

Optoelektronische Messtechnik

Vorlesung | Nr. 7
Innerer PE | Dioden | Photoleiter

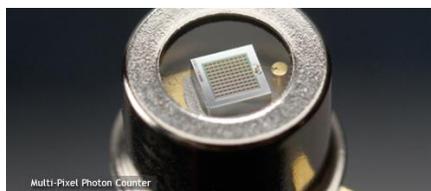
LTI | Lichttechnisches Institut



KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

www.lti.kit.edu

Quantendetektoren



Multi-Pixel Photon Counter

www.hamamatsu.de



TDI CCD sensor

www.hamamatsu.de

- Photonen generieren Elektronen und / oder Löcher
- Photosignal proportional der Photonenrate
- Beispiele
 - Photomultiplier Tube (PMT)
 - Dioden
 - Phototransistor
 - Solarzelle
- allgemeine Eigenschaften
 - schnell 🖱
 - empfindlich 🖱
 - Spektral selektiv 🖱
 - Temperatursensitiv 🖱

optoelektronische Empfänger



Quanten
Thermisch

Nächstes Thema!

äußerer PE		innerer PE		konstant		moduliert	
PMT	MCP	Dioden	Photoleiter	Thermo- elektrischer Effekt	Bolometer Effekt	Pyro- elektrischer Effekt	Thermo- pneumatischer Effekt

3 17.06.2016 Vorlesung | Dr.-Ing. Klaus Trampert | Nr. 7 | Innerer PE | Dioden | Photoleiter Lichttechnisches Institut

Innerer Photoeffekt

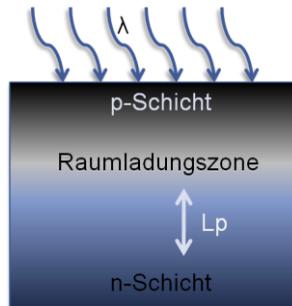




- Einfallende Strahlung wird im HL absorbiert und generiert Elektron-Lochpaare
- Inneres Feld über p-n Sperrschicht oder Metall-HL-Übergang trennt Elektronen und Löcher räumlich
- Ladungsträgertrennung
 - => elektrisches Feld
 - => Photostrom oder –spannung
- Anwendung
 - Empfänger
 - Solarzelle

4 17.06.2016 Vorlesung | Dr.-Ing. Klaus Trampert | Nr. 7 | Innerer PE | Dioden | Photoleiter Lichttechnisches Institut

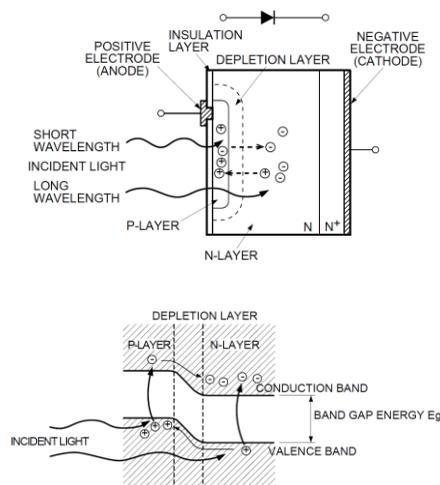
Photostrom in pn-Diode



$$I_{ph} = I_{ph,drift} + I_{ph,diff}$$

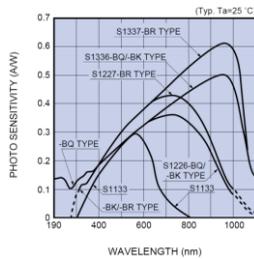
- **Feld**
 - p- und n- Gebiete quasineutral > Feld frei
 - Ladungsträger in RLZ getrennt
 - RLZ trägt Strom
- in der RLZ optisch generierten Träger liefern den Hauptbeitrag, den Driftphotostrom $I_{ph,drift}$
- die in den Neutralgebieten erzeugten Träger müssen erst in die RLZ diffundieren, um als Diffusionsphotostrom $I_{ph,diff}$ zum gesamten Photostrom beizutragen
- die Diffusionslängen sollten daher hinreichend groß sein, vergleichbar groß wie der reziproke Absorptionskoeffizient
- die RLZ sollte breit und oberflächennah sein – dünne P-Schicht!

Aufbau einer Diode



- Das Feld der RLZ treibt die durch Einstrahlung generierten Elektronen als Überschussminoritätsträger von der p- auf die n-Seite und die Löcher von der n-Seite auf die p-Seite.
- Im Außenkreis fließt ohne äußere Spannung U_0 ein Photostrom in Sperrrichtung.
- Im Leerlauf lädt sich die n-Seite negativ, die p-Seite positiv auf. Die Barriere erniedrigt sich von eU_D auf $e(U_D - U_{OL})$; U_{OL} Leerlaufspannung bei Einstrahlung.

spektrale Empfindlichkeit



$$s = \frac{I_{KL}}{\Phi_0} = \frac{e(1-\rho)\eta(\lambda)\lambda}{h \cdot c} \left(1 - \frac{e^{-a \cdot W_s}}{1 + a \cdot L_p}\right)$$

- Sie nimmt zu kürzeren Wellenlängen mit der (überschüssigen) Photonenenergie ab.
- Auch deshalb, weil die Träger bei Einstrahlung von kleinen Wellenlängen näher der Oberfläche generiert werden, wo sie verstärkt rekombinieren.
- Strahlung langer Wellenlängen dringt tiefer ein, kurzwelligere wird oberflächennah absorbiert
- Für die UV-Detektion flache p-n-Übergänge
 - Ionenimplantation
- Abnahme der Empfindlichkeit nach Maximum ist im Wesentlichen durch die Grenzenergie bestimmt.

optoelektronische Empfänger

Quanten

Thermisch

äußerer PE

innerer

Dioden in der Anwendung.

konstant

moduliert

PMT

MCP

Dioden

Photoleiter

Thermo-
elektrischer
Effekt

Bolometer
Effekt

Pyro-
elektrischer
Effekt

Thermo-
pneumatischer
Effekt

Photodioden



- Unterscheidung nach
 - HL-Material
 - Spektrale Empfindlichkeit
 - Größe
 - Elektrische Eigenschaften
 - Absolute Empfindlichkeit / Grenzfrequenz
 - Gehäuse
 - mechanische & thermische Beanspruchung
 - Aufbau | interne Filter | Optiken

Materialien von Photodioden



UV

- Si
0,2- 1,1
- GaP
0,19 - 0,55
- GaAsP
0,30 - 0,60
- SiC
0,21 - 0,38



VIS,
NIR

- Si
< 1,1
- GaAlAsSb
0,75 – 1,9
- Ge
0,8 – 1,7
- InGaAlAs
0,85 – 1,6
- InGaAsP
1,0 -1,6

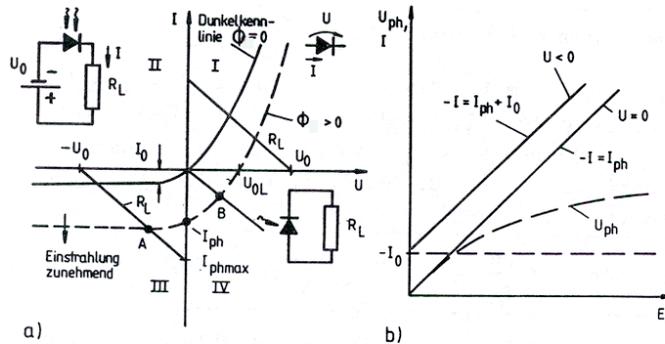


MIR,
FIR

- InAs
< 3,5
- InSb
<5,6
- HgCdTe |
PbSnTZe |
PbSnSe
< 15

Alle Wellenlängenangaben in μm

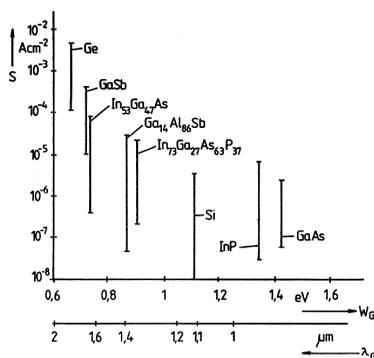
Dioden Kennlinie



- IV: Kurzschluss- und Leerlauf-betrieb (Photozelle) und III: Sperrbetrieb (Photodiode) eines bestrahlten p-n-Übergangs

- Kurzschluß-Photostrom wächst linear mit der Bestrahlungsstärke, Leerlauf-Photospannung logarithmisch mit der Bestrahlungsstärke

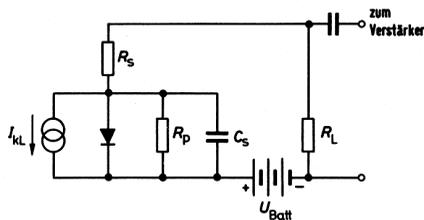
Dunkelstrom



Dunkelstromdichten von p-n-Übergängen bei $T = 300$ K

- Dunkelstrom = i.W. thermischer Sperrsättigungsstrom
- Sperrsättigungsstrom proportional $\exp(-E_G/kT)$
- Weitere
 - Tunnelströme durch die Sperrschicht
 - Leck-Ströme auf der Oberfläche

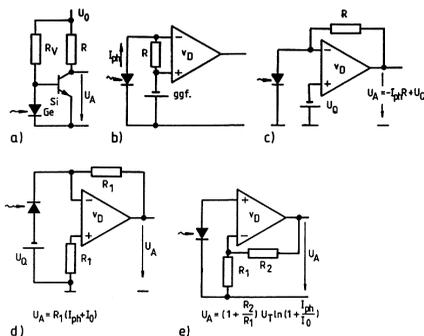
Zeitkonstante einer pn-Diode



$$f_3 = \frac{1}{2\pi\tau_3} = \frac{1}{2\pi C_S [R_s + R_L (1 + R_s / R_p)]}$$

- Dominate Grenz Frequenz $f =$ Umladezeit τ_3 der Sperschichtkapazität C_S
 - $C_S = 1 - 10 \text{ pF}$
 - $R_L = 50 - 100 \Omega$
 - $\tau_3 = 50 \text{ ps} - 1 \text{ ns}$
- Der kleine Serienwiderstand R_s der Bahn und Kontaktierung ist ebenso wie der sehr große Parallelwiderstand R_p (Innenwiderstand) hier i.d.R. vernachlässigbar.
- Insgesamt zeigt bei modulierter Einstrahlung die Photodiode Tiefpassverhalten mit der Zeitkonstanten
- $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$.
- Sie ist im Vergleich zum Photoleiter erheblich schneller.

Beschaltung von Photodioden



- a) Photoschaltverstärker: Bei Unterschreitung einer gewissen Bestrahlungsstärke schaltet Transistor durch.
- b) Photodiode wirkt mit kleinem Lastwiderstand $R_L \ll R_p$ als Stromgenerator, Spannungsabfall über kleinem Lastwiderstand wird verstärkt bzw.
- c) Strom-Spannungswandlung mit arbeitspunktunabhängigem Transimpedanzverstärker (Quasikurzschluss!)
- d) dto, aber mit Vorspannung und folglich Dunkelstrom I_0 .
- e) Photodiode wirkt mit großem Lastwiderstand $R_L \gg R_p$ als Spannungsgenerator, realisiert mit Elektrometerverstärker - logarithmisches Verhalten.

Stoßionisierung APD

- Elektron (Loch) eines bei a (b) erzeugten Elektron-Lochpaares wird beschleunigt und erzeugt bei der Bewegung in der Feldzone in Richtung vom p- ins n-Gebiet (vom n-Gebiet ins p-Gebiet) durch Stoßionisation neue Elektron-Lochpaare.

Zunahme der Elektronen

$$dn = \alpha_n \cdot n \cdot dx$$

Zunahme der Löcher

$$dp = \alpha_p \cdot p \cdot dx$$

Ionisierungskoeffizient für Elektronen bzw. für Löcher, abhängig vom Material und der Feldstärke F

$$\alpha_n = \alpha_{n,\infty} e^{-E_n/F}$$

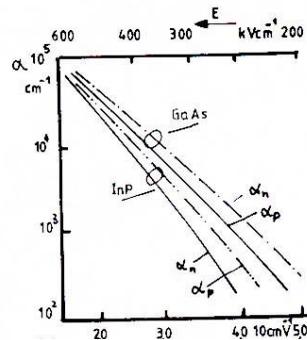
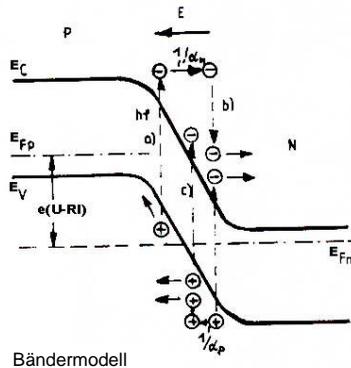
$$\alpha_p = \alpha_{p,\infty} e^{-E_p/F}$$

Generationsrate durch Stoßionisierung - zusätzlich in Kontinuitätsgleichung zu berücksichtigen

$$G(x) = \alpha_n n(x) \cdot v_n + \alpha_p p(x) \cdot v_p$$

$$\left(-\right) \frac{1}{e} \frac{dj_{n(p)}}{dx} + G(x) + g(x) = 0$$

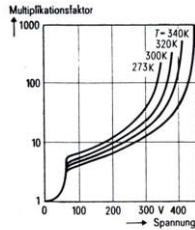
Interne Lawinenverstärkung - APD



Ionisierungskoeffizienten von GaAs und InP als Funktionen der el. Feldstärke

- Lawinen-Photodiode – Photodiode auf Homo- oder Hetero-pn, -pin, p⁺p⁺n, -MS-Basis, bei der durch Lawinenvervielfachung in der Sperrschicht hoher Feldstärke (10⁵ V/cm) eine innere Verstärkung erfolgt: $I_{ph} = M \cdot I_{ph} (M = 1)$

Verstärkung der APD



$$M \approx \frac{1}{1 - \left(\frac{R \cdot I}{U_{Br}}\right)^m} \approx \frac{1}{1 - \left(1 - m \frac{R \cdot I}{U_{Br}}\right)} = \frac{U_{Br}}{mR \cdot I}$$

$$I = M \cdot I_{ph} \Rightarrow$$

$$M = \sqrt{\frac{U_{Br}}{mR \cdot I_{ph}}}$$

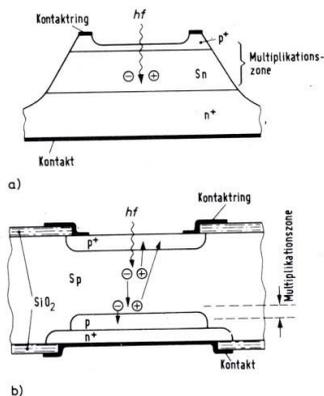
$$I = \sqrt{\frac{U_{Br}}{mR} I_{ph}}$$

- Empirischer Ansatz für die innere Verstärkung; $\alpha_n = \alpha_p$

$$M = M_n = M_p = \frac{1}{1 - \left(\frac{U - R \cdot I}{U_{Br}}\right)^m}$$

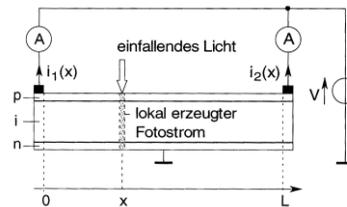
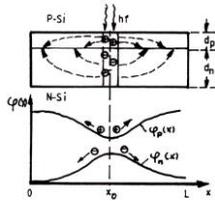
- U_{Br} Durchbruchspannung, $m = 1,4 - 4$ für Si, $2,5 - 8$ für Ge
- Nur für kleine Ströme I , so dass $RI \ll U$, und Spannungen $U < U_{Br}$ ist der verstärkte Strom $I = M I_{ph}$ proportional dem Photostrom und somit der Strahlungsleistung – linearer Empfänger.
- Wird $U \approx U_{Br}$ eingestellt, so wird M umgekehrt proportional I und $I \sim I_{ph}^{1/2}$, die APD also nichtlinear:

Aufbau der APD



- Lawinendioden mit ähnlicher Struktur wie PIN-Dioden mit breiter schwach dotierter Zone, nahe der Durchbruchspannung betrieben.
 - Mesastruktur: Zur Vermeidung von Randedurchbrüchen wird ein Guard (Schutz)ring in Kontakt mit einer hoch dotierten Zone gebracht
 - Planare p+spn+ Struktur
- Kleine aktive Flächen mit 50 – 700 μm Durchmesser
- Materialien: Si bis 0,85 μm , III-V-Halbleiter für den 1,3 – 1,55 μm Bereich
- Einsatz vor allem in der optischen Nachrichtentechnik
 - Schnell
 - verstärkend
 - leider nicht sonderlich linear

Positionempfindliche Dioden



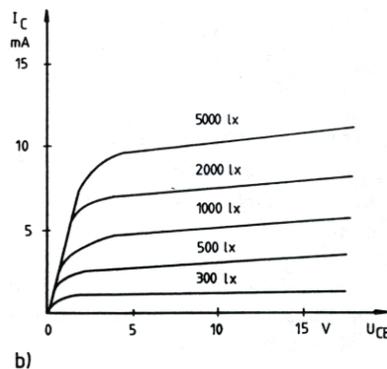
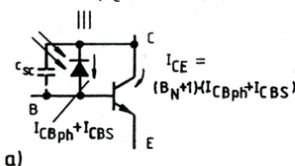
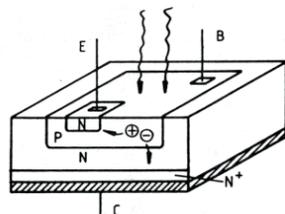
- Durch scharf gebündelten Lichtstrahl bei x erzeugter Photostrom i_{hv} teilt sich in einen Strom $i_1(x)$ und $i_2(x)$ auf, abgenommen an den Orten $x=0$ bzw. $x=L$; diese Ströme fließen über das p-Gebiet mit spezif. Widerstand R' .

- Es gilt: $R' \cdot x \cdot i_1 = R'(L-x)i_2 \Rightarrow$

$$x = \frac{i_1}{i_1 + i_2} L \Rightarrow x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2} \right) L$$

- ausgewertet mit Stromsummen und Stromdifferenzsignal
- Auflösungsvermögen etwa $10 \mu\text{m}$

Photobipolartransistor



- In Sperrrichtung gepolte Kollektor-Basisdiode wird bestrahlt
- Die optisch generierten Ladungsträger bewirken einen zusätzlichen Sperrstrom
- Potentialbarriere über B-C wird abgesenkt =>Emitterstrom erhöht.

Verstärkung des Phototransistors

- Ersatzschaltbild: Photodiode mit Quellstrom $I_{CB,ph}$ parallel zum Kollektor-Basisübergang, über den auch der Dunkelstrom fließt:
 $I_{CB,s} = \text{Reststrom } I_{CB,0}$ bei üblicherweise fehlendem Basisanschluss

$$I_C - (I_{CB,ph} + I_{CB,0}) = B \cdot (I_{CB,ph} + I_{CB,0}) \Rightarrow$$

$$I_C \approx (B + 1)I_{ph}$$

$$U_{CE} = U_0 - R_L \cdot I_C$$

B – Stromverstärkung
in Emitterschaltung

- Da B eine Funktion von I_C und damit auch eine von I_{ph} ist, ist der Phototransistor kein linearer Empfänger.
- Steuergröße ist hier die Beleuchtungsstärke.
- Phototransistor besitzt eine wesentlich größere Stromempfindlichkeit als die Photodiode wegen der Verstärkung $B \gg 1$

optoelektronische Empfänger

Quanten

Thermisch

äußerer
PE

innerer
PE

konstant

moduliert

Nächstes Thema!

PMT

MCP

Dioden

Photoleiter

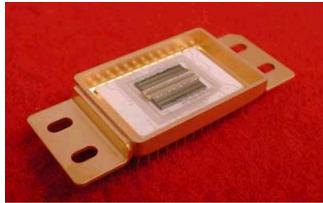
Thermo-
elektrischer
Effekt

Bolometer
Effekt

Pyro-
elektrischer
Effekt

Thermo-
pneu-
matischer
Effekt

Photoleiter oder Photowiderstand



PbS-Array mit 256 Elementen

- flacher Halbleiterwiderstand ohne Sperrschicht mit zwei ohmschen Kontakten an den Enden
- Funktion
 - Innerer Photoeffekt
 - Widerstand R erniedrigt sich durch Absorption von Strahlung
 - Eigen-, Störstellen- oder Intradband-Photoleitung
- Ausleseprinzip
 - Stromkreis mit Spannungsquelle & Photowiderstand
 - Erfassung des Signals als Stromänderung

Materialien

- Intrinsische Photoleiter: CdS, CdSe, PbS, PbSe, InSb, $Hg_{1-x}Cd_xTe$
- meist polykristallin, Widerstand von Barrieren an Korngrenzen durch Bestrahlung i.d.R. stärker erniedrigt als der vom Volumen
- CdS
 - typisch $100\text{ M}\Omega$ Dunkelwiderstand und $1\text{ k}\Omega$ Hellwiderstand bei 100 lx
 - $G \approx 10^3 - 10^4$,
 - $\tau \approx 50\text{ ms}$
 - spektrale Empfindlichkeit maximal bei 600 nm
 - u.a. für Belichtungsmessung
- PbS
 - $\tau \approx 100\text{ }\mu\text{s}$
 - rel. hohe Detektivität im NIR – Empfindlichkeit
 - maximal bei $2,5\text{ }\mu\text{m}$ (300K) bzw. $2,8\text{ }\mu\text{m}$ (77K)
 - zum Empfang des $2,7\text{ }\mu\text{m}$ – Bandes von H_2O und CO_2 in heißen Kohlenwasserstoffabgasen

Materialien

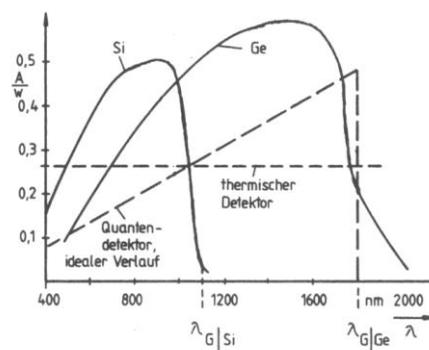
■ InSb

- $\tau \approx 1 \mu\text{s}$
- Empfindlichkeit maximal bei $6,8 \mu\text{m}$ (300 K) bzw. $5,3 \mu\text{m}$ (77 K)

■ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

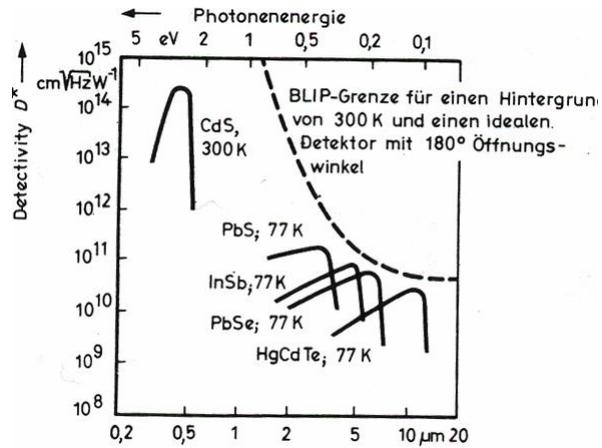
- lückenlos mischbar aus HgTe und CdTe mit Bandabständen $< 0,1 \text{ eV}$, schwierig die Einstellung niedriger Gleichgewichtsträgerdichten, muss gekühlt werden
- $\tau \approx 100 \text{ ns}$
- Empfindlichkeit maximal im Bereich von $8 - 20 \mu\text{m}$
- wird fast die BLIP-Grenze erreicht (BLIP – background limited infrared photodetector)

Stromempfindlichkeit von Photoleitern



- von Ge und Si, verglichen mit thermischen Empfänger und idealem Quantendetektor ohne innere Verstärkung
- λ_G Grenzwellenlänge

Detektivität intrinsischer Photoleiter



BLIP – background limited infrared photodetector