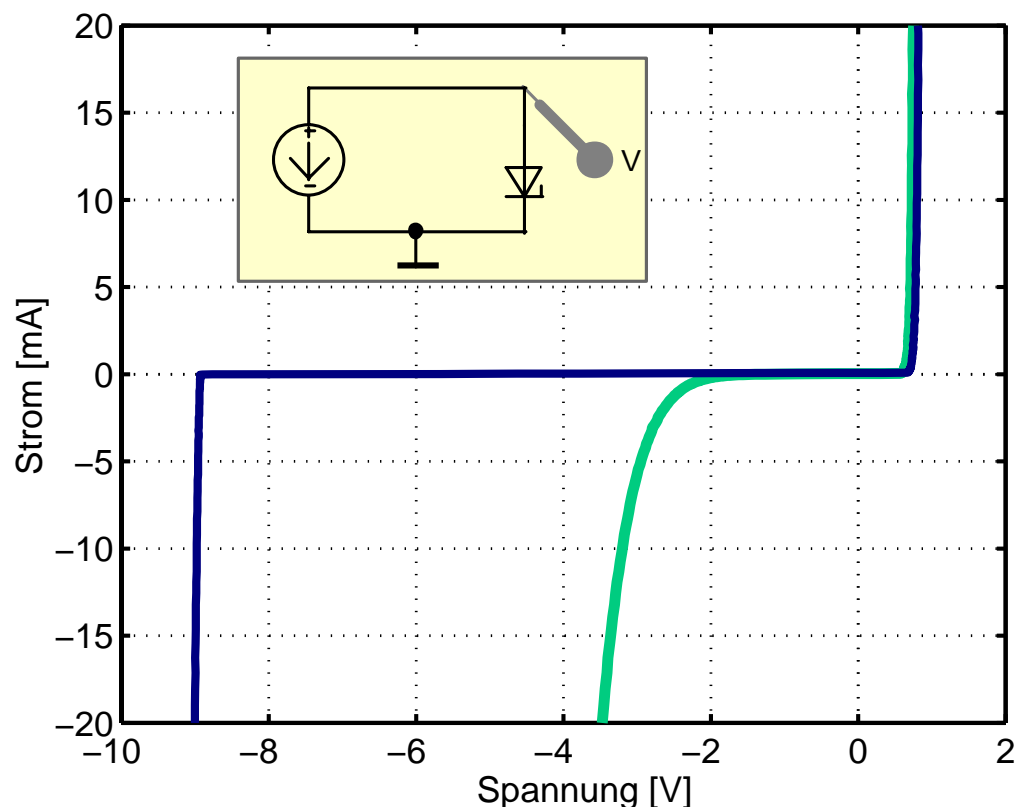


Dioden

dioden.tex KB 20020520



In der gesamten modernen Technik spielen Dioden jeglicher Art eine außerordentlich wichtige Rolle. Neben den klassischen Gleichrichterdiode, durch die beispielsweise auch erst die Verwendung der Drehstromlichtmaschine im Auto möglich wurde, gibt es eine Vielzahl von Spezialdioden. Z-Dioden werden zur Spannungsstabilisierung verwendet, in jedem Rundfunk- und Fernsehempfänger sind Kapazitätsdioden für die Frequenzabstimmung von Schwingkreisen zuständig. Sehr viele Detektoren und Sensoren beruhen auf Diodenstrukturen, so die meisten hochauflösenden Detektoren für α -, β -, γ - und Röntgenstrahlung. Immer wichtiger werden die optischen Anwendungen, Sender und Empfänger bei der optischen Nachrichtenübertragung, Solarzellen, Elemente von optischen Detektorarrays, viele optische Anzeigen sind Dioden. Diodengepumpte Festkörperlaser verdrängen immer stärker die klassischen Laser in der Materialbearbeitung.

Gegenstand dieses Projekts sind die elektrischen Eigenschaften und einige typische Anwendungen von Dioden.

Inhaltsverzeichnis

1 Ziele	3
2 Grundlagen: Halbleiterphysik	3
3 Grundlagen: Dioden	4
3.1 Abrupter p-n-Übergang im Gleichgewicht	4
3.2 Spannung am p-n-Übergang	5
3.3 Strom am p-n-Übergang	5
3.4 Diodentypen	6
4 Aufgaben	10
4.1 Kennlinien unterschiedlicher Dioden	10
4.2 Lumineszenzdioden	11
4.3 Solarzelle	11
4.4 Zenerdiode, Spannungsstabilisierung	11
4.5 Spannungsbegrenzung mit Dioden	11
4.6 Photodiode, optische Nachrichtenübertragung	11
4.7 Gleichrichterschaltungen	12
4.8 Kapazitätsdiode	12
Literatur und Links	12

1 Ziele

- Halbleiterphysikalische Grundlagen
- p-n-Übergang, Funktionsweise von Dioden
- Diodentypen für unterschiedliche Anwendungen
- Messprogramme für Gleichspannungsmessungen (Kennlinien)
- Automatisiertes Messen mit Funktionsgenerator und Oszilloskop
- Eigenschaften und Kennlinien von Dioden
- Spannungsstabilisierung mit Zener-Dioden
- Eigenschaften von Gleichrichterschaltungen
- Optoelektronik, optische Nachrichtenübertragung
- Anwendung von Kapazitätsdioden

2 Grundlagen: Halbleiterphysik

Überlegen Sie, ob sie die folgenden Begriffe aus der Halbleiterphysik physikalisch richtig einordnen können. Falls nicht — ein Lehrbuch zur Halbleiterphysik hilft weiter.

- Bändermodell im Orts- und k-Raum,
- Valenzband, Leitungsband, Bandlücke E_g ,
- Elektronen – Defektelektronen/Löcher,
- Eigenleitung – Störstellenleitung ('intrinsic', 'extrinsic'),
- Akzeptoren, Donatoren,
- p-Typ-, n-Typ-Halbleiter,
- effektive Masse,
- Zustandsdichte, Fermiverteilung, Ladungsträgerdichte,
- Fermienergie E_F ,
- Ladungsträgerbeweglichkeit, Leitfähigkeit,
- Majoritätsladungsträger, Minoritätsladungsträger,
- Ladungsträgeranreicherung, -verarmung,
- bewegliche und ortsfeste Ladungen, Raumladung,
- p-n-Übergang,
- Erzeugung und Rekombination von Ladungsträgern.

3 Grundlagen: Dioden

Ladungen, Potenziale und Felder in einer Diode kann man sich an einem Idealisierung veranschaulichen, dem abrupten p-n-Übergang. Gekennzeichnet ist diese Idealisierung durch eine eindimensionale Geometrie und konstante Dotierungen im p- und n-Bereich.

3.1 Abrupter p-n-Übergang im Gleichgewicht

Im idealisierten Modell des p-n-Übergangs wechselt in der Mitte eines Halbleiterstabs die Dotierung nach Art einer Stufenfunktion von p-Typ (Akzeptoren) nach n-Typ (Donatoren). Direkt am Übergang ändert sich zunächst auch die Dichte der (beweglichen) Ladungsträger abrupt, in der Skizze Abbildung 1 (a)

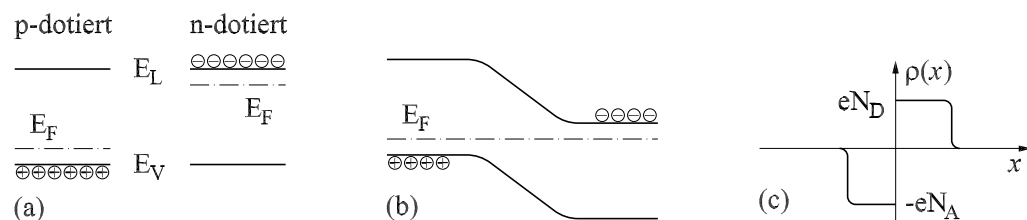


Abbildung 1: Idealisierter p-n-Übergang. (a): Eindimensionale Bandstruktur (Ortsraum) für p- und n-Dotierung (E_V : Valenzbandkante, E_L : Leitungsbandkante, E_F : Fermienergie). (b): Ladungsträgerverarmung und Bandverbiegung am Übergang nach Kontakt. (c): Ladungsdichte ρ am Übergang (N_A und N_D : Dotierungskonzentrationen).

sind die Energieverhältnisse – Bandkanten und Fermienergien – in einem eindimensionalen Bandschema im Ortsraum dargestellt. Der starke Gradient führt zu einem Diffusionsstrom. Dadurch wird der Dichtegradient abgebaut, gleichzeitig ein Gegenfeld durch die raumfesten Ladungen aufgebaut. Im stationären Zustand kompensieren sich Diffusions- und Feldstrom, die Fermi-Energie im Gesamtsystem ist konstant. Im Übergangsbereich bildet sich eine ladungsträgerverarmte Zone, die Raumladungszone - das Bandschema Abbildung 1 (b) veranschaulicht die resultierende 'Bandverbiegung'. Für eine idealisierte Berechnung nimmt man an, dass die Raumladungszone völlig frei von beweglichen Ladungsträgern ist. Die Ladungsdichte im Übergangsbereich hat dann etwa den in Abbildung 1 (c) dargestellten Verlauf (Akzeptor- und Donatorkonzentrationen N_A und N_D).

Zur Feld- und Potenzialberechnung wird die (eindimensionale) Poisson-Gleichung ein- bzw. zweimal integriert. Die zu beiden Seiten des Übergangs konstante Ladungsdichte führt zu jeweils linearem Feldverlauf (Dreieck, Maximum an der Grenze zwischen p- und n-Gebiet) und parabolischem Potenzialverlauf. Neben- und Randbedingungen: Das E-Feld außerhalb des Übergangsbereichs ist Null, die gesamte Potenzialdifferenz ist gleich der ursprünglichen Differenz der beiden Fermi-Energien auf der p- und n-Seite.

3.2 Spannung am p-n-Übergang

Liegt eine äußere Spannung am p-n-Übergang, ändern sich die Randbedingungen bei der Integration der Poisson-Gleichung. Spannung in Durchlassrichtung verringert die Potenzialstufe am Übergang, die Raumladungszonen auf beiden Seiten des Übergangs werden schmaler, das Feld im Übergangsbereich wird kleiner. Bei einer Spannung in Sperr-Richtung ist es umgekehrt, die Potenzialstufe vergrößert sich, die Raumladungszonen werden breiter, das Feld im Übergangsbereich wird größer. Abbildung 2 veranschaulicht dies.

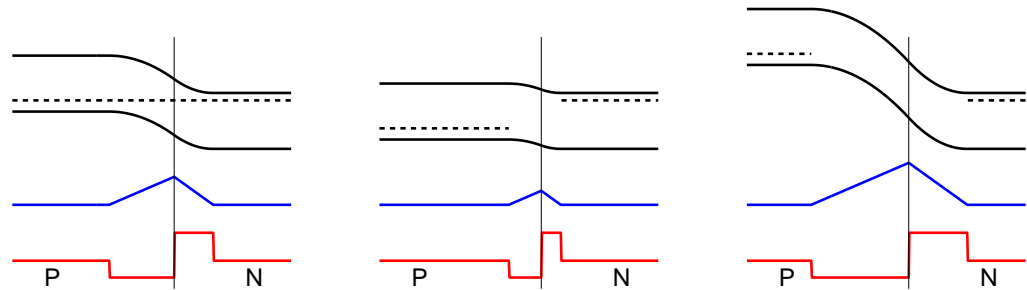


Abbildung 2: Spannung am p-n-Übergang: links ohne anliegende Spannung, Mitte: Spannung in Durchlassrichtung, rechts: Spannung in Sperr-Richtung. Die senkrechte dünne Linie ist die als scharf angenommene Grenze zwischen p- und n-Gebiet. Die untere Kurve stellt jeweils die stufenfunktionsartige Raumladungsdichte dar, die sich in einem solch einfachen Modell einstellt, die mittlere den dreieckigen Verlauf des Betrags des elektrischen Feldes, oben der parabolische Potenzialverlauf für die Elektronen, der Verlauf von Valenz- und Leitungsbandkante (Bandstruktur im Ortsraum) im Übergangsbereich. Die Lage der Fermi-Energien ist gestrichelt eingezeichnet, die Differenz zwischen den Fermi-Energien auf p- und n-Seite entspricht der am p-n-Übergang anliegenden Spannung, $\Delta E_F = e * U$. Deutlich werden die Unterschiede in der Breite der Raumladungszonen und im Maximalwert des elektrischen Feldes für die drei Fälle.

Durch die Änderung der Breite der Raumladungszonen ändert sich auch die Kapazität des p-n-Übergangs; man kann den p-n-Übergang als Plattenkondensator auffassen, dessen 'Plattenabstand' durch die Raumladungszonen definiert ist. Der Effekt wird ausgenutzt, um spannungsgesteuerte Kapazitäten zu bauen (Kapazitätsdioden). Detektordioden (Photodioden) werden schneller (höheres Feld, geringere Kapazität), wenn man eine Sperrspannung geeigneter Größe anlegt.

3.3 Strom am p-n-Übergang

Die Dichte der Minoritätsladungsträger am Rand des Übergangsbereichs ändert sich exponentiell mit der angelegten Spannung. Ist die p-Seite gegenüber der n-Seite negativ gepolt (Sperr-Richtung), nimmt die Dichte der Minoritätsladungsträger ab; im Übergangsbereich thermisch generierte Ladungsträger (das System strebt eine Fermi-Verteilung an) führen zu einem kleinen, bei genügend hoher Spannung konstanten Sperrstrom. Bei entgegengesetzter Polung (Durchlassrichtung) steigt die Dichte der Minoritätsladungsträger exponentiell mit der

Spannung an, der Durchlassstrom steigt proportional dazu an.

Die Abhängigkeit des Stroms I von der angelegten Spannung U wird recht gut durch die erstmals von Shockley [1] 1951 aufgestellte Formel

$$I = I_S \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) \quad (1)$$

beschrieben. Der Vorfaktor I_S (Sättigungssperrstrom) wird durch Materialparameter, Geometrie der Diode und Temperatur bestimmt.

Bei hohen Sperrspannungen weicht der Kennlinienverlauf vom obigen Ausdruck ab: Durch die dann hohen Feldstärken im Übergangsgebiet werden die Ladungsträger dort derart beschleunigt, dass sie sekundäre Elektron-Loch-Paare anregen können (Lawineneffekt). Die Folge ist ein mit der Sperrspannung drastisch zunehmender Sperrstrom, der bei zu großer thermischer Belastung schließlich zu einer Zerstörung des p-n-Übergangs führt.

Im Durchlassbereich ist der Kennlinienverlauf dadurch modifiziert, dass der ohmsche Widerstand von p- und n-Bereich im allgemeinen nicht vernachlässigt werden kann. Der Strom wird dadurch kleiner als im durch Gleichung 1 gegebenen Idealfall.

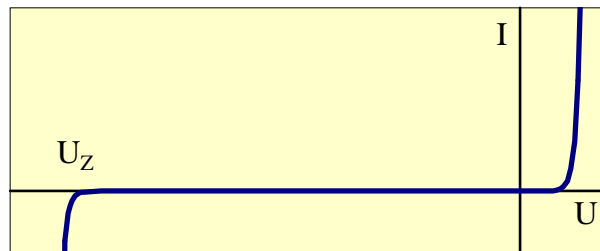


Abbildung 3: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode (U_Z : Zener-, Durchbruchspannung).

Weiterführende Stichworte: Feldstrom, Diffusionsstrom, Quasiferminiveaus, Tunnel-, Zener-, Lawineneffekt.

3.4 Diodentypen

Dioden werden in der Elektronik und Elektrik sowie der physikalischen und elektrischen Messtechnik für die unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt. Dafür wurden viele Spezialbauformen entwickelt; einige davon sind im folgenden aufgeführt.

3.4.1 Schaltdiode, Universaldiode



Geringer Durchlasswiderstand, sehr kleiner Sperrstrom, Material: Silizium (überwiegend) oder Germanium (heute selten, praktisch ausgestorben), Größenordnung der Strombelastbarkeit: 100 mA, der Durchbruchspannung: 100 V, der Kapazität: einige pF, der Durchlassspannung: 0.7 V (Si) bzw. 0.3 V (Ge), preisgünstig.

3.4.2 Gleichrichterdiode



Ähnliche Eigenschaften wie bei der Schaltdiode, meist höhere Durchbruchspan-

nung (1000 V), Strombelastbarkeit der Anwendung entsprechend (1 ... 1000 A), die höhere Belastbarkeit wird unter anderem durch eine größere Fläche erreicht, dadurch auch deutlich höhere Kapazität.

3.4.3 Schottky-Diode



Kein p-n-Überhang, sondern ein Metall-Halbleiter-Übergang (Schottky-Kontakt). Zum Strom tragen nur Majoritätsladungsträger bei, dadurch schaltet die Schottky-Diode sehr schnell. Die Durchlassspannung ist etwa halb so groß wie bei Silizium-Dioden. Sie wird dort verwendet, wo es auf eine dieser beiden Eigenschaften ankommt: Hochfrequenztechnik, Gleichrichter mit geringen Verlusten – hohem Wirkungsgrad.

3.4.4 Zenerdiode



Diode mit gut definierter Durchbruchspannung, die so gebaut ist, dass sie dauerhaft im Bereich des steilen Anstiegs der Sperrkennlinie betrieben werden kann, ohne dadurch zerstört zu werden. Sie wird zur Spannungsstabilisierung und Spannungsbegrenzung verwendet (kleiner differentieller Widerstand im steilen Anstieg der Kennlinie). Typische Nennspannungen zwischen etwa 2 und 200 V.

3.4.5 Kapazitätsdiode



Die Kapazität einer Diode ist abhängig von der anliegenden Sperrspannung. Diodenbauformen, die auf diesen Effekt hin optimiert sind (Kapazitätsdioden, *Varaktor*-Dioden), werden als variable Kapazität in Schwingkreisen verwendet (spannungsgesteuerte Frequenzabstimmung in jeglicher Art von Empfängern).

3.4.6 Tunnel diode



Diode mit extrem hoch dotierten p- und n-Gebieten, damit sehr dünnem Übergangsgebiet. Durch die hohe Dotierung liegt die Fermi-Energie im Valenz- bzw. Leitungsband. Wird eine kleine Spannung in Durchlass- oder Sperr-Richtung an die Tunnel diode angelegt, verschieben sich die Bänder so, dass sich besetzte und unbesetzte Zustände auf gleichem Potenzial gegenüberstehen, ein Tunnelstrom fließt durch das dünne Übergangsgebiet. Dieser wächst in Sperr-Richtung mit zunehmender Sperrspannung stetig an, ebenso für kleine Spannungen in Durchlassrichtung. Dagegen stehen sich bei etwas höheren Spannungen in Durchlassrichtung besetzte und verbotene Zustände (Bandlücke) gegenüber. Dies führt in einem gewissen Spannungsbereich zu einer Abnahme des Stroms mit steigender Spannung (negativer differentieller Widerstand), bis bei weiterer Spannungserhöhung 'normales' Durchlassverhalten einsetzt.

3.4.7 Backward-Diode



Tunnel diode, bei der die Fermienergie an der Valenz- bzw. Leitungsbandkante liegt. Dadurch erhält man die Sperrkennlinie einer Tunnel diode und (annähernd) die Durchlasskennlinie eines normalen p-n-Übergangs. Die Backward-Diode ist

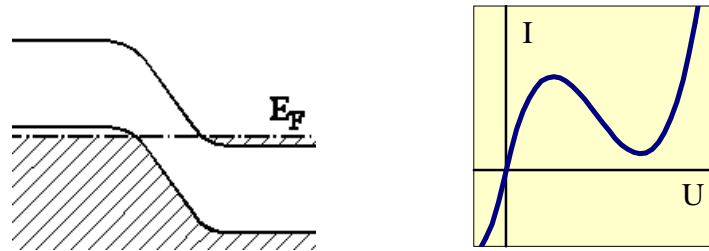
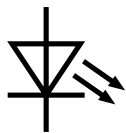


Abbildung 4: Links das idealisierte Bandschema im p-n-Übergangsbereich einer Tunnel diode, gezeichnet ist der örtliche Verlauf der Valenzband- und Leitungsbandkanten. Elektronenzustände unterhalb der Fermienergie sind besetzt (schraffiert). Rechts die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Tunnel diode, das lokale Strommaximum liegt bei einer Durchlassspannung von etwa 100 mV.

somit für kleine Spannungen in Sperr-Richtung durchlässig, in Durchlassrichtung sperrend (Name!). Sie kann zur Gleichrichtung kleiner Spannungen verwendet werden.

3.4.8 Lumineszenzdiode, Laserdiode



Bei allen Dioden ist im Durchlassbetrieb die Ladungsträgerdichte im Übergangsbereich gegenüber der Gleichgewichtssituation deutlich erhöht. Dieser Überschuss wird durch die Rekombination von Elektron-Loch-Paaren abgebaut. Wird die Energie des Elektron-Loch-Paars ($\approx E_g$) als Lichtquant frei, spricht man von strahlender Rekombination – Lumineszenz. Grundsätzlich lumineszieren alle Dioden, effizient allerdings nur bei einem Halbleitermaterial mit *direkter* Bandstruktur, bei Halbleitern mit *indirekter* Bandstruktur (Si, Ge) überwiegt die nicht-strahlende Rekombination (Phononenerzeugung).

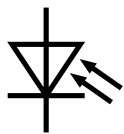
Die Energie der Lichtquanten entspricht in etwa der Bandlücke (E_g) des verwendeten Halbleitermaterials. Gebräuchliche Materialien sind 'maßgeschneiderte' Mischungen aus III-V-Verbindungshalbleitern wie GaAs, GaAlAs, InGaAsP u. ä. für Infrarot, Rot, Orange, Gelb, Grün. Effiziente violette und blaue Lumineszenzdiode sind erst seit kurzem auf dem Markt (GaN, InGaN). In Kombination mit geeigneten lumineszierenden Substanzen (*Lumineszenz-Konverter*), die in ähnlicher Weise auch in Leuchtstoff- und Energiesparlampen verwendet werden, lassen sich damit 'weiße' Lumineszenzdiode herstellen. Wegen ihrer Zuverlässigkeit und ihres hohen Wirkungsgrads steht diesen ein immenser Boom bevor.

Laserdiode sind spezielle Bauformen von Lumineszenzdiode. Durch geeignete Maßnahmen (Heteroübergänge, Strukturierung, Resonator) erreicht man hohe Ladungsträgerkonzentrationen in einem begrenzten Volumen (*carrier confinement*), Lichtführung in einem Wellenleiter (*light confinement*) und Rückkopplung des Lichts (Reflexion an Spaltflächen, 'distributed Bragg reflector' o. ä.), dadurch eine sehr niedrige Laserschwelle (Durchlassstrom, ab dem Lasertätigkeit einsetzt). Durch die mit dem vergleichsweise kleinen Betriebsstrom verbundene geringe thermische Belastung ist bei modernen Halbleiterlasern ein sehr zuverlässiger Betrieb möglich. Dies ist insbesondere bei den Anwendungen in der

optischen Nachrichtentechnik ein wichtiger Aspekt.

Die Bandlückenenergie (E_g) im Halbleiter ist abhängig von äußeren Parametern wie Temperatur und Druck. Durch Änderung dieser Parameter lässt sich die Emissionwellenlänge von Laserdioden in gewissen Grenzen verschieben. Dies wird für Anwendungen in der optischen Spektroskopie ausgenutzt (Infrarotspektroskopie von Schadstoffmolekülen in der Umweltüberwachung mit Blei-Chalkogenid-Lasern).

3.4.9 Photodiode



Beleuchtet man einen p-n-Übergang mit Licht geeigneter Wellenlänge, werden Elektron-Loch-Paare erzeugt, die durch das Feld im Übergangsbereich getrennt werden, (Sperr-)Strom fließt. Photodioden sind für diesen Effekt – hohen Quantenwirkungsgrad – optimierte Dioden. Sie werden in der optischen Nachrichtentechnik, in vielen Bereichen der Elektronik (Potenzialtrennung, Lichtschranken etc.) und in vielen Bauformen und aus verschiedenen Materialien (unterschiedliche langwellige Grenze wegen der materialabhängigen Mindestanregungsenergie) als Detektoren in der physikalischen Meßtechnik (optische Spektroskopie) eingesetzt.

Speziell für eine gute Leistungsausbeute bei Beleuchtung mit Sonnenlicht optimiert sind Solarzellen. Auch hier ist ein hoher Quantenwirkungsgrad entscheidend, andere für die Anwendung von Photodioden wichtige Parameter wie Linearität und Geschwindigkeit sind allerdings nur von untergeordneter Bedeutung.

Lawinenphotodioden (avalanche photo diodes, APDs) sind Photodioden, die für eine kontrollierte Lawinenvervielfachung konstruiert sind. Sie werden mit einer genau festgelegten, hohen Sperrspannung betrieben, entweder in einem Bereich konstanter Ladungsträgervervielfachung (100 ... 1000) oder – ähnlich einem Geiger-Müller-Zählrohr – im Durchbruchsbereich. Für den sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich sind APDs derzeit die empfindlichsten Detektoren (Einzelphotonennachweis mit einer Quanteneffizienz von etwa 80 %).

Ähnlich wie Photodioden arbeiten die Halbleiterdetektoren in der kernphysikalischen Messtechnik. Zum spektroskopischen Nachweis von Alpha- und Beta-Teilchen sowie Röntgenquanten verwendet man p-i-n-Strukturen aus Silizium, für Gamma-Quanten solche aus Germanium (höhere Elektronendichte und damit höherer Absorptionskoeffizient). Sie werden in Sperr-Richtung mit hoher Sperrspannung betrieben, das dadurch über der i-Schicht aufgebaute E-Feld trennt die vom absorbierten Teilchen erzeugten Elektron-Loch-Paare, die abfließende Ladung ist in guter Näherung proportional zur absorbierten Energie.

3.4.10 P-I-N-Diode



Ein in den p-n-Übergang eingeschobener undotierter (*intrinsic*) Bereich kann dazu dienen, die Sperrspannung zu erhöhen oder das aktive Volumen von Detektordioden zu vergrößern. Im Durchlassbetrieb zeigen solche Strukturen eine ausgeprägte Stromabhängigkeit des Widerstands. Spezielle, darauf hin op-

timierte p-i-n-Dioden werden als Abschwächer oder Schalter in der Hochfrequenztechnik verwendet.

3.4.11 DIAC (Diode AC switch)



Eine symmetrische Struktur aus zwei gegeneinander gesetzten p-n-Übergängen mit gemeinsamer dünner Zwischenschicht. Ein p-n-Übergang wird jeweils in Durchlass-, einer in Sperr-Richtung betrieben. Das Bauelement sperrt bis zu einer bestimmten Spannung, wird beim Überschreiten dieser Grenzspannung schlagartig niederohmig. Man verwendet DIACs, um Trigger-Impulse (Zünd-Impulse) für *Thyristoren* oder *TRIACs* zu erzeugen.

3.4.12 Gunn-Diode

Die Funktionsweise der Gunn-Diode beruht auf einem physikalisch interessanten Bandstruktur-Effekt: In Halbleitern, bei denen ein Leitungsbandminimum für Elektronen mit kleiner effektiver Masse und hoher Beweglichkeit energetisch knapp unterhalb eines Leitungsbandminimums für Elektronen mit großer effektiver Masse und kleiner Beweglichkeit liegt, treten bei hohen elektrischen Feldern Streueffekte auf, die die Leitfähigkeit verkleinern. Es werden schnelle Elektronen aus dem Minimum mit hoher Beweglichkeit in das mit kleinerer Beweglichkeit gestreut, dies führt zu einem Feldstärkebereich mit negativem differentiellen Widerstand.

Zu den Halbleitern, die diesen Gunn-Effekt zeigen, gehören GaAs und InP. Durch geeignete Konstruktion kann man zeitliche Feldstärke-, Elektronendichte- und damit Stromfluktuationen im GHz-Bereich erreichen. Gunn-Dioden werden als Mikrowellengeneratoren mit hohem Wirkungsgrad eingesetzt.

3.4.13 IMPATT-Diode

Ebenfalls zur Mikrowellenerzeugung dienen IMPATT-Strukturen (IMPact Avalanche and Transit Time), bei denen ein p-n-Übergang mit einer kurzen Laufstrecke kombiniert ist. Eine genügend große Sperrspannung veranlasst einen Lawnendurchbruch im Übergangsbereich, die Ladungslawine senkt die Feldstärke solange unter die Durchbruchfeldstärke, bis die Ladung abgeflossen ist. Dies wiederholt sich periodisch und verursacht Stromfluktuationen im GHz-Bereich.

Sowohl Gunn- als auch IMPATT-Dioden werden zur Frequenzfestlegung mit geeigneten Mikrowellenresonatoren kombiniert.

3.4.14 Temperatursensoren

Die Temperaturabhängigkeit der Durchlasskennlinie einer Diode (Shockley-Formel) lässt sich zur Temperaturmessung ausnutzen; *Bandgap-Referenz-Dioden* werden als Sensoren mit nahezu linearer Kennlinie im Temperaturbereich $-30 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$ angeboten, für tiefe Temperaturen ($1 \dots 100 \text{ K}$) geeignete Dioden weisen dagegen eine stark gekrümmte Kennlinie auf.

4 Aufgaben

4.1 Kennlinien unterschiedlicher Dioden

Entwickeln Sie ein MATLAB-Skript, das mit den D/A- und A/D-Wandlern des Mess- und Steuergeräts Strom-Spannungs-Kennlinien misst. Messen Sie damit die Kennlinien von Silizium-, Germanium- und Schottky-Diode. Diskutieren Sie die Unterschiede – insbesondere im Durchlassbereich. Welche Probleme treten bei der Messung des Sperrstroms auf?

4.2 Lumineszenzdioden

Kennlinien von Lumineszenzdioden unterschiedlicher Farbe. Unterschiede, Korrelation mit der Farbe? Versuchen Sie, Ströme (und damit auch elektrische Leistungen) zu definieren, bei denen Sie subjektiv gleiche 'Helligkeit' bei den unterschiedlichen Farben beobachten. Diskussion.

4.3 Solarzelle

Messung der Kennlinien einer Solarzelle ohne und mit unterschiedlich heller Beleuchtung. Berechnen Sie jeweils die Arbeitspunkte für eine optimale Leistungsanpassung. Diskutieren Sie mögliche andere Arbeitspunkte für eine Solarzelle oder Photodiode (Abb. 5). Versuchen Sie, die 'Helligkeit' der unterschiedlichen Lumineszenzdioden zu messen, Vergleich mit der subjektiven Beobachtung. Diskussion.

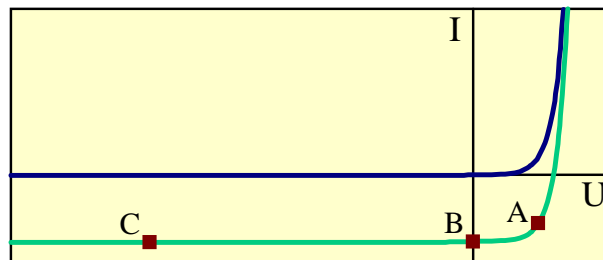


Abbildung 5: Idealisierte Kennlinien einer Solarzelle (Photodiode) ohne und mit Beleuchtung. A, B, C kennzeichnen charakteristische Arbeitspunkte.

4.4 Zenerdiode, Spannungsstabilisierung

Messen Sie die Kennlinien der beiden an den Arbeitsplätzen verfügbaren Zenerdioden. Diskussion des typischen Verlaufs, differentieller Widerstand, Unterschiede. Entwickeln Sie eine einfache Schaltung zur Spannungsstabilisierung. Simulation und Messung des Verhaltens in Abhängigkeit von Eingangsspannung und Strombelastung.

4.5 Spannungsbegrenzung mit Dioden

Bei empfindlichen elektronischen Geräten schützt man die Eingänge durch geeignete Diodenschaltungen vor Überspannungen. Überlegen Sie sich eine Schaltung zum Schutz von TTL-Eingängen (zulässiger Spannungsbereich etwa 0–5 V). Zeigen Sie deren Wirkung – z. B. dadurch, dass Sie Sinusspannungen unterschiedlicher Amplitude anlegen.

4.6 Photodiode, optische Nachrichtenübertragung

Mit Lumineszenzdiode, Plastiklichtleiter und Photodiode kann eine einfache optische Übertragungsstrecke aufgebaut werden. Untersuchen Sie das Übertragungsverhalten für langsame Analogsignale. Messen Sie dazu zunächst die DC-Übertragungskennlinie und legen Sie darauf einen Arbeitspunkt fest. Messen Sie die Verzerrung eines übertragenen Sinussignals für unterschiedliche Aussteuerung. Versuchen Sie, die Verzerrung zu quantifizieren (Fourieranalyse).

Zum Test der *digitalen* Übertragungscharakteristik verwenden Sie ein unipolares Rechtecksignal, mit dem die Lumineszenzdiode direkt betrieben wird (Offset und Amplitude am Frequenzgenerator jeweils 2.5 V). Messen Sie den Frequenzgang. Typische Signalformen.

4.7 Gleichrichterschaltungen

Simulieren und messen Sie die Ausgangsspannungen und die Ströme am Einweg- und Brückengleichrichter (Abb. 6) für unterschiedliche Lasten (einige typische Fälle). Diskutieren Sie Folgerungen für die Sinusform der Netzwechselspannung.

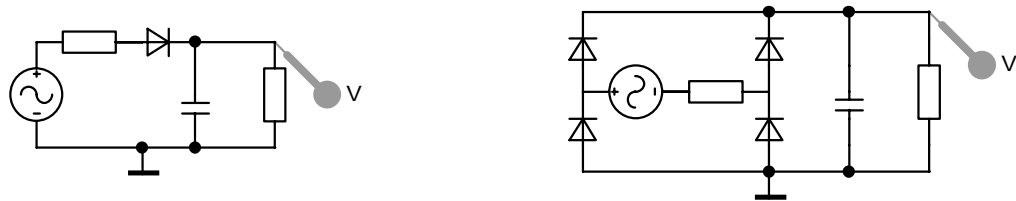


Abbildung 6: Gleichrichterschaltungen: Links Einweggleichrichter mit einer Diode, rechts Brückenschaltung mit vier Dioden.

4.8 Kapazitätsdiode

Simulieren Sie einen LC-Schwingkreis, der mit einer Kapazitätsdiode abgestimmt wird. Wie ändert sich die Resonanzfrequenz als Funktion der Spannung an der Diode (vgl. Abbildung 7)?

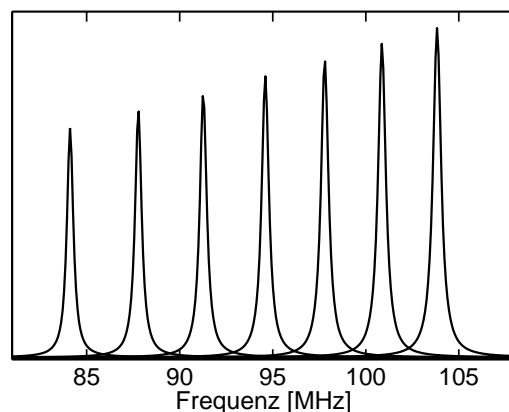


Abbildung 7: Resonanzkurven eines LC-Kreises aus einer Induktivität mit $1 \mu\text{H}$ und einer Kapazitätsdiode BBY 31 (Diodenspannungen 18... 30 V in Stufen von 2 V).

Zusatz: Die Kapazität der Photodiode BPW 34 aus Aufgabe 4.6 ist vergleichsweise groß (große Detektorfläche) und hängt in charakteristischer Weise von der Sperrspannung ab (Abb. 8). Wie könnte man damit einen gesteuerten kapazitiven Spannungsteiler für Wechselspannungen realisieren? Untersuchen Sie dessen Verhalten.

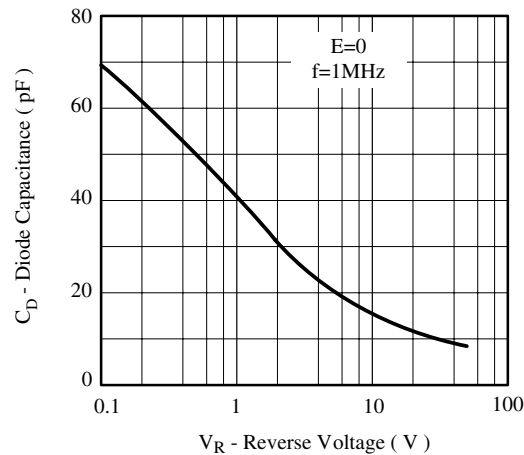


Abbildung 8: Diodenkapazität der Photodiode BPW 34 als Funktion der angelegten Sperrspannung.

Literatur und Links

- [1] F. S. Goucher, G. L. Pearson, M. Spark, G. K. Teal, W. Shockley. *Theory and Experiment for a Germanium p-n Junction*. Phys. Rev. **81**, 637 (1951).
- [2] Ulrich Tietze, Christian Schenk. *Halbleiterschaltungstechnik, n-te Auflage*. Springer, 199x.
- [3] *Datenblätter von Dioden:*
<http://www.physik.uni-osnabrueck.de/kbetzler/ep/proj/dsdiodes.shtml>.
- [4] *Halbleiterhersteller und mehr:*
<http://www.aufzu.de/semi/>.