

Halbleitertechnologie von A bis Z

Optoelektronik & Photonik

Grundlagen der Optoelektronik	3
<i>Warum Optoelektronik?</i>	<i>3</i>
<i>Direkte vs. indirekte Bandlücke</i>	<i>3</i>
<i>Photonenenergie und Bandlücke</i>	<i>3</i>
<i>Materialsystem-Übersicht</i>	<i>4</i>
<i>Quanteneffizienz als Bewertungsgröße</i>	<i>5</i>

Grundlagen der Optoelektronik

Warum Optoelektronik?

Optoelektronische Bauelemente nutzen die Wechselwirkung zwischen Licht und Halbleitern in beide Richtungen: Bei der Emission wandeln LEDs und Laserdioden elektrische Energie in Photonen um, bei der Detektion wandeln Photodioden Licht zurück in elektrische Signale. Elektronen aus dem Leitungsband rekombinieren mit Löchern im Valenzband, die freiwerdende Energie wird als Photon abgestrahlt. Bei der Detektion läuft der Prozess umgekehrt – ein absorbiertes Photon hebt ein Elektron ins Leitungsband und erzeugt so ein Elektron-Loch-Paar, das als Photostrom messbar wird.

Diese drei Bauelementklassen – LED, Laserdiode, Photodiode – bilden zusammen die Grundlage praktisch jeder optischen Datenübertragung, vieler Sensorik-Anwendungen und der modernen Displaytechnik. Anders als bei den bisher behandelten Bauelementen (MOSFET, Bipolartransistor) steht hier nicht das Schalten von Strömen im Vordergrund, sondern die kontrollierte Wandlung zwischen elektrischer und optischer Energie.

Direkte vs. indirekte Bandlücke

Ob ein Halbleiter effizient Licht emittieren kann, entscheidet sich an der Bandstruktur im k -Raum, also der Auftragung der Energie über dem Kristallimpuls der Elektronen. Bei einem direkten Halbleiter wie GaAs liegen das Minimum des Leitungsbands und das Maximum des Valenzbands beim gleichen k -Wert. Ein Elektron kann beim Übergang ins Valenzband rekombinieren, ohne seinen Impuls ändern zu müssen – die Impulserhaltung übernimmt allein das emittierte Photon, dessen Impuls im Vergleich zum Elektronenimpuls vernachlässigbar klein ist.

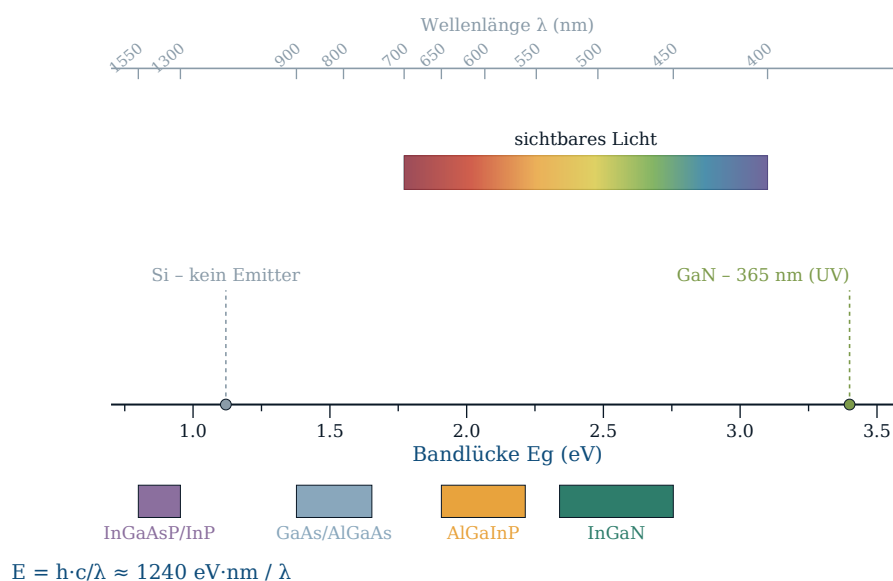
Bei einem indirekten Halbleiter wie Silicium liegen Leitungsband-Minimum und Valenzband-Maximum bei unterschiedlichen k -Werten. Die Rekombination erfordert zusätzlich ein Phonon, das die Impulsdifferenz aufnimmt oder liefert. Da ein Dreiteilchenprozess (Elektron, Loch, Phonon) erheblich unwahrscheinlicher ist als ein Zweiteilchenprozess, liegt die strahlende Rekombinationsrate in Silicium um mehrere Größenordnungen niedriger als in GaAs – die interne Quanteneffizienz liegt bei Si typischerweise im Bereich von 10^{-6} , bei GaAs nahe 1. Das ist der physikalische Kern, warum Si-LEDs praktisch nicht existieren und III-V-Verbindungshalbleiter für Lichtemission alternativlos sind.

Photonenenergie und Bandlücke

Die Wellenlänge des emittierten oder absorbierten Lichts hängt direkt von der Bandlücke ab: $E = h \cdot c / \lambda$. Für die Praxis hat sich eine Faustformel etabliert: $\lambda \text{ [nm]} \approx 1240 / E_g \text{ [eV]}$. Eine größere Bandlücke bedeutet kürzerwelliges, energiereicheres Licht. GaAs mit $E_g \approx 1,42 \text{ eV}$ emittiert bei rund 870 nm im nahen Infrarot, GaN mit $E_g \approx 3,4 \text{ eV}$ liegt bei etwa 365 nm im UV-Bereich.

Sichtbares Licht erfordert Bandlücken zwischen etwa 1,8 eV (rot) und 3,1 eV (violett) – ein Bereich, den kein binäres III-V-Material vollständig abdeckt. Erst durch Legierung, etwa InGaInP oder AlGaInP, lässt sich die Bandlücke kontinuierlich zwischen den Werten der binären Randverbindungen einstellen (Vegard-Regel als Näherung) und so gezielt auf die gewünschte Emissionswellenlänge trimmen, ohne das grundlegende Materialsystem zu wechseln.

Bandlücke und Emissionswellenlänge
Materialsysteme optoelektronischer Bauelemente im Überblick



Materialsystem-Übersicht

Jeder Wellenlängenbereich hat sein etabliertes Materialsystem, das sich an der jeweiligen Anwendung orientiert:

- InGaIn – blau bis grün (450–530 nm), Basis moderner weißer LEDs in Kombination mit gelbem Phosphor
- AlGaInP – rot bis gelb (560–650 nm), ergänzt InGaIn zur vollständigen RGB-Abdeckung

- GaAs / AlGaAs – nahes Infrarot (750-900 nm), Standardmaterial für einfache Laserdioden und IR-LEDs (Fernbedienungen, Näherungssensoren)
- InGaAsP / InP – Telekommunikationswellenlängen 1,3 μm und 1,55 μm , gewählt wegen der Dämpfungs- und Dispersionsminima von Quarzglasfasern in diesem Bereich
- Silicium / Germanium – kein Emitter, aber wichtige Photodetektor-Materialien im sichtbaren (Si) bzw. nahinfraroten Bereich (Ge), da Absorption anders als Emission keinen strahlenden Übergang benötigt und daher auch in indirekten Halbleitern effizient funktioniert

Diese Materialzuordnung zieht sich als roter Faden durch die folgenden Kapitel: Welches Material für LED, Laser oder Photodiode infrage kommt, ist im Kern immer eine Frage der Zielwellenlänge und der damit verknüpften Bandlücke.

Quanteneffizienz als Bewertungsgröße

Um Emitter und Detektoren später vergleichbar zu machen, lohnt sich an dieser Stelle eine Begriffsklärung. Die interne Quanteneffizienz beschreibt, welcher Anteil der injizierten Elektron-Loch-Paare tatsächlich strahlend rekombiniert, im Gegensatz zu nichtstrahlenden Verlustkanälen über Kristalldefekte oder Oberflächenzustände. Die externe Quanteneffizienz berücksichtigt zusätzlich, wie viele der intern erzeugten Photonen den Halbleiter tatsächlich verlassen, statt durch Totalreflexion oder Reabsorption im Bauelement verloren zu gehen.

Diese Unterscheidung wird im LED-Kapitel bei der Diskussion von Auskopplungseffizienz und Droop-Effekt wieder aufgegriffen und ist auch bei Photodioden zentral, dort als Responsivität ausgedrückt.