

1

2

3

Polovodiče

- teplotní závislost u kovů

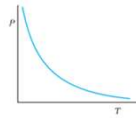
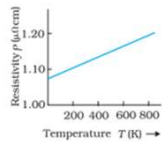
teplotní závislost u polovodičů

$$\rho_k = 1 / \sigma = \rho_0 (1 + \alpha_T \Delta T)$$

$$\rho_p = A \exp (\Delta W / k T),$$

ρ_k - rezistivita vodiče (kovu) [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$],
 ρ_0 - rezistivita při $T_0 = 293 \text{ K}$ [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$],
 σ - konduktivita (el. vodivost) [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$],
 α_T - teplotní součinitel rezistivity [K^{-1}],
 $\Delta T = T - T_0$ - difference teplot [K],

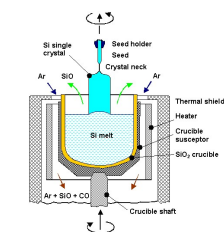
ρ_p - rezistivita polovodiče [$\Omega \cdot \text{cm}$],
 k - Boltzmannova konstanta $8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$,
 A - frekvenční faktor (předexponenciální člen) [$\Omega \cdot \text{cm}$],
 ΔW - šířka zakázaného pásu [eV],
 T - teplota [K].



4

Požadavky na polovodičové materiály

- chemická čistota** - min. čistota pro Si 99,999999 % (8N), obvykle 11N (99,9999999999 %)
- strukturní dokonalost** - monokrystaly s definovanou orientací a minimálním obsahem poruch (vakancí, interstiálů, bez dislokací, ...)



Czochralského metoda

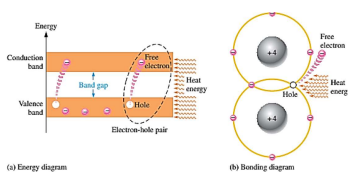
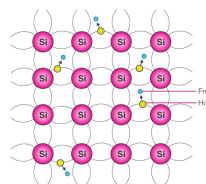
přeměna polykrystalického křemíku na monokrystal



5

Nosiče náboje v polovodičích

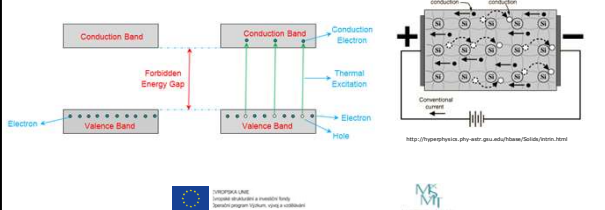
- v **kovech** nosiče náboje **elektrony**
- v **polovodičích** jsou to **elektrony** a **díry** (místo kde chybí $e^- \rightarrow +$ náboj)
- dynamická rovnováha částic - **generování** (vznik) a **rekombinace** (zánik)



6

Vlastní vodivost polovodičů (intrinsická)

- vyskytuje se ve všech polovodičích
- v polovodiči při 0 K zcela zaplněný valenční pás a volný vodivostní
- při $T > 0$ K některé elektrony excitovány do vodivostního pásu → **elektronová vodivost**
- ve valenčním pásu vzniká volné místo – díra (**děrová vodivost**)
- počet děr = počet vodivostních elektronů

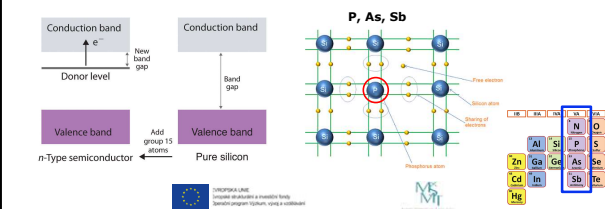


7

Nevlastní vodivost polovodičů (extrinsická)

Polovodiče typu N

- vodivost můžeme výrazně zvýšit procesem **dotování/dopování**
- atomy polovodiče nahrazeny atomem cizího prvku – **příměsí**
- při přidání prvku z V. skupiny (**donor – dárce**) vzniká přebytek elektronů – **polovodič typu N**
- jako příměs se používá fosfor (P), antimon (Sb), arsen (As)

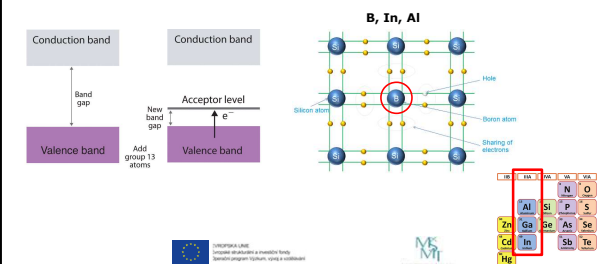


8

Nevlastní vodivost polovodičů (extrinsická)

Polovodiče typu P

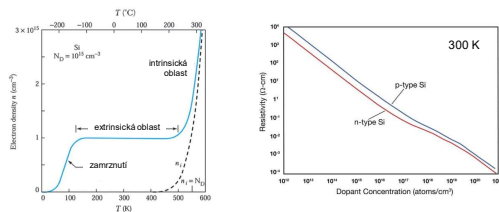
- při přidání prvku z III. skupiny (**akceptor – příjemce**) vznikají v polovodiči díry – **polovodič typu P**
- jako příměs se používá bor (B), indium (In), galium (Ga), hliník (Al)



9

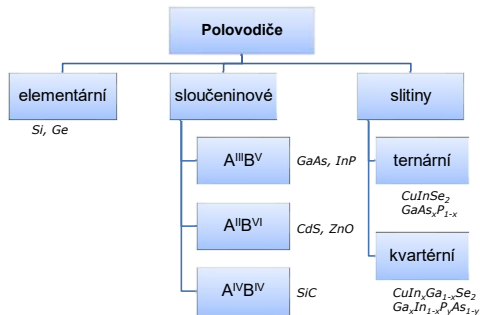
Nevlastní vodivost polovodičů (extrinická)

- koncentrace dopantů velmi nízká (cca 1 atom příměsi na $10^4 - 10^6$ atomů základního prvku)
- koncentrace atomů v pevné látce $\approx 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
- koncentrace nosičů závislá na teplotě



10

Polovodičové materiály

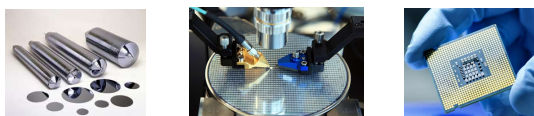


11

Elementární polovodiče a jejich použití

Křemík

- nejdůležitější polovodičový materiál
- šířka zakázaného pásu 1,12 eV
- použitelný do cca 200 °C
- použití: diody, tranzistory, tyristory, vícepřechodové spínací obvody, integrované obvody, fotovoltaické články, mikroprocesory atd.



12

Elementární polovodiče a jejich použití

Germanium

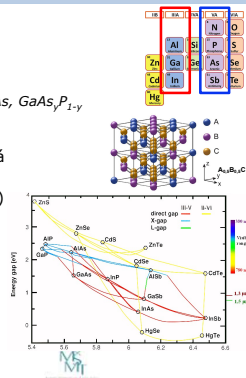
- šířka zakázaného pásu menší než u křemíku (jen 0,67 eV), vyšší pohyblivost nosičů náboje → vysoké frekvence
- použitelný cca do 75 °C
- použití: (*dříve*) vf diody, detekčních diody, tranzistory, fotodiody detektorů jaderného záření apod.
(*dnes*) minimálně – většinou pro speciální aplikace (tvorba slitin s Si, substráty, senzorové aplikace)



13

Sloučeninové polovodiče $A^{III}B^V$

- po Si nej důležitější skupina polovodičů
- chemické sloučeniny a slitiny
 - ▶ binární (AB): $GaAs$, GaP , InP , GaN , ...
 - ▶ ternární ($A_xA_{1-x}B$) nebo (AB_yB_{1-y}): $Ga_xAl_{1-x}As$, $GaAs_yP_{1-y}$
 - ▶ kvartérní ($A_xA_{1-x}B_yB_{1-y}$): $Ga_{1-x}In_xP_{1-y}As_y$
- schopnost tvorby tuhých roztoků - široká možnost kombinací sloučenin např. $InP-InAs$ (InP_yAs_{1-y}), $GaP-InP$ ($Ga_{1-x}In_xP$)
- velký rozsah šířek zakázaného pásu = možnost přípravy polovodičových materiálů požadovaných vlastností (pracovní napětí, max. frekvence, optické vlastnosti)



14

Sloučeninové polovodiče $A^{III}B^V$

- přehled některých aplikací sloučenin typu $A^{III}B^V$

Složení	Aplikace	Fyzikální jev
GaAs, InP, In _x Ga _{1-x} As	vř. tranzistory a MIO	vyšoká polyblivost elektronů
GaAs, InP	vř. generátory a zesilovače, Gunnovy diody	Gunnův jev
GaAs	vř. generátor a zesilovač	lavinový jev
GaAs	násobiče kmitočtu, parametrické zesilovače, ladění	napičová závislost kapacity PN přechodu
GaAs	elektroakustické zesilovače, zpřístupňovače signálu	piezoelektrický jev
GaAs, GaAs ₂ P ₃ , AlGa _{1-x} As, GaP, (In,Ga)(As,P)	luminescenční diody	rekombinace nosičů na PN přechodech způsobující záření
GaAs, GaAs ₂ P ₃ , In _x Ga _{1-x} As, AlGa _{1-x} As, (In,Ga)(As,P), InSb	detektory záření	generace páří na PN přechodu způsobující záření
GaAs, AlGa _{1-x} As	koherentní zdroje záření (lasertové diody)	rekombinace nosičů injekcí

Poznámka: vf. – vysokofrekvenční, MIO – monolitické integrované obvody

Drápala J. – Materiály pro elektrotechniku

15

Další typy sloučeninových polovodičů

Sloučeniny A^{II}B^{VI}

- např. CdS, CdSe (fotorezistory, fotodiody); ZnS, ZnSe (elektroluminiscentní displeje), CdHgTe (detektory rtg. a γ-záření)

Sloučeniny A^{IV}B^{VI}

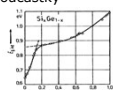
- PbS – fotorezistory, PbTe – IR detektory a kamery

Sloučeniny A₃II₂B₅V

- (Cd,Zn)₃(As,P)₂ – solární články, luminiscentní diody, Schottkyho diody

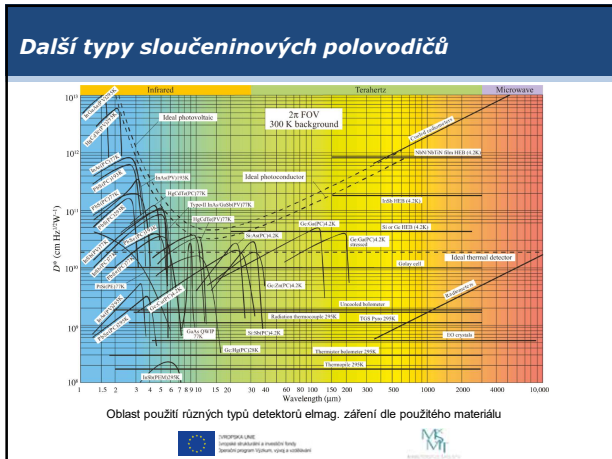
Sloučeniny A^{IV}B^{IV}

- Ge-Si – úplná vzájemná rozpustnost prvků – změna E_g i pohyblivosti nositelů náboje – vf diody, tranzistory, fotodetektory pro IR oblast
- SiC – optoelektronika, luminiscentní diody, vysokoteplotní součástky




16



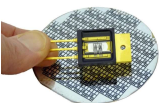
17

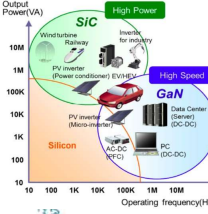
Sloučeninové polovodiče

Polovodiče s velkou šířkou pásma

- běžné polovodičové materiály E_g = 1 – 1,5 eV (Si, Ge, GaAs, InP)
- materiály s E_g = 2 – 4 eV
 - vyšší pracovní teploty (běžně 300 °C)
 - vyšší hodnoty elektrického pole (cca 10x proti Si)
 - vyšší tepelná vodivost (dobrý odvod tepla)

Materiál	E _g (eV)
SiC	2,3-3,2
GaN	3,4
ZnO	3,3
diamant	5,5
AlN	6,2







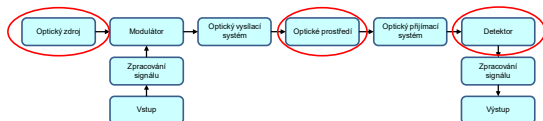
18

Optoelektronika

19

Materiály pro optoelektroniku

- optoelektronické systémy velké využití v oblasti datových přenosů i v klasické a výkonové elektronice (optické oddělovací členy, součásti spotřební elektroniky)

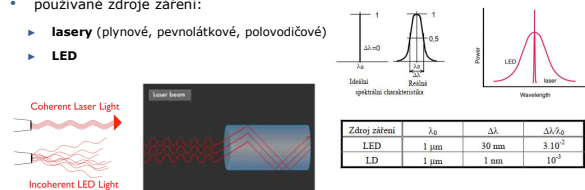


- výhody elektrooptických systémů
 - vysoká rychlost přenosu informace
 - odolnost vůči rušení
 - vytvoření bezkontaktních spojů (galvanické oddělení obvodů)

20

Zdroje elektromagnetického záření

- pro optický přenos informace má největší význam oblast přibližně od **1,2 μm** do **400 nm** (minimální útlum optické cesty – optických vláken)
- ideální optický zdroj by měl generovat monochromatické koherentní optické záření s konstantním a dostatečně velkým výstupním výkonem
- používané zdroje záření:
 - lasery** (plynové, pevnolátkové, polovodičové)
 - LED**



21

Lasery

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- plynové lasery**
 - paprsek vzniká v plynném prostředí (He-Ne, Ar, CO₂)
 - vybuzení vlivem vysokého napětí na elektrodách trubice
 - technologické lasery: Ar, CO₂ (IR laser) – řezání, vrtání, svařování, lékařské aplikace (až stovky kW výkonu)

UNIVERSITA LÁZE
Univerzita obrátění a změny formy
Světelný proud (světlo, vlna a částice)

22

Lasery

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- pevnolátkové lasery**
 - aktivní prostředí monokrystaly pevných látek, vyzářující v červené nebo IR oblasti
 - rubínový (Al₂O₃) – 694,3 nm
 - neodymový (Nd:YAG) – 1064,1 nm
 - erbiový (Er:YAG) – 2940 nm
 - technologické operace (řezání, vrtání, svařování, značení) nebo biomedicínské aplikace (kožní lékařství, onkologie, dentální medicína)

UNIVERSITA LÁZE
Univerzita obrátění a změny formy
Světelný proud (světlo, vlna a částice)

23

Lasery

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- polovodičové lasery**
 - obdobný princip jako LED, ale jiná konstrukce
 - vznik záření v přechodové vrstvě mezi P a N polovodičem
 - materiály obdobné jako u klasických LED
 - optické prvky v elektronice (CD, DVD, Blu-ray, tiskárny), telekomunikace, dopravní prostředky (dálkoměry, Lidar), vojenské aplikace

Materiál	Vzorec	Rozdíl energií drah	Vlnová délka
galium fosfid	GaP	2,24 eV	550 nm
arsenid hliníku	AlAs	2,09 eV	590 nm
galium arsenid	GaAs	1,42 eV	870 nm
fosfid india	InP	1,35 eV	930 nm
arsenid hliníku a galia	AlGaAs	1,42 až 1,61 eV	770 až 870 nm
indium-galium-arsenid-fosfid	InGaAsP	0,74 až 1,13 eV	1100 až 1670 nm

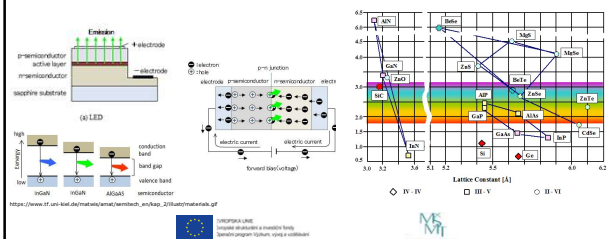
UNIVERSITA LÁZE
Univerzita obrátění a změny formy
Světelný proud (světlo, vlna a částice)

24

Elektroluminiscenční diody (LED – Light Emitting Diode)

- zdroje nekoherentního světelného záření
- fyzikální princip založen na rekombinaci elektronu s dírou
- sloučeninové polovodiče zejména prvků typu $A^{III}B^V$, $A^{II}B^VI$
- kombinací lze vytvořit diody svítící různými barvami

(Ga,Al)_xAs a GaP – červená, In_xGa_{1-x}P – zelená, SiC, GaN – modrá)



25

Elektroluminiscenční diody (LED – Light Emitting Diode)

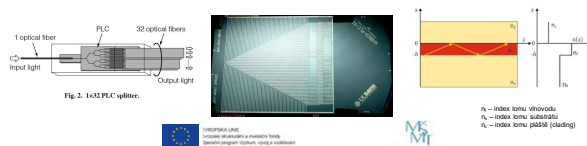
LED Color Guide

LED P/N Suffix	Description	Chemistry	# of Elements	Color Temperature (CCT Typ)	Peak Wavelength (A / x-coord)	Dominant Wavelength (A / y-coord)	Forward Voltage (V Typ) (V Max)	Brightness
HR	High Efficiency Red	GaP	2	~	700	660	2.0	2.5 Standard
SR	Super Red	GaAsAs	3	~	660	640	1.7	2.2 High
SR	Super Red	AlInGaP	4	~	660	640	2.1	2.5 High
SI	Super High Intensity Red	AlInGaP	4	~	635	620	2.0	2.6 High
I	High Intensity Red	GaAsP	3	~	635	625	2.0	2.5 Standard
DI	T5 AlInGaP Red	AlInGaP	4	~	640	630	2.2	2.8 High
SO	Super Orange	AlInGaP	4	~	630	620	2.0	2.5 Standard
A	Amber	GaAsP	3	~	605	610	2.0	2.5 Standard
SY	Super Yellow	AlInGaP	4	~	590	588	2.0	2.5 Standard
ZY	T5 AlInGaP Yellow	AlInGaP	4	~	590	588	2.3	2.8 High
Y	Yellow	GaAsP	3	~	590	588	2.1	2.5 Standard
SLG	Super Ultra Green	AlInGaP	4	~	534	568	2.2	2.6 High
G	Green	GaP	2	~	565	568	2.2	2.6 Standard
SG	Super Green	GaP	2	~	565	568	2.2	2.6 Standard
PG	Pure Green	GaP	2	~	555	555	2.1	2.5 Standard
UPG	Ultra Pure Green	InGaN	3	~	525	520	3.5	4.0 High
LEG	Ultra Emerald Green	InGaN	3	~	500	500	3.5	4.0 High
USB	Ultra Super Blue	InGaN	3	~	470	470	3.5	4.0 High
UV	Ultra Violet	InGaN	3	~	410	~	3.5	4.0 Standard
SLV	Super Violet	InGaN	3	~	380	~	3.4	3.9 Standard
T	Turquoise	InGaN	3	~	0.19	0.41	3.2	4.0 Standard
V	Violet / Purple	InGaN	3	~	0.22	0.11	3.2	4.0 Standard
P	Pink	InGaN	3	~	0.33	0.21	3.2	4.0 Standard
MW (Warm)	Warm White	InGaN	3	3000K	~	~	3.3	4.0 High
NW (Neutral)	Neutral White	InGaN	3	4000K	~	~	3.3	4.0 High
WW (Cool)	Cool White	InGaN	3	6000K	~	~	3.3	4.0 High

26

Materiály pro světlovody

- optické vlnovody (světlovody) – prvky sloužící pro přenos informace na optických kmitočtech (data, světlo)
- nejčastěji vlnové délky v rozsahu cca 400 – 1500 nm
- **planární světlovody**
 - ▶ přenos na velmi krátkou vzdálenost (μm až mm)
 - ▶ na substrátu vrstva světlovodu s indexem lomu n_f , pro který platí $n_f > n_s > n_c$
 - ▶ pro realizaci miniaturních světlovodů, optické obvody a přizpůsobení, optické součástky, dvourozměrné čočky v optických obvodech atd.
 - ▶ skla na bázi SiO_2 , Al_2O_3 , GaAs, LiNbO_3 , polyester, hexamethylsiloxan



27

Materiály pro světlovody

- vláknové světlovody**
 - přenos na velké vzdálenosti (výborné optické vlastnosti na jednotku délky - útlum)
 - absorpce signálu v objemu způsobena nejvíce nečistotami (ionty kovů Cr, Mn, Co, Ni, atd.), vlhkostí (absorpce OH⁻ v IR pásmu) a nehomogenitami vzniklými při tažení vláken
 - jádro (index lomu n_1), plášť (index lomu n_2), ochranný povlak (zpravidla plast)

The diagram shows various cross-sections of optical fibers, including standard step-index, graded-index, and plastic optical fibers. A graph plots Attenuation (dB/km) against Wavelength (nm) from 400 to 1700 nm, showing peaks for OH⁻ and water, and a low-loss window around 1550 nm.

28

Materiály pro světlovody

- materiály pro jádra vláknových světlovodů** $n_1 > n_2$
 - syntetický křemen** SiO₂ – čistý (nejběžnější, $n=1,47$) nebo dotovaný
 - GeO₂, Al₂O₃, P₂O₅ (zvýšení n)
 - fluor, B₂O₃ (snížení n) – plášť celoskleněných vláken
 - víceložkovná skla** – sodnovápenatá ($n=1,52$), borito-křemičitá ($n=1,5$), olovnatá ($n=1,57 - 1,75$)
 - fluoridová skla** – zejména pro MIR pásmo (mid-infrared, 2000 – 5000 nm)
 - chalkogenidová skla** na bázi S, Se, Te – velmi široké přenosové pásmo až do IR oblasti (n až 3)
 - polymery** – nejčastěji PMMA (polymethylmetakrylát – plexisklo) – levnější než skla, ale horší přenosové vlastnosti

The diagram shows a cross-section of a fiber core with different materials: PCF 980/1000, HCSF, Multimode GOF, Singlemode GOF, and Singlemode GOF. A table below lists the core diameters for each type.

Core Diameter (μm)	PCF 980/1000	HCSF	Multimode GOF	Singlemode GOF	Singlemode GOF
200-220			50-62.5	9	10/125

29

Materiály pro světlovody

- materiály pro pláště vláknových světlovodů**
 - vzduch** – pro bezplášťová vlákna
 - skla** – s nižším indexem lomu
 - polymery** – polynivylidenfluorid (PVDF), silikony, akryláty
- další vrstvy světlovodů a kabelů**
 - zvýšení ochrany vlákna před vnějším prostředím (pronikání vlhkosti)
 - v kabelech výplňový materiál pro zvýšení mechanické odolnosti a vnitřního poškození
 - zvýšení mechanické odolnosti vlákn (vnější plášť, kevlarová výztuž)

The diagram shows cross-sections of fiber coatings and cable structures. Labels include: High-density polyethylene (HDPE), Copper braid (0.1 mm), Braided mesh, Water resistant polyurethane (WPU), Optical cladding (PMMA), Optical resistance (Acrylic resin), Secondary coat (Polyurethane), Primary coat (Silicone), Cladding, and Core.

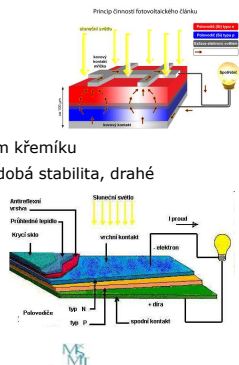
30

Solární články

- založen na fotovoltaickém efektu
- zdroj elektrického napětí

články 1. generace

- základem velkoplošný $p-n$ přechod na monokrystalickém nebo polykrystalickém křemíku
- dobrá účinnost (cca 30 - 40 %), dlouhodobá stabilita, drahé

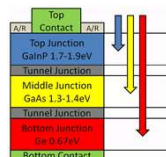


31

Solární články

články 2. a 3. generace

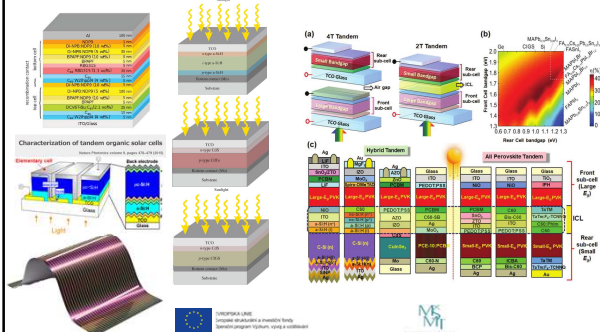
- tenkovrstvé články s možností realizace na velkém množství substrátů (včetně flexibilních)
- široké využití tenkovrstvých technologií
- díky vícevrstvé struktuře využití většího pásma záření (tandemové články), ale celková nízká účinnost (< 20 %)
- ▶ **polykrystalický a amorfní Si**
- ▶ polovodičové vrstvy *CdTe*, *CIGS* (CuInGaSe_2), *GaAs* (vyšší teploty, větší šířka pásma)
- ▶ **organické polovodičové struktury** (barviva) – malá účinnost (do 5 %), levné



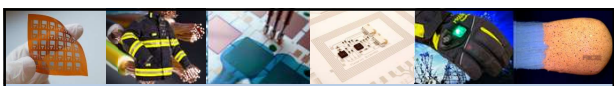
32

Solární články

- příklady realizací různých tenkovrstvých struktur solárních článků



33



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

Děkuji za pozornost

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

 FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

 FAKULTA
MECHANICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

34
