

Normale und anomale Absorption von Elektronen in Einkristallen aus Silicium und Germanium

G. MEYER

Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg

(Z. Naturforschg. 21 a, 1524—1526 [1966]; eingeg. am 20. August 1966)

In der Zweistrahl-näherung der dynamischen Theorie¹ wird das Elektronenwellenfeld, das sich in einem Kristall unter dem Einfluß der BRAGGSchen Reflexion an einer Netzebenen-schar ausbildet, als Überlagerung zweier BLOCH-Wellen dargestellt. Deren Amplituden sind gitterperiodisch so moduliert, daß die Maxima der einen Welle in den reflektierenden Netzebenen, die der anderen *dazwischen* liegen. Das Intensitätsverhältnis und die Modulationsamplitude der beiden BLOCH-Wellen hängen vom Anregungsfehler des betreffenden Reflexes ab. Für sehr große Anregungsfehler ergibt sich als Grenzfall eine ebene Welle.

Unelastische Streuprozesse wie Anregung von Elektronenzuständen oder thermischen Gitterschwingungen des Kristalls bewirken eine Absorption des Wellenfeldes. Wenn die Wahrscheinlichkeit für unelastische Streuung gitterperiodisch ist, werden die beiden BLOCH-Wellen verschieden stark unelastisch gestreut, d. h. unterschiedlich absorbiert. Die Elektronenabsorption ist für große Anregungsfehler, im Grenzfall ebener Wellen, praktisch unabhängig von der Richtung des eingeschossenen Elektronenstrahls, während sich für kleine Anregungsfehler eine Richtungsabhängigkeit der Absorption ergibt. Das gesamte Absorptionsverhalten läßt sich in der Zweistrahl-näherung durch Einführung der Absorptionskoeffizienten μ_0 und μ_h für normale bzw. anomale Absorption beschreiben^{2,3}. μ_0 ist durch die räumlich konstante, μ_h durch die mit der Periode der reflektierenden Netzebenen-schar modulierte FOURIER-Komponente der Absorptionswahrscheinlichkeit bestimmt.

In bisherigen Untersuchungen wurden μ_0 und μ_h für die Substanzen Al⁴, MgO (z. B. ^{5,6}) und MoS₂⁷ gemessen. Die erhaltenen Werte können jedoch dadurch verfälscht sein, daß bei der Intensitätsmessung stets ein Teil der unelastisch gestreuten Elektronen mit erfaßt wurde^{8,9}. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde daher ein Energiefilter¹⁰ verwendet, so daß nur Elektronen registriert wurden, die bei der Streuung weniger als 3 eV Energie verloren haben.

Die Frage, welche unelastischen Streuprozesse für die anomale Absorption verantwortlich sind, ist bisher noch nicht experimentell untersucht worden. Auf Grund theoretischer Überlegungen ist zu erwarten, daß die Anregungswahrscheinlichkeit für kollektive Elektronenzustände (Plasmonen)¹¹ nicht gitterperiodisch ist¹², daß also die Plasmaanregung nicht von der Einschubrichtung abhängt. Dagegen sollte die Absorption infolge thermisch diffuser Streuung stark gitterperiodisch sein^{13, 14, 14a}. Da die Wahrscheinlichkeit für thermische Streuung mit der Kristalltemperatur anwächst, müßten also μ_0 und μ_h mit der Temperatur zunehmen.

Diese beiden Aussagen wurden in der vorliegenden Arbeit experimentell geprüft.

Plasmastreueung

Wenn die Anregungswahrscheinlichkeit für Plasmonen gitterperiodisch wäre, so müßte der Wirkungsquerschnitt eines Kristalls für Plasmaanregung davon abhängen, ob die Wellenfunktion der Elektronen eine ebene oder eine gitterperiodisch modulierte Welle ist. Denn die unelastische Streuung ist im Fall der ebenen Welle allein durch den räumlich konstanten Teil der Streuwahrscheinlichkeit, im Fall der BLOCH-Welle zusätzlich durch den gitterperiodischen Teil bestimmt. Um diese beiden Fälle angenähert zu realisieren, wurde ein Germaniumkristall der Dicke $D = 3300 \text{ \AA}$ wahlweise so orientiert, daß entweder kein Reflex stark angeregt oder daß der (2,2,0)-Reflex maximal angeregt war. In letzteren Falle bewirkt die anomale Absorption ($\mu_h D = 4,9$) eine so stark unterschiedliche Schwächung der beiden BLOCH-Wellen, daß praktisch nur die schwächer absorbierte BLOCH-Welle zur Plasmaanregung beiträgt. In beiden Fällen wurde mit 72 keV-Elektronen das Energiespektrum der in Vorwärtsrichtung gestreuten Elektronen bestimmt. Das Intensitätsverhältnis der unter Anregung eines Plasmons gestreuten (I_{1P}) und der elastisch gestreuten Elektronen (I_{el}) erwies sich als unabhängig von der Einschubrichtung und betrug $I_{1P}/I_{el} = 3,04 \pm 0,04$. Eine Gitterperiodizität der Wahrscheinlichkeit für Plasmaanregung ist also nicht nachweisbar.

Temperaturabhängigkeit der Absorption

Zur Prüfung der Frage nach dem Beitrag der thermisch diffusen Streuung zur anomalen Absorption wurden μ_0 und μ_h von Si und Ge für verschiedene Netzebenen-scharen in Abhängigkeit von der Kristalltemperatur gemessen. μ_0 und μ_h ergeben sich nach dem

¹ H. BETHE, Ann. Phys. 87, 55 [1928].

² H. YOSHIOKA, J. Phys. Soc. Japan 12, 618 [1957].

³ H. HASHIMOTO, A. HOWIE u. M. J. WHELAN, Proc. Roy. Soc. London A 269, 80 [1962].

⁴ H. HASHIMOTO, J. Appl. Phys. 35, 277 [1964].

⁵ G. LEHMPFUHL u. K. MOLIÈRE, J. Phys. Soc. Japan 17, Suppl. B-II, 130 [1962].

⁶ H. WATANABE, J. Phys. Soc. Japan 17, Suppl. B-II, 195 [1962].

⁷ P. GOODMAN u. G. LEHMPFUHL, Z. Naturforschg. 20 a, 110 [1965].

⁸ R. D. HEIDENREICH, J. Appl. Phys. 33, 2321 [1962].

⁹ R. UYEDA u. M. NONOYAMA, Japan. J. Appl. Phys. 4, 498 [1965].

¹⁰ K. BRACK, Z. Naturforschg. 17 a, 1066 [1962].

¹¹ D. BOHM u. D. PINES, Phys. Rev. 92, 609 [1953].

¹² A. HOWIE, Proc. Roy. Soc. London A 271, 268 [1963].

¹³ H. YOSHIOKA u. Y. KAINUMA, J. Phys. Soc. Japan 17, Suppl. B-II, 134 [1962].

¹⁴ C. R. HALL u. P. B. HIRSCH, Proc. Roy. Soc. London 286, 158 [1965].

^{14a} M. J. WHELAN, J. Appl. Phys. 36, 2103 [1965].



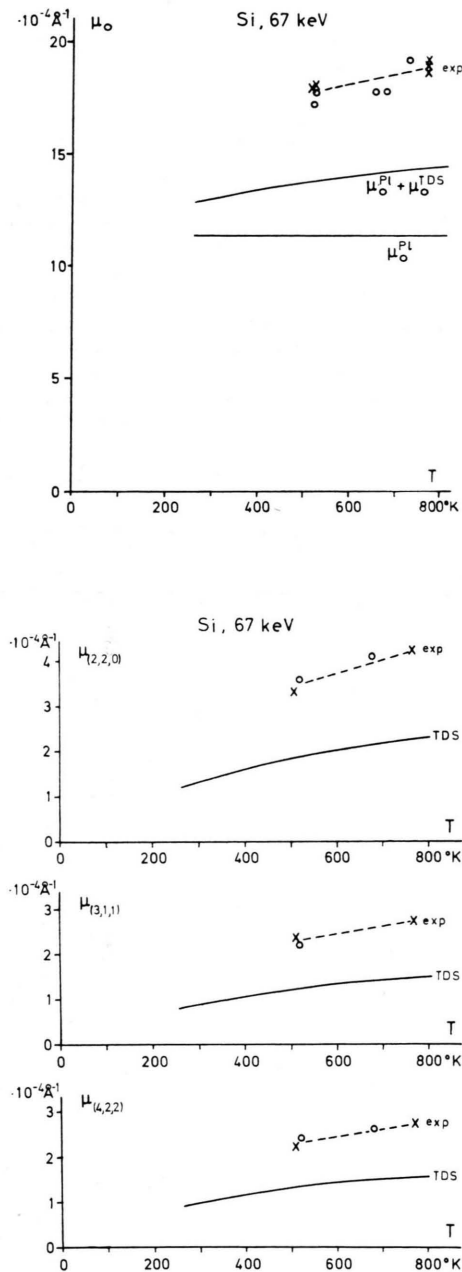


Abb. 1. a) Normaler Absorptionskoeffizient μ_0 ; b) anomale Absorptionskoeffizienten μ_h für die Netzebenencharakteren $h = (2, 2, 0)$, $(3, 1, 1)$, $(4, 2, 2)$ von Silicium für 67 keV-Elektronen als Funktion der Kristalltemperatur T . Die Meßwerte wurden an zwei verschiedenen Kristallen der Dicke 2100 Å (o) bzw. 2800 Å (x) bestimmt. Ausgezogene Kurven: Relativistisch korrigierte theoretische Werte für Anregung von Plasmaschwingungen (PI) und thermischen Gitterschwingungen (TDS).

früher beschriebenen Verfahren¹⁵ aus der Abhängigkeit der Primärstrahlintensität hinter einem plattenförmigen Einkristall von der Einschüßrichtung, wenn diese in der Umgebung der v. LAUEschen Interferenzbedingung für den Reflex h variiert wird.

Die Meßergebnisse sind in den Abb. 1a, b und 2a, b aufgetragen.

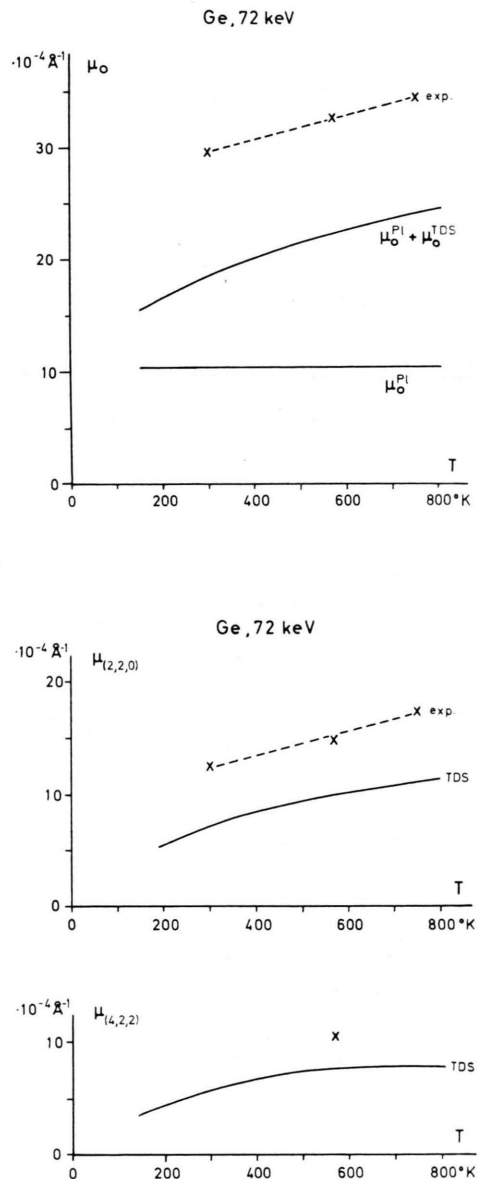


Abb. 2. a) Normaler Absorptionskoeffizient μ_0 ; b) anomale Absorptionskoeffizienten μ_h für die Netzebenencharakteren $h = (2, 2, 0)$, $(4, 2, 2)$ von Germanium für 72 keV-Elektronen als Funktion der Kristalltemperatur T . Die Meßwerte (x) wurden an einem Kristall der Dicke 3300 Å bestimmt. Ausgezogene Kurven: Theoretische Werte entspr. wie in Abb. 1.

¹⁵ G. MEYER, Phys. Letters **20**, 240 [1966].

Die Werte für $h=(2,2,0)$ sind mit Hilfe der BETHEschen Näherung¹ korrigiert worden¹⁶, wobei nur die beiden stärksten Umwegreflexe $-h$ und $2h$ berücksichtigt wurden. Durch die Korrektur wird μ_{220} bei Si um etwa 10%, bei Ge um etwa 20% reduziert. Zur Berechnung der theoretischen Kurven wurde im Fall der thermisch diffusen Streuung (TDS) das EINSTEIN-Modell zugrundegelegt, das nach¹⁷ μ_0^{TDS} von Al richtig beschreibt. μ_0^{Pl} für Plasmastreueung wurde nach¹⁸ berechnet und hängt wegen der geringen thermischen Ausdehnung der Kristalle praktisch nicht von der Temperatur ab¹⁹.

Aus den Meßergebnissen kann folgendes geschlossen werden:

1. Alle Absorptionskoeffizienten zeigen eine merkliche Zunahme mit der Temperatur, die recht gut mit der theoretisch erwarteten übereinstimmt. Daraus ist zu schließen, daß erstens die Anregungswahrscheinlichkeit für thermische Gitterschwingungen durch Elektronenstoß gitterperiodisch ist, und daß zweitens das EINSTEIN-Modell diese Anregungswahrscheinlichkeit bei beiden Substanzen gut beschreibt.

2. Die Meßwerte μ_0 und μ_h sind bei Ge größer als bei Si, und zwar ist μ_0 etwa um einen Faktor 2 größer,

μ_h sogar etwa um einen Faktor 4. Normale und anomale Absorption nehmen also mit der Ordnungszahl der Streusubstanz stark zu.

3. Je nach Netzebenenschar liegt der Quotient μ_h/μ_0 bei Si zwischen 1/5 und 1/8, bei Ge dagegen zwischen 1/2 und 1/3. Die Wahrscheinlichkeit für unelastische Streuung ist also im Ge-Gitter wesentlich stärker moduliert als im Si. Das ist verständlich, weil mit wachsender Ordnungszahl die thermische Streuung im Vergleich zu anderen unelastischen Streuprozessen stärker hervortritt²⁰.

4. Sämtliche Meßwerte μ_0 und μ_h sind größer als nach der Theorie zu erwarten ist, wenn man nur thermische Streuung und Plasmaanregung in Betracht zieht. Es muß also angenommen werden, daß weitere unelastische Streuprozesse zur Absorption beitragen. Hinsichtlich der normalen Absorption wird diese Annahme gestützt durch Messungen an amorphen Ge-Schichten²¹, bei denen sich ergab, daß der gesamte Wirkungsquerschnitt für Elektronenanregung etwa um einen Faktor 1,7 größer ist als der für Plasmaanregung.

Ich danke der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung dieser Arbeit durch ein Stipendium.

¹⁶ M. HORSTMANN u. G. MEYER, Z. Phys. **182**, 380 [1965].

¹⁷ M. HORSTMANN, Z. Phys. **183**, 124 [1965].

¹⁸ R. A. FERRELL, Phys. Rev. **101**, 554 [1956].

¹⁹ K. ZEPPENFELD, Z. Naturforschg. **20 a**, 1076 [1965].

²⁰ J. HANSEN-SCHMIDT, Z. Phys., im Druck.

²¹ W. BRÜNGER u. W. MENZ, Z. Phys. **184**, 271 [1965].