

Obsah

Předmluva	10
Úvod.....	12
1 Teoretický úvod	13
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 multiplétů	23
1.3.2.1 Sčítání momentu hybnosti a atomové termy	25
1.3.3 Přechody 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
2	Scintilační materiál	66
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
3	Příklady scintilačních materiálů	91
3.1	Scintilační materiály na bázi halogenidů	91
3.1.1	NaI:Tl ⁺ , CsI:Tl ⁺	91
3.1.2	LaBr ₃ :Ce ³⁺ , Sr ²⁺	93
3.1.3	CeBr ₃	94
3.1.4	SrI ₂ :Eu ²⁺	94
3.1.5	Cs ₂ HfCl ₆	95
3.1.6	LaF ₃	96
3.1.7	BaF ₂	98
3.1.8	VUV scintilátory	98
3.2	Scintilační materiály na bázi oxidů	100
3.2.1	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	100
3.2.2	CdWO ₄ (CWO)	101
3.2.3	PbWO ₄ (PWO)	102
3.2.4	Scintilátory na bázi granátů	103
3.2.4.1	YAG:Ce ³⁺ , LuAG:Ce ³⁺	104
3.2.4.2	GGAG:Ce ³⁺	106
3.2.4.3	Vliv iontů Ce ⁴⁺ 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 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): Ce^{3+} , Ca^{2+}	116
3.2.7	GSO: Ce^{3+}	117
3.2.8	Scintilátory na bázi 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	CsPbX_3 (X = Cl, Br, I)	133
3.4.3.1	K přípravě 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 LiCaAlF_6 (LICAF).....	142
3.6.7	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
4	Aplikace scintilačních materiálů	149
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
5	Technologie přípravy vybraných scintilačních materiálů	233
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 $ALnS_2$	264
	Poděkování.....	265
	Zkratky, značky a symboly	266
	Seznam citací	277
	Jmenný resjtrík.....	299
	Věcný resjtrík.....	299