

LUMINESCENTNE SNOVI (I. del)

Lea Županc Mežnar, Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana

Phosphors (Part I)

ABSTRACT

In the article will be presented some of the properties of luminescent materials or phosphors: designation, colour, light output, persistence and morphology, as well as their preparation. Phosphors are widely used for displaying information in displays and for illumination purposes in fluorescent lamps.

POVZETEK

V članku bodo predstavljene osnovne lastnosti luminiscentnih snovi: oznaka, barva, svetlobni odziv, persistenca in morfologija ter njihova priprava. Luminiscentne snovi se množično uporabljajo predvsem na dveh področjih: za prikaz slike v prikazalnikih in kot izvir bele svetlobe v fluorescentnih svetilih.

1 UVOD

Luminiscenca je pojav, pri katerem nekatere snovi absorbirajo žarke visoke energije (UV-svetlobo, rentgenske žarke, elektrone, ...) in oddajajo svetlobo nižje energije.

Pojav luminiscence je prvi opisal, čeprav ne pod tem imenom, italijanski alkimist Vincenzo Cascariolo leta 1603. Ko je nekoč zmlal barit iz okolice Bologne, ga pomešal z ogljem v prahu in dal oboje v plamen, ni dobil zlata. Ponoči pa je opazil, da snov oddajala vijolično-modro svetlobo, čeprav je bila hladna. Leta 1640 je izšla prva knjiga o tem bolonjskem kamnu, kjer so prvič uporabili grško ime "stony phosphoros", kamen, ki nosi svetlobo. Od takrat se mikrokristalinične luminiscentne snovi imenujejo fosforji (phosphors), za razliko od elementa fosforja (phosphorus), ki je bil odkrit 60 let kasneje. Oba nosita ime po istem pojavu, vendar element fosfor sveti zaradi kemijske reakcije na površini (oksidacije), medtem ko "fosforji" ali luminiforji oddajajo svetlobo zaradi fizikalnega procesa v notranjosti (elektronski prehodi), kjer pa ne pride do kemijske spremembe snovi.

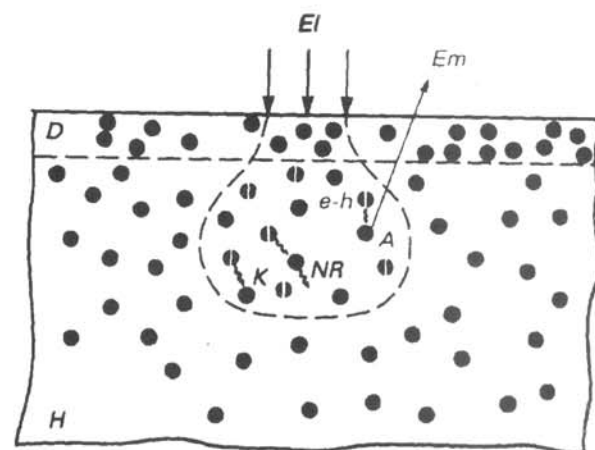
Leta 1852 je George Stokes s prizmo in optičnimi filtri razklonil belo svetlobo na pasove in ugotovil, da svetloba z vijolično-modrega dela sončnega spektra pri določenih snoveh povzroči emisijo svetlobe nižje energije. Uvedel je pojem fluorescenca po mineralu fluoritu, ki so ga v tistem času množično preiskovali. S fluorescenca poimenujemo pojav, kjer snov sveti le kratak čas po vzbujanju (10^{-9} - 10^{-3} s), pri fosforescenci pa je ta čas daljši (10^{-3} - 10 s). Eilhard Wiedemann je leta 1888 uvedel pojem luminiscenca za vse pojave, kjer snov sveti, ne da bi jo bilo potrebno močno segreti.

Opisanih je bilo mnogo vrst luminiscence, ki se med seboj razlikujejo po načinu vzbujanja in se po njem tudi imenujejo. Če v visokem vakuumu zberemo curek elektronov in ga potem vodimo po zaslonu, imenujemo pojav katodoluminiscenca. To je osnovni princip delovanja velike in najstarejše družine prikazalnikov - katodnih elektronov, ki prikazujejo sliko pri TV-sprejemnikih in računalniških monitorjih. Elektroluminiscentne snovi oddajajo svetlobo, če skozi njih teče električni tok.

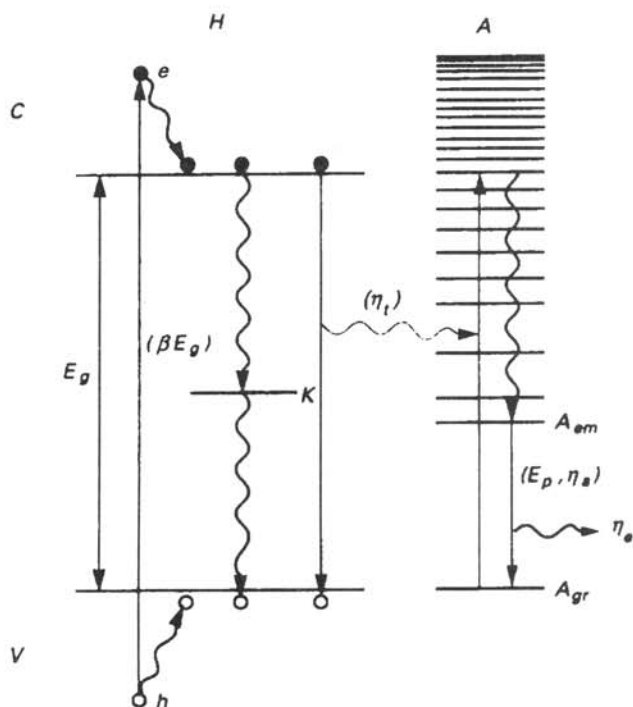
Plazemski prikazalniki delujejo na osnovi iono- ali anodoluminiscence. Pojav fotoluminiscence se izkorišča v ogromni industriji fluorescentnih svetil, kjer plast luminiforja absorbira UV-svetlobo, nastalo pri razelektritvi živega srebra in oddaja vidno svetlobo. Če vzbujamo z visokoenergijskimi rentgenskimi žarki, je pojav znan kot rentgenoluminiscenca, kemoluminiscenca pa je emisija svetlobe kot posledica energije, ki se sprosti pri kemijski reakciji. Bioluminiscenco srečamo pri živih organizmih, npr. globokomorskih ribah in kresnicah. Manj znani pojavi so še: triboluminiscenca (trenje), radioluminiscenca (radioaktivne snovi), sonoluminiscenca (zvok visokih frekvenc) in termoluminiscenca (višja temperatura).

2 Katodoluminiscentni proces

Fizikalni procesi, ki delujejo pri vzbujanju luminiforja z elektroni v katodni elektronki, so prikazani na sliki 1 [1]. Podobni procesi potekajo tudi pri vzbujanju z UV-svetlobo. Luminiscentno snov sestavljata anorganska matrika H in aktivator A, kot na splošno imenujemo elemente, ki so vgrajeni v matriko in povzročijo luminiscenco. Hitri elektroni (EI) prodrejo v luminifor in se upočasnijo v kristalni mreži matrike. Vstopna globina elektronov je odvisna od pospeševalne napetosti in pada s specifično gostoto snovi: pri 30 kV je vstopna globina 3-5 μm . Pospešeni elektroni vzbudijo elektrone na notranjih nivojih matrike in ti povzročijo plaz sekundarnih elektronov. V kristalni mreži matrike nastanejo pari elektron-vrzel (e-h), ki prenesejo svojo energijo do atomov aktivatorja in jih vzbudijo. Ti se vrnejo v osnovno stanje tako, da oddajajo svetlobo z energijo Em. Nastanejo tudi nesevalni procesi zaradi prenašanja energije do atomov zaviralcev (K-killer centers), zaradi rekombinacije na neaktivni površini zrn (D), kjer je večje število napak v kristalni strukturi, in zaradi nesevalnih prehodov aktivatorja (NR).



Slika 1. Shematski prikaz procesov pri vzbujanju delca luminiforja z elektroni v katodni elektronki [1]



Slika 2. Shematski prikaz energij in izkoristkov posameznih procesov pri vzbujanju luminiforja [1]

Slika 2 prikazuje različne stopnje vzbujanja in njihove izkoristke. Nastanek para elektron-vrzel zahteva povprečno energijo βE_g , kjer je E_g energija reže in β

faktor med 2,7 in 5, odvisno od kristalne mreže. Elektroni se v prevodnem pasu C lahko rekombinirajo z vrzeli v valenčnem pasu (V) preko zaviralcev ali s prenosom energije do aktivatorja; izkoristek procesa je η_t . Vzbujeni ioni aktivatorja se vrnejo v A_{em} -stanje preko nesevalnih prehodov, v osnovno stanje A_{gr} pa s sevalnim prehodom. Pri tem aktivator odda foton z energijo E_p , kvantni izkoristek procesa pa je η_a (razmerje št. fotonov in vzbujenih ionov aktivatorja). Fotoni zapustijo zrna luminiscentnega prahu (zaslon) z izkoristkom η_e .

Če upoštevamo posamezne procese pri vzbujanju luminiforja v katodni elektroniki, lahko definiramo celoten izkoristek η_{CR} /1/:

$$\eta_{CR} = (E_p / \beta E_g) \eta_t \eta_a \eta_e \quad (1)$$

3 Luminiscentne snovi

Snovi, ki pri vzbujanju z visokoenergijskimi delci ali fotoni svetijo, imenujemo luminiscentne snovi ali luminiforji [2]. Na začetku so uporabljali le fino mlete naravne snovi, npr. $Zn_2SiO_4:Mn$ in $(Zn,Cd)S$, dopiran z manj kot 1% bakra ali srebra. Hkrati s hitro rastjo TV-industrije in proizvodnje fluorescentnih svetil po drugi svetovni vojni se je širila tudi proizvodnja umetno pripravljenih luminiscentnih snovi. Črnobeli televiziji se je leta 1953 pridružila še barvna in vzpodbudila iskanje primernih modrih, zelenih in rdečih luminiforjev. Leta 1964 so se na trgu pojavili prvi luminiforji, ki vsebujejo elemente redkih zemelj. Zaradi mnogo prednosti (termična obstojnost, linearni odziv pri višjih energijah

TABELA 1. Osnovne lastnosti nekaterih katodoluminiscentnih snovi [3-5]

Luminifor a	b	Barva izsevane svetlobe	Barvne koordinate		Kemijska sestava	Izkoristek		Izsevalni čas (10%)
			x	y		energijski (%)	svetlobni (lm/W)	
P1	GJ	zelena	0,218	0,712	$Zn_2SiO_4:Mn$	4,8-8,5	28-31	25 ms
P4		bela			$ZnS:Ag+$ $(Zn,CdS):Ag$			40 μs
P5	BJ	modra	0,169	0,123	$CaWO_4:W$	2,5-3,6	2,1-3	25 μs
P11	BE	modra	0,139	0,148	$ZnS:Ag$	10-21	10-27	34 μs
P14		modra + oranžna			$ZnS:Ag+$ $(Zn,CdS):Cu$			27 μs + 500 ms
P20	KA	zelena	0,426	0,546	$ZnCdS:Ag$	14-16	65	0.3 ms
P22	X	rdeča	0,650	0,325	$YVO_4:Eu$	7,1-8	9,5	3 ms
P22	XX	rdeča	0,628	0,337	$Y_2O_2S:Eu$	13		0.85 ms
P25	LJ	oranžna	0,569	0,0429	$CaSiO_3:Mn,Pb$			60 μs
P43	GY	zelena	0,333	0,556	$Gd_2O_2S:Tb$	11-18	37-41	1 ms
P45	WB	bela	0,243	0,312	$Y_2O_2S:Tb$	18	20	600 μs
P53	KJ	zelena	0,368	0,539	$Y_3Al_5O_{12}:Tb$	12	30	7 ms
P56	RF	rdeča	0,640	0,335	$Y_2O_3:Eu$			2 ms
	LA	oranžna	0,557	0,442	$Cd_5(PO_4)_3Cl:Mn$			28 ms

vzbujanja, ozki emisijski vrhovi) so hitro nadomestili sulfidne snovi.

Več kot tisoč organskih in anorganskih snovi sveti, le nekaj sto pa je tehnološko uporabnih. Omejila se bom le na luminiforje za katodne elektronke. Osnovne lastnosti luminiscentnih snovi, ki definirajo njihovo uporabo v različnih napravah, so: oznaka oz. kemijska sestava, barva, svetlobni izkoristek, persistenca in morfološke značilnosti.

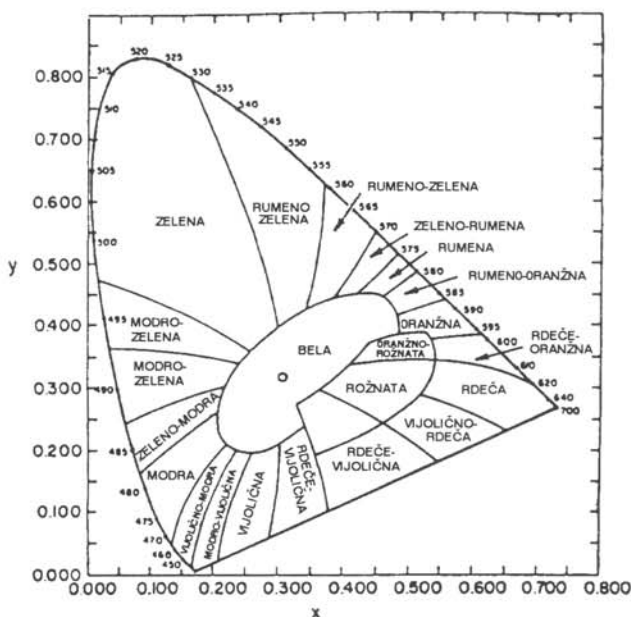
3.1 Razvrščanje luminiscentnih snovi

V uporabi sta dva sistema razvrščanja luminiscentnih snovi. Prvi je sistem JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council, ZDA), ki se najpogosteje uporablja. Nove luminiforje registrirajo v publikaciji Optical Characteristics of Cathode Ray Screens /3/, kjer je vsaka snov označena s črko in številko (tabela 1a), priložen je emisijski spekter in pojevanje svetlosti s časom, potem ko prekinemo vzbujanje. Tabela 1 podaja nekaj luminiscentnih snovi, ki smo jih uporabili pri izdelavi zaslonov v našem laboratoriju za optoelektroniko; registriranih in komercialno dosegljivih pa je več kot 60 različnih katodoluminiscentnih snovi.

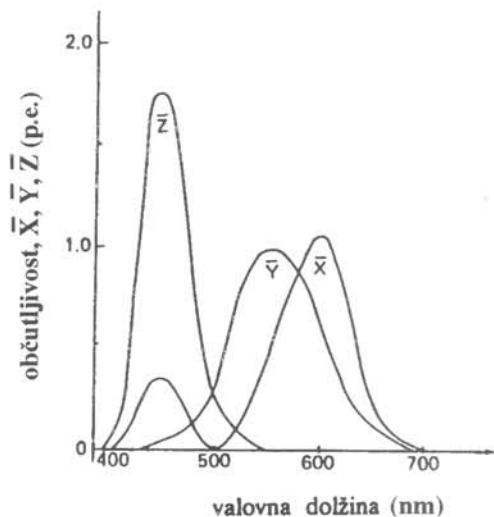
Mednarodno združenje Pro elektron s sedežem v Bruslju izdaja svojo publikacijo /4/, kjer je luminiscentna snov označena z eno ali dvema črkama (tabela 1b). Oba sistema navajata le splošne lastnosti, medtem ko mora uporabnik za specifične pogoje vzbujanja sam določiti lastnosti, kot sta npr. svetlobni izkoristek in trajnost.

3.2 Barva oddane svetlobe luminiscentnih snovi

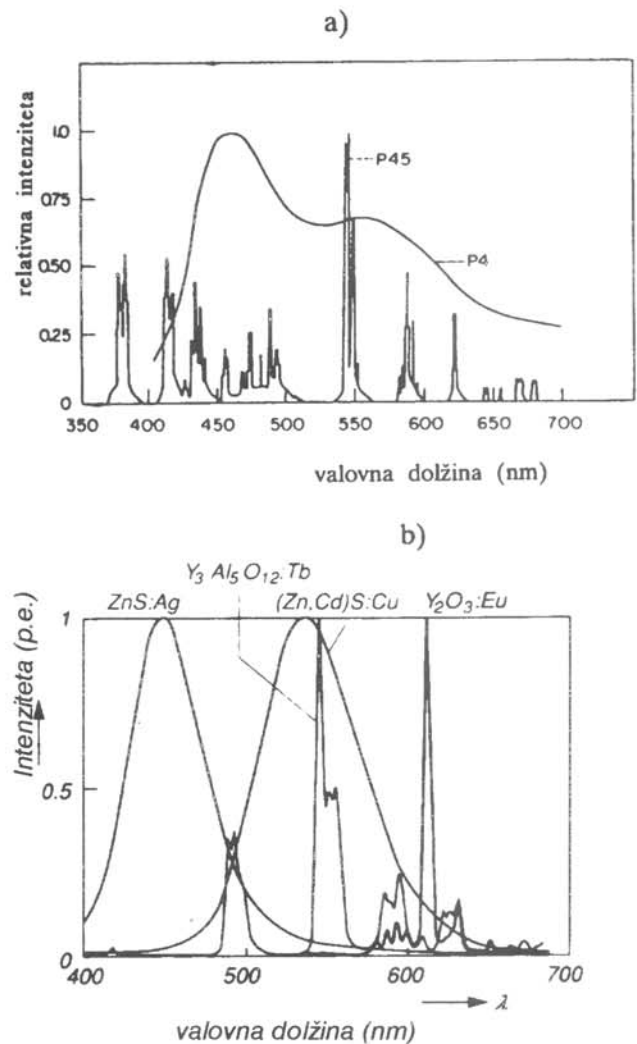
Barvo oddane svetlobe luminiforjev kvantitativno podajajo na dva načina: s spektralno porazdelitvijo in CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) barvnima koordinatama x in y. Iz emisijskih spektrov ne moremo določiti, kakšno barvo bo zaznalo oko. Zato so pri CIE



Slika 3. Barvni diagram CIE iz leta 1931 /5/



Slika 4. Faktorji občutljivosti očesa za določeno valovno dolžino oziroma barvo, določeni pri CIE /5/. Krivulja \bar{Y} prikazuje hkrati tudi relativno občutljivost očesa pri dnevni svetlobi



Slika 5. a) Emisijski spektri nekaterih belih /6/ in b) barvnih luminiforjev /1/ (P45: $Y_2O_2S:Tb$, P4: $ZnS:Ag + (Zn,Cd)S:Ag$)

TABELA 2. Osnovne količine v optiki [7]

Količina	Simbol	Fizikalne enote	Fiziološke enote
Svetlobni tok	$P = \frac{Q}{t}$	vat (W)	lumen (lm)
Gostota svetlobnega toka	$j = \frac{P}{S}$	W/m ²	lm/m ²
Osvetljenost	$M = \frac{dP}{dA}$	W/m ²	luks (lx) (lm/m ²)
Svetilnost	$I = \frac{dP}{d\Omega}$	W/sterad.	sveča (cd) (lm/sterad.)
Svetlost	$B = \frac{dI}{dS}$	W/m ² .sterad	cd/m ²

določili standardni barvni diagram (slika 3), kamor vnesemo normalizirani koordinati x in y (x+y+z=1). Iz emisijskega spektra izračunamo barvne koordinate tako, da intenziteto pomnožimo s faktorjem občutljivosti očesa za določeno valovno dolžino (barvni koeficienti v odvisnosti od valovne dolžine $\bar{X}(\lambda)$, $\bar{Y}(\lambda)$ in $\bar{Z}(\lambda)$, slika 4). Z barvnimi koordinatami je tudi mogoče napovedati, kakšno barvo bomo dobili iz mešanice posameznih luminiscentnih snovi [5,6].

Emisijski spekter je "prstni odtis" luminiforja, iz katerega lahko razberemo, v katerem delu svetlobnega spektra snov oddaja (UV, V, IR), kakšna je širina spektralne porazdelitve, ali imamo več vrhov itn. (slika 5). V splošnem imajo f-d prehodi aktivatorjev široke emisijske vrhove in manj nasičeno barvo (ZnS:Ag, (Zn,Cd)S:Cu), medtem ko imajo f-f prehodi (Y₃Al₅O₁₂:Tb, Y₂O₃:Eu, Y₂O₂S:Tb) ozke emisijske vrhove in bolj nasičeno barvo. Z mešanico ZnS:Ag in (Zn,Cd)S:Cu dobimo bel luminifor (npr. P4).

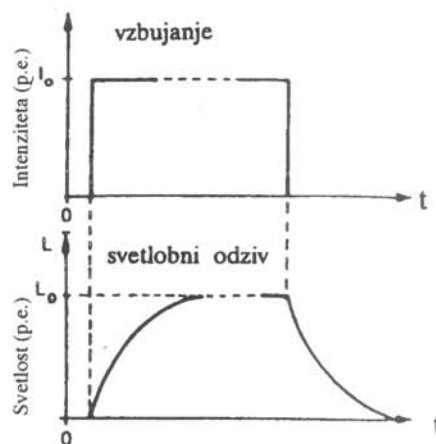
3.3 Svetlobni odziv luminiscentnih snovi

Svetlost zaslona je odvisna od luminiscentne snovi in pogojev vzbujanja. Na splošno velja, da je svetlobni izkoristek tržno dosegljivih luminiforjev med 3 in 21 % (tabela 1). Fizikalno lahko zaslon podamo kot točkasti ali ploskovni svetlobni izvir. Kadar snov oddaja svetlobo zunaj vidnega področja, se uporabljajo fizikalne enote, pri vizualnih aplikacijah pa so primernejše fiziološke enote, ki upoštevajo občutljivost očesa za določeno valovno področje (tabela 2).

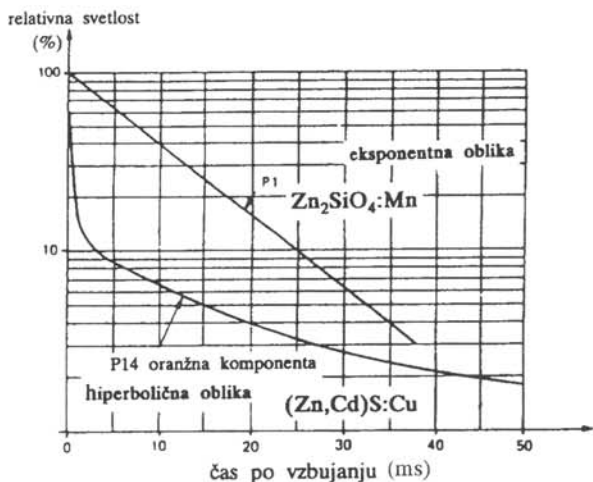
3.4 Persistenca luminiscentnih snovi

Pojemanje svetlosti, potem ko prenehamo vzbujanje, imenujemo persistenca. Čas ugašanja je v mejah od nanosekunde do nekaj sekund in je pomembna lastnost luminiscentne snovi, saj določa, v kateri napravi jo

bomo uporabili. V grobem so luminiforji razdeljeni v tri skupine: počasi ugašajoči se uporabljajo v radarjih, hitri za skeniranje, srednje hitri pa za katodne elektronke (nekaj 100 μs). Počasni bi na TV-zaslону povzročili senčenje gibajočih predmetov, hitri pa utripanje. Podaja se z izsevalnim časom t_x, ko pade svetlost na 1/e, 10% ali 1% začetne vrednosti (tabela 1). Ker poje manje ni linearno, je potrebno poznati celoten potek krivulje, in ne le t_x. Različne odzive dobimo tudi glede na dolžino in število pulzov, s katerimi vzbujamo (slika 6). S slike 7 je razvidno, da je padanje svetlosti lahko eksponentno (pri silikatih, fosfatih, oksisulfidih lantanoidov, aluminatih, volframatih in nekateri fluoridih) ali hiperbolično (pri sulfidih in nekaterih fluoridih). Slednji imajo daljši čas pojemanja, zato so manj primerni za izdelavo slikovnih prikazalnikov [5,6].



Slika 6. Vzbujanje z dolgim pulzom in svetlobni odziv luminiforja [5]



Slika 7. Značilni obliki krivulj, ki ponazarjata poje-manje svetlosti /5/

3.5 Morfologija luminiscentnih snovi

Velikost in oblika delcev vplivata na zlaganje osnovnih gradnikov v plast. Gostota in debelina plasti pa neposredno vplivata na svetlost in ločljivost zaslonov /8/. Ločljivost katodne elektronke je seštevek ločljivosti zaslona in velikosti elektronskega snopa. Za visoko-ločljiv zaslon (premer črte ali svetlobne točke < 20 μm) potrebujemo luminiscentni prah z 1-2 μm velikimi delci. Tako majhna zrna dobimo z nastavitvijo temperature žganja, mletjem in/ali separacijo. Majhni delci pa imajo nizek svetlobni izkoristek, saj je razmerje volumna neaktivne plasti na površini proti volumnu aktivnega dela zrna bolj neugodno kot pri velikih zrnih. Zato se odločimo za kompromis med svetlostjo in ločljivostjo glede na zahteve, ki jih mora izpolnjevati zaslon. Mletje ni zaželeno, saj dodatno znižuje svetlobni izkoristek snovi, sejanje pa je zelo neekonomičen postopek; zato iščejo nove postopke priprave, kot je npr. sol-gel, kjer dobimo kot produkt fin prah z ozko porazdelitvijo velikosti in dovolj visokim svetlobnim izkoristkom /9/.

4 Sinteza luminiscentnih snovi

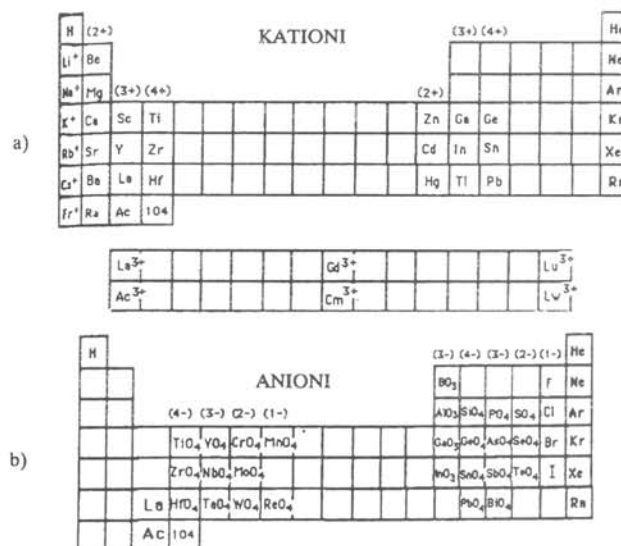
Pri sintezi luminiscentnih snovi veljajo nekatera splošna pravila, nemogoče pa je vnaprej napovedati, kako pripraviti snov z visokim kvantnim izkoristkom. Izbrati je potrebno osnovno matriko in aktivator, poznati pa moramo tudi zaviralce in koaktivatorje. Pri pripravi luminiscentnih snovi je potrebno paziti na čistočo kemikalij in postopkov, ujemanje velikosti in števila zunanjih elektronov pri kationih mreže in aktivatorja, optično prepustnost matrike in optično aktivnost aktivatorja.

Luminoforji so anorganske kristalinične snovi, kjer so v kristalno mrežo osnovne snovi (matrike) vgrajeni ioni aktivatorja. **Anorgansko matriko** luminiforja sestavlja kation (slika 8a) in anion (kisik ali borati, silikati, fosfati ...) z določeno valenco (slika 8b) /10/. Končna oblika anionov v kristalu je lahko drugačna (npr. SiO₄⁴⁻, Si₂O₇⁶⁻, Si₄O₁₁⁵⁻). Osnovna matrika mora biti optično prepustna, da absorpcija poteče le na aktivatorju.

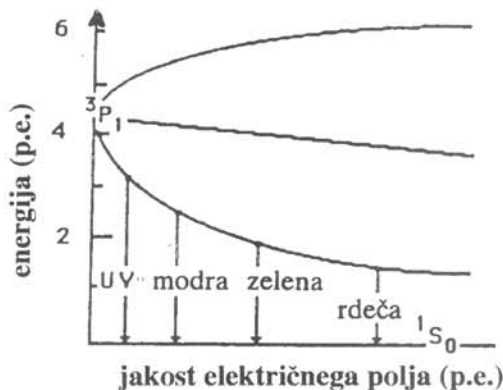
Izjema so samoaktivirani luminiforji, kjer absorpcija poteka na anionskem delu (prehodni elementi, slika 8b) in kjer ni dodan aktivator (razen lantanoidov). Določeno valenčno stanje mora biti v kristalu stabilno. Vpliv matrike na luminiscentne lastnosti je zelo kompleksen pojav, odvisen je od simetrije in moči električnega polja na mestu kationa. Zgled: aktivator Sn²⁺ lahko v različnih snoveh oddaja UV, modro, zeleno ali rdečo svetlobo (slika 9).

Aktivatorji (slika 10) morajo imeti d¹⁰s² (1S₀) elektronsko konfiguracijo. Pri elementih, ki imajo le polovično zasedeno lupino, ne pride do dovolj močne absorpcije, zato jim dodamo **koaktivatorje**, ki bolje absorbirajo energijo vzbujanja in jo oddajo aktivatorju /11/.

Za sistem osnovna mreža-aktivator velja Vegardov zakon /10/, ki pove, da se smejo ionski radiji kationov aktivatorja in osnovne mreže razlikovati za manj kot 15%; višje neujemanje pri koncentraciji aktivatorja nad 5 % povzroči v kristalu napetosti in napake, ki zmanjšujejo kvantni izkoristek snovi. Kationa morata imeti tudi enako valenco, sicer nastanejo v osnovni kristalni mreži napake; dodamo lahko katione za kompenzacijo naboja.



Slika 8. Matrični kationi in anioni ter njihova valenčna stanja /10/



Slika 9. Energija oddane svetlobe aktivatorja Sn²⁺ pri različnih jakostih električnega polja /10/

KATIONI

																	(1+) (2+) (3+)	He												
																	polovično zasedeni nivoji				Ne									
																	(1+) (2+) (3+)			(1-) (0)	Ar									
																	Cr	Mn	Fe			Cu	Zn	Ga	Ge	As		Kr		
																			Tc			Ag	Cd	In	Sn	Sb		Xe		
																	La		Re			Au	Hg	Tl	Pb	Bi		Rn		
																	Ac	104												
																	(3+)													
																	Ce	Pr	Nd		Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	
																	Th	U												

Slika 10. Kationi, ki jih lahko uporabimo kot aktivatorje /10/

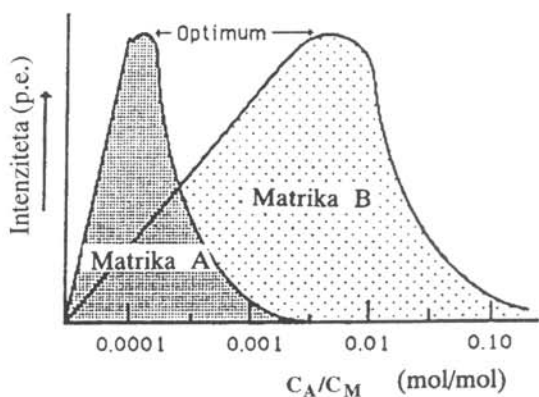
Na sliki 11 so zaviralci luminiscence. To so kationi z določeno valenco (quencheri, killers), ki absorbirajo energijo, s katero jih vzbujaemo. Pri pripravi luminiforja moramo torej paziti na čistočo reaktantov; v njih sme biti < 1 ppm motečih kationov.

kationi z neparnimi spini

																	(2+) (3+) (3+)	(2+) (2+)	He										
																					Ne								
																				(2+) (2+)	Ar								
																	Ti	V	Cr			Fe ²⁺	Co ²⁺	Ni	Cu				Kr
																	Zr	Nb	Mo			Ru ³⁺	Rh ³⁺	Pd					Xe
																	La	Hf	Ta	W	Re ⁴⁺	Os ⁴⁺	Ir ⁴⁺	Pt					Rn
																	Ac	104											

Slika 11. Kationi, ki znižujejo svetlobni odziv luminiforjev /10/

Na višino kvantnega izkoristka luminiscentne snovi vpliva koncentracija aktivatorja, vgrajenega v določeno kristalno strukturo osnovne matrike. Optimalno koncentracijo aktivatorja v snovi moramo eksperimentalno določiti glede na svetlobni odziv. Na sliki 12 je prikazano, da intenziteta oddane svetlobe sprva linearno narašča s številom aktivatorskih mest N_{ak}, dokler ne



Slika 12. Optimalna koncentracija aktivatorja (CA) v dveh različnih matrikah (CM) /10/

postane gostota teh mest previsoka in pride do nasičenja.

Z zaporednimi poskusi priprave in meritve svetlobnega odziva snovi je potrebno izbrati optimalni temperaturni cikel. Natančno je potrebno določiti tako temperaturo kot čas segrevanja, ki sta odvisna od vrste in oblike reaktantov.

Od kemijskih lastnosti reakcijskih snovi je odvisno, katero atmosfero uporabimo pri segrevanju: nevtralnno (N₂, Ar ...), reduktivno (95-98 % N₂ in 2-5 % H₂) ali zračno. S segrevanjem na zraku pri nekaterih elementih (npr. kositrju) preprečimo redukcijo.

Sintezne poti, s katerimi pripravimo luminiscentni prah, so lahko različne. Reaktanti, ki bodo vstopili v reakcijo pri visoki temperaturi, so v različnih oblikah:

- kot mešanica oksidov
- aktivator je koprecipitiran v oborini osnovne matrike
- aktivator je že delno vgrajen v osnovno matriko (gel).

Eden izmed fosforjev, ki jih lahko pripravimo direktno z obarjanjem, je YVO₄:Eu. Oborina ima že pred segrevanjem 40 % svetlosti končnega produkta. Oborino kot vmesni produkt uporabljamo zato, da reakcija poteče hitreje, ker je ne omejuje proces difuzije, kot je to primer pri reakciji v trdnem stanju.

5 SKLEP

V članku sem predstavila pojav luminiscence, osnovne lastnosti in sintezo luminiscentnih snovi. Poudarek je bil predvsem na katodoluminiscentnih snoveh, ki jih v našem laboratoriju uporabljamo pri izdelavi zaslonov za miniaturne katodne elektronke.

6 LITERATURA

- /1/ R. Raue, A.T. Vink and T. Welker, Phosphor screen in cathode-ray tubes for projection television, Philips Tech. Rev., 44, 335 (1989)
- /2/ H.W. Leverenz, An introduction to luminescence of solids, John Wiley & Sons, New York, 1950
- /3/ Optical Characteristics of Cathode Ray Tube Screens, Engineering Dept., Electronic Industries Association (1985), Publ. No. 116A, Washington, DC
- /4/ Pro Electron Handbook, Pro Electron, 10 Avenue Hamoir, Brussels 18
- /5/ A. Martin, Cathode Ray Tubes for Military Applications, Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press, New York, 67, 183 (1986)
- /6/ S. Woodcock and J. D. Leyland, The choice of phosphor for modern CRT display applications, Displays, 7, 69 (1979)
- /7/ J. Strnad, Fizika, 2. del, Državna založba Slovenije, 1985, str. 511
- /8/ L. Ozawa and H.N. Hersh, Optimum arrangement of phosphor particles in cathode-ray picture tube screens, J. Electrochem. Soc., 121, 894 (1974)
- /9/ M. Pham-Thi and A. Morell, Process optimization and characterization of the red no-mill phosphor Y₂O₂S:Eu, J. Electrochem. Soc., 138, 1100 (1991)
- /10/ R.C. Ropp, Luminescence and the Solid State, Elsevier, Amsterdam, 1991
- /11/ J. Shmulovich, G.W. Berkstresser, C.D. Brandle and A. Valentino, Single-crystal rare-earth-doped yttrium orthosilicate phosphors, J. Electrochem. Soc., 135, 3141 (1988)