ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

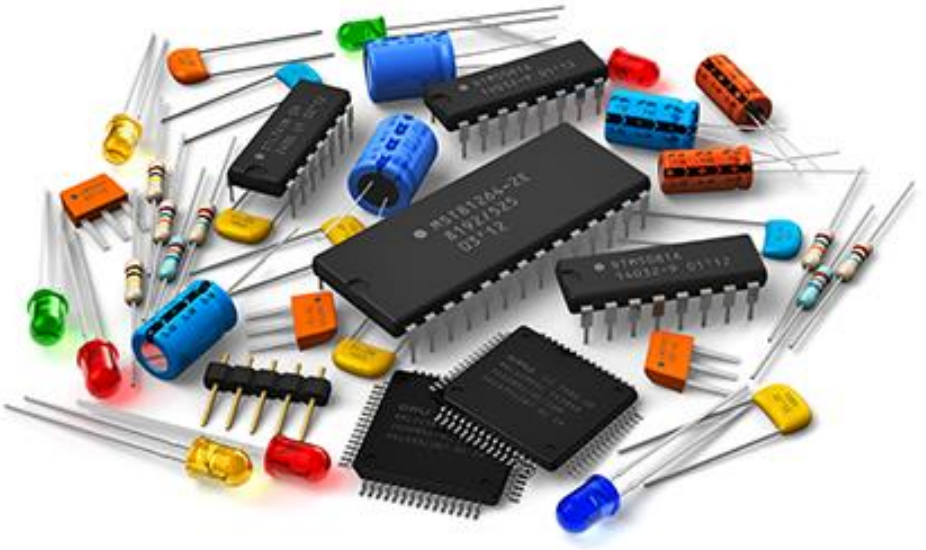
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika

KET/FYE



Optoelektronika – opticko-elektrické převodníky

Přednáška 13

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

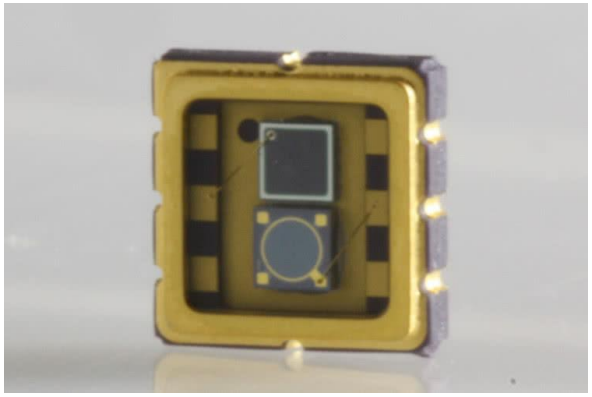
- Dozvíte se, proč fotorezistor mění svůj odpor s osvětleností.
- Zjistíte, za jakých podmínek se fotodioda chová jako zdroj.
- Dozvíte se, jaký je rozdíl mezi fototranzistorem a běžným bipolárním tranzistorem.
- Zjistíte, jaký maximální výkon lze získat ze solárního článku.
- Zjistíte, co je optron a k čemu se používá.
- Dozvíte se, jak funguje fotonásobič a jaké je jeho použití.

Opticko-elektrický převodník

- **fotodetektor x převodník** → není to úplně stejné

- **fotodetektor – důležitá citlivost**
  - převod světelného záření na elektrický signál
  - záření působí na vodivost – fotorezistor, fototranzistor, fototyristor

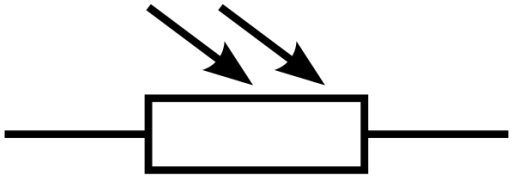
- **převodník – důležitá účinnost**
  - vytváří fotoelektrické napětí – fotodioda, solární články





Fotorezistor

- není přímo převodník – **pouze detektor**
- **velikost odporu se mění s osvětlením**



- **funkce závisí na šířce zakázaného pásu a vlnové délce dopadajícího záření** – 2 případy
  - foton prochází – není pohlcen
  - foton předává energii
    - excitace elektronů z valenčního pásu do vodivostního
    - změna koncentrace nosičů

$$\frac{hc}{\lambda} < E_g$$

$$\frac{hc}{\lambda} > E_g$$

- **změna koncentrace nosičů – změna vodivosti**

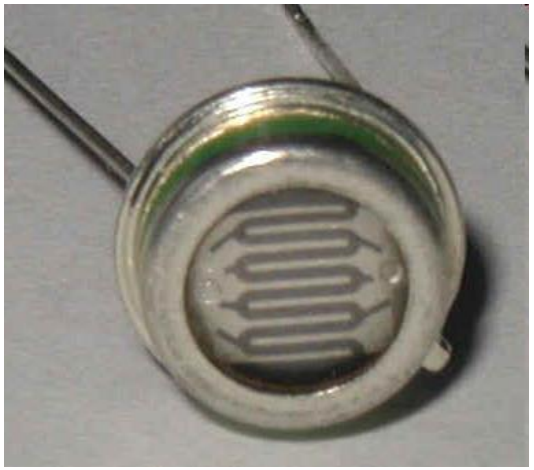
- světlem vybuzené nosiče – vznik nerovnovážných nosičů
  - rekombinace nosičů po ukončení působení světla
- **významná změna vodivosti způsobená světlem**

$$\gamma = en\mu_n + ep\mu_p \qquad \Delta\gamma = e\Delta n\mu_n + e\Delta p\mu_p \qquad \Delta n = \Delta p$$

$$\Delta n = G\Delta\tau \qquad \Delta\gamma = e\left(\mu_n + \mu_p\right)\Delta n$$

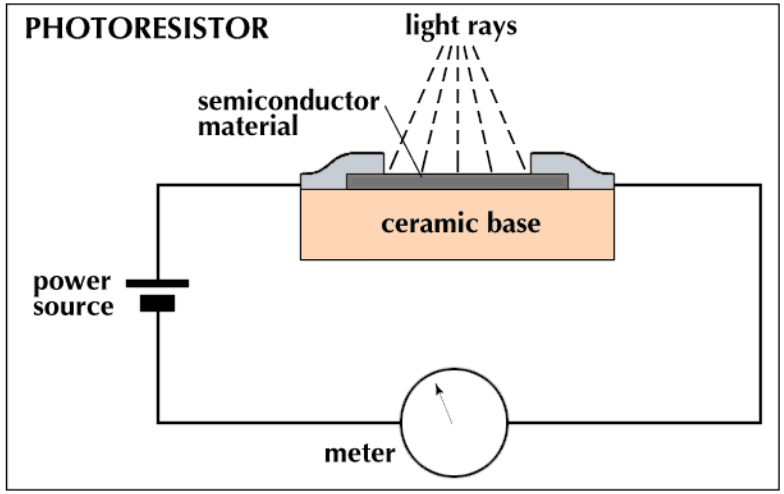
$$\boxed{\Delta\gamma = e\mu G\Delta\tau}$$

$\mu\Delta\tau$ – činitel jakosti fotocitlivých polovodičů



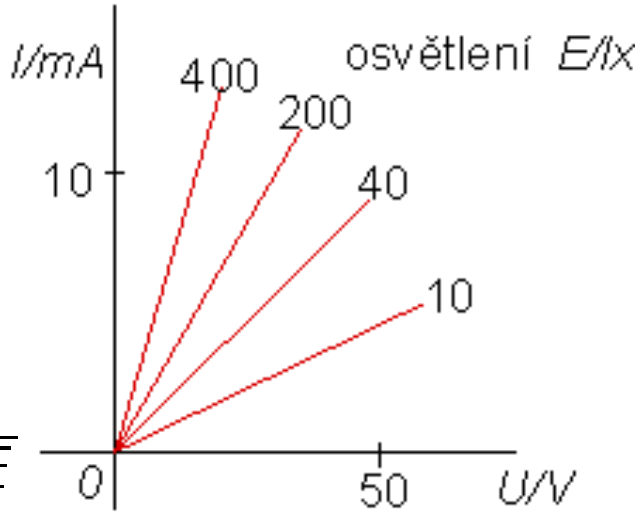
G – generace (koncentrace nosičů za jednotku doby) – souvisí s intenzitou dopadajícího záření

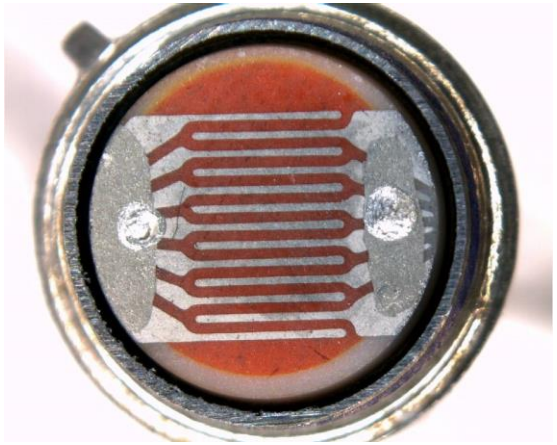
$\Delta\tau$ – doba života (jak dlouho vydrží v excitovaném stavu)







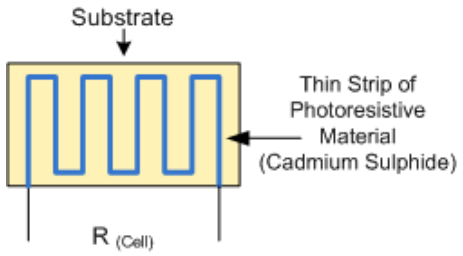


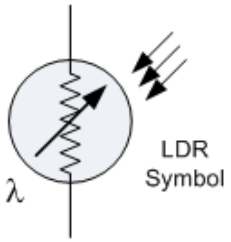


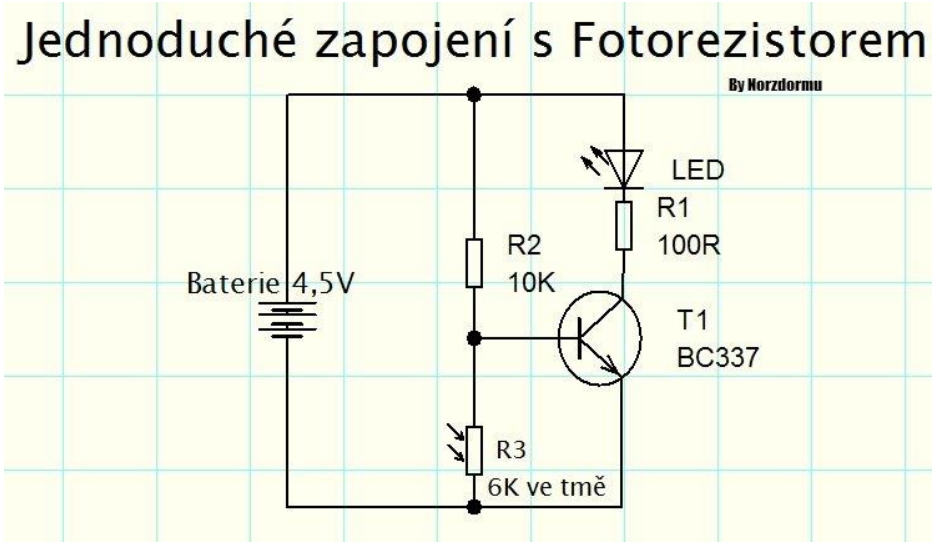
Princip činnosti:
https://www.youtube.com/watch?v=ilN8XIK77dc

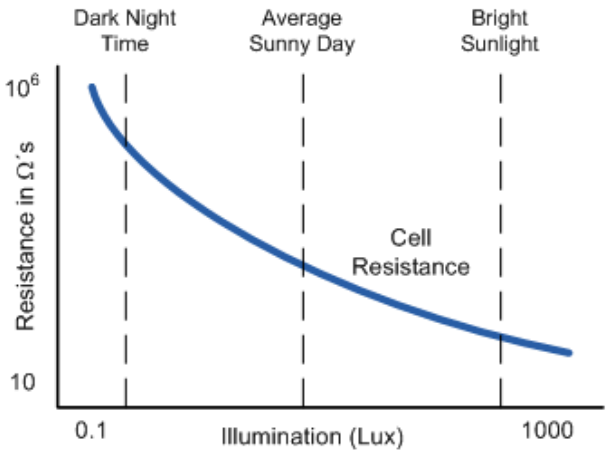
- **fotoelektrický zisk – důležitý konstrukční parametr**
  - U – napětí na elektrodách
  - L – vzdálenost elektrod

$$G_f = \mu\tau\frac{U}{L^2}$$

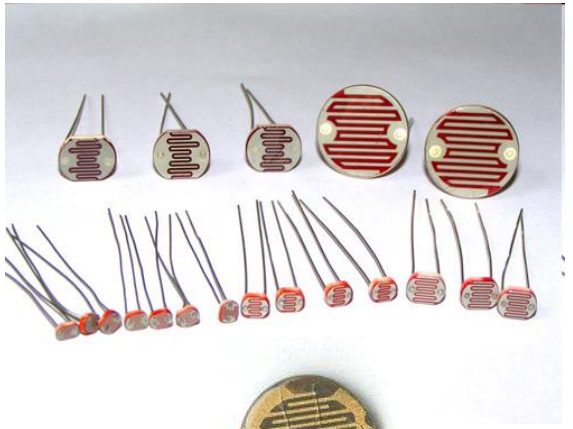








- **požadavky**
  - **nekonečný odpor pro E=0 lx (tma)** – minimální proud (I=0)
  - vysoká pohyblivost – velký činitel jakosti



- **reálný fotorezistor**
  - **konečný odpor pro E=0 lx** – protéká proud
  - ztráta citlivosti



- **použité materiály** – monokrystaly a polykrystaly
  - skupina II.A a VI. B – CdS, CdSe, ZnS, PbO

$$E_g > \frac{hc}{\lambda} = \frac{1{,}24}{\lambda_{red}} = \frac{1{,}24}{0{,}7} = 1{,}7eV \rightarrow CdS$$

infračervené detektory → větší vlnová délka → E_g = 0,6 eV

Fotodioda

- **polovodičová součástka založena na PN přechodu**
  - skutečný opticko-elektrický převodník

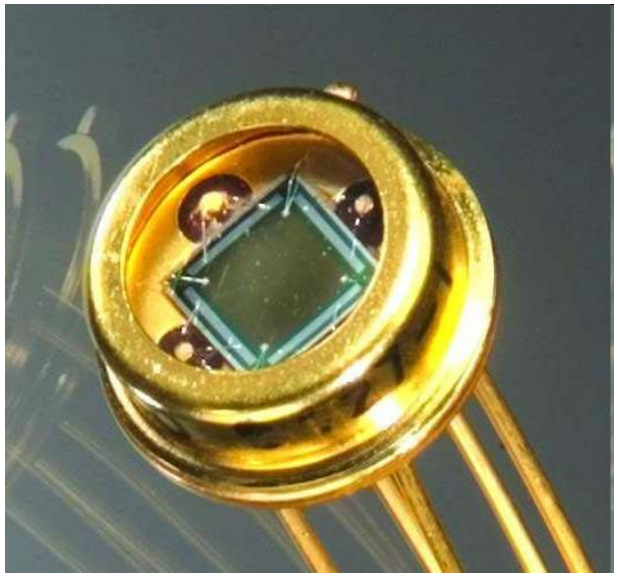


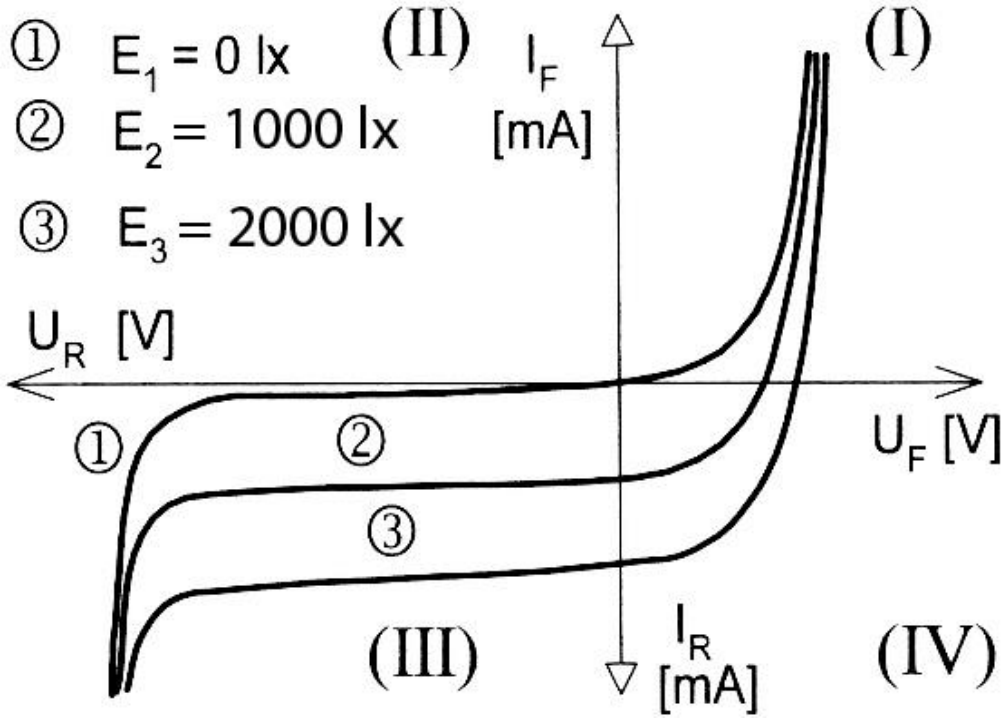
- **energie fotonu musí být větší než energie zakázaného pásu**
  - elektron bude excitován energií fotonu
  - vznik páru elektron-díra vlivem absorbce světelného kvanta
  - **vnitřní fotojev**
- **vznik pouze lokálního páru elektron-díra – nedochází k rekombinaci**
  - **oddělení nosičů PN přechodem**
  - **generované elektrony přechází do N**
  - **generované díry přecházejí do P**

$$\frac{hc}{\lambda} > E_g$$

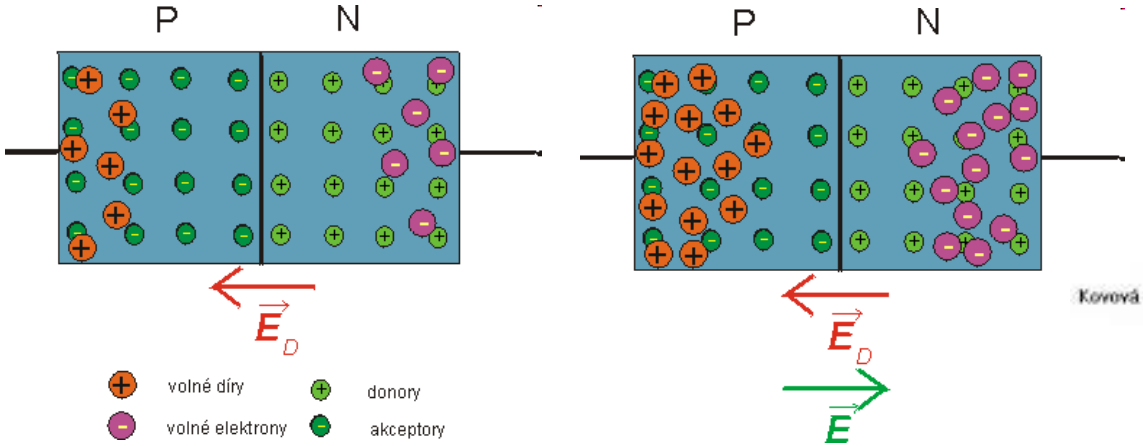
- polarita na PN přechodu – lze odebírat energii – chová se jako zdroj
  - typ N – mínus
  - typ P - plus

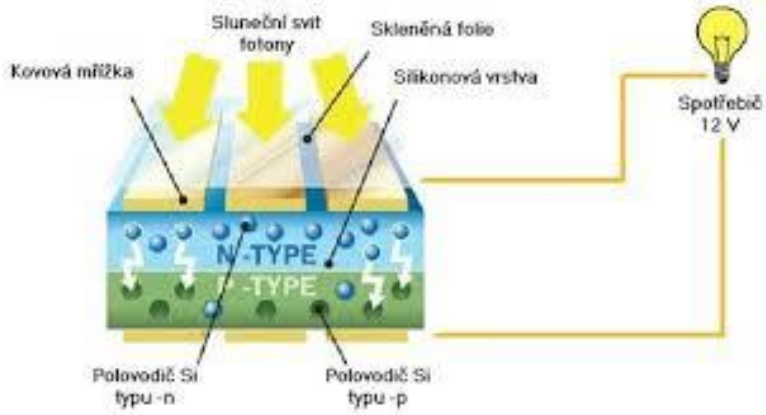
- **V-A charakteristika**
  - usměrňovací dioda – I. a III. kvadrant – vždy jako spotřebič
  - **fotodioda**
    - I. a III. kvadrant – spotřebič
    - IV. kvadrant – zdroj



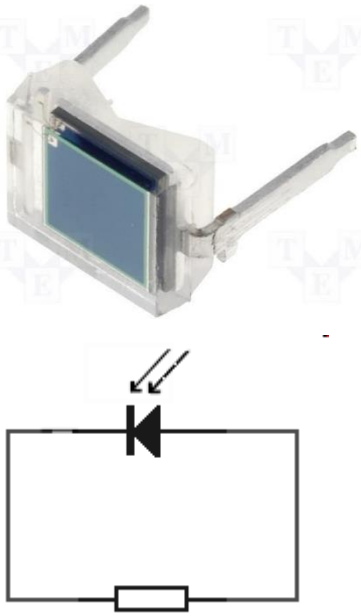


- **IV. kvadrant** – záporný výkon
  - **zdroj fotoelektromotorického napětí**
  - difúze většinových nosičů přes PN přechod – snížení potenciálové bariéry (difúzní napětí) o hodnotu fotoelektromotorického napětí
  - **vznik nové dynamické rovnováhy – tzv. hradlový režim**





- **IV. kvadrant**
  - připojenou zátěží prochází proud
  - **nutná optimalizace zatěžovacího odporu – dosažení největšího možného výkonu**
  - aplikace – solární články



- optimální výkon – lze zvolit zatěžovacím odporem

$$P_V = U_P I_P$$

  - odebíraný výkon - maximální
  - příkon

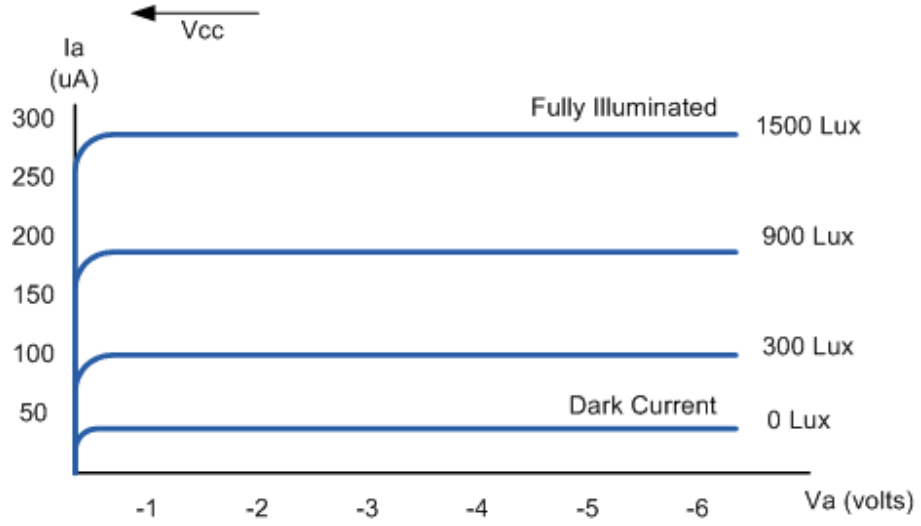
$$P_P = \int_0^{U_0} i\,du$$

  - účinnost

$$\eta = \frac{P_V}{P_P} < 1 \quad cca\ 30\,\%$$

- **III. kvadrant** – odporový režim (pasivní režim)
  - odporová fotodioda
  - fotodetektor – detekce světla

- **proud za tmy (E=0 lx) – dán sytným proudem**
  - fotodioda nižší proud než fotoodpor
  - tvoří tzv. pozadí – určuje citlivost detekce
  - čím menší proud za tmy, tím lepší citlivost



Princip činnosti:
https://www.youtube.com/watch?v=8k9UIlwo7W4

Solární (fotovoltaický) článek

- **princip objeven 1839** – E. Becquerel
- fotovoltaický efekt 1877 na selenu – W. G. Adams a R. E. Day
- **solární článek 1883 - Fritts**
- křemíkový solární článek 1941 – R. S. Ohl
- **současná podoba solárního článku z roku 1954** – Pearson, Chapin, Fuller (Bell Laboratories)

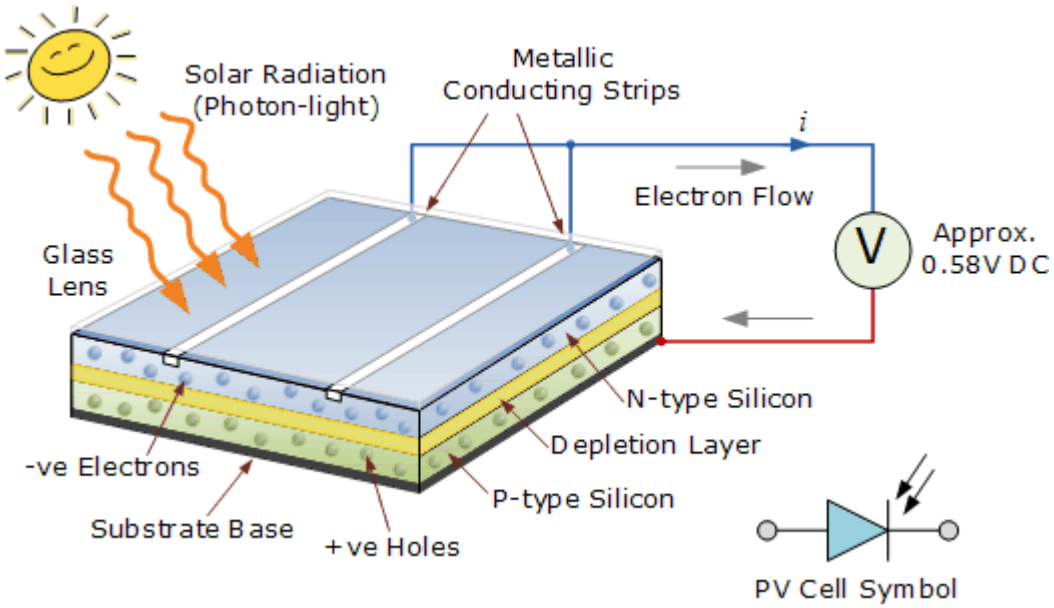
- **největší problém - účinnost**
  - 1883 – 1%
  - 1954 - 4,5 % až 6%
  - 2018 – cca 40% (závisí na typu)



- **zpracování okamžité světelné energie**
  - vznik pomocí termonukleární reakce
- **uvolnění energie sloučením – rozdíl proti štěpení jádra**
  - chemické reakce
- **energie získaná přeměnou ztracené hmoty**
  - ztráta hmoty při sloučení

$$H + H \Rightarrow He$$

$$\Delta m = 2m_H - m_{He}$$





$$H + H \Rightarrow He \qquad \Delta m = 2m_H - m_{He}$$

$$2m_H > m_{He}$$

$$E = \Delta m c^2$$

$$\Delta m = 10^3\, kg \quad za\ 1s \qquad c^2 = 9 \cdot 10^{16}\, m^2 / s^2$$

$$P = \frac{E}{t} = \frac{\Delta m c^2}{t} \approx 10^{20}\, W$$

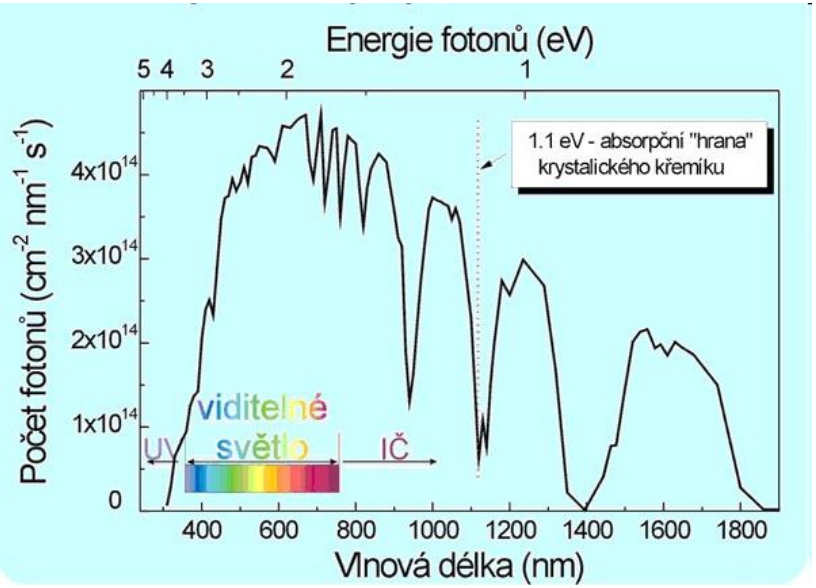
- **výkon vyzářen do plochy** – hustota výkonu
  - **dopadající výkon na povrch Země – velice nízká hodnota**
  - **výkon snížen o ztráty v atmosféře**
    - cca 300 W/m^2 - absorbce
    - cca 100 W/m^2 - rozptyl
  - velice malá hustota výkonu – závisí na průhlednosti atmosféry
- **články vyráběny z křemíku**
  - **není vhodný materiál** – minimální energie 1,12 eV → vlnová délka 1,1 µm
  - **křemík nezachycuje celé spektrum vlnových délek – max. 1,1 µm**
  - je dobře technologicky zvládnutý

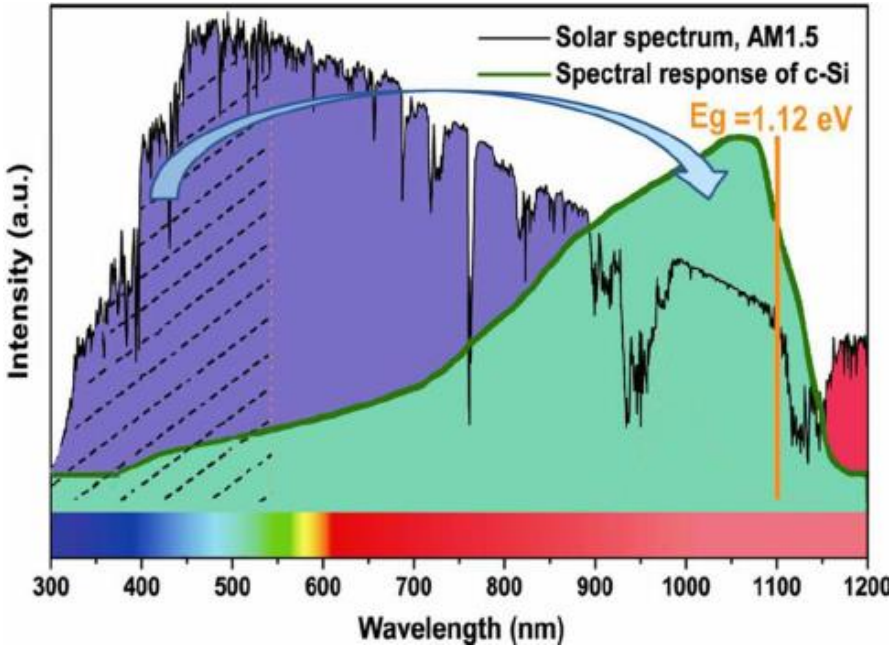
R – vzdálenost Země od slunce

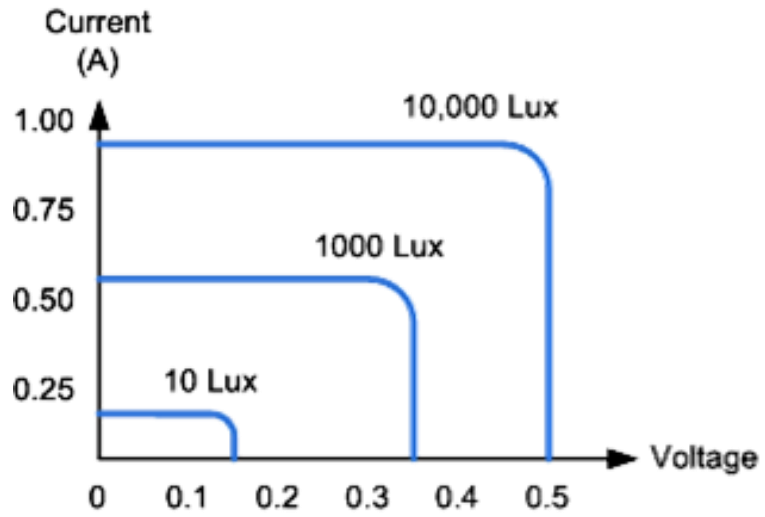
(cca 150 mil. km)

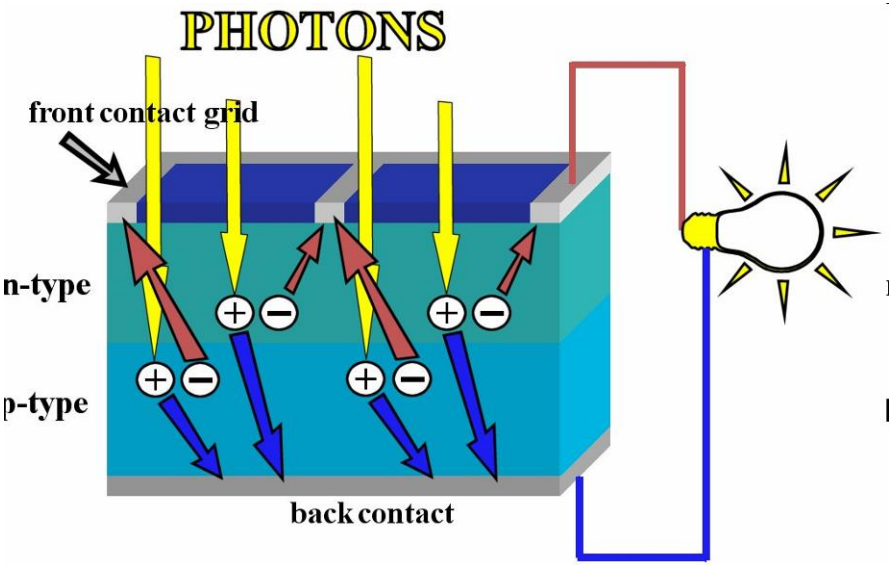
$$\frac{P_Z}{S} = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi R^2} \approx 1{,}4\,kW/m^2$$

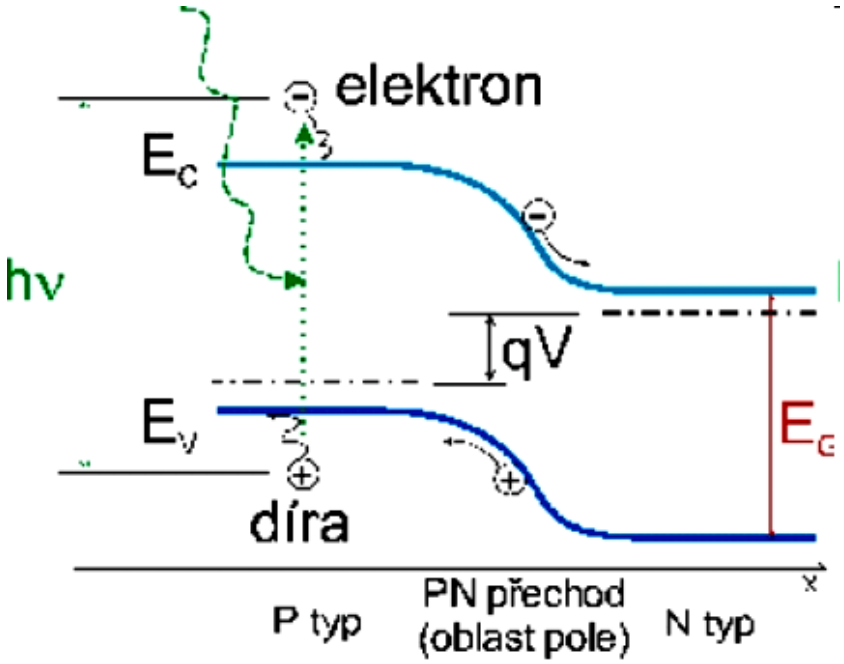
- **princip činnosti – fotodioda ve IV. kvadrantu**
  - nutná excitace elektronů
  - **vznik páru elektron-díra**
  - **hromadění elektronů** – nemohou přecházet přes PN přechod – vznik elektrického potenciálu
  - **elektrický potenciál – 0,5 - 0,6 V na jeden článek**





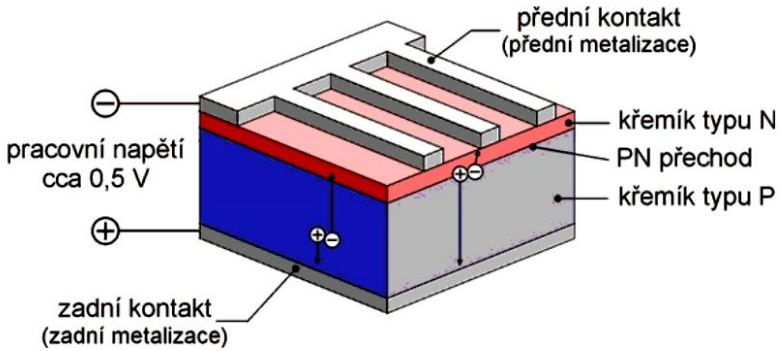


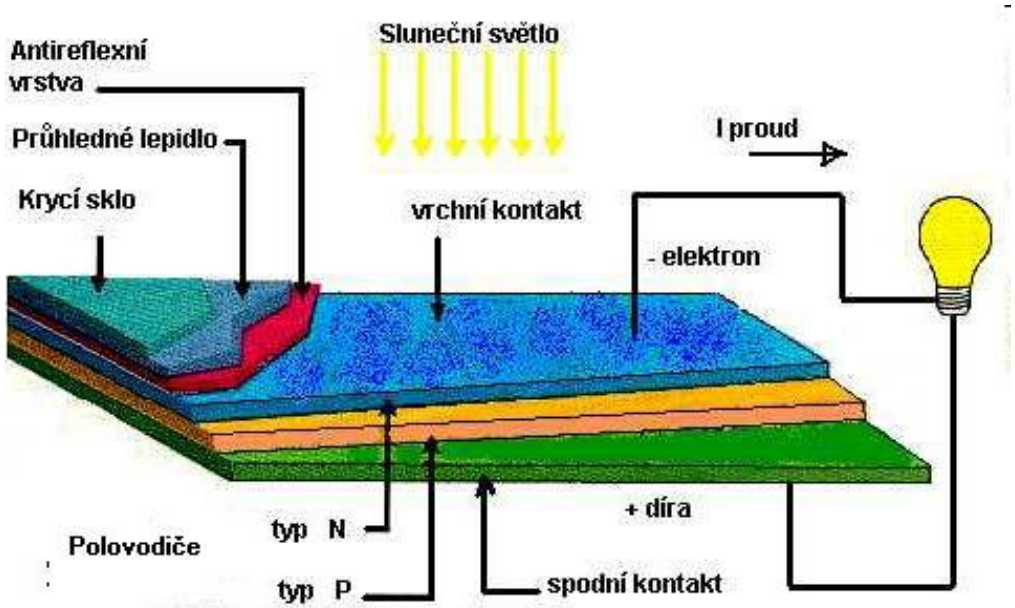




Princip činnosti:
https://www.youtube.com/watch?v=UJ8XW9AgUrw

- **konstrukce**
  - **2 vrstvy krystalického Si – vytvoření PN přechodu**
    - 1. vrstva – Si sycen fosforem – typ N
    - 2. vrstva – na Si vrstva Ag nebo Al – průnik do vrstvy Si – typ P





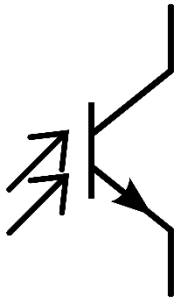
Výrobní technologie

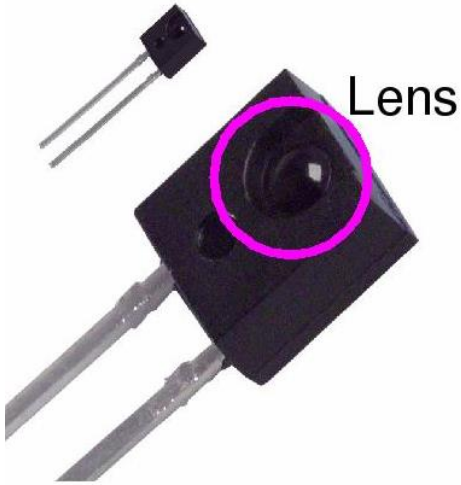
- **křemíková technologie**
  - **tlustovrstvá technologie** – Si plátky, vytvořen PN přechod – fotodioda (monokrystal, polykrystal) – 85% článků na trhu,
    - účinnost – 30 až 40 %
  - **tenkovrstvá technologie** – tenká vrstva Si na nosném podkladu, vytvořen PN přechod, lacinější výroba,
    - účinnost – 10 až 15 %
- **nekřemíková technologie**
  - organické sloučeniny, polymery – výzkum
    - malá účinnost – 4,5%

Fototranzistor

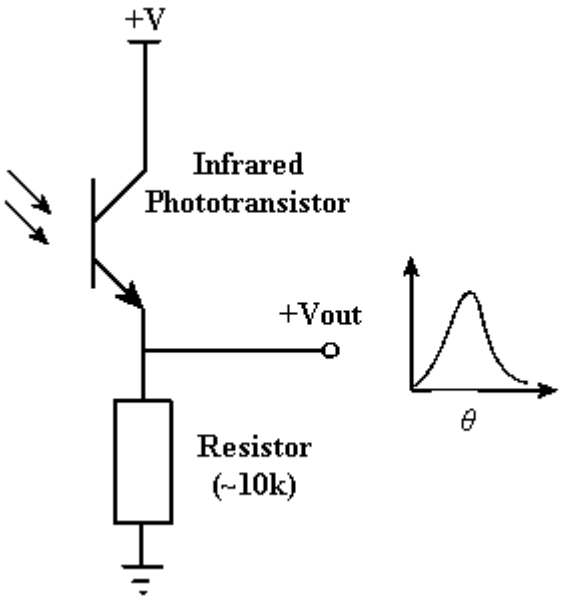
- **dopad světla do oblasti báze**
  - vznik páru elektron-díra
  - nosiče odděleny PN přechody
  - **zvýšení emitorového i kolektorového proudu**

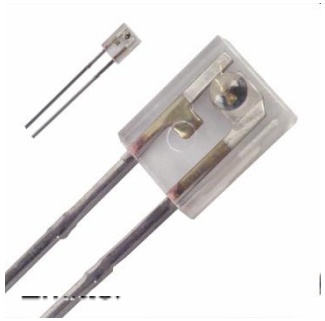
- lze použít každý tranzistor – mechanická konstrukce musí umožnit dopad světla na příslušnou oblast

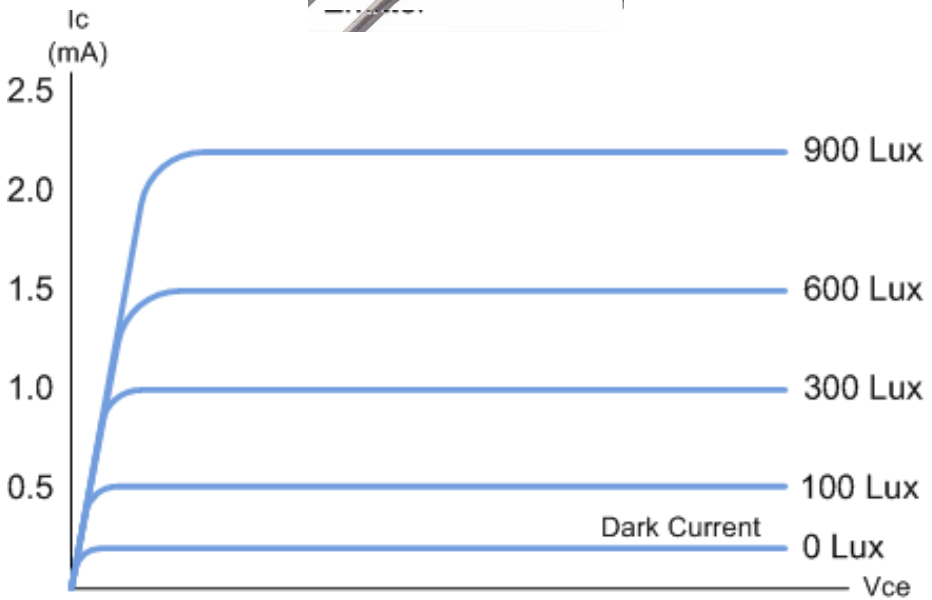




- zapojení se společným kolektorem – nízký výstupní odpor
- v praxi se příliš nepoužívají – vhodnější zapojení fotodiody a tranzistorového zesilovače





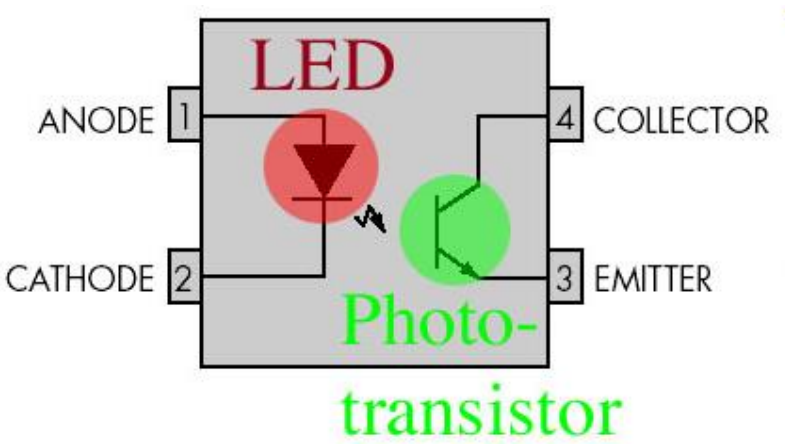


Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=zx4OUXk0LSQ

Optron

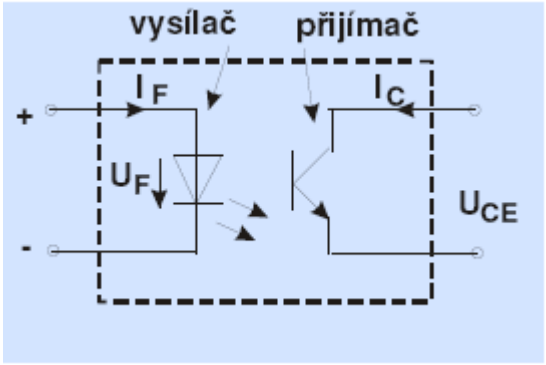
- **základem je optronová dvojice**
  - **zdroj světla**
  - **fotodetektor**

- elektro-optický a opticko-elektrický převodník
  - dvojbran
    - vstup – zdroj světla
    - výstup - fotodetektor
  - **galvanicky oddělené součástky**
  - ztráta možnosti využít elmag. vazby

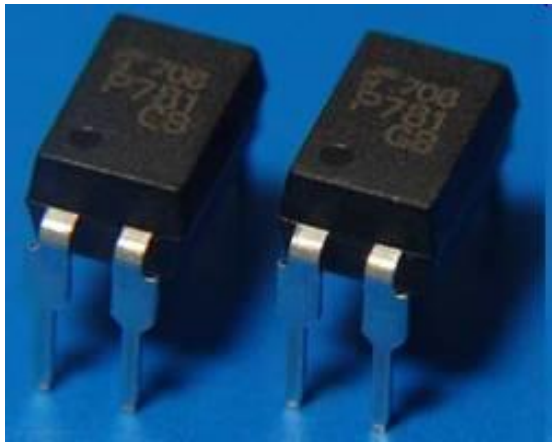


- základní součástka optoelektronických obvodů a systémů

- **zdroj světla (vysílač)**
  - luminiscenční dioda
  - laserová dioda



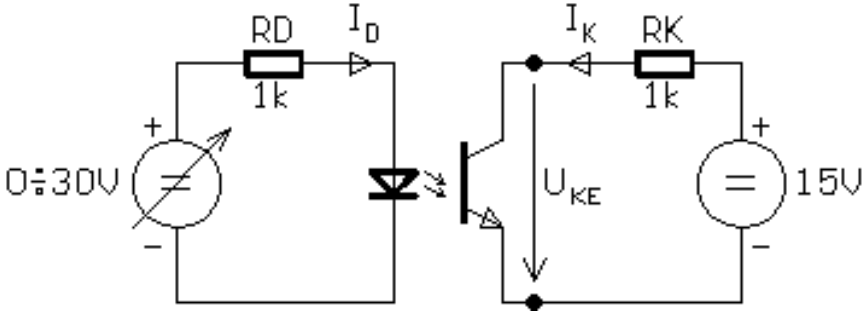
- **Fotodetektor (přijímač)**
  - fotorezistor – nutný přídavný zdroj napětí
  - fotodioda
  - fototranzistor
  - fototyristor

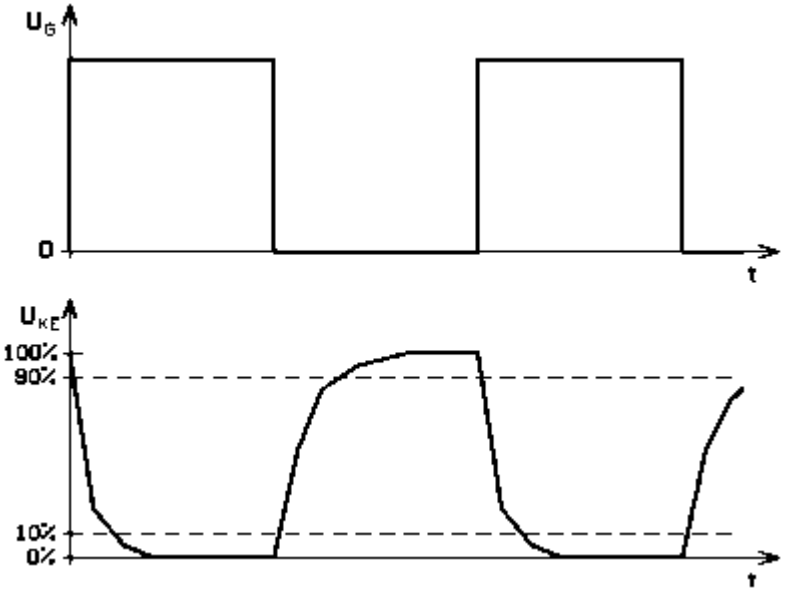


- **použití – galvanické oddělení obvodů**
  - galvanické oddělení vstupu a výstupu
  - styk vysokofrekvenčních a nízkofrekvenčních obvodů
  - styk obvodů s výrazně odlišnými napěťovými hladinami

- **způsob přenosu signálu**
  - elektrický signál → optický signál → elektrický signál
- změna na vstupu (napětí, proud) – změna intenzity záření
- změna na výstupu – změna velikosti odporu, napětí, proudu
- **proudový přenosový činitel CTR** (Current Transfer Ratio)

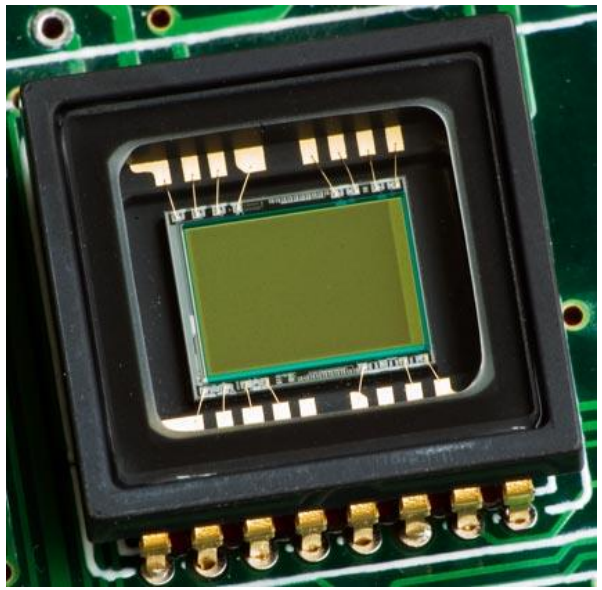
$$CTR = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_D}$$





CCD snímač

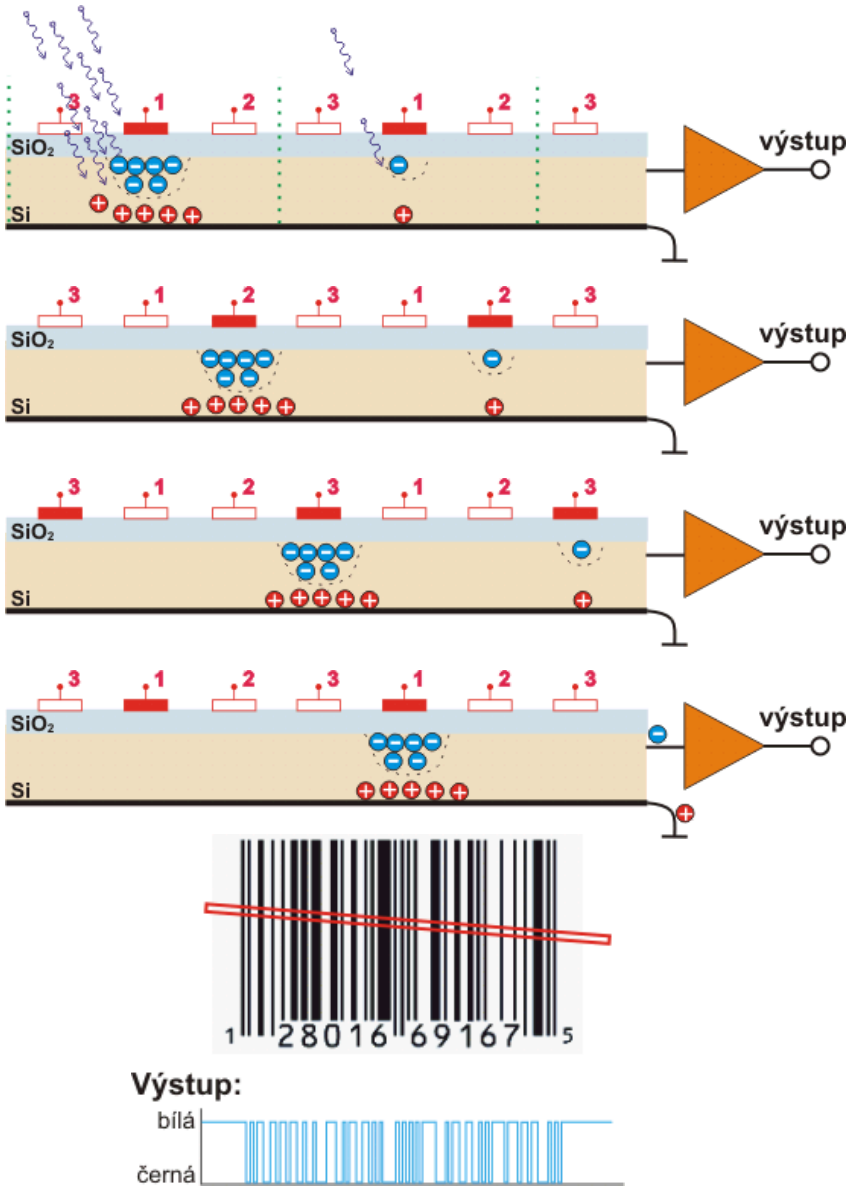
- CCD - Charge-Coupled Device (zařízení s vázanými náboji)
- **elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace**
  - kamery
  - fotoaparáty
  - scannery, čtečky čárových nebo QR kódů
  - Faxy



- **využívá principu fotoefektu**
- foton při nárazu do atomu dokáže převést některý z jeho elektronů ze základního (valenčního pásu) do excitovaného stavu (vodivostního pásu)

- **princip činnosti**
  - 1. **na elektrody 1 přivedeno kladné napětí** a na CCD se nechá působit světlo (otevře závěrka)
  - 2. **dopadající fotony excitují v elektrony**, které jsou pak přitahovány ke kladně nabitým elektrodám
  - 3. díry jsou naopak přitahovány elektrodou na spodku CCD
  - 4. na elektrody 1, 2 a 3 se přivádí fázově posunutý signál (postupné navyšování napětí) – **postupný posuv nosičů**

- hranice pixelů - svislé tečkované čáry
- více dopadajících fotonů – více excitovaných elektronů



Fotonka

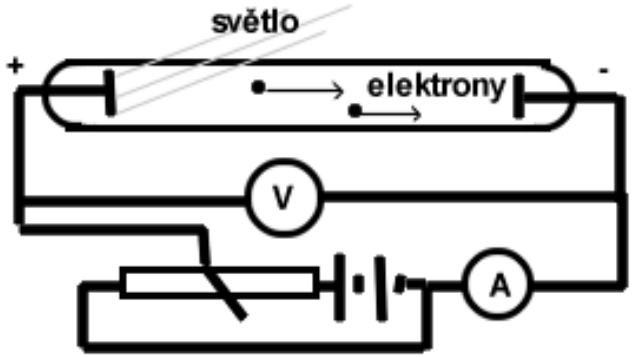
- **fotonka – vakuová elektronka**
  - **foton vyráží z fotokatody elektrony (fotoelektrony) - vnější fotojev**
  - proud – určen počtem vyražených elektronů, souvisí s intenzitou světla
  - **energie fotoelektronu závisí na vlnové délce, nezávisí na intenzitě světla**
  - energetická rovnice pro vnější fotojev (Einsteinova rovnice)

$$\frac{hc}{\lambda} = E_v + \frac{1}{2}mv^2$$

příkon

výstupní energie elektronu

kinetická energie elektronu



Fotonásobič

- **vnější fotojev + sekundární emise elektronů**
- **obsahuje tzv. dynody** – dochází k sekundární emisi elektronů
- **dochází k lavinovému násobení** – neustálé vyrážení elektronů
- základ snímacích elektronek a obrazovek
- $\delta = 5$ a počet dynod = 9 → zisk fotonásobiče 5^9

$$\frac{1}{2}mv_{prim}^2 = E_v + \delta\frac{1}{2}mv_{sek}^2$$

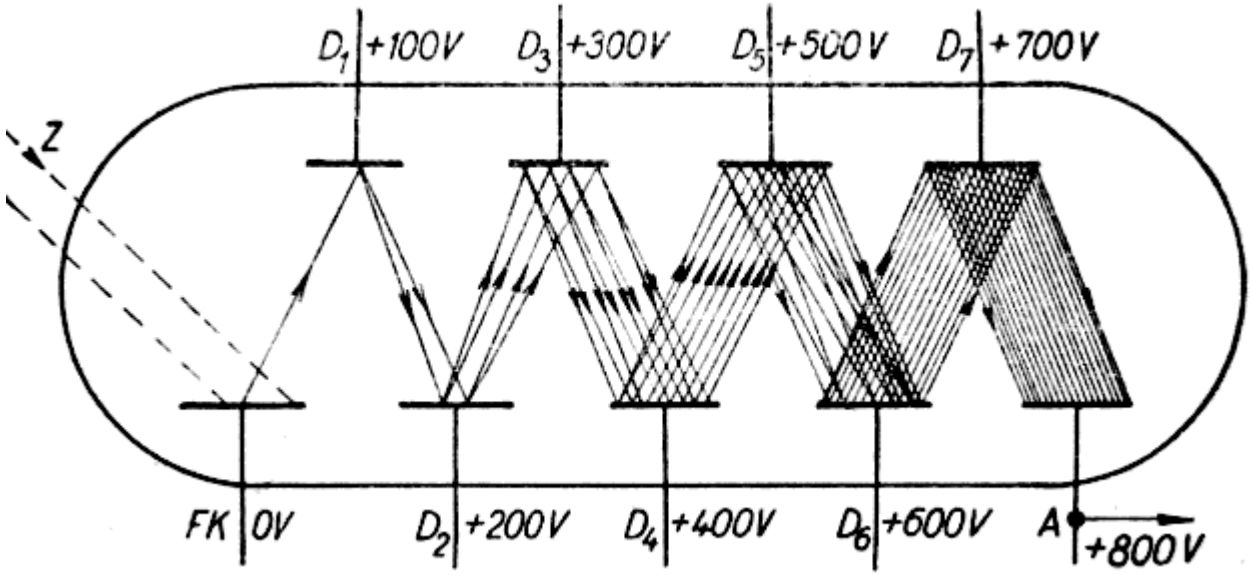
kinetická energie primárního elektronu

výstupní energie

počet elektronů vyražených primárním elektronem

kinetická energie sekundárních elektronů

- **skleněná baňka s vakuem**
  - **fotokatoda** – nutná dostatečná energie záření k vyražení elektronu
  - **dynody** – různý potenciál k urychlení elektronů
  - **anoda**



- **parametry**
  - plocha a tvar elektrod
  - spektrální charakteristika citlivosti
  - zisk
  - citlivost fotokatody, anody
  - anodový proud za tmy
  - doba průletu fotoelektronu
  - doba náběhu impulzu
  - max. anodové napětí a proud



- **použití**
  - **detekce slabého světelného záření s velkým odstupem signál/šum**
  - **astronomie**



Kontrolní otázky

- Jaký je rozdíl mezi opto-elektrickým převodníkem a fotodetektorem?
- Vysvětlete princip fotorezistoru.
- Vysvětlete princip fotodiody.
- Za jakých podmínek se fotodioda chová jako zdroj?
- Na čem závisí výstupní charakteristiky fototranzistoru?
- Co je solární článek?
- Vysvětlete princip CCD snímače.
- Vysvětlete princip optronu.



Použitá literatura

- Musil, V.: **Elektronické součástky.** VUT Brno, 2005, ISBN 80-214-2627-6
- Vaníček, F.: **Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely.** ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-03112-8
- Jerhot, J.: **Elektronické součástky a zesilovače.** VŠSE Plzeň, 1979
- FOIT, J.; HUDEC, L.: **Základy elektroniky.** ČVUT v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04236-6
- Vobecký, J.; Záhlava, V.: **Elektronika : součástky a obvody, principy a příklady.** Grada Publishing, 2005, ISBN 80-247-1241-5
- Sze, S.M.; Kwok, K.Ng.: **Physics of semiconductor devices.** Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0-471-14323-9
- Kasap, S.O.: **Principles of electronic materials and devices.** McGraw-Hill, 2006, ISBN 0-07-124458-1
- Schroder, D.K.: **Semiconductor material and device characterization.** John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73906-5