 Aufbau

Der Aufbau der Messapparatur ist in Abb. 2 zu sehen.

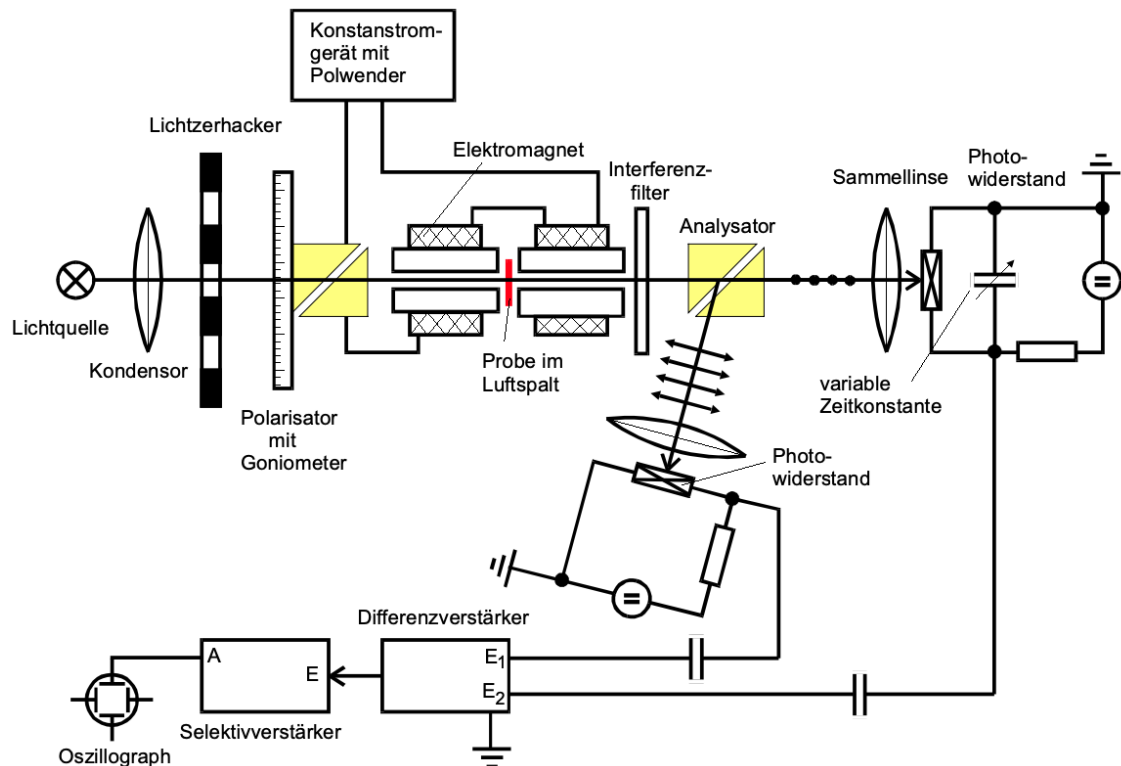


Abbildung 2: Der schematische Aufbau der Messapparatur. [3]

Das Gleichlicht der Halogenlampe wird durch einen Lichtzerhacker in Impulse zerhackt, damit mit einer Wechsellichtmethode gearbeitet werden kann. Das Licht wird außerdem durch einen Interferenzfilter monochromatisiert und durch ein Glan-Thompson-Prisma linear polarisiert. Die Probe befindet sich im Luftspalt eines Elektromagneten, der von einem Konstantstromgerät gespeist wird, das eine Polwendevorrichtung besitzt (um den Drehwinkel zu verdoppeln). Das Glan-Thompson-Prisma teilt den Lichtstrahl in zwei Strahlbündel, die senkrecht zueinander polarisiert sind. Die Lichtintensität wird jeweils mit einem Photowiderstand gemessen, indem eine Gleichspannung durchgeschickt und der Spannungsabfall gemessen wird (Innenwiderstand ist proportional zur Intensität). Mithilfe eines Differenzverstärkers, der an einen Oszillographen angeschlossen ist, kann festgestellt werden, ob die beiden Signalspannungen gleich sind.

3.2 Justierung

Die Messapparatur wird mit sichtbarem Licht justiert. Dazu werden Probe und Interferenzfilter entfernt. Zunächst werden die Prismen so ausgerichtet, dass das Licht senkrecht zu ihrer Oberfläche einfällt. Durch Drehen des Analysatorprismas um seine vertikale Achse wird die Lichtintensität des durchgehenden Strahls eliminiert. Anschließend wird das

Licht auf die lichtempfindlichen Flächen der Photowiderstände abgebildet. Es wird eine Wechsellichtfrequenz von 450 Hz eingestellt. Die Mittenfrequenz des Selektivverstärkers wird auf diese Frequenz eingeregelt und der Gütefaktor auf seinen Maximalwert ($Q = 100$). Probe und Interferenzfilter werden eingesetzt und alles wird verbunden. Zuletzt wird überprüft, ob die Signalamplitude durch Drehen des Polarisators auf nahezu Null gebracht werden kann.

3.3 Messung

Zuerst wird mithilfe einer Hallsonde die Kraftflussdichte in Richtung des einfallenden Lichts in der Nähe des Luftspalts bei maximalem Feldstrom gemessen.

Als nächstes wird die Faraday-Rotation an hochreinem GaAs und an zwei n-dotierten GaAs-Proben für verschiedene Wellenlängen im nahen Infrarot gemessen. Dazu werden neun verschiedene Interferenzfilter, die eine Wellenlänge filtern, verwendet. Die Drehung der Polarisationssebene (Faraday-Rotation) wird folgendermaßen gemessen: bei maximalem Feld wird die gleiche Lichtintensität für beide Strahlen eingestellt (Spannung Null am Differenzverstärker). Das wird erreicht, indem abwechselnd das erste Glan-Thompson-Prisma um seine Längsachse gedreht (die Winkelstellung wird am fest mit dem Prisma verbundenen Goniometer abgelesen) und die Zeitkonstante der beiden Photowiderstände aneinander angepasst wird. Anschließend wird das Feld umgepolt und es wird wieder auf Signalspannung Null abgeglichen. Der zweite Drehwinkel kann am Goniometer abgelesen werden. Die Drehung der Polarisationssebene ist dann die Hälfte der Differenz der beiden Drehwinkel.

4 Auswertung

Für die Auswertung wurden NumPy [5], Matplotlib [6], SciPy [7] und Uncertainties [8] verwendet.

4.1 Kraftflussdichte

Die mithilfe einer Hall-Sonde ermittelte maximale Kraftflussdichte des Magnetfelds bei maximaler Stromstärke beträgt

$$B = 392 \text{ mT}.$$

Diese Kraftflussdichte wird in der Mitte des Luftspalts des Elektromagneten erreicht.

4.2 Effektive Masse mittels Faraday-Rotation

Die Werte für die Dicke und die Donatorenkonzentration für die drei Proben sind in Tab. 1 zu finden. Die für die drei Proben eingestellten Winkel bei den verschiedenen Wellenlängen befinden sich in Tab..

Tabelle 1: Die Werte für die Dicken und die Donatorenkonzentrationen für die reine GaAs-Probe und die beiden n-dotierten GaAs-Proben.

	Reine Probe	Probe 1	Probe 2
Dicke d/mm	5,110	1,296	1,360
Donatorendichte $N/1/\text{cm}^3$		$2,800 \cdot 10^{18}$	$1,200 \cdot 10^{18}$

Die aus den Werten in Tab. berechneten und auf die Dicke der Probe skalierten Rotationswinkel befinden sich in Tab..

Tabelle 2: Winkel.

$\lambda/\mu\text{m}$	θ_{rein}	θ_1	θ_2
0	0	0	0
0	0	0	0

Die quadrierte Wellenlänge ist in Abb. 3 gegen die in Tab. stehenden Werte aufgetragen.

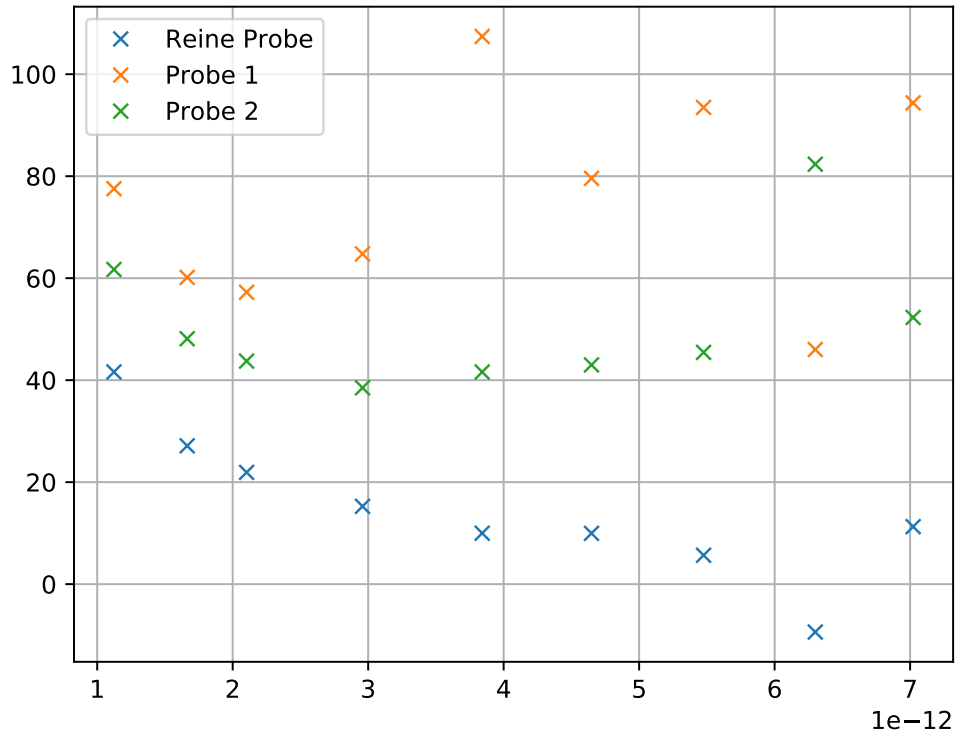


Abbildung 3: Die Rotationswinkel der reinen und der beiden n-dotierten Proben sind gegen die quadratische Wellenlänge aufgetragen.

Zur Bestimmung der effektiven Masse wird jeweils die Differenz des Rotationswinkels der reinen Probe und des Rotationswinkels der dotierten Probe gebildet. Diese Werte sind in Tab. eingetragen.

Der Drehwinkel wird für beide Proben gegen λ^2 aufgetragen. Der Proportionalitätsfaktor zwischen den Größen wird bestimmt. Daraus wird die effektive Masse mit Gleichung 1 berechnet. In Abb. 4 sind die Werte für Probe 1 zu sehen, in Abb. 5 die für Probe 2.

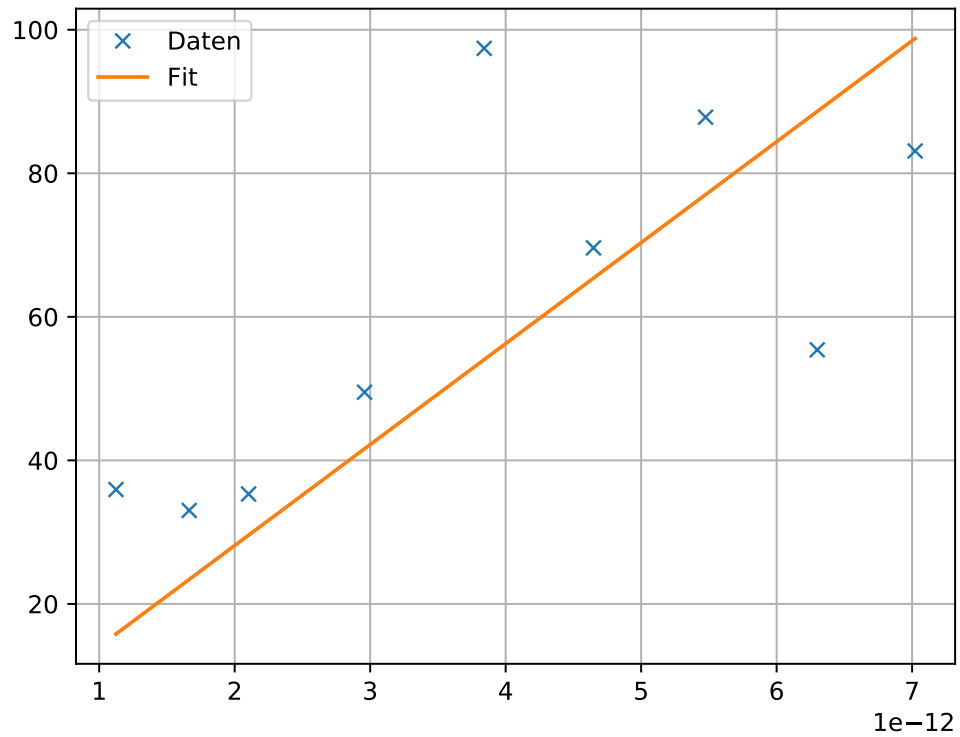


Abbildung 4: Die Differenz der Rotationswinkel von der reinen und der ersten n-dotierten Probe ist gegen die quadratische Wellenlänge aufgetragen. Zu sehen sind die Daten und eine Ausgleichsgerade.

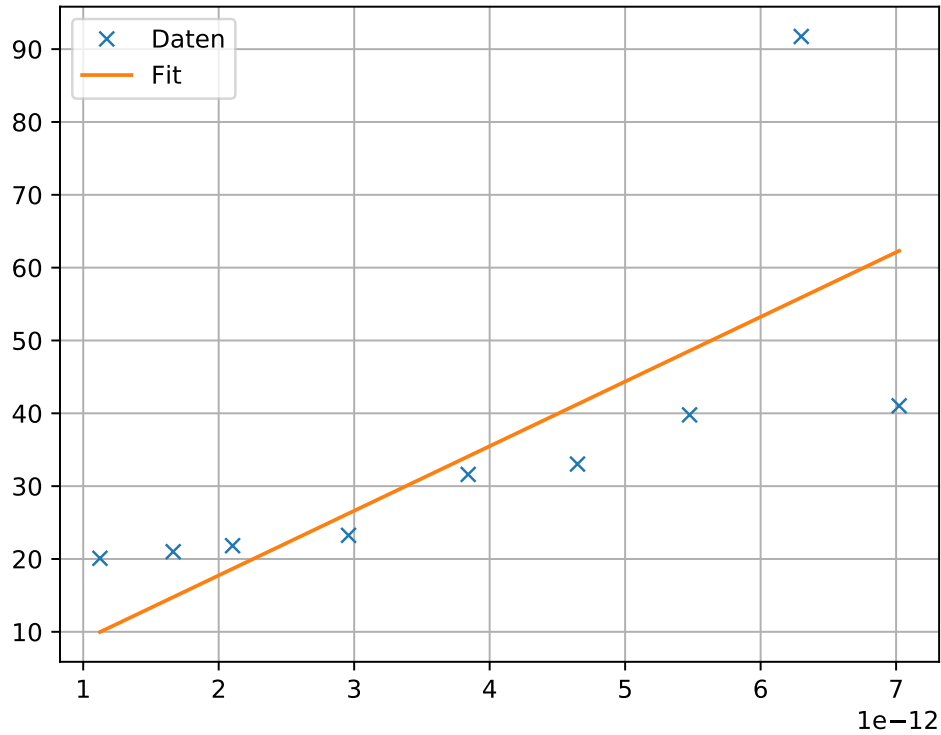


Abbildung 5: Die Differenz der Rotationswinkel von der reinen und der zweiten n-dotierten Probe ist gegen die quadratische Wellenlänge aufgetragen. Zu sehen sind die Daten und eine Ausgleichsgerade.

Im Folgenden steht die Zahl im Index für die Probe. Die Steigungen der Ausgleichsgeraden werden zu

$$s_1 = 0 \frac{\text{rad}}{\text{m}^3}$$

$$s_2 = 0 \frac{\text{rad}}{\text{m}^3}$$

bestimmt. Daraus folgt für die effektiven Massen mit 1

$$m_{\text{eff},1} = 0 m_e$$

$$m_{\text{eff},2} = 0 m_e,$$

wobei m_e die Elektronenmasse ist.

5 Diskussion

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 3 (Atome, Moleküle und Festkörper)*. Springer-Verlag, 2010.
- [2] Joachim Heintze und Peter Bock. *Lehrbuch zur Experimentalphysik (Band 4: Wellen und Optik)*. Springer-Verlag, 2017.
- [3] TU Dortmund. *V46 - Faraday-Effekt an Halbleitern*. 2020. URL: <https://moodle.tu-dortmund.de/mod/folder/view.php?id=529779>.
- [4] Wikipedia. „Faraday-Effekt“. In: (). URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Faraday-Effekt>.
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [6] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [7] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. „SciPy: Open source scientific tools for Python“. Version 0.16.0. In: (). URL: <http://www.scipy.org/>.
- [8] Eric O. Lebigot. „Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties“. Version 2.4.6.1. In: (). URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.