

# Obsah

Předmluva .....	10
Úvod.....	12
<b>1 Teoretický úvod .....</b>	<b>13</b>
1.1 Záření kolem nás .....	13
1.2 Základní pojmy spojené s luminiscencí .....	16
1.2.1 Procesy interakce světelného paprsku a optického média .....	16
1.2.2 Historie luminiscence .....	19
1.2.3 Definice základních pojmů spojených s luminiscencí .....	20
1.2.4 Druhy luminiscence .....	21
1.3 Energetické stavy částic .....	22
1.3.1 Výstavba elektronového obalu atomů.....	22
1.3.2 Popis termů a multipletů.....	23
1.3.2.1 Sčítání momentu hybnosti a atomové termy.....	25
1.3.3 Přejechy elektronů do vzbuzených stavů.....	27
1.4 Charakteristiky luminiscence .....	29
1.4.1 Časový průběh luminiscence .....	29
1.4.2 Rozdělení luminiscence dle jejích časových charakteristik.....	30
1.4.3 Kvantový výtěžek luminiscence .....	31
1.5 Pásový model elektronové struktury pevných látek.....	33
1.5.1 Vznik energetických pásů v pevné látce .....	33
1.5.2 Uspořádání elektronů v energetických pásech.....	34
1.5.3 Vlastnosti látek vyplývající z pásové teorie .....	34
1.6 Luminiscence v pojetí pásového modelu pevných látek .....	37
1.7 Model konfiguračních křivek .....	38
1.8 Procesy vedoucí ke ztrátě luminiscenčního světla .....	42
1.8.1 Teplotní zhášení luminiscence .....	42
1.8.2 Teplotně indukovaná ionizace excitovaného stavu.....	42
1.8.3 Zhášení luminiscence přenosem náboje .....	46
1.9 Teorie krystalového pole .....	46
1.10 Vybrané druhy luminiscenčních center .....	49
1.10.1 Energetické hladiny iontů vzácných zemin ( $4f \rightarrow 4f$ přechody).....	50
1.10.2 Ionty vzácných zemin se širokou emisí .....	53
1.10.3 Ionty s konfigurací základního stavu $ns^2$ .....	56
1.10.4 Energetické hladiny iontů d prvků (přechodných kovů).....	58
1.10.5 Exciton .....	59
1.10.6 Excitonu podobná luminiscence .....	60
1.10.7 Mechanismus červené emise ve scintilačních krystalech ZnSe:Te.....	60



1.10.8	Cross-luminiscence.....	61
1.10.9	Luminiscence s přenosem náboje .....	62
<b>2</b>	<b>Scintilační materiál</b> .....	<b>66</b>
2.1	Definice scintilačního materiálu .....	66
2.2	Stručná historie používání scintilačních materiálů.....	66
2.3	Fyzikální mechanismus scintilace .....	69
2.4	Scintilační detektor, scintilační sonda .....	70
2.5	Parametry scintilačních materiálů .....	72
2.5.1	Hustota, efektivní atomové číslo a lineární koeficient zeslabení.....	72
2.5.2	Pozice emise .....	74
2.5.3	Celková scintilační účinnost a relativní účinnost .....	75
2.5.4	Radiační poškození .....	76
2.5.5	Barevná centra .....	77
2.5.5.1	Barevná centra v halogenidech .....	77
2.5.5.2	Barevná centra v oxidech.....	80
2.5.6	Doba života scintilace .....	80
2.5.7	Afterglow .....	82
2.5.8	Světelný výtěžek, proporcionalita a energetické rozlišení.....	83
2.5.9	Časové rozlišení .....	84
2.5.10	Teplotní stabilita emise .....	84
2.5.11	Chemická a fyzikální stabilita.....	84
2.6	Neutronové scintilátory a specifika požadavků na jejich vlastnosti.....	85
2.6.1	Složení, hustota a atomové číslo.....	86
2.6.2	Schopnost diskriminace tvarem pulzu a výškou pulzu .....	88
2.6.3	Poměr alfa/beta .....	89
	Poděkování.....	90
<b>3</b>	<b>Příklady scintilačních materiálů</b> .....	<b>91</b>
3.1	Scintilační materiály na bázi halogenidů.....	91
3.1.1	NaI:Tl <sup>+</sup> , CsI:Tl <sup>+</sup> .....	91
3.1.2	LaBr <sub>3</sub> :Ce <sup>3+</sup> , Sr <sup>2+</sup> .....	93
3.1.3	CeBr <sub>3</sub> .....	94
3.1.4	SrI <sub>2</sub> :Eu <sup>2+</sup> .....	94
3.1.5	Cs <sub>2</sub> HfCl <sub>6</sub> .....	95
3.1.6	LaF <sub>3</sub> .....	96
3.1.7	BaF <sub>2</sub> .....	98
3.1.8	VUV scintilátory .....	98
3.2	Scintilační materiály na bázi oxidů .....	100
3.2.1	Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (BGO).....	100
3.2.2	CdWO <sub>4</sub> (CWO).....	101
3.2.3	PbWO <sub>4</sub> (PWO).....	102
3.2.4	Scintilátory na bázi granátů .....	103
3.2.4.1	YAG:Ce <sup>3+</sup> , LuAG:Ce <sup>3+</sup> .....	104
3.2.4.2	GGAG:Ce <sup>3+</sup> .....	106
3.2.4.3	Vliv iontů Ce <sup>4+</sup> na luminiscenční vlastnosti.....	107



3.2.4.4	Scintilační materiály na bázi granátů ve formě tenkých vrstev .....	109
3.2.4.5	YAG dopovaný ionty $\text{Eu}^{2+}$ .....	111
3.2.4.6	Vliv stechiometrie na scintilační vlastnosti hlinitých granátů .....	112
3.2.5	$(\text{Gd},\text{La})\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}^{3+}$ .....	113
3.2.6	$(\text{Lu},\text{Y})_2\text{SiO}_4\text{O}$ (LYSO): $\text{Ce}^{3+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ .....	116
3.2.7	GSO: $\text{Ce}^{3+}$ .....	117
3.2.8	Scintilátory na bázi $\text{SrHfO}_3$ .....	119
3.2.9	$\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ , $\text{LuAlO}_3:\text{Ce}$ , $\text{LaAlO}_3:\text{Ce}$ .....	122
3.3	Scintilační materiály na bázi sulfidů.....	123
3.3.1	$\text{AlnS}_2:\text{Eu}^{2+}$ .....	123
3.3.2	$\text{ZnS}:\text{Ag}^+$ .....	124
3.4	Scintilátory ve formě kvantových struktur .....	125
3.4.1	Scintilátory na bázi nitridových polovodičů .....	125
3.4.1.1	Optické vlastnosti heterostruktur na bázi GaN .....	130
3.4.2	Scintilátory na bázi $\text{ZnO}:\text{Ga}$ .....	131
3.4.3	$\text{CsPbX}_3$ (X = Cl, Br, I) .....	133
3.4.3.1	K přípravě $\text{CsPbX}_3$ .....	134
3.5	Eutektické systémy se separovanými fázemi .....	135
3.6	Neutronové scintilátory .....	136
3.6.1	Lithiové sklo .....	138
3.6.2	$^6\text{LiF}/\text{ZnS}:\text{Ag}$ .....	138
3.6.3	$^6\text{LiI}:\text{Eu}$ .....	139
3.6.4	$\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$ .....	139
3.6.5	Neutronové scintilátory na bázi halogenidových elpasolitů .....	139
3.6.6	Neutronové scintilátory na bázi $\text{LiCaAlF}_6$ (LICAF).....	142
3.6.7	$\text{LiBaF}_3$ .....	143
3.6.8	Eutektické systémy s obsahem Li.....	144
3.6.9	$\text{LiAlO}_2:\text{Ti}$ .....	145
3.6.10	$\text{Li}_4\text{SiO}_4:\text{Ti}$ .....	147
3.6.11	Scintilátory pro rychlé neutrony .....	148
	Poděkování.....	148
<b>4</b>	<b>Aplikace scintilačních materiálů</b> .....	<b>149</b>
4.1	Lékařské aplikace .....	149
4.1.1	Radioterapie .....	149
4.1.2	Hadronová terapie.....	150
4.1.2.1	Protonová terapie .....	151
4.1.2.1.1	Detekce .....	152
4.1.3	Výpočetní tomografie – CT .....	152
4.1.3.1	Historická poznámka .....	152
4.1.3.2	Princip CT .....	153
4.1.3.3	Scintilační detektory v CT systémech.....	154
4.1.3.4	Rekonstrukce obrazu.....	156
4.1.3.5	Princip výstavby CT obrazu metodou iterativní rekonstrukce.....	157
4.1.4	Protonová CT (pCT) .....	158



4.1.5	Pozitronová emisní tomografie (PET) .....	159
4.1.5.1	Úvod.....	159
4.1.5.2	Princip PET.....	160
4.1.5.3	Scintilační detektory v PET .....	161
4.1.5.4	Využití PET v různých medicínských odvětvích .....	163
4.1.5.4.1	PET v neurologii.....	163
4.1.5.4.2	PET v onkologii.....	163
4.1.5.5	PET v budoucnu.....	164
4.1.6	Pozitronová emisní tomografie s měřením doby letu (TOF–PET) .....	164
4.1.6.1	Úvod.....	164
4.1.6.2	Princip fungování TOF–PET .....	165
4.1.6.3	10ps výzva .....	166
4.1.7	PET/CT .....	168
4.1.8	Další multimodalitní systémy .....	171
4.1.9	Pozitronová emisní mamografie (PEM) .....	171
4.1.10	Fotodynamická radioterapie (PDTX) .....	175
4.2	Fyzika vysokých energií.....	177
4.2.1	CERN.....	177
4.2.1.1	LHC.....	178
4.2.1.1.1	Detektor CMS.....	179
4.2.1.2	Čerenkovovo záření .....	180
4.2.1.3	Crystal Clear Collaboration .....	181
4.2.2	Experiment PANDA.....	182
4.2.3	Bezneutrinový dvojitý beta rozpad .....	185
4.2.3.1	Detektory bezneutrinového dvojitého beta rozpadu .....	187
4.2.3.2	Scintilační detektory pro detekci dvojitého beta rozpadu.....	189
4.2.3.2.1	Experiment Kamland-Zen .....	189
4.2.3.2.2	Experiment AMoRE (Advanced Mo based Rare process Experiment) .....	189
4.2.3.2.3	Experiment CUORE – The Cryogenic Underground Observatory for Rare Events .....	190
4.2.3.2.4	Experiment CANDLES (CALcium fluoride for the study of Neutrinos and Dark matters by Low Energy Spectrometer) s krystaly $^{48}\text{CaF}_2$ .....	190
4.2.3.2.5	Experiment COBRA (Cadmium-zinc-telluride 0-neutrino double-Beta Research Apparatus).....	191
4.2.4	IceCube – South Pole Neutrino Observatory .....	191
4.2.4.1	Funkce detektoru.....	192
4.2.5	Vesmírný průzkum.....	194
4.2.5.1	Obecný úvod .....	194
4.2.5.2	Mise BepiColombo .....	195
4.2.5.3	Detektor MGNS a gama spektroskopie .....	197
4.3	Další aplikace scintilačních materiálů.....	199
4.3.1	Bezpilotní vzdušné monitorování radioaktivní kontaminace .....	199



4.3.2	Předpovídání zemětřesení .....	203
4.3.2.1	Úvod.....	203
4.3.2.2	Prekurzory seismických aktivit.....	203
4.3.2.3	Radon .....	204
4.3.2.4	Předpovídání zemětřesení .....	204
4.3.2.5	Detekce radonu .....	206
4.3.2.5.1	Lucasova cela .....	206
4.3.3	Geofyzikální sondování .....	207
4.3.4	Elektronová mikroskopie.....	208
4.4	Vojenské aplikace scintilátorů .....	209
4.5	Aplikace neutronového záření.....	214
4.5.1	Zobrazování pomocí neutronů .....	214
4.5.2	Detekce zakázaných látek o specifickém složení .....	223
4.5.3	Analýza pomocí tepelných neutronů (TNA – <i>Thermal Neutron Analysis</i> )....	226
4.5.4	Analýza pomocí rychlých neutronů (FNA – <i>Fast Neutron Analysis</i> ).....	226
4.5.5	Analýza pomocí pulzních rychlých neutronů (PFNA – <i>Pulsed Fast Neutron Analysis</i> ) .....	227
4.5.6	Pulzní transmisní spektroskopie pomocí rychlých neutronů (PFNTS – <i>Pulsed Fast Neutron Transmission Spectroscopy</i> ) .....	227
4.5.7	Zobrazování pomocí přidružených částic (API – <i>Associated Particle Imaging</i> ).....	228
4.5.8	Pulzní analýza pomocí rychlých a termálních neutronů (PFTNA – <i>Pulsed Fast-Thermal Neutron Analysis</i> ) .....	228
4.5.9	Analýza rozptylu rychlých neutronů (FNSA – <i>Fast neutron scattering analysis</i> ) .....	230
	Poděkování.....	232
<b>5</b>	<b>Technologie přípravy vybraných scintilačních materiálů .....</b>	<b>233</b>
5.1	Příprava objemových krystalů.....	233
5.1.1	Czochralského metoda.....	233
5.1.2	Bridgmanova metoda.....	236
5.1.3	Horizontální Bridgmanova metoda (Bagdasarovova metoda).....	239
5.1.4	Kyropoulosova metoda .....	241
5.1.5	Metoda micro-pulling-down .....	243
5.1.6	Stěpanovova metoda (metoda EFG – <i>Edge-defined Film-fed Growth</i> ) .....	253
5.1.7	Metoda OFZ ( <i>Optical Floating Zone method</i> ) .....	256
5.2	Další metody pěstování krystalů .....	258
5.3	Pěstování vrstev epitaxí z kapalně fáze (LPE – <i>Liquid Phase Epitaxy</i> ).....	259
5.4	Příprava keramických scintilátorů.....	262
5.5	Příprava ternárních sulfidů $AlN_2S_2$ .....	264
	Poděkování.....	265
	Zkratky, značky a symboly .....	266
	Seznam citací .....	277
	Jmenný rejstřík.....	299
	Věcný rejstřík.....	299