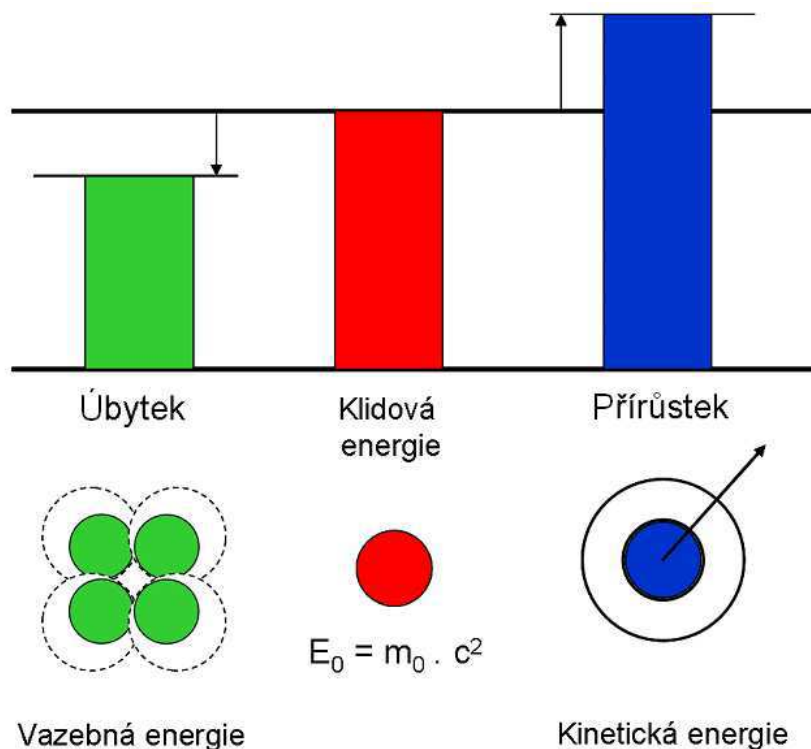


1. Energie a její transformace

Energie je nejdůležitější vlastností hmoty a záření. Je obsažena v každém kousku hmoty i ve světelném paprsku. Je ve vesmíru a všude kolem nás. S energií se setkáváme na každém kroku. Chemická energie ve svalech člověka umožňuje jeho pohyb. Teplo našeho těla je pohybová energie molekul, z nichž je složeno. V našem těle probíhá mnoho změn poháněných energií. Potřebnou energii přijímá náš organismus v potravě. Bez energie je dále nemyslitelná doprava, zemědělství, průmysl, vytápění, energetické spotřebiče apod. Kromě toho energetické spotřebiče nejenže potřebují energii, aby nám sloužily, ale už k jejich samotné výrobě je zapotřebí energie.

1.1 Energie

Energie je slovo vytvořené v polovině 19. století z řeckého „energeia“ (tzn. vůle, síla či schopnost k činům). Je to skalární fyzikální veličina, která je charakterizována schopností fyzikální soustavy konat práci. Energií lze též definovat jako veličinu charakterizující stav určité soustavy. Kromě energie patří ke stavovým veličinám také rychlost, výška tělesa nad nulovým potenciálem, teplota, tlak, hustota, entropie a měrná tepelná kapacita. Jednotkou energie je 1 joule [J]. Energie je skalární fyzikální veličina charakterizující stav určité soustavy a vyznačující se schopností soustavy konat práci.



Obr. 1.1: Změna klidové energie hmotné látky

Každá hmota v klidu obsahuje klidovou energii E_0 [J], která je definována Einsteinovou rovnicí:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2, \quad (1.1)$$

kde m_0 [kg] je klidová hmotnost a c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] rychlost šíření světla ($c = 3\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), přesněji

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,998\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad \text{kde} \quad \epsilon_0 = 8,855\cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1} \text{ permitivita vakua}$$
$$\mu_0 = 4\cdot\pi\cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1} \text{ permeabilita vakua}$$

Klidovou energii hmotného tělesa E_0 lze zvětšit (např. zahřátím tělesa, nebo uvedením tělesa do pohybu), nebo zmenšit (např. jadernou reakcí). Tyto změny jsou znázorněny v obr. 1.1.

1.2 Druhy energií

Celková energie v izolované soustavě je dána součtem jednotlivých druhů energií. Mezi nejčastější druhy energie patří energie:

- mechanická
- tepelná
- vnější
- chemická
- elektrická
- jaderná
- zářivá

1.2.1 Mechanická energie

Mechanická energie se vyskytuje ve dvou formách – ve formě kinetické a potenciální energie. Kinetická (též pohybová) energie E_k je charakterizována pohybem tělesa. Při posuvném pohybu tělesa o hmotnosti m rychlostí v je kinetická energie dána rovnicí:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad , \quad (1.2)$$

Kinetická energie tuhého tělesa otáčejícího se kolem osy úhlovou rychlostí ω s momentem setrvačnosti tělesa J k ose otáčení je dána vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad , \quad (1.3)$$

Potenciální energie E_p tělesa se vyskytuje ve dvou typech. Prvním typem je tíhová potenciální energie tělesa v silovém poli Země:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad , \quad (1.4)$$

kde h je výška nad úrovní, pro kterou je potenciální energie nulová (obvykle zemský povrch). Druhým typem potenciální energie je potenciální energie pružnosti u pružných těles schopných deformace. V tomto případě je potenciální energie dána vztahem:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2 \quad , \quad (1.5)$$

kde k [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$] je tuhost a y [m] – výchylka z rovnovážné polohy.

Celková mechanická energie E_m je dána součtem kinetické a potenciální energie:

$$E_m = E_k + E_p \quad . \quad (1.6)$$

V izolované mechanické soustavě platí zákon zachování mechanické energie, kdy při mechanickém ději zůstává konstantní celková mechanická energie izolované soustavy a tím i součet kinetické a potenciální energie:

$$E_m = E_k + E_p = konst. \quad (1.7)$$

1.2.2 Tepelná energie

Tepelná energie jako stavová veličina musí být chápána pouze jako energie vnitřní U . Je definována součinem hmotnosti m , měrného tepla c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] (v případě plynů měrného tepla při stálém objemu c_v) a termodynamické teploty T [K]:

$$U = m \cdot c \cdot T. \quad (1.8)$$

10.2.3 Vnější energie

Vnější energie E_v se definuje pro stlačitelné látky, kterými jsou zejména plyny a páry, a je dána součinem tlaku p a objemu V :

$$E_v = p \cdot V, \quad (1.9)$$

U kapalin bývá měrný objem (i hustota ρ) v relativně velkém rozsahu tlaků konstantní, proto se zde přímo nehovoří o vnější energii, ale používá se pojem tlaková energie E_p , která je dána rovnicí:

$$E_p = m \cdot \frac{p}{\rho} \quad (1.10)$$

U pevných látek se vnější energie přímo nedefinuje. Obdobný druh energie si lze představit např. pružnou deformací tělesa, v němž se zvyšuje mechanické napětí, zmenšuje se objem apod.

Pozn.: Součtem vnější a vnitřní energie je definována tzv. entalpie.

1.2.4 Chemická energie

Chemická energie se uvolňuje nebo absorbuje při chemických reakcích, při kterých dochází k přeskupování atomů. Při chemických reakcích mezi sebou reagují atomy s kladným nebo záporným elektrickým nábojem. Chemické síly jsou potom elektrické povahy a uvolněná chemická energie je rovna práci vykonané těmito elektrickými silami. Chemickou energii lze tedy chápat jako část energie transformující se na jiné druhy energie při uvažovaných chemických reakcích.

U paliv bývá chemická energie popsána výhřevností. Výhřevnost lze definovat jako maximální množství uvolněného tepla, které lze využít, pokud vodní pára nekondenzuje.

Potom chemická energie je dána vztahem:

$$E_{ch} = m \cdot Q_i, \quad (1.11)$$

kde Q_i [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$] je výhřevnost.

1.2.5 Elektrická energie

Elektrická energie je energie elektrostatického a magnetického pole, které vzniká v okolí pohybujících se nábojů.

1.2.6 Jaderná energie

Jaderná energie se uvolňuje při jaderných reakcích v důsledku změn vazebních sil v jádře atomu. Množství uvolněné energie je úměrné úbytku hmotnosti. K uvolnění energie dochází při štěpení velmi těžkých jader na lehčí, nebo při slučování velmi lehkých jader na těžší.

1.2.7 Zářivá energie

Zářivá energie je energie elektromagnetického záření, které se uvolňuje ze zářivého tělesa při emisi kvant záření. Projevuje se jako elektromagnetické vlny různých délek. Zářivá energie je definována rovnicí:

$$E_z = h \cdot f \quad (1.12)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ je tzv. Planckova konstanta a f [Hz] - frekvence záření.

Planck dospěl k poznatku že klasická teorie světla nevystihuje skutečnost, když se snažil odvodnit platnost vyzařovacího zákona, který byl v naprostém souhlase s experimenty. Jeho teorie se stala základem celé moderní kvantové fyziky. Vztah (1.12) definuje známou kvantovou hypotézu. Z této kvantové hypotézy se později vyvinul základní princip kvantové fyziky; tento princip, pokud jde o záření, vedl k pojmu *fotonu*, (o pojmu foton v doplňku ke kapitole 1.2.7) který je základem dnešních představ o podstatě světla.

1.3 Transformace energie

Jednotlivé druhy energií se mohou za určitých podmínek vzájemně přeměňovat. Tyto přeměny se nazývají transformacemi energie. Při transformacích energie nedochází k energetickým ztrátám a zůstává v platnosti zákon zachování energie. S transformací energie souvisí pojmy exergie a anergie.

Exergie je ta část energie, která je schopna za daných podmínek (jsou zpravidla určeny stavem okolí) další transformace.

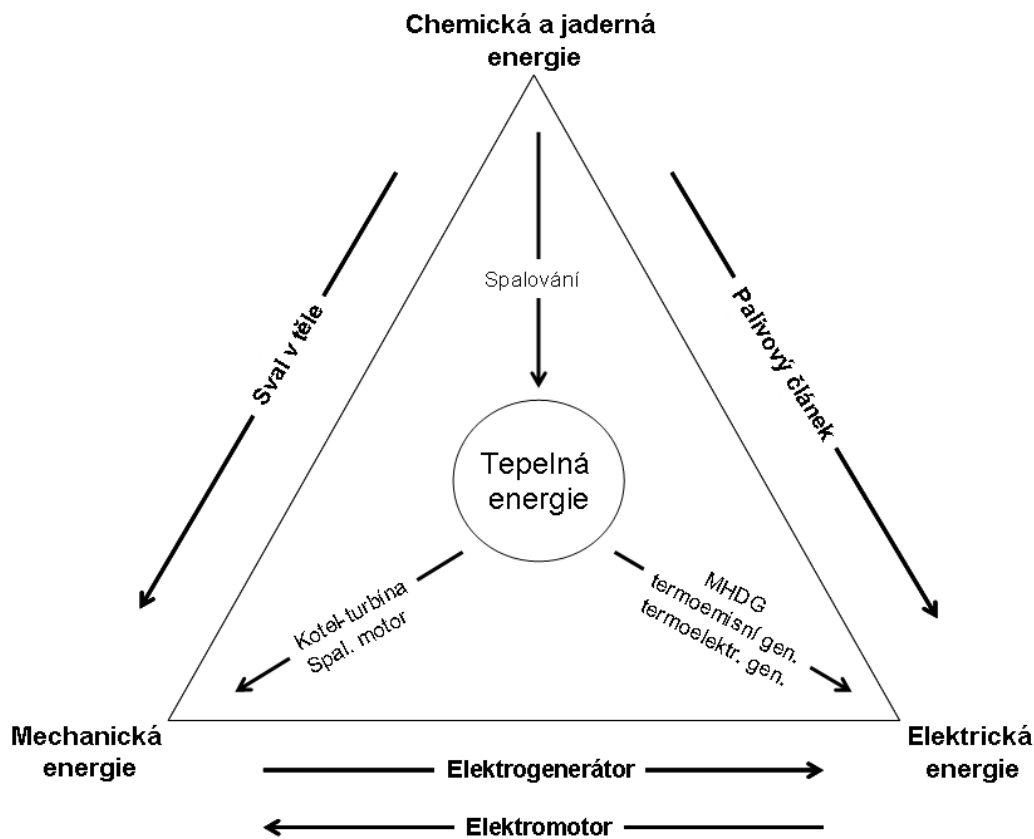
Anergie je ta část energie, která není schopna za daných podmínek transformace na jiný druh energie.

Exergie je transformovatelná část energie. Anergie je netransformovatelná část energie.

Z výše uvedených definic je zřejmé, že součet exergie a anergie zůstává konstantní při všech procesech. Kromě toho nelze přeměnit anergii na exergii.

Za 100 %-ní anergii je považována entalpie okolí (venkovního vzduchu) a těch systémů, které jsou s okolím v rovnováze. Entalpie systému, který má teplotu nebo tlak vyšší než je stav okolí, je zčásti exergií a zčásti anergií. Chemická energie se uvažuje s exergií 95 %. Jaderná energie je téměř 100 %-ní exergií. Zářivá, mechanická a elektrická energie jsou považovány za 100 %-ní exergii.

Nejdůležitější případy transformací jednotlivých druhů energie jsou znázorněny na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Diagram transformací energií

1.4 Testové otázky ke kapitole 1

1. Definujte pojem energie.
2. Co je to klidová energie? Uveďte dále její definiční vztah včetně významu a jednotek jednotlivých veličin.
3. Vyjmenujte druhy energií, s kterými se nejčastěji setkáváme.
4. Definujte pojmy vnitřní energie, vnější energie a entalpie.
5. Definujte pojmy exergie a anergie. Vyjmenujte některé případy, kdy se jedná o 100 %-ní anergii, 100 %-ní exergii a kombinaci exergie a anergie.
6. Nakreslete diagram nejčastějších případů transformací energie

doplněk ke kapitole 1.2.7

Foton

Albert Einstein začal považovat jako první kvanta elektromagnetického záření za skutečné částice. Příímý a přesvědčivý důkaz této částicové povahy fotonů (kvant elektromagnetického záření), podal až v roce 1922 americký fyzik Arthur Holly Compton (1892 - 1962, Nobelova cena v roce 1927), který experimentoval s tvrdým rentgenovým zářením o vlnové délce 0,07 nm, jehož kvanta mají vysokou energii:

$$E = h \cdot f = 17,8 \text{ keV}$$

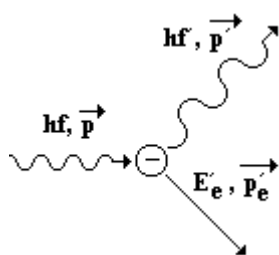
h Planckova konstanta $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ (Js)

f kmitočet záření Hz

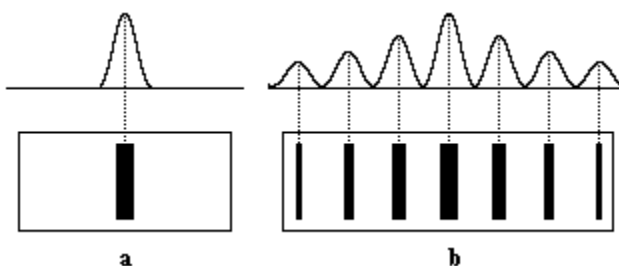
Rovnoběžný svazek tohoto záření nechal dopadat na uhlíkovou destičku a měřil frekvenci záření rozptýleného pod různými úhly. Kvanta záření se přitom chovala jako malé pružné kuličky, které se srážely s elektrony v uhlíkové destičce. Protože energie kvant elektromagnetického záření vysoko převyšovala vazebnou energii elektronů v uhlíku, bylo možné považovat elektrony za volné nehybné částice (viz obr. 1).

JINÝMI SLOVY VE VÝPOČTU NENÍ NUTNÉ BRÁT V ÚVAHU VAZEBNOU ENERGIÍ ELEKTRONU, KTEROU JE NUTNÉ PŘEKONAT. JEJÍ HODNOTA JE TOTIŽ ŘÁDOVĚ MNOHEM MENŠÍ NEŽ JE ENERGIE POUŽITÉHO ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.

Analogie pro snadnější pochopení: Mějme rybářský vlasec, který má nosnost jeden kilogram. Tento vlasec přivažme za nárazník automobilu a druhý jeho konec do skobičky ve zdi tak, že vlasec je mezi autem a zdí velmi volný. Když se auto začne rozjíždět, řidič v autě nezaznamená přetržení vlasce - síla (resp. práce) nutná na jeho přetržení je výrazně menší, než je síla (práce) vyvinutá motorem auta. (Kdybychom připevnili mezi auto a zeď silný řetěz, řidič si napnutí řetězu při rozjíždění automobilu jistě všimne ...)



Obr. 1



Obr. 1.1

Při pružných srážkách musí být splněny zákon zachování energie a zákon zachování hybnosti. Frekvence záření rozptýleného pod určitým úhlem pak splňuje rovnici:

$$h \cdot f = h \cdot f' + E_e'$$

kde

f je frekvence záření původního svazku,

f' frekvence záření rozptýleného a

E_e' kinetická energie elektronu po srážce (viz obr. 1).

Podle této rovnice je tedy $f' < f$ a $\lambda' > \lambda$. Tento rozptyl záření na volných elektronech byl nazván Comptonův jev.

Na světlo a ostatní druhy elektromagnetického záření lze tedy pohlížet jako na proud částic, proud fotonů. Jedná se o nový druh částic s nulovou klidovou hmotností, které v sobě spojují chování vln i částic, neustále se pohybují rychlostí světla a jejich energie je dána vztahem

$$E = h \cdot f \quad \text{a hybnost vztahem} \quad p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad \text{protože} \quad c = f \lambda$$

S fotony se člověk setkával již odpradáвна, neboť vnímal světlo. Fyzikálně se je podařilo objevit až ve 20. století. Jejich objev souvisí s historií výzkumu podstaty světla. Od 17. do 19. století byly vypracovány dvě teorie vysvětlující vlastnosti světla:

1. **Newtonova (korpuskulární) teorie** - chápe světlo jako proud částic
2. **Huygensova (vlnová) teorie** - světlo chápe jako vlnění světového éteru

Některé jevy (odraz, lom) bylo možné vysvětlit z hlediska obou teorií. Z hlediska Newtonovy teorie se jednalo o částice, které se prostě při dopadu na rozhraní dvou prostředí odráží nebo jím procházejí (jsou natolik malé, že projdou). Analogicky bylo možné pomocí Newtonovy teorie vysvětlit disperzi světla: bílé světlo je složeno z částic („kuliček“) různých druhů (barev), které vnímáme spolu dohromady jako barvu bílou- tzv. aditivní mísení barev.

Vyjádríme-li disperzi světla vzhledem k citlivosti lidského oka pomocí napětí -vztaženo k 1V, pak pro vytvoření bílé barvy musí být poměr základních barev spektra, červené R ,zelené G a modré B

$$U_y = 0,30 U_R + 0,59 U_G + 0,11 U_B$$

Při disperzi se pak částice jednotlivých barev od sebe oddělí proto, že mají nepatrně jiné vlastnosti (např. hmotnost).

V 19. století však došlo k zásadnímu zvratu a byla všeobecně přijata teorie vlnová. Young a Fresnel prováděli pokusy s difrakcí světla (ohybem světla). Ohyb nastává na malých překážkách či otvorech (srovnatelných s vlnovou délkou světla), na hraně, vlasu, tenkém drátku, jedné či více štěrbinách, na mřížce. Ve všech těchto případech procházející světelné vlny vzájemně interferují, v některých směrech se vzájemně zesilují, v jiných se zase zeslabují a vytvářejí tak na stínítku charakteristický ohybový obrazec (viz obr. 1.1b). Tyto experimenty není možné vysvětlit z hlediska korpuskulární teorie - ta dává výsledný obrazec s maximální intenzitou přímo naproti otvoru (viz obr. 1.1a) bez typického opakování světlých a tmavých míst (resp. barevného spektra).

J. C. Maxwell později dokázal, že světelné vlnění není vlněním éteru, jak se do té doby soudilo, ale že se jedná o zvláštní případ vlnění elektromagnetického. Na základě toho vypracoval celou teorii elektromagnetického pole, která velice dobře souhlasila s již zjištěnými (a ověřenými) fakty a zákony (Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákony, ...). Zároveň umožnila rozvoj poznatků „novým“ směrem.

Na druhé straně Planckova kvantová hypotéza vysvětlující spektrum rovnovážného záření, Einsteinova teorie fotoefektu a Comptonův jev nás přesvědčují o tom, že světlo má částicový (korpuskulární) charakter. Tím ale vzniká rozpor neřešitelný v rámci klasické makroskopické fyziky: Je-li světlo proud částic (fotonů), jak je možné vysvětlit jeho difrakci na dvou štěrbinách? Částice přece může projít jen jednou štěrbinou a přítomnost druhé štěrbinu nemůže mít na průběh experimentu žádný vliv. A přesto, jestliže zakryjeme jednu štěrbinu, difrakční obrazec se změní.

Bylo by možné si představit, že vlnění nastává, pohybuje-li se současně velké množství fotonů, podobně jako vznikají vlny v plynech nebo kapalinách. Proto byly prováděny pokusy

s velmi slabým zářením a dlouhými expozičními dobami, kdy do difrakčního systému vstupoval jeden foton po druhém. Každý takový foton vyvolal samozřejmě zčernání jen jednoho bodu fotografické desky v místě, kam náhodně dopadl. Po delší době však zčernalé body začaly opět vytvářet difrakční obrazec jako v případě vlny dopadající současně na obě štěrbinu. Na některá místa fotografické desky dopadlo fotonů méně, na některé více a pravděpodobnost dopadu se řídila přesně chováním vlny při difrakci na dvou štěrbinách.

Proto je nutné připustit, že foton se chová jako částice a zároveň jako vlna. Interferenčními metodami je možné měřit jeho frekvenci a vlnovou délku, pozorujeme-li jeho ohyb na překážkách a štěrbinách. Popisujeme tedy chování fotonu jako vlnu. Na druhé straně při fotoefektu a Comptonově jevu se chová foton jako částice - sráží se s elektrony a předává jim část své energie analogicky jako jedna kulečnicková koule předává energii jiné kouli při vzájemné srážce. Při dopadu na fotografickou desku vyvolá každý foton zčernání v určitém místě jako důsledek chemické reakce. Chová se tedy jako částice.

Uvedený rozpor se nazývá korpuskulárně vlnový dualismus (částicově vlnový dualismus). Mnoho fyziků již vedlo spory o tom, jak si představit částici, která se chová jako vlna, a vlnu, která se chová jako částice. Je to ale nesprávně položená otázka. Z naší běžné makroskopické zkušenosti jsme zvyklí buď na pohyb částic, těles (letící kulka, jedoucí automobil, pohybující se planeta, ...) a nebo na pohyb vlny (zvukové vlnění, vlna na vodní hladině, ...). Částice má v klasické fyzice v každém okamžiku určitou polohu na své trajektorii a určitou rychlost, kterou se pohybuje, vlna má zase vlnovou délku a frekvenci a zasahuje současně do celého prostoru.

Foton je objekt mikrosvěta a pohybuje se prostě jinak, než jak jsme zvyklí si představovat. Není možné prostě určit jeho trajektorii a stanovit místo jeho dopadu např. na fotografické desce. Je možné stanovit pouze pravděpodobnost, s níž dopadne do daného místa. Podle druhu experimentu, který s fotonem provádíme, může foton projevit buď svou částicovou nebo vlnovou povahu, i když se samozřejmě jedná o tentýž objekt.

Při experimentování s elektromagnetickým zářením různých vlnových délek lze zjistit tento poznatek:

SE ZKRACOVÁNÍM VLNOVÉ DÉLKY SE PROJEVUJÍ ČÁSTICOVÉ VLASTNOSTI FOTONU VÝRAZNĚJI.

Z hlediska aplikací polovodičové techniky vyplývá, že polovodičový přechod je citlivý na osvětlení, což se využívá u *fotodiod*. Luminiscenční diody LED při průchodu proudem svítí, protože při rekombinaci páru *elektron-díra* se uvolňuje energie ve formě fotonů.

Vzniká tak inverzní fotoelektrický jev, který tvoří základ svítících polovodičových přechodů, LED diod.

LED je zkratka light emitting diode. Základní princip činnosti je stejný jako u klasické usměrňovací diody. Přiložením napětí v propustném směru dochází k injekci minoritních nosičů náboje přes PN přechod. Po překonání určité vzdálenosti tyto nosiče rekombinují s nosiči opačného znaménka. Tento proces způsobuje v aktivní oblasti uvolnění energie ve formě fotonů. Vlnová délka záření λ , je dána rozdílem energií nosiče před a po rekombinaci

$$\Delta W = W_2 - W_1 ; \quad \Delta W = \frac{hc}{\lambda} \quad [J; J \cdot s, \text{ m/s}, \text{ m}],$$

odkud dostáváme pro vlnovou délku emitovaného fotonu

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W}$$

přičemž c je rychlost světla ve vakuu a h je Planckova konstanta. Přepočtem z joule na elektronvolty dostaneme vzorec

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W} e = \frac{1,24}{\Delta W} \quad [\mu m ; eV] \quad 1 eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$$

U LED se snažíme o to, aby se co nejvíce vyzářeného výkonu (typicky $50 \mu W/mA$) dostalo z aktivní oblasti na povrch. Proto musí být konstrukce LED přizpůsobena tak, aby docházelo k co nejmenší absorpci emitovaného záření v objemu polovodiče a v materiálu kontaktů. Kromě toho se emitovaný výkon zvyšuje použitím speciálních zalévacích hmot (s indexem lomu větším než 1) a skel, popřípadě rozměrově optimalizovanou polosférou nad vlastním polovodičovým systémem.

Úloha: Vlastnosti fotonu

Zadání: Určete energii, hybnost a hmotnost fotonu γ záření s vlnovou délkou $\lambda = 1 \text{ pm}$.