

Verständnisfragen und Aufgaben zur Optischen Messtechnik  
Teil: Prof. Dr. R. Heilmann

### Grundlagen

1. Wie viele Photonen emittiert ein Laser mit einer Ausgangsleistung von 1 mW bei einer Emissionswellenlänge von 632,8 nm?
2. Die Umrechnung von Photonenenergien  $E$  in entsprechende Wellenlängen  $\lambda$  bereitet einige Mühe. Zeigen Sie, dass zur Vereinfachung der Umrechnung die Gleichung

$$\frac{\lambda}{\mu\text{m}} = \frac{1,240}{E / \text{eV}}$$

verwendet werden kann!

3. Worin besteht der Unterschied zwischen Fluoreszenz und Phosphoreszenz? Wie ist das atomphysikalisch zu erklären?
4. Worin besteht der Unterschied zwischen Wärmestrahlung und Lumineszenz?
5. Weshalb gibt es in Einzelatomen als mögliche Energiezustände Energieniveaus in Kristallen hingegen Energiebänder?
6. Worin bestehen die Unterschiede in den elektrischen und optischen Eigenschaften zwischen Leiter, Halbleiter und Isolator? Diskutieren Sie die Unterschiede anhand des Bänderschemas!

### Detektoren allgemein

7. Bei Zimmertemperatur ist es möglich, bei n-dotiertem GaAs durch Lichteinstrahlung Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband zu heben ( $E_g = 1,43 \text{ eV}$ ). Es ist aber nicht möglich, Elektronen von einem flachen Donator ( $E_D < 0,01 \text{ eV}$ ) ins Leitungsband zu heben. Warum? Was ist zu tun, damit dies möglich wird?
8. Weshalb entsteht bei Lichteinstrahlung in einem pn-Übergang ein Driftstrom - bei einem homogenen Halbleiter (z. B. einem Fotowiderstand) jedoch nicht?
9. Welchen Einfluss hat ein Vakuum auf den äußeren und den inneren Fotoeffekt?
10. Weshalb ist die Empfindlichkeit von Detektoren proportional zur Wellenlänge der detektierten Strahlung?
11. Weshalb ist der Quantenwirkungsgrad von Fotodetektoren in der Regel kleiner 1?
12. Wodurch unterscheidet sich das Rauschen, das von einer inkohärenten Strahlungsquelle ausgeht von dem eines Lasers? Unter welchen Bedingungen macht sich das bemerkbar?

13. Welchen Einfluss hat die Bandbreite eines Messsystems auf das Rauschen des Signals?
14. Wie lassen sich Schrotrauschen und Thermisches Rauschen reduzieren?
15. Was bedeutet NEP?
16. Was beschreibt die Größe  $D^*$ ?
17. Welche prinzipiellen Unterschiede gibt es zwischen Thermischen Detektoren und Photonendetektoren?
18. Weshalb misst man bei Bolometern die Widerstände mit einer Messbrücke?
19. Weshalb zeigen Thermistoren eine andere Temperaturabhängigkeit des Widerstandes als Metalle?
20. Was versteht man unter „negativ electrothermal feedback?“ Wie funktioniert es?
21. Wieso funktionieren pyroelektrische Detektoren nicht mit Metallen?
22. Worin liegen die Nachteile eines pyroelektrischen Detektors?
23. Welche Vor- und Nachteile haben Golay-Zellen?

### **Halbleiterdetektoren**

24. Weshalb ist bei extrinsischen Fotoleitern oft eine Kühlung notwendig?
25. Weshalb führt die Diffusion beim pn-Übergang nicht zur vollständigen „Neutralisation“ von Elektronen und Löchern, sodass schließlich nur noch ein neutraler Halbleiter übrig bleibt?
26. Weshalb wird eine Fotodiode als Sensor in Sperrrichtung und nicht in Durchlassrichtung betrieben?
27. Weshalb ist der Dunkelstrom einer Ge-Fotodiode höher als bei einer Si-Diode?
28. Weshalb verschiebt sich bei Bestrahlung die Kennlinie einer Fotodiode „nach unten“ zu negativen Strömen?
29. Wird beim Vergrößern der Sperrspannung die Fotodiode langsamer oder schneller?
30. Weshalb sind großflächige Fotodioden langsamer als kleinflächige?
31. Eine Fotodiode liefert bei 800 nm und einer Bestrahlungsleistung von  $2,8 \mu\text{W}$  einen Fotostrom von  $1 \mu\text{A}$ . Bestimmen Sie die Quanteneffizienz und die Empfindlichkeit! (Lösung:  $\eta = 0,56$ ,  $\mathcal{R} = 0,036 \text{ AW}^{-1}$ )

32. Mit welcher Spannung ist eine APD zu betreiben? Muss sie viel größer, etwas größer, etwas kleiner oder viel kleiner als die Durchbruchspannung sein?
33. Weshalb werden besonders helle Objekte in Digitalkameras unscharf abgebildet?
34. Warum kann mit EMCCD das SNR gegenüber herkömmlichen CCDs mit Verstärker verbessert werden?
35. Wodurch wird der Dynamikbereich des EMCCD begrenzt?
36. Ein pin-Fotodiode hat bei einer Wellenlänge von  $1,3 \mu\text{m}$  eine Quanteneffizienz von 0,5 und einen Dunkelstrom von  $I_d = 10 \text{ nA}$ . Die lichtempfindliche Fläche  $A$  ist  $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$  groß. Das Rauschen wird durch das Schrotrauschen bestimmt. Der Effektivwert des Rauschstromes ist gegeben durch  $I_{\text{sh}} = (2e\Delta f I_d)^{1/2}$ . Hierbei ist  $e$  die Elementarladung,  $\Delta f$  die Bandbreite und  $I_d$  der Gesamtstrom, der vom Dunkelstrom dominiert wird.
- a) Berechnen Sie die NEP =  $\Phi$  (S/N= 1), d. h. Fotostrom = Rauschstrom.  
(Lösung: Herleitung über Empfindlichkeit: Fotostrom  $I_{\text{ph}} = \Phi_{\text{ph}} \eta (e\lambda/hc) = I_{\text{sh}}$ . Daraus folgt  $\text{NEP} = \Phi_{\text{ph0}} = ((2e\Delta f I_d)^{1/2} hc) / (\eta e\lambda) = 1,08 \cdot 10^{-13} \text{ W}$  für  $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ .)
- b) Bestimmen Sie  $D^*$ !  
(Lösung  $D^* = 1,13 \cdot 10^{11} \text{ cm}(\text{Hz})^{1/2} \text{W}^{-1}$ )

## Vakuumdetectoren

37. Worin liegt der Vorteil von Halbleiterdetektoren gegenüber Vakuumdetectoren?
38. Worin liegt der Vorteil von Vakuumdetectoren gegenüber Halbleiterdetektoren?
39. Worin besteht der Unterschied zwischen Austrittsarbeit und Bandlücke?
40. Aus einer Silberoberfläche, die durch monochromatisches Licht der Wellenlänge  $150 \text{ nm}$  beleuchtet wird, werden Fotoelektronen ausgelöst. Wie groß ist die Geschwindigkeit der Elektronen, wenn der lichtelektrische Effekt bei Silber unterhalb von  $260 \text{ nm}$  einsetzt?
41. Wie kann die Austrittsarbeit von Metallelektroden abgesenkt werden?
42. Wodurch wird bei einer Mikrokanalplatte die Bildauflösung bestimmt? Wie lässt sich das Bild einer Mikrokanalplatte optoelektronisch weiterverarbeiten?
43. Wodurch wird der Dunkelstrom eines Vakuumdetectors bestimmt?
44. Ein Photomultiplier hat eine Verstärkung von  $V = 10^7$ . Die Fotokathode hat eine Quanteneffizienz von 0,1. Welche Photonenrate (Zahl der einfallenden Photonen pro Sekunde) erzeugt einen Strom von  $1 \text{ nA}$ ?  
(Lösung:  $n/\Delta t = 6250 \text{ s}^{-1}$ )
45. Ein Photomultiplier mit einer Quanteneffizienz der Kathode von 0,1 besitzt 14 Dynoden, die jeweils über einen Verstärkungsfaktor von 4 verfügen. Der

Anodenableitwiderstand beträgt  $50 \Omega$ . Welche Spannung fällt am Widerstand ab, wenn  $10^6$  Photonen pro Sekunde auf die Kathode auftreffen?  
(Lösung: Verstärkungsfaktor  $2,67 \cdot 10^8$ ,  $U = 214 \mu\text{V}$ )

46. Wozu benutzt man Streak-Kameras?

### **Lidar**

47. Um das Wievielfache fällt die Intensität eines Lidar-Signals, wenn sich der Abstand des rückstreuenden Objekts von 100 m auf 200 m erhöht?

48. Sind bei Lidar-Systemen prinzipiell alle Laserwellenlängen gleich gut geeignet?

49. Warum werden beim Überlagerungsempfang nicht die Einzelsignale, sondern nur das Schwebungssignal detektiert?

50. Welche Funktion hat die  $\lambda/4$ -Platte in Lidarsystemen?

51. Wie können mit einem Dauerstrich-Lidar ortsabhängige Messungen der Geschwindigkeit durchgeführt werden?

52. Das detektierte Signal eines Doppler-Lidars kann durch Erhöhung der Leistung des Lokallasers verbessert werden. Wodurch wird diese Methode der Signalverbesserung begrenzt?

53. Weshalb verwendet man bei gepulsten Lidarsystemen die Methode des Injection Seeding?

54. Wodurch wird bei gepulsten Doppler-Lidar-Systemen die örtliche Auflösung der Geschwindigkeitsmessung bestimmt?

55. Wie funktionieren Lidarsysteme mit Phasenkorelation, FM-CW-Lidar und DIAL?

### **Frequenzkamm**

56. Wie entsteht ein Frequenzkamm?

57. Wie lässt sich mit einem Frequenzkamm die Absolut-Frequenz einer optischen Strahlung bestimmen?

58. Weshalb kann ein Frequenzkamm zur Absolutmessung von optischen Frequenzen nicht mit  $\mu\text{s}$ -Laserimpulsen realisiert werden?

59. Wie lässt sich die Frequenz von Laserstrahlung verdoppeln? Warum ist dies für die Absolutmessung der Frequenz notwendig?

## **Laserkreisel**

60. Was beschreibt der Sagnac-Effekt?

61. Mit welcher Frequenzverschiebung ist in einem Ringlaser mit kreisförmigem Resonator (Durchmesser 20 cm, Wellenlänge  $1,55 \mu\text{m}$ ) zu rechnen, wenn sich dieser mit einer Drehzahl von  $0,1\text{s}^{-1}$  dreht?  
(81 kHz)

Hinweis: Weitere typische Prüfungsfragen haben folgende Strukturen:

Zeigen Sie, dass folgender Zusammenhang gilt: Formel...

Skizzieren Sie den Aufbau eines/einer.... Benennen Sie die einzelnen Komponenten! Welche Aufgabe hat Komponente X?