

Optische Übergänge
 Absorptionsspektroskopie
 Schwingungsanalogie
 Quantenmechanischer Übergang
 Blochugel
 Spontane Emission
 Stimulierte Emission
 optischer Übergang im Halbleiter
 Ebene Welle (Maxwell)
 Dämpfung
 Verstärkung
 Einstein Koeffizienten
 Optik an Grenzflächen
 Reflexion & Transmission
 Dielektrischer Spiegel
 Einfall-/Ausfall-/Transmissionswinkel
 Totalreflexion
 Evaneszentes Feld
 Führen der Goos-Verschiebung
 Planarer Filmwellenleiter
 ↳ Raumwelle
 ↳ Substratwelle
 ↳ Filmwelle
 Confinement Factor
 Photolumineszenz
 Halbleiterlumineszenz
 Absorption & Emission vom HL (GaAs, ...)
 Anforderung LED
 Klassische Photolumineszenz Spektroskopie
 zeitaufgelöste Photolumineszenz (TCSPC)
 Streak Camera (TCSPC)
 Czerny Turner / Monodromator
 Strahlende Rekombination
 Auger Rekombination
 Störstellenrekombination [nicht strahlend] /
 Shockley-Read-Hall-Rekombination
 Strahlende Störstellenrekombination

Halbleitergrundgleichung
 interne Quanteneffizienz
 Halbleiterheterostrukturen
 Doppelheterostruktur
 Homostruktur (Homojunction)
 Ladungsträger flucht & festhalten
 Multiquantum Wells H&W
 Heterostrukturen ① - ③
 Epitaxie
 Homo- vs. Heterogene Epitaxie
 Durchstimmen
 Quantentäre Halbleiter
 AlGaInP
 InGaN
 Blue / Grüne / Rote LEDs
 Flüssigepitaxie
 Molekularstrahlepitaxie (mit Vor-Lamelleit)
 Reed-Verfahren
 MOVPE / MOCVD
 Aistron
 Halbleiterquantenstrukturen
 Potentialbarriere für Elektron/Proton
 Schrödingergleichung
 Zustandsdichte bei Halbleitern
 ↳ Form & Definition
 Konsequenzen der Quantisierung?
 Exzitonen
 OD-Fall Quantengrenzfall
 Stranicki-Kastranow-Wachstum
 Volmer-Weber Wachstum
 Frank-van der Merwe Wachstum
 Lithographie
 ↳ direkt, mit Abstand, Projektion Mask / Unifert
 Spin coating
 positiver & negativer Lack
 EUV-Lithographie
 binäre Maske / Elektronenstrahl-Lithographie
 Strahlungsfelder
 Reinräume
 Dünnschichtabscheidungen
 thermisches Verdampfen
 ↳ Elektronenstrahlverdampfen
 ↳ Sputtern
 ↳ Magnetron Sputtern
 ↳ Pulsed Laser deposition PLD
 ↳ Elektrokemische Abscheidung
 Lift Off
 Nasäten

Trockenätzen / Plasmaätzen
 Vergleich Nass- / Trockenätzen
 Packaging
 ideale Biondenkennlinie
 LED mit / ohne Vorspannung
 Emissionsspektren (Form)
 Linienbreite
 Quanteneffizienz (intern)
 Quantenausbeute
 Quanteneffizienz (extern)
 Das Auge als Detektor
 Strahlung vs. Lichtstrom
 Lichtausbeute
 Solide State Lighting
 Optische Verluste
 ↳ Fresnel
 ↳ Absorption
 ↳ Totalreflexion
 Vermeidung optischer Verluste
 ↳ Backside Mirror
 ↳ Epoxy Dome
 ↳ Oberflächengeometrie
 ↳ TIP
 ↳ Microstructured Surface /
 Texturierte Oberfläche
 ↳ Current spreading
 ↳ Photon recycling
 ↳ Thin Film LED
 ↳ Ceramic Technology
 ↳ Ux3: Chip technology
 Thermomanagement / Wärmegestaltung
 Temperatureinflüsse (optisch)
 blaue / rot / grün
 CRI
 Weiße LED [Anzahl 2/3/4 Farben]
 mögliche Farbkonverter
 Phosphorumwandlung [mit Spaltlinien]
 Thin GaN
 Chip Level Conversion (LL / conformal coating)
 ↳ Bondwire
 Klemmleiste / Inbetriebnahme LED
 DIMMBARKEIT
 LED Retrofit
 Exzitonen (optisch)
 ↳ Temperaturabhängiger Einfluss
 ↳ analoge Verstärkung
 ↳ Exzitonen in 2D
 ↳ Wannier Exziton
 ↳ Frenkel Exziton
 Emissionsspektren
 homogene Verbreiterung
 inhomogene Verbreiterung

Lasing Maser, Shize

LASER =

Lasergleichungen (A)

Lasergleichungen stationärer Fall

Laserbildung (B)

↳ Aussage über spontane Emission

↳ geometrische Folge

Halbleiterlaserdioden Aufbau

Furby Perot Laser / Kantenemitter

Doppelheterostruktur Laser

Halbleiterlaserdioden Ausgangs-

leistung & Ausgangsspektrum

VCSEL-Laser

DBR - Distributed Bragg Reflector

DFB - Distributed Feedback-Laser

Wellenlängenabstimmung

externe Wellenlängenabstimmung

Halbleiterlasergleichung

↳ bisschen schwerer als Laserleitung

Rekombination $R(N) =$

Normierte Verstärkung

Photonenzahl

Klein Signalsmodulation

CO₂-Laser

Nd:YAG-Laser

Strahlungsqualität

Faserlaser

Modulatoren (Einstellungselemente)

akustooptische Modulatoren

elektrooptische Modulatoren

↳ Pockels Effekt

↳ Kerr Effekt (elektrisch)

↳ Kerr Effekt (optisch)

Mach-Zehnder-Modulator

↳ Funktionsweise

↳ Aufbau

↳ Eigenschaft

Elektrooptische Lichtkuppeler

Flüssigkristallmodulator

Magnetooptische Modulatoren

↳ Prinzip

Faraday Isolator [optische Diode]

↳ Zeeman Effekt

↳ Stark Effekt

Elektroabsorptive Modulatoren

↳ Franz Keldysh Effekt

Quantum Confinement Stark Effekt

Kramers Stark Effekt

Burstein-Kern-Shift

Randkantenrenormierung (Lemmer Diplomarbeit)

YAG

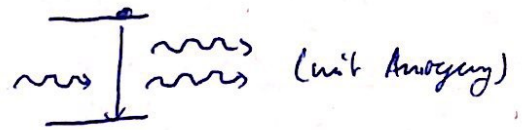
Spontane Emission

- Elektron fällt von einem Zustand in einen tiefer liegenden
- dabei oszillation $\rightarrow$ Aussendung von Licht



Stimulierte Emission

- Elektromagnetische Welle rüttelt an Elektron
- Elektron wird von einem Zustand in einen tieferen versetzt
- dabei oszillation $\rightarrow$ Aussendung von Licht



$\rightarrow$ zur Verstärkung von Licht.

- Vorteil: selbe Frequenz, selbe Phase, selbe Ausbreitungsrichtung $\rightarrow$ Grundlage Lasertätigkeit

Optischer Übergang im Halbleiter

- Optische Eigenschaften bestimmt durch optische Übergänge zwischen verschiedenen Bändern
- Übergänge erfolgen unter Impulserhaltung (K-Erhaltung)

Gewinne & Verluste

Ebene Welle Lösung der Maxwell Gleichung

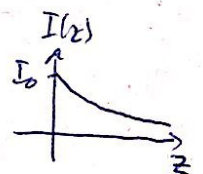
$$\vec{E}(x,y,z,t) = \vec{E}_0 e^{j(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

- $\rightarrow$ angenommen Welle propagiert in z-Richtung & ist in x-Richtung polarisiert
- im Medium mit Brechungsindex n

$$\vec{E}_x(x,y,z,t) = \vec{e}_x E_0 e^{j(\beta z - \omega t)} \quad \text{mit Propagationskonstante } \beta = \frac{2\pi n}{\lambda_0}$$

Dämpfung

- $\rightarrow$ der Intensität beim durchgang durch absorbierendes Medium
- $\rightarrow$ wird in Wellengleichung ebenfalls im Realteil im Exponenten berücksichtigt.

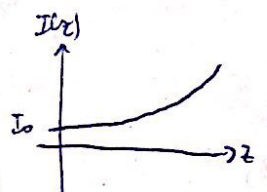


$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad \& \quad \vec{E}_x(x,y,z,t) = \vec{e}_x \cdot E_0 e^{j(\gamma z - \omega t)} \quad \text{mit } \gamma = \beta + j \frac{\alpha}{2}$$

$$\Gamma = j(\beta + j \frac{\alpha}{2})$$

Verstärkung

- $\rightarrow$ der Intensität beim Durchgang eines Verstärkenden Mediums
- $\rightarrow$ wird in Wellengleichung ebenfalls im Realteil im Exponenten berücksichtigt.

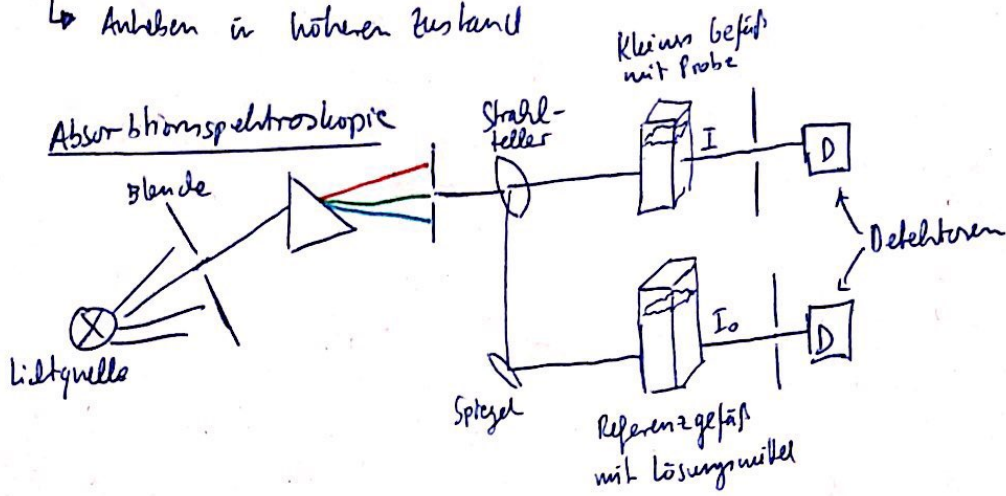


$$I(z) = I_0 \cdot e^{g z} \quad \& \quad \vec{E}_x(x,y,z,t) = \vec{e}_x E_0 \cdot e^{j(\gamma z - \omega t)} \quad \text{mit } \gamma = \beta - j \frac{g}{2}$$

Optoelektronik - II Optik in Halbleiterelementen

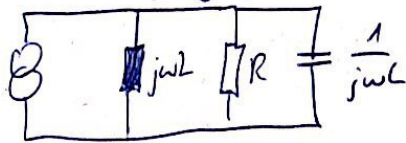
Optische Übergänge

- ↳ Elektromagnetische Welle (Licht) trifft an Elektron
 - ↳ Elektron nimmt Energie auf
 - ↳ Anheben in höheren Zustand
- } optischer Absorptionsprozess



Schwingkreisanalogie

- ↳ optischer Übergang verhält sich wie ein Schwingkreis mit Antenne



Quantenmechanischer Übergang

- Elektron in Blockzustand ψ_n → Einschalten von Störung H' → Blockzustand ist kein Eigenzustand mehr

→ H' induziert Übergänge zu anderen Quantenzuständen ψ_n

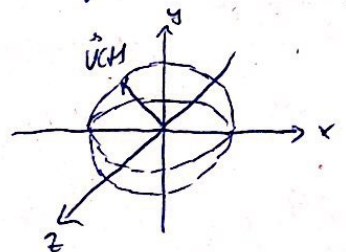
Es entsteht Rate für Übergänge von einem Zustand ψ_1 in Zustand ψ_2

$$W_{1 \rightarrow 2} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \int d^3r \psi_2^*(\vec{r}) H'(\vec{r}) \psi_1(\vec{r}) \right|^2 \delta(E_2 - E_1 \pm \hbar\omega)$$

Blattlauge

- ↳ charakterisiert vollständig den Quantenzustand eines mit einer elektromagnetischen Welle wechselwirkenden Elektrons. → stellt Zustand eines Zweizustandssystems dar.

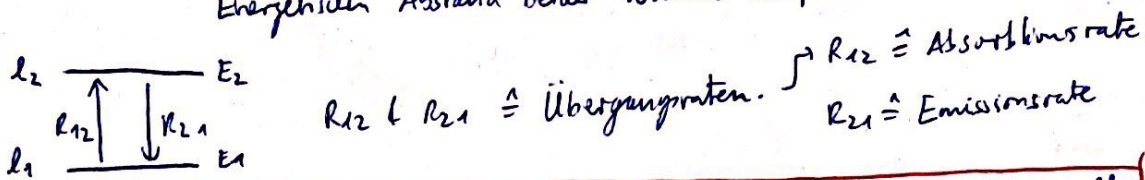
(Zweizustandssystem $\hat{=}$ $\uparrow \downarrow$)



Optoelektronik - II Optik in Halbleiterelementen

Einstein Koeffizienten

- zur Berechnung der spontanen & stimulierten Emission & zur Absorption
- Aussage: Optische Übergänge nur, wenn die Energie der Photonen exakt dem Energieabstand beider Niveaus entspricht.



mit $n_{ph}(E_{12}) \hat{=} \text{ Anzahl der Photonen im "passenden" Energieintervall}$

$$[R_{12} = B_{12} n_{ph}(E_{12})] \rightarrow B_{12} \hat{=} 1. \text{ Einsteinkoeffizient.}$$

- Absorption findet nur statt wenn E_2 unbesetzt & E_1 besetzt $\Rightarrow$ Pauli-Prinzip
- ~~Reinabsorption~~ somit gilt laut Pauliprinzip mit der Besetzungsfunktion $f(E)$

$$R_{12} = B_{12} f(E_1) [1 - f(E_2)] n_{ph}(E_{12})$$

$$R_{21,stim} = B_{21} f(E_2) [1 - f(E_1)] n_{ph}(E_{12})$$

$$R_{21,spont} = A_{21} f(E_2) [1 - f(E_1)]$$

im thermischen Gleichgewicht: $R_{12} = R_{21,stim} + R_{21,spont}$

analog folgen

mit $B_{21} \hat{=} 2. \text{ Einsteinkoeffizient}$

$A_{21} \hat{=} 3. \text{ Einsteinkoeffizient}$

- Besetzung der elektronischen Niveaus nach Fermi-Dirac $\sim f(E_i) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_i - E_F}{k_B T}}}$

- Berechnung Anzahl Photonen passend $\rightarrow n_{ph}$

① Bose-Einstein Verteilung $n_{BE}(E, T) = \frac{1}{e^{\frac{E}{k_B T}} - 1}$

② #Photonen bei bestimmter Energie über Zustandsdichte $g_{ph}(E) = \frac{8\pi n^3 E^2}{h^3 c^3}$

$$n_{ph}(E_{12}, T) = g_{ph}(E_{12}) \cdot n_{BE}(E_{12}, T)$$

- nach Einsetzen von ① & ② in $R_{12} = R_{21,stim} + R_{21,spont}$ erhält man:

$B_{12} = B_{21} \rightarrow \text{Absorption \& Emission (stimuliert) erfolgen mit gleicher Rate}$
Große Absorption $\Leftrightarrow$ Große stimulierte Emission

• für den 3. Einsteinkoeffizienten gilt:

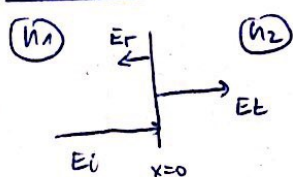
$$A_{21} = g_{ph}(E_{12}) \cdot B_{12} = g_{ph}(E_{21}) \cdot B_{21}$$

es folgt: spontane Emission, stimulierte Emission & Absorption sind proportional zueinander

$$\hookrightarrow A_{21} \sim B_{12} \simeq B_{21}$$

Optik an Grenzflächen

• senkrechter Einfall einer ebenen Welle auf Grenzfläche



$$\frac{E_t}{E_{i,x=0}} = t = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$$

$$\frac{E_r}{E_{i,x=0}} = r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

← Verhältnis der E-Felder

• Intensität

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 \quad T = \frac{n_2}{n_1} \left| \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \right|^2$$

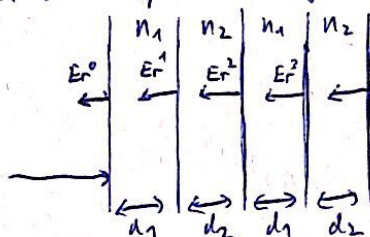
→ hohe Reflexion bei hohem Brechungsunterschied

↳ Verhältnis der Intensität: $I \sim E^2$

• Dielektrischer Spiegel

↳ erhöhen der Reflexion durch phasenrichtiges Hintereinanderschichten von Grenzflächen

für $n_2 > n_1$:



für konstruktive Interferenz

$$d_2 = \frac{\lambda_0}{4n_2}$$

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1}$$

↳ Einsatz als dielektrische Spiegelschichten z.B. in Laser (DFB-Laser)

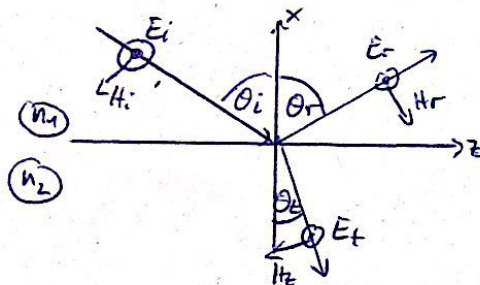
• Planarer Wellenleiter

• Senkrechter Einfall an Grenzfläche (wie FWH)

es muss: $n_1 \sin(\theta_i) = n_1 \sin(\theta_r) = n_2 \sin(\theta_t)$

$$\hookrightarrow \theta_i = \theta_r \quad (\text{Reflexion})$$

$$\hookrightarrow n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (\text{Brechung})$$



• Totalreflexion

→ gesamte Intensität wird an der „Grenzfläche“ reflektiert jedoch mit Phasenverschiebung

→ $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$, falls $\theta_i = 90^\circ \rightarrow \theta_{\text{total}} = \sin^{-1}(\frac{n_2}{n_1})$ → geht nur von optisch dünner in optisch dichter

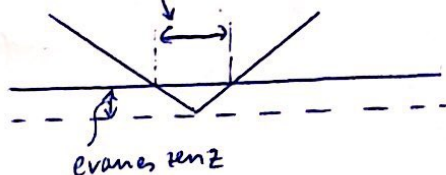
→ Winkel der Phasenverschiebung: $\tan \phi = \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}}{n_1 \cos \theta_i}$

Optoelektronik - II Optik in Halbleiterbauelementen

zu Totalreflexion

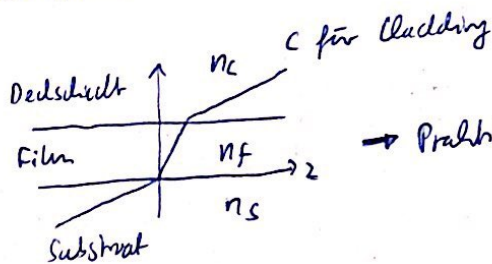
- Evaneszentes Feld → Welle dringt in Material ein in dem sie sich nicht ausbreiten kann und klingt dort exponentiell ab. Folgerung:

- Goos-Hänchen-Verschiebung → longitudinaler Versatz einer einfallenden Welle



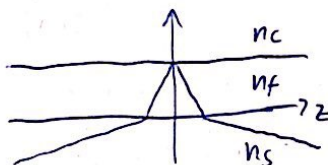
Planarer Filmwellenleiter

a) Raumwelle:

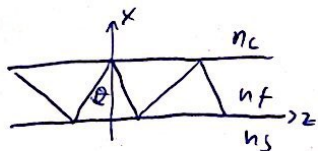


→ Praktisch für LED

b) Substratwelle:



c) Filmwelle



→ für Laser (Glasfaser!...)

- geführte Filmwelle, falls

$$\sin \theta > \frac{n_c}{n_f} \quad \sin \theta > \frac{n_s}{n_f} \quad \text{mit } n_f > n_s > n_c$$

Substratwelle, falls $\frac{n_c}{n_f} < \sin \theta < \frac{n_s}{n_f}$, Raumwelle, falls $\sin \theta < \frac{n_c}{n_f} \leq \frac{n_s}{n_f}$

- bei Filmwelle → in x-Richtung stehende Welle & in z-Richtung Ausbreitung.

→ nur diskrete Lösungen für θ

→ symmetrische Wellenleiter immer Lösung, asymmetrische Wellenleiter müssen nicht!

↳ „cut-off“ Frequenzen

Füllfaktor / Confinement Faktor

↳ (optische Verstärkung im HL-Material) • (Füllfaktor) = (optische Verstärkung geführte Wellenmode)

geht • $\Gamma_{\text{akt}} = g_{\text{mod}}$ mit $g_{\text{akt}} = -\alpha(E)$ mit $\alpha =$ Verstärkungsfaktor Material

$$\Gamma_{\text{akt}} = \frac{\int_0^d |E(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 dx}$$

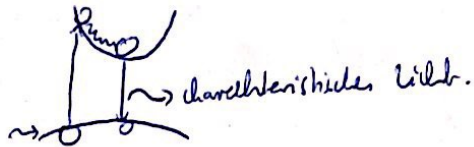
Füllfaktor $\rightarrow$ ein Teil des Feldes im Kabel, ein Teil des Feldes außerhalb des
Kabels $\rightarrow$ mittels Füllfaktor berechnen welcher „Verstärkungsfaktor“ im Leiter
& welcher außerhalb. oben integrieren über in Wellenleiter unten integrieren
über allen.

Optoelektronik - III Herstellungstechnologien

• Photolumineszenz

① optische Anregung $\rightarrow$ erzeugen elektronen Loch-Paar $\rightarrow$ ② Elektron (Loch) relaxiert zu Bandenminimum (-maximum)

$\rightarrow$ ③ Elektron fällt zurück in Valenzband (rekombiniert mit Loch) $\rightarrow$ Erzeugung von charakteristischem Licht



• Halbleiterlumineszenz

- $\rightarrow$ Ausnutzen der Bandlücke $\rightarrow$ emittierte Photonen haben ungefähr Energie der Bandlücke
- $\rightarrow$ Stärke & Dynamik der Emission durch Übergangsraten & Besetzungsfunktion für Elektronen & Löcher bestimmt $\rightarrow$ kann man designen

• Absorption & Emission von Halbleitern

	GaP	GaAs	InP	InAs	InSb
λ_g	446nm	871nm	925nm	3,44 μ m	6,89 μ m

• Anforderung an LED's

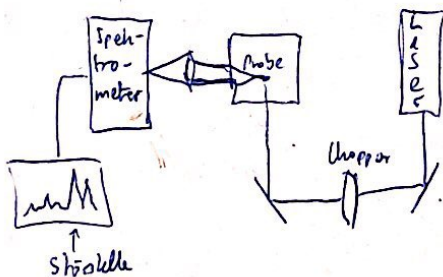
$\rightarrow$ direkte Bandlücke, wenig nichtstrahlende Übergänge, möglichst kostengünstig

• Rekombinationsprozesse in LED's

$\rightarrow$ strahlende & nicht strahlende Prozesse. Zur Vermeidung nicht strahlender Prozesse:

$\rightarrow$ Vermeidung nicht strahlender Prozesse $\rightarrow$ nutzen sehr defektfreier ($\hat{=}$ kristalliner) Schichten

• Klassische Photolumineszenz Spektroskopie

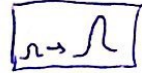


• Zeitaufgelöste Photolumineszenz Spektroskopie / Streak Camera / TCSPC

$\rightarrow$ ähnlich wie bei klassischer PL nur mit Streak Camera ~~oder~~ hohes Spektrometer

• Streak-Camera [Optisches Oszilloskop] $\rightarrow$ auch Photomultiplier

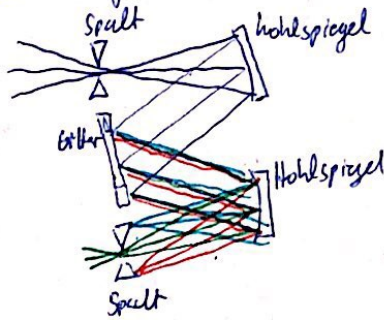
$\rightarrow$ Photon löst Elektron aus, dieses beschleunigt wie in Braunscher Röhre & löst am Ende viele Photonen aus. diese werden dann auf Phosphor schirm aufgetragen.
 $\rightarrow$ ermöglicht Impulse im femtosekundenbereich zu detektieren



• LZerny Turner / Monochromator

$\rightarrow$ optisches Gerät zur spektralen Isolierung einer bestimmten Wellenlänge aus einer einfallenden Menge elektromagnetischer Strahlung.

Aufbau:



• zeitkorreliertes Einzelphotonen zählen TCSPC

$\rightarrow$ zur Messung von sich zeitlich schnell ändernder Lichtintensitäten
 $\rightarrow$ also meistens zur Messung der Fluoreszenzlebensdauer, d.h. die mittlere Zeit, die ein Molekül in einem angeregten Zustand ist.

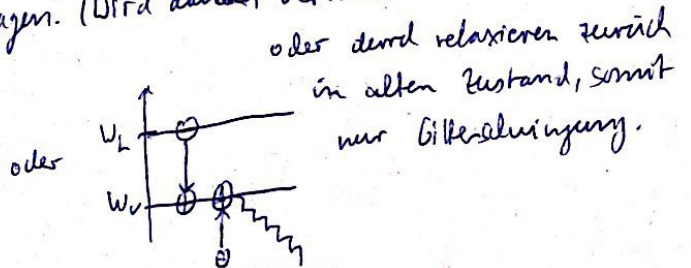
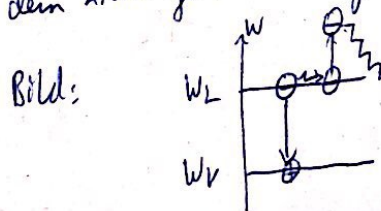
• Strahlende Rekombination: Elektron geht unter Lichtaussendung vom Leitungsband auf einen unbesetzten Platz (Loch) im Valenzband.

$\rightarrow$ Was ist R_{rad} ? $\rightarrow R_{rad} \hat{=}$ strahlende Rekombinationsrate

$\rightarrow$ mikroskopisch: $R_{rad} = \int_{E_g}^{\infty} b_{cv}(h\nu) f_c(E_c) f_v(E_v) d(h\nu)$ & makroskopisch $R_{rad} = A \cdot p \cdot n$

$n \hat{=}$ Elektronen dichte
 $p \hat{=}$ Lochdichte
 $A \hat{=}$ Rekombinationskoeffizient.

• Auger Rekombination: $\rightarrow$ nicht strahlend. Elektron fällt von Leitungsband in Valenzband & gibt Energie an Nachbar elektron im Leitungsband. Dieses wird dann z.B. aus dem Atom gestößt/herausgeschlagen. (Wird danach vermutlich wieder eingefangen, oder durch relaxieren zurück in alten Zustand, somit nur Gitterschwingung).



$$R_{Auger} = B \cdot n^2 \cdot p$$

Optoelektronik - III Herstellungstechnologien

• Störstellenrekombination (~~Störstellen~~) (nicht strahlend) // Shockley-Read-Hall-Rekombination

→ Störstelle $\hat{=}$ fehlendes Atom oder Substitutionsatom in (hochreinem) Kristall

→ Elektron & Loch werden in dieselbe Störstelle eingefangen

① Elektron springt auf Rekombinationsniveau, das Mitten der Bandlücke ist.

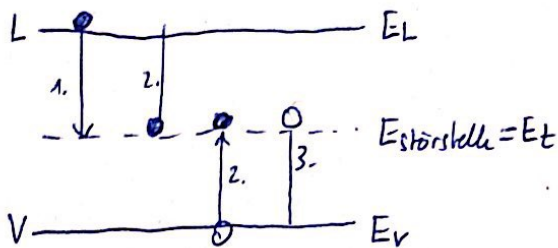
② Rekombiniert von dort mit 2. Sprung mit Loch

③ Energie wird in Form von Gitterschwingungen freigegeben.

→ Energieniveaus in der Mitte entstehen durch Störstellen wie Dotieratome.

↳ hängt also stark von Dotierung ab.

Bild:



$$R_{\text{Stör}} = n \cdot N_t \cdot \sigma \cdot v_{\text{th}}$$

→ $N_t \hat{=}$ Dichte Störstellen

→ $\sigma \hat{=}$ Einfangsquerschnitt

→ $v_{\text{th}} \hat{=}$ thermische Geschwindigkeit

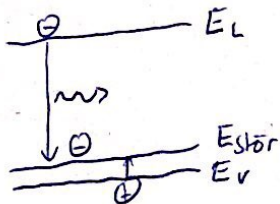
$E_t \rightarrow$ traps $\hat{=}$ isolierende Störstelle

↳ Gitterfehler in einem Kristall, bei dem ein Atom durch ein anderes ersetzt ist, das die gleiche Elektronenstruktur der Valenzschale hat.

• Strahlende Störstellenrekombination

↳ hat durch Wachstum an neuen Materialien an Bedeutung verloren.

↳ ähnlich zur nichtstrahlenden Störstellenrekombination. Störstellenniveau liegt hier nur näher an einem Band, sodass "großer Sprung" Photon emittiert.



• Halbleitergrundgleichungen

$$\frac{\partial n(\vec{r}, t)}{\partial t} = -(R_{\text{rad}} + R_{\text{nonrad}})$$

mit $R_{\text{rad}}(n) \cdot n = A \cdot n(\vec{r}, t) \cdot p(\vec{r}, t)$ & $R_{\text{nonrad}} = R_{\text{Auger}} + R_{\text{Stör}} + \dots$

$n \hat{=}$ Elektronendichte, $A \hat{=}$ Rekombinationskoeffizient

$R_{\text{rad}} \hat{=}$ Strahlende Rekombinationsrate $R_{\text{nonrad}} \hat{=}$ nichtstrahlende Rekombinationsrate

$$R_{\text{ges}} = R_{\text{rad}} + R_{\text{nonrad}}$$

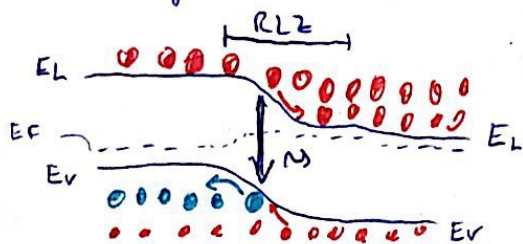
interne Quanteneffizienz: $\eta_{\text{int}} = \frac{R_{\text{rad}}}{R_{\text{rad}} + R_{\text{nonrad}}}$

Wie viele von allen Rekombinationsprozessen sind Strahlend $\rightarrow$ ist dichten abhängig, nicht konstant.

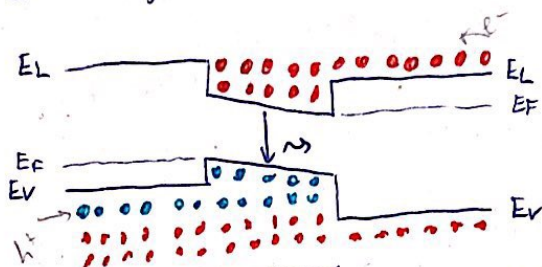
Halbleiter - Heterostrukturen

- ↳ Grenzschicht zwischen zwei unterschiedlichen Halbleitermaterialien
- ↳ anders als bei Dohierung hier sogar Materialart unterschiedlich (→ effizientere Rekombination)

- ① Doppelheterostrukturen → sorgt für geringere Bandlücke (in RLZ)
- ② Homojunction (unter konstanter Eingangsseitig angelegter Spannung)



- ② Heterojunction (unter konstanter Eingangsseitig angelegter Spannung)



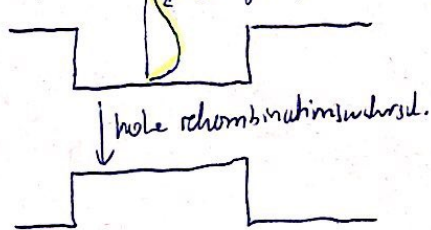
Vorteil: erhöhte Ladungsträger dichte & erhöhte Strahlungs Rekombination im Bereich der Barren
niedrigen Bandlücke

• Ladungsträger flucht & festhalten

- Ladungsträger müssen eingespart werden um Rekombinationswahrscheinlichkeit zu erhöhen.

↳ dies geht gut in Doppelheterostrukturen

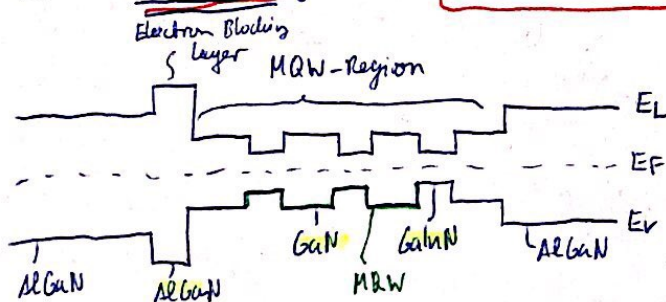
↳ Ladungsträgerverteilung → groß in der Gap



↑ aufgetropft oder gestreut! ← wenn schichten sein

- Weitere Verbesserung durch

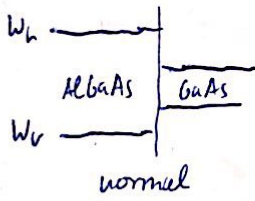
Multiquantum-Wellen, d.h. mehrere endliche Potentialtöpfe in Gap



Optoelektronik - III ~~Herstellung~~ Herstellungstechnologien

Heterostrukturen Typ I - III → für die Wirkungsweise des Bauelements ist die Abfolge der Energieniveaus entscheidend.

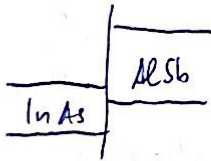
• Typ I



→ hohe Rekombinationswahrscheinlichkeit, gut für LED's
↳ z.B. Fernbedienungs-Infrarot

• Typ II

→ gut für Dissoziation von e-h-Paaren → z.B. gut in Photodiode (nicht weiter laufende LED)
eine Art Kondensator
z.B. keine Fragen



• Typ III



→ Super tunnel diode → keine. Wichtige Anwendung.
↳ direkt vom einen Leitungsband ins nächste Valenzband.

Epitaxie → Form der Kristallwachstums, welche beim Aufwachsen von Kristallen auf kristallinen Substraten auftritt.

→ Wachstum erfolgt auf kristallinen Substraten

→ Wachstum erfolgt in dünnen Schichten als hochkristalline Struktur auf Substraten (Lagen)

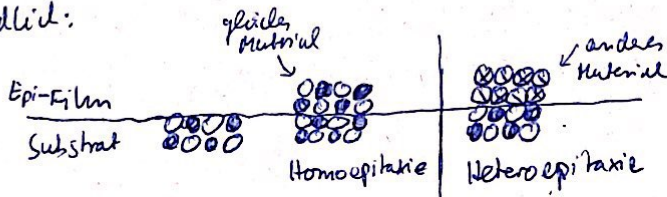
→ Epitaxie ≙ „darauf anordnen“

Vorteile: • geringe Defektdichte

• Heterostrukturen möglich
↳ z.B. 3-5-Halbleiter

• laterale Strukturierung möglich, d.h. seitliches Wachstum.

Bildlich:



→ Wichtig bei Heteroverbindungen:

↳ passende Materialgruppen müssen übereinander liegen, d.h. andere Bandlücke ist o.k. aber andere Wellenlänge nicht erlaubt. → Gitterkonstante muss ungefähr identisch sein. (Gitterkonstanten λ)

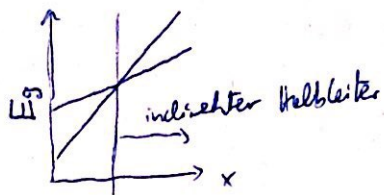
Wichtige Materialsysteme

AlGaAs GaInAsP
GaInAs AlGaInP

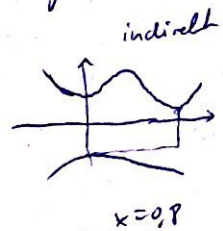
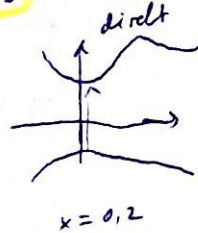
• Durchstimmen

↳ Geeignete Halbleiter erlauben das Durchstimmen der Bandlücke bei gleich bleibender Gitterkonstante, d.h. es ist möglich durch Variation der Materialmenge einen indirekten einen direkten Halbleiter zu machen.

→ $E_g = a + bx \rightarrow x = \frac{E_g - a}{b}$ & $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ist die richtige Verbindung.



z.B.



• quantitative Halbleiter

↳ Halbleiter aus 4 Materialien z.B. AlGaInP → hervorragende für hohe Helligkeits LED

↳ Besonderheit: $\rightarrow$ zwei Freiheitsgrade

① HQW

② Durchstimmen.

• AlGaInP

↳ rot/orangene Hochleistungs LED

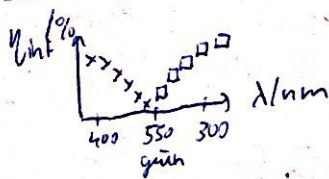
↳ interne Quanteneffizienz $\eta_{\text{int}} = 90\%$

↳ 640-760 nm

• Blaue / Grüne / Rote LED's

→ haben unterschiedliche Aufbauart. Kritisch: "Green Gap" → gibt kaum Stoffe die geeignet sind

↳ schwer Grüne LED herzustellen.



• InGaN

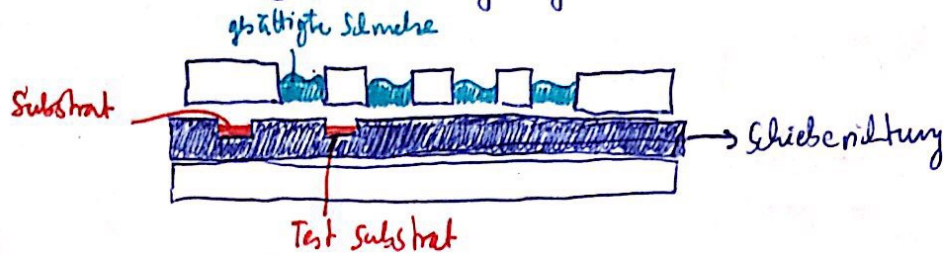
↳ blaue LED

↳ 450-500 nm

Optoelektronik (III) - Herstellungstechniken

• Flüssigepitaxie - Liquid Phase Epitaxy, LPE

- Ablauf:
- ① Substrat wird an gesättigter Schmelze vorbeigeführt
 - ② Abscheidung auf kühlerem Substrat



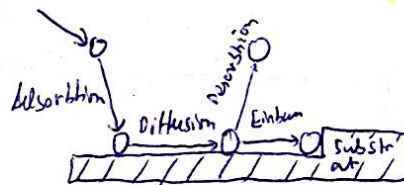
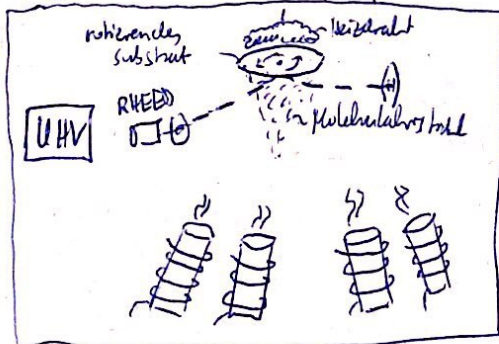
→ Vorteil: - schnelles Wachstum, kostengünstig, gute Reinheit [sehr wirtschaftlich]

- Nachteil:
- keine präzise Schichtdickenkontrolle ($> 10 \text{ nm}$)
 - hohe Temperatur erforderlich
 - keine scharfen Übergänge (> 50 Atomlagen)
 - Komponenten müssen Schmelz- & löslich sein

→ aufgrund vieler Nachteile eher ungewöhnliches Verfahren [kaum Anwendung]

• Molekularstrahlepitaxie - Molecular Beam Epitaxy [MBE]

- Ablauf:
- ① alles findet im UHV [Ultra Hochvakuum statt] - 10^{-10} mbar
 - ② Stoffe aus denen Schicht bestehen soll in Evaporationsziegeln erhitzen & verdampfen
 - ③ gerichteter Molekularstrahl steigt als Dampf auf
 - ④ Adsorption auf erhitztem ($600^\circ - 700^\circ$) & rotierendem Substrat [Schichtwachstum]
 - ⑤ zusätzlich Diffusion & Desorption
 - ⑥ mittels RHEED Verfahren kann Glattheit geprüft werden



↳ RHEED - Verfahren [Reflection high energy electron diffraction]

- ↳ Identisch: Beugung hochenergetischer Elektronen bei Reflexion
- zur Analyse von glatten Materialoberflächen
- Elektronen im keV Bereich auf Substrat schießen & reflektierte Beugung auf Schirm auswerten

• Vorteile MBE:

- niedrige Wachstumstemperaturen
- sehr dünne Schichten möglich
- sehr scharfe Übergänge [Monolagen]
- vor Ort Kontrolle mit RHEED

• Nachteile MBE:

- aufwendige Vakuumtechnik
- sehr geringer Durchsatz

• Anwendung: ① in Forschung & ② zur Herstellung von Halbleiter Laserdioden

• Metallorganische Gasphasen Epitaxie (MOVPE)

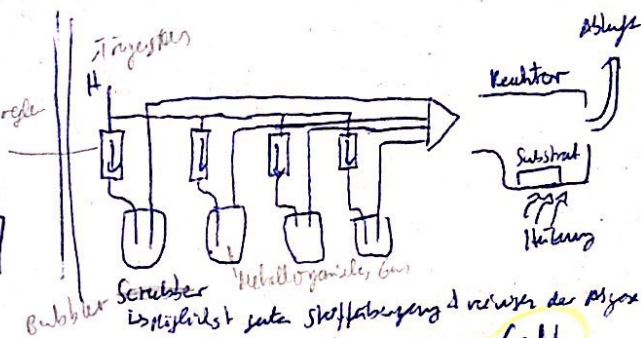
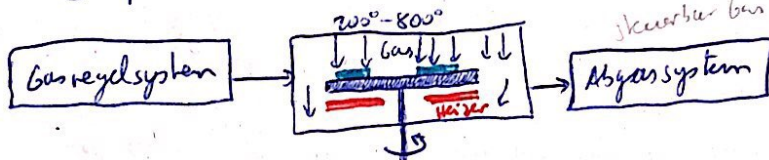
↳ Morpe $\hat{=}$ Metall organic ^{vapor} phase epitaxy

macht das Verfahren aus

• Ablauf: ① zum einfachen Transport die Precursor (Vorläufer)-Moleküle mit Trägergas zum geheizten Substrat transportieren

② thermische Zersetzung auf dem Substrat

③ epitaktisches Wachstum



• Anwendung: - Bedeutendstes Herstellungsverfahren für III-V Halbleiter, insbesondere GaN

• Vorteile: → sehr flexibel, sehr breites Spektrum an Verbindungen
→ sehr dünne Schichten, scharfe Übergänge
→ Produktion im Großmaßstab möglich [da geringes Vakuum]

• Nachteile: → teure, z.T. gefährliche Quellen [als Präkursor Materialien]

• weitere Anwendung: → Bauelemente mit geringen Schichtdicken, präzisen Grenzflächen, verschiedenen Polierungen
→ dominante Form der Herstellung von Halbleiterheterostrukturen
→ für Leuchtdioden, Halbleiterlaser, Solarzellen

• Metallorganisch chemische Gasphasenepitaxie (MOCVD)

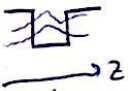
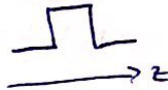
↳ metall organic chemical vapor deposition

→ Oberbegriff für alle Verfahren wie MOVPE (also mit Präkursor)

• Aixtron

↳ Weltmarktführer bei Epitaxieanlagen

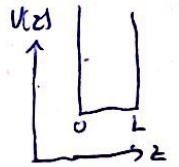
Halbleiterquantenstrukturen

Potentialbarrieren: für Elektron  & für Proton 

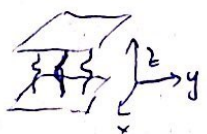
- kleine Strukturen → Quantenmechanik
- keine freie Bewegung in z-Richtung, stattdessen lokalisierte Wellenfunktion wie in Atomphysik
- Potentialtopf & Schrödinger Gleichung

$$\text{SGL: } -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} + V(z) \psi(z) = E \psi(z)$$

Lösungen für Barrieren $\rightarrow \infty$ $\psi_n(z) = A \sin\left(\frac{n\pi z}{L_z}\right)$ & $E_n = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n\pi}{L_z}\right)^2$



→ Wichtig: Blochwellen kann sich frei in x,y-Richtung ausbreiten, nur in z-Richtung stehende Wellen

 auch: $\psi_{\text{Bloch}}(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{V}} \underbrace{u(x,y)}_{\text{Blochansatz}} e^{ik_x x} e^{ik_y y} \psi_n(z)$

Zustandsdichte bei Halbleitern verschiedener Dimensionen

• Zustandsdichte: Gibt an wie viele erlaubte Zustände in einem System in einem infinitesimalen Gebiet zwischen w und $w+\Delta w$ auftreten

• Berechnungsvorgehen: ① Volumen / Fläche / ... eines Zustandes

② $|k|^2$ aufstellen $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = |k|^2$ mit $k_x = \frac{2\pi}{L}$

③ $|k|^2$ in Dispersionsrelation einsetzen & $|k|^2$ nach $|k|^2$ umformen

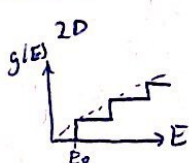
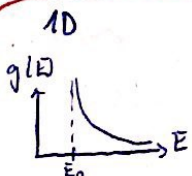
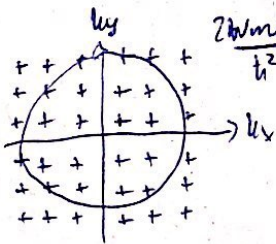
$$W = \frac{\hbar^2 |k|^2}{2m_{\text{eff}}} = \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)}{2m_{\text{eff}}} \rightarrow k^2 = \frac{2m_{\text{eff}} W}{\hbar^2}$$

④ Zustandsdichte dichte mit Energie kleiner w berechnen

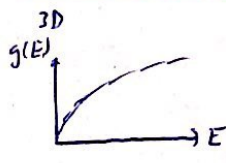
$$N(w) = 2 \frac{V_{\text{Kugel}}}{V_{\text{Zustand}}} \quad \text{mit } V_{\text{Kugel}} = \frac{4\pi}{3} k^2$$

⑤ Energiedichte $D(w) = \frac{dN(w)}{dw}$

$$\textcircled{6} \text{ Zustandsdichte } g(w) = \frac{D(w)}{V} = \frac{D(w)}{L^3}$$



$$g(E) = \frac{m_{\text{eff}}}{\pi \hbar^2}$$



$$g(E) = \frac{(2m_{\text{eff}})^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E}$$

Frage: Warum in 2D Zustandsdichte anfangs zu Null & wie schnell?

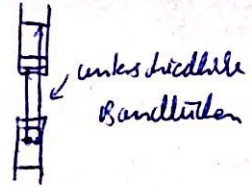
→ steigt ja, aber nur in eine Richtung, in die freien Richtungen wächst die Energie bei anstieg von Modensprung.

• Konsequenz der Quantisierung

?

- Verschieben der Bandlücken zu höheren Energien

↳ Veränderte Absorptions- & Emissionsspektren. Emissionsdesign möglich

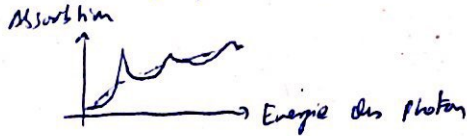


• Exzitonen

- Sorgen dafür, dass Zustands dicht doch nicht kugelförmiges aussehen

- gebundenes Lochpaar in Halbleiter → transportiert Ladungsträgerenergie ohne Ladungsträgertransport

- Exzitonenresonanz sorgt für starke Kanten in Zustandsdichtefunktion:



↳ Mott-Wannier & Frenkel

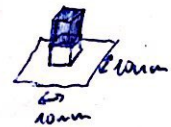
↳ Wikipedia verstehen falls genug Zeit dafür da ist.

• 0D-Fall $\hat{=}$ Quantenpunkten

→ Wofür: • Viele Quantenpunkte ergeben breite Spektren

• Man erzeugt quasi neue Bandlücken aus anionischen Atomen

↳ jeder Quantenpunkt $\hat{=}$ perfekt designetem Atom



→ Herstellungsverfahren: anders als 1D, 2D, 3D → dort geätzt, hier „aufgedruckt“.

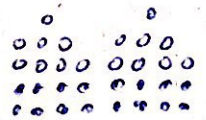
→ Herstellung: ① Substrat, darauf ② Wetting Layer, darauf ③ Formenbildung



→ 3 Verfahren zur Formenbildung bei ~~der~~ Quanten dots

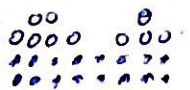
① Stranski-Krastanow-Wachstum

→ Adhäsion der 1. Monolage ist höher als auf reiner Oberfläche. Dadurch bildet sich zuerst ganze Monolage aus (die Beschichtungsschicht $\hat{=}$ wetting layer). Dem folgt Wachstum auf Inseln in Höhe



② Volmer-Weber-Wachstum

→ Adhäsion auf neuer Schicht höher als auf reiner Oberfläche. ~~Dadurch bildet sich zuerst eine ganze Monolage, die Beschichtungsschicht~~ Hieraus erfolgt das Wachstum in Form von hohen Inseln. Führt zu großen Oberflächen



③ Frank van der Merwe-Wachstum

→ Modell bei dem neue Schichten Monolage für Monolage wachsen. Annahme Adhäsion auf neuer Schicht gleich wie auf alter.



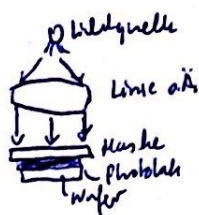
→ In Realität: Mischung aus ① - ③

Optoelektronik III - Herstellungstechnologien

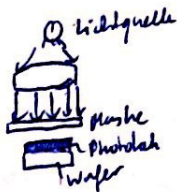
Lithographie

→ 3 Bildungsverfahren, unterscheiden sich in Auflösung, Linsenschärfe, Haltbarkeit

① direkter Kontakt



② Mit Abstand



③ Projektion

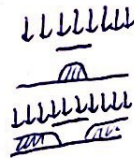


→ Aufbringen des Fotolacks mittels „Spin Coating“

- ↳ dosieren auf Wafer mittels Tropfen des Flüssiglacks
- ↳ Bildung einer Haut (Lack)
- ↳ flüssig lack unter lack durch drehung der Scheibe entfernen
- ↳ bei finaler geschwindigkeit verdampfen des Lösungsmittels

→ positiver & negativer Lack

- ↳ positiver Lack löst sich wo er beleuchtet wird
- ↳ negativer Lack wird fest wo er beleuchtet wird.



→ anzahlbare Strukturgrößen sind abhängig von Belichtungswellenlänge & vom Maschenkonzept.

EUV Lithographie

- extrem ultra violet Lithographie ($\lambda = 13,5 \text{ nm}$)
- ermöglicht Strukturverkleinerung → effiziente, schnelle & günstige Skalierbarkeit
- Verfahren über viele Wölfspeigel

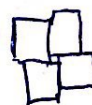


binäre Masche Elektronenstrahlolithographie

- ↳ Belichten durch Masken mit Elektronenstrahl
- ↳ dauert lange, da serieller Verfahren

→ Stichung fehler → Bere frugen, vor allem was die Striche sollen (Folie 4.31)

- Quadrate passen nicht mehr zusammen → Maske wird auf kleine Quadrate geschnitten & dann viele Quadrate (Wafer) zusammen geschlossen.
- ↳ dabei anpassfehler



Reinräume

- Wichtig: extrem hoher Yield, da gilt $Y_{ges} = \prod_{i=1}^N Y_i$ [Yield $\hat{=}$ Ausbeute]
wobei es N Produktionsschritte gibt.
- Reinräume werden in ISO Klassen unterteilt je nach partikelzahl / Volumen

Dünnschichtabscheidung (nicht epitaktisch)

① Thermisches Verdampfen

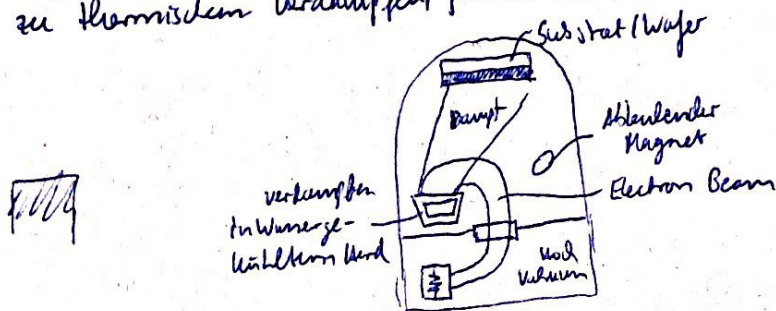
- einfachstes ~~dünnschichtabscheidungsverfahren~~ PVD-Verfahren (PVD $\hat{=}$ physikalische Gasphasenabscheidung)
- durch Wärmeübertragung vom Heizsystem verdampfen des Ausgangsmaterials
- anschließendes Kondensieren auf einem gegenüberliegenden Substrat zu einer Dünnschicht.

Verfahren: - verdampfung am Widerstand nicht am Strahl

- muss in Vakuum stattfinden $\rightarrow$ damit keine Kollision mit Fremdkörpern
- verbraucht sehr viel Strom ($\sim 100A$)
- Siedepunkt des Materials setzt Grenzen $\Rightarrow$ deshalb Elektronenstrahl dämpfen da höhere Temperaturen

② Elektronenstrahlverdampfen

- ähnlich zu thermischem Verdampfen, jedoch erhitzen mit Elektronenstrahl



③ Sputtern (auch Kathodenzerstäubung)

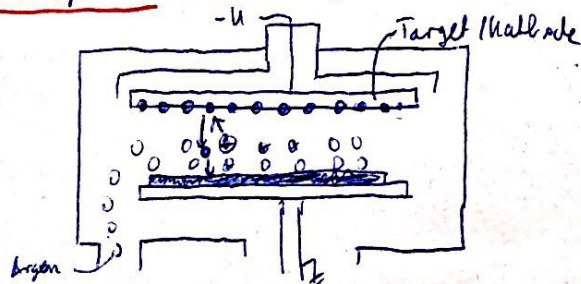
- Atome verlassen Ausgangsmaterial durch den Oberflächenbeschuss mittels Energiereicher Teilchen
- herausgeschlagene Atome wandern durch Vakuumkammer und kondensieren ~~an~~ ^{auf} Substrat
- das Ausgangsmaterial dient als zu beschussende Kathode an die DC oder RF-Spannung angelegt wird ^{mit Hochfrequente U}
- Vakuumkammer wird mit Prozessgas (Argon positiv ionisiert) & ionisierten Atome werden auf

Targa (Kathode) beschleunigt.

- Kathodenmaterial (meist Gold) aus Kathode geschlagen & auf darunterliegendem Wafer darauf fallend
- Dünnschicht bildet sich aus.

Zusatz: Magnetron Sputtern $\rightarrow$ Verstärkung durch zusätzlich angelegtes Magnetfeld

Skizze:



Optoelektronik (III) - Herstellungstechnologien

zu Dünnschichtabscheidung (PVD)

(4) PLD (Pulsed Laser deposition)

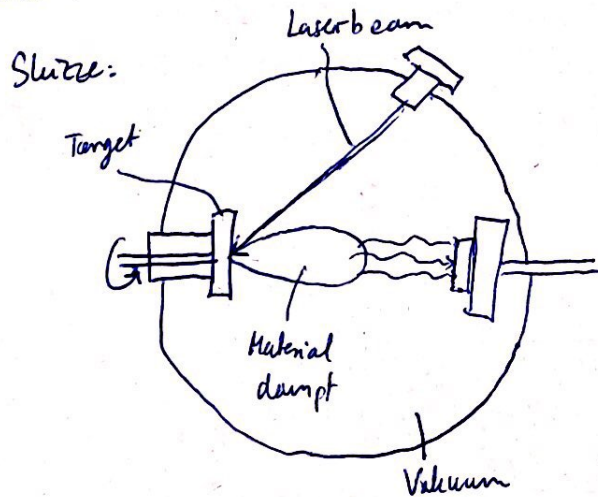
- eng verwandt mit thermischem Verdampfen
- Material des wird mit gepulster Laserstrahlung hoher Intensität 10 MW/cm^2 beleuchtet (in Vakuum)
- Verdampfung im Target über Absorption der Energie
- Materialdampf bewegt sich zum Substrat und kondensiert zu dünner Schicht

Vorteil:

- durch Laserpulse kann Menge auf Substrat exakt festgelegt werden
- komplizierte Zusammensetzung von Elementen kann exakt übertragen werden
- einfache Herstellung vielschichtiger Lagen
↳ multilagen

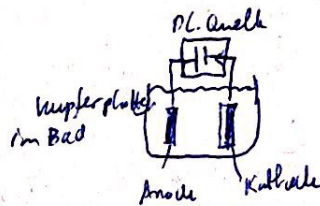
Nachteile:

- langsamer als andere PVD verfahren
- keine großen Flächen wie bei Sputtern



(5) Elektrochemische Abscheidung

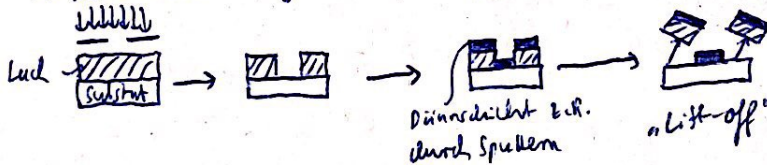
→ einfaches Elektrolyse verfahren



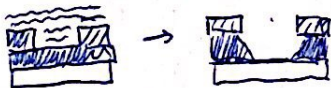
Strukturierung

(1) Lift Off - "Abheben"

→ Abheben des auf den Lack aufgetragenen Materials. Dient auf das Substrat abgeschiedene Materialien abheben



(2) Nassätzen



↳ anisotropie hilft Materialien in alle drei Richtungen auf gewünschte Form zu bringen.

→ Vorteil: kann anisotrop sein, d.h. nicht in jede Richtung gleich

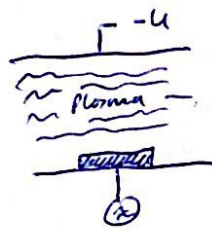
- normalerweise zweistufiger Prozess

- ↳ oxidieren der Oberfläche
- ↳ entfernen des Oxids

→ keine scharfen Kanten

③ Trockenätzen / Plasma ätzen

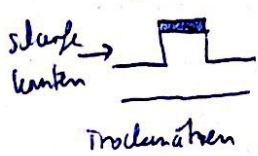
- entsteht über Gas statt Flüssigkeiten
- Gas wie bei Sputtern auf Substrat gedrossen.
 - ↳ scharfe Kanten



→ Anwendung ① - ③

- ↳ Chipstrahlerzeugung z.B. durch reaktives Ionenätzen.

→ Vergleich Nassätzen & Trockenätzen



Wenn man ein gewünschtes Profil will, so muss man die Ätzprozesse genau Abstimmen.

Elektronen Packaging

① Epitaxie → ② Coating "festhaftete Schicht" → ③ Strukturierung (Lithografie → ④ "lift-off")

→ ⑤ Chip-Trennung → ⑥ Anschlussarmen schneiden → ⑦ Bonding (Verbinden) → ⑧ Phosphorlinse

↳ Vollständiges Herstellungsverfahren LED

Optoelektronik (IV) - Halbleiter-Leuchtdioden

ideale Diodenkennlinie



$$I = I_s \left(e^{\frac{e u}{k_B T}} - 1 \right)$$

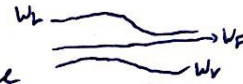
$$I_s = e \left(\frac{D_n}{L_n} \cdot n_p + \frac{D_p}{L_p} \cdot p_n \right)$$

$I_s \hat{=}$ Sperrsättigungsstromstärke
 $L_n, L_p \hat{=}$ Diffusionslänge
 $D_n, D_p \hat{=}$ Minorität Ladungsträgerdiff.
 $n, p \hat{=}$ Diodenidealkoeffizienten
 $R \hat{=}$ Serienwiderstand
 Diodenstrom nimmt mit steigender Temperatur ab.

LED ohne (mit) Vorspannung

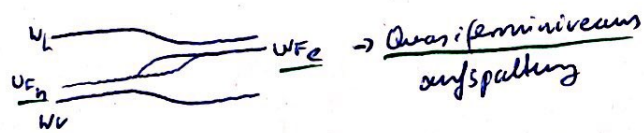
a) ohne Vorspannung

- ↳ thermodynamisches Gleichgewicht
- ↳ # Absorptionsübergänge $\hat{=}$ # Emissionsübergänge



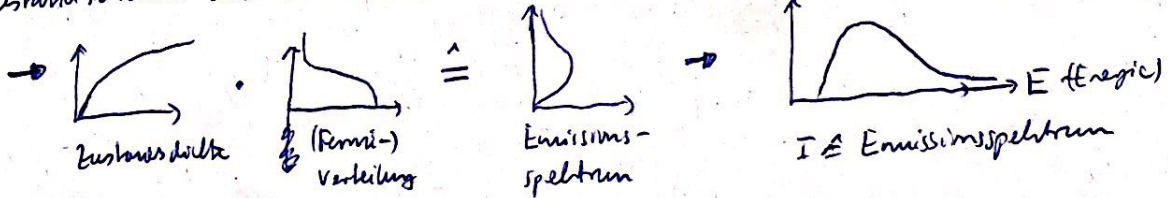
b) mit Vorspannung

- ↳ thermodynamisches Nichtgleichgewicht
- ↳ Aufspaltung des Fermi-niveaus



Emissionsspektren

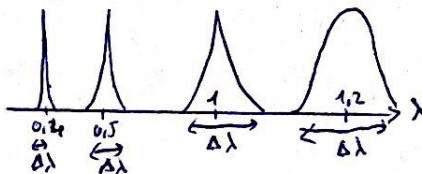
- emission kann nur statt finden, wenn Ausgangszustand besetzt & Endzustand unbesetzt
- ↳ daher bestimmen Besetzungsfunktionen von Elektronen & Löchern, sowie Zustandsdichten das Emissionsspektrum



$$I(E) \sim \sqrt{E - E_g} \cdot e^{-\frac{E}{k_B T}} \quad \& \quad E = E_g + \frac{1}{2} k_B T$$

Linienbreite

- ↳ Breite des Wellenlängenintervalls das von einer Spektrallinie in einem Spektrum überdeckt wird
- Spektren werden im hohen λ Bereich breiter, da gilt $\Delta \lambda \sim |\lambda|^2 \rightarrow \Delta \lambda = \left| \frac{\lambda^2}{hc} \right| \Delta E$



Quanten effizienz

interne Quanten effizienz :

$$\eta_{int} = \frac{\# \text{Emittierte Photonen in aktiver Region pro Sekunde}}{\# \text{Injizierte Elektronen in LED pro Sekunde}} = \frac{P_{int} / (h \cdot f)}{I / e}$$

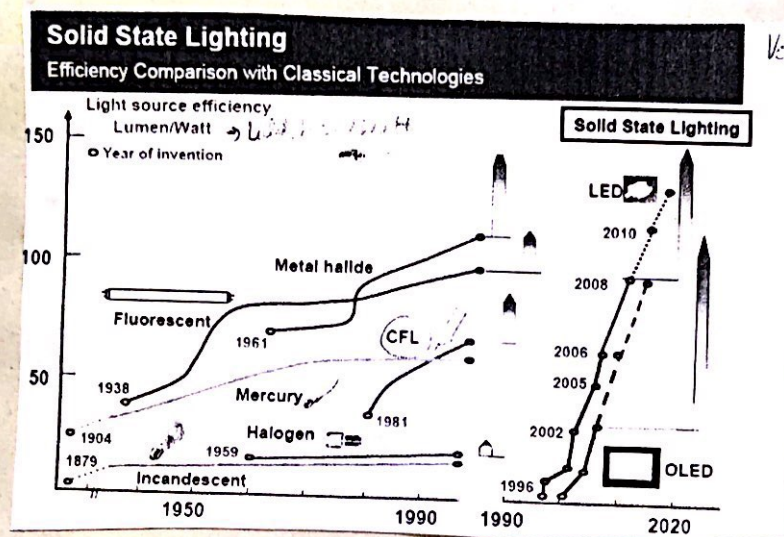
Quantenausbeute:

$$\eta_{extraction} = \frac{\# \text{Emittierte Photonen nach drau\ss en pro Sekunde}}{\# \text{Emittierte Photonen in aktiver Region pro Sekunde}}$$

→ konnte in den letzten Jahren massiv gesteigert werden

externe Quanten effizienz:

$$\eta_{ext} = \eta_{int} \cdot \eta_{extraction} = \frac{\# \text{Emittierte Photonen nach drau\ss en pro Sekunde}}{\# \text{Injizierte Elektronen in LED pro Sekunde}} = \frac{P / (h \cdot f)}{I / e}$$

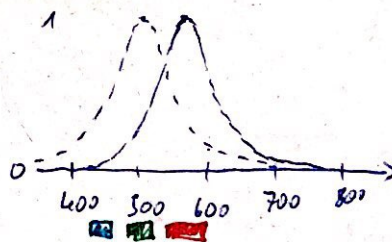


Das Auge als Detektor:

Maximum der Aellempfindlichkeit

↳ bei Hellsehen: $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$

↳ bei Nachtsehen: $\lambda_0 = 507 \text{ nm}$



⇒ anhand vieler Beobachter gemessen

Strahlungsfluss vs. Lichtstrom

→ Strahlungsfluss / Strahlungsleistung $\hat{=}$ Energiemenge pro Zeitspanne die von elektromagnetischer Welle transportiert wird.

↳ $[\Phi_e] \hat{=} W$ mit Index e wie energetisch

→ Bewerteter Strahlungsfluss des Auges als Lichtstrom Φ_v bezeichnet

$[\Phi_v] \hat{=} \text{lm (lumen)}$ mit Index v wie visuell

$$\Phi_v = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot d\lambda$$

Licht ausbeute $\eta = \frac{\Phi_v}{P_{el}} \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$

Optoelektronik IV - Halbleiterbauelemente

Optische Verluste ①-③

① Absorption

- ↳ Licht muss genügend nahe an der Oberfläche sein (vom HL-Material), sonst wird es wieder absorbiert.

② Fresnelsche Verluste

- ↳ senkrechte Reflexionsverluste an Oberfläche

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 \rightarrow R_{\text{III-V}} \approx \left| \frac{3.6 - 1}{3.6 + 1} \right|^2 \approx 32\%$$

③ Totalreflexionsverluste

- ↳ tritt auf für Winkel größer als der kritische Winkel θ_c

$$n_{\text{Luft}} \cdot \sin(90^\circ) = n_{\text{HL}} \sin \theta_c \rightarrow \theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n_{\text{HL}}}\right)$$



- ↳ das meiste Licht bleibt im Halbleiter

- ↳ Wirkungsgrad berechnet sich indem man Austrittshälfte durch gesamtfläche teil.

$$\frac{P_{\text{escape}}}{P_{\text{total}}} = \frac{\int_0^{\theta_c} 2\pi r \sin \phi \, d\phi}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta_c)$$

für GaAs ist $\frac{P_{\text{esc}}}{P_{\text{total}}} \approx 2\% \rightarrow$ extreme Verluste

Näherung: $\frac{P_{\text{esc}}}{P_{\text{total}}} \approx \frac{1}{4} \frac{1}{n^2} = \frac{1}{4} \frac{n_{\text{ext}}^2}{n_{\text{int}}^2}$



Erhöhung der Auskuppelleffizienz

• Backside Mirror

- nutzen der Photonen die nach hinten gehen.
- dielektrische oder metallische Spiegelschichten auf Rückseite
- Vermeidung von Absorption

• Epoxy Dome

- Fluchthegel erhöhen durch kugelförmige aufschichtung mit höherem Brechungsgrad als Luft.

- statt 2% nun ca. 10% Licht auskuppelung



ohne ED

mit Luft



mit ED

mit ED

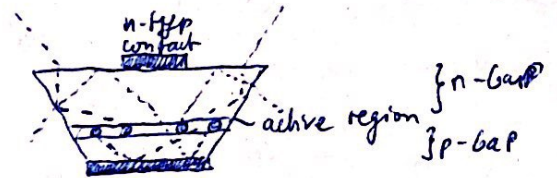
• Spezielle Oberflächengeometrie

- ↳ Kugelförmige LED wäre ideal ← Lemme fragen
- ↳ leider sehr aufwendig / nicht umsetzbar
- oder alternativ kegelförmige LED



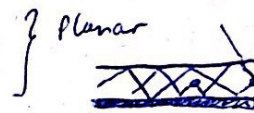
• Hocheffiziente Geometrie: TIP ($\hat{=}$ Truncated inverted pyramid)

- ↳ zu deutsch: Abgeschnittene invertierte Pyramide
- ↳ numerische Optimierung durch Ray-Tracing
- hiermit erstmals Nachweis einer 100 lm/W-LED (1999)
- Verwendung von GaP-Schichten
- von HP entworfen, von Ostar schnell kopiert.



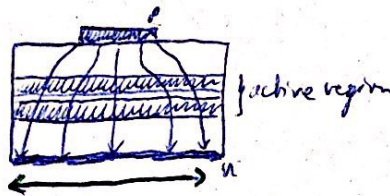
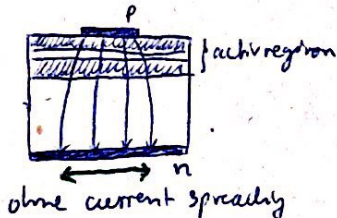
• Microstructured Surface / Texturierte Oberflächen

- erhöhen der Oberflächen z.B. durch microning LED
- texturierte Oberflächen erhöhen Fluchtmöglichkeit
- externe Quanteneffizienz steigt von 9% auf 30%



• Current spreading

- gezielte Verbreiterung der aktiven Zone durch dickere Kontaktschicht.



• Photon recycling

- ↳ Absorbierte Photonen wieder emittieren
- ↳ vor allem bei Perowskit-Kristallen

• Thin Film LED / Thin Film GaN

- ↳ geben Photonen die Chance mehr Fluchtkegel zu finden
- ↳ reduziert interne Absorption
- ↳ gut gemittelte Aussende Winkelverteilung.
- ↳ Lichtauskopplung von $\approx 80\%$



Weiße LED

• Mögliche Farbkombinationen zur Herstellung

- a) Dichromatisch: blau - gelb
- b) Trichromatisch: blau - grün - gelb
- c) Tetrachromatisch: blau - cyan - grün - rot

↓ besser werdender CRI [$\hat{=}$ color rendering Index]
d.h. näher an Tageslicht

➔ Lösungsansatz mit Phosphor ist besonders Farbstabil
jedoch bei Phosphor Stokes Shift nicht vermeidbar, d.h. Verschiebung der Wellenlänge zwischen
Absorption und Emission nicht vermeidbar

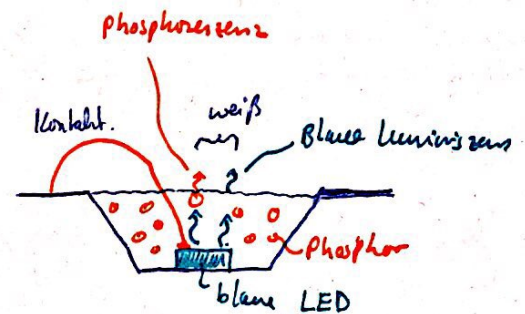
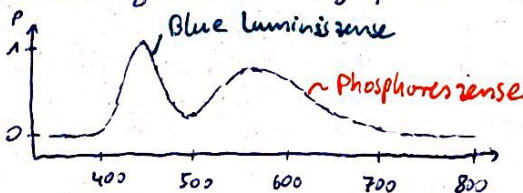
• Mögliche Farbkonverter: Farbstoffe, Phosphor, Halbleiter, Polymere

- ➔ Phosphor Konverter sind am meisten verbreitet (sind stabil & temperaturbeständig)
- ➔ ~~Cerium~~ dotiertes YAG [yttrium aluminium garnet] → Standard für gelbe Farbe, wird
dann mit blauer LED kombiniert
- ➔ Vorteil Phosphor: Schon viel know how, da schon bei Leuchtstofflampen benutzt

• Phosphor Farbumwandlung

- ➔ sehr gutes Spektrum für weißes Licht (braun green gap)
- ➔ diese weißen LED's haben einen bläulichen Farbton & eine
hohe Farbtemperatur
- ➔ Phosphor absorbiert blaues Licht & emittiert gelbes Licht.
Ausgesendet wird Mischung aus blau & gelb $\Rightarrow$ weiß

➔ Spektrum:



• Thin GaN → Bene fragen Folie 6.5, 6.6, 6.7

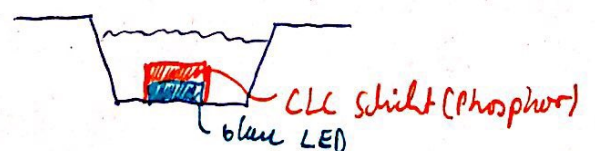
- ↳ color on Demand → Farbwiedergabe auf Nachfrage
- ↳ unzureichende Farbhomoogenität → coating nötig, sonst



nähe blau → kleinerer Abstand
denn weiß → optimaler Abstand
dann gelb → zu viel Abstand

• Chip Level Conversion (CLC) auch conformal coating

- ↳ Phosphor schon direkt auf Chip / Wafer Drucken
- ↳ exzellente Farbhomoogenität
- ↳ hohe Leuchtdichte
- ↳ perfekt für optische Systeme



• Lumiramic-Technologie Luxeon Rebel

- ersetzt Bonddraht durch Bestromung von unten
- Inhomogenität des blauen Lichts wird durch Inhomogenität des gelben Lichts aufgehoben
↳ weniger Fluktuation

• UX-3 chip technology

- Bestromung erfolgt durch Stäbe die durch den Chip gehen.
- ersetzt oben aufgesetzten Bonddraht.

• Thermomanagement / Leistungsbilanz

→ nur 25% der investierten Energie geht in Licht $\Rightarrow$ 75% Wärme

↳ Verluste: Elektrisch, interne Quanteneffizienz, Extraktionseffizienz, Gehäuse,

Umwandlung der Farbe v. r. Phosphor in Weiß
Konversion & Stokes-Shift

→ Chip optimiertes Limit: $P_{opt} = 84\%$ & $P_{heat} = 16\%$

→ Thermomanagement sehr wichtig, da Glühlampe nur 12% Wärmeleistung & LED

85% Wärmeleistung

↳ zudem hohe Leistungsdichte, da geringe Fläche

→ Glühlampe sendet Energie als Infrarotstrahlung aus, LED als Wärme

→ Leistungsdichte Kohleplatte = $\frac{1500W}{\pi \cdot (7,5cm)^2} = 8,4 \frac{W}{cm^2}$

Leistungsdichte LED = $\frac{1,1W \cdot 75\%}{(0,1cm)^2} = 82,5 W/cm^2$

→ Temperatureinflüsse

① durch zu hohe Temperaturen gehen LED's kaputt

② durch hohe Temperaturen driftet das Spektrum (Farbe ändert sich)

↳ bei rotem Licht: T steigt $\rightarrow E_g$ fällt $\rightarrow E_g = h \cdot \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda$ steigt

↳ bei blauem Licht: T steigt $\rightarrow$ mehr Zustände gefüllt $\rightarrow$ hohe Energie $\rightarrow \lambda$ fällt.

③ wachsende Temperatur bewirkt silbrumfende Bandfläche

④ Rot vs. Grün vs. Blau

↳ rot sehr temperaturempfindlich $\rightarrow$ nur bis ~~1800K~~ 200K

↳ grün in der Mitte $\rightarrow$ bis 350K

↳ blau temperatureunempfindlich $\rightarrow$ bis 1600K

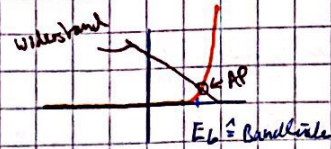
⑤ Wärme Widerstand ist in den letzten Jahren extrem zurückgegangen

Optoelektronik (IV) Halbleiterlichtdioden

Elektrischer Betrieb

① Kennlinie einer LED

- maßgeblich von Bandlücke bestimmt
- wegen steiler Kennlinie muss LED mit Strombegrenzung betrieben werden d.h. Vorwiderstand
- Arbeitspunkt wird von R_s festgelegt & kompensiert teilweise Temperaturschwankungen
- maximal Verlustleistung im Vorwiderstand



② DIMMBARKEIT über Pulsweitenmodulation

- ↳ Leuchte wird über Pulse
- ↳ Umsetzung über Mikrocontroller

LED Retrofit

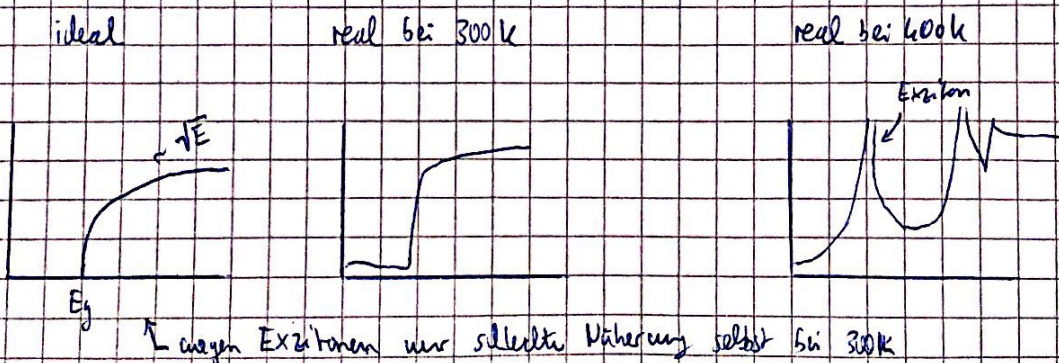
- ↳ laut Definition: Modernisierung / Austausch bestehender Anlagen & Betriebsmittel
- ↳ üblicher Solar, versteht wie Glühlampe.
- ↳ Problem: Verlustenergie geht nicht mehr als Infrarot Strahlung weg → Thermische Energie muss in kleinem Gehäuse abgeführt werden

Optoelektronik (V) Quantenmechanische Grundlagen der Optoelektronik

Exzitonen

- Absorption in Halbleiter sieht anders aus als bisher gezeigt
- insbesondere bei tiefen Temperaturen Peak mit großer Absorption energetisch unter Bandlücke

Kennlinien:



→ Exzitonen sind Elektronen-Loch-Paare

Analogie Exzitonen zu Wasserstoff-Atom

→ bei Wasserstoff Eigenenergien $E_{H,n} = - \frac{E_{Ryd}}{n^2}$

→ bei Exziton Eigenenergien $E_{ex,n} = - \frac{1}{n^2} \cdot E_{ex,1}$

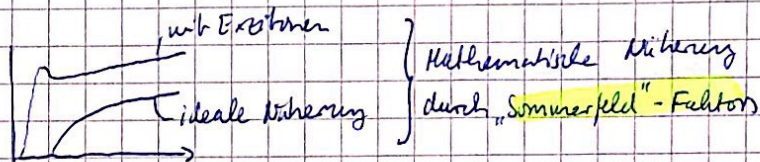
Jedoch → bei Exziton wird μ eingefügt d. $\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_{r, \text{Halbleiter}}$

mit $\mu \hat{=}$ Masse Exziton

→ Somit: Exziton-bindungsenergie deutlich unter $k \cdot T$ (26 meV)

↳ Exzitonen also bei 300K ungefähr aufgelöst

↳ dennoch Effekt der Coulombanziehung von Elektronen-Loch-paar vorhanden, somit



→ Exzitonische Effekte in 2D

↳ Elektron & Loch gemeinsam im Quantum Well eingesperrt, daher stärkere Wechselwirkung

↳ dies hilft strahlender Rekombination

2 Exzitonarten

Wannier Exziton

- geringe Bindungsenergie (~ 10 meV)

- hoher Radius (~ 100 Å)

- sehr stark delokalisiert

↳ typisch für anorganische Halbleiter

Frenkel Exziton

- hohe Bindungsenergie (~ 1 eV)

- geringer Radius (~ 10 Å)

- etwa eine Einheitszelle groß

↳ typisch für organische Halbleiter

Optoelektronik (V) - Quantenmechanik Grundlagen der Optoelektronik

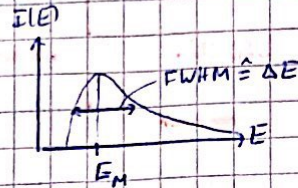
Homogene & inhomogene Verbreiterung

① Emissionsspektrum

• Spektrum $I(E) \propto \sqrt{E - E_g} e^{-E/KT}$

• Maximale Intensität bei $E_M = E_g + \frac{1}{2} kT$

• Full Width at half maximum $FWHM \hat{=} \Delta E = 1,8 kT$

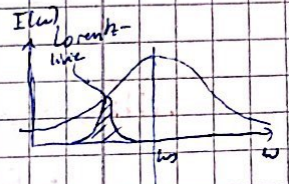


homogene Verbreiterung [Gleich verbreitete Linie für alle Atome]
 ↳ was für Linie
 ↳ alle Atome? (ist doch 1 atomal)

↳ „Emissionswahrscheinlichkeit für bestimmte Frequenz für alle Teilchen gleich groß“

↳ Unsicherheit des einzelnen oder gleichen Atoms durch z.B. Stöße oder unterschiedliche Lebensdauer des angeregten Zustands

↳ beschreiben durch Lorentzlinie



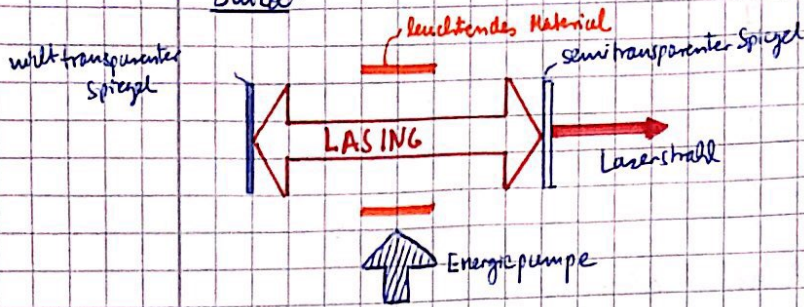
inhomogene Verbreiterung [Unterschiedliche Lage der Resonanzenergie für unterschiedliche Atome → es sind unterschiedlich k-Vektoren m.H.]

↳ „Emissionswahrscheinlichkeit für eine bestimmte Frequenz ist nicht für alle Teilchen gleich groß“

↳ Stochastische Überlagerung vieler Teilchen ⇒ Gaußkurve

Optoelektronik (VI) - Laserdioden

Skizze:



Prinzip & Name

- Prinzip der Rückkopplung
- LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

!!!! Lasergleichungen (A)

- Photonenzahl:

$$\frac{dN_{ph}}{dt} = \underbrace{B_{21} N_{ph} N_{A2}}_{\substack{\text{Erzeugt durch} \\ \text{stim. Emission}}} - \underbrace{\gamma_{ph} \cdot N_{ph}}_{\substack{\text{Verluste über} \\ \text{Spiegel}}} \sim \# \text{ vorhandene Photonen}$$

Einsteins Koeffizient
stim. Emission
vorhandene Photonen
angeregte Atome
durchlässigkeit des transparenten Spiegels

$$\text{mit } \gamma_{ph} = T - \frac{c}{2L}$$

↑
Transmissionswahrscheinlichkeit

- Anzahl der angeregten Zustände:

$$\frac{dN_{A2}}{dt} = \underbrace{-B_{21} N_{ph} N_{A2}}_{\substack{\text{stimulierte} \\ \text{Emission}}} - \underbrace{\gamma_{A2} N_{A2}}_{\substack{\text{Nichtstrahlender} \\ \text{Zerfall von} \\ \text{Atomen (Auger z.B.)}}} + R$$

sehr angeregten Zustand in Photon um
Pump rate

➡ Vernachlässigung spontaner Emission

Lasergleichungen im stationären Zustand (Eingleichungen)

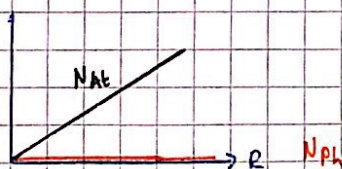
$$(I) \rightarrow 0 = B_{21} N_{ph} N_{A2} - \gamma_{ph} N_{ph} = N_{ph} (B_{21} N_{A2} - \gamma_{ph})$$

$$(II) \rightarrow 0 = -B_{21} N_{ph} N_{A2} - \gamma_{A2} N_{A2} + R$$

Es ergeben sich 2 Lösungsmöglichkeiten:

Fall ① aus (I) $N_{ph} \stackrel{!}{=} 0 \rightarrow$ kein Photon ausgesendet, Laser nicht „angesprochen“

↳ in (II) $N_{A2} = \frac{R}{\gamma_{A2}} \rightarrow$ immer mehr angeregte Zustände



Optoelektronik VI - Laserdioden

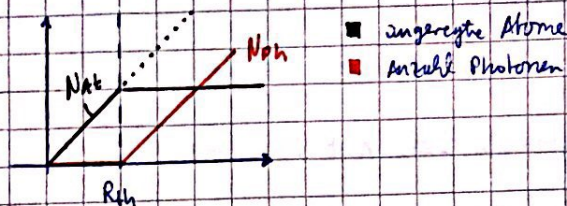
Fall 2)

aus ① $B_{21} N_{AE} - \gamma_{ph} = 0 \rightarrow N_{AE} = \frac{\gamma_{ph}}{B_{21}}$

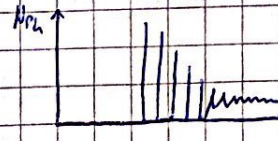
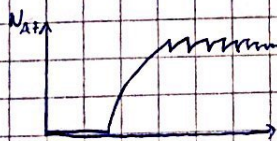
in ② $0 = -B_{21} B_{ph} \frac{\gamma_{ph}}{B_{21}} - \gamma_{AE} \frac{\gamma_{ph}}{B_{21}} + R = -N_{ph} \gamma_{ph} - \gamma_{AE} \frac{\gamma_{ph}}{B_{21}} + R$

somit $N_{ph} = \left(\frac{R}{\gamma_{ph}} - \frac{\gamma_{AE}}{B_{21}} \right) \sim R$

→ da $N_{ph} \geq 0$ folgt erst ab einer Threshold-Rate wird der Laser funktionsfähig $\rightarrow R_{th} = \frac{\gamma_{AE} \gamma_{ph}}{B_{21}}$



→ die zeitabhängige Lösung beschreibt auch Relaxationsoszillationen (d.h. dynamisches Verhalten der Pumprate), sowie das Einschwingverhalten des Lasers

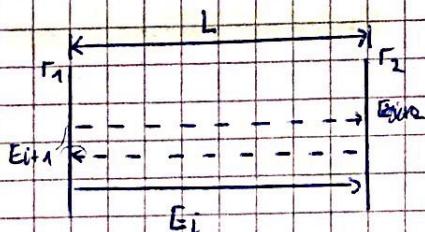


Lasergleichungen (B)

→ in Lasergleichungen (A) fehlt:

- 1.) Aussage über spektrale Eigenschaften des Lasertlichts
- 2.) Geometrische Kette des Lasers

Lasermodell:



An der Laserschwelle kann die Welle ungeschwächt & phasenrichtig einen kompletten Umlauf ausführen, d.h. $E_{tx} = E_i$

nen $E_{tx} = r_1 \cdot r_2 \cdot E_i \cdot e^{-2\Gamma L} \Leftrightarrow r_1 r_2 = e^{2\Gamma L}$ mit $\Gamma = \left(\alpha - j \frac{\kappa}{2} \right)$

Nun 2. Bedingungen

① Phasenbedingungen

$$\text{Im}\{\exp(2\Gamma L)\} = 0, \quad 2L\beta = m \cdot 2\pi \Rightarrow \boxed{L = m \cdot \frac{\lambda}{2n}} \text{ Lasing} \quad \left(\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}\right)$$

↳ Lasing nur für gewisse Wellenlängen $\rightarrow$ Ausbreitung von Moden

② Amplitude soll erhalten bleiben [Reaktor gleich]

$$1 = r_1 r_2 e^{-2j(\beta - j\frac{\alpha}{2})L} \rightarrow \ln(r_1 r_2) = -j\frac{\alpha}{2} \cdot 2L = \alpha L$$

$$\text{gain } g = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right)$$

Halbleiterlaserschichten

Funktionsweise: ~~LED~~ anorganische LED mit Resonator

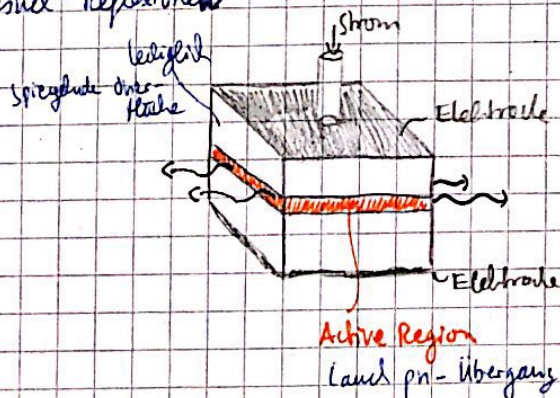
- ① Ladungsträger hinzufügen ② Erhöhung der Ladungsträgerdichte
- ③ Erhöhung von f_{cutoff} und f_n ④ g (gain) wird positiv
- ⑤ Schwellenverstärkung ⑥ g_{th} wird erreicht ⑦ Laserprozess setzt ein



Farby - Perot - Laser / Kantenemitter

$\rightarrow$ keine expliziten Spiegel sondern lediglich durch das Lasermaterialial mittels

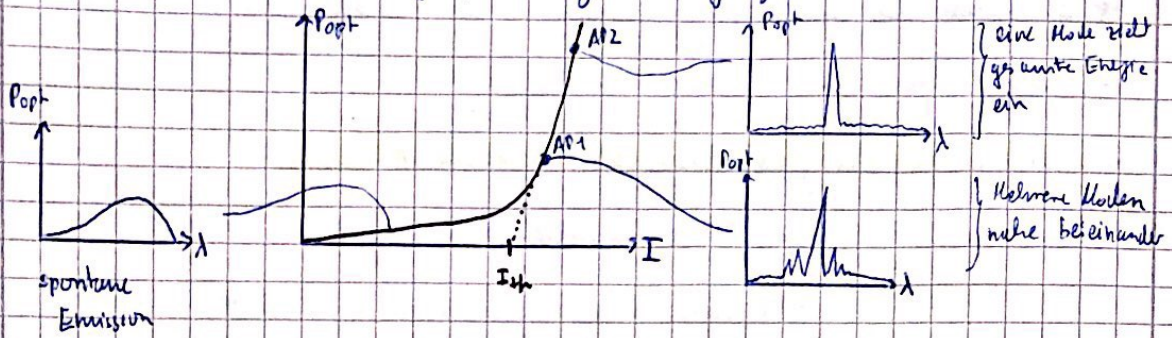
Fresnel-Reflexionen



Kantenemitter-Laser

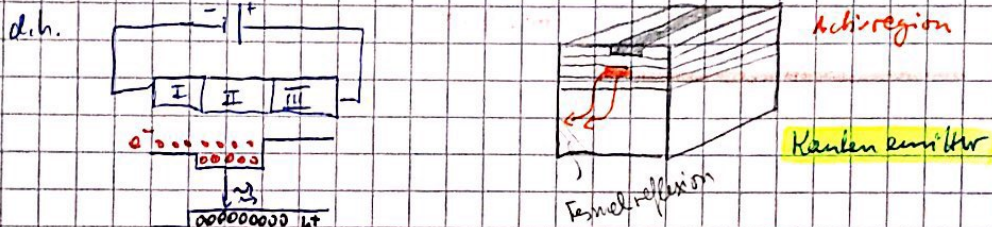
Optoelektronik (VI) - Laserdioden

Halbleiter Laserdioden: Ausgangsleistung & Ausgangsspektrum



Halbleiter Laserdioden: Doppelheterostruktur Laserdiode

→ äquivalent zu Fabry-Pérot-Laser lediglich mit Doppelheterostruktur,

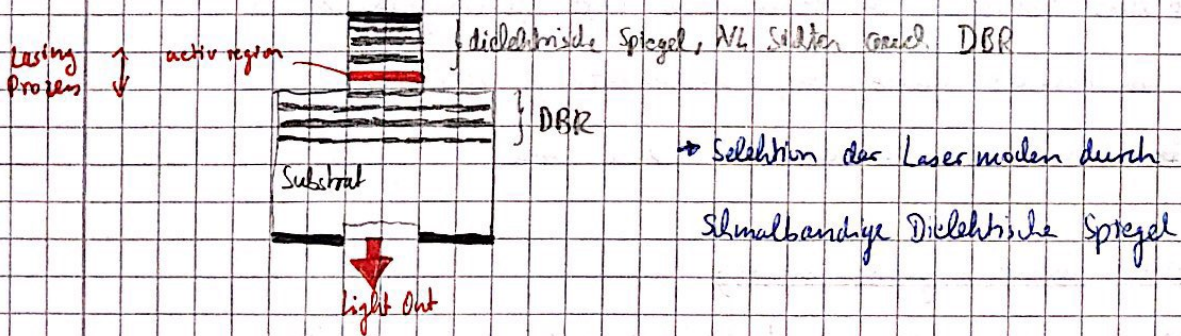


Laser mit verteilter Rückkopplung [VCSEL, DBR, DFB]

VCSEL $\hat{=}$ [Vertical Cavity Surface Emitting Laser]

→ auch Oberflächenemitter

→ Kombination von vertikalen dielektrischen Spiegeln ($\lambda/4$ Schichten) mit aktiver Schicht

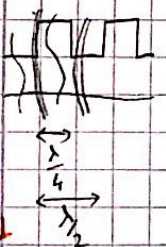
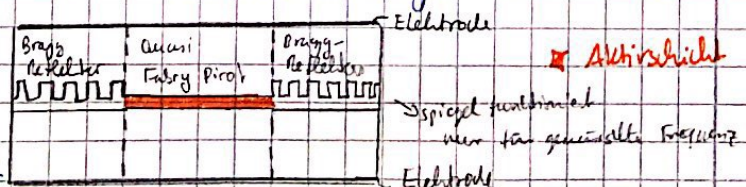


DBR - Distributed Bragg Reflector

→ Kombination von Wellenleitung und „lateralen dielektrischen Spiegeln“

→ ein Quasi Fabry Pórot Laser mit Braggreflektoren an der Seite und ohne Reflexion durch unterschiedliche Brechungsindizes wie bei Fabry Pórot

→ auch hier Selektion der Lasermoden durch schmalbandige dielektrische Spiegel



DFB - Laser [Distributed Feedback Laser]

- Einbauen des dielektrischen Spiegels in die aktive Zone
- deutsch: Laser mit verteilter Rückkopplung
- Führt zur Kopplung Kontradirektional laufender Wellen.

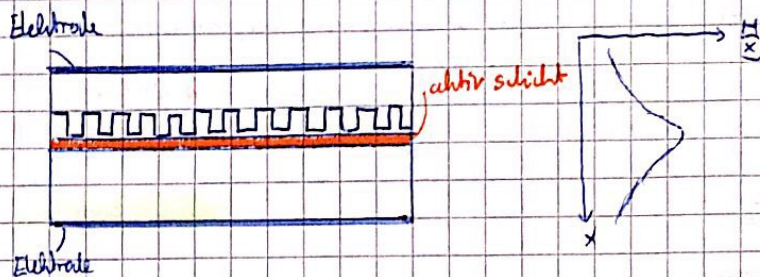
Eigenschaften:

- niedrigere Schwellenstromgrenze

- bessere Strahlenqualität

- z.B. für Glasfaserkabelübertragung

- Stärke Rückkopplung kann bestimmt werden



→ Durch DFB ist auch aufkopplung aus Wellenleiter möglich

Wellenlängenabstimmung

- ↳ Aktive Kontrolle der Emissionswellenlänge durch Steuerstrom I_L
- ↳ durch Variation des Steuerstroms den Brechungsindex direkt und indirekt (durch Temperaturänderung) verändern.
- ↳ zum Beispiel Tunable Twin Guide Laser

externe Wellenlängenabstimmung

- Wellenlängenselektiver Spiegel (extern) mittels Reflexionsgitter
- hierfür Entspiegung der Laserfacette nötig



Optoelektronik (VI) - Laserdioden

AC-Betrieb von Laserdioden

Halbleiterlasergleichung

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - R(N) - \frac{G}{V\tau_s} S$$

was ist G $\hat{=}$ normierte Verstärkung

mit $N \hat{=}$ Ladungsträgerdichte

$G \hat{=}$ Normierte Verstärkung

$S \hat{=}$ # Photonen in Lasermode

$I \hat{=}$ Strom

$V \hat{=}$ Rekombinationsvolumen

$R(N) \hat{=}$ Rekombinationsrate

- Wieso sind die Halbleiterlasergleichung schwerer als die normale Lasergleichung? $\Rightarrow$ Da im Halbleiter angeregte Zustände statt Elektronen und Protonen. Angeregte Zustände haben einen komplexeren Zusammenhang bezüglich N .

$\rightarrow$ Rekombination $R(N) = A \cdot N + B N^2 + C N^3$ & $\frac{dn}{dt} = g - A n - B n^2 - C n^3$

$A \hat{=}$ Störstellenrekombination (strahlend oder nichtstrahlend) $\sim n$

$B \hat{=}$ Rekombination freier Ladungsträger $\sim n \cdot p$

$C \hat{=}$ Augerrekombination $\sim n^2 \cdot p$

$\rightarrow$ Normierte Verstärkung $G = \Gamma V_g \tau_s \cdot g$ & $g \approx (N - N_{tr}) \frac{\partial g}{\partial N}$

mit $V_g \hat{=}$ Gruppengeschwindigkeit der Photonen

$\tau_s \hat{=}$ Photonen Lebensdauer

$g \hat{=}$ Materialgewinn

$N_{tr} \hat{=}$ Transparenzdichte bei der Absorption verschwindet

$\rightarrow$ Photonenzahl $\frac{dS}{dt} = (G - 1) \frac{S}{\tau_s} + R_{sp}$

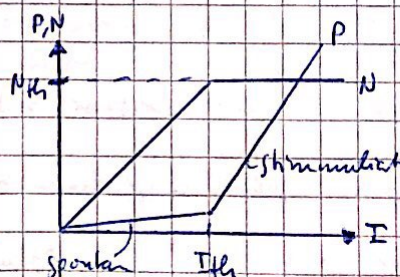
mit $R_{sp} \hat{=}$ spontane Emissionsrate im Laser

Stationärer Fall

$\rightarrow G = 0 \Rightarrow I_{th} = e V R(N_{th})$

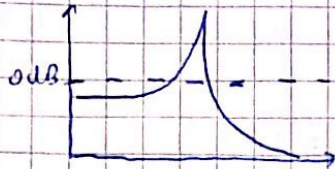
$\rightarrow \frac{dN}{dt} = 0 \Rightarrow P \sim S = \frac{\tau_s}{e} (I - I_{th})$

$\rightarrow \frac{dS}{dt} = 0$



Kleinsignalmodulation

→ stromabhängige Resonanz & stromabhängige Dämpfung



Der globale Lasermarkt

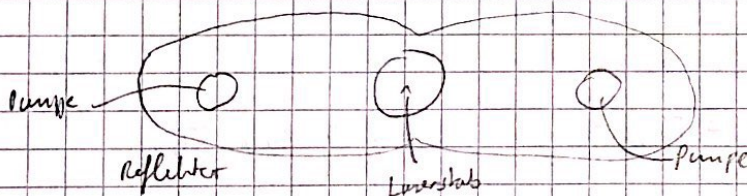
Der CO₂-Laser

- ↳ leistungsstärkster & am häufigsten industriell eingesetzter Laser
- ↳ sehr effizient & kostengünstig
- ↳ $\eta \approx 15\% - 20\%$
- ↳ sendet infrarotstrahlung aus

Der Nd:YAG-Laser (Nd = Neodym)

→ Yttrium Aluminium Garnet

- ↳ verwendet Neodym dotierten YAG kristall
- ↳ starke Emission im infra roten & Absorption im sichtbaren Bereich
- ↳ Vorteil → wegen geringer Wellenlänge in Glasfaser transportierbar



Strahlenqualität

- ↳ qualifiziert die Güte der Fokussierbarkeit
- ↳ 3 Kennzahlen zur Identifizierung
 - ① Strahlkennzahl
 - ② Modenfaktor
 - ③ Strahlparameterprodukt

Faserlaser

- dotierter Kern einer Glasfaser bildet bei Faserlaser das aktive Medium
- aufgrund großer Länge hohe Verstärkung
- werden durch Diodenlaser gepumpt

Optoelektronik VII Modulatoren

• ~~akustooptische~~ Modulatoren

→ optisches Bauteil, welches Licht eine Definierte Charakteristik aufprägt

→ Einstellmöglichkeiten:

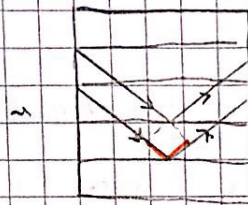
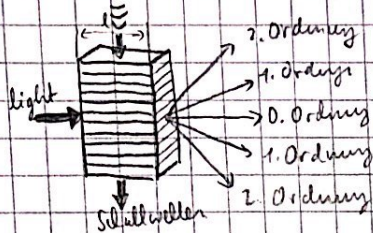
- | | |
|--------------------------------------|-----------------------|
| a) Licht polarisieren | → Drehung / Filterung |
| b) EM-Wellen haben Phase | → Interferenz |
| c) Photonen können absorbiert werden | → Elektroabsorption |
| d) Licht kann gebrochen werden | → Schaltbare Gitter |

• akustooptische Modulatoren

↳ Prinzip: Beugung am dynamischen Gitter

↳ Ablauf: ① Longitudinale Schallwelle → ② Kompression

→ ③ Drehunterschiede (dynamisches Gitter)



Gangunterschied

↳ „Akustooptischer Effekt“ ⇒ Anwesenheit von Schall kann den Brechungsindex ändern

↳ Einsatzgebiet: Laserprojektionsdisplay

• elektrooptische Modulatoren

↳ Änderung Phase oder Polarisation

↳ Prinzip: Änderung des Brechungsindex bei angelegter Spannung

↳ dies führt zu Phasenänderung

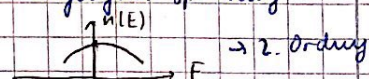
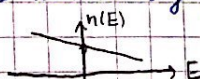
↳ 3 Effekthypen der Brechungsindexänderung [Auswertung hängt von Kristallstruktur ab]

① Pockels-Effekt (Sonderfall)

② Kerr-Effekt (elektrisch)

↳ lineare Änderung des Brechungsindex über der angelegten Spannung

↳ quadratische Änderung des Brechungsindex über angelegter Spannung



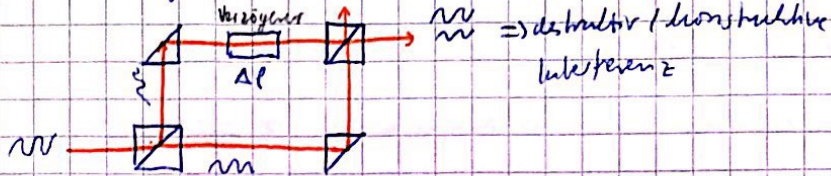
③ Kerr-Effekt (optisch) beschreibt alle weiteren möglichen (→ n-te Ordnung)

Mach-Zehnder-Modulator $\hat{=}$ elektrooptischer Modulator

• Funktionsweise:

- einfallendes Licht in 2 Arme aufteilen
- unterschiedliche optische Weglänge
- am Ende überlagern → Phasenverschiebung

• Aufbau:



- Eigenschaft: auch für sehr hohe Frequenzen $> 100 \text{ GHz}$ möglich

Elektrooptische Bildkoppler

- führt die Leistung einer elektromagnetischen Welle über auf eine Leiterstruktur

Flüssigkristallmodulator

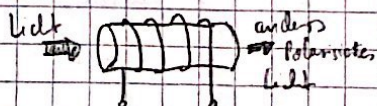
- ↳ moduliert den Polarisationszustand
- ↳ steht in jedem LCD-Fernseher
- ↳ Flüssigkristalle polarisieren Licht wenn eine bestimmte Kraft an elektrischer Spannung angelegt.



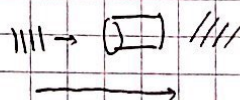
Magnetooptische Modulatoren

- ↳ zur Drehung von linear polarisiertem Licht mittels Faradayeffekt
- ↳ Prinzip: Brechungsindex
- ↳ Kann auch als Faraday Isolator (Optische Diode) genutzt werden
 - ↳ hierbei wird Licht nur in eine Richtung durchgelassen & rückwärts durchlaufendes Licht wird bei beliebiger Polarisation abgelenkt oder absorbiert.

Skizze:



Wirkweise



- Zeeman-Effekt: Aufspalten von Spektrallinien durch Magnetfeld

Halbleitermodulatoren

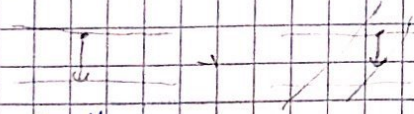
- Stark Effekt: Aufspalten von Spektrallinien im statischen elektrischen Feld (auf atomarer / molekularer Ebene)

Elektrooptische Elektroabsorptive Modulatoren

- Veränderung der Absorption in einem Halbleiter in Abhängigkeit vom elektrischen Feld

↳ mittels Franz-Keldysh-Effekt

- ↳ durch elektrisches Feld Verkippen der Bandlücke & dadurch Absorption kleiner als Bandlücke möglich



- ↳ auch hier eigentlich starker Einfluss von Exzitonen

Quantum Confinement Stark Effekt

- Durch Verkippen der Bänder bilden sich neue Energieniveaus
- ↳ Rotverschiebung

Warum Stark Lokalisierung

- Durch Verkippen der Bänder wird Kopplung aufgehoben
- ↳ Blauverschiebung

Burstein-Moss-Effekt

- Dotierung führt zu Änderung des Brechungsindex
- ↳ durch Dotierung Veränderung / Vergrößerung der effektiven Bandlücke → äußert sich in Verschiebung der Absorptionskante

Bandkantenrenormierung → Diplomarbeit Lemmer 1990

- ↳ beschreibt das Phänomen: Durch die Anwesenheit von bereits angeregten Ladungsträgern ändert sich auch die Energie der elektronischen Zustände. Dies bewirkt eine Änderung der Bandstruktur.

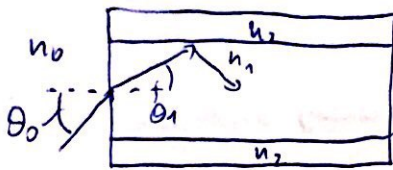
Wissen aus Übung:

• V-Coating $\rightarrow$ Doppelte Reflexionsschicht, die



• Matrix Transfermethode

• Akzeptanzwinkel $\rightarrow$ maximaler Einfallswinkel in dem Licht in Wellenleiter einfallen darf



$$\theta_c = \arcsin(\sqrt{n_1^2 - n_2^2})$$

• Unterschiede Diodenlaser vs. Festkörperlaser

Bei	Diodenlaser	Festkörperlaser
optische Leistung / Leistung	$\sim 50\%$	$\sim 20\%$
Frequenz	$> 10 \text{ GHz}$	$\sim 100 \text{ MHz}$
Divergenzwinkel	$\sim 30^\circ$	$\sim 0,1^\circ$
Strahlenprofil	Elliptisch	Rund
Temperaturempfindlichkeit	sehr	wenig

In Festkörperlaser Energielevel der Atome nur schwach beeinflusst

$\rightarrow$ Absorption & Emission durch schmalbandige Linien bestimmt

In Halbleitermaterialien $\rightarrow$ können Diodenlaser, Atome durch Niveaubanden beeinflusst

$\rightarrow$ Ausbildung Leitungs- & Valenzband $\Rightarrow$ Verbreiterung der Absorption & Emission

Verwendung	Diodenlaser	Festkörperlaser
	Pumpe für Festkörperlaser	Materialbearbeitung
	CD/DVD/Blue Ray	Spektroskopie
	Bar Code Scanner	Lithografie
	Laserschneider	Medizin
	Optische Kommunikationstechnik	Grüner Laser Pointer
	Router Laser Pointer	

• In P / In GaAsP 1100 - 1605 nm

• GaAs / AlGaAs 750 - 900 nm

• GaInP 375 - 660 nm

• AlGaIn 350 - 600 nm

$$\text{Strom } I = e \cdot g \cdot V$$

$\uparrow$ gain

intrinsischer Fall $n=p$

Quantenausbeute im intrinsischen

$$\eta = \frac{B n^2}{A + B n^2 + C n^3}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{R}{N} = A + BN + CN^2 \rightarrow A, B, C \text{ erhält man aus Messung bei 3 verschiedenen } N$$

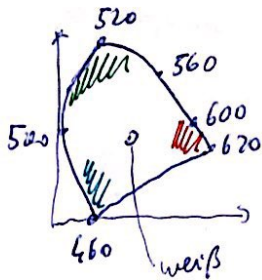
• Methoden zur Steigerung der Lichtausbeute

↳ optimierte Geometrie $\rightarrow$ TIP, Texturierte Oberflächen, Epoxy Dome, Mikrolinsen Array

• CIE - Normvalenzsystem

↳ Farbsystem das die Relation zwischen menschlicher Farbwahrnehmung und den physikalischen Ursachen des Farbseins herstellt

↳ CIE [$\hat{=}$ Commission internationale de l'éclairage]



• Der Emittor welcher eine Wellenlänge näher der Maximums der V-Lambda Kurve hat, kann trotz gleichem Wertston heller für den Beobachter aussehen.

• LEDs mit hohem Blauanteil und hoher Farbtemperatur werden auch als kaltweiße LEDs bezeichnet. LEDs mit höherem gelb-orange Anteil und niedrigerer Farbtemperatur werden als warmweiß bezeichnet

• CRI $\hat{=}$ Colour rendering Index $\rightarrow$ Kennzahl mit der die Qualität der Farbwiedergabe von Lichtquellen gleicher korrelierter Farbtemperaturen beschrieben wird.

• CCT $\hat{=}$ Correlated Color Temperature $\Rightarrow$ Farbtemperatur

↳ ein Maß zum bestimmen des Farbeindrucks einer Lichtquelle $\rightarrow$ Einheit Kelvin

Wissen aus Übung II

→ wodurch verbessern LEDs mit Heterostrukturen Leistung gegenüber Homostruktur

- ↳ Heterojunction verbessert Leistung aufgrund des Ladungsträgerconfinements, d.h. der Ladungsträger gefangen in einer kleineren aktiven Region
- ↳ zudem Verstreuerung freier Ladungsträger über aktive Region hinaus verhindert.

→ Ladungsträger Verlustmechanismen in Heterojunction

- ↳ Thermische Emission von Ladungsträgern
- ↳ Ladungsträger nicht in aktiver Zone „gefangen“
- ↳ hohe Stromdichte → aktive Region überfüllt

→ Unterschied Doppel Hetero Struktur & Einzel Quantum Well LED

DH-LED: relativ dicker QW ($> 400 \text{ nm}$)

SQW-LED: relativ dünner QW ($5 \dots 10 \text{ nm}$)

niedrige Injektion → SQW-LED besser, da weniger Defektzustände wiederholen

hohe Injektion → DH-LED besser, da aktive Zone nicht schnell überfüllt

→ Typische Wirkungsgrade laut Übung

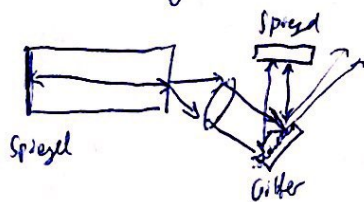
$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{el}} \eta_{\text{IQE}} \eta_{\text{ext}} \eta_{\text{Gefänge}} = 0,43$$

$\begin{matrix} 0,9 & 0,71 & 0,75 & 0,9 \end{matrix}$

→ für weiße LEDs treten noch mehr Verluste auf wegen Phosphor Konversion

→ Typische ^{U_{bet}} Betriebsspannung LED → 1-3V

- External Cavity Resonator / Laser



→ Licht auf der einen Seite durch Spiegel auf der anderen Seite durch Gitter rückkopplern. Dadurch werden Längen durch Abtuning.