

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV FYZIKY

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Použití křemíkových detektorů pro vojenské účely

Ing. Vladislav Píša

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Matematické a fyzikální inženýrství

Školitel: Prof. RNDr. Bruno Sopko, DrSc.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Únor 2022

## Silicon Detectors Employment for Army Purposes

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu fyziky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Vladislav Piša

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Technická 4, Praha 6

Školitel: Prof. RNDr. Bruno Sopko, DrSc.

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Technická 4, Praha 6

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Matematické a fyzikální inženýrství

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. Ing. František Černý

předseda oborové rady oboru Matematické a fyzikální inženýrství

Fakulta strojní ČVUT v Praze

## Úvod

V 80. letech byl zahájen výzkum a vývoj v oblasti použití polovodičových detektorů pro vojenské účely. Pozornost byla zaměřena na využití křemíkových diod a výzkumné práce na KIPL FJFI ČVUT pod vedením prof. Sopka DrSc. vyústily v konstrukci křemíkové diody s dlouhou bází k měření dávek neutronů a křemíkovou diodu s názvem Podhorník pracující v pulzním režimu, která byla použita v sondě dozimetrického přístroje DP-86. Tento přístroj je určen k měření dávkového příkonu záření gama emitovaného směsí štěpných produktů vzniklé po výbuchu jaderné zbraně přímo v terénu.

Autor předkládané disertační byl jako koordinátor úkolu pověřen kontrolou splnění všech takticko-technických požadavků definovaných tehdejší MNO. Zvláštní pozornost byla věnována závislosti odezvy přístroje na energii a úhlové závislosti. Protože experimentálně zjištěná závislost nebyla vyhovující, byla vypočtena poměrná citlivost pro směs štěpných produktů vzhledem k  $^{137}\text{Cs}$  použitím lineární brzdě schopnosti, což vykázalo z hlediska TTP přijatelné výsledky. Nebyla však zohledněna úhlová závislost, přesto byl přístroj DP - 86 zaveden do tehdejší ČSLA. Kromě presentace výsledků výzkumu a vývoje je hlavním cílem této práce vyhodnotit závislost na energii přesnějšími metodami a vyhodnotit vliv úhlové závislosti.

Předložená disertační práce je rozdělena do dvanácti kapitol:

První kapitola popisuje současný stav a vývojové trendy v oblastech dozimetrického zabezpečení české armády a její vazbu na NATO, polovodičových detektorů a matematického modelování transportu elektronů.

Druhá kapitola definuje cíle disertační práce.

Třetí kapitola se zabývá modelováním transportu elektronů a ním spojenými interakcemi elektronů a záření gama. Jsou zde uvedeny teorie Landauova, Vavilova, Goudsmit-Saundersonova, Moliérova a Tabatova ve formě umožňující přímé použití. K modelování transportu elektronů byla v této práci použita Moliérova a doletu elektronů Tabatova teorie.

Ve čtvrté kapitole je detailně uveden program Monte Carlo v Basic Visual pro transport elektronů využitím Molierovy teorie.

Pátá a šestá kapitola prezentuje výzkum a vývoj křemíkové diody s dlouhou bází i detektoru Podhorník s uvedením jejich dozimetrických vlastností.

Sedmá až jedenáctá kapitola představuje těžiště práce a obsahuje výpočet relativní citlivosti detektoru Podhorník (energetické závislosti v rozsahu energií 50 keV až 2 MeV) a jejich experimentální ověření v rámci tehdejších možností. Tyto výsledky byly použity při výpočtu poměrné citlivosti přístroje DP-86 v závislosti na stárnutí směsi štěpných produktů.

Dvanáctá kapitola shrnuje dosažené výsledky a doporučení.

## **Obsah:**

1. Současný stav dozimetrického zabezpečení armády .....	7
2. Cíle disertační práce .....	9
3. Metody zpracování.....	10
4. Dosažené výsledky.....	12
5. Závěr.....	14
6. Publikace z disertační práce uvedené v tezích.....	15
7. Publikace autora vztahující se k předložené disertační práci.....	15
8. Anotace.....	16

## 1. Současný stav dozimetrického zabezpečení české armády

ČR je členem NATO, kde probíhá dalekosáhlá standardizace mezi členskými státy. Přímou na internetu si lze otevřít věstník Úřadu pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti <http://oos.army.cz/standardizace-v-nato>. Zde lze najít odpovídající dokumenty a pod položkou Obranná standardizace jsou obsaženy Standardizace v NATO a Standardizace v rezortu MO ČR. Celková koncepce armády v oblasti dozimetrického a radiometrického zabezpečení USA je poměrně detailně popsána v publikaci The Army Radiation Program, Department of the Army, Pamphlet 385 - 24 z 30. 11. 2015.

Pokud jde o dozimetrické a radiometrické zajištění české armády, tak základním dokumentem shrnujícím odkazy na další závazné dokumenty je Český obranný standart - Vojskové dozimetrické a radiometrické přístroje. Požadavky k měření dávkového ekvivalentu záření gama, jsou obsaženy v ČSN EN 60845.1.

Vyhodnocení stupně zamoření terénu směsí štěpných produktů je založeno na měření dávkového příkonu záření gama emitovaného touto směsí. K tomuto měření slouží především dozimetrický přístroj DP - 86, který byl zavedený do armády v roce 1992. Přístroj je určen k měření dávkového příkonu záření gama emitovaného směsí štěpných produktů a orientačnímu měření kontaminace povrchů prostřednictvím detekce záření beta. Použití přímo v terénu. Je umístěn v malé brašně, která obsahuje sondu a vlastní přístroj. Sonda je vybavena dvěma polovodičovými detektory různé citlivosti a nastavitelnou olověnou clonou určenou k odstínění záření beta při měření dávkového příkonu záření gama. Dávkový příkon měří v rozsahu  $1 \mu\text{Gy h}^{-1}$  až  $9,999 \text{ Gy h}^{-1}$  ve dvou rozsazích. Pracovní návod je dostupný přímo na internetu.

V NATO současné době je pozornost zaměřena zejména na miniaturizaci a multifunkčnost dozimetrických přístrojů. Výzkum, vývoj a výroba v dané oblasti dnes probíhá především v rámci renomovaných nadnárodních firem, které buďto přijímají armádní zakázky, nebo nezávisle na armádách nabízí své výrobky na světovém trhu. S nejúspěšnějšími firmami se lze seznámit přímo na internetu, stačí zadat [List of defense contractors by arm sales](#), který podává přehled nejúspěšnějších firem. Pokud jde o polovodičové detektory, zaujala vůdčí pozici australská firma [CANBERRA Industries](#). Dále se tato firma zabývá výrobou Geiger-Muellerových počítačů a scintilačních detektorů V oblasti polovodičových detektorů lze například uvést firmy:

Amptex Inc.: Driftové a pinové detektory Amsterdam, Scientific Instrument: Pixelové detektory, Keltec: Driftové detektory, Micron Semiconductor: Stripové, pixelové a radiální detektory, PN Detectors: Křemíkové driftové detektory, SGW Sensortech: Driftové a Si(Li) detektory. V oblasti detektorů určených k detekci záření gama se vychází z klasických koncepcí ionizačních komor a luminiscenčních či polovodičových detektorů, výzkum je zaměřen hlavně na nové materiály v oblasti polovodičových detektorů, které by vykazovaly v porovnání s křemíkem stejné či lepší parametry z hlediska použití v dozimetrii. Snad nejvhodnější ukázkou komplexního monitorovacího přístroje je multifunkční radiometrického komplet [SVG 2 Radiometer \(NATO Stock Number 6665-12-358-1874\)](#).

V oblasti polovodičových detektorů je hlavní pozornost zaměřená zejména na nové materiály vhodné pro spektrální analýzu při pokojové teplotě. Přehled o daných materiálech a jejich vlastnostech lze najít např. v<sup>1</sup>, jsou zde uvedeny následující materiály vhodné pro detekci záření X a gama i jejich vlastnosti: Si, Ge, 4H-SiC, GaAs, InP, CdTe, Cd<sub>0,9</sub>Zn<sub>0,1</sub>Te, PbI<sub>2</sub>, HgI<sub>2</sub>, TlBr. Pokud jde o český výzkum, tak lze uvést např. diplomovou práci J. Pekárka<sup>2</sup>, která je zaměřená na detektory našich pracovišť MFF UK, Ve vynikajícím přehledu<sup>3</sup> [Room temperature semiconductor detectors for nuclear security](#) je v kapitole 3 obsažený úplný přehled v současné době zkoumaných materiálů a jejich parametrů.

Dnešní výzkum se vyznačuje rozsáhlou spoluprací řady pracovišť, v oblasti transportu záření zahrnuje spolupráci na evropské úrovni pracoviště v Cernu. Byl vypracován rozsáhlý projekt [GEANT 4](#), který je pravidelně aktualizován<sup>4</sup>. Výhodou je, že je přístupný na internetu, stačí zadat GEANT 4 a podrobně se seznámit s celým projektem. Zájemcům poskytne podrobné informace o pokrocích v modelování transportu elektronů a lze si stáhnout programy pro některé konkrétní úlohy. Pokud jde o modelování transportu nabitých částic, je zaměřený zejména na aplikace v radiobiologii a výpočet dávky elektronů.

Pro modelování transportu elektronů se používá především Goudsmit - Saundersonova teorie. Aplikace této teorie v GEANT 4 je podrobně popsána v práci<sup>4</sup>. Zároveň jsou zde shrnuty zkušenosti s aplikacemi této teorie.

V disertační práci je použita jednoparametrická Moliérova teorie, kterou lze odvodit přímo z Goudsmit- Saundersonovy teorie. Tato teorie byla podrobena řadě kritických poznámek a návrhů na zlepšení parametrů, především se jednalo o zpřesnění výpočtu parametru B a funkcí  $f^1$  a  $f^2$ . Jejich úplné zpracování uvádí publikace<sup>5</sup>.



## **2. Cíle disertační práce**

V návaznosti na úvod lze definovat následující cíle prezentované disertační práce:

- Jedním ze základních předpokladů pro vyhodnocení způsobilosti přístroje DP - 86 pro měření dávkového příkonu je znalost energetické závislosti odezvy přístroje.  
Základním cílem této práce je:
  - Určit experimentálně energetickou závislost odezvy přístroje DP - 86 pro měření dávkového příkonu záření gama
  - Vytvoření matematického modelu a simulační určení energetické závislosti odezvy přístroje DP - 86 pro měření dávkového příkonu
  - Porovnání experimentálních a simulačních výsledků
- Přístroj DP-86 je určený k měření dávkového příkonu záření gama směsi štěpných produktů v polních podmínkách. Druhým cílem práce tedy je výpočet odezvy při měření dávkového příkonu směsi štěpných produktů na podkladě získaných výsledků.
- Měření v polních podmínkách vyžaduje znalost úhlové závislosti odezvy přístroje DP -86. Třetím cílem je:
  - Určit experimentálně úhlovou závislost odezvy přístroje DP - 86 pro vybrané energie
  - Na podkladě získaných výsledků vypočítat odezvu přístroje DP - 86 pro kontaminovanou rovinu podle návodu k použití přístroje

### **3. Metody zpracování**

#### **3.1 Experimentální měření relativní citlivosti sondy**

##### **3.1.1 Měření energetické závislosti detektoru Podhorník**

Měření proběhlo na pracovišti VÚ 070 použitím bodových zdrojů  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{60}\text{Co}$  a na pracovišti IHE Praha použitím zdroje brzděného záření pro střední energie 72 keV, 88 keV, 105 keV, 134 keV, 205 keV a 235 keV. Naměřené hodnoty byly vztaženy k  $^{137}\text{Cs}$  a definovány jako relativní citlivost<sup>6,7</sup>.

##### **3.1.2 Měření úhlové závislosti**

Na VÚ 070 byla ověřována úhlová závislost vybrané sondy použitím bodového zdroje  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{60}\text{Co}$  a měřena odezva<sup>7</sup> při natočení osy sondy k směru dopadajícího svazku záření gama o  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  a  $90^\circ$ .

#### **3.2 Výpočet relativní citlivosti, poměrné citlivosti a citlivosti při měření v terénu**

##### **3.2.1 Výpočet relativní citlivosti detektoru Podhorník**

Pro vyhodnocení energetické závislosti detektoru lze definovat veličinu  $\varepsilon_r(E)$ , kterou nazveme Relativní citlivostí a definujeme

$$\varepsilon_r(E) = N(E) / N(E_c)$$

kde  $E$  je energie dopadajícího monoenergetického záření gama,  $E_c$  je kalibrační energie (zdroj  $^{137}\text{Cs}$ ),  $N(E)$  je počet impulzů v detektoru po ozáření jednotce kermy  $K(E)$  odpovídající monoenergetickému záření gama o energii  $E$ . Funkci  $\varepsilon_r(E)$  lze vztáhnout na jeden foton a vyjádřit pomocí pravděpodobnosti  $p(E)$  vzniku impulzu v detektoru:

$$\varepsilon_r(E) = p(E)/K(E) / [p(E_c)/K(E_c)]$$

V sondě přístroje DP - 86 byla použita křemíková dioda Podhorník diskovitěho tvaru o poloměru 2 mm, výšce 0,7 mm, šířce aktivní (ochuzené) vrstvy 0,17 mm a šířce niklového pouzdra 20  $\mu\text{m}$ . Diskriminační úroveň byla nastavená na 50 keV. Výpočet předpokládá vznik impulzu za předpokladu, že procházející elektron uvolněný interakcí záření gama Comptonovým rozptylem nebo fotoefektem zanechá v aktivní vrstvě energii přesahující 50 keV. Byly použity tři metody výpočtu: Modelování mnohonásobného rozptylu použitím Moliérové teorie<sup>8</sup>, lineární brzděné schopnosti a Tabatovy teorie<sup>9</sup>. Při použití lineární brzděné schopnosti a Tabatovy teorie byly zanedbány okrajové efekty, tj. výpočet předpokládá nekonečný rozměr aktivní i obklopující vrstvy ve směru os  $x$  a  $y$  a konečné šířky ve směru osy  $z$ . Jak plyne z výše uvedených údajů, šířky křemíkových vrstev obklopující aktivní vrstvu jsou 0,265 mm. V modelu výpočtu se uvažuje pouzra vrstva, na níž přímo dopadá gama záření. Sonda je vybavena clonou šířky  $d = 1$  mm, která zeslabuje svazek kolmo dopadajících fotonů faktorem  $e^{-\mu_{\text{Pb}}d}$ , kde  $\mu_{\text{Pb}}$  je lineární brzděná schopnost olova.

Foton uvolní elektron buďto v aktivní nebo neaktivní vrstvě fotoefektem nebo Comptonovým rozptylem. Označme  $\sigma_c(E)$  a  $\sigma_f(E)$  celkové účinné průřezy Comptonova rozptylu a fotoefektu,  $p_1$  pravděpodobnost vzniku impulzu v důsledku ztráty energie elektronu vzniklého v aktivním objemu Comptonovým rozptylem,  $p_2$  pravděpodobnost vzniku impulzu v důsledku ztráty energie elektronu vzniklého v neaktivní vrstvě nebo v niklovém pouzdře Comptonovým rozptylem,  $p_3$  je pravděpodobnost vzniku impulzu v důsledku ztráty energie elektronu vznik-

lého v aktivní vrstvě fotoefektem,  $w$  je poměr šířky aktivní a neaktivní vrstvy. Pro usnadnění výpočtu transportu elektronů byla šířka niklového pouzdra nahrazena vrstvou 60  $\mu\text{m}$  křemíku. Nyní lze psát

$$\varepsilon(E) = p(E)/K(E) = K_0 \cdot f(E),$$

$$\text{kde } K_\sigma = e^{-\mu_{\text{Pb}}^d} / K(E) \quad f(E) = \sigma_e(E) \cdot (p_1(E) + w \cdot p_2(E)) + \sigma_f(E) \cdot p_3(E)$$

Veškeré výsledky jsou uvedeny v tabulce, přičemž platí:  $p_1$  – dolet elektronu je počítán použitím lineární brzdné schopnosti,  $p_{2T}$  – aplikace Tabatovy teorie,  $p_{2M}$  – aplikace Moliérový teorie a  $p_3$  – uvažován pouze fotoefekt.

### 3.2.2 Výpočet poměrné citlivosti

Poměrná citlivost  $\varepsilon_f$  je definována jako podíl odezvy při měření dávkového příkonu záření gama směsi štěpných produktů a záření gama za předpokladu stejné hodnoty dávkového příkonu záření gama  $^{137}\text{Cs}$ . Se stárnutím směsi se mění její hodnoty v důsledku změny spektra energie. K výpočtu byla použita metoda Guseva<sup>10</sup>, který získal směs štěpných produktů ozařováním  $^{235}\text{U}$  neutrony. Výsledné spektrum rozdělil do pěti grup, pro každou grupu  $i$  zavedl a počítal efektivní energii vztahem  $E_i = D_{ij} \cdot E_j$  kde sčítá dávkový příkon  $D_{ij}$  radionuklidů označených indexem  $j$  s energií  $E_j$  v rámci grupy  $i$ . Pro jednotlivé grupy je uveden jejich příspěvek k celkovému dávkovému příkonu. Poměrná citlivost byla počítána podle vztahu

$$\varepsilon_f = \sum D_i \cdot \varepsilon_r(E_i)$$

kde  $\varepsilon_r(E_i)$  bylo spočítáno použitím získaných hodnot relativní citlivosti.

### 3.2.3 Pokles citlivosti při měření v terénu

Podle návodu k obsluze má být sonda umístěna ve výši 50 cm kolmo nad terénem- Uvažujme tedy rovnoměrně kontaminovaný terén kruhového tvaru o poloměru  $R = 50$  m a sondu ve výšce  $h = 50$  cm. Ve vzdálenosti  $r$  od středu zavedme funkci  $\theta = \arctg(h/r)$ , kde  $\theta$  je úhel natočení sondy. Naměřené výsledky lze aproximovat funkcí  $f(\theta) = 0,994 - 0,0042\theta$  pro  $^{137}\text{Cs}$  a  $0,979 - 0,0055\theta$  pro  $^{60}\text{Co}$ .

Za předpokladu směrové nezávislosti je naměřená hodnota  $F_n$  úměrná integrálu

$$F_n = \int_0^R 2\pi r \cdot dr / (r^2 + h^2)$$

V případě směrové závislosti popsané funkcí  $f(\theta)$  je naměřená hodnota  $F_z$  úměrná integrálu

$$F_z = \int_0^R 2\pi r \cdot f(\arctg(h/r)) \cdot dr / (r^2 + h^2)$$

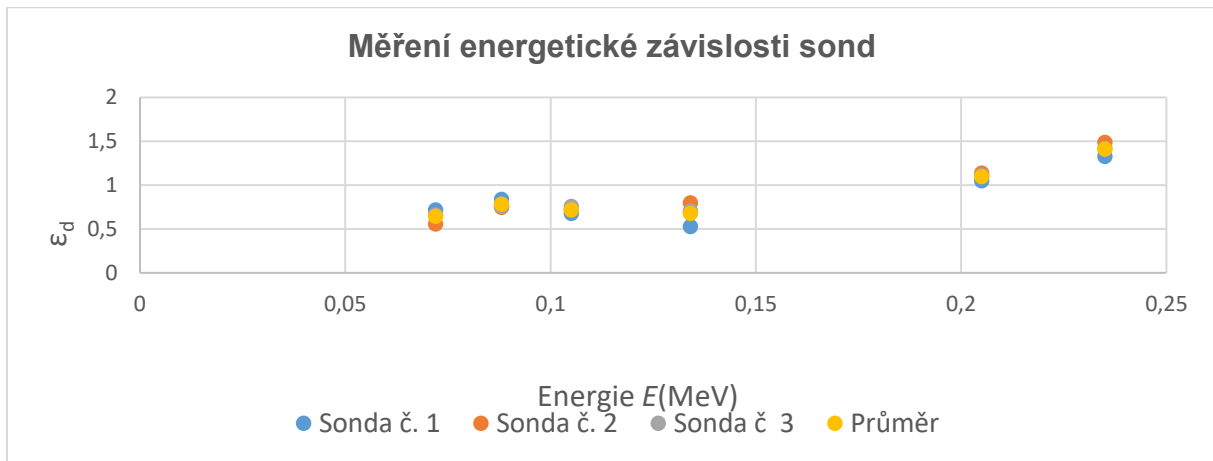
Výpočet prvního integrálu je triviální, druhý integrál lze lehce počítat numericky přímo z definice integrálu dostatečně jemným dělením. Nyní definujme poměr  $F_z / F_n$ , který lze považovat za poměr mezi naměřenou a skutečnou hodnotou a který charakterizuje pokles citlivosti.

## 4. Dosažené výsledky

### 4.1 Výsledky experimentálních prací

#### 4.1.1 Výsledky měření energetické závislosti sondy

Obr. 1 Měření energetické závislosti vybraných sond



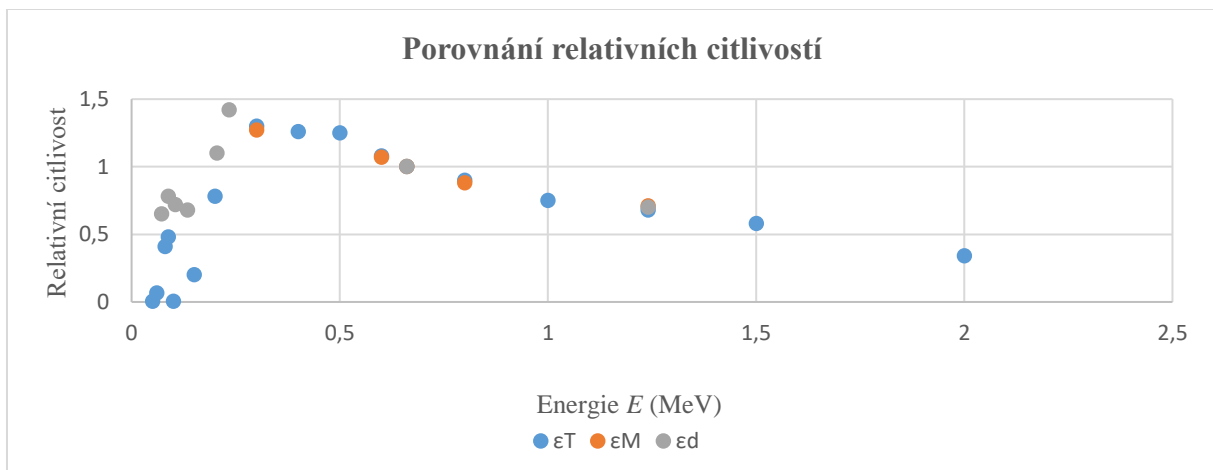
#### 4.1.2 Výsledky měření úhlové závislosti odezvy sondy

Úhel $\theta$	0°	30°	60°	90°
<sup>137</sup> Cs	1	0,85	0,76	0,61
<sup>60</sup> Co	1	0,78	0,65	0,49

Tab. 1 Výsledky měření úhlové závislosti odezvy sondy

### 4.2 Výsledky výpočtů a simulací relativní a poměrné citlivosti a vliv úhlové závislosti

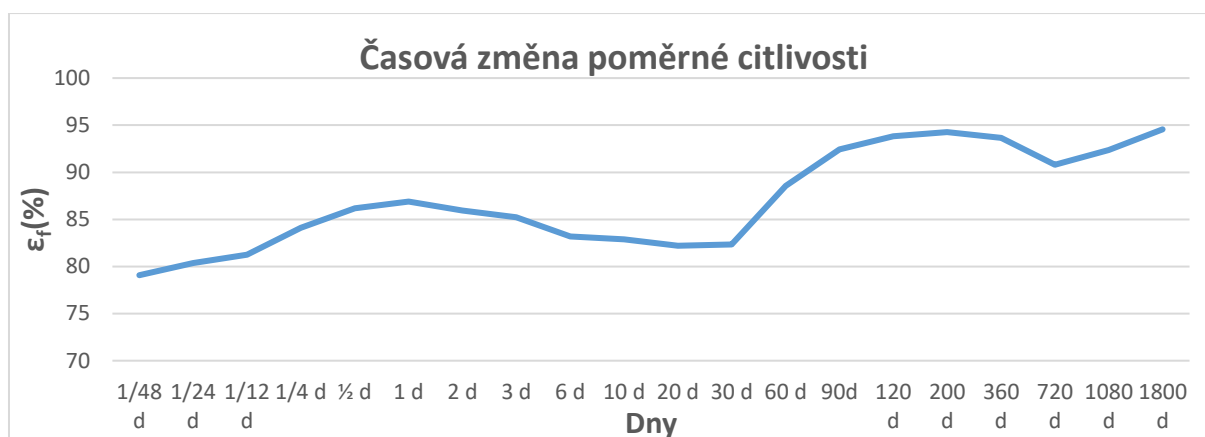
Obr. 2 Porovnání relativních citlivostí



<b>E</b> <b>MeV</b>	<b>Kerma</b> <b>Gy</b>	$\sigma_{Si,e}$ $10^{-28} \text{ m}^2$	$\sigma_{Si,f}$ $10^{-28} \text{ m}^2$	$\mu_{Pb}$ $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$	<b>K<sub>0</sub></b>	<b>p<sub>1</sub>, p<sub>3</sub></b>	<b>p<sub>2T</sub></b>	<b>p<sub>2M</sub></b>	<b>f<sub>T</sub></b>	<b>f<sub>M</sub></b>	<b>ε<sub>T</sub></b>	<b>ε<sub>M</sub></b>
<b>0,050</b>	3,08	7,86	10,6	7,81	0,0018	1 (p <sub>3</sub> )	0		10,6		0,004	
<b>0,060</b>	3,213	7,64	6,0	4,85	0,049	1 (p <sub>3</sub> )	0		6		0,06	
<b>0,080</b>	3,35	7,24	2,42	1,83	0,83	1 (p <sub>3</sub> )	0		2,42		0,41	
<b>0,088</b> -	3,52	7,07	1,68	2,33	1,39	1(p <sub>3</sub> )	0		1,68		0,48	
<b>0,088</b> +	3,52	7,07	1,68	7,45	0,0023	1 (p <sub>3</sub> )	0		1,68		0,001	
<b>0,100</b>	4,03	6,90	1,19	5,4	0,0211	1 (p <sub>3</sub> )	0		1,19		0,005	
<b>0,150</b>	6,49	6,21	0,329	1,97	0,642	1 (p <sub>3</sub> ) 0,12(p <sub>1</sub> )	0,03		1,45		0,20	
<b>0,200</b>	9,53	5,69	0,134	0,991	1,33	1 (p <sub>3</sub> ) 0,31(p <sub>1</sub> )	0,09		2,87		0,78	
<b>0,300</b>	14,69	4,95	-	0,404	1,67	0,474	0,15	0,14	3,83	3,58	1,30	1,27
<b>0,400</b>	20,49	4,43	-	0,251	1,43	0,518(p <sub>1</sub> )	0,29	.	4,30		1,25	
<b>0,500</b>	25,81	4,05	-	0,161	1,26	0,535(p <sub>1</sub> )	0,34		4,9		1,25	
<b>0,600</b>	30,78	3,75	-	0,125	1,10	0,538(p <sub>1</sub> )	0,37	0,41	4,85	5,09	1,07	1,06
<b>0,661</b>	34,41	3,61	-	0,108	1	0,541(p <sub>1</sub> )	0,42	0,46	4,98	5,27	1	1,00
<b>0,800</b>	40,13	3,29	-	0,0885	0,88	0,542(p <sub>1</sub> )	0,51	0,53	5,00	5,10	0,90	0,88
<b>1,000</b>	48,40	2,96	-	0,0708	0,74	0,545(p <sub>1</sub> )	0,58		4,97		0,75	
<b>1,170</b> <b>1,310</b>	56,60	2,78 2,62	-	0,06	0,64	0,556(p <sub>1</sub> )	0,7	0,81	5,29	5,67	0,68	0,71
<b>1,500</b>	66,50	2,40	-	0,0517	0,55	0,565(p <sub>1</sub> )	0,80		5,2		0,58	
<b>2,000</b>	106,51	2,05	-	0,0455	0,35	0,574(p <sub>1</sub> )	0,88		4,24		0,34	

**Tab. 2** Souhrmný přehled výsledků výpočtů a experimentálního měření relativní citlivosti

**Obr.3** Časová změna poměrné citlivosti



h \ R	<sup>131</sup> Cs				<sup>60</sup> Co			
	50 m	25 m	10 m	5 m	50 m	25 m	10 m	5 m
<b>50 cm</b>	0,67	0,68	0,69	0,72	0,56	0,58	0,59	0,62

**Tab. 3** Pokles poměrné citlivosti při měření v terénu

### 5. Závěr:

Získané výsledky vztažené k měření a výpočtu relativní citlivosti a z ní vypočítaná poměrná citlivost v závislosti na stárnutí směsi štěpných produktů. Výsledky ukazují, že s výjimkou nízkých energií se naměřené hodnoty pozoruhodně kryjí s vypočítanými hodnotami a to jak podle Tabatovy teorie, tak matematickou simulací podle Moliérovoy teorie. Tato shoda výsledků je dána především tím, že je počítána relativní citlivost vztažená ke kalibrační energii <sup>137</sup>Cs.

V oblasti nízkých energií se projevuje značná variabilita odezvy detektoru, což je pravděpodobně dáno variabilitou šířky ochuzené vrstvy. Vliv má také použití rentgenového záření se spojitým spektrem a nikoliv monoenergetických zdrojů. Zřetelně je též na „skokovém“ průběhu vidět

Doporučení a další oblasti výzkumu:

Ze získaných výsledků plyne, že poměrná citlivost v závislosti na stárnutí směsi štěpných produktů se pohybuje v rozmezí 80% až 95% vzhledem ke kalibrační energii <sup>137</sup>Cs. Nicméně měření v terénu, ke kterému je přístroj DP-86 je určený, je velmi důležitý vliv úhlové závislosti, jak je uvedeno v předchozí kapitole. Z tohoto důvodu by bylo vhodné upravit návod k obsluze a naměřenou hodnotu vynásobit 1,25. Tím bychom dostali poměrnou citlivost v rozmezí 70% až 119%.

V oblasti dozimetrie použitím polovodičových detektorů je pozornost soustředěna na výzkum perspektivních materiálů použitelných za požadovaných klimatických podmínek a zlepšení jejich parametrů. Ze závěrů předkládané disertační práce plyne nutnost věnovat větší pozornost úhlové závislosti odezvy detektoru a vlivu této závislosti na přesnost měření při použití detektoru DP-86 v polních podmínkách.

## 6. Publikace z disertační práce uvedené v tezích

- [1] Semiconductor materials for radiation detectors, Alan Owens, Journal of Synchrotron Radiation ISSN 0909 – 0495, 2005
- [2] Detektory RTG a gama záření na bázi polovodiče CdTe/CdZnTe, J. Pekárek diplomová práce. Fyzikální pstav UK Praha
- [3] Room temperature semiconductor detectors for nuclear security  
<https://doi:10.1063/1.5091805>
- [4] Ivachenko V. et al., Incorporation of the Goudsmit–Saunderson electron transport Theory in the Geant 4 Monte Carlo Code, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 267 (2009), Strana 3624–3632  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.015>
- [5] O Molierovskoj tĕorii mnogokratnogo rassejanija zarjažonnych ěastic i jeho kritike v posleduščije gody, A. A. Bedňakov, Fyzika elementarnych ěastic i atomnogo jadra. Moskva 2014
- [8] A generalized empirical Equations for the transmission coefficients of electrons, T. Tabata, R. Ito, Nuclear Instruments and Methods, 127 (1975), Strana 429  
[https://doi.org/10.1016/s0029-554x\(75\)80016-4](https://doi.org/10.1016/s0029-554x(75)80016-4)
- [9] A Monte Carlo Method for Calculations of the Distribution of angular Deflections due to Multiple Scattering, T. Mukoyama, Y. Watanabe, Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ., Vol. 56, No. 1, 1978, Strana 1

[10] Gusev N. G., Zaščita ot gama izluěenija produktov dělenija, Atomizdat, Moskva 1968.

## 7. Publikace autora vztahující se k předložené disertační práci

- [6] Píša V., Mĕření úhlové a energetické závislosti přístroje DP - 86, VÚ 070 Brno, 1990
- [7] Píša V., Protokoly o mĕření energetické závislosti přístroje DP – 86, VÚ 070 Brno, 1991
- [11] Píša V. Výpoěet energetické závislosti přístroje DP – 86, VÚ 070 Brno, 1991

**Ohlasy:** Na podkladĕ těchto publikací byl dozimetrický přístroj DP-86 zaveden v ĀSLA

[12] V. Sopko, B. Sopko, D. Chren, J. Dammer and V. Píša, Study of the development of defects in Si PIN diodes exposed to 23 GeV/c protons, JINST\_043P\_1114.pdf, 2015

[13] Píša V., Sopko B., Sopko V., Application of semiconductor detectors for dose rate measurement of fission products, AIP Conference, Proceedings **2411**,080010, 2021

<https://doi.org/10.1063/5.0067384>

**Ohlasy:** Pozvání na konference GSEMMM22, ISAMA2022, ICAMSME2022 a nabídky na spolupráci. Ocenĕn originální přístup k výpoětu relativní citlivosti

## **8. Anotace:**

The present doctoral thesis deals with the use of the silicon detectors for military purposes. It involves the development of a silicon diode as both the gamma and neutron radiation detectors, which resulted in the introduction of the Podhorník detectors into the probe of the dosimetric device DP-86 designed to measure the dose power of gamma radiation emitted by a mixture of fission products. The Podhorník detector operates in the pulse mode and the basic requirement for the accuracy measurements is the knowledge of the energy and directional dependence. The calculation of the energy dependence and its experimental verification represents the core of the thesis. Based on the obtained results, the detector response is calculated according to the change of gamma radiation energy spectrum during the time change of the fissile product mixture. Monte Carlo modelling using the Molière's theory and Tabata's range straggling curves were used to calculate the energy dependence. The results obtained from both procedures were compared. The thesis also includes the Monte Carlo program written in Basic Visual, so it can be copied, easily modified and used for electron transport tasks.