

5 Dioden

Dioden sind die wichtigsten passiven nichtlinearen Bauelemente. Sie sind asymmetrische Zweipole, d.h. ihr Widerstand hängt von der Polarität der angelegten Spannung ab.

5.1 Grundlagen

5.1.1 Bandstruktur und Dotierung

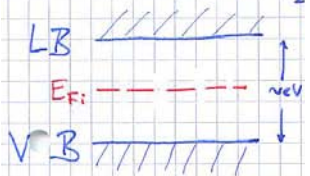


Abbildung 5.1: Bandlücke eines Halbleiters.

Dioden bestehen aus 2 Arten von unterschiedlich dotierten Halbleitern. Beim Halbleitermaterial verwendet man meist Silizium. Alternativen sind Germanium oder binäre Halbleiter aus Elementen der dritten und fünften Gruppe (III/V) Halbleiter, wie z.B. GaAs. Im Rahmen dieser Vorlesung beschränken wir uns auf Silizium, mit Hinweisen auf Germanium und GaAs. Die wichtigsten Parameter dieser Materialien sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Bei einem intrinsischen Halbleiter werden durch thermische Anregung einige Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband angeregt. Dadurch werden in gleicher Zahl bewegliche Elektronen und Löcher als Ladungsträger erzeugt.

5.1.2 Dotierung

Das große Potenzial der Halbleiter liegt darin, dass ihre Eigenschaften durch das Einbringen von Dotieratomen gezielt modifiziert werden können. Bringt man 5-wertige Atome, wie z.B. P, As, Sb in Si ein,

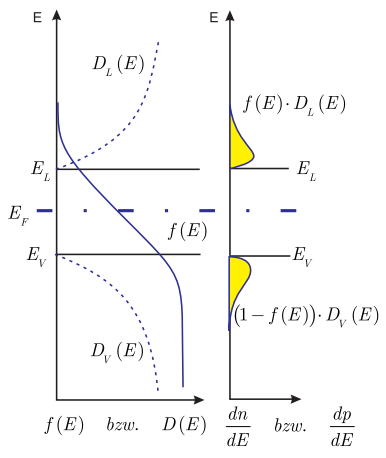


Abbildung 5.2: Ladungsträgerdichte im Valenz- und Leitungsband.

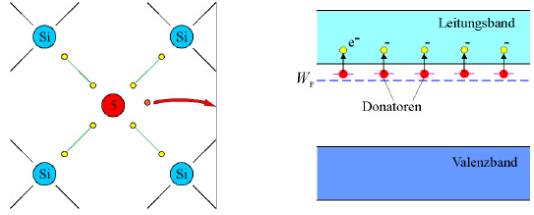


Abbildung 5.3: Donatoren in einem Halbleiter.

so liegen deren Energien leicht unterhalb der Bandkante des Leitungsbandes. Der Abstand beträgt wenige 10 meV, so dass die meisten dieser Donatoren ionisiert werden, d.h. sie geben ein Elektron ans Leitungsband ab und erhöhen dort die Ladungsträgerdichte um viele Größenordnungen.

Ganz analog kann man in den Kristall auch dreiwertige Fremdatome einbauen, wie z.B. B, Al Ga und In. Dadurch werden Fehlstellen erzeugt, die von Elektronen des Valenzbandes aufgefüllt werden. Im Valenzband bleiben daher „Löcher“ zurück, die sich im Elektronengas wie positive Ladungsträger verhalten.

Dioden enthalten eine Grenzschicht zwischen einem n-(negativ) dotierten Teil und einem p-(positiv) do-

	Ge	Si	GaAs	
Bandlücke	0,66	1,12	1,4	eV
Eigenleitungsdichte n_i	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{10}$	$9,2 \cdot 10^6$	cm^{-3}
Elektronenbeweglichkeit μ_n	3900	1350	8800	cm^2/Vs
Löcherbeweglichkeit μ_p	1900	480	450	cm^2/Vs

Tabelle 5.1: Parameter für die wichtigsten Halbleitermaterialien

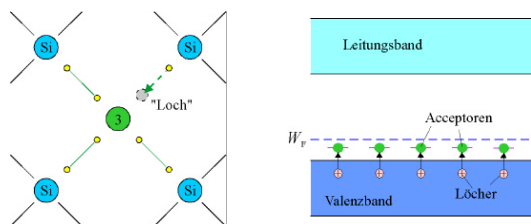


Abbildung 5.4: Akzeptoren in einem Halbleiter.

im Gleichgewicht mit den extrinsischen Ladungsträgern:

$$n_e n_p = n_i^2.$$

Da das Material insgesamt neutral sein muss, ist die Summe der positiven Ladungsträger gleich der Summe der negativen Ladungsträger,

$$N_D + n_p = N_A + n_e.$$

Hier stellt N_D die Dichte der positive geladenen Donatorenrümpfe, N_A die Dichte der negativ geladenen Akzeptoren dar. In einem n-dotierten Material ist $N_D \approx n_e \gg n_p$. Zusammen mit dem Massenwirkungsgesetz folgt daraus

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_D}.$$

Typische Zahlenwerte für n-Si sind $n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $N_D \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ und damit $n_p \approx 10^5 \text{ cm}^{-3}$.

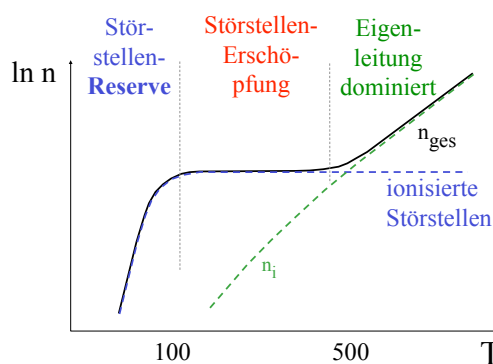


Abbildung 5.6: Abhängigkeit der Ladungsträgerdichte von der Temperatur.

Die Ionisierung von Donatoren und Akzeptoren ist thermisch aktiviert, genau wie die Erzeugung von intrinsischen Ladungsträgern. Aufgrund der relativ

tierten Teil.

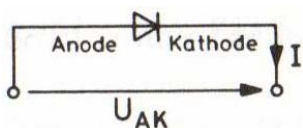


Abbildung 5.5: Symbolische Darstellung einer Diode.

In elektronischen Schaltungen werden Dioden allgemein mit dem in Abb. 5.5 gezeigten Symbol dargestellt. Die Anode ist die p-dotierte Zone, die Kathode die n-dotierte Zone.

5.1.3 Ladungsträgerdichte und Temperaturabhängigkeit

In einem intrinsischen Halbleiter ist die Zahl der positiven und negativen (beweglichen) Ladungsträger gleich. Wird das Material negativ dotiert, so steigt die Anzahl der freien Elektronen, diejenige der Löcher sinkt, $n_p \propto 1/n_e$.

Intrinsisches Material enthält Ladungsträger auf Grund der thermisch angeregten Übergänge zwischen Valenz- und Leitungsband; wir bezeichnen die Dichte dieser Ladungsträger mit n_i . Sie stehen

niedrigen Ionisierungsenergie ist diese ab einer Temperatur von ca. 100 K praktisch vollständig. Dadurch bleibt die Ladungsträgerdichte über einen relativ breiten Temperaturbereich relativ konstant und nimmt erst bei hohen Temperaturen wieder zu, wenn die intrinsischen Ladungsträger über die extrinsischen dominieren. Die Grenze zwischen dem Erschöpfungsbereich und dem Bereich, in dem die Eigenleitung dominiert, hängt von der Dotierung ab.

5.1.4 p-n Übergang

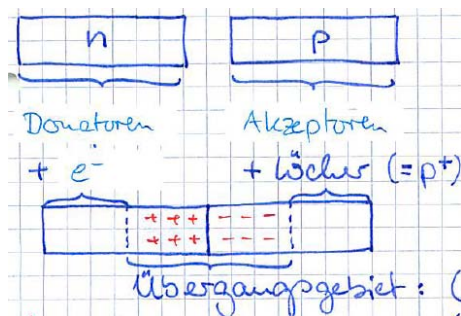


Abbildung 5.7: p-n Übergang.

An der Grenzfläche zwischen 2 entgegengesetzt dotierten Bereichen spielt die Diffusion der Ladungsträger eine wichtige Rolle. Dadurch treffen Elektronen und Löcher aufeinander, rekombinieren und erzeugen so eine Verarmungszone.

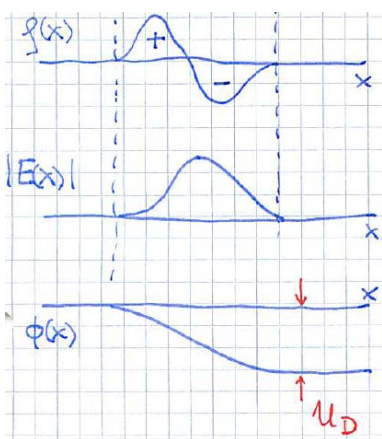


Abbildung 5.8: Ladungsdichte, elektrisches Feld und Potenzial im Bereich des Übergangs.

Da die ionisierten Rumpfe zurückbleiben, entsteht im n-dotierten Bereich eine Zone positiver Raumladungen, auf der p-dotierten Seite ein Bereich negativer Raumladungen. Dies erzeugt ein elektrisches Feld in der Richtung vom n- zum p-dotierten Bereich. Die Stärke des Feldes ist bestimmt durch die Dichte der Raumladung,

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon}$$

oder, in einer Dimension,

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon}.$$

Die zugehörige Potenzialdifferenz entspricht dem Integral

$$\Phi(x) = - \int E_x(x) dx.$$

Dieses elektrische Feld, resp. das Potenzial, wirkt der Diffusion entgegen, so dass sich ein Gleichgewicht bildet.

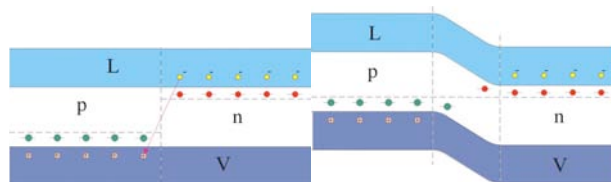


Abbildung 5.9: Bandverbiegung auf Grund der Diffusion im Bereich der Grenzfläche: Links die Bänder ohne elektrischen Kontakt, rechts nach Diffusion und Erzeugung einer Verarmungszone.

Das Fermi-niveau liegt im p-dotierten Bereich knapp oberhalb der Valenzbandkante, im n-dotierten Bereich knapp unterhalb der Leitungsbandkante.

Im Gleichgewicht beträgt die Diffusionsspannung für ein kastenförmiges Potenzial

$$U_D = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}.$$

Der erste Faktor, das Verhältnis aus thermischer Energie und Elementarladung ist die Temperaturspannung

$$U_T = \frac{k_B T}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \approx 26 \text{ mV}$$

(bei Raumtemperatur). Typische Werte von U_D für Si sind in der Größenordnung von 0.6 .. 0.7 V. Der Wert ist temperaturabhängig:

$$\frac{\partial U_D}{\partial T} \approx 2 \frac{\text{mV}}{\text{K}}.$$

Die Breite d_0 der Verarmungszone liegt im Bereich von μm und ist abhängig vom Dotierungsprofil.

Da sich hier zwei Bereiche entgegengesetzter Ladung in geringer Entfernung befinden, wirkt eine Diode immer auch als Kondensator. Die entsprechende Kapazität wird als Sperrschichtkapazität bezeichnet.

5.1.5 Einfluss einer Spannung

Wir betrachten nun das Verhalten der Diode, wenn eine Spannung angelegt wird. Zunächst wird am p-Leiter eine negative Spannung angelegt, am n-Leiter eine positive. Dadurch werden die Ladungsträger in Richtung auf die Elektroden verschoben. Die Sperrschicht wird dadurch breiter, die Raumladungszone wird größer und damit der Abstand zwischen den Energien der Bänder auf beiden Seiten.

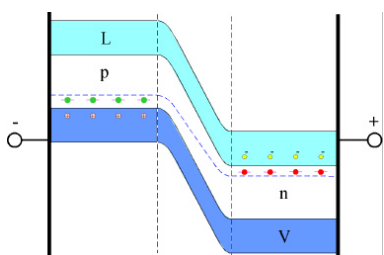


Abbildung 5.10: Sperrschicht bei Anlegen einer Spannung in Rückwärtsrichtung.

Da die Leitfähigkeit im Bereich der Sperrschicht weitaus niedriger ist, fällt hier der größte Teil der Spannung ab. Der Unterschied im Fermi-niveau zwischen den beiden Bereichen entspricht praktisch der angelegten Spannung.

Wechselt man das Vorzeichen der Spannung, so werden auf der p-Dotierten Seite zusätzliche Löcher, auf der n-dotierten Seite zusätzliche Elektronen eingebracht. Diese wandern in Richtung Sperrschicht, diese wird schmaler, die Raumladungszone wird reduziert und die Diffusionsspannung weitgehend kompensiert. Die Ladungsträger können die Sperrschicht

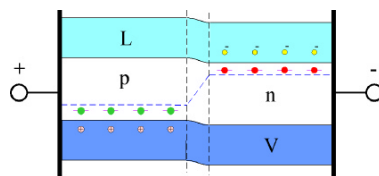


Abbildung 5.11: Sperrschicht bei Anlegen einer Spannung in Vorwärtsrichtung.

durchqueren und rekombinieren, so dass hier ein Strom fließt. Man spricht deshalb vom "Durchlassbereich".

5.1.6 Diodenkennlinie

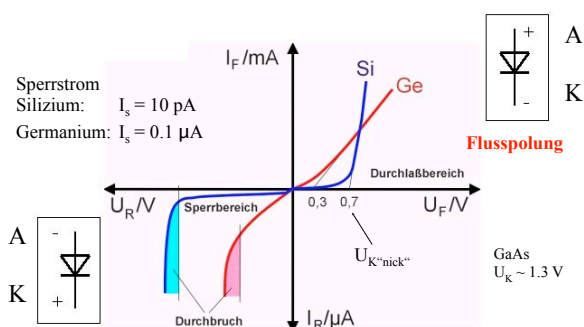


Abbildung 5.12: Strom-Spannungskennlinie einer typischen Diode.

Die Beziehung zwischen Strom und Spannung einer Diode ist stark asymmetrisch. Im Sperrbereich fließt nur ein geringer Strom, der Sperrstrom I_S , der von den Minoritätsladungsträgern gebildet wird, d.h. den Elektronen im p-Bereich und den Löchern im p-dotierten Bereich. Für Ge-Dioden ist er in der Größenordnung von μA , für Si-Dioden in der Größenordnung von nA . Da mit zunehmender Temperatur die Zahl der Minoritätsladungsträger zunimmt, steigt die Leitfähigkeit mit der Temperatur. Eine Temperaturerhöhung um 10°C verdoppelt etwa den Sperrstrom I_S .

Wenn die Spannung (in Sperrichtung) die Durchbruchspannung U_{Br} übersteigt, so steigt der Strom sehr schnell an. In diesem Bereich reicht die kinetische Energie der Ladungsträger, um über Stoßionisation weitere Ladungsträger zu erzeugen. Wird der

Strom in diesem Bereich nicht beschränkt, kann dies zur Zerstörung der Diode führen.

Im Durchlassbereich, d.h. in Vorwärtsrichtung, werden Ladungsträger in die Verarmungszone eingebracht, diese wird dünner. In diesem Bereich kann der Strom beschrieben werden durch die Funktion

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1),$$

wobei U_T wieder die Temperaturspannung $kT/e \approx 26 \text{ mV}$ darstellt. Wegen der Temperaturabhängigkeit von I_s und U_T ist auch der Strom temperaturabhängig; diese Eigenschaft von Dioden ist meist nicht erwünscht. Bei großen Spannungen, $U \gg U_T$ weicht die Kennlinie von der Exponentialfunktion ab und nähert sich einer Geraden, da hier der endliche Bahnwiderstand der Diode wichtig wird.

Eine wichtige charakteristische Größe von Dioden ist die Flussspannung: so bezeichnet man die Spannung, bei der der Strom 1/10 des zulässigen Maximalstromes erreicht. Sie beträgt bei Si-Dioden ca. 0,7 V, bei Ge-Dioden ca. 0,3 V. Da die Anzahl der Ladungsträger in einem Halbleiter mit zunehmender Temperatur steigt, steigt auch die Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur, und die Kennlinie verschiebt sich insgesamt nach links, d.h. zu tieferen Spannungen.

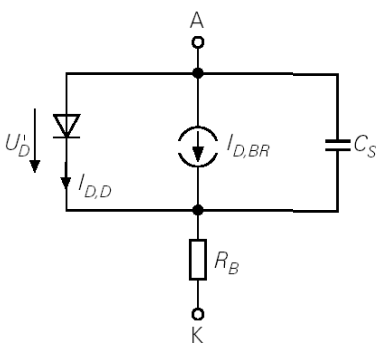


Abbildung 5.13: Ersatzschaltbild für eine Diode.

Abb. 5.13 zeigt ein Ersatzschaltbild für eine reale Diode, welches den Diffusionsstrom, den Durchbruchstrom, die Sperrschichtkapazität und den Bahnwiderstand berücksichtigt.

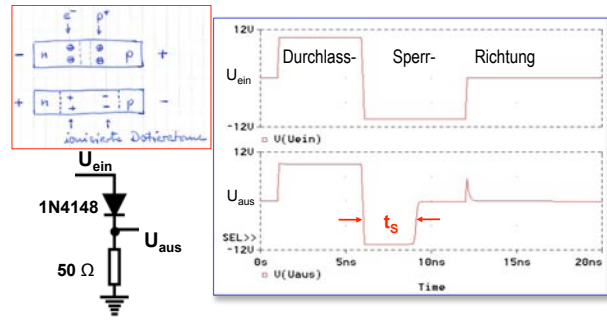


Abbildung 5.14: Schaltverhalten einer Diode.

5.1.7 Schaltverhalten

Bei der Umpolung von der Durchlass- zur Sperrrichtung müssen langsame Minoritätsladungsträger aus der Verarmungszone entfernt werden und die Sperrschichtkapazität umgeladen werden. Während dieser Zeit fließt deshalb ein Strom in Sperrrichtung. Die Größe des Stroms und die Dauer wird neben der Grenzsichtkapazität durch den Serienwiderstand bestimmt. Die Diode sperrt erst nach Ablauf der Speicherzeit t_s . Normale Dioden sind deshalb für schnelle Anwendungen nicht geeignet. Das Problem wird bei Schottky-Dioden vermieden. Beim Umschalten von Sperr- auf Vorwärtsrichtung bewirkt die Grenzsichtkapazität ebenfalls eine kurze Spannungsspitze; diese ist jedoch deutlich kürzer als beim Umschalten auf Sperrrichtung.

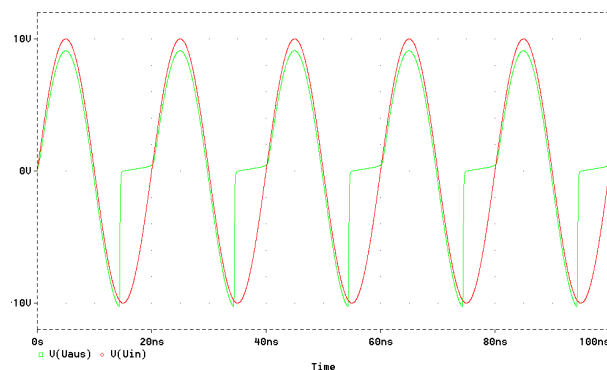


Abbildung 5.15: Wechselspannung über einer Diode.

Legt man eine Wechselspannung über einer Diode an, so wird die negative Halbwelle unterdrückt. Ist die Frequenz hoch genug, so führt die Verzögerung

beim Umschalten dazu, dass ein Teil der negativen Halbwellen durchkommt. Je nach Aufbau der Diode kann das Ende des Stromflusses in der negativen Halbwellen sehr plötzlich sein. Der Strom enthält dann hohe Vielfache der Grundfrequenz. Dioden, welche diesen Effekt optimieren, werden als "step-recovery" Dioden bezeichnet. Sie werden für die Erzeugung steiler Impulse und zur Frequenzvervielfachung verwendet.

5.2 Dioden-Schaltungen

5.2.1 Einfacher Gleichrichter

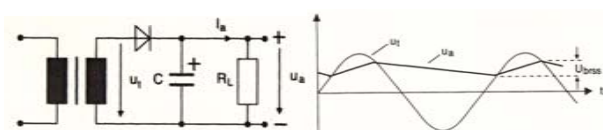


Abbildung 5.16: Einfache Gleichrichterschaltung und resultierende Spannung.

Eine Diode kann verwendet werden, um nur Strom in eine Richtung durchzulassen. Typische Anwendungen sind die Erzeugung einer Gleichspannung nach einem Transformator. Die Diode allein erzeugt dabei eine Folge von positiven Halbwellen. Diese kann man mit Hilfe eines Kondensators glätten. Es bleibt ein Wechselfspannungsanteil (Brummspannung) übrig, der umso kleiner ist, je größer der Kondensator.

5.2.2 Vier-Wege Gleichrichter

Der einfache Gleichrichter unterdrückt die negative Halbwellen der Eingangsspannung, aber er nutzt sie nicht und erzeugt eine relativ hohe Brummspannung. Dies kann vermieden werden mit Hilfe des Vier-Weg Gleichrichters (auch Grätz-Schaltung genannt).

Dabei verwendet man vier Dioden, um beide Hälften der Wechselfspannung zu nutzen. Allerdings fließt dabei der Strom durch 2 Dioden, so dass zweimal die Diodenspannung verloren geht.

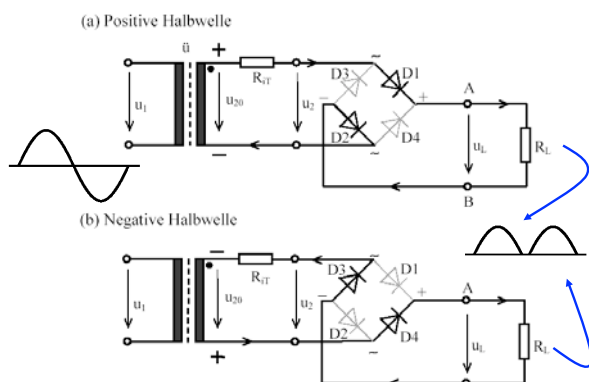


Abbildung 5.17: Vierwege-Gleichrichter: es werden beide Halbwellen in positive Spannungen umgewandelt.

5.2.3 Spannungsbegrenzung

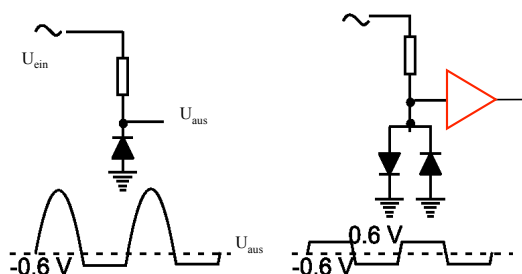


Abbildung 5.18: Links: Begrenzung von negativen Spannungen; rechts: Begrenzung von positiven und negativen Spannungen.

Abb. 5.18 zeigt, wie man Dioden verwenden kann, um Spannungen zu begrenzen. In der linken Figur werden negative Spannungen auf $-0,6\text{ V}$ (die Sperrspannung) begrenzt: bei stärker negativen Spannungen leitet die Diode und hält deshalb das Potenzial auf $-0,6\text{ V}$. Bei positiven Spannungen sperrt die Diode und das Signal wird nur wenig abgeschwächt.

Auf der rechten Seite von Abb. 5.18 werden zwei Dioden parallel, aber mit entgegengesetzter Polung auf Masse geschaltet. Man spricht von gekreuzten Dioden. Bei Spannungen $U > 0,6\text{ V}$ leitet die linke Diode, bei Spannungen $U < -0,6\text{ V}$ die rechte Diode. Alle Spannungen $|U| > 0,6\text{ V}$ werden deshalb geblockt. Solche Schaltungen verwendet man

z.B., um empfindliche Bauteile vor Spannungsspitzen zu schützen. Möchte man die Spannungsgrenze auf einen Wert $> 0,6\text{ V}$ einstellen, so kann man mehrere Dioden in Reihe schalten.

5.2.4 Diodenschalter

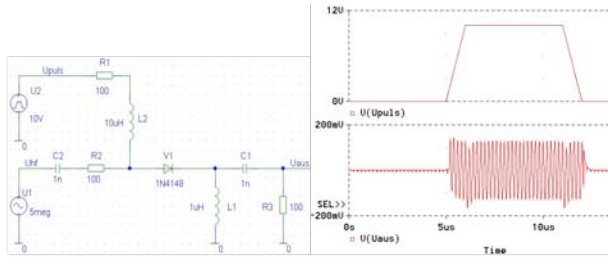


Abbildung 5.19: Links: Schaltplan für einfachen Diodenschalter. Rechts: Schaltimpuls und transmittiertes Signal.

Wird an die Diode eine Gleichspannung in Vorwärtsrichtung angelegt, so wird sie leitend. Dies kann man verwenden, um einfache Schalter aufzubauen. In Abb. 7.10 ist links eine Schaltung gezeigt, welche einen Diodenschalter implementiert: Für negative oder kleine positive Spannungen sperrt die Diode. Steigt die Kontrollspannung U_2 jedoch über die Grenze von $0,6\text{ V}$, so fließt ein Strom durch die beiden Induktivitäten L_1 und L_2 und die Diode V_1 . Damit wird sie auch für das Signal U_{hf} leitend und dieses erscheint am Ausgang U_{aus} . Der Kondensator C_1 dient dazu, dass das Schaltsignal selber nicht am Ausgang erscheint.

5.2.5 Duplexer

Ein Duplexer verwendet zwei Spannungsbegrenzer, um starke von schwachen Signalen zu trennen und um empfindliche Bauteile (Vorverstärker) vor den starken Signalen zu schützen. In der Figur ist links ein Leistungsverstärker gezeichnet, der Pulse mit Amplituden im kV Bereich erzeugt. Diese dürfen nicht zum Vorverstärker am rechten Rand gelangen, weil dieser sonst zerstört würde. Deshalb werden vor dem Eingang des Vorverstärkers gekreuzte Dioden angebracht, welche das Signal an dieser Stelle auf

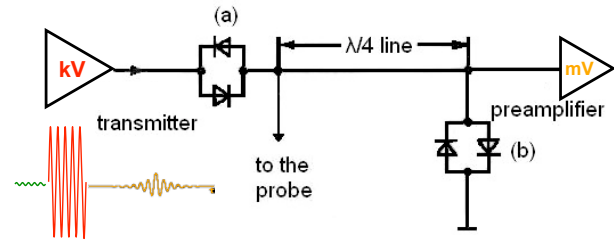


Abbildung 5.20: Dieser Duplexer dient dazu, starke von schwachen Signalen zu trennen.

$\pm 0,6\text{ V}$ begrenzen. Im Vergleich zu den kV Signalen des Verstärkers wirken diese Dioden somit als Kurzschluss. Damit das starke Signal dadurch nicht einfach in den Verstärker reflektiert wird, wird dieser Kurzschluss durch eine $\lambda/4$ Leitung in ein offenes Ende transformiert. Der RF-Puls 'sieht' somit die Abzweigung gar nicht und läuft zur Probe.

Das Signal, welches von der Probe zurückkommt ist sehr viel schwächer, d.h. weit unterhalb der Schaltspannung der Dioden. Die gekreuzten Dioden auf dem Weg zum Leistungsverstärker lassen deshalb dieses Kleinsignal nicht durch, ebenso wenig die Dioden am Eingang zum Vorverstärker. Es gelangt deshalb vollständig in den Vorverstärker. Das Diodenpaar am Ausgang des Leistungsverstärker dient außerdem dazu, das Rauschen zu unterdrücken, welches dieser auch dann erzeugt, wenn kein Eingangssignal anliegt. Beträgt es weniger als $\pm 0,6\text{ V}$, so wird es von den Dioden geblockt.

5.2.6 Spannungsverdoppler

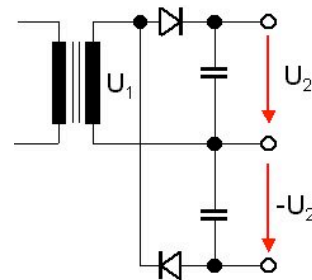


Abbildung 5.21: Delon-Schaltung zur Verdopplung einer Wechselspannung.

Bei der Delon-Schaltung lädt die positive Halbwelle den oberen Kondensator auf, die negative den Unteren. Somit kann zwischen dem oberen und dem unteren Kontakt die Spannung $2U_0$ abgegriffen werden.

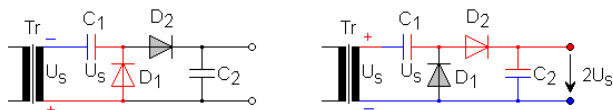


Abbildung 5.22: Villard- oder Greinacher Schaltung.

Abb. 5.22 zeigt eine Alternative: In diesem Fall wird während der ersten Halbwelle der Kondensator C_1 aufgeladen. Während der zweiten Halbwelle wird die positive Platte mit dem oberen Ausgang verbunden, während von der negativen Platte nochmals U_s subtrahiert wird und das Resultat auf den unteren Ausgang gegeben wird. Die Schaltung wird als Villard- oder Greinacher Schaltung, im angelsächsischen Raum oft als Cockcroft-Walton Generator bezeichnet und eignet sich zur Kaskadierung.

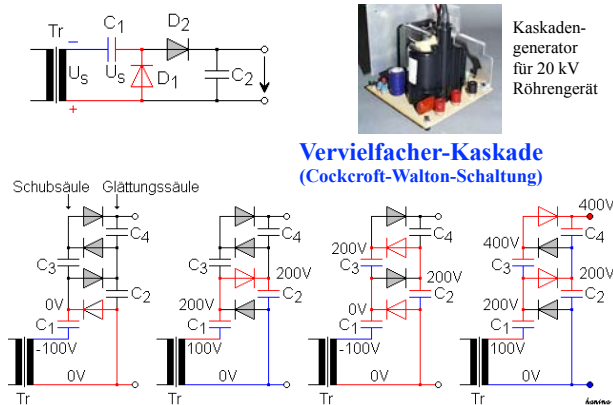


Abbildung 5.23: Vervielfacherkaskade.

Abb. 5.23 zeigt ein Beispiel, in dem Spannungen bis in den kV Bereich erzeugt werden.

5.2.7 Mischer

Die nichtlineare Kennlinie kann auch verwendet werden, um Signale miteinander zu multiplizieren. Wendet man das auf harmonische Signale an, so erhält man im Ausgangssignal Summen und Differenzen der Eingangsfrequenzen. Einzelheiten dazu wer-

den im Kapitel 9 (analoge Signalübertragung) diskutiert.

5.3 Dioden-Typen

5.3.1 Symbole für Dioden

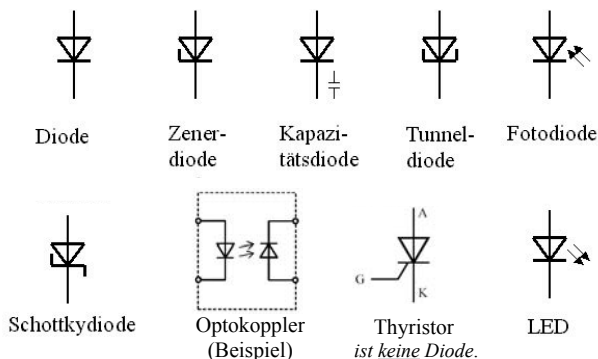


Abbildung 5.24: Symbole für unterschiedliche Diodentypen.

Die Eigenschaften von Dioden können über die Dimensionen und Dotierung in einem relativ breiten Bereich gesteuert werden. Es werden deshalb relativ unterschiedliche Typen verwendet, und man hat entsprechend viele unterschiedliche Symbole eingeführt. Abb. 5.24 fasst die wichtigsten zusammen. Gemeinsam ist ihnen das Dreieck, welches die technische Stromrichtung angibt.

5.3.2 Kapazitätsdiode

Die Grenzflächenkapazität einer Diode hängt, wie bei einem Plattenkondensator, von der Dicke des Dielektrikums ab, in diesem Fall also von der Dicke der Verarmungszone. Dies kann man optimieren, um Dioden mit elektrisch steuerbarer Kapazität herzustellen.

Solche Kapazitätsdioden haben eine variable Grenzschichtkapazität

$$C_S(d) = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d(U)} \propto U^{-0.5..-2}$$

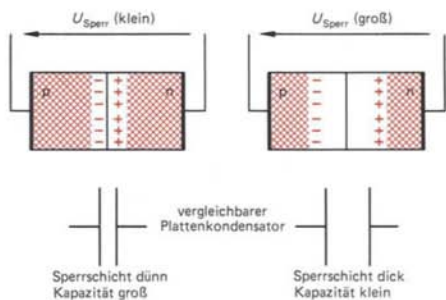


Abbildung 5.25: Änderung der Kapazität einer Diode durch die äußere Spannung.

Typische Werte liegen im Bereich von ≤ 500 pF und sind abhängig vom Dotierungsprofil am Übergang. Über die Steuerspannung kann die Kapazität um einen Faktor von 3-15 variiert werden.

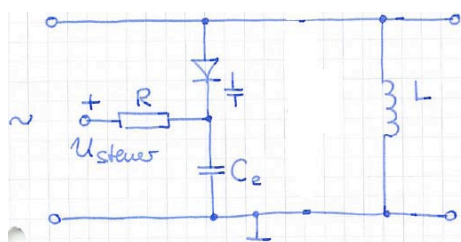


Abbildung 5.26: Elektroische Steuerung einer Kapazitätsdiode zur Abstimmung eines Schwingkreises.

Abb. 5.26 zeigt eine Schaltung, welche diese Möglichkeit nutzt. Die Kapazität der Diode wird über die (langsame) Steuerspannung U_{Steuer} eingestellt. Der Kondensator C_e dient der Entkopplung der Steuerspannung, die Kapazitätsdiode ist in Sperrichtung geschaltet. Die Gesamtkapazität von C_S und C_e wird durch C_S bestimmt, falls $C_e \gg C_S$.

Typische Anwendungen sind die Abstimmung von Schwingkreisen (AFC) oder spannungskontrollierte Oszillatoren (VCO). Reicht der abstimmbare Bereich einer Diode nicht aus, kann man mehrere in Reihe oder parallel kombinieren.

5.3.3 Z-Dioden

Zener-Dioden dienen zur Spannungsstabilisierung und werden in der Nähe der Durchbruchspannung

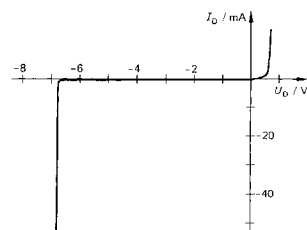


Abbildung 5.27: Kennlinie einer Zenerdiode.

betrieben. Ihre wichtigsten Eigenschaften sind:

- "scharf" abknickende Kennlinie bei U_{Br} .
- sehr schmaler pn-Übergang ($d \approx 10$ nm)
- hoch dotiert: $n \approx 10^{16}..10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Die hohe Dichte bewirkt, dass die Sperrschicht relativ schmal und die Feldstärke hoch wird. Dadurch können Elektronen aus Valenzorbitalen herausgelöst werden. Dieser Vorgang ist analog zu einer inneren Feldemission.

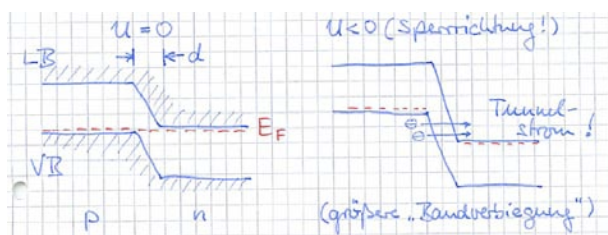


Abbildung 5.28: Bandverlauf bei einer Zenerdiode.

Der Vorgang kann als Tunnelprozess verstanden werden: Wir an die Z-Diode eine Spannung in Sperrichtung angelegt, so werden die Bänder an der Sperrichtung so stark verbogen, dass sich die Zustände an der Valenzbandkante auf der einen Seite auf gleicher Höhe befinden wie die Zustände an der Leitungsbandkante auf der anderen Seite. Damit wird ein resonante Tunneln durch die dünne Grenzschicht möglich.

Die Energie, die benötigt wird, um diese innere Feldemission zu bewirken, sinkt mit zunehmender Temperatur, so dass sich die Kennlinie zu niedrigeren Spannungen verschiebt.

Bei Dioden mit einer Durchbruchspannung oberhalb von 6 V dominiert ein anderer Effekt: Hier werden die Ladungsträger so stark beschleunigt, dass sie bei

Stößen mit den Atomen genügend Energie besitzen, um weiter bewegliche Ladungsträger zu erzeugen. Diese werden ebenfalls beschleunigt und die Zahl der Ladungsträger nimmt lawinenartig zu. Bei diesem Prozess sinkt die Effizienz mit zunehmender Temperatur, d.h. die Kennlinie der Diode verschiebt sich nach links.

5.3.4 Spannungsstabilisierung mit Z-Diode

Eine typische Anwendung der Zener-Dioden ist die Stabilisierung einer Spannung.

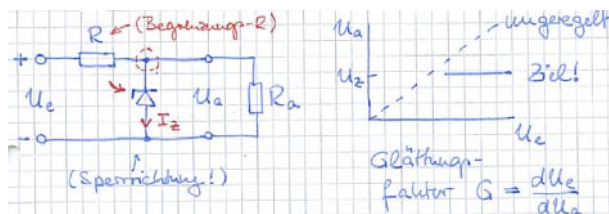


Abbildung 5.29: Spannungsregelung mit Hilfe einer Zenerdiode.

Die Funktionsweise der Stabilisierung kann verstanden werden, indem man den Knoten betrachtet, der in Abb. 5.29 markiert ist: Der Strom durch den Begrenzungswiderstand R ist

$$I_R = I_Z + I_a. \quad (5.1)$$

Als Ersatzschaltbild für die Diode am Arbeitspunkt betrachten wir sie als eine ideale Spannungsquelle mit Spannung U_{Z0} in Reihe mit einem Innenwiderstand

$$r_Z = \frac{\partial U_Z}{\partial I_Z}:$$

U_Z ist die Spannung über der realen Zenerdiode, U_{Z0} die Spannung über der idealen. Der Widerstand r_Z liegt im Bereich von etwa 10Ω und der Spannungsabfall über diesem Widerstand beträgt $U_a - U_{Z0}$. Damit können wir die Strombilanz (5.1) schreiben als

$$\frac{U_e - U_a}{R} = \frac{U_a - U_{Z0}}{r_Z} + \frac{U_a}{R_a}.$$

Wir bestimmen die Ableitung nach der Ausgangsspannung U_a :

$$\frac{1}{R} \left(\frac{dU_e}{dU_a} - 1 \right) = \frac{1-0}{r_Z} + \frac{1}{R_a}.$$

Somit wird der Glättungsfaktor

$$G = \frac{dU_e}{dU_a} = 1 + \frac{R}{r_Z} + \frac{R}{R_a} \approx \frac{R}{r_Z},$$

falls $r_Z \ll R, R_a$. Damit wird der Glättungsfaktor G unabhängig vom Lastwiderstand R_a was eine wichtige Voraussetzung für ein gutes Netzteil ist. Allerdings ist er proportional zum Begrenzungswiderstand R und damit zur Verlustleistung $P = RI_a^2$.

5.3.5 Temperaturabhängigkeit

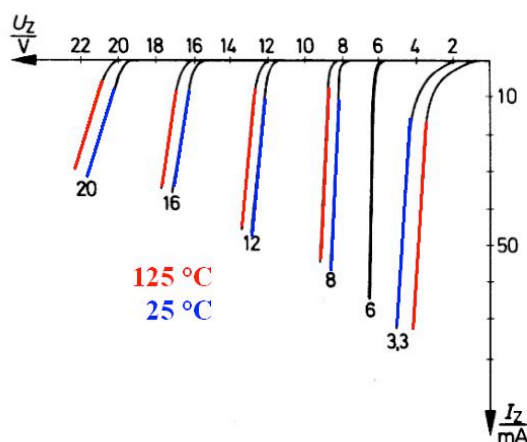


Abbildung 5.30: Temperaturabhängigkeit der Kennlinien.

Die Kennlinien und damit die Durchbruchspannung von Zenerdioden zeigen eine erhebliche Temperaturabhängigkeit, wie in Abb. 5.30 dargestellt. Die Abbildung zeigt auch, dass der Temperaturkoeffizient mit der Zenerspannung das Vorzeichen ändert, wie in Abb. 5.31 gezeigt. Der Grund für diesen Effekt ist die unterschiedliche Art des Durchbruchs: bei Spannungen unterhalb von 6 V findet ein 'Zener-Durchbruch' statt, bei Spannungen oberhalb von 6 V ein 'Lawinen-Durchbruch'.

Dieser Vorzeichenwechsel kann genutzt werden, um die unerwünschte Temperaturabhängigkeit zu reduzieren. Dafür verwendet man nicht eine einzige Z-Diode, sondern kombiniert zwei mit entgegengesetztem, betragsmäßig möglichst identischen Temperaturkoeffizienten. Ein Beispiel ist in der rechten Hälfte von Abb. 5.31 gezeigt.

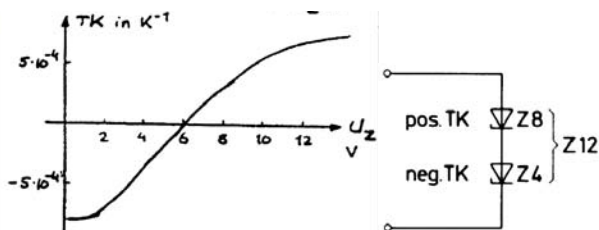


Abbildung 5.31: Temperaturabhängigkeit Kennlinien.

5.3.6 Tunneldiode

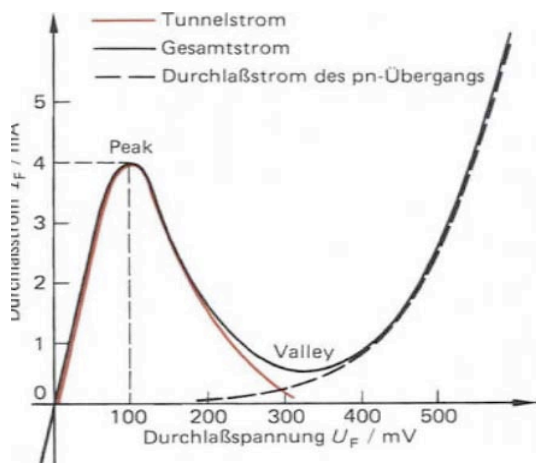


Abbildung 5.32: Kennlinie einer Tunneldiode.

Die Tunneldiode hat über einen bestimmten Spannungsbereich einen negativen differentiellen Widerstand

$$r_D = \frac{\partial U}{\partial I} < 0.$$

Ihre Kennlinie in diesem Bereich entspricht dem eines aktiven Zweipols. Während ein normaler Widerstand $R > 0$ in einem Schwingkreis zu einer Dämpfung führt ergibt ein negativer differentieller Widerstand $r < 0$ eine Verstärkung und kann z.B. zur Entdämpfung schneller Schwingkreise verwendet werden. Die Tunneldiode hat für negative Spannungen keine Sperrwirkung. Das Tunneln der Ladungsträger wird hier erleichtert, indem das Material sehr hoch dotiert wird ($n_{Dot} \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) und gleichzeitig die Sperrschicht relativ dünn gehalten wird, $< 10 \text{ nm}$.

Abb. 5.33 zeigt schematisch, wie diese Eigenschaften zustande kommen: In Sperrrichtung und für gerin-

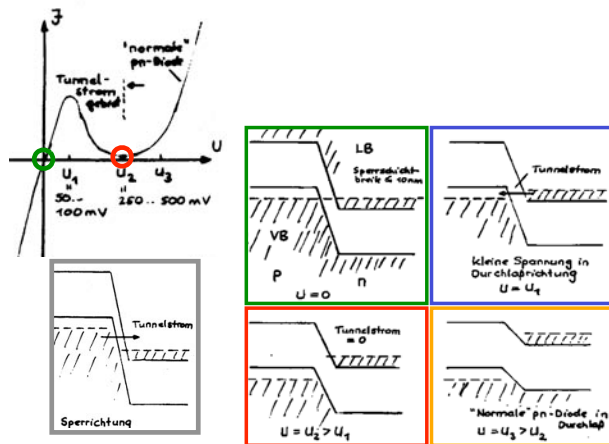


Abbildung 5.33: Bänder einer Tunneldiode für verschiedene Spannungen.

ge positive Spannungen ist der ‘verbotene’ Bereich so klein, dass die Ladungsträger durchtunneln können. Für höhere Spannungen ($U_2 \approx 250 \text{ mV}$) stehen auf der anderen Seite des Kontaktes keine Zustände zur Verfügung und der Tunnelprozess wird unterbunden. Erst bei höheren Spannungen tritt die normale Diodenwirkung ein.

Backward-Dioden sind ähnlich aufgebaut wie Tunneldioden, aber schwächer dotiert, so dass nur ein geringer Tunnelstrom auftritt und dadurch das Maximum sehr flach wird.

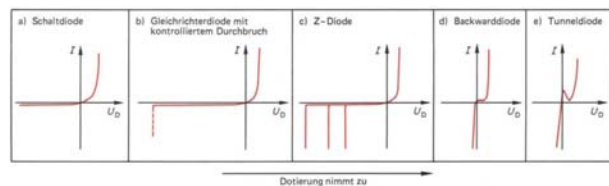


Abbildung 5.34: Abnahme der Sperrspannung mit zunehmender Dotierung.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Typen zeigt, dass die zunehmende Dotierung zu einer Abnahme der Sperrspannung und zu einer systematischen Änderung der Kennlinie führt.

5.3.7 Schottky-Diode

Bei der Schottky-Diode wird der p-n Übergang durch einen Metall-Halbleiter Kontakt realisiert.

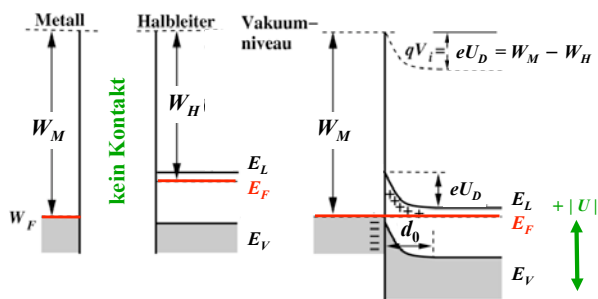


Abbildung 5.35: Ladungstransfer und Bandverbiegung beim Kontakt zwischen Metall und Halbleiter.

In einem Metall und einem Halbleiter haben die Elektronen unterschiedliche Austrittsarbeit. Kommt ein n-dotierter Halbleiter in Kontakt mit einem Metall, so können Elektronen aus dem Halbleiter in das Metall übertragen werden. Dadurch entsteht im Halbleiter eine positiv geladene Raumladungszone und im Metall eine negative geladene Raumladungszone, wie bei der Halbleiterdiode.

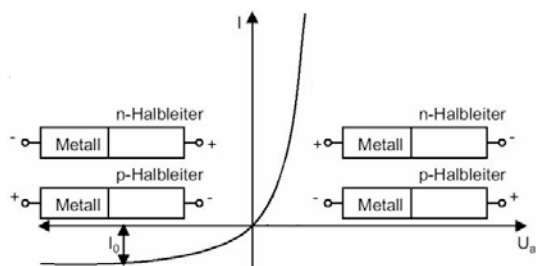


Abbildung 5.36: Kennlinie einer Schottky-Diode.

Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Mechanismen haben Schottky-Dioden eine etwas andere Kennlinie als Halbleiterdioden. Da bei dieser Diode keine Minoritätsladungsträger zur Leitung beitragen, ist die Schottky-Diode sehr schnell: sie kann bis zu Frequenzen im Bereich von 100 GHz verwendet werden.

Es gilt, 2 Fälle zu unterscheiden auf Grund der relativen Größe der Austrittsarbeit W_M im Metall relativ zur Austrittsarbeit im Halbleiter W_H :

- $W_M < W_H$ Das Fermi-Niveau im Metall liegt oberhalb des Fermi-niveaus im HL; somit können Elektronen aus dem Metall leicht in den

Halbleiter tunneln, sie gewinnen dabei Energie.

- $W_M > W_H$ Die Elektronen fließen vom HL in das Metall und erzeugen eine Verarmungszone am Metall-HL Übergang. Dies führt zu einer Bandverbiegung im HL.

Die Dicke der Verarmungszone und damit der Strom durch die Grenzfläche kann wie bei einer normalen Diode über die Spannung eingestellt werden. Im Vergleich zu normalen Dioden ist jedoch die Schwellspannung geringer ($\approx 0,3$ V) und es sind keine Minoritätsladungsträger am Transport beteiligt, so dass kürzere Schaltzeiten resultieren. Schottky-Dioden sind deshalb vor allem für schnelle Anwendungen interessant.

5.3.8 PIN-Dioden

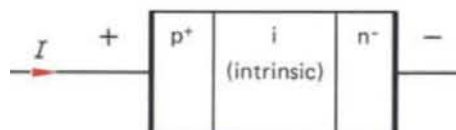


Abbildung 5.37: Aufbau einer pin-Diode.

In einer pin-Diode befindet sich zwischen der p- und der n-Schicht noch eine zusätzliche i- (intrinsische) Schicht. Die p- und n-Schicht sind hier sehr hoch dotiert. Ist die Sperrschicht nicht oder in Sperrrichtung vorgespannt, d. h. mit einer Spannung in Sperrrichtung betrieben, dann isoliert die praktisch ladungsträgerfreie Intrinsic-Schicht, und die Diode ist sehr hochohmig. Wird die Diode mit der angelegten Spannung in Durchlaßrichtung betrieben, fließen Ladungsträger aus den hoch dotierten Randschichten in die Intrinsic-Schicht und diese leitet. Der differentielle Leitwert der Sperrschicht ist zum Vor- oder Steuerstrom proportional, ihr differentieller Widerstand entsprechend umgekehrt proportional. Die Diode verhält sich in diesem Bereich wie eine ganz normale Siliziumdiode. PIN Dioden finden vor allem in schnellen Hochfrequenzschaltern Anwendung.

5.3.9 Fotodioden

Halbleiter können die Energie von optischen Photonen verwenden, um Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband anzuregen. Dabei wird ein Elektron-Loch Paar erzeugt, d.h. es entstehen freie Ladungsträger. Voraussetzung ist, dass die Energie

$$E_V = h\nu,$$

mit h als Planck'sches Wirkungsquantum und ν der optischen Frequenz mindestens gleich der Bandlücke des Halbleiters entspricht. Geschieht diese Absorption im Bereich des pn-Übergangs, so werden die Ladungsträger getrennt und es fließt ein Photostrom. In der Solarzelle wird dieser zur Umwandlung von Licht- in elektrische Energie verwendet, in Fotodioden für den Nachweis von Licht.

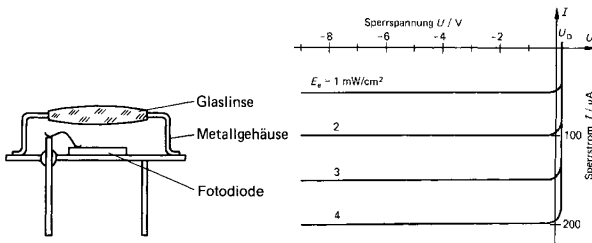


Abbildung 5.38: Fotodiode in Gehäuse (links) und Kennlinie einer Fotodiode für verschiedene Beleuchtungsstärken (rechts).

Fotodioden werden im Sperrbereich betrieben, und ihre Kennlinie zeigt einen Sperrstrom, der über einen relativ weiten Bereich proportional zur Beleuchtungsstärke ist. Sie sind relativ hochohmig; für schnelle Detektoren muss deshalb der Fotostrom über einen Transimpedanzverstärker in eine Spannung umgewandelt werden.

5.3.10 Historisches

Gleichrichtung in einem Festkörper wurde erstmals 1874 von Karl Ferdinand Braun (1850-1918) gezeigt, u.a. mit einem Blei/Sulfid Kontakt. Ein Bipolartransistor wurde 1947 an den Bell Labs entwickelt (Bardeen, Brattain, Shockley) und 1956 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Erst 1962 wurden

jedoch mehr Halbleiter-Bauelemente als Röhren hergestellt.