

**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta  
**Band:** 41 (1968)  
**Heft:** 6-7

**Artikel:** Elektronenzustände an Versetzungen in Silizium  
**Autor:** Weber, H. / Schröter, W. / Haasen, P.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-114000>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Der Autor möchte Herrn Prof. Dr. G. BUSCH, Direktor des Laboratoriums für Festkörperphysik, seinen herzlichen Dank für das grosse Interesse an diesem Thema und für seine wertvollen Diskussionsbeiträge aussprechen. Dank gebührt auch dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung sowie dem Verein zur Förderung der Festkörperphysik an der ETH für finanzielle Unterstützung, sowie den Herren H. A. MEIER und H. P. STAUB für die Durchführung einiger Messungen.

### Literaturverzeichnis

- [1] I. TSUBOKAWA, Phys. Soc. Japan *15*, 1664 (1960).
- [2] B. T. MATTHIAS, R. M. BOZORTH und J. H. VAN VLECK, Phys. Rev. Lett. *7*, 160 (1961).
- [3] P. K. BALTZER, H. W. LEHMANN und M. ROBBINS, Phys. Rev. Lett. *15*, 493 (1965).
- [4] G. BUSCH, P. JUNOD und P. WACHTER, Phys. Lett. *12*, 11 (1964).
- [5] G. BUSCH und P. WACHTER, Arbeitsgemeinschaft Magnetismus, Jahrestagung 1968, Münster, im Druck.
- [6] S. P. F. HUMPHREYS-OWEN, Proc. Phys. Soc. *77*, 949 (1961).
- [7] H. A. MEIER, Diplomarbeit am Lab. f. Festkörperphysik, ETH Zürich (1968), unveröffentlicht.
- [8] G. BUSCH und P. WACHTER, Phys. kondens. Mat. *5*, 232 (1966).
- [9] F. RYS, J. S. HELMAN und W. BALTENSPERGER, Phys. kondens. Mat. *6*, 105 (1967).
- [10] S. J. CHO, Phys. Rev. *157*, 632 (1967).
- [11] S. J. PICKART und H. A. ALPERIN, Bull. Am. Phys. Soc. *10*, 32 (1965).
- [12] P. SCHWOB und O. VOGT, Phys. Lett. *22*, 374 (1966).
- [13] P. WACHTER, Phys. kondens. Mat. *7*, 1 (1968).
- [14] H. W. WHITE, D. C. MCCOLLUM und J. CALLAWAY, Phys. Lett. *24A*, 388 (1967).
- [15] B. E. ARGYLE, J. C. SUITS und M. J. FREISER, Phys. Rev. Lett. *15*, 822 (1965).

## Elektronenzustände an Versetzungen in Silizium<sup>1)</sup>

von **H. Weber, W. Schröter und P. Haasen**

Institut für Metallphysik der Universität Göttingen

(29. IV. 68)

*Abstract.* Hall effect measurements are reported on dislocated silicon. The results indicate the existence of two dislocations bands in the energy gap.

Versetzungen in Halbleitern ändern sowohl die Konzentration der freien Ladungsträger wie auch ihre Beweglichkeit [1, 2]. Die zusätzliche Streuung an Versetzungen rührt von deren elektrostatischer Aufladung her [3]. Diese ist durch die Lage der Versetzungszustände in der Energielücke quantitativ bestimmt, welche sich ihrerseits aus Messung des Halleffektes in plastisch verformten Halbleitern ergibt. In Analogie zu kürzlich beschriebenen Ergebnissen an Germanium [2], die im ersten Abschnitt kurz referiert werden, wird im zweiten Abschnitt über erste Messungen des Halleffektes an verformtem Silizium berichtet.

<sup>1)</sup> Vorgetragen auf der Frühjahrstagung Berlin der DPG am 19. 3. 1968, Verhandlungen DPG (VI) 3, 116 (1968).

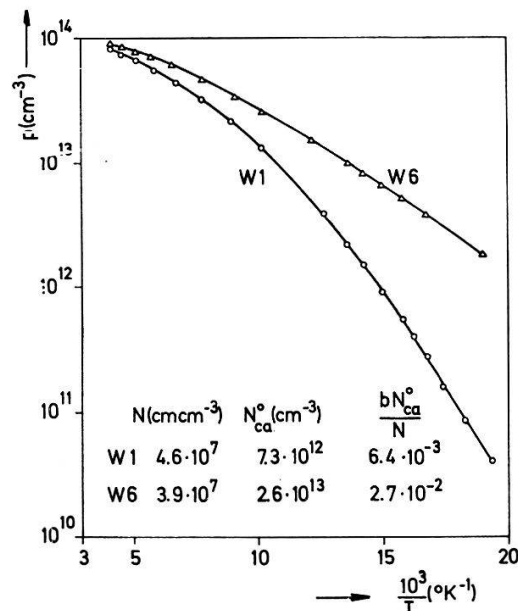
# 1. Versetzungszustände in Germanium

TEICHLER [4] hat kürzlich über seine Versuche berichtet, die an neutralen Schraubenversetzungen in Ge und Si lokalisierten Zustände nach der Pseudopotential-Methode [5] zu berechnen. Die Ergebnisse sind wegen der benutzten Näherungen bisher nur von qualitativer Bedeutung. Sie lassen aber die folgenden allgemeinen Schlüsse zu:

a) Die durch die Versetzung verursachte Störung des Gitters erweist sich als stark genug, um Zustände vom Valenz- und Leitungsband in die Bandlücke hinein abzuspalten. Dementsprechend kann eine Versetzung als Akzeptor und Donator wirken.

b) Die Zustände ordnen sich in eindimensionalen, längs der Versetzung lokalisierten Bändern an, weil die Translationsperiodizität längs der Schraubenversetzung die Gitterperiodizität bleibt.

c) Die Zustandsverteilung und Besetzungsgrenze  $E_0$  für eine neutrale Schraubenversetzung hängen im einzelnen stark vom Verhältnis der Zustandsdichten in Valenz- und Leitungsband ab.



Figur 1

Temperaturabhängigkeit der Löcherdichte für zwei verformte Ge-Proben. Das Verhältnis  $b N_{ca}^0/N$  variiert hier etwa im gleichen Bereich wie für die beiden verformten Si-Proben (siehe Figur 2).

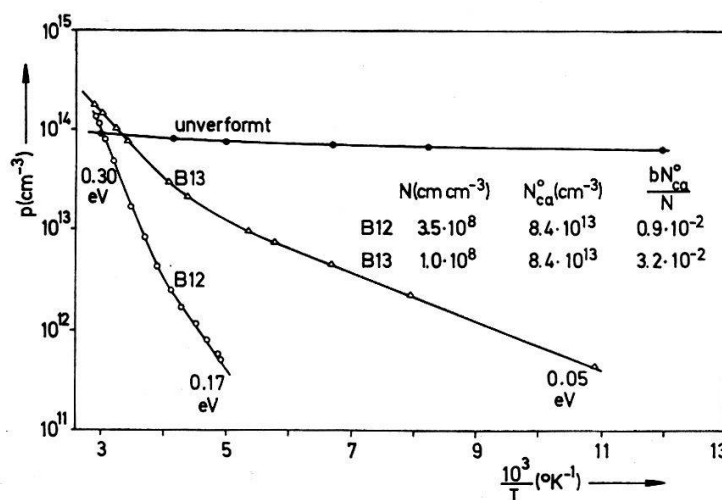
Diese theoretischen Folgerungen stehen in guter Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen an Ge [2]. Halleffektmessungen (Figur 1) für bekannte Anordnungen von Stufenversetzungen lassen sich durch ein eindimensionales Band deuten, das im neutralen Zustand bis zu einer Energie  $E_0 = 0,09$  eV über der Valenzbandkante besetzt ist. Mit zunehmender Besetzung des Bandes aus dem Gitter oder aus den Fremdatomen verschiebt sich die Besetzungsgrenze innerhalb des Bandes, vorausgesetzt, dass dieses eine endliche Breite hat. Zugleich wandert das Band wegen der elektrostatischen Wechselwirkung der besetzenden Ladungsträger im verbotenen Band, u. zw. bei Besetzung durch Elektronen nach oben, durch Löcher nach unten.

Leider lässt sich aus Messungen allein des Halleffektes jeweils nur die Lage der Besetzungsgrenze bezüglich der Valenzbandkante ermitteln, daher nicht die Breite des Versetzungsbandes. Dazu sind andere Methoden, etwa die einer optischen Anregung notwendig, die wir z.Z. untersuchen. Angesichts des obigen Punktes c) war es aber auch wünschenswert, Messungen an Versetzungen in Si zu machen, das in seiner Bandstruktur bekanntlich merklich von Ge abweicht.

## 2. Messungen der Hallkonstanten in verformtem Silizium

$p$ -leitende Siliziumkristalle ( $3 \times 3 \times 15 \text{ mm}^3$ , Orientierung  $[123]$ ) mit sorgfältig gereinigten Oberflächen wurden in Formiergas bei  $770^\circ\text{C}$  unter konstanter Last homogen gestaucht. Nach elektronenmikroskopischen Untersuchungen von WÖHLER [6] werden bei dieser Versuchsführung vorwiegend Stufenversetzungen erzeugt. Zwischen Druckstempel und Probe wurden Plättchen aus hochreinem Reaktorgraphit gelegt. Die mit dem Quadrat der Last zunehmende Versetzungsdichte  $N$  wurde als Ätzgrubendichte auf elektronenmikroskopisch durchstrahlten Replikas ermittelt. Im Temperaturbereich zwischen  $90$  und  $350^\circ\text{K}$  ( $\pm 0,1^\circ\text{K}$ ) wurde die Hallkonstante  $R_H$  bei einem Magnetfeld von  $6360 \text{ G}$  sowie die Leitfähigkeit  $\sigma$  von unverformten, verformten sowie Vergleichsproben kompensatorisch gemessen. Die Löcherdichte  $p$  wurde aus  $R_H$  nach der Beziehung  $p = 3\pi/8 R_H e$  berechnet.

Eine möglichst genaue Kontrolle der chemischen Dotierung und das Einhalten eines bestimmten Bereichs für das Verhältnis von Dotierung zur Versetzungsdichte erwies sich in den Untersuchungen an Ge als wesentlich [2]. Die Fremdatomdichte darf durch die für die Verformung notwendige Glühbehandlung nur in engen Grenzen vergrößert werden. Diese Forderung ist vorläufig bei Si wesentlich schlechter erfüllbar als bei Ge. Die in Si während der Verformung eindiffundierte Fremdatomdichte liegt nach Ausweis von lediglich geglühten Kontrollproben bei  $(1-3) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . Die Ausgangsdotierung wurde daher im Vergleich zu Ge hoch, nämlich zu  $8,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  chemischen Akzeptoren gewählt. Damit dennoch der elektrische Einfluss der Versetzungen deutlich sichtbar war, wurden die Si-Kristalle entsprechend stärker als die aus Ge verformt, so dass auch für Si das Verhältnis  $b \cdot N_{ca}^0/N < 0,1$  war ( $b$  Burgersvek-



Figur 2

Temperaturabhängigkeit der Löcherdichte für zwei Si-Proben vor und nach der Verformung.

tor,  $N_{ca}^0$  Dichte der chemischen Akzeptoren). Für die elektrischen Messungen wurden den Si-Proben Goldkontakte aufgelegt.

Figur 2 zeigt die gewonnenen Messergebnisse. Aufgetragen ist der Logarithmus der Löcherdichte über der inversen Temperatur für zwei verschieden stark gestauchte Proben vor und nach der Verformung. Diese Auftragung ist mit Figur 1 für zwei verschieden verformte Ge-Proben zu vergleichen. Die Ergebnisse an den beiden Si-Proben reichen für die quantitative Prüfung eines Bandmodells der Versetzung nicht aus, lassen aber im Vergleich mit Ge einige wichtige qualitative Unterschiede erkennen.

Die Proben zeigen nach der Verformung Löcherleitung. Da die Löcherdichte zunächst unter dem Ausgangswert liegt, dann mit zunehmender Temperatur über diesen hinaus ansteigt, entstehen durch die Verformung offenbar Akzeptor- wie auch Donatorzustände. Der Verlauf der Löcherdichte im oberen Temperaturbereich für die beiden verformten Si-Proben ähnelt stark dem Gesamtverlauf bei Ge, wobei die Temperaturskalen für die beiden Materialien erwartungsgemäss verschieden sind. Die gedehnte  $1/T$ -Skala bei Si erklärt, warum die Aufladung der Versetzungen sich nicht wie bei Ge in einer merklichen Krümmung der  $\ln p(1/T)$ -Kurve äussert. Aus der Steigung des Hochtemperaturteils der steileren Kurve ergibt sich ein Niveau von ca. 0,3 eV.

Ein von Ge her nicht bekanntes Verhalten zeigen die Kurven für Si im Tieftemperaturbereich. Den dort wesentlich kleineren Steigungen ist ein Niveau von 0,05 eV für die schwächer verformte und von 0,17 eV für die stärker verformte Probe zugeordnet. Die Abhängigkeit der Niveaus von der Verformung ist, wie eine auf den Ergebnissen an Ge basierende Abschätzung ergibt, erklärbar durch die verschiedene Versetzungsaufladung (bestimmt durch  $bN_{ca}^0/N$ ). Ergänzend sei noch bemerkt, dass auch die Hallbeweglichkeit als Funktion der Temperatur in verformtem Si qualitativ den gleichen Verlauf zeigt wie in verformtem Ge. Es wird ein mit zunehmender Verformung ausgeprägteres Maximum für  $\mu_H(T)$  bei ca. 120° K beobachtet, das durch die Streuung an geladenen Versetzungen ziemlich quantitativ erklärt werden kann [3]. Auch das ist ein starker Hinweis darauf, dass der gemessene  $\ln p(1/T)$ -Verlauf in Si nach Verformung allein durch die Versetzungen bestimmt wird. In Si sind den Stufenversetzungen also zwei Niveaus oder Bänder in der Energielücke zugeordnet, während in Germanium nur ein Niveau oder Band bekannt ist. Dieser Unterschied entspricht qualitativ den Ergebnissen der Teichlerschen Rechnungen [4]. Die genaue Lage der Zustände in Si muss allerdings noch durch weitere Experimente gesichert werden.

Wir danken Herrn Dr. TEICHLER für wertvolle Diskussionen, der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit.

### Literaturverzeichnis

- [1] Zusammenfassender Bericht bei H. ALEXANDER und P. HAASEN, Solid St. Phys. 21, edit. F. Seitz und D. Turnbull, im Druck.
- [2] W. SCHRÖTER, Phys. St. Sol. 21, 211 (1967).
- [3] W. SCHRÖTER, Verh. dt. phys. Ges. (VI) 3, 116 (1968); Phys. St. Sol., in Vorbereitung.
- [4] H. TEICHLER, Verh. dt. phys. Ges. (VI) 3, 115 (1968).
- [5] H. TEICHLER, Phys. St. Sol. 23, 341 (1967).
- [6] F. D. WÖHLER (Göttingen), unveröffentlicht.