

Übung Optoelektronik SS2018

Lösungshinweise

June 27, 2018

Übung 1

Aufgabe 1 - Antireflexschichtbeschichtungen I

a)

Die Wellen, die an den unterschiedlichen Grenzflächen reflektiert werden, sollen destruktiv interferieren. Damit ergibt sich für die Antireflexschicht eine Bedingung für die Schichtdicke d :

$$2d \stackrel{!}{=} \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda_0}{n_{ARS}}$$

n_{ARS} ist hierbei der Brechungsindex der Antireflexschicht. Für eine minimale Schichtdicke, wählen wir $m = 0$. Betrachten wir nur die ersten beiden reflektierten Strahlen, so sollten diese dieselbe Amplitude haben um vollständig destruktiv zu interferieren (dies ist eine starke Vereinfachung, für eine exakte Lösung müssen wir unendlich viele Reflexionen in der Schicht betrachten). Wir setzen also die Reflektionsfaktoren an den beiden Grenzflächen gleich:

$$\left| \frac{n_{GaAs} - n_{ARS}}{n_{GaAs} + n_{ARS}} \right|^2 = \left| \frac{n_{ARS} - n_{Luft}}{n_{ARS} + n_{Luft}} \right|^2$$

Wurzelziehen und auflösen ergibt:

$$n_{ARS} = \sqrt{n_{GaAs} \cdot n_{Luft}}$$

b)

Für die Reflexion an der GaAs Luft zu Grenzfläche ergibt sich ohne Antireflexschicht eine Reflexion von ca. 32%. Der Brechungsindex einer Antireflexschicht und die Dicke sollten sein:

$$n_{ARS} = \sqrt{n_{GaAs} \cdot n_{Luft}} \approx 1,90 \quad d = \frac{\lambda_0}{4n_{ARS}} \approx 105nm$$

Aufgabe 2 - Antireflexschichtbeschichtungen II

Mit gegebener Formel erhält man für SiO₂ eine minimale Reflexion von 4,7% und für TiO₂ von 4,1%. Letzteres sollte daher als Antireflexschicht vorgezogen werden. Die minimale Schichtdicke analog zu obiger Rechnung zu 97,8nm. Der Brechungsindex einer idealen Schicht würde 1,87 betragen. Aufgrund des Herstellungsprozesses ist allerdings in der Regel die Auswahl an Materialien begrenzt.

Verständliche Herleitungen der Reflexionsformel mittels der Transfermatrixmethode sind in z.B. in „Optik für Ingenieure“ von F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch und H. Schmidt (Springer Verlag) oder in „Optik“ von E. Hecht (Oldenburg Verlag) zu finden.

Aufgabe 3 - AR Einfach- und Doppelschicht

a)

Um die optimale Brechungsindexkombination zu finden wählt man den Ansatz:

$$R = \left(\frac{n_3^2 n_1 - n_4 n_2^2}{n_3^2 n_1 + n_4 n_2^2} \right)^2 \stackrel{!}{=} 0$$

Auflösen ergibt direkt die gesuchte Beziehung:

$$n_3^2 n_1 - n_4 n_2^2 = 0 \iff \frac{n_1}{n_4} = \left(\frac{n_2}{n_3} \right)^2$$

b)

Für die InGaAs-Luft Grenzfläche wäre das ideale Brechungsverhältnis:

$$\frac{n_2}{n_3} = \sqrt{\frac{n_1}{n_4}} = \sqrt{\frac{1}{3,8}} = 0,51$$

Mit den Materialien MgF_2 und CdS kommt man diesem Verhältnis am Nächsten:

$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{1,38}{2,60} \approx 0,53$$

Die so erreichbare minimale Reflektion beträgt:

$$R_{min} = \left(\frac{n_3^2 n_1 - n_4 n_2^2}{n_3^2 n_1 + n_4 n_2^2} \right)^2 = \left(\frac{3,6^2 - 3,6 \times 1,38^2}{3,6^2 + 3,6 \times 1,38^2} \right)^2 = 0,001$$

Durch eine Kombination von $\frac{\lambda}{2}$ und $\frac{\lambda}{4}$ -Schichten können auch weniger scharfe, aber breitbandigere reflektionsmindernde Schichten wie in folgender Abbildung hergestellt werden:

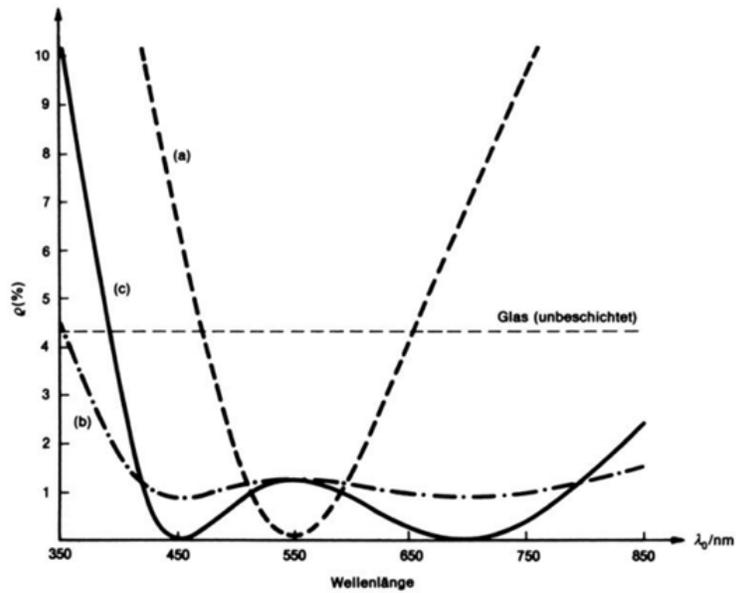
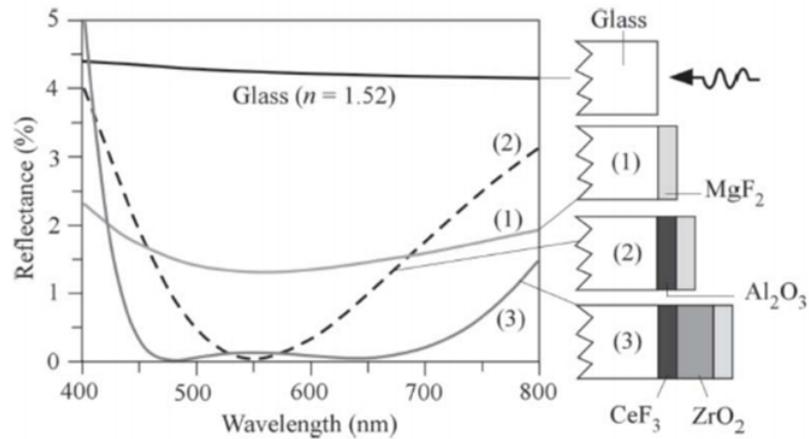


Abb. 19.4. Reflexionsgrad einer Doppelschicht auf Glas als Funktion der Wellenlänge. In allen Fällen ist $n_0 = 1$ (Luft) und $n_s = 1,52$ (Glas). Die nachfolgend angegebenen optischen Dicken ($\lambda_1/4$ bzw. $\lambda_2/2$) beziehen sich auf eine Wellenlänge von $\lambda_0 = 550$ nm: (a) $\lambda/4 - \lambda/4$: $n_1 = 1,65, n_2 = 2,1$. (b) $\lambda/4 - \lambda/2$: $n_1 = 1,38, n_2 = 1,6$. (c) $\lambda/4 - \lambda/2$: $n_1 = 1,38, n_2 = 1,85$

Eine breitbandige und niedrige Reflexion kann z.B. mit einer dreifachen Schichtfolge erreicht werden. Im folgendem Bild ist ein Vergleich von einer einfach, doppelten und dreifach Glas-Antireflexbeschichtung zu sehen:



Aufgabe 4 - Wellenleiter

a)

Der maximale Akzeptanzwinkel kann durch zweimaliges Anwenden des Snelliusschen Brechungsgesetzes hergeleitet werden. Für den steilsten Winkel des Lichtstrahls, der in der Faser noch totalreflektiert wird, gilt:

$$n_1 \sin(90^\circ - \theta_1) = n_2 \sin(90^\circ) = n_2$$

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Erneutes Anwenden des Brechungsgesetzes am Luft-Glas Übergang liefert das gesuchte Ergebnis für den maximalen Akzeptanzwinkel θ_0 :

$$n_0 \sin(\theta_0) = n_1 \sin(\theta_1)$$

$$\theta_0 = \arcsin\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right)$$

b)

Lichteinkopplung in eine Faser

Um den in voriger Aufgabe ausgerechneten kritischen Einstrahlwinkel nicht zu übersteigen, muss für die Brennweite gelten:

$$f > \frac{d}{2 \cdot \tan\theta_0} = \frac{d \cdot \sqrt{1 - (n_1^2 - n_2^2)}}{2 \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = 29\text{mm}$$

Übung 2

Aufgabe 1 - Wellenleiter II, Wellenoptik

Mit der Modefinder.gui, der die Transfermatrixmethode zur Suche für Wellenleitermodenimplementiert hat lassen sich folgende effektive Brechungsindices und Laserwellenlängen für die Struktur errechnen:

a) $n_{eff} = 3.51$, $\lambda_{Laser} \approx 842 \text{ nm}$; b) $n_{eff} = 3.41$, $\lambda_{Laser} \approx 818 \text{ nm}$; c) $n_{eff} = 3.35$, $\lambda_{Laser} \approx 804 \text{ nm}$

d) Die TE0 Mode existiert ab 100nm, die TE1 Mode ab 375nm und die TE2 Mode ab 625nm

Aufgabe 2 – Materialien in der Optoelektronik

a) In Festkörperlaser sind die Energielevels der Atome nur schwach beeinflusst durch die umliegenden Atome. Daher sind sowohl Absorption als auch Emission durch schmalbandige Linien bestimmt. In Halbleitermaterialien, aus denen Diodenlaser bestehen, sind die Atome durch die kovalenten Bindungen stark durch Nachbaratome beeinflusst und es bilden sich Valenz- und Leitungsbander aus. Dies führt zu einer Verbreiterung der Absorption und Emission.

b) Einige Unterschiede:

	Diodenlaser	Gas/Festkörperlaser
Wall Plug Efficiency	~50%	<20%
Modulationsfrequenz	>10GHz	~100MHz
Größe	<1mm	>10cm
Divergenzwinkel	~30°	~0.1°
Strahlprofil	Elliptisch	Rund (Grundmode)
Linienbreite/Koherenzlänge	-	+
Temperaturempfindlichkeit	Sehr empfindlich	Weniger empfindlich

Table 1: Unterschiede zwischen Diodenlasern und Gas/Festkörperlaser

Typische Anwendungsbereiche:

Diodenlaser	Festkörper/Gaslaser
Pumplaser für Festkörperlaser	Materialbearbeitung
CD/DVD/Blue-Ray	Spektroskopie
Bar Code Scanner	Lithographie
Laser drucker	Medizinische Anwendungen
Optische Kommunikationstechnik	Holographie
Roter Laser pointer	Grüner Laser pointer

Table 2: Typische Anwendungsgebiete für Diodenlaser und Festkörper-/Gaslaser

- c) InP/InGaAsP: 1100-1650 nm
- d) GaAs/AlGaAs: 750-900 nm
- e) GaInN: 375-440 nm
- f) AlGaN: 350-400 nm

Aufgabe 3 – Materialkomposition

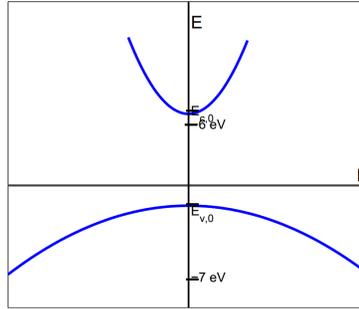
a) Nach $E = \frac{hc}{\lambda}$ entspricht 650nm einer Energie von 1,9eV. Die gegebene lineare Näherung für die Bandlücke wird nach x umgestellt und der Bandlückenenergie gleichgesetzt, man erhält:



Ausgehend vom direkten Halbleiter GaAs (x=0) werden einzelne Ga-Atome durch Aluminium ersetzt. AlAs (x=1) dagegen ist ein indirekter Halbleiter. Mit zunehmendem Aluminiumanteil verändert sich die Differenz der direkten und indirekten Bandlücke. Ab ca. x=0.43 wird AlGaAs indirekt. Dies lässt sich auch am Diagramm in der Aufgabenstellung ablesen: Kurve 1 beschreibt die direkte Bandlücke, Kurve 2 die indirekte.

Aufgabe 4 – Bandstruktur $In_{0.53}Ga_{0.47}As$

a) In der Nähe des Leitungsband-Minimums und des Valenzbandmaximum lässt sich die Bandstruktur über die Dispersionsrelation annähern (Parabel). Die effektive Masse ist umgekehrt proportional zur Krümmung der Bänder. Das Leitungsband ist daher stärker gekrümmt als das Valenzband. Leitungsbandminimum bei $E_{c,0}$ und Valenzbandmaximum bei $E_{v,0}$. Beide Bänder werden angenähert durch Parabeln:



b) Die maximale Wellenlänge entspricht der minimalen Energie des Übergangs, also $\Delta E = E_{c,0} - E_{v,0} = 0,762 \text{ eV}$. Dies entspricht einer Wellenlänge von $1,627 \mu\text{m}$.

c) Impuls $p = \hbar k$. Durch Einsetzen in die Parabelnäherungen für Leitungs- und Valenzband gilt für die Bandlücke

$$\Delta E = E_{c,0} - E_{v,0} + \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) = 1,054 \text{ eV} \rightarrow \lambda = 1,177 \mu\text{m}$$

(Hinweis: in eV umrechnen!) Man beobachtet also eine Blauverschiebung (hin zu höherer Energie).

Aufgabe 5 – Rekombinationsprozesse

a) Die wichtigsten Rekombinationsprozesse

1. Störstellenrekombination (strahlend oder nicht-strahlend) $\propto n$
2. Rekombination freier Ladungsträger (strahlend) $\propto n^2$
3. Auger-Rekombination (nicht-strahlend) $\propto n^3$

Beschreibung der Ladungsträgerdichte als Funktion der Zeit (mit g =Generationsrate):

$$\frac{dn}{dt} = g - An - Bn^2 - Cn^3$$

b)

- Für geringe Ladungsträgerdichten $n < 10^{17}$: nicht strahlende Störstellenrekombination überwiegt, daher geringe Photoluminiszenz-Quantenausbeute (PLQY)

- Für Ladungsträgerdichte $n \sim 10^{18}$: strahlende Rekombination freier Ladungsträger überwiegt, daher hohe PLQY

- Für geringe Ladungsträgerdichten $n > 10^{19}$: nicht strahlende Auger-Rekombination überwiegt, daher niedrige PLQY

c) Aus der optischen Leistung, welche der strahlenden Rekombination entspricht, lässt sich die Ladungsträgerdichte n berechnen:

$$P_{opt} = Bn^2 \hbar \omega V \rightarrow n = 2,79 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

Mit $n=p$ und der Annahme des stationären Zustands gilt für Generation und Rekombination:

$$\frac{dn}{dt} = g - r = g - An - Bn^2 - Cn^3 = 0 \rightarrow g = An + Bn^2 + Cn^3 = 1,47 \cdot 10^{24} s^{-1} cm^{-3}$$

Da die Ladungsträger mittels Strom injiziert werden, kann der Strom zu:

$$I = e \cdot g \cdot V = 23,6 mA$$

berechnet werden.

b)

Für die Quantenausbeute gilt:

$$\eta = \frac{\text{strahlende Rekombination}}{\text{Summe aller Rekombinationen}} = \frac{Bn^2}{An+Bn^2+Cn^3} = 5,3\%$$

Übung 3

Aufgabe 1 – Lithographie

a) Aus der Bilanz der benötigten Ladung $A \cdot D = I \cdot t$ folgt die Zeitdauer $t = \frac{A \cdot D}{I} = 50,7 h$

b) Unter der Annahme quadratischer Pixel ergibt sich die Pixelanzahl durch $n_{Pix} = \frac{A_{belichtet}}{(100nm)^2} = 9,12 \cdot 10^{11}$. Dieser Wert wird mit der benötigten Zeitdauer pro Pixel multipliziert (bzw. durch die Frequenz geteilt) und ergibt eine Dauer von 25,3h.

Bedenkt man die nötige Ladungsdosis bei gegebenem Strom, so ergibt sich eine gewisse Verweildauer des Elektronenstrahls pro Pixel. Hier wird nämlich vereinfacht angenommen, dass ein Puls ausreicht, um die den Pixel vollständig zu belichten.

c) Die Zahl der nötigen Elektronen ergibt sich über die Ladung zu $n_e = \frac{A \cdot D}{e} = 1,1 \cdot 10^{17}$. Laut Aufgabenstellung ist dieser Wert gleich der Zahl der Photonen. Unter Berücksichtigung der Effizienz und der Tatsache, dass bei der optischen Lithographie die Probe bzw. Maske vollständig belichtet werden muss, muss die Lampe entsprechend $n_{ph} = 2,2 \cdot 10^{18}$ Photonen liefern. Aus der optischen Leistung ergibt sich die Belichtungsdauer zu $t = \frac{E_{ges}}{P_{opt}} = 25ms$.

Aufgabe 2 – Thermisches Verdampfen

a) Auflösen der gegebenen Gleichung nach p und Einsetzen der Werte ergibt einen Druck von $p = 6,76 \cdot 10^{-8} mbar$ (Umrechnung über Pa).

b) Der Yield (Ausbeute) des Vorgangs lässt sich über die aufgedampfte Fläche berechnen:

$$Y = \frac{A_{Probe}}{A_{ges}} = \frac{9 \cdot 4cm^2}{\pi r^2}$$

Die Gesamtfläche wird über die Kreisfläche des Verdampfungskegels berechnet zu $r = h \cdot \tan\theta$. $\Rightarrow Y = 3,46\%$

c) Zur Berechnung des Wertes des Goldes wird berechnet, welches Volumen an Material aufgedampft wird und die Masse entsprechend der Dichte berechnet.

$$V_{dampf} = 30nm \cdot A_{ges} = 3,12 \cdot 10^{-9}m^3$$

$$V_{vordampf} = 120s \cdot 0,05 \frac{nm}{s} \cdot A_{ges} = 0,624 \cdot 10^{-9}m^3$$

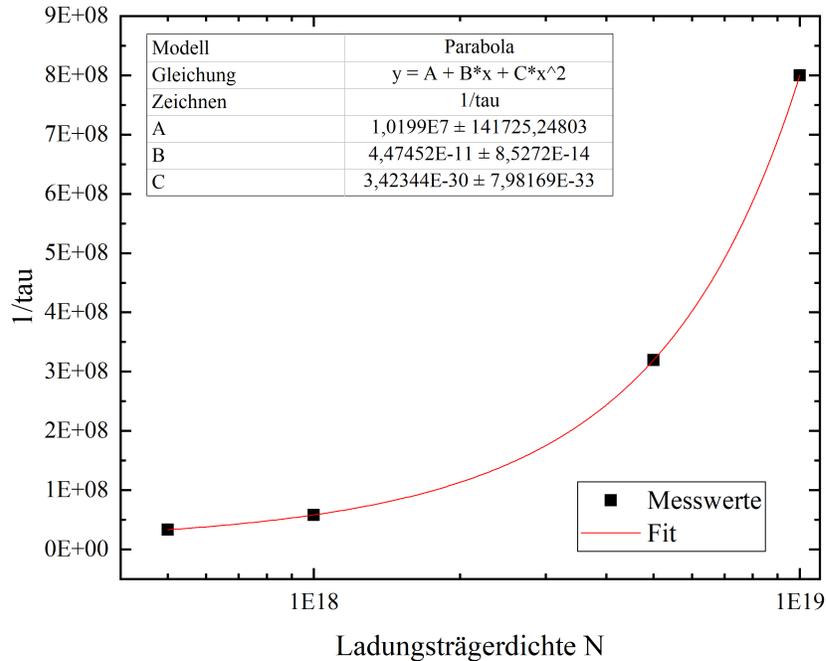
$$m_{ges} = (V_{dampf} + V_{vordampf}) \rho_{Au} = 72,3mg$$

Dies entspricht bei einem Goldpreis von 50\$ pro Gramm einem Wert von 3,62€, wovon ein Wert von 0,13€ auf der Probe landet.

Aufgabe 3 – Rekombinationsprozesse

a) Siehe Vorlesungsfolien Folien 3.8-3.10.

b) Durch Fit der Gleichung erhält man die Rekombinationskoeffizienten zu: $A = 1,0 \cdot 10^7 s^{-1}$, $B = 4,47 \cdot 10^{-11} cm^3 s^{-1}$, $C = 3,4 \cdot 10^{-30} cm^6 s^{-1}$.



c) Die strahlende, bimolekulare Rekombination ist dominant gegenüber der monomolekularen (trap-assisted nicht strahlender) Rekombination wenn gilt $AN < BN^2$ und dominant gegenüber der Auger Rekombination wenn gilt $BN^2 > CN$. Zusammenfassend und mit den Werten für die Rekombinationseffizienzen aus Teil b) ergibt sich für die Ladungsträgerdichte N :

$$\frac{A}{B} < N < \frac{B}{C}$$

$$2,22 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^{-3} < N < 1,32 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^{-3}$$

Aufgabe 4 – Elektronenverteilung im Halbleiter

a) Es sollen hier zunächst nur die Elektronen im LB ohne optische Übergänge betrachtet werden.

Es gilt bei moderater Anregung die Boltzmann-Näherung, d.h.

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{kt}\right) \text{ für } E - E_F \gg kT.$$

Die Elektronenverteilung berechnet sich als Produkt der Besetzungswahrscheinlichkeit und der Zustandsdichte zu

$$N(E) = D(E) \cdot f(E).$$

Im 3D-Volumenhalbleiter gilt die Zustandsdichte für Elektronen im LB:

$$D_c(E) = \frac{(2m_e^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} \sqrt{E - E_c} = c \cdot \sqrt{E - E_c}$$

$$N(E) = c \cdot \sqrt{E - E_c} \cdot \exp\left(-\frac{E - E_F}{kt}\right)$$

Das Maximum ergibt sich durch die Ableitung nach E und nach 0 gleichsetzen:

$$E = E_c + \frac{kT}{2}$$

b) Kleine Änderungen des Zusammenhangs zwischen Wellenlänge und Energie

$$\lambda = \frac{hc}{E_{ph}}$$

lassen sich durch das Differential annähern

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta E} \approx \left| \frac{d\lambda}{dE} \right| = \left| -\frac{hc}{E_{ph}^2} \right|$$

$$\Delta\lambda = \left| -\frac{hc}{E_{ph}^2} \right| \Delta E$$

$$\Delta\lambda = \lambda_0^2 \frac{3k_b T}{hc}$$

Die spektrale Breite berechnet sich damit zu

$$\lambda_0 = 870nm \rightarrow \Delta\lambda = 28nm$$

$$\lambda_0 = 1300nm \rightarrow \Delta\lambda = 63nm$$

$$\lambda_0 = 1550nm \rightarrow \Delta\lambda = 90nm$$

c) Äquivalent zu b) lässt sich der Zusammenhang der Wellenlängenänderung und der Änderung der Temperatur berechnen

$$\frac{d\lambda}{dE_g} = -\frac{hc}{E_{ph}^2}$$

Der Term wird mit $\frac{dE_g}{dT} = -4.5 \cdot 10^{-4} \frac{eV}{K}$ erweitert und führt zu

$$\frac{d\lambda}{dE_g} \frac{dE_g}{dT} = -\frac{hc}{E_{ph}^2} \frac{dE_g}{dT}$$

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{hc}{E_{ph}^2} \frac{dE_g}{dT} = 0,277 \frac{nm}{K}$$

Aus der Näherung $\frac{\Delta\lambda}{\Delta E} \approx \left| \frac{d\lambda}{dE} \right|$ folgt erneut

$$\Delta\lambda = \frac{d\lambda}{dT} \Delta T = 2,8 nm$$

Aufgabe 5 – Totalreflexion in einer LED

a)

Mit dem snellschen Brechungsgesetz ergibt sich für den Winkel der Totalreflexion an der GaAs-Luft Grenzfläche:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{1}{n_{GaAs}}\right) \approx 16^\circ$$

b)

Der Anteil der emittierten Leistung, der in den Raumwinkel emittiert wird, in dem das Licht Austreten kann, erhält man als Verhältnis der entsprechenden Fläche zur Gesamtfläche. Unter Verwendung der Notation in untenstehender Zeichnung und dem kritischen Winkel θ_c kann die Fläche über Integration in Kugelkoordinaten ermittelt werden:

$$A_{\theta_c} = \int_0^{\theta_c} 2\pi r \sin\phi r d\phi = 2\pi r^2 \int_0^{\theta_c} \sin\phi d\phi = 2\pi r^2 (1 - \cos\theta_c)$$

Daraus folgt die anteilig emittierte Leistung:

$$\frac{P_{austretend}}{P_{Gesamt}} = \frac{A_{\theta_c}}{A_{Gesamt}} = \frac{2\pi r^2 (1 - \cos\theta_c)}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} (1 - \cos\theta_c) \approx 0,02 = 2\%$$

D.h. lediglich 2% Prozent der emittierten Leistung verlässt die LED in vorwärtsrichtung! Daher ist ein Lichtmanagement zur Erhöhung der emittierten Leistung in LEDs unabdingbar.

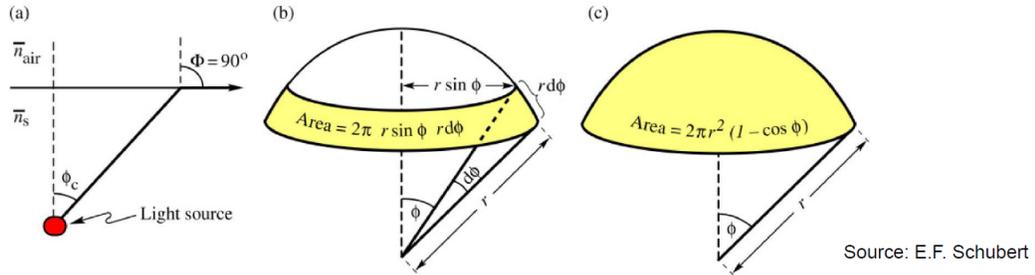


Fig. 5.3. (a) Definition of the escape cone by the critical angle ϕ_c . (b) Area element dA . (c) Area of calotte defined by radius r and angle ϕ_c .

Source: E.F. Schubert

c) Einige Mögliche Technologische Maßnahmen: Optimierte Geometrien, zB. Invertierte Truncated Pyramids. Auskoppeloptiken: Texturierte Oberflächen, Epoxy-Dome, Mikrolinsen-Array,... Details siehe Vorlesung.

Übung 4

Aufgabe 1 - Weiße LED I

Für das Anzahlverhältnis der Photonen vor Absorption durch den Phosphor, gilt: $m_1 + m_2 = 1$. Somit ergibt sich:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{m_2 \cdot \eta_2 \cdot h \frac{c}{\lambda_2}}{m_1 \cdot h \frac{c}{\lambda_1}} = \frac{(1 - m_1) \cdot \eta_2 \cdot \lambda_1}{m_1 \cdot \lambda_2} \stackrel{!}{=} 2$$

$$m_1 = \frac{\eta_2 \lambda_1}{2\lambda_2 + \eta_2 \lambda_1} = 0,237$$

Die Ausgangsleistung P_{out} lässt sich somit in abhängig von der Eingangsleistung P_0 schreiben als:

$$P_{out} = P_0 \eta_1 m_1 + \eta_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} P_0 \eta_1 m_2$$

Für den Gesamtwirkungsgrad η_{ges} ergibt sich damit:

$$\eta_{ges} = \frac{P_{out}}{P_0} = \eta_1 m_1 + \eta_1 \eta_2 (1 - m_1) \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 0,213 = 12,3\%$$

Aufgabe 2 - Weiße LED II

a) Die komplementären Wellenlängen lassen sich durch das CIE Farbdiaagramm bestimmen:

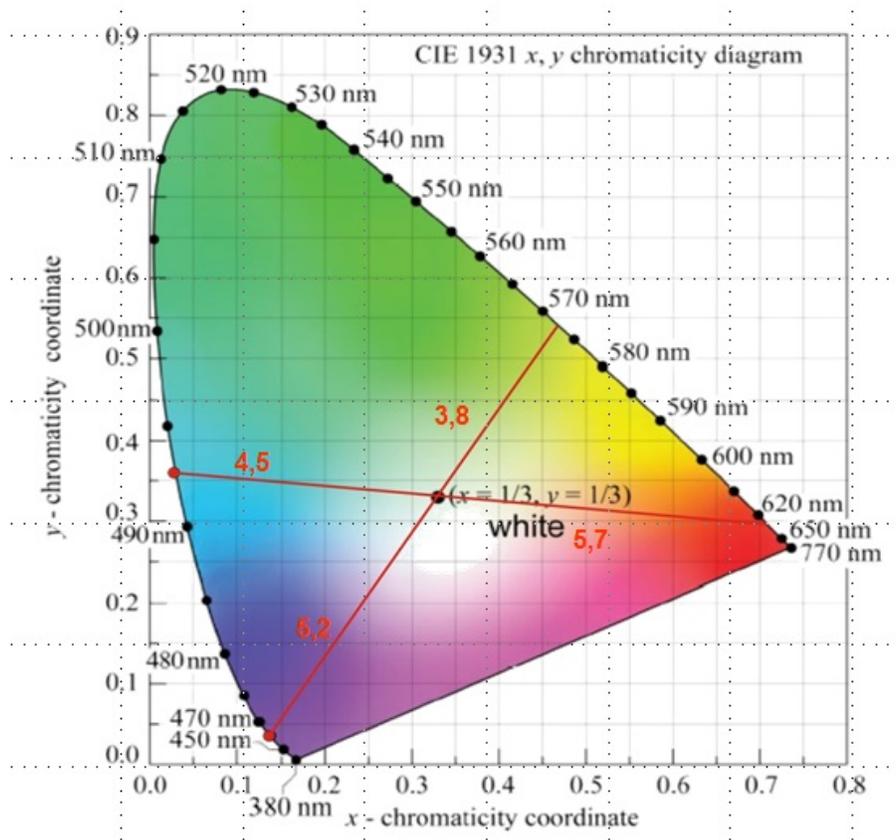


Figure 1: Komplementäre Wellenlängen zur Realisierung von Weißlicht LEDs.

Durch Ablesen aus dem Diagramm erhält man:

$$\lambda_{460nm, \text{komplementär}} = 573nm$$

$$\lambda_{492,5nm, \text{komplementär}} = 630nm$$

b) Abmessen der Abstände in obiger Zeichnung ergibt:

$$\frac{I_{460nm}}{I_{573nm}} \stackrel{!}{=} \frac{3,8}{5,2} = 0,73$$

$$\frac{I_{492,5nm}}{I_{630nm}} \stackrel{!}{=} \frac{5,7}{4,5} = 1,27$$

c) Durch das in b) bestimmte Verhältnis ergibt sich:

$$P_{460nm} + P_{573nm} = 1,73P_{573nm} \stackrel{!}{=} 1W$$

$$\begin{aligned} \implies P_{573nm} &= 578mW; & P_{460nm} &= 422mW \\ \implies P_{492,5nm} &= 441mW; & P_{492,5nm} &= 559mW \end{aligned}$$

d) Ablesen aus der $V(\lambda)$ Kurve ergibt die folgenden Empfindlichkeiten:

$$\eta_{460nm} = 41 \frac{lm}{W}$$

$$\eta_{492,5nm} = 157 \frac{lm}{W}$$

$$\eta_{573nm} = 642 \frac{lm}{W}$$

$$\eta_{630nm} = 184 \frac{lm}{W}$$

Die Lichtausbeute ergibt sich aus den jeweiligen Intensitäten multipliziert mit den Empfindlichkeiten:

$$\phi_{LED1} = \eta_{460nm} \cdot P_{460nm} + \eta_{573nm} \cdot P_{573nm} = 389lm$$

$$\phi_{LED2} = \eta_{492,5nm} \cdot P_{492,5nm} + \eta_{630nm} \cdot P_{630nm} = 169lm$$

e) Der Emitter mit $\lambda = 573nm$ liegt sehr nahe am Maximum der Hellempfindlichkeit des Auges. Daraus resultiert die deutlich höhere Lichtausbeute.

Aufgabe 3 - Spektren und Farbräume (an-)organischer LEDs

a) Spektren der beiden LEDs:

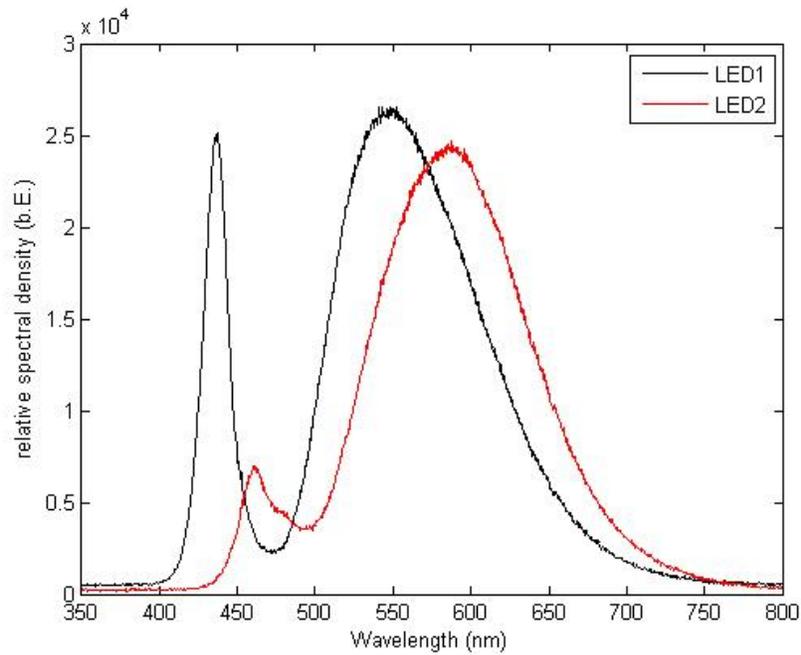


Figure 2: Spektrum einer kalten und warmen LED. LEDs mit hohem Blauanteil und hoher Farbtemperatur werden auch als kaltweiße LEDs bezeichnet. LEDs mit höherem gelb-orange Anteil und niedrigerer Farbtemperatur dagegen als Kaltweiß.

b) Mit dem Color Calculator lassen sich folgende Werte errechnen:

	Farbtemperatur (CCT)	Farbwiedergabeindex (CRI)
Anorganische LED1	4988	59
Anorganische LED2	3054	65
Organische LED1	2994	78
Organische LED2	3746	81

Table 3: Farbtemperatur (CCT) und Farbwiedergabeindex (CRI) für die verschiedenen Weißlicht LEDs.

Spektren der organischen LEDs:

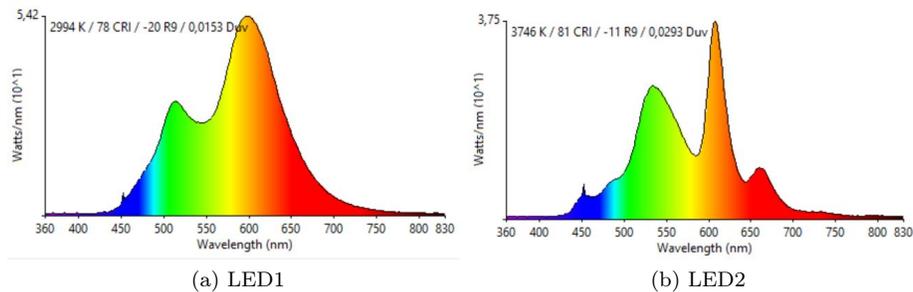


Figure 3: x-y Farbdiagramme der beiden LEDs.

- c) Die hohe Farbtemperatur der anorganischen LED1 kommt durch den hohen Blauanteil zustande. Die anderen LEDs haben stärkere Anteile im roten Spektralbereich, weshalb die Emission stärker einem Schwarzkörperstrahler mit einer niedrigeren Temperatur ähnelt.
- d) Spektren der Displays:

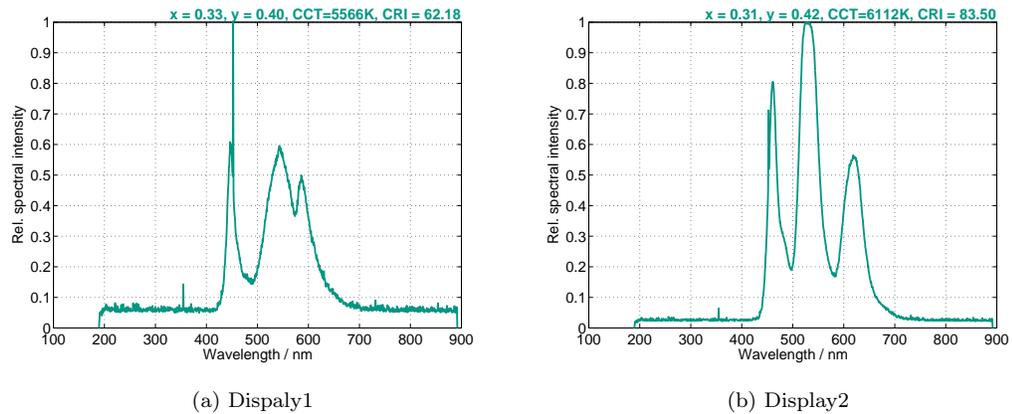


Figure 4: Spektren der Displays

Bei Display1 handelt es sich um das Weiß eines TFT LCD Displays. Man erkennt die typische Signatur einer blauen LED mit gelbem Phosphor. Diese Displays besitzen am Rand ein LED Array, das über die gesamte Displayfläche ein konstantes Weißlicht erzeugt. Farbfilter über den einzelnen Pixeln bestimmen den Farbeindruck. Die Helligkeit der einzelnen Pixel werden über zwei Polarisatoren und Flüssigkristalle gesteuert.

Beim zweiten Weiß Spektrum handelt es sich um ein Samsung Galaxy S5 mit AMOLED Display. Hier ist eine großflächige weiße OLED über den gesamten Displaybereich aufgedampft. Die Helligkeit kann direkt über den Strom durch

die OLED gesteuert werden. Dadurch erhält man einen höheren Schwarz-Weiss Kontrast. Der Farbeindruck wird ebenfalls über Farbfiltern über den einzelnen Pixeln bestimmt.

Aufgabe 4 - Wirtschaftlichkeit von Leuchtmitteln

Durch die angenommenen Werte errechnen sich die Stromkosten durch Multiplikation der Betriebsstunden mit dem Energieverbrauch und dem Strompreis. Man beachte, dass aufgrund der kurzen Lebensdauer der Halogenlampe insgesamt 4 Stück benötigt werden. Somit erhält man:

	Anschaffungskosten	Stromkosten	Gesamtkosten
Halogenlampe	6,00 €	83,95 €	89,95 €
Energiesparlampe	5,00 €	20,08 €	25,08 €
LED	7,00 €	16,43 €	23,43 €

Figure 5: Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Leuchtmitteln