

Laserdiode

Elektronen nehmen im Halbleiter diskrete Energieniveaus an. Es existieren drei Varianten der Wechselwirkung zwischen Photonen und Elektronen:

- Absorption: Ein Photon der Strahlungsenergie $hf=E_2-E_1$ hebt ein Elektron aus einem niedrigeren Energiezustand E_1 auf ein höheres Energieniveau E_2 . Die Absorptionsrate ist proportional zur Anzahl N_1 der niedrigerenergetischen Atome sowie zur spektralen Energiedichte $u(f)$ des Strahlungsfeldes.

$$\dot{N}_{\text{Abs}} = B_{12} u(f) N_1$$

B_{12} Einsteinkoeffizient (Absorptionswahrscheinlichkeit)

- Spontane Emission: Nach einer mittleren Verweilzeit fällt das angeregte Elektron von der Energiestufe E_2 unter Aussendung eines Photons auf das niedrigere Niveau E_1 zurück. Die Rate der spontanen Emission ergibt sich aus der Beziehung

$$\dot{N}_{\text{s.Em}} = A_{21} N_2$$

A_{21} Einsteinkoeffizient (Wahrscheinlichkeit des spontanen Übergangs)

- Induzierte Emission: Ein Photon der Energie $hf=E_2-E_1$ stimuliert ein angeregtes Elektron unter Abstrahlung eines zweiten Photons zu einem Übergang von E_2 nach E_1 . Letzteres verstärkt das erstere phasengleich. Die Rate für die induzierte Emission folgt aus

$$\dot{N}_{\text{i.Em}} = B_{21} u(f) N_2$$

B_{21} Einsteinkoeffizient (Wahrscheinlichkeit der induzierten Emission)

Die Änderungsraten der Elektronenzahlen in den beiden, unterschiedlichen Energieniveaus sind gleich der Nettosumme von Absorptionsrate und Emissionsraten:

$$\dot{N}_2 = -\dot{N}_1 = -A_{21} N_2 + u(f) [B_{12} N_1 - B_{21} N_2]$$

Im stationären Zustand ergibt sich daraus für das Besetzungsverhältnis die Beziehung:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12} u(f)}{A_{21} + B_{21} u(f)}$$

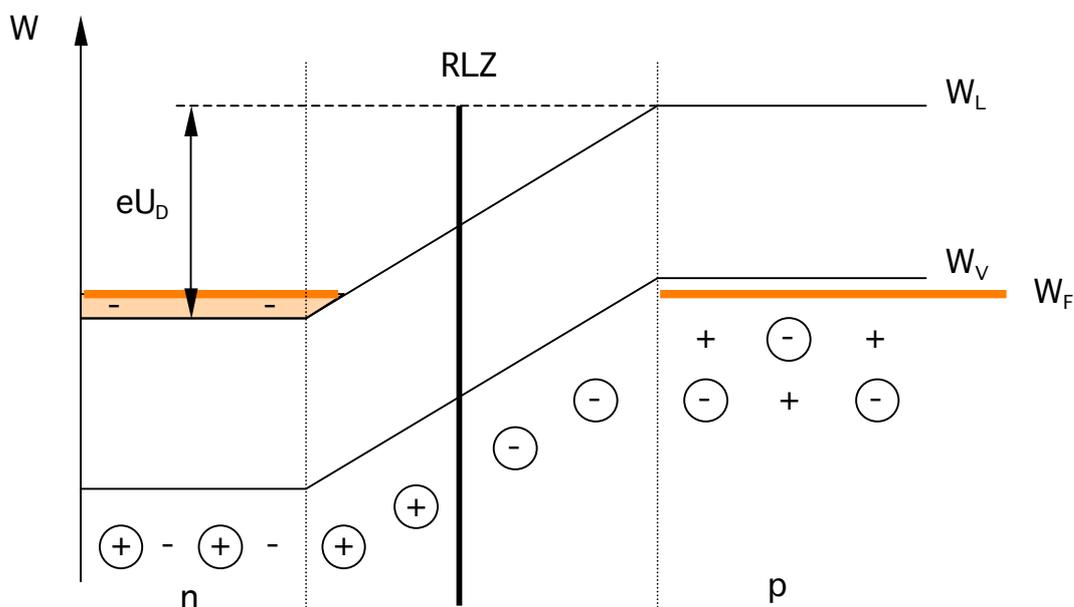
Beim Laser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) erfolgt Lichtverstärkung durch stimulierte Emission. Dazu muss eine Besetzungsinversion ($N_2/N_1 > 1$) aufgebaut werden.

Durch spontane Emission erzeugte Photonen wechselwirken mit einem angeregten Elektron und veranlassen die induzierte Emission eines weiteren phasengleichen Photons. Angeregte Elektronen fallen dabei in das tiefere Valenzband zurück. Primäres und sekundäres Photon stimulieren weitere Energieübergänge; Folge ist eine Photonenlawine. Da alle Photonen im Gegensatz zu Glühlicht phasengleich abstrahlen, entsteht eine Lichtwelle mit großer Kohärenzlänge:

Das von einer realen Lichtquelle emittierte Licht sendet keinen unendlich langen Wellenzug aus; nach Ablauf der Kohärenzzeit bricht der Wellenzug ab und wird durch einen neuen Wellenzug ersetzt, der stochastisch mit einer anderen Nullphase startet. Die in der Kohärenzzeit zurückgelegte Wegstrecke ist die Kohärenzlänge der Lichtquelle.

Interferometer, die mit Phasendifferenzen zwischen einem Mess- und einem Referenzpfad arbeiten, dürfen nur den Einfluss der zu bewertenden Wirkgröße erfassen. Dazu sind ausbalancierte Interferometer notwendig, deren Pfade optisch gleichlang sind; die Wellenzüge brechen am Detektor gleichzeitig ab und werden simultan von neuen Wellenzügen mit gleicher Startphase ersetzt. Andernfalls wären die Wellenzüge zeitlich gegeneinander versetzt; zufällige Phasensprünge führten dazu, dass sich innerhalb der Messzeit die Phasendifferenz mehrfach stochastisch ändert; die gemessene Intensität, die nicht anderes als ein Zeitmittelwert ist, würde verschmieren. Je größer der Balancefehler ist, um so weniger hebt sich der Interferenzterm vom Untergrund ab.

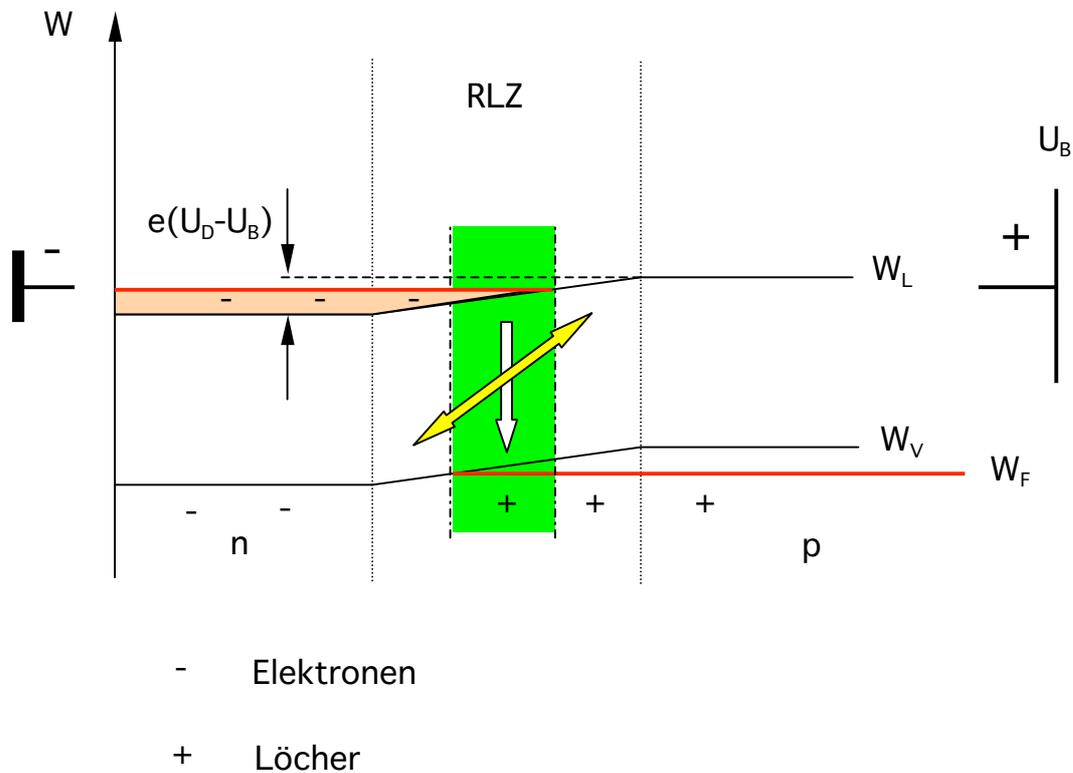
Die Laserdiode als praktische Umsetzung der beschriebenen Zusammenhänge basiert auf einem entarteten Halbleiter pn-Übergang, bei dem zu einen das gemeinsame Fermieniveau W_F im Leitungsband des n-Gebietes liegt und zum anderen durch das Valenzband des p-Bereichs verläuft. Dieser Zustand der Entartung wird durch hohe Dotierungen erreicht.



(-) Akzeptoren - Elektronen

(+) Donatoren + Löcher

Die Besetzungsinversion wird mit dem Auffüllen höherer Energieniveaus durch das Anlegen einer äußeren Spannung U_B in Flussrichtung erreicht.
 Die Breite der Raumladungszone am pn-Übergang wird dadurch ebenso wie die Potenzialstufe U_D der zugehörigen Raumladungszone verringert; die Fermieniveaus der freien Ladungsträger (Löcher, Elektronen) im p- bzw. im n-Gebiet sind nicht mehr identisch.

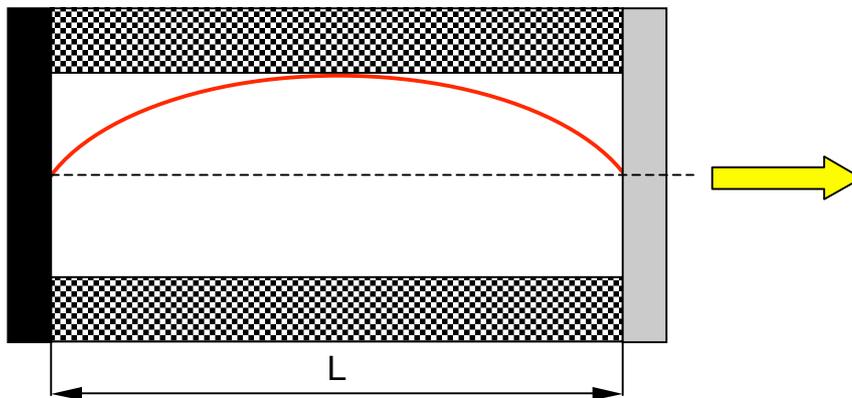


Innerhalb einer aktiven Zone ($0.1 - 3\mu\text{m}$) existiert ein Überlappungsbereich in dem besetzte Zustände des Leitbandes (Elektronen) leeren des Valenzbandes (Löchern) gegenüberstehen. Die Breite der aktiven Zone hängt von der äußeren Spannung U_B ab; induzierte Emission erfolgt erst oberhalb einer bestimmten Schwellspannung.

Die Rekombination freier Ladungsträger in dieser Zone führt zur Ausstrahlung von Photonen, welche wiederum über die induzierte Emission weitere angeregte Elektronen auf das niedrigere Energieniveau im Valenzband des p-Gebietes zurückfallen lassen.

Die Besetzungsinversion wird durch Energienachlieferung aus der äußeren Stromquelle ständig aufrecht erhalten; es ergibt sich ein stationärer Zustand.

Die Laserdiode sendet allerdings erst dann einen gerichteten Strahl aus, wenn der aktive pn-Übergang in einen optischen Resonator (Länge L) longitudinal eingebettet wird.



Die Rückkopplung im optischen Resonator führt zur Frequenzauslese. Nur die Lichtwellen in longitudinaler Richtung zwischen den Spiegeln können sich konstruktiv verstärken, alle anderen Photonen werden in die Umgebung abgestrahlt und nehmen nicht am Verstärkungsprozess teil. Die Bedingung für konstruktive Interferenz lautet:

$$L = i \frac{\lambda}{2n}$$

n Brechungsindex
 λ Lichtwellenlänge

Einer der Spiegel besitzt eine geringe Transmission, so dass ein Teil des induzierten Laserlichtes ausgekoppelt werden kann.

Neben Licht mit einer zentralen Wellenlänge werden auch benachbarte Moden ausgestrahlt, die allerdings eine geringere Intensität aufweisen. Der Abstand diskreter Resonanzwellenlängen lässt sich über die formale Differentiation der Resonanzbedingung aus folgenden Beziehungen abschätzen:

$$i \frac{d\lambda}{di} + \lambda = 2L \frac{dn}{d\lambda} \frac{d\lambda}{di} \quad \text{mit} \quad i = \frac{2Ln}{\lambda}$$

Zwei benachbarte Spektrallinien unterscheiden sich um die Modenzahldifferenz

$$di \approx \Delta i = 1$$

Der Abstand zwischen diesen diskreten Moden, deren Intensität mit zunehmender Distanz vom Zentrum deutlich abnimmt (s. Abb.), hat den Wert:

$$|\Delta\lambda| = \left| \frac{\lambda^2}{2L \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)} \right|$$

