

Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums aus der Schwellenspannung von LEDs (A9)

In diesem Versuch sollen Sie sich mit LEDs beschäftigen, diese richtig beschalten lernen, die Schwellenspannungen farblich unterschiedlicher Leuchtdioden messen und daraus das Plancksche Wirkungsquantum bestimmen.

Vorkenntnisse

- Dotierung von Halbleitern, p- und n-Leitung
- einfaches Bändermodell eines Festkörpers (Metall, Halbleiter, Isolator)
- pn-Übergang (Raumladungszone, Sperrschicht, Rekombination)
- Grundstromkreis (Maschensatz)
- Diodenkennlinie (Durchlass- und Sperrrichtung)
- Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts
- Photoeffekt, Einstein Beziehung

Informieren Sie sich bereits in Vorbereitung auf den Versuch anhand der Stichwörter in gängigen Lehrbüchern (z.B. Leistungskurslehrbuch: Metzler, Physik) oder Nachschlagewerken.

Grundlagen

Eine Leuchtdiode (auch: Lumineszenzdiode), kurz LED (light emitting diode) genannt, ist ein elektronisches Halbleiterbauelement mit einem pn-Übergang. An der Kontaktfläche zweier unterschiedlich dotierter Halbleiter bildet sich eine Verarmungsrandschicht, da einige Elektronen in das p-Gebiet und einige Löcher in das n-Gebiet diffundieren und dort jeweils rekombinieren. Je nach Richtung des angelegten äußeren Feldes erweitert sich diese Randschicht (Sperrschicht) oder nimmt ab (Durchlassrichtung). Bei der LED treibt das in Durchlassrichtung angelegte Feld Elektronen und Löcher, die teilweise an den Elektroden injiziert worden sind, aufeinander zu bis sie in der Randschicht unter Lichtaussendung rekombinieren.

Die $I - U$ -Kennlinie verhält sich ähnlich wie die einer gewöhnlichen Gleichrichter-Diode. Während in der Sperrrichtung kein Strom (bzw. fast unabhängig von der angelegten Spannung nur ein äußerst geringer, so genannter Sperrstrom von wenigen μA) fließt, wächst der Stromfluß in Durchlassrichtung (Pluspol der Betriebsspannung am p-Gebiet) mit steigender Spannung ab einer Schwellenspannung U_S etwa exponentiell an. In Abbildung 1 ist die Kennlinie einer LED gezeigt.

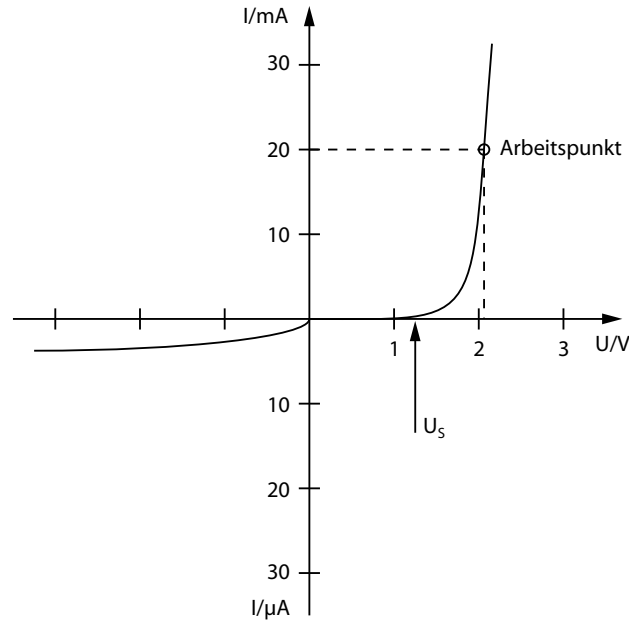


Abbildung 1: Kennlinie einer LED

Fließt bei einer LED in Durchlassrichtung Strom, so führt die Rekombination von Elektronen mit Löchern am pn-Übergang zur Aussendung von Licht. Bei der Rekombination “fällt” ein Elektron aus dem Leitungsband (Minimum) des elektrisch angeregten Halbleiters in ein Loch im Valenzband (Maximum), wobei die Energie in Form eines Lichtquants (Photon) frei wird. Das Photon ist ein so genanntes Quasiteilchen, das wie ein Teilchen in der klassischen Physik durch zwei Größen, Energie und Impuls, charakterisiert wird. Allerdings ist der Impuls p_{ph} eines Photons sehr klein bzw. nahezu Null (Rechnen Sie selbst nach: $p_{ph} = E_{ph}/c = hf/c = h/\lambda$). Wegen der Impulserhaltung können für LEDs deshalb nur direkte Halbleitermaterialien verwendet werden. Bei diesen liegen das Leitungsbandminimum und das Valenzbandmaximum im so genannten Impulsraum bei der gleichen Koordinate, so dass bei der Rekombination eines Elektrons mit einem Loch kein Impuls erzeugt bzw. verbraucht werden muss. Die Abbildung 2 zeigt die Bandstruktur und Rekombination im direkten Halbleiter.

Die Energie des ausgesandten Lichts E_{ph} hängt von der Größe der Bandlücke (energetischer Abstand zwischen Leitungsbandminimum und Valenzbandmaximum) der verwendeten Halbleitermaterialien ab, es gilt also

$$E_{ph} = E_{\text{Bandlücke}} . \quad (1)$$

Aus der Einsteinschen Beziehung $E_{ph} = hf$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$) ist, ergibt sich die Frequenz des Lichts. Die Wellenlänge bestimmt sich zu

$$\lambda = \frac{hc}{E_{ph}} = \frac{c}{f} . \quad (2)$$

Je größer also die Bandlücke des Halbleitermaterials ist, um so energiereicher bzw. kurzwelliger sind die ausgesandten Photonen. Das Licht der Leuchtdiode ist relativ monochromatisch. Die spektrale Breite des ausgesandten Lichts beträgt wenige 10 nm. Diese - im Vergleich zu den scharfen, von angeregten Atomen ausgesandten Linien - große spektrale Breite kommt daher, weil die Bandkante (Energie der Bandlücke) nur bei $T = 0 \text{ K}$ “scharf” ist und bei Raumtemperatur Gitterschwingungen im Festkörper (Phononen) bei der Rekombination mitwirken.

Leuchtdioden sind inzwischen aus verschiedenen Halbleitermaterialien herstellbar und daher in verschiedenen Farben, von ultraviolett über blau, grün, gelb, orange, rot bis infrarot erhältlich. So genannte “weiße LEDs” enthalten entweder drei LEDs (rot, grün und blau) auf einem Chip oder bestehen aus einer blauen Diode und einem Farbstoff, der einen Teil des blauen Lichts in den grünen bis roten Spektralbereich umsetzt, so dass insgesamt weißes Licht emittiert wird.

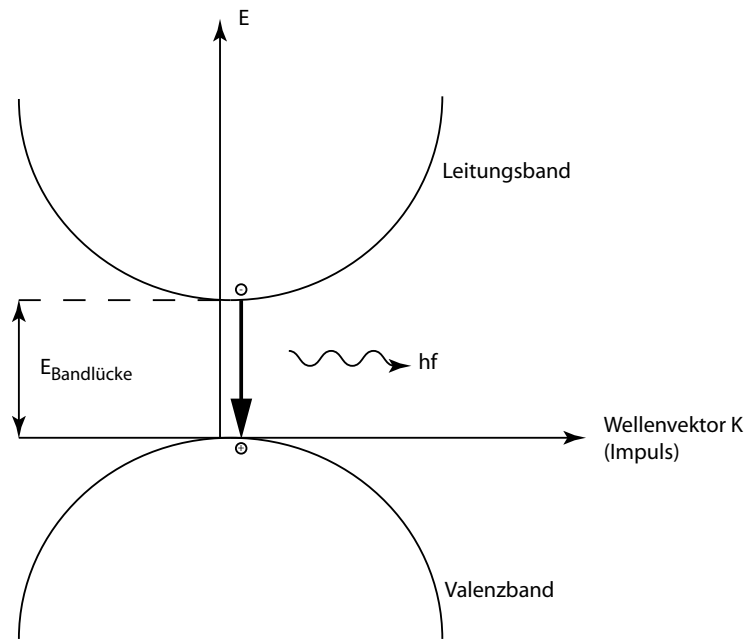


Abbildung 2: Rekombination eines Elektrons mit einem Loch unter Aussendung eines Photons

Während eine Glühlampe (Temperaturstrahler mit kontinuierlichem Spektrum) nur wenige Prozent der elektrischen Energie in Licht umsetzt, arbeiten LEDs wesentlich effektiver. Ihre Vorteile sind die große Leuchtkraft bei geringer Stromstärke und die Lebensdauer von bis zu 10^6 Stunden. LEDs werden neben der Anzeige von Signalen/Zuständen von Geräten heute bereits auch in Ampelanlagen und für Beleuchtungszwecke (z.B. als Rücklicht, aber auch schon als Scheinwerfer bei Lokomotiven und Autos) eingesetzt. Preiswerte Standard-LEDs werden gewöhnlich mit 20 mA betrieben, es sind aber auch so genannte "low-current-LEDs" mit Betriebsströmen von 5 mA und "SuperFlux-LEDs" mit Betriebsströmen bis zu 1 A verfügbar. Bei Letzteren sind zusätzliche Maßnahmen nötig, um die Verlustleistung (Wärme) abzuführen.

Eine Leuchtdiode beginnt bereits bei einem Bruchteil des maximal erlaubten Betriebsstroms zu leuchten. Die dazu gehörige Spannung nennt man Schwellenspannung U_S . Mit weiter steigender Spannung nehmen der Strom exponentiell und die Leuchtkraft stark zu. Aufgrund der exponentiell ansteigenden Kennlinie im Durchlassbereich führen daher Schwankungen der Betriebsspannung und eine Überschreitung des zulässigen maximalen Betriebsstroms oft zur sofortigen Zerstörung der LED. Eine LED muss daher stets mit einem Vorwiderstand zur Strombegrenzung an eine Spannungsquelle angeschlossen werden.

Noch mal kurz zurück zur Einstein-Beziehung: Der von Hallwachs 1870 entdeckte äußere Photoeffekt wurde 1905 von Einstein erstmals erklärt, indem er annahm, dass Licht in Form von Lichtquanten (Photonen) übertragen wird. Die damalige Hypothese, dass die Photonenenergie $E_{ph} = hf$ sei, ist mit eine der wichtigsten - inzwischen natürlich bewiesenen - Grundlagen der Quantenmechanik. Der äußere Photoeffekt (siehe Versuch A 3) beschreibt das Herauslösen von Elektronen aus einer Metalloberfläche durch Licht, wobei der Energiesatz gilt und die kinetische Energie des herausgelösten Elektrons sich zu $E_{kin,elektron} = hf - W_A$ ergibt mit W_A als Ablösearbeit des Elektrons aus dem Metall. Einstein konnte damit erklären, dass nur energiereiche Photonen unterhalb einer bestimmten Wellenlänge, d.h. mit einer bestimmten Mindestenergie, die größer als die Ablösearbeit ist, Elektronen herausschlagen können. Mit dem inneren photoelektrischen Effekt bezeichnet man die Anregung von Elektronen z.B. im Atom oder im Halbleiter durch Absorption von Photonen. Lichteinstrahlung mit geeigneter Wellenlänge führt im Halbleiter zur so genannten Photoleitfähigkeit. Wird zusätzlich ein pn-Übergang benutzt, ist wie bei der Solarzelle Ladungstrennung nach Lichteinstrahlung möglich.

Bei der Lichterzeugung mittels Leuchtdioden könnte man also vom umgekehrten inneren photoelek-

trischen Effekt sprechen. Unterschiedliche, getrennte Ladungen rekombinieren am pn-Übergang, wobei die freiwerdende Energie als Photon ausgesendet wird. Auch hier gilt der Energiesatz: Man benötigt elektrische Energie $W_{el} = eU$, wobei U die an die LED angelegte Spannung ist, um ein Photon mit der Energie $E_{photon} = hf$ zu erzeugen. Gemäß (1) muss also $eU \geq E_{ph} = E_{Bandkante}$ sein, damit die LED leuchtet. Für die Schwellenspannung U_S , bei der das Leuchten gerade einsetzt, gilt dann

$$hf = eU_S \quad . \quad (3)$$

Hinweise zur Versuchsdurchführung

Beobachtet man - möglichst im Dunkeln - beim langsamen Hochdrehen der Spannung den Einsatzzpunkt des Leuchtens, kann man aus der Schwellenspannung und der Wellenlänge die Plancksche Konstante h ermitteln. Aus (3) und (2) ergibt sich

$$\lambda = \frac{hc}{eU_S} \quad \text{bzw.} \quad h = \frac{\lambda e U_S}{c} \quad . \quad (4)$$

In der vorliegenden Bauform ist das "lange Anschlussbein" die Anode (der Pluspol). Der **maximal** zulässige Betriebsstrom beträgt bei allen LEDs 20mA.

Farbe	Peak-Wellenlänge	Material
rot	630 nm	AlGaInP)*
gelb	590 nm	AlGaInP)*
gelb-grün	574 nm	AlGaInP)*
grün	503 nm	InGaN
blau	428 nm und 466 nm	GaN/SiC

Bei den mit *) gekennzeichneten Halbleitermaterialien handelt es sich um Mischkristalle $Al_xGa_{1-x}In_yP_{1-y}$, bei denen durch Veränderung der Mischungsparameter x, y mit $0 \leq x \leq 1$ und $0 \leq y \leq 1$ (Aluminium sitzt im Kristall zum Teil auf Gallium-Plätzen und Phosphor zum Teil auf Indium-Plätzen) die Bandlückenenergie und damit die Farbe des Lichts entsprechend verändert wurde.

Aufgaben

1. Entwerfen Sie eine Schaltung, um die rote LED mit einer 12 V-Spannungsquelle betreiben zu können. Beachten Sie dabei, dass die Betriebsspannung der roten LED 2 V beträgt und der maximale Betriebsstrom 20 mA. Bauen Sie die Schaltung auf und messen Sie zur Kontrolle dabei den Betriebsstrom.
2. Bauen Sie folgende Schaltung (Abb. 3) auf und messen Sie für alle in der Tabelle aufgeführten LEDs die jeweilige Schwellenspannung U_S . Drehen Sie die Spannung mit dem 10-Gang Potentiometer jeweils langsam hoch und beobachten Sie dabei das Einsetzen der Lumineszenz der LED im Dunkeln durch das Papprohr.
3. Kühlen Sie die gelbe LED in flüssigem Stickstoff (Siedetemperatur: 77 K) ab (warten Sie ab, bis sich der flüssige Stickstoff "beruhigt"). Die LED bleibt dabei angeschlossen. **Setzen Sie unbedingt eine Schutzbrille auf.** Wenn die LED aufhört zu leuchten, erhöhen Sie langsam die Schwellenspannung U_S bis die LED wieder leuchtet. Bestimmen Sie die Schwellenspannung U_S der LED bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs. Beschreiben und erklären Sie Ihre Beobachtungen.
4. Berechnen Sie gemäß (4) jeweils aus den Schwellenspannungen und Wellenlängen der einzelnen LEDs das Plancksche Wirkungsquantum, bilden Sie einen Mittelwert oder führen Sie eine grafische Mittelung (grafische Darstellung U_S als Funktion der Frequenz f) durch. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert und diskutieren Sie mögliche Ursachen für Abweichungen.

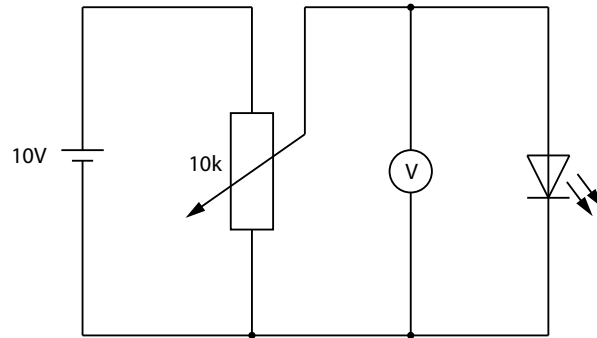


Abbildung 3: Schaltung zur Messung der Schwellenspannung von LEDs

5. Berechnen Sie mit dem von Ihnen bestimmten Planckschen Wirkungsquantum und der in Aufgabe 4 bestimmten Schwellenspannung die Wellenlänge des Lichts der auf 77 K abgekühlten gelben LED.