

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

Ziel des Versuches

In diesem Versuch werden Sie sich mit Light Emitting Diodes (LEDs) beschäftigen, diese richtig beschalten lernen, die Schwellenspannung 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 Lichtes
- 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.

Theoretischer Hintergrund

Eine Leuchtdiode, kurz LED 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 oder reduziert sich diese Randschicht (Sperrschicht). Diese nimmt in Sperrrichtung der Diode zu und in Durchlassrichtung ab. Bei der LED treibt das in Durchlassrichtung angelegte Feld Elektronen und Löcher, die teilweise an der Kathode bzw. Anode 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 so gut wie kein Strom (wenige μA) fließt, ist in Durchlassrichtung eine exponentielle Zunahme des Stromflusses ab einem bestimmten Spannungswert (U_S) zu beobachten. In Abbildung 1 ist die Kennlinie einer LED gezeigt.

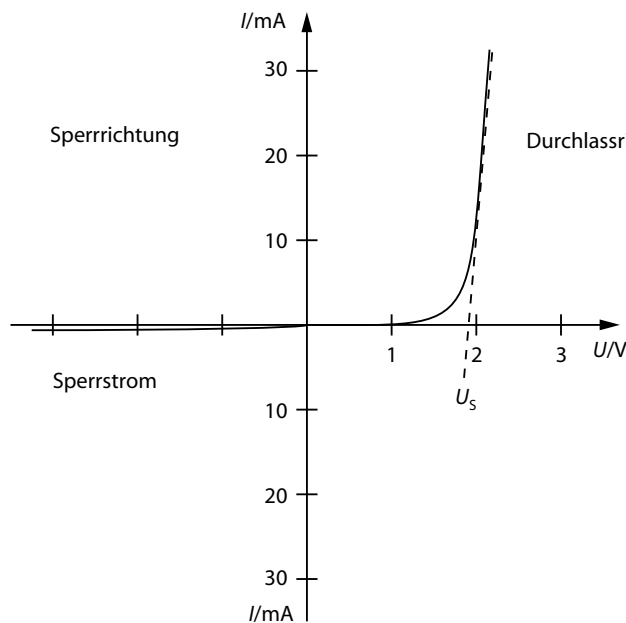


Abbildung 1: Kennlinie einer LED

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 mit der Frequenz f) frei wird (siehe Abb. 2). 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: $p_{\text{ph}} = E_{\text{ph}}/c = hf/c = h/\lambda$). 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, sodass bei der Rekombination eines Elektrons mit einem Loch kein Impuls erzeugt bzw. verbraucht werden muss.

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

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

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

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

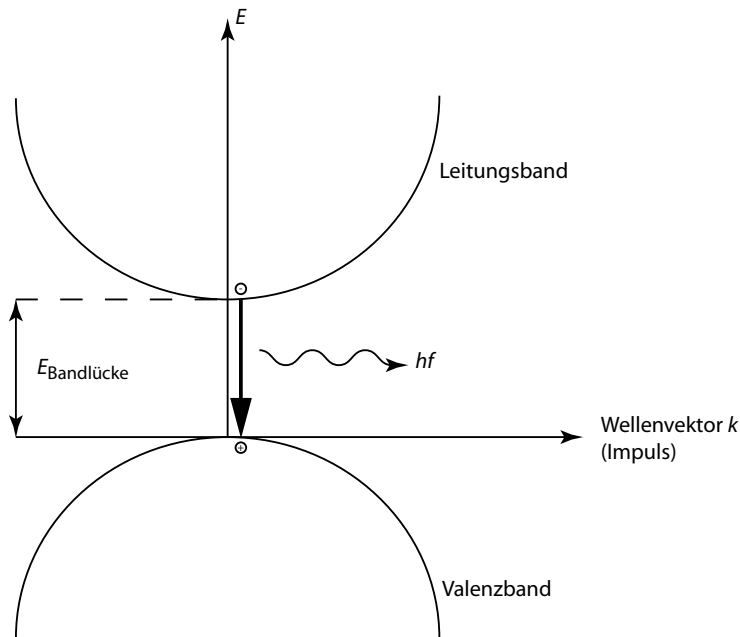


Abbildung 2: Rekombination eines Elektrons mit einem Loch unter Aussendung eines Photons (Darstellung im Impulsraum)

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 Lichtes beträgt wenige 10 nm.

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 Lichtes in den grünen bis roten Spektralbereich umsetzt, sodass insgesamt weißes Licht emittiert wird.

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 geringem Stromverbrauch und die Lebensdauer von bis zu 10^6 Stunden. Preiswerte Standard-LEDs werden gewöhnlich mit 20 mA betrieben, es sind aber auch so genannte „low-current-LEDs“ mit Betriebsströmen von weniger als 5 mA und Leistungs-LEDs mit Betriebsströmen bis zu mehreren 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. Den Spannungswert, bei dem der Strom in Durchlassrichtung merklich größer ist als der Sperrstrom, nennt man Schwellenspannung. Mit weiter steigender Spannung nimmt der Strom exponentiell und die Leuchtkraft stark zu. Die Schwellenspannung kann aus dem Schnittpunkt einer Tangente, die an den Kurvenverlauf der $I(U)$ -Kennlinie (Abb. 1) oberhalb des Knickpunktes angelegt wird, bestimmt werden. 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 sollte daher stets mit einem Vorwiderstand zur Strombegrenzung an eine Spannungsquelle angeschlossen werden oder mit einer Konstantstromquelle betrieben werden.

Die Lichterzeugung mittels Leuchtdioden könnte man als umgekehrten inneren photoelektrischen Effekt bezeichnen. Die Elektronen und Löcher rekombinieren am pn-Übergang, wobei die freiwerdende Energie als Photon ausgesendet wird. Auch hier gilt der Energiesatz: Man benötigt elektrische Energie $W_{\text{el}} = eU$, wobei U die an die LED angelegte Spannung ist, um ein Photon zu erzeugen. Gemäß (1) muss also $eU \geq E_{\text{ph}} = E_{\text{Bandkante}}$ sein, damit die LED leuchtet. Für die Spannung U_S , bei der das Leuchten gerade einsetzt, die im folgenden Sichtschiwellenspannung (U_{Sicht}) genannt wird, gilt dann

$$hf = eU_{\text{Sicht}} \quad . \quad (3)$$

Aufgabenstellung

1. Ermitteln Sie mit Hilfe des USB-Spektrometers die Wellenlängen der an Ihrem Versuchsplatz befindlichen LEDs.
2. Entwerfen Sie eine Schaltung, um die rote LED mit einer 12 V-Spannungsquelle betreiben zu können, und berechnen Sie den Vorwiderstand. Beachten Sie dabei, dass die Betriebsspannung der roten LED 2 V beträgt und der maximale Betriebsstrom 20 mA.
3. Bauen Sie folgende Schaltung (Abb. 3) auf und messen Sie für alle LEDs die jeweilige Sichtschiwellenspannung U_{Sicht} . Beginnend bei $U_{\text{LED}} = 0 \text{ V}$ ¹, drehen Sie dann die Spannung mit dem 10-Gang Potentiometer langsam hoch und beobachten Sie dabei das Einsetzen der Lumineszenz der LED im Dunkeln durch den Tubus.

¹ Überprüfen Sie diese Spannung vor Einbau der LED!

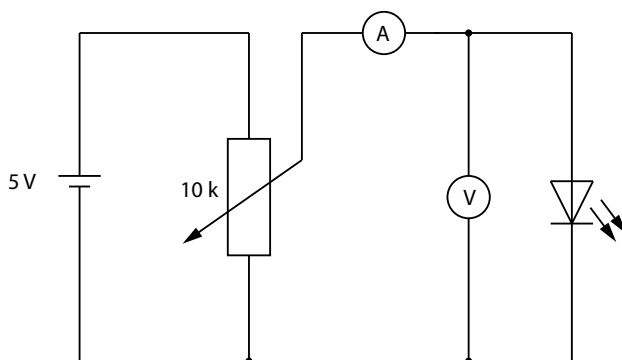


Abbildung 3: Schaltung zur Messung der Schwellenspannung von LEDs

Aus U_{Sicht} und λ kann h ermittelt werden.

Es ergibt sich aus (3) und (2):

$$\lambda = \frac{hc}{eU_{\text{Sicht}}} \quad \text{bzw.} \quad h = \frac{\lambda eU_{\text{Sicht}}}{c} \quad . \quad (4)$$

4. Wiederholen Sie Aufgabe 3 und messen Sie dabei kleinschrittig den Strom und die Spannung an der LED. Überschreiten Sie bitte nicht 20 mA. Stellen Sie die aufgenommenen Kennlinien grafisch dar und ermitteln Sie daraus grafisch die Schwellenspannung.

5. Berechnen Sie gemäß Gl. (4) jeweils aus den Sichtschwellenspannungen und Wellenlängen der einzelnen LEDs das plancksche Wirkungsquantum, bilden Sie einen Mittelwert oder führen Sie eine grafische Mittelung (grafische Darstellung U_{Sicht} als Funktion der Frequenz f) durch. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert und diskutieren Sie mögliche Ursachen für Abweichungen.
6. Wiederholen Sie Aufgabe 5 mit Ihren in Aufgabe 4 ermittelten Schwellenspannungen U_S .
7. Diskutieren Sie etwaige Abweichungen der beiden Messmethoden.