

Heidelberger Taschenbücher Band 71



Otfried Madelung

*Grundlagen
der Halbleiterphysik*

Mit 63 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York 1970

Professor Dr. Otfried Madelung
Institut für Theoretische Physik (II) der Universität Marburg (Lahn)

ISBN-13: 978-3-540-04872-5

e-ISBN-13: 978-3-642-95158-9

DOI: 10.1007/978-3-642-95158-9

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin · Heidelberg 1970. Library of Congress Catalog Card Number 72-108678.

Vorwort

Das nun seit zwei Jahrzehnten anhaltende Interesse an den Halbleitern — sei es als Modellsubstanzen für die Untersuchung von Festkörpereigenschaften, sei es als Ausgangsmaterialien für zahlreiche Bauelemente der Elektronik — hat zu einer Flut von Veröffentlichungen geführt. Alle neu erscheinenden Originalarbeiten kann ein einzelner nicht mehr überblicken. Die Zahl der zusammenfassenden Berichte über Teilgebiete der Halbleiterphysik beträgt weit über Hundert. Wenn in dieser Situation ein weiteres Buch über Halbleiter vorgelegt wird, so waren dafür folgende Gründe maßgebend:

Der größte Teil der Halbleiterphänomene läßt sich mit einfachen halbklassischen Modellvorstellungen qualitativ (und oft auch quantitativ) erklären. Dies gilt insbesondere für die Erscheinungen, die die Grundlage zum Verständnis der Transistorphysik bilden. Der Erfolg einfacher Modelle ist aber immer mit der Gefahr der mißbräuchlichen Anwendung der notwendig simplifizierten Begriffe verbunden. Die Grenzen der Anwendung eines Modells müssen also stets im Auge behalten werden. Nicht nur in der Forschung, sondern auch in der Anwendung sind diese Grenzen aber heute in vielen Fällen überschritten. So läßt sich der Gunn-Effekt — um nur ein Beispiel zu nennen — nicht verstehen ohne die Kenntnis der detaillierten Bandstruktur des Galliumarsenids und ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Elektron-Phonon-Wechselwirkung bei schwachen und bei starken elektrischen Feldern. Nicht nur der Physiker, der auf dem Halbleitergebiet arbeitet, sondern auch der Ingenieur, der die Halbleiterbauelemente mit Verständnis anwenden will, sollte deshalb über die einfachen Grundbegriffe des Halbleitermodells hinaus dessen Grenzen und Erweiterungsmöglichkeiten kennen. Er sollte wissen, was ein Γ_{25} -Minimum ist und warum es so genannt wird, er sollte den Unterschied zwischen akustischer und optischer Elektron-Gitter-Wechselwirkung verstehen, er sollte also etwas mehr von den Grundlagen der Halbleiterphysik wissen als ihm häufig in Einführungen geboten wird.

Nach einer Erläuterung der Grundbegriffe an Hand des einfachen Halbleitermodells werden deshalb in den ersten fünf Kapiteln und Teilen des sechsten und siebenten Kapitels die theoretischen Grundlagen des Modells quantitativ so weit entwickelt, wie dies im Rahmen eines Taschenbuches möglich ist. Die weiteren Kapitel bringen

dann die Fülle der optischen und elektrischen Halbleiterphänomene, die Grundlagen der Transistorphysik und weitere relevante Halbleitereigenschaften. Hier war eine rigorose Beschränkung des Stoffes notwendig. Dies war nur möglich durch die zahlreichen zusammenfassenden Berichte, die in Buchreihen und Zeitschriften vorliegen. Auf diese Darstellungen wird ausgiebig und möglichst vollständig hingewiesen.

Die Abschnitte, die sich mit der theoretischen Fundierung des Halbleitermodells befassen, erfordern zu ihrem Verständnis eine Vertrautheit des Lesers mit den Grundlagen der Quantenmechanik. Dem theoretisch weniger vorgebildeten Leser sei empfohlen, die wichtigsten Ergebnisse dieser Abschnitte zur Kenntnis zu nehmen und sich dann der Schilderung der zahlreichen Halbleiterphänomene zuzuwenden.

Damit kann das vorliegende Buch in zweierlei Hinsicht nützlich sein. Einmal kann es zum ersten Selbststudium und als Führer in die zusammenfassende Literatur dienen. Zusammenfassende Berichte über Teilgebiete erfüllen nur dann ihren Zweck, wenn der Leser sie in das Gesamtgebiet richtig einordnen kann. Zum anderen kann das Buch als Textbuch für Vorlesungen dienen. Es ist nicht als Vorlesungsniederschrift gedacht. Der Nutzen von Taschenbüchern, die den Stoff einer Vorlesung in dem Umfang bringen, in dem ein intelligenter Student mitschreiben würde, ist noch nicht erwiesen. Sie ersparen zwar den Hörern einer mit dem Buch identischen Vorlesung das Mitschreiben — aber oft auch das Mitdenken. Das vorliegende Buch bringt in möglichst sauberer Form die Grundlagen der Halbleitertheorie, läßt aber dem Dozenten die Freiheit, Akzente selbst zu setzen, Teile zurückzustellen, andere ausführlicher zu bringen und Einzelkapitel als Grundlage für Seminare zu benutzen.

Meinen Mitarbeitern, die mir bei der abschließenden Fassung des Manuskriptes und beim Lesen der Korrekturen behilflich waren, danke ich herzlich. Dem Springer-Verlag gebührt Dank für die sorgfältige und ungewöhnlich schnelle Drucklegung des Buches.

Marburg, Dezember 1969

O. Madelung

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Kapitel 1: Grundbegriffe der Halbleiterphysik | 1 |
| 1. Definition des Halbleiters | 1 |
| 2. Elektronen und Löcher | 2 |
| 3. Störstellen | 4 |
| 4. Effektive Masse, Beweglichkeit, Lebensdauer | 6 |
| 5. Das Energiespektrum der Elektronen | 9 |
| 6. Die Grenzen des klassischen Modells | 11 |
| 7. Klassifikation der wichtigsten Halbleiter | 13 |
| Kapitel 2: Die Symmetrien des Kristallgitters | 17 |
| 8. Wigner-Seitz-Zellen und Brillouin-Zonen | 17 |
| 9. Die Translationsgruppe, zyklische Randbedingungen | 20 |
| 10. Punktgruppen und Raumgruppen | 21 |
| Kapitel 3: Die Bandstruktur | 23 |
| 11. Die Schrödinger-Gleichung des Ein-Elektronen-Problems | 24 |
| 12. Folgerungen aus der Translationsinvarianz | 25 |
| 13. Folgerungen aus der Invarianz gegenüber Operationen der Raumgruppe | 28 |
| 14. Irreduzible Darstellungen | 31 |
| 15. Typische Eigenschaften der Bandstruktur von Halbleitern | 37 |
| 16. Die Effektiv-Massen-Näherung | 40 |
| 17. Dynamik der Kristallelektronen | 42 |
| 18. Die Zustandsdichte | 46 |
| 19. Störstellenterme im Bändermodell | 47 |
| 20. Das Bändermodell im Magnetfeld | 48 |
| Kapitel 4: Gitterschwingungen | 50 |
| 21. Normalschwingungen, Phononen | 51 |
| 22. Dispersionsbeziehung für Phononen | 52 |
| Kapitel 5: Statistik | 54 |
| 23. Das thermodynamische Gleichgewicht | 54 |
| 24. Elektronen- und Löcherkonzentrationen in den Bändern und den Störstellen für den homogenen feldfreien Halbleiter | 57 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 25. Reaktionskinetik | 61 |
| 26. Das lokale Gleichgewicht: Rekombination und Erzeugung | 64 |
| 27. Das räumliche Gleichgewicht: Diffusions- und Feldströme | 66 |
| Kapitel 6: Optische Eigenschaften | 68 |
| 28. Direkte Interband-Übergänge | 69 |
| 29. Indirekte Interband-Übergänge | 74 |
| 30. Übergänge in Exzitonen-Zustände | 76 |
| 31. Absorption und Reflexion im Magnetfeld | 79 |
| 32. Elektroreflexion | 82 |
| 33. Absorption freier Ladungsträger | 84 |
| 34. Absorption durch Gitterschwingungen | 89 |
| Kapitel 7: Transporteigenschaften bei lokalem Gleichgewicht | 92 |
| 35. Die Stromgleichungen | 92 |
| 36. Streumechanismen | 94 |
| 37. Die Stromgleichungen in der Relaxationszeit-Näherung | 100 |
| 38. Elektrische Leitfähigkeit und Beweglichkeit | 104 |
| 39. Galvanomagnetische Effekte | 109 |
| 40. Thermoelektrische Effekte | 116 |
| 41. Thermomagnetische Effekte | 120 |
| 42. Abweichungen von dem Modell des homogenen nicht-entarteten Halbleiters mit isotroper parabolischer Bandstruktur | 122 |
| 43. Transporterscheinungen bei extremen äußeren Einflüssen | 128 |
| Kapitel 8: Transporteigenschaften bei Störung des lokalen Gleichgewichtes | 133 |
| 44. Die Transportgleichungen | 134 |
| 45. Photoleitung | 137 |
| 46. Mit der Photoleitung verbundene Erscheinungen | 142 |
| 47. Der p-n-Übergang | 143 |
| 48. Weitere Eigenschaften von p-n-Übergängen | 150 |
| 49. Photoeffekt in p-n-Übergängen | 153 |
| 50. Der n-p-n-Transistor | 155 |
| 51. Der Feldeffekt-Transistor | 159 |
| Kapitel 9: Oberflächen und Kontakte | 160 |
| 52. Die freie Halbleiteroberfläche | 160 |
| 53. Der Kontakt Metall-Halbleiter mit Verarmungsrandschicht | 164 |
| 54. Ergänzungen zur Randschichttheorie: Inversionsschichten und Anreicherungs-Randschichten | 169 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Kapitel 10: Die wichtigsten Eigenschaften spezieller Halbleiter | 170 |
| 55. Halbleiter mit tetraedrischem Gitter | 171 |
| 56. Weitere halbleitende Elemente und Verbindungen . . | 181 |
| 57. Anwendungsmöglichkeiten der Halbleiter | 185 |
| Schlußbemerkungen | 186 |
| Liste der verwendeten Symbole | 186 |
| Literaturverzeichnis | 190 |
| Sachverzeichnis | 194 |