

Götz Körschen

Untersuchung eines optischen Halbleiterverstärkers mittels Simulation im Hinblick auf den Einsatz in Systemen

Unter Verwendung von Wellenlängenmultiplex (WDM)

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 1997 Diplomica Verlag GmbH
ISBN: 9783832406202

Untersuchung eines optischen Halbleiterverstärkers mittels Simulation im Hinblick auf den Einsatz in Systemen

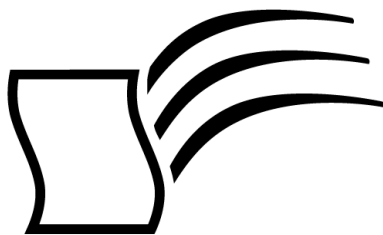
Unter Verwendung von Wellenlängenmultiplex (WDM)

Götz Körschen

Untersuchung eines optischen Halbleiterverstärkers mittels Simulation im Hinblick auf den Einsatz in Systemen

Unter Verwendung von Wellenlängenmultiplex (WDM)

Diplomarbeit
an der Universität Kaiserslautern
November 1997 Abgabe



Diplom.de

Diplomica GmbH ———
Hermannstal 119k ———
22119 Hamburg ———

Fon: 040 / 655 99 20 ———
Fax: 040 / 655 99 222 ———

agentur@diplom.de ———
www.diplom.de ———

ID 620

Körschen, Götz: Untersuchung eines optischen Halbleiterverstärkers mittels Simulation im Hinblick auf den Einsatz in Systemen: Unter Verwendung von Wellenlängenmultiplex (WDM) / Götz Körschen - Hamburg: Diplomica GmbH, 1998

Zugl.: Kaiserslautern, Universität, Diplom, 1997

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

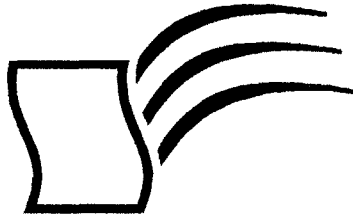
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH

<http://www.diplom.de>, Hamburg 1998

Printed in Germany



Diplomarbeiten Agentur

Wissensquellen gewinnbringend nutzen

Qualität, Praxisrelevanz und Aktualität zeichnen unsere Studien aus. Wir bieten Ihnen im Auftrag unserer Autorinnen und Autoren Wirtschaftsstudien und wissenschaftliche Abschlussarbeiten – Dissertationen, Diplomarbeiten, Masterarbeiten, Staatsexamensarbeiten und Studienarbeiten zum Kauf. Sie wurden an deutschen Universitäten, Fachhochschulen, Akademien oder vergleichbaren Institutionen der Europäischen Union geschrieben. Der Notendurchschnitt liegt bei 1,5.

Wettbewerbsvorteile verschaffen – Vergleichen Sie den Preis unserer Studien mit den Honoraren externer Berater. Um dieses Wissen selbst zusammenzutragen, müssten Sie viel Zeit und Geld aufbringen.

<http://www.diplom.de> bietet Ihnen unser vollständiges Lieferprogramm mit mehreren tausend Studien im Internet. Neben dem Online-Katalog und der Online-Suchmaschine für Ihre Recherche steht Ihnen auch eine Online-Bestellfunktion zur Verfügung. Inhaltliche Zusammenfassungen und Inhaltsverzeichnisse zu jeder Studie sind im Internet einsehbar.

Individueller Service – Gerne senden wir Ihnen auch unseren Papierkatalog zu. Bitte fordern Sie Ihr individuelles Exemplar bei uns an. Für Fragen, Anregungen und individuelle Anfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung. Wir freuen uns auf eine gute Zusammenarbeit

Ihr Team der Diplomarbeiten Agentur

Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey –
Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke —
und Guido Meyer GbR —

Hermannstal 119 k —
22119 Hamburg —

Fon: 040 / 655 99 20 —
Fax: 040 / 655 99 222 —

agentur@diplom.de —
www.diplom.de —

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Halbleiterverstärker	3
2.1 Aufbau	3
2.1.1 Dotierungsarten	3
2.1.2 Der pn-Übergang	5
3 Mathematische Beschreibung der Verstärkung	8
3.1 Die Parameter der Ratengleichung	9
3.1.1 Der Diffusionskoeffizient	9
3.1.2 Die Rekombinationsrate	11
3.1.3 Die Ladungsträgerlebenszeit	12
3.1.4 Der Confinement- oder Führungsfaktor	13
3.1.5 Der Verstärkungsfaktor $g(N)$	15
3.1.6 Die Sättigungsenergie und die Sättigungsleistung	17
3.2 Herleitung der Ratengleichung	19
4 Die Maxwellschen Gleichungen	25
5 Das spontane Emissionsrauschen	35
5.1 Auswirkungen der spontanen Emission	35
5.2 Mathematische Beschreibung des spontanen Emissionsrauschens	35
5.3 Die Bestimmung der Rauschleistung	36
6 Die Simulation eines OSA	42
6.1 Der Sender	42
6.1.1 Modulationsarten	42
6.1.2 Signalformen	43

6.1.3 Technik für WDM	47
6.2 Der optische Halbleiterverstärker	48
6.2.1 Beschreibung des Rauschens	50
6.3 Der Empfänger	52
7 Die Ergebnisse der Simulation des OSA	53
7.1 Auswirkung der Verstärkung	53
7.1.1 Die Amplitude des Photostromes bei unterschiedlicher Verstärkung	54
7.1.2 Die Auswirkung der Verstärkung auf die spektrale Verteilung der Energie	55
7.1.3 Die Auswirkung der Verstärkung auf die Phase	56
7.1.4 Die Auswirkung der Verstärkung auf die spektrale Verteilung der Phasenänderung	57
7.2 Die Auswirkung der Sättigungsenergie	58
7.2.1 Die Auswirkung der Sättigung auf die Amplitude	58
7.2.2 Die Auswirkung der Sättigung auf die Phasenänderung	59
7.3 Das Verhalten des OSA im Betrieb mit WDM	60
7.4 Der Einfluß des spontanen Emissionsrauschens	61
7.4.1 Der Einfluß des spontanen Emissionsrauschens auf die Amplitude	62
7.4.2 Die Auswirkung des spontanen Emissionsrauschens auf die spektrale Verteilung der Energie der Impulse	64
7.4.3 Die Auswirkung des Rauschens auf die Phasenänderung	65
7.4.4 Die Auswirkung des spontanen Emissionsrauschens auf die spektrale Verteilung der Phasenänderung	66
7.5 Der Chirp	67
7.5.1 Der Chirp eines Solitonen-Impulses	67
7.5.2 Der Chirp eines Gauss-Impulses	68
7.5.3 Der Chirp eines NRZ-Signales	69

7.6 Der Vergleich der Signale hinsichtlich der Frequenzverschiebung	71
7.7 Die gleichzeitige Verstärkung unterschiedlicher Signalformen	72
7.7.1 Die Auswirkung der nicht synchronen Übertragung auf die Impulsleistung	73
7.7.2 Die Auswirkung der nicht synchronen Übertragung auf die Phase	74
7.7.3 Die Auswirkung der nicht synchronen Übertragung den Chirp	74
7.8 Die Auswirkung der Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	75
7.8.1 Die Auswirkung der Frequenzabhängigkeit der Verstärkung bei 4 Kanälen	76
7.9 Die Verstärkung eines NRZ-Signales	78
8 Zusammenfassung	80
9 Anhang	82
9.1 Protokoll des Programmes der Simulation unter Verwendung der Amplitude der Impulse	82
9.2 Die Simulation unter Verwendung der Impulsleistung	119
10 Literatur	141

1 Einleitung

Mit einem weltweit stetig zusammenwachsendem Wirtschaftsmarkt einhergehend ist ein ansteigender Informationsaustausch.

Zur Gewährleistung dieses Austausches gewinnt die optische Signalübertragung zunehmend an Bedeutung. Vorteil dieser Form der Übertragung sind die geringe Anfälligkeit gegenüber elektrischen und magnetischen Störungen zum einen, zum anderen sind größere Übertragungsraten im Vergleich zur drahtgebundenen Signalübertragung möglich.

Die Signalübertragung über optische Strecken erfolgt zur Zeit bevorzugt im Wellenlängenbereich um $1.3 \mu\text{m}$. Vorteil der Verwendung dieser Wellenlängen ist die dort relativ geringe Dispersion von ca. $0.8 - 1 \frac{\text{ps}}{\text{km} \cdot \text{nm}}$. Die Dispersion beschreibt die zeitliche Veränderung eines das Übertragungssystem durchlaufenden Wellenpaketes. Die Gruppengeschwindigkeit eines Wellenpaketes ist von seiner Wellenlänge abhängig, es zerläuft während seiner räumlichen und zeitlichen Übertragung.

Bei der Übertragung bei Wellenlängen um $1.3 \mu\text{m}$ tritt eine Dämpfung des Signales auf. Diese beträgt ca. $0.4 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$ Übertragungsstrecke. Zum Ausgleich dieser Dämpfung müssen die Signale in gewissen Abständen verstärkt werden.

Die meisten sich zur Zeit in Betrieb befindlichen optischen Übertragungssysteme enthalten keine optischen Verstärker. Das Signal, welches durch einen intensitätsmodulierten Sender in die als Übertragungsstrecke verwendete Glasfaser eingekoppelt wird, wird in ein elektrisches Signal gewandelt, dieses wird verstärkt, regeneriert, in ein optisches Signal zurückgewandelt und erneut synchronisiert. Die Verstärkung erfolgt im Basisbandbereich. Diese Methode setzt voraus, daß die Modulation nicht mit der Lichtquelle interferiert und daß die Detektoren rauschbegrenzt sind [1]. Falls die Wellenlänge des Signales aufgrund von Schwankungen während der Impulsdauer nicht konstant bleibt, tritt ein Problem bei der Synchronisation der Modulation dieses Signales auf.

Um diese Problematik zu umgehen, können optische Halbleiterverstärker verwendet werden.

In dieser Arbeit werden sie mit OSA für **Optical Semiconductor Amplifier** bezeichnet. Durch Verwendung der OSA entfällt die Modulation und somit die Problematik der Synchronisation. Dies ermöglicht des weiteren eine gleichzeitige Übertragung von Signalen mit unterschiedlichen Modulationsarten. Die reine optische Verstärkung ermöglicht weiterhin die Verstärkung von sehr hohen Frequenzen.

Ein OSA wandelt elektrische Energie, Strom, in optische Energie, Photonen, um. Der OSA verstärkt mit Hilfe der stimulierten Emission Signalwellen, welche die aktive Schicht durchlaufen. Dabei stimulieren die eingestrahnten Signalphotonen das aktive Medium zur Aussendung von weiteren Photonen mit gleicher Richtung, Phase und Frequenz. Diese neuen Photonen regen dann ihrerseits die Aussendung weiterer Photonen an, so daß die Intensität der Signalwellen beim Durchlauf durch das aktive Medium exponentiell anwächst. Zum Erreichen der stimulierten Emission ist eine Inversion der Energieniveaus notwendig. Inversion bedeutet, daß das energetisch höhere Niveau (Leitungsband) der Atome des Halbleiters innerhalb der aktiven Schicht mehr Elektronen enthalten muß als das darunter energetisch tieferliegende Niveau des Grundzustandes (Valenzband). Erreicht wird diese Inversion durch Anlegen einer einen Pumpstrom bewirkenden Spannung.

Zusätzlich zur stimulierten Emission tritt die spontane Emission auf. Diese spontane Emission ist ein nicht zu vernachlässigender Störeffekt. Sie trägt ebenfalls zur Verstärkung bei, jedoch kommt es hierbei zu einer inkohärenten Verstärkung. Auch Photonen mit keiner festen Phasen- und Amplitudenbeziehung zur Signalwelle haben am Vorgang der Verstärkung Anteil. Die ursprüngliche Signalform wird dadurch in Betrag und Phase verändert, Rauschen tritt auf.

Die bestehenden optischen Übertragungstrecken können bei Verwendung von Signalen mit unterschiedlichen Wellenlängen (Wellenlängenmultiplex, **Wavelength Division Multiplex**, WDM) bzw. Frequenzen betrieben werden. Dies bedeutet eine Mehrfachnutzung einer Strecke und eine Kapazitätserweiterung bestehender Strecken. Gleichzeitig bedeutet dies eine Senkung der relativen Betriebskosten pro Übertragungskanal [2].

2 Halbleiterverstärker

2.1 Aufbau

Ein Halbleiterverstärker, OSA, entspricht seinem Aufbau nach einer in Durchlaßrichtung geschalteten pn-Diode. Diese pn-Diode wird realisiert durch aneinanderfügen zweier unterschiedlich dotierter Halbleiter. Dieses sind der p- sowie der n-Halbleiter. Dotierung, der substitutionelle Einbau von Fremdatomen in ein bestehendes Kristallgitter, verändert die physikalischen Eigenschaften des Materials.

Jedes Atom strebt eine möglichst volle Besetzung seiner äußersten, noch Elektronen enthaltenen Schale an. Dies entspricht dem energetisch günstigsten Zustand. Untereinander gehen die Atome eine sogenannte kovalente Bindung ein. Sie „teilen“ sich die zur Auffüllung der äußersten Schale benötigten Elektronen.

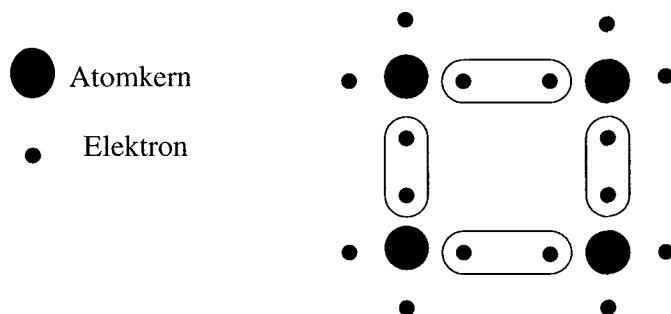


Bild 2.1 Die kovalente Bindung am Beispiel eines vierwertigen Atoms. Die umhüllt eingezeichneten Elektronen gehören jeweils zu den zwei benachbarten Atomkernen.

Durch Zufuhr von z.B. thermischer Energie, können Bindungen dieser Art gelöst werden. Es entstehen dann frei bewegliche Ladungsträger. Sie können durch das Kristallgitter wandern. Es besteht Leitfähigkeit, die sogenannte Eigenleitfähigkeit. Diese ist von der Größe der zugeführten thermischen Energie, also der Temperatur, abhängig. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Eigenleitfähigkeit größere Werte an als bei niedrigeren Temperaturen [3].

2.1.1 Dotierungsarten

Es wird unterschieden zwischen der p- sowie der n-Dotierung. Im Falle der p-Dotierung wird

ein Atom mit einer geringeren Wertigkeit als das bestehende Kristallgitter substituiert, im Falle der n-Dotierung mit einer höheren Wertigkeit. Die Wertigkeit bezieht sich auf die Anzahl der sich in der äußersten Schale befindlichen Elektronen. Bei einer Wertigkeit von beispielsweise vier sind dies vier, bei einer Wertigkeit von beispielsweise fünf sind dies fünf Elektronen. Bei der p-Dotierung besitzen die eingefügten Atome weniger, bei der n-Dotierung mehr Elektronen als die des Wirtsmaterials. Dies bewirkt eine Störung der kovalenten Bindungen. Im Falle der p-Dotierung nehmen die substitutionell eingefügten Fremdatome Elektronen benachbarter Atome zu ihrer Valenzabsättigung auf, das Defektelektron wandert durch den Halbleiterkristall. Diese Wanderung wird verursacht durch das mit Elektronen unterbesetzte Valenzband. Die um diesen Vorgang auszulösende benötigte thermische Energie ist weitaus geringer als im Falle einer ungestörten kovalenten Bindung. Im Bändermodell äußert sich dies in einem knapp oberhalb des Valenzbandes liegendem, bei $T = 0$ Kelvin unbesetzten Energieniveau. Bei Raumtemperatur ist dieses Energieniveau durch ein aus dem Valenzband stammendes Elektron besetzt.

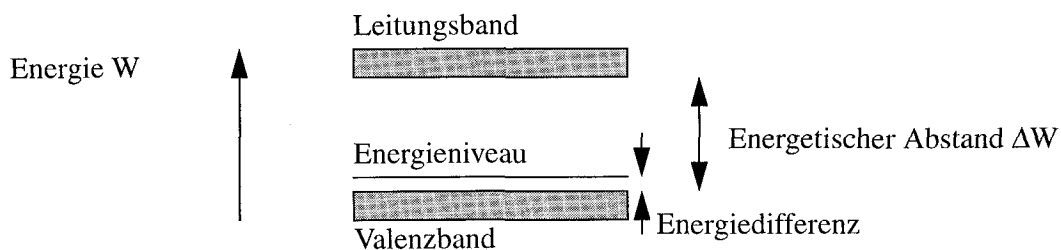


Bild 2.2 Bändermodell der p-Dotierung.

Im Falle der n-Dotierung bleibt bei der kovalenten Bindung ein Elektron frei. Das Energieniveau dieses Elektrons liegt knapp unterhalb des Leitungsbandes. Bei $T = 0$ Kelvin ist es besetzt, bei Raumtemperatur ist es dagegen unbesetzt, da das Elektron in das Leitungsband übergetreten ist.

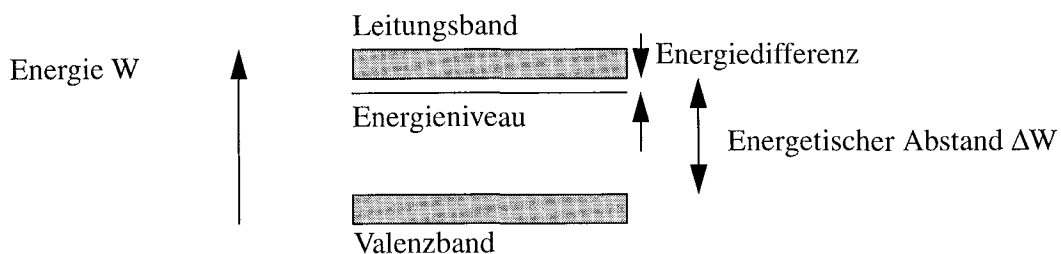


Bild 2.3 Bändermodell der n-Dotierung.

Entsprechend wie im Falle der p-Dotierung das Defektelektron kann auch das Elektron bei der n-Dotierung durch eine weitaus geringere Energie aus seiner atomaren Bindung gelöst werden.

Es besteht aufgrund der sich frei durch den Halbleiterkristall bewegendes Ladungsträger Leitfähigkeit.

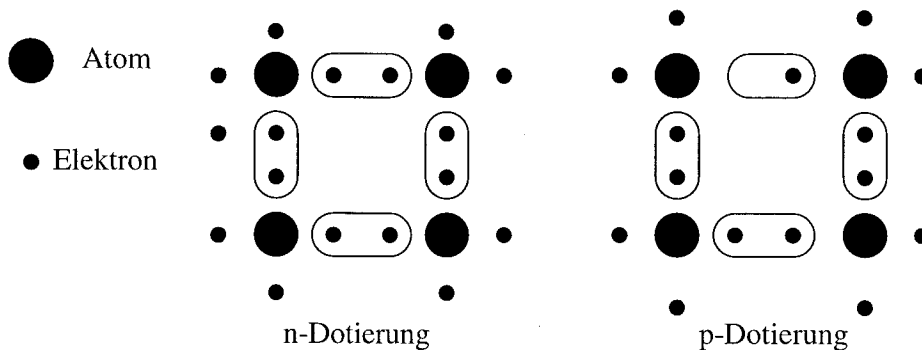


Bild 2.4 n- und p-Dotierung. Zu Erkennen ist links das überzählige Elektron, rechts das Defektelektron.

Atome, welche in einem Kristallgitterverband über Defektelektrone verfügen, werden Akzeptoren, solche mit überzähligen Elektronen werden Donatoren genannt [4].

2.1.2 Der pn-Übergang

Werden ein p- und ein n-dotierter Halbleiter aneinander gefügt, so bildet sich zwischen ihnen der sogenannte pn-Übergang aus.

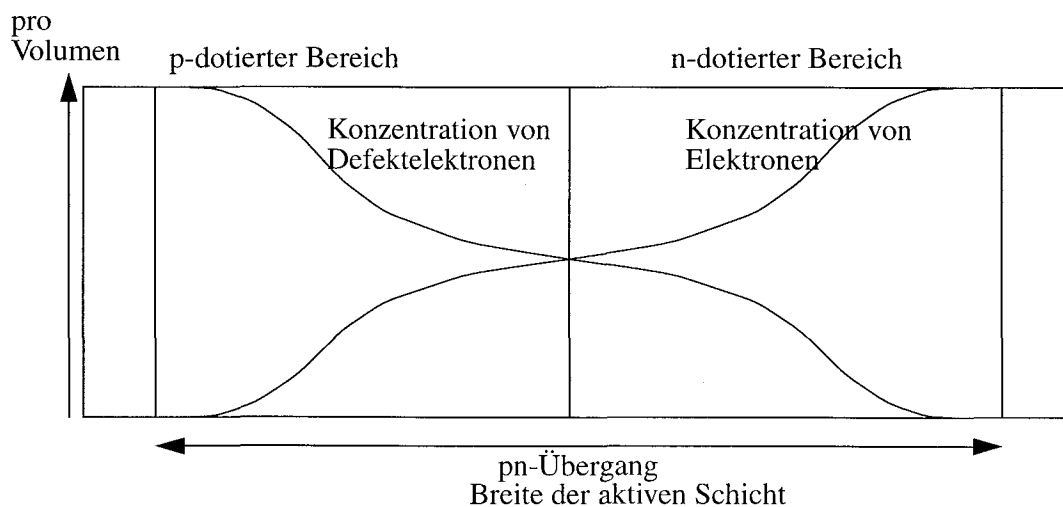


Bild 2.5 Der pn-Übergang.

Aufgrund der unterschiedlichen Ladungsträgerkonzentrationen, im p-Halbleiter überwiegen die Defektelektronen, im n-Halbleiter die Elektronen, diffundieren die durch die Zufuhr thermischer Energie freigewordenen Ladungsträger in den jeweilig anders dotierten Halbleiter. Elektronen des n-Halbleiters wandern in den p-Halbleiter, Defektelektronen des p- in den n-

Halbleiter. Es erfolgt eine Diffusion der Ladungsträger. An der Verbindungszone entsteht eine Zone, innerhalb derer die Konzentration der Elektronen im n-Halbleiter geringer ist als im restlichen n-Halbleiter, entsprechend die Konzentration der Defektelektronen im p-Halbleiter. Diese Zone ist der pn-Übergang [3].

Die Bewegung der Ladungsträger ist vergleichbar einem elektrischen Strom, dem sogenannten Diffusionsstrom, der über die Grenzfläche aus dem p- in den n-Halbleiter fließt. Innerhalb des pn-Überganges kommt es im n-Halbleiter zu einer Erhöhung der Konzentration der Elektronen, im p-Halbleiter zu einer Erhöhung der Konzentration der Defektelektronen. Die jeweils dadurch entstandene Konzentrationsumkehr auf beiden Seiten des pn-Überganges bewirkt die Ausbildung eines elektrischen Feldes. Dieses Feld bewirkt einen der Diffusion der Ladungsträger entgegengesetzt gerichteten Strom. Dieses ist der sogenannte Feld- oder Driftstrom.

Auf ein Elektron, welches aus dem n- in den p-Bereich überzugehen versucht, wirkt dieses elektrische Feld. Dieses Feld ist bestrebt, das Elektron in den n-Bereich und das Defektelektron in den p-Bereich zurück zu drängen. Das Feld kann deswegen nur von Ladungsträgern mit ausreichend großer kinetischer Energie überwunden werden. Diese Ladungsträger gelangen dann in den jeweils anders dotierten Halbleitertyp.

Durch die Wärmebewegung können Defektelektronen, welche sich im n-Halbleiter befinden, in den Bereich des elektrischen Feldes gelangen. Diese Defektelektronen werden durch dieses Feld in den p-Bereich überführt. Entsprechendes gilt für die Elektronen des p-Bereiches, welche durch die Wärmebewegung und durch das Feld in den n-Bereich überführt werden. Dieses bewirkt den sogenannten Leitungstrom. Der Leitungstrom ist dem Diffusionsstrom entgegengesetzt gerichtet. In einem isolierten Halbleiter stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem Leitungs- und dem Diffusionsstrom ein [3].

Wird der stromlose Halbleiter an eine Spannungsquelle angeschlossen, so entfällt ein Großteil der Spannung auf den pn-Übergang. Dies hat seine Ursache darin, daß in den Grenzschichten in dem jeweiligen p- bzw. n-Halbleitereine geringere Konzentration von Defektelektronen bzw. Elektronen befindet als außerhalb dieser Grenzschicht. Der pn-Übergang besitzt daher einen wesentlich größeren ohmschen Widerstand als die Bahngebiete.