

Halbleiter-Diode

Ziele

In diesem Versuch lernen Sie grundlegende Eigenschaften von *pn-Halbleiter-Übergängen* kennen. Dazu messen Sie die Detailmerkmale der *elektrischen Leitfähigkeit (Kennlinien)* einer Silizium-Diode. Darüber hinaus erproben Sie auch optische Eigenschaften des pn-Übergangs, mit der LED.

Diese Aufgaben müssen Sie vorher *schriftlich* erledigen:

- Zeichnen Sie das Bändermodell eines Leiters, Halbleiters und Isolators. Geben Sie typische Werte für die Energielücke (in eV) an. Berechnen Sie die mittlere thermische Energie von (freien) Elektronen bei Zimmertemperatur und begründen Sie damit die elektrischen Leitungseigenschaften.
- Berechnen Sie die Photonenenergie von Licht der Wellenlänge $\lambda = 632 \text{ nm}$ in eV?
- Was versteht man unter dem „Dotieren“ von Halbleitern? Geben Sie ein konkretes Beispiel für Silizium an.
- Was versteht man unter dem Raumladungsgebiet in einem pn-Übergang? Fertigen Sie eine Skizze.
- Das Titelbild zeigt das Röntgenbild einer LED. LEDs werden stets mit Stromkonstantern oder mindestens mit einem Vorwiderstand betrieben. Geben Sie dafür eine Erklärung.

Literatur

1. Feynman/Leighton/Sands; *Feynman Lectures Of Physics*, Bd. 3
2. W. Demtröder; *Experimentalphysik Bd. 3*
3. M. Alonso, E: J. Finn; *Fundamental University Physics Bd. 3*
4. Gerthsen/Kneser/Vogel; *Physik*; Kap. 14.3.6
5. E. Fred Schubert, www.LightEmittingDiodes.org und dort die Links

1 Festkörperphysikalische Grundbegriffe

In dieser Anleitung liefern wir nur eine Zusammenstellung der Grundbegriffe. Erklärungen und Herleitungen finden Sie in der Lehrbuchliteratur und im Praktikumsskript.

1.1 Das Bändermodell

Bei der Bildung von Kristallen spalten die diskreten atomaren Niveaus vielfach auf und verschieben sich. Dabei entstehen sog. *Energiebänder* als erlaubte Energieeigenwerte, zwischen denen energetisch verbotene Zonen liegen. Das letzte voll besetzte Band wird als *Valenzband* (VB) bezeichnet; das nächstfolgende erlaubte Band ist bei Halbleitern leer. Halbleiter haben daher bei $T = 0\text{ K}$ keine freien Ladungsträger ihre Leitfähigkeit σ ist null. Wenn durch Energieaufnahme Elektronen ins LB gelangen, sind sie „dort“ beweglich, das Band wird zum *Leitungsband* (LB).¹

$E_G = E_L - E_V$ ist der Energieabstand zwischen VB und LB. Bei Leitern ist $E_G \approx 0$ oder die Bänder überlappen. Ist $E_G < 1$ bis 2 eV spricht man von *Halbleitern*, ist $E_G > 4\text{ eV}$, hat man gute *Isolatoren*.

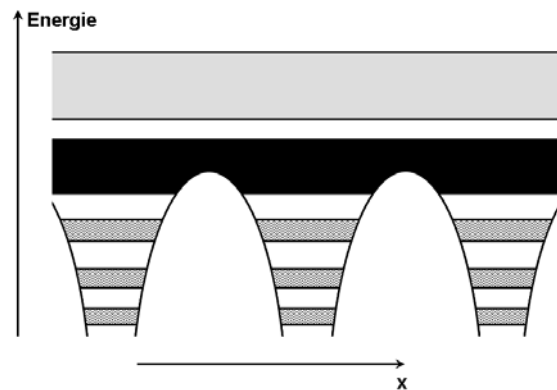
A1: Durch Energiezufuhr (Wärme, Licht) kann die Lücke E_G überwunden werden. Berechnen Sie für die folgenden Materialien die Wellenlänge λ des Lichts/die Temperatur T , mit der eine Anregung über die Energielücke gerade möglich wäre.

Ge: $E_G = 0,66\text{ eV}$; Si: $E_G = 1,1\text{ eV}$;

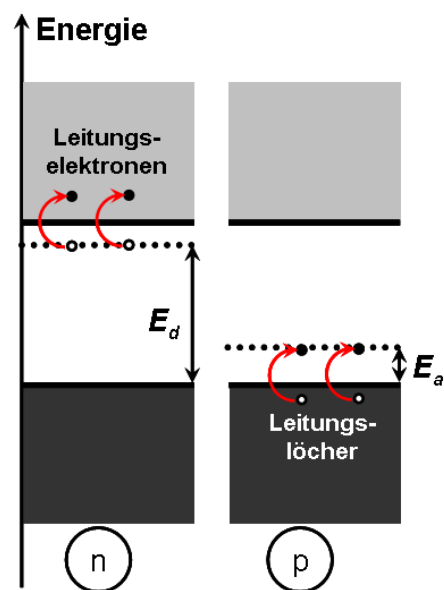
GaAs: $E_G = 1,42\text{ eV}$.

1.2 Dotieren

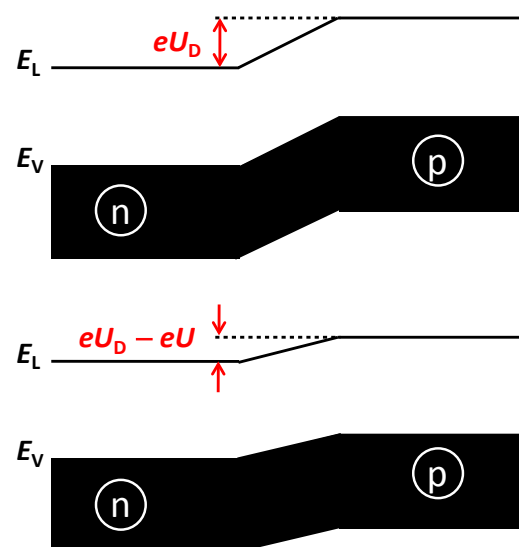
Durch *Dotieren* (Einbau von Gitterstörungen) lässt sich die Leitfähigkeit des Halbleiters stark beeinflussen. Bei der *n-Dotierung* bringt man fünfwertige Fremdatome ein (z. B. Phosphor, Arsen, Antimon). Diese Elemente liefern so ein schwach gebundenes Elektron. Nur wenige meV Energie reichen aus, um dieses Elektron z. B. thermisch freizusetzen. Bei der *p-Dotierung* bringt man dreiwertige Atome ein (z. B. Bor, Aluminium, Gallium) und erzeugt so zusätzliche freie „Löcher“.



1 Halbleiter: Energie im Bändermodell



2 Dotierte Halbleiter; rechts p-dotiert, links n-dotiert



3 pn-Übergang; oben: im thermischen Gleichgewicht, unten: externe Spannung U in Durchlassrichtung; Ordinate ist die Energie, Abszisse eine Ortskoordinate

¹ Die Entstehung der Bänder wird in /1/ für einen sehr einfachen aber typischen und verallgemeinerbaren Fall vorgerechnet.

Im Bändermodell des n-Halbleiters besetzen die zusätzlichen Elektronen *Donatorniveaus* mit einer Energie E_d knapp unter dem LB, aus denen sie mit geringer Zufuhr von Energie $\Delta E = E_C - E_d \approx 0,01 \text{ eV}$ also $T = \Delta E / k_B = 116 \text{ K}$ in das LB angeregt werden (Abb. 2). Hauptsächlich Elektronen übernehmen im n-Halbleiter den Ladungstransport (Majoritätsladungsträger); die Löcher sind im n-Halbleiter seltener (Minoritätsladungsträger).

A2 Beschreiben Sie die entsprechenden Umstände beim p-Halbleiter: „p-Halbleiter haben freie *Akzeptorniveaus*, die bereits mit geringer Energie $E_a \approx 0,01 \text{ eV}$ von Elektronen aus dem VB ...

1.3 Der pn-Kontakt im thermischen Gleichgewicht

Bringt man den (n)- und den (p)-Halbleiter zusammen, erhält man das elektronische Jahrhundertbauteil: die *Halbleiter-Diode*.

Aufgrund ihrer größeren Anzahldichte diffundieren jeweils die Majoritätsträger auf die Minoritätsseite: Elektronen in den (p)-Halbleiter (Stromdichte $j_{\text{diff}}(n)$) und genauso Löcher in den (p)-Halbleiter (Stromdichte $j_{\text{diff}}(p)$). Dadurch gerät das Grenzgebiet aus dem Ladungsgleichgewicht, es entsteht eine *Raumladungszone* und ein lokales E -Feld von (n) nach (p) und damit eine elektrische Spannung über den Übergangsbereich. Die Folge sind zusätzliche Driftströme $j_E(n)$ und $j_E(p)$, den Diffusionsströmen entgegen. Im thermischen Gleichgewicht kompensieren sich Diffusionsstrom und Driftstrom gerade:

$$j_{\text{diff}}(n) + j_E(n) = j_{\text{diff}}(p) + j_E(p) = 0.$$

Die Energiedarstellung zeigt diesen Zustand durch einen konstanten Knick der Energiebänder (Abb. 3), denn die Bandkante des (p)-Halbleiters hebt sich um $\Delta E = e \cdot U_D$ gegenüber der Bandkante des (n)-Halbleiters. Die Größe dieser Gleichgewichtsspannung U_D , der sog Diffusionsspannung, hängt von Dotierungsdichte im Vergleich zur intrinsischen Trägerdichte (N_n/n_i bzw N_p/n_i), der Temperatur und der Bandlücke E_G ab:

$$U_D \approx \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_n N_p}{n_i^2} \right).$$

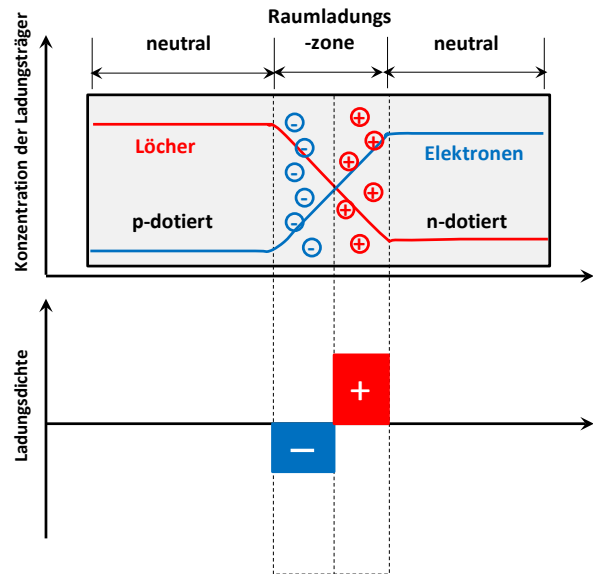
Nicht vorgerechnet, aber zur Vollständigkeit hier sei erwähnt: Die Breite W_D der Raumladungszone des abrupten pn-Übergangs können Sie berechnen:

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \left(\frac{1}{N_p} + \frac{1}{N_n} \right) U_D}.$$

Beispiel: Silizium-Diode (bitte nachrechnen!)

Dotierung: $N_n = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ und $N_p = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; die Dielektrizitätskonstante von Silizium: $\epsilon = 11,8$; bei $T = T_0 = 300 \text{ K}$ ist $n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Daraus errechnen Sie: $U_D \approx 0,75 \text{ V}$ und $W_D = 0,7 \text{ }\mu\text{m}$.



4 Ein einfaches Modell der Raumladungszone

2 Shockley-Formel für die Gleichrichterdiode

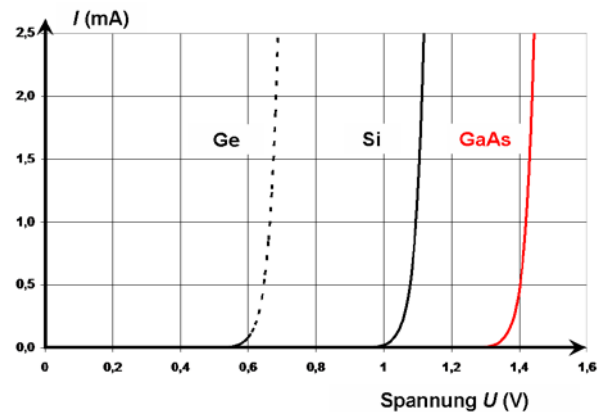
Durch einen pn-Halbleiter-Übergang fließen bei externer Spannung U Ladungsträger. Die Stromstärke hängt dabei stark vom Halbleitermaterial (chemisches Element, Dotierung, Geometrie) und exponentiell von einer extern angelegten Spannung U und der Temperatur T ab. Eine brauchbare Näherung für die Stromstärke I im Halbleiter liefert die Shockley-Formel:

$$I = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U}{nU_{th}}\right) - 1 \right] \quad \text{darin } I_S \text{ die Sperrstromstärke } I_S \approx I_{S0}(T_0) \cdot \exp\left(-\frac{U_G}{U_{th}}\right). \quad (1)$$

- Die *Thermospannung* $U_{th} = k_B T / e$ hat bei Zimmertemperatur $T_0 = 300$ K den Wert $U_{th0} = 25,8$ mV;
- Externe Spannung U ; typische Werte -10 V $< U < 1$ V;
- Bandlücke $U_G = E_G / e$; typische Werte liegen im Volt-Bereich;
- Rekombinationseffekte im Halbleiter reduzieren die wirkende Spannung U . Um diesen Effekt einzubauen, ersetzt man noch U durch U/n , mit dem materialabhängigen *Diodenfaktor* $1 < n < 2$.

Die exponentielle Temperaturabhängigkeit $I_S = I_{S0} \exp(-U_G/U_{th})$ beschreibt die thermische Anregungswahrscheinlichkeit von Elektron-Lochpaaren über die Bandlücke hinweg: Sperrströme sind Minoritätsträgerströme, also ohne „Hilfe von der anderen Halbleiterseite“. I_{S0} wird auch als *Sättigungsstromstärke* bezeichnet.

Der Exponentialfaktor $[\exp(U/nU_{th}) - 1]$ beschreibt die Zunahme der Minoritätsträgerdichte durch den Diffusionsstrom durch den pn-Kontakt (Verbiegung der Bandkanten).



5 Diodenkennlinien nach Gl. 1 für $T = 300$ K

Das elektronische Bauteil mit einem pn-Übergang wird als *Halbleiter-Diode* bezeichnet. Man unterscheidet, je nach Polung der externen Spannung *Sperrrichtung* der Halbleiter-Diode ($U < 0$) und *Flussrichtung* ($U > 0$). Die Sperrstromstärke hängt für $|U| \gg U_{th}$ nicht von der externen Spannung ab. In Flussrichtung gepolt, nimmt die Stromstärke exponentiell mit U zu. Die Kennlinienform ist für alle Halbleiterdioden gleich. Abb. 5 zeigt die nach Gl. 1 berechneten Diodenkennlinien. In jedem der Fälle finden Sie eine Exponentialfunktion ohne Schwellenwert. Der Faktor $\exp(-U_G/U_{th})$ führt zu einer Verschiebung der Kennlinien parallel zur Abszisse, die Form bleibt jedoch gleich.

A3 Berechnen Sie mithilfe von Gl. 1 und Abb. 5 Werte für die jeweiligen Sättigungsstromstärken I_{S0} der dort dargestellten Halbleitertypen ($T = 300$ K).

	Si	Ge	GaAs
Beweglichkeit Elektronen μ_n [cm² V⁻¹s⁻¹]	1.350	3.900	8.000
Beweglichkeit Löcher μ_p [cm² V⁻¹s⁻¹]	480	1.800	300
$D_n = \mu_n \cdot k_B T / e$ [cm² s⁻¹]	35	101	207
$D_p = \mu_p \cdot k_B T / e$ [cm² s⁻¹]	12,4	46,6	7,8
intrinsische Dichte n_i [cm⁻³]	$1,5 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,8 \cdot 10^6$
j_{n0} [A/cm²]	$1,26 \cdot 10^{-9}$	$9,30 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-16}$
j_{p0} [A/cm²]	$4,47 \cdot 10^{-10}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$	$4,02 \cdot 10^{-18}$
j_{S0} [A/cm²]	$1,70 \cdot 10^{-9}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-16}$

$$T_0 = 300 \text{ K}; L_n = 0,1 \text{ mm}; L_p = 0,01 \text{ mm}; N_n = 10 \cdot N_p = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

3 Die reale Halbleiter-Diode

(1) Durchbruch: Die Sperrschicht wird für große Sperrspannungen plötzlich leitfähig, es kommt zum so genannten Durchbruch. Dafür sind im Prinzip zwei unterschiedliche Effekte verantwortlich, der *Lawineneffekt* und der *Zenereffekt*:

- Ist die Sperrschicht ausreichend breit und die Sperrspannung ausreichend groß, erhalten die Elektronen dort einen Impuls, der u. U. ausreicht, um durch Stoß ein weiteres Elektron aus dem Gitterverband herauszulösen. So können durch Stoßionisation lawinenartig Minoritätsladungsträger erzeugt werden. Da die Sperrschichtweite mit der Temperatur abnimmt, nimmt die Durchbruchspannung mit der Temperatur zu (*Lawineneffekt*).
- Bei hoher Dotierung und geringer Sperrschichtweite, kommt es nicht zur Ausbildung einer Lawine: Die Barriere durch die Bandlücke wird bei starker Verbiegung der Bänder im äußeren Feld u. U. so schmal, dass Elektronen aus dem VB in das LB tunneln können (innere Feldemission, *Zenereffekt*).
- Ohne besondere Schutzmaßnahmen kann eine große Sperrstromstärke bei gleichzeitig großer Sperrspannung (große Verlustleistung!) zur thermischen Zerstörung des pn-Übergangs führen.

(2) Kapazität: Die Sperrschicht erinnert an einen kleinen Kondensator. Tatsächlich hat die Sperrschicht eine Kapazität C_S , die das Hochfrequenzverhalten von Halbleiterdioden bestimmt. Da die Größe der Sperrschicht durch eine externe Spannung gesteuert werden kann, erhält man mit Halbleiterdioden spannungsgesteuerte Kapazitäten (s. Abb. 6).

(3) Rekombination: Bei kleinen Spannungen sind reale Stromstärken größer als nach der Shockley-Theorie berechnete, da zusätzlich Rekombinationsströme in der Raumladungszone messbar auftreten.

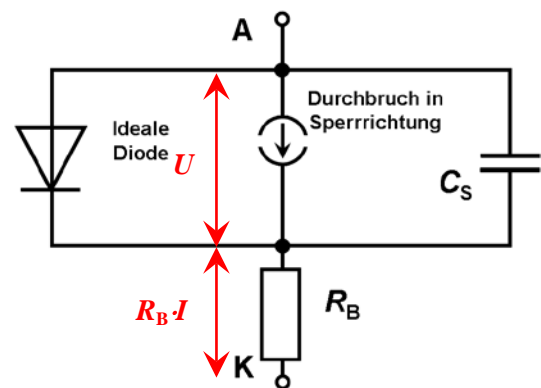
(4) Majoritätsträgerströme: Bei großen Spannungen sind die Majoritätsträgerdichten nicht mehr unabhängig von der externen Spannung U . Diesen Effekt, wie auch die Rekombinationsströme kann man in Grenzen phänomenologisch dadurch beheben, dass man U durch U/n ersetzt mit dem sog. Diodenfaktor n (s. o.). Dieser Faktor wird auf manchen Datenblättern ausgewiesen.

(5) Bahnwiderstand: Bei großen Stromstärken I wird der Bahnwiderstand R_B der Diode spürbar (Abb. 7). R_B kann als einfache ohmsche Komponente der verwendeten Materialien angesehen werden. Dieser Effekt hat deutliche Auswirkungen auf die Form der Kennlinien. Sie schmiegen sich für große Stromstärken an Geraden der Steigung $I = U/R_B$ an. Um das zu verstehen, lösen Sie Gl. 1 nach der Spannung U über der Diode auf und ergänzen den Term um den Spannungsabfall an R_B :

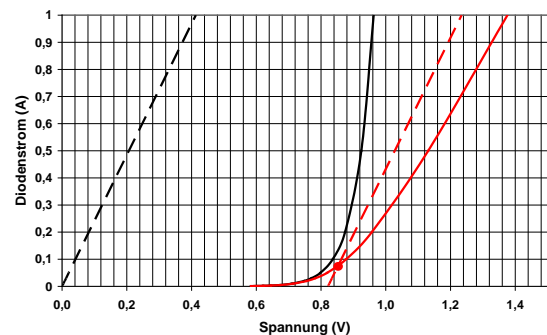
$$U^* = U + R_B I = nU_{th} \cdot \ln\left(\frac{I + I_S}{I_S}\right) + R_B I \rightarrow nU_{th} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_S}\right) + R_B I.$$

Die Steigung der Kennlinie $U = U(I)$, der differentielle Widerstand r , nähert sich immer mehr R_B an:

$$r = \frac{dU^*}{dI} = nU_{th} \cdot \frac{1}{I} + R_B \rightarrow R_B.$$



6 Ersatzschaltbild realer Dioden



7 Reale Kennlinie: Wirkung des Bahnwiderstandes R_B

Die Steigung der Kennlinie wird für große Stromstärken I also konstant. Abb. 7 zeigt diese Verformung (rote Kennlinie). Aus der Kennliniensteigung für große Stromstärken ($\approx 1/R_B$) können Sie jeweils für konstante Stromstärken I die idealisierte Kennlinienform bestimmen:

$$U = U^* - R_B I .$$

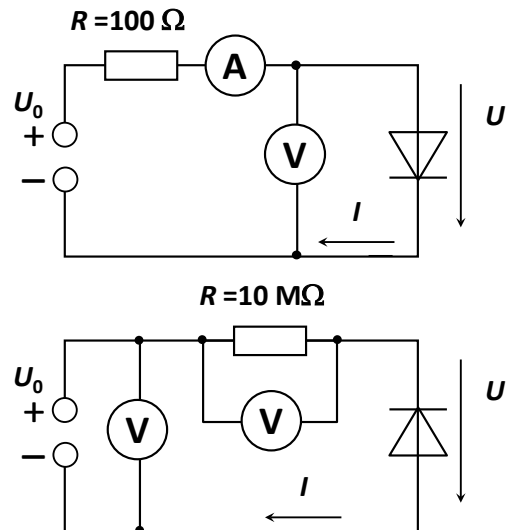
Diese Eigenschaft realer Dioden verschafft Ihnen auch eine *lineare Kennliniennäherung*². Für einen von Ihnen gewählten Arbeitspunkt, $(U_A^* | I_A)$ bestimmen Sie eine sog. Schwellenspannung U_{Sch}

$$U_{Sch} = a \cdot U_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_A}{I_S} \right) = 0,821 \text{ V} .$$

Die Gerade mit der Steigung $1/R_B$ durch den Punkt $(0 | U_{Sch})$ stellt eine für manche Zwecke brauchbare Näherung der I - U -Kennlinie dar (gestrichelt rot in Abb. 7). Die Werte für Abb. 7 entstammen dem Datenblatt der Diode 1N4148 (Diodenfaktor $n = 2,13$, Arbeitspunkt $(853 \text{ mV} | 77 \text{ mA})$; Sperrstromstärke $I_S = 24 \text{ nA}$).

4 Kennlinien von Dioden

In Abb. 8 sehen Sie die Schaltungen, mit denen Sie die Strom-Spannungskennlinien von Dioden messen können.



8 Schaltungen für die Aufnahme der Kennlinien;
Durchlassrichtung: U_0 maximal ca. 5–6 V
Sperrrichtung: U_0 maximal ca. 60 V

M1 Durchlassrichtung Bauen Sie die Schaltung für die Durchlass- (=Fluss-)Richtung auf. Stellen Sie die Spannung U_0 so ein, dass Sie 10 Messpunkte $(U; I)$ zwischen 0,1 mA und 50 mA erhalten. Verteilen Sie die Messpunkte angemessen. Fertigen Sie eine Zeichnung an.

Begründen Sie: $U = U_0 - I \cdot (R + R_i)$; R_i = Innenwiderstand des Strommessgeräts. Welche Annahme über den Innenwiderstand des Spannungsmessgeräts macht man dabei?

M2 Sperrrichtung Mit der Schaltung nach Abb. 8 lassen sich kleine Stromstärken messen. Warum? Ggf. brauchen Sie größere Spannungen U_0 oder kleinere Vorwiderstände R . Wovon hängt die Wahl ab?

Begründen Sie: $I = U_R / R$.

Messen Sie die Sperrstromstärke I_S für unterschiedliche Spannungen U . Können Sie die Behauptung der Shockley-Theorie bestätigen, dass I_S nicht von U abhängt?

M3 Temperaturabhängigkeit Mithilfe des Heißluftföns können Sie die Betriebstemperatur der Diode verändern. Messen Sie die Sperrstromstärke bei konstanter Spannung U in Abhängigkeit von der Temperatur T . Die Temperatur messen Sie mit den bereitliegenden Temperaturfühlern.

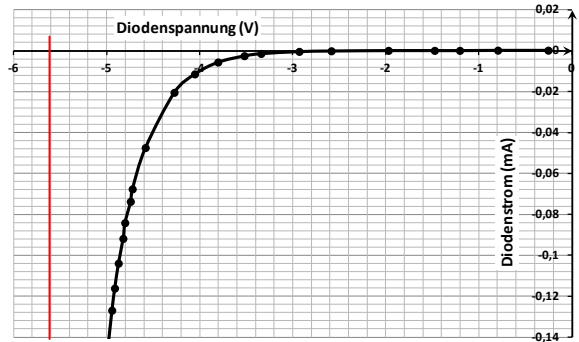
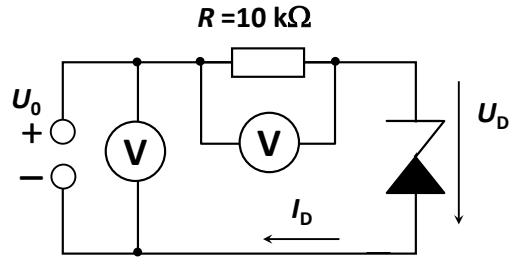
Vorsicht, die Luft aus dem Heißluftgerät ist sehr heiß!

Nach Gl.1 hängt I_S exponentiell von T ab. Bestimmen Sie mit einer angemessenen Fitanalyse den Wert der Energielücke E_G .

² Andere Verfahren verwenden als Geradensteigung die Steigung der Tangente im Arbeitspunkt

M4 Zenerdurchbruch Die Konstruktion sog. Zenerdioden erlaubt einen „gesteuerten“ Durchbruch (Abb. 9). Für Sperrspannungen größer als ein konstruktiv bedingter Wert steigt der Sperrstrom sehr stark an und muss durch einen Vorwiderstand begrenzt werden. Der Spannungsabfall U_Z an der Diode ist im Bereich dieses Zenerdurchbruchs nahezu konstant. Abb. 9 zeigt den Übergang in das Zenergebiet.

Messen Sie mit der Schaltung nach Abb. 9 die Zenerspannung der vorliegenden Zenerdioden.



- 9 Zenerdurchbruch bei der Diode ZPY5,6V: Bei Sperrspannungen größer als 4,6 V wird der pn-Übergang plötzlich leitend. Die Stromstärke wird für $U > 5,5V$ praktisch nur noch vom Vorwiderstand begrenzt
Messung: T. Feld; Physikpraktikum 2014.

5 LED

Können Sie erklären warum eine LED Licht abgibt? Dazu sei der historische Beitrag von O. V. Lossev (1924) zitiert. Bei seinen Messungen stieß der Elektroniker O. V. Lossev auf Lumineszenz-Erscheinungen an der Kontaktstelle in der SiC-Diode (Abb. 10) und hatte Mühe, das Phänomen zu verstehen.

Sie wissen: Beim pn-Übergang in Durchlassrichtung ($U < 0$) werden Minoritätsladungsträger injiziert (Elektronen in den p- sowie Löcher in den n-Halbleiter). Die dabei entstandenen Elektron-Loch-Paare rekombinieren unter Aussenden von Licht, dessen Photonenenergie vom Betrag der Bandlücke bestimmt ist ($h \cdot c / \lambda \approx E_G$). Halbleiter mit direkter Bandlücke haben einen hohen *optischen Wirkungsgrad*.

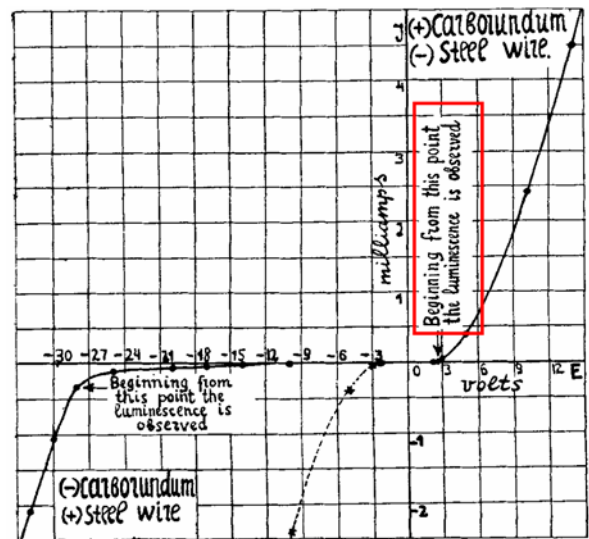
A4 Bestimmen Sie die Wellenlänge und damit Photonenenergie der vier LED in Abb. 11.

M5 Messen Sie die Durchlasskennlinie von drei unterschiedlichen LED. Mit dem Handspektrometer bestimmen Sie die Wellenlänge für das Linienmaximum λ_{max} . Berechnen Sie daraus die Photonenenergie W_{max} in eV.

Was halten Sie davon: Die Farbe einer LED bestimmt sich aus der Kennlinie. Man bestimmt die „Schwellenspannung“ U_{Sch} und daraus mit

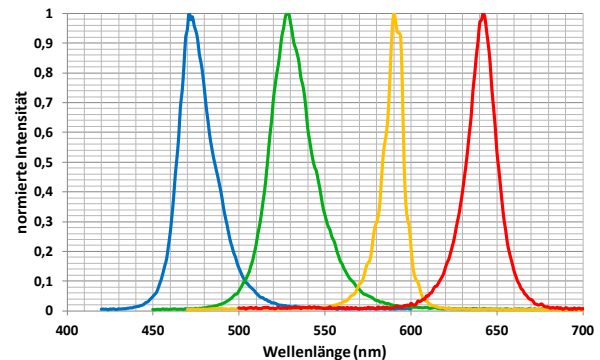
$$\lambda = 2\pi \frac{c}{\omega} = h \frac{c}{eU_{Sch}}$$

die Wellenlänge des Linienmaximums?



By the dotted line (in the third quadrant) is shown the branch of first quadrant. Luminescence II.

- 10 Lumineszenz-Erscheinungen beim historischen Experiment von Oleg Vladimirovich Lossev
Quelle: Wireless World and Radio Review 1924,271, 93



- 11 Spektren dreier verschiedener LED
Messung: T. Feld; Physikpraktikum 2014