



## Physikalisches Praktikum II

Bachelor Physikalische Technik: Lasertechnik  
Prof. Dr. H.-Ch. Mertins, MSc. M. Gilbert

### **FK06 Halbleiterdioden**

(Pr\_PhII\_FK06\_Dioden\_7, 24.10.2015)

Name	Matr. Nr.	Gruppe	Team
1.			
2.			
Protokoll ist ok	<input type="radio"/>	Datum	Abtestat
Folgende Korrekturen nötig	<input type="radio"/>		

## Hinweis

Lesen Sie die Versuchsanleitung (inkl. Versuchsdurchführung & Auswertung!) gründlich durch und machen sich mit den Begrifflichkeiten vertraut. Die Teilnahme am Praktikum erfordert das erfolgreiche Beantworten der Zulassungsfragen am Versuchstag (siehe Anleitung) oder alternativ eine kurze Vorstellung eines Themengebietes an der Tafel.

## 1. Ziel

Halbleiterbauelemente wie Diode, Transistor, LED (light emitting diode) oder Halbleiterlaser bilden die Grundlage heutiger Informations- und Kommunikationstechnologien sowie energiesparender Beleuchtungssysteme. Halbleiter-Laserdioden spielen zudem eine starke Rolle im Bereich der Lasertechnik und Photonik: Zum einen werden sie in neuen Festkörperlaser-Systemen als Pumpquellen eingesetzt, zum anderen halten sie Einzug in der Lasermaterialbearbeitung.

In diesem Praktikum befassen wir uns mit den wichtigsten Eigenschaften der Halbleiter-Diode.

## 2 Theorie

Halbleiterdioden besitzen eine charakteristische, *nicht* lineare Strom-Spannungs Kennlinie (Abb. 1), wodurch sie sich von einem ohmschen Leiter unterscheiden. Je nach Polung wird der Strom durchgelassen oder gesperrt (Abb. 1), so dass sie als Gleichrichter verwendet werden kann. Im Folgenden soll die Ursache dieser Kennlinie und der Aufbau einer Halbleiterdiode beschrieben werden.

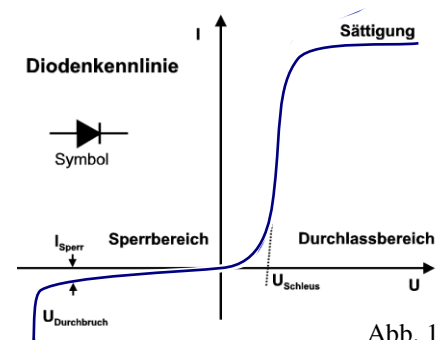


Abb. 1

### 2.1 Leitfähigkeit

Für einen ohmschen Leiter im elektrischen Feld der Stärke  $E$  beträgt die Stromdichte  $j = I/A = \sigma E$  ( $I$ : Strom,  $A$ : Leiterquerschnitt,  $\sigma$ : Leitfähigkeit). Der Strom wird getragen durch die quasi-freien Elektronen mit der Beweglichkeit  $\mu$ , die sich mit der Driftgeschwindigkeit  $v_{dr}$  bewegen. Mit der Ladungsträgerdichte  $n$  und der Elektronenladung  $e$  lässt sich die Leitfähigkeit durch  $\sigma = ne\mu$  ausdrücken. Die experimentelle Bestimmung der Größen  $n$  und  $\mu$  erfolgt mit dem Halleffekt (siehe Praktikum). Ein wesentlicher Unterschied zwischen Metallen und Halbleitern liegt in der unterschiedlichen Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit. Während Metalle ein sehr schwach fallendes  $\sigma$  mit wachsender Temperatur zeigen, steigt bei Halbleitern  $\sigma$  exponentiell mit wachsender Temperatur. Dies liegt an dem Anstieg der Ladungsträgerdichte mit wachsender Temperatur. Woher kommen die Ladungsträger im Halbleiter?

## 2.2 Halbleiter

Bei hinreichend tiefen Temperaturen sind reine Halbleiter elektrisch isolierend, da sie keine freien Ladungsträger besitzen. Erst mit wachsender Temperatur werden Elektronen aus der chemischen Bindung herausgerissen so dass die Dichte  $n$  der

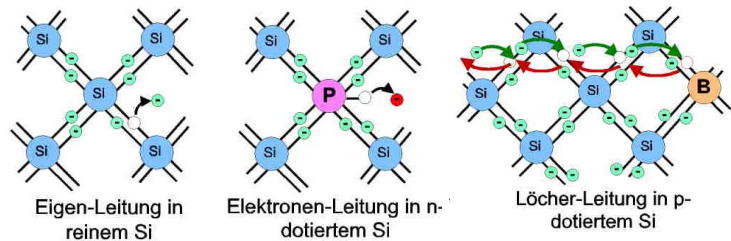


Abb. 2

freien Ladungsträger stark steigt. Jetzt kann elektrische Leitung einsetzen. Die Leitfähigkeit wird drastisch verstärkt durch Dotierung der Halbleitern. Hier werden einige Atome des reinen Festkörpers (z.B. Si, Abb. 2) durch andere ersetzt. Donatoratome wie z.B. Phosphor (P), haben ein Elektron mehr als Si (n-Dotierung). Dieses zusätzliche Elektron trägt nicht zur chemischen Bindung des Halbleiterkristalls bei und kann daher schon bei deutlich kleinerer Temperatur „befreit“ werden und zur sogenannten n-Leitung (negative Ladungsträger) beitragen.

Die p-Dotierung erhält man, wenn Si-Atome gegen Akzeptoratome wie z.B. Bor (B) ausgetauscht werden, die ein Elektron weniger besitzen. Jetzt gibt es ein Akzeptor-Loch in der Bindung, das zur Leitung indirekt beiträgt, indem es einen „freien Platz“ darstellt (Abb. 2, Loch am B-Atom). Wird ein benachbartes Elektron aus der chemischen Bindung thermisch befreit, so wird es in das vorhandene Loch springen wo es wieder gebunden wird (Abb. 2 oberer Pfeil). Diese Elektron hat aber an seinem Ursprungsort ein neues Loch hinterlassen, so dass man sagen kann, das Loch des Akzeptors ist entgegen der Elektronenbewegung gewandert (Abb. 2 untere Pfeile). Diese Leitung heißt p- oder Löcherleitung, da sich die Löcher durch den Festkörper bewegen. Beachte, dass die Akzeptoren, bzw. die Si-Atome, welche eigentlich die „positive Ladung des Lochs“ tragen natürlich ortsfest bleiben.

Die Bindungsenergie der Donatorelektronen ist sehr gering. Mit  $20 - 100 \text{ meV}$  liegt sie in der Größenordnung der thermischen Energie  $kT \sim 25 \text{ meV}$  für Zimmertemperatur  $T = 300 \text{ K}$ . Folglich befinden sich nahezu alle Donatorelektronen im Leitungsband und können als freie Elektronen am Stromtransport teilnehmen. Entsprechendes gilt für die Akzeptoren und die entstehenden Löcher im Valenzband (Details zum Bandmodell des Halbleiters siehe Praktikum „Solarzelle“). Damit ist man am Ziel und hat schon bei Zimmertemperatur die Leitfähigkeit dotierter Halbleiter um einen Faktor  $10^5$  bis  $10^8$  verstärken können, gegenüber der des reinen, undotierten Halbleiters.

## 2.3 pn-Übergang

Die typische Halbleiterdiode besteht aus einem p- und einem n-dotierten Halbleiter, die kontaktiert sind. Die entscheidenden Prozesse spielen sich am pn-Übergang an. In Abb. 3 stellen die großen Kugeln mit den Symbolen ortsfeste Dotierungsatome dar (Donatoren im n-Teil, Akzeptoren im p-Teil). Die kleinen Kugeln stellen die beweglichen Majoritätsträger dar welche für den elektrischen Strom zuständig sind. Majoritätsträger heißen sie, weil sie in der Überzahl vorhanden sind. Dies sind Elektronen im n-Teil und Löcher im p-Teil. Minoritätsträger sind die beweglichen Ladungsträger, welche nur in der Unterzahl vorhanden sind, d.h. Löcher im n-dotierten und Elektronen im p-dotierten Teil.

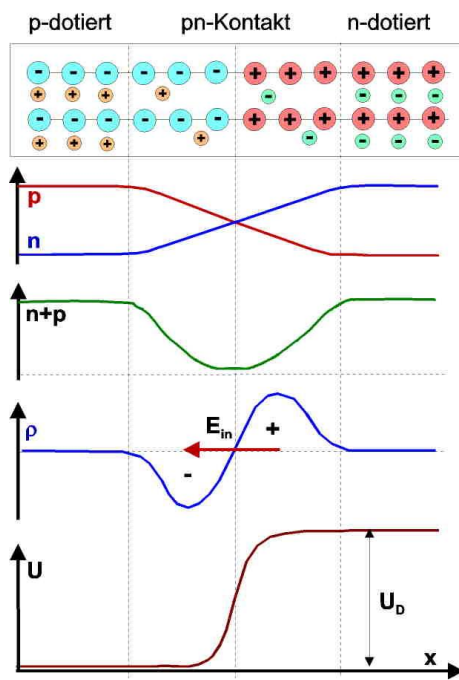


Abb. 3

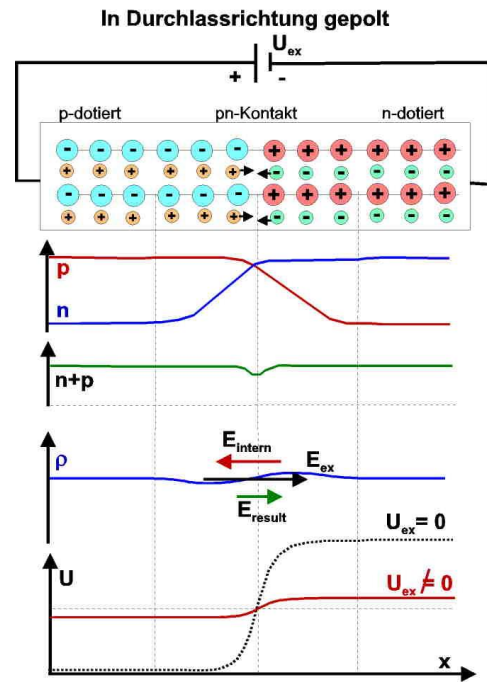


Abb. 4

An der Kontaktfläche von p- und n-dotiertem Halbleiter werden infolge des Konzentrationsunterschiedes der Ladungsträger, Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet diffundieren und Löcher aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet. Diese Löcher und Elektronen rekombinieren, d.h. ein freies Elektron wird vom Loch des Akzeptors eingefangen und gebunden. Damit verschwinden die freien Ladungsträger im Grenzgebiet. Dies spiegelt sich im Verlauf der Ladungsträgerdichte  $n(x)$ ,  $p(x)$  wider (Abb. 3). Die für die elektrische Leitfähigkeit verantwortliche gesamte Ladungsträgerdichte  $\rho(x) = \{n(x) + p(x)\}$  zeigt hier ein Minimum, was zu einem erhöhten elektrischen Widerstand  $R(x)$  führt. Daher nennt man die Grenze „hochohmig“. Weil die freien Ladungsträger aus dem Grenzbereich hinausdiffundiert sind, aber die ortsfesten ionisierten Dotierungsatome zurück geblieben sind, entsteht an der Grenze auf der n-Seite eine positive Raumladungszone und auf der p-Seite eine negative Raumladungszone. Dies wird durch die Ladungsdichte  $\rho(x)$  dargestellt.

Diese wirkt wie ein elektrischer Dipol und baut ein inneres elektrisches Feld  $E_{in}$  an der Grenze auf. Das Feld innere wirkt der weiteren Diffusion von Ladungsträgern entgegen, bis sich ein stromloses Gleichgewicht zwischen Diffusions- und Feldstrom einstellt. Statt des E-Feldes kann man ebenso die Potentialdifferenz  $U_D$  (Kontaktspannung) mit  $E_{in} = dU_D/dx$  betrachten (Abb. 3). Beachte: es existiert ein E-Feld bzw. eine Spannung am pn-Kontakt, obwohl von außen keine Spannung angelegt wurde!

Jetzt sind wir mit unserem Modell so weit gekommen, um die Strom-Spannungskennlinie (Abb. 1) der pn-Diode zu erklären. Legen wir außen an die Diode eine Spannung  $U_{ex}$  an, so, dass der Pluspol am p-dotierten Teil und der Minuspol am n-dotierten Teil anliegt (Durchlassrichtung), so strömen von beiden Seiten die Majoritätsträger zur Grenzfläche und erhöhen damit wieder den Ladungsträgeranteil ( $n + p$ ) in der zuvor verarmten Grenzschicht (Abb. 4). Die Breite der Raumladungszone verringert sich. Die Diffusionsspannung  $U_D$  und damit das sperrende E-Feld  $E_{in}$  werden reduziert. Das außen angelegte Feld  $E_{ex}$  ist größer als das entgegengerichtete innere Feld, so dass das resultierende Feld einen Strom durch

die Diode treibt. Die Diode ist in „Durchlassrichtung“ gepolt (siehe Abb. 1, 4). Wird die äußere Spannungsquelle aber umgepol, so verstärkt sich der Effekt der Ladungsträgertrennung an der pn-Grenzschicht weiter. Die Kontaktspannung wächst und das den Strom sperrende innere E-Feld steigt. Nur ein sehr geringer Teil von Minoritätsladungsträgern fließt über die Grenze (Sperrstrom  $I_{\text{Sperr}}$ ). Die Diode ist in Sperrichtung gepolt. Die Strom-Spannungs Kennlinie der Diode folgt näherungsweise der Gleichung

$$(1) \quad I(U_{\text{ex}}) = I_{\text{Sperr}} \left( e^{\frac{eU_{\text{ex}}}{kT}} - 1 \right)$$

mit  $e$  = Elektronenladung,  $k$  = Boltzmannkonstante. Ein deutlicher Anstieg des Stromes erfolgt erst nach Überschreiten der Schleusenspannung  $U_s$ , die man durch Extrapolation der steil ansteigenden Stromkurve nach unten auf die Stromachse erhält. Sie ist stark abhängig vom Material und den Dotierungsatomen der Diode.

## 2.4 LED

Eine Leuchtdiode (Light emitting diode) ist eine hochdotierte Diode, die in Durchlassrichtung betrieben wird (Abb. 1, 5). Im pn-Grenzgebiet rekombinieren die freien Elektronen mit Löchern, wobei jedesmal die frei werdende Energie in Form eines Lichtquanten abgestrahlt wird. Die Energie des Lichtes  $E = hf$  und damit seine Farbe (Wellenlänge  $\lambda$ ) hängt empfindlich von dem Diodenmaterial ab. Näherungsweise entspricht die Photonenenergie dem Wert der Bandlücke  $E_g$  des Kristalls, d.h. dem energetischen Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband:

$$(2) \quad hf = E_g$$

Eine ausführliche Darstellung des Bandstrukturmodells eines Halbleiters finden Sie im Praktikum „Solarzelle & Photowiderstand“. Die Bandlücke eines Halbleiterkristalls ist von seiner Atomsorte abhängig. Damit kann jede LED nur Licht einer bestimmten Farbe abstrahlen. Will man eine andere Farbe, muß ein anderes Halbleitermaterial mit einer passenden Bandlücke gewählt werden. Leider eignen sich nicht alle Materialien zur Herstellung von LEDs, denn bei vielen Halbleitern rekombinieren Elektronen und Löcher strahlungslos. Sie geben ihre Energie dann nicht als Lichtquant, sondern als Wärme ab, genauer sie regen den Kristall zu Gitterschwingungen an. Typische LED-Materialien sind GaAs ( $E_g = 1,43$  eV,  $\lambda = 870$  nm Infrarot), Mischkristalle wie  $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$  ( $E_g = 1,92$  eV,  $\lambda = 650$  nm Rot), GaP ( $E_g = 2,26$  eV,  $\lambda = 560$  nm Orange),  $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N}$  ( $E_g = 2,76$  eV,  $\lambda = 450$  nm Blau). Um eine weißes Licht emittierende LED herzustellen kann man eine blau emittierende LED in eine Kunststoffhülle setzen, die durch das hochenergetische, blaue Licht selbst zum Leuchten in allen Farben, also weiß angeregt wird.

## Fragen Zulassung

- Nennen Sie drei typische Halbleitermaterialien
- Was sind p- / n-dotierte Halbleiter? Warum wird dotiert?
- Zeichnen Sie eine Diodenkennlinie. Wozu werden Dioden eingesetzt?
- Warum existiert bereits ein E-Feld bzw. eine Spannung am pn-Kontakt, obwohl von außen keine Spannung angelegt wurde?

### 3. Durchführung

Halbleiterdioden werden durch lokale Überhitzung am pn-Kontakt zerstört! Beachten Sie die Grenzwerte und regeln Sie die Spannung der Netzgeräte vor dem Ein/Ausschalten auf Null!

#### pn-Dioden

- 3.1 Erfragen Sie vom Betreuer die genauen Innenwiderstände von Volt- u. Amperemeter, um die späteren Messwerte diesbezüglich zu korrigieren (siehe Praktikum E01).
- 3.2 Nehmen Sie Strom-Spannungskennlinie einer Diode für den Sperr- und Durchlassbereich in Einzelpunktmessungen (10 Messwerte) auf (Durchlass maximal 100 mA, Sperrrichtung maximal 10 mA). Bestimmen Sie Sperrstrom und Schleusenspannung.

#### Leuchtdioden (LED)

- 3.3 Nehmen Sie für 2 verschiedene LED`s die Kennlinie wie in 3.2 auf und bestimmen Sie die Schleusenspannung.
- 3.4 Bestimmen Sie mit einem Gitterspektrometer die Wellenlänge des emittierten Lichtes für die in 3.3 untersuchten LED`s.

### 4. Auswertung

- 4.1 Beschreiben Sie kurz die Funktionsweise einer Halbleiterdiode und einer LED.
- 4.2 Erstellen Sie die Diodenkennlinien aus den mit den Innenwiderständen korrigierten Daten aus 3.2.
- 4.3 Erstellen sie die Kennlinie der LED`s aus 3.3. Bestimmen Sie Sperrstrom und Schleusenspannung.
- 4.4 Bestimmen Sie aus der Lichtfrequenz  $f$  (aus 3.4) und aus der Schleusenspannung  $U_S$  der LED`s die Bandlücke  $E_g \approx eU_S \approx hf$  (in eV) des Halbleitermaterials. Bestimmen Sie die Konstante  $\frac{h}{e} = \frac{U_S}{f}$  und vergleichen Sie mit Literaturwerten.