

Bestimmung der Energielücke von Germanium

Halbleitende Materialien sind dadurch charakterisiert, daß elementare Anregungen von Valenzelektronen nur möglich sind, wenn den Elektronen genügend Energie zugeführt wird, um eine für das Material charakteristische "Energielücke" zwischen Valenz- und Leitungsband zu überwinden. Viele physikalische Eigenschaften von Halbleitern sind daher von der Größe dieser Energielücke bestimmt. Im vorliegenden Versuch soll die Größe der Energielücke des Elementarhalbleiters **Germanium** bestimmt werden. Dazu wird der Sperrstrom eines Germanium pn-Übergangs als Funktion der Temperatur gemessen. Für die Erzeugung eines Stroms in diesem Übergang ist eine thermische Aktivierung von Ladungsträgern über die Energielücke hinweg nötig; deshalb folgt der Sperrstrom einer exponentiellen Abhängigkeit von Energielücke und Temperatur gemäß einer Boltzmann-Verteilung.

Stichworte für die Vorbereitung:

- Halbleiter, dotiert / undotiert
- Bändermodell, Valenzband, Leitungsband
- Eigenleitung, Störstellenleitung
- pn-Übergang, Diodenkennlinie
- Raumladungszone, Fermienergie E_F , Kontaktpotential
- Durchlaßspannung U_F , Sperrspannung U_R , Temperaturspannung U_T
- Transistor
- Transistorkenngrößen

Literatur:

- Allgemeine Lehrbücher der Physik (z.B. Gerthsen/Gneser/Vogel: Physik, Springer Verlag, oder Hering, Martin, Stohrer: Physik für Ingenieure, VDI-Verlag)
- Rudden/ Wilson: Elementare Festkörperphysik und Halbleiterelektronik, Spektrum Verlag 1995
- Tholl, Bauelemente der Halbleiterelektronik, Teil 1, Teubner (1976)
- Tietze, Schenk, Halbleiter Schaltungstechnik, Springer
- Havill, Walton: Elements of Electronics, Macmillan Press 1975

GRUNDLAGEN

1.1 Einleitung

Eine Halbleiterdiode bzw. ein pn-Übergang entsteht, wenn man in einem Halbleiterkristall eine p-leitende an eine n-leitende Zone angrenzen läßt. An der Grenzfläche diffundieren dann, wegen des Dichtegefälles und der thermischen Energie der freien Ladungsträger, Elektronen in die p-Zone und Löcher in die n-Zone. Deshalb nimmt in einem schmalen Gebiet beiderseits der Grenzfläche die Dichte der freien Ladungsträger um mehrere Zehnerpotenzen ab. Diesen Strom, der aus Majoritätsträgern besteht, nennt man Diffusionsstrom. Die ionisierten Fremdatome bleiben dabei als positive und negative Raumladungen in der n- und p-Zone zurück und rekombinieren zum Teil. Sie bauen in der Grenzschicht ein elektrisches Feld auf und verursachen einen Strom, der der Diffusion entgegenwirkt. Dieser Strom wird als Feldstrom bezeichnet und besteht aus Minoritätsträgern.

Liegt am pn-Übergang keine äußere Spannung, so heben sich Diffusions- und Feldstrom gegenseitig auf. Am Grenzübergang entsteht durch die Raumladungsfeldstärke ein Spannungssprung, der als Diffusionsspannung bezeichnet wird.

1.2 Kennlinie einer Halbleiterdiode

Der Diffusionsstrom hängt von der Dotierungsdichte (Majoritätsträger) und, wegen der Wärmebewegung über den Boltzmannfaktor, von der Höhe der Diffusionsspannung ab. Der Diffusionsstrom kann durch die Gleichung

$$I_D = C_D \cdot e^{-\frac{eU_D}{kT}} \quad [1]$$

mit: C_D : Proportionalitätsfaktor
 U_D : Diffusionsspannung

beschrieben werden.

Der Feldstrom besteht nur aus Minoritätsträgern und kann deshalb schon von sehr kleinen Spannungen an nicht mehr zunehmen. Der Feldstrom ist also ein Sättigungsstrom, der proportional zur Minoritätsträgerdichte ist. Die Minoritätsträgerdichte ist über das Massenwirkungsgesetz der Halbleiter von der Dotierung und wegen der Wärmebewegung über den Boltzmannfaktor von der Energielücke im Bandschema abhängig. Für den Feldstrom ergibt sich daher:

$$I_F = C_F \cdot e^{-\frac{\Delta W}{kT}} \quad [2]$$

wobei C_F einen Proportionalitätsfaktor und ΔW die Energielücke im Bandschema darstellen.

Ohne äußere Spannung ist der Strom durch eine ideale Diode gleich Null, d.h.:

$$I_D = I_F$$

$$C_D \cdot e^{-\frac{e \cdot U_D}{k \cdot T}} = C_F \cdot e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}} \quad [3]$$

Mit äußerer Spannung U kann die Diffusionsspannung abgebaut werden und I_D wird zu

$$I_{DU} = C_D \cdot e^{-\frac{e(U_D - U)}{k \cdot T}}$$

d.h. es fließt ein Strom.

$$I = I_{DU} - I_F$$

$$I = C_D \cdot e^{-\frac{e(U_D - U)}{k \cdot T}} - C_F \cdot e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}}$$

$$I = C_D \cdot e^{-\frac{e \cdot U_D}{k \cdot T}} e^{\frac{e \cdot U}{k \cdot T}} - C_F \cdot e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}} \quad [4]$$

mit Gl. [3] kann geschrieben werden

$$I = C_F \cdot e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}} e^{\frac{e \cdot U}{k \cdot T}} - C_F \cdot e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}}$$

Durch Ausklammern ergibt sich die Diodenkennlinie.

$$I = C_F \cdot e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}} \left(e^{\frac{e \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) \text{ oder}$$

$$I = I_{RS} \left(e^{\left(\frac{U}{U_T} \right)} - 1 \right)$$

Der Koeffizient $I_{RS} = C_F \cdot e^{-\frac{\Delta W}{k \cdot T}}$ wird als Sättigungssperrestrom bezeichnet und ist stark temperaturabhängig. Aus dem Quotient $\left(\frac{k \cdot T}{e} \right) = U_T$ erhält man dimensionsmäßig eine Spannung, die Temperaturspannung. Für die Temperaturspannung bei Zimmertemperatur (25°C) erhält man:

$$U_T = \left(\frac{k \cdot T}{e} \right) = \frac{1,381e^{-23} \text{ VAs} \cdot 298,15 \text{ K}}{1,602e^{-19} \text{ AsK}} = 25,7 \text{ mV}$$

Die Differentiation der Diodengleichung im Durchlaßbereich, d.h.

$$e^{\frac{U}{U_T}} \gg 1$$

ergibt den differentiellen Leitwert:

$$\frac{dI_F}{dU_F} = \left(\frac{I_{RS}}{U_T} \right) e^{\left(\frac{U_F}{U_T} \right)} = \frac{I_F}{U_T} = \frac{1}{r_F}$$

wobei der Index "F" die Durchlaßrichtung angibt.

Reale Dioden zeigen Abweichungen von dem Kennlinienverlauf der Diodengleichung. Im Durchlaßbereich für $U > 0$ können diese Abweichungen im wesentlichen auf Widerstände zurückgeführt werden, die in Serie mit dem pn-Übergang liegen (Widerstand des Halbleitermaterials, der Kontakte und Zuleitungen). Im Sperrbereich für $U < 0$ dehnt sich die Sperrschicht mit wachsender Sperrspannung aus, so daß in ihrem Bereich mehr thermische Paarbildungsprozesse zum Sperrstrom beitragen. Bei höheren Spannungen kann die Feldstärke in der Sperrschicht so groß werden, daß ihre Kraftwirkung allein ausreicht, Elektronen aus ihren Bindungen zu reißen und so die Dichte der freien Ladungsträger beträchtlich zu erhöhen (Zehner-effekt). Außerdem kann bei hoher Sperrspannung und genügend breiter Sperrschicht, die kinetische Energie der freien Ladungsträger so groß werden, daß sie in der Lage sind, durch Stoß weitere Ladungsträger freizusetzen (Lawinen- oder Avalanche-Effekt). In beiden Fällen steigt, von einer kritischen Spannung an, der Sperrstrom steil an.

1.3 Temperaturabhängigkeit des Sperrstroms

Der Sperrstrom ist nach Gl. [2], wie der Feldstrom, ein Minoritätsträgerstrom und exponentiell von der Temperatur abhängig. Für den Sperrstrom ergibt sich

$$I_{RST} = C_F \cdot e^{\left(\frac{-\Delta W}{kT}\right)} \quad [6]$$

Man betrachtet nun den Sperrstrom I_{RST} bei der Temperatur T und den Sperrstrom I_{RS0} bei der Temperatur T_0 .

$$I_{RS0} = C_F \cdot e^{\left(\frac{-\Delta W}{kT_0}\right)} \quad [7]$$

Gl. [6] und Gl. [7] werden dividiert und anschließend logarithmiert, so daß sich ergibt

$$\ln\left(\frac{I_{RST}}{I_{RS0}}\right) = \frac{\Delta W}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) \quad [8]$$

Mit der Temperaturkonstante $C = \frac{\Delta W}{k} = \frac{e \cdot \Delta U}{k}$ und der Energielücke ($e \cdot \Delta U$) in eV, läßt sich schreiben

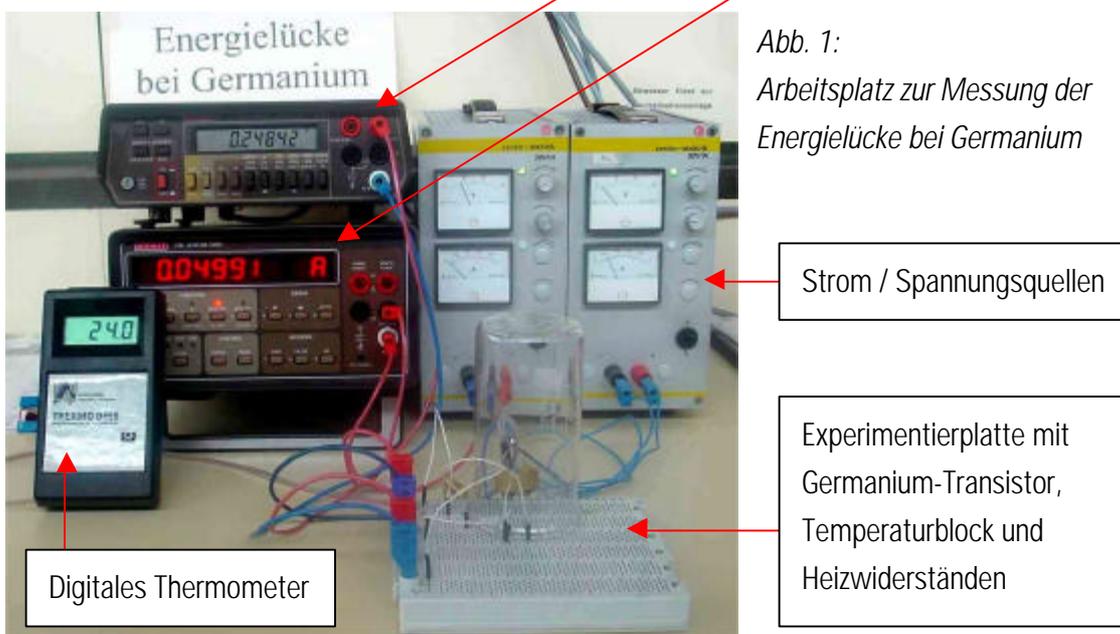
$$\ln\left(\frac{I_{RST}}{I_{RS0}}\right) = \frac{C}{T_0} - \frac{C}{T} \quad [9]$$

Dies entspricht in halblogarithmischer Darstellung der Gleichung einer Geraden, wobei C die Steigung der Geraden angibt und die Variable $1/T$ auf der Abszisse aufgetragen wird.

2. Versuchsdurchführung

Geräteliste:

- 2 Spannungs- bzw. Stromquellen (Typ ZENTRO)
- 1 Strommeßgerät
- 2 Spannungsmessgeräte
- 1 Experimentierplatte mit Zubehör
- 1 Temperaturblock mit Heizwiderständen
- 1 Digitales Thermometer zur Messung der Temperaturabhängigkeit des Sperrstroms
- 1 Germaniumdiode (Transistor)
- 1 Siliziumdiode (Transistor)
- 1 Potentiometer
- Widerstände
- Datenbücher



2.1 Aufnahme der Kennlinien $I_F = f(U_F)$ im Bereich -3 V bis +1 V.

Schaltung:

Überlegen Sie sich geeignete Schaltungen zur Aufnahme der $I_F = f(U_F)$ Kennlinie der Basis-Kollektor-Strecke eines Si- bzw. Ge-Transistors in Durchlaß- bzw. Sperrichtung. Beachten Sie hierbei den Einfluß der Meßgeräte auf das Meßergebnis (Strom- bzw. Spannungsfehlerschaltung). Welche Schaltung eignet sich für die Sperr-, bzw. Vorwärtsbeschaltung der Diode?

- Entnehmen Sie den Datenbüchern bzw. den Datenblättern die Grenzdaten und Anschlußbezeichnungen der Bauteile.

- Legen Sie die maximale Betriebsspannung fest, und berechnen Sie aus der maximalen Verlustleistung den maximalen Durchlaßstrom. Begrenzen Sie den Durchlaßstrom durch Beschaltung der Diode mit einem geeigneten Schutzwiderstand.
- Notieren Sie die Umgebungstemperatur und die Innenwiderstände der Meßgeräte.
- Bauen Sie die Meßschaltungen auf dem Steckbrett auf und nehmen Sie die Kennlinien auf.

2.2 Messung der Temperaturabhängigkeit des Sperrstroms einer Germanium-Diode (Emitter-Basis-Diode eines Transistors)

Hierzu wird der Transistor in die entsprechende Bohrung des Temperaturblocks eingebracht (evtl. etwas Wärmeleitpaste verwenden). Die Temperatur wird über den Strom durch die beiden Heizwiderstände eingestellt. Zur Temperaturmessung wird ein digitales Thermometer verwendet. Decken Sie die Schaltung mit einem Becherglas ab, um während der Messung annähernd ein thermisches Gleichgewicht zu erreichen.

Messung: Messen Sie den Sperrstrom in Mikroampère als Funktion der Temperatur beim Aufheizen auf etwa 50°C und beim Abkühlen.

3. Hinweise für die Auswertung

- 3.1 Berechnen Sie den entstandenen Meßfehler durch die Meßgeräte bei der Durchlaß- und Sperrkennlinie.
- 3.2 Zeichnen Sie die aufgenommenen Kennlinien in ein Diagramm. Verkleinern Sie den Maßstab für den Sperrstrom der Ge-Diode entsprechend.
- 3.3 Ermitteln Sie die Schwellspannung¹ und den differentiellen Durchlaßwiderstand aus der gezeichneten Kennlinie. Berechnen Sie den differentiellen Durchlaßwiderstand mit Hilfe der Temperaturspannung, und vergleichen Sie den berechneten mit dem aus der Kennlinie ermittelten Wert.
- 3.4 Berechnen Sie die theoretische Diodenkennlinie für Ge-Dioden. Entnehmen Sie dazu I_{RS} aus 3.2. Zeichnen Sie die Kennlinie in das Diagramm von 3.2! Warum zeigen die beiden Kennlinien (theoretische und experimentelle) einen unterschiedlichen Verlauf?
- 3.5 Zeichnen Sie die Funktion $\ln\left(\frac{I_{RST}}{I_{RS0}}\right) = f(1/T)$ eventuell auf halblogarithmisches Papier und berechnen Sie den Wert der Energielücke in eV . Dieser Teil der Auswertung ist am Versuchstag zu machen!
- 3.6 Wie genau ist die Temperaturmessung und der berechnete Wert der Energielücke? Fehlerrechnung!

¹ Schwellspannung: als Schwellspannung wird die Spannung bezeichnet, bei der der Durchlaßstrom auf ein Zehntel des maximal zulässigen Durchlaßstroms angestiegen ist.

Physiklabor 2

Bestimmung der Energielücke von Germanium

(Korrekturblätter)

Marc Baumann, Matr. 13855
Kai-Uwe Berroth, Matr. 13842

Weingarten, 11.01.2005

3. Auswertung

3.1 Aufnahme der Kennlinien $I_F=f(U_F)$

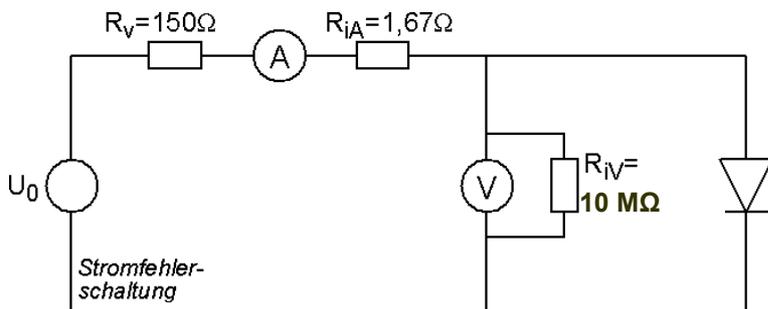
Die Kennlinien werden im Bereich von -3 bis $+1V$ aufgenommen. Zuerst wird die Siliziumdiode in Durchlassrichtung vermessen. Anschließend eine Germaniumdiode in Sperrrichtung. Im Folgenden sind die dafür verwendeten Schaltungen dargestellt. Der Widerstand R_V wird nach der Formel:

$$R_V = \frac{U_{Batt/max}}{I_{max}} = 150\Omega \quad \text{mit} \quad I_{max}(Ge) = I_{max}(Si) = 200mA$$

$$U_{Batt/max} = 30V$$

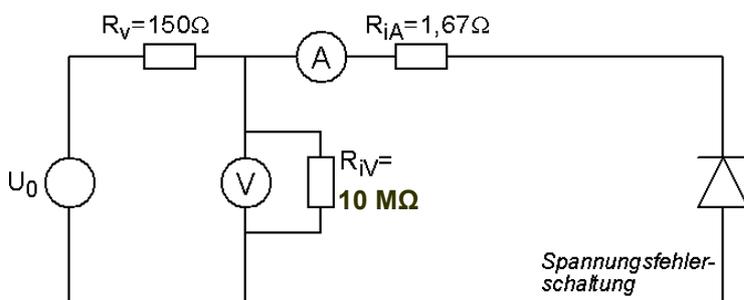
bestimmt.

Für die Durchlassrichtung wurde folgende Schaltung verwendet:



Stromfehlerschaltung

Für Messungen in Sperrrichtung wurde folgende Schaltung verwendet:



Spannungfehlerschaltung

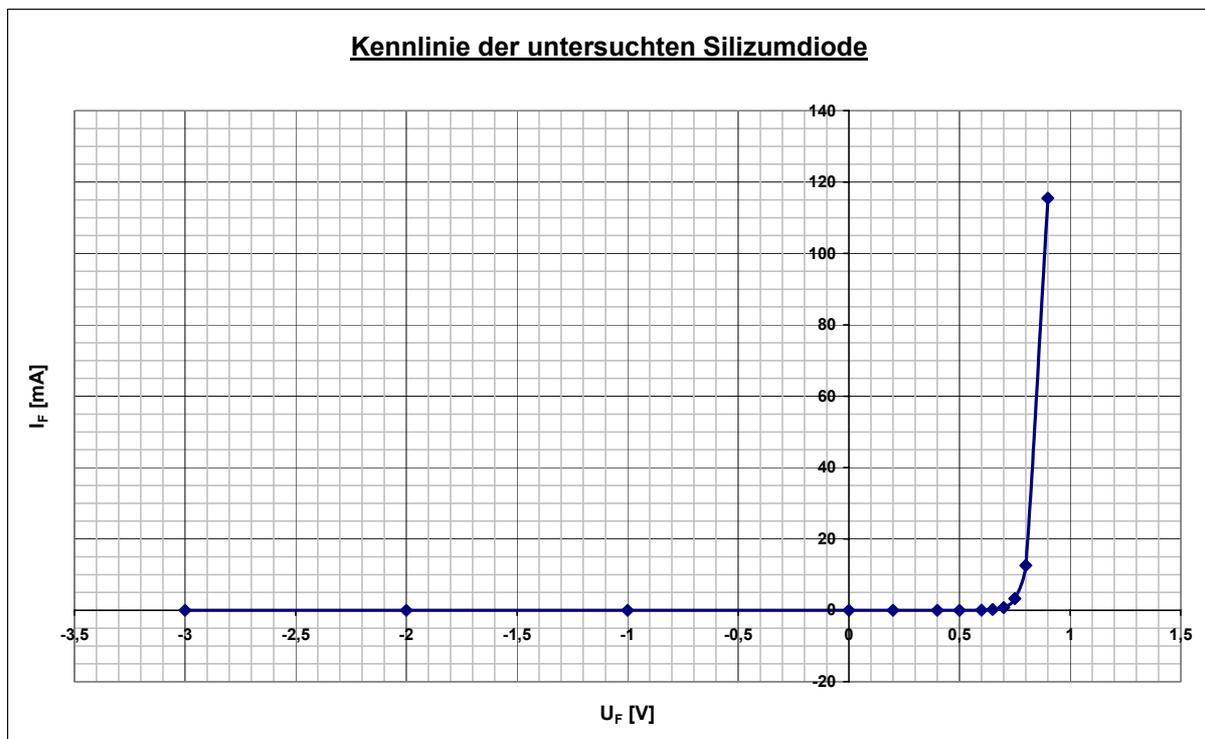
3.2 Kennlinie einer Siliziumdiode

Es ergaben sich folgende Messwerte:

U_F [V]	-3	-2	-1	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,9
I_F [mA]	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,32	0,78	3,32	12,61	115,52

Anmerkung:

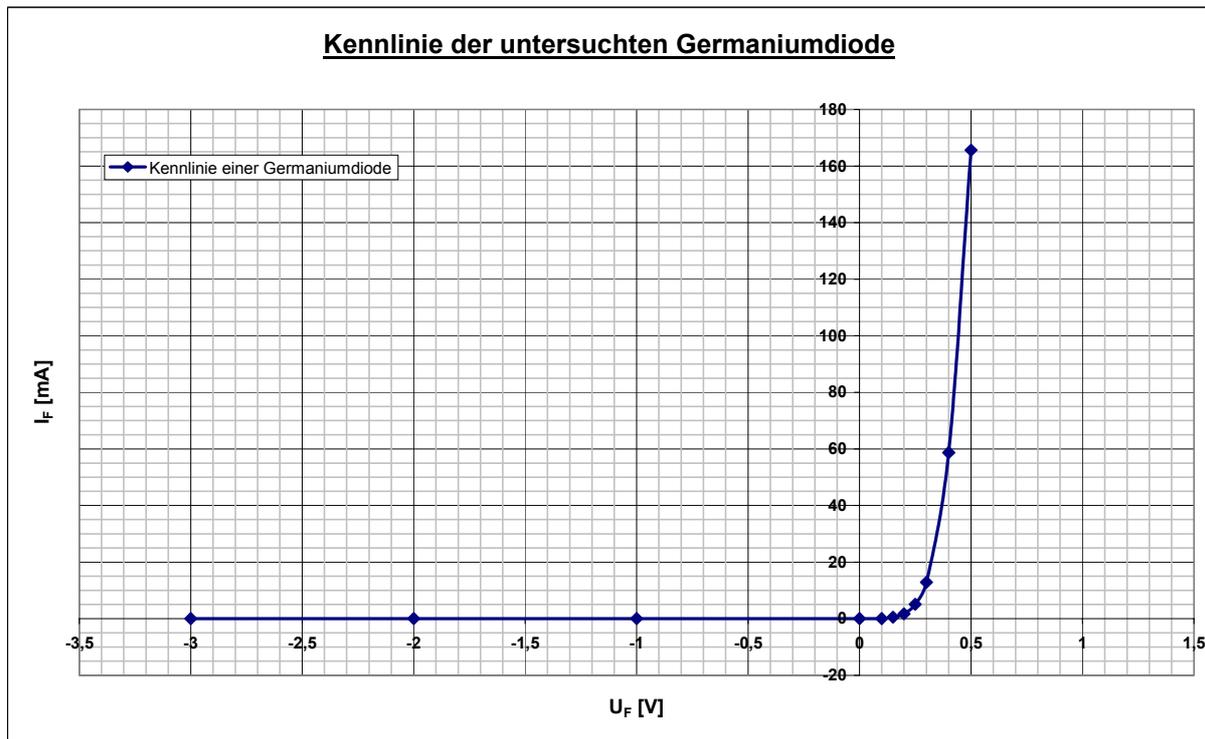
In unserem Messprotokoll wurde ein Sperrstrom von $1\mu\text{A}$ festgehalten. Verglichen mit den Literaturwerten muss dieser allerdings im nA-Bereich liegen (Außerhalb des Messbereichs des Messgerätes). Es musste es sich somit um einen Ablesefehler handeln. Stattdessen wurde näherungsweise 0 mA verwendet.



3.3 Kennlinie einer Germaniumdiode

Es ergaben sich folgende Messwerte:

U_F [V]	-3	-2	-1	0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
I_F [mA]	-0,001	-0,001	-0,001	0	0,01	0,5	1,7	5,1	12,9	58,7	165,6



3.4 Temperaturabhängigkeit des Sperrstroms einer Ge-Diode

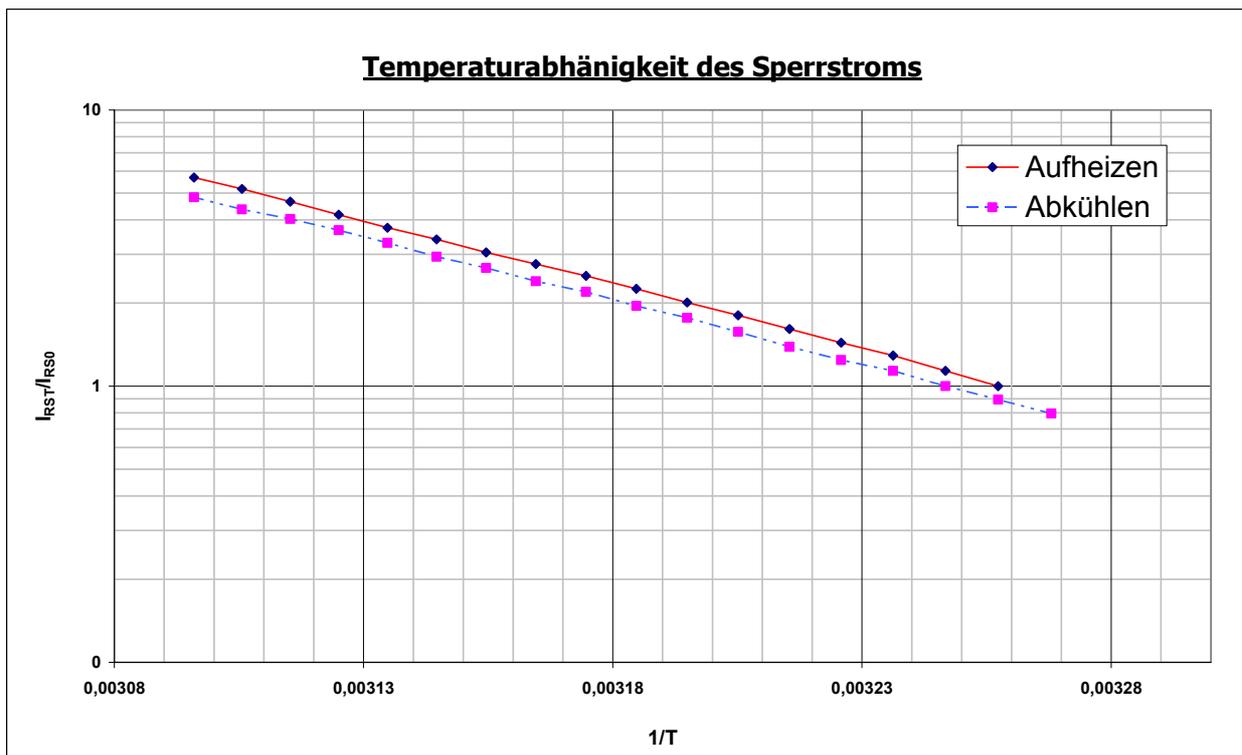
Grundeinstellungen: $U_{BE} = -1 \text{ V}$
 $I_{RS0} = 10,3 \mu\text{A}$

Messergebnisse beim Aufheizen

T [°C]	1/T [1/K]	I_{RST} [μA]	I_{RST}/I_{RS0}
34	0,00326	10,3	1,00000
35	0,00325	11,7	1,13592
36	0,00324	13,3	1,29126
37	0,00323	14,8	1,43689
38	0,00322	16,6	1,61165
39	0,00321	18,6	1,80583
40	0,00319	20,7	2,00971
41	0,00318	23,2	2,25243
42	0,00317	25,8	2,50485
43	0,00316	28,5	2,76699
44	0,00315	31,4	3,04854
45	0,00314	35	3,39806
46	0,00313	38,6	3,74757
47	0,00313	43	4,17476
48	0,00312	48	4,66019
49	0,00311	53,3	5,17476
50	0,00310	58,6	5,68932

Messergebnisse beim Abkühlen

T [°C]	1/T [1/K]	I_{RST} [μA]	I_{RST}/I_{RS0}
33	0,00327	8,2	0,79612
34	0,00326	9,2	0,89320
35	0,00325	10,3	1,00000
36	0,00324	11,7	1,13592
37	0,00323	12,8	1,24272
38	0,00322	14,3	1,38835
39	0,00321	16,2	1,57282
40	0,00319	18,2	1,76699
41	0,00318	20,1	1,95146
42	0,00317	22,6	2,19417
43	0,00316	24,7	2,39806
44	0,00315	27,6	2,67961
45	0,00314	30,3	2,94175
46	0,00313	34	3,30097
47	0,00313	37,8	3,66990
48	0,00312	41,5	4,02913
49	0,00311	45	4,36893
50	0,00310	49,7	4,82524



3.5 Berechnung des entstandenen Messfehlers durch die Messgeräte

3.5.1 Messfehler bei Durchlassrichtung

Auf Grund der großen Ströme wird bei dieser Messung die Stromfehlermessung angewendet. Hierdurch erhält man einen kleinen Fehler in der Strommessung, ist aber dafür bei der Spannungsmessung genauer.

Um den Stromfehler ermitteln zu können sind folgende Informationen nötig:

$$\begin{aligned}R_{iV} &= 10\text{M}\Omega \\U_{D\max}(\text{Si}) &= 0,9\text{ V} \\U_{D\max}(\text{Ge}) &= 0,5\text{ V}\end{aligned}$$

Hiermit lässt sich der maximale Messfehler berechnen:

$$\begin{aligned}\Delta I_D &= I_A - I_D \quad \text{mit } I_A = I_{R_{iV}} + I_D = \frac{U_D}{R_{iV}} + I_D \\ \underline{\underline{\Delta I_{D\max}}} &= \underline{\underline{\frac{U_{D\max}}{R_{iV}}}}\end{aligned}$$

Setzt man die oben aufgeführten Werte ein, erhält man:

$$\begin{aligned}\Delta I_{D\max}(\text{Si}) &= 90\text{nA} \\ \Delta I_{D\max}(\text{Ge}) &= 50\text{nA}\end{aligned}$$

3.5.2 Messfehler bei Sperrrichtung

Im Gegensatz zur Durchlassrichtung treten hier sehr kleine Ströme auf, die möglichst exakt gemessen werden sollten. Die Spannungsfehlerschaltung wird hierfür verwendet. Hierdurch erhält man einen kleinen Fehler in der Spannungsmessung, ist aber dafür bei der Strommessung genauer.

Um den Stromfehler ermitteln zu können sind folgende Informationen nötig:

$$\begin{aligned}R_{iA} &= 1,67\Omega \\I_{D\max}(\text{Si}) &= -1\ \mu\text{A} \\I_{D\max}(\text{Ge}) &= -1\ \mu\text{A}\end{aligned}$$

Hiermit lässt sich der maximale Messfehler berechnen:

$$\Delta U = U_V - U_D \quad \text{mit } U_V = U_{R_{iA}} + U_D = I_D \cdot R_{iA} + U_D$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\Delta U_{\max} = I_{D_{\max}} \cdot R_{iA}}}$$

Setzt man die oben aufgeführten Werte ein, erhält man:

$$\Delta U_{D_{\max}}(\text{Si}) = 1,67 \mu\text{V}$$

$$\Delta U_{D_{\max}}(\text{Ge}) = 1,67 \mu\text{V}$$

3.6 Ermittlungen der Schwellspannung U_F und des diff. Durchlasswiderstandes r_F

3.6.1 Schwellenspannung U_F

aus den Datenblättern entnimmt man:

$$I_{\max}(\text{Ge}) = I_{\max}(\text{Si}) = 200 \text{mA}$$

$$\underline{\underline{I_F = \frac{I_{\max}}{10} = 20 \text{mA}}}$$

Ablesen von U_F aus den Diodenkennlinien:

$$U_F(\text{Si}) \approx 0,82 \text{V}$$

$$U_F(\text{Ge}) \approx 0,31 \text{V}$$

3.6.2 Berechnung des differentiellen Durchlasswiderstands r_F

aus den Diodenkennlinien:

$$r_F(\text{Si}) = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,1 \text{V}}{97,5 \text{mA}} = 1,026 \Omega$$

$$r_F(\text{Ge}) = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,1 \text{V}}{105 \text{mA}} = 0,952 \Omega$$

Berechnung des differentiellen Durchlasswiderstands bei einer Raumtemperatur von etwa 22.8°C :

Aus:

$$\frac{dI_F}{dU_F} = \frac{I_F}{U_T} = \frac{1}{r_F} \quad \text{mit} \quad U_T = \frac{k \cdot T_U}{e} = \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 295,8 \text{ K}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = 25,5 \text{ mV}$$

ergibt sich:

$$r_F(\text{Si}) = \frac{U_T}{I_F} = \frac{25,5 \text{ mV}}{20 \text{ mA}} = 1,27 \Omega$$

$$r_F(\text{Ge}) = \frac{U_T}{I_F} = \frac{25,5 \text{ mV}}{20 \text{ mA}} = 1,27 \Omega$$

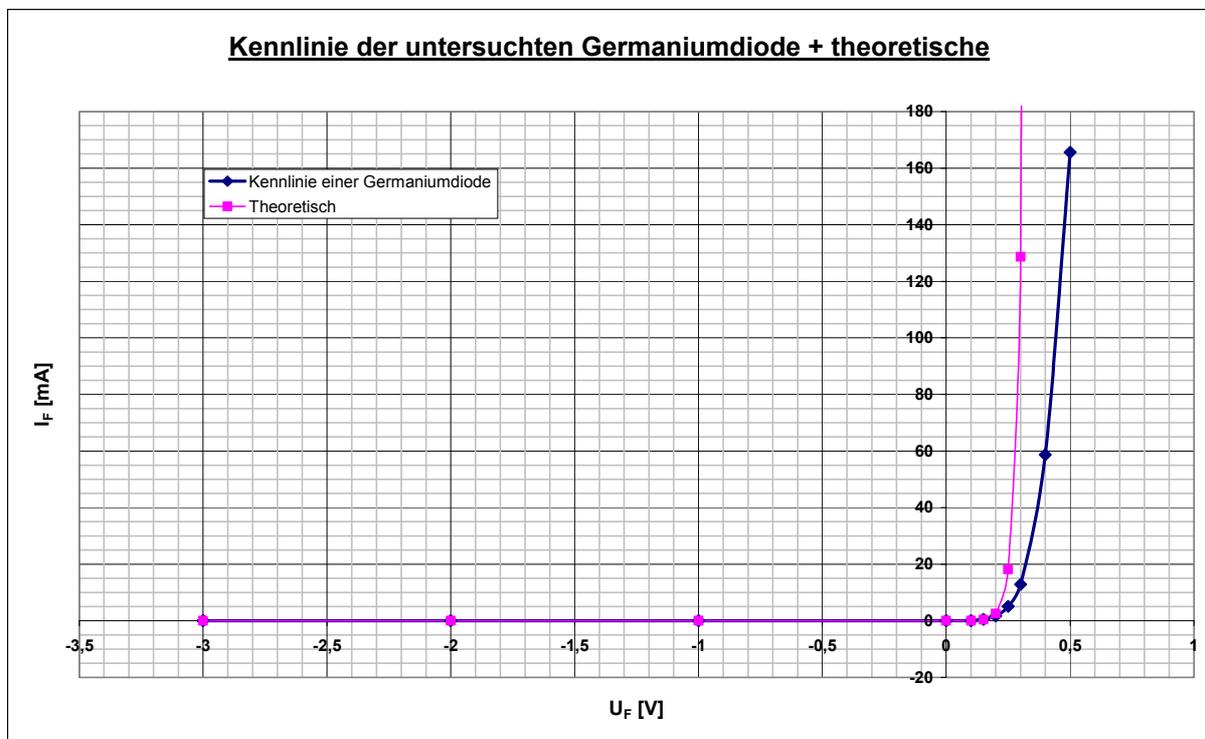
3.7 Theoretische Diodenkennlinie für Ge-Dioden

Die theoretische Diodenkennlinie ergibt sich aus folgender Formel:

$$I = I_{RS} \left(e^{\left(\frac{U}{U_T}\right)} - 1 \right) \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} I_{RS} &= 1\mu A \\ U_T &= 25,5mV \end{aligned}$$

Wertetabelle:

U_F [V]	-3,0	-2,0	-1,0	0,0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
I_F [mA]	-0,001	-0,001	-0,001	0,0	0,049	0,36	2,5	18,1	129	$\approx 6,5A$	$\approx 328A$



Die theoretische Kennlinie unterscheidet sich deutlich von der gemessenen. Grund hierfür ist, dass jede Diode einen kleinen Widerstand in Reihe besitzt. Wird der Strom größer, beeinflusst der Widerstand immer stärker die Kennlinie. Die Steigung wird dann $\sim r_f$.

3.8 Bestimmung der Energielücke von Germanium

Berechnung der Energielücke:

Geradengleichung: $\ln\left(\frac{I_{RST}}{I_{RS0}}\right) = m \cdot x$ mit $x = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$
 $m = \frac{\Delta W}{k}$

$$\Delta W = m \cdot k = \frac{\ln \Delta \frac{I_{RST}}{I_{RS0}}}{\Delta \frac{1}{T}} \cdot k$$

Aus dem ermittelten Diagramm lässt sich die Steigung ablesen:
(es wurde bei der abkühlenden Messkurve der Start- und Endwert benutzt)

Hierfür ergibt sich für: $\Delta \frac{I_{RST}}{I_{RS0}} = 4,029$

$$\Delta \frac{1}{T} = 0,00017 \frac{1}{K}$$

$$\Delta W = 1,07 \cdot 10^{-19} J$$

$$\Delta W = \frac{1,07 \cdot 10^{-19} J}{e} = 0,67 eV$$

Verglichen mit dem Literaturwert von $\Delta W = 0,67 eV$ trifft unser ermittelter Wert exakt die Angabe. Es muss allerdings auch erwähnt werden, dass unterschiedliche Wertepaare zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen führen. Für ein weiteres Wertepaar ergab sich zum Beispiel eine Energielücke von $\Delta W = 0,72 eV$. Im nächsten Abschnitt wird dies in der Fehlerrechnung deutlich gemacht.

3.9 Fehlerrechnung

Aus

$$W = m \cdot k = \frac{\ln \frac{I_{RST}}{I_{RS0}}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \cdot k$$

folgt unter der Berücksichtigung der Temperaturfehler von:

Temperaturmessfehler: $\Delta T_{Mess} = 1 K$

Maximaler Fehler: $\Delta W = k \cdot \ln \frac{I_{RST}}{I_{RS0}} \cdot \frac{(T_0)^2}{(T_0 - T)^2} \cdot \Delta T$

$$\Delta W = 9,162 \cdot 10^{-21} J$$

$$\Delta W = \frac{9,162 \cdot 10^{-21} J}{e} = \pm 57 meV$$

Hieraus ergibt sich für die Energielücke in Germanium mit dem Laboraufbau:

$$\underline{\underline{W = (0,67 \pm 0,057)eV}}$$

4. Diskussion:

- Mit dem Versuchsaufbau konnte erstaunlich gut die Energielücke von Germanium bestimmt werden. Das Messergebnis fiel bedeutend besser aus als erwartet. Es muss gesagt werden, dass für andere Wertepaare das Ergebnis etwas variiert, allerdings noch gut durch die Fehlerrechnung abgedeckt werden.
- Der größte Fehler wird bei der Temperaturmessung der Germaniumdiode gemacht. Die Wertetabelle von 3.4 lässt die starke Temperaturabhängigkeit des Sättigungssperrstrom erkennen. Aus diesem Grund wurde die Fehlerrechnung auch nur für die Temperatur vorgenommen.
- Der Temperaturfehler wurde mit $\pm 1\text{K}$ angenommen, was auf den ersten Blick etwas hoch erscheint. In der Versuchsdurchführung wurde die Heizleistung etwas zu hoch eingestellt. Ein kleinerer Strom durch die Heizwiderstände wäre sinnvoller gewesen, da somit die Temperatur noch langsamer angestiegen wäre. Die Versuchsanordnung der Heizung enthält darüber hinaus thermische Kapazitäten und Temperaturgefälle. Diese wurden durch den Aufbau versucht möglichst klein zu halten (Wärmeleitpaste, Becherglas,..). Ideal wäre, für jede Temperatur eine kleine Pause von wenigen Minuten zu machen, um eine möglichst konstante Temperatur im Transistor zu erreichen. (Bei Bosch betragen die Wartezeiten für temperaturabhängige Messungen 10 min bevor Messungen an den Drucksensoren vorgenommen wurden)
- Die Messung für den Sperrsättigungsstrom beginnt bei einer Temperatur von 33°C , da zuvor mit der Heizleistung experimentiert wurde und somit der Heizblock vorgewärmt wurde. Dennoch ist das Ergebnis unserer Meinung nach sehr gut.