

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Martin Petriska

Autoreferát dizertačnej práce

**POKROČILÉ PRÍSTUPY V MERANÍ DOBY ŽIVOTA
POZITRÓNŮV V RADIÁČNE NAMÁHANÝCH
MATERIÁLOCH**

na získanie vedecko-akademickej hodnosti
philosophiae doctor
v odbore doktorandského štúdia:
5.2.48 Fyzikálne inžinierstvo

Bratislava, Júl 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave fyzikálneho a jadrového inžinierstva, Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Martin Petriska
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: Prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. Alexander Šatka, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroniky a fotoniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

RNDr. Ondrej Šauša, CSc.
Slovenská akadémia vied
Fyzikálny ústav
Oddelenie jadrovej fyziky
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava 45

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o h,

pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia, vymenovanou predsedom odborovej komisie 5-2-48 Fyzikálne inžinierstvo, na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, v zasedačke dekana, blok A, 1. poschodie

Prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan fakulty
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Obsah

1. Úvod	5
2. Súčasný stav problematiky	5
2.1. Metódy skúmania mikroštruktúr materiálov	5
2.2. Pozitronová anihilačná spektroskopia	6
2.3. Metódy PAS	6
2.3.1. Meranie doby života pozitronov (PALS)	8
2.3.2. Spektroskopia Dopplerovho rozšírenia energie anihilačného žiarenia (DB, CDB)	10
2.3.3. Meranie uhlovej korelácie anihilačných fotónov (ACAR)	11
2.3.4. Konverzia časovacieho signálu	12
2.3.5. Analógová CFD	12
2.3.6. Digitálna CFD	13
3. Ciele dizertačnej práce	14
4. Experimentálna časť	14
4.1. Digitálna aparátúra pre meranie doby života pozitronov	14
4.1.1. Vzorkovacia frekvencia	15
4.1.2. Počet vstupných kanálov digitalizačnej karty	15
4.1.3. Dátová priepustnosť karty	16
4.2. Spúšťanie merania digitálnych aparátúr PALS	17
4.3. Testované digitalizačné karty	18
4.3.1. Acqiris DP240	18
4.3.2. Ztec ZT4612	19
4.3.3. Vývojový kit s DRS4	19
4.4. Meranie doby života pozitronov v radiačne poškodených materiáloch	20
4.4.1. Analógová trojdetektorová aparátúra PALS	21
4.4.2. Digitálna trojdetektorová aparátúra PALS	22
4.4.3. Polodigitálna aparátúra PALS	22
5. Záver	25
6. Summary	25
Literatúra	26
7. Publikačná činnosť	28

1. Úvod

Vývoj nových jadrových zariadení, ako aj úsilie o bezpečnú prevádzku existujúcich jadrových elektrární aj po uplynutí pôvodne predpokladanej prevádzkovej životnosti, kladie mimoriadne vysoké nároky na oblasť výskumu mikroštruktúry konštrukčných materiálov. Požiadavky na objektívne posúdenie zmien v dôsledku extrémnych externých vplyvov (radiácia, chemické namáhanie, ...) sa neustále zvyšujú, čo podmieňuje aj vývoj vybraných spektroskopických metód, ktoré sa v danej oblasti používajú. Jednou z týchto metód je aj pozitronová anihilačná spektroskopia, ktorej technickým vylepšeniam sa venuje táto práca.

Pozitron je prvou objavenou antičasticou. Proces anihilácie pozitronu s elektrónmi v látkach nám dáva možnosť skúmať vlastnosti materiálov na atomárnej úrovni. Práca sa zaoberá inováciou metód pozitronovej anihilácie, používaných pri skúmaní vlastností radiačne poškodených materiálov. Radiačne poškodené materiály je dôležité skúmať z dôvodu prevádzkovania jadrovej elektrárne a životnosti systémov primárneho okruhu.

Vývoj v oblasti pozitronovej anihilácie ukázal, že pri súčasnom stave detektorov nie je možné očakávať dramatické zníženie rozlišovacej schopnosti (FWHM) aparátúr na meranie doby života pozitronov. Ako jednou z mála technických možností inovácie meracej aparatúry, ktoré vedú k presnejším a reprodukovateľným výsledkom merania, ktoré by navyše boli lepšie využiteľné v následnom spracovaní a archivácii vo forme ľahko prístupných databáz, je prechod od analógových k digitálnym jednotkám.

Predložená práca mapuje súčasný stav vo svete a predkladá môj príspevok v danej oblasti, ktorý je podložený experimentálnymi meraniami na aparatúre, ktorú som vyvinul v Laboratóriu pozitronovej anihilačnej spektroskopie na UJFI FEI STU v Bratislave.

2. Súčasný stav problematiky

2.1. Metódy skúmania mikroštruktúr materiálov

Medzi štandardné testy konštrukčných materiálov patrí ťahová skúška a skúška vrubovej húževnatosti (Charpy-V test). V poslednom desaťročí však vstupuje do popredia i využívanie nedeštruktívnych metód, ktoré monitorujú priamo mikroštruktúru s možnosťou jej efektívneho hodnotenia. Tieto metódy umožňujú skúmanie vlastností týchto materiálov v dôsledku špecifických vonkajších faktorov, ako je mechanické namáhanie, chemické zmeny a najmä radiačné zaťaženie. Ako efektívne metódy v oblasti aplikácie nedeštruktívnych spektroskopických techník sa potvrdili najmä transmisná elektrónová mikroskopia (TEM), Mössbauerova spektroskopia (MS), metóda merania malých uhlov odrazu neutrónu (SANS). Ďalšou metódou, ktorá sa ukazuje v tejto oblasti výskumu ako efektívna, je pozitronová anihilačná spektroskopia (PAS).

2.2. Pozitrónová anihilačná spektroskopia

Pozitrón je prvou objavenou antičasticou. Jeho existenciu predpovedal Dirac v roku 1930 [7] a interpretoval ju buď ako elektrón s kladnou energiou alebo ako kladnú časticu s hmotnosťou nižšou ako protón. Dirac postuloval svoju teóriu dier, hovoriacu o kontinuu energetických stavov $-m_0 \cdot c^2 \rightarrow -\infty$, ktoré je obsadené elektrónmi so zápornými energiami. Interakcia medzi γ -fotónom s energiou väčšou ako $2 \cdot m \cdot c^2$ a elektrónom so zápornou energiou spôsobí vynesenie elektrónu kladného stavu, kde bude mať celkovú energiu E_2 a kinetickú energiu T_2 . Za sebou zanechá „dieru“ v kontinuu negatívnych energetických stavov. „Diera“ sa bude správať ako kladne nabitá častica – pozitrón, s celkovou energiou E_1 a kladnou kinetickou energiou T_1 . Ak skočí do „diery“ elektrón, vyžiari sa energia $2 \cdot m \cdot c^2$ formou dvoch γ -fotónov. Tento proces sa nazýva anihilácia.

Prvý experimentálny dôkaz pozitrónu publikoval v roku 1932 Anderson [1, 2], ktorý však nepoznal teórie Diraca. Blackett a Occhialini (1933) [4] potvrdili Andersonove výsledky a poukázali na spojitosť medzi experimentálnymi dôkazmi a Diracovou predpoveďou. Anihilácia pozitrónu a elektrónu v látke bola prvýkrát sledovaná v roku 1940. Väzobný stav pozitrónu a elektrónu je analógiou k jadrú vodíka, v ktorom je namiesto protónu pozitrón. Tento stav nazývaný Pozitrónium (Ps) predpovedal ho Mohorovičič (1934) [11] a objavil Deutsch (1951) [6]. Postupom času sa vyvinuli tri hlavné metódy skúmania materiálov využívajúce pozitróny: meranie doby života pozitrónov v látke, meranie Dopplerovho rozšírenia anihilačnej energie a uhlová korelácia.

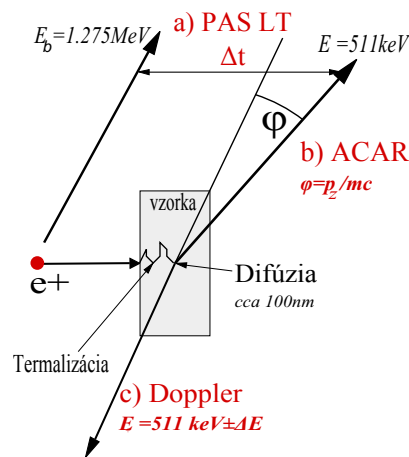
2.3. Metódy PAS

Proces anihilácie hmoty za vzniku energie $e^+ + e^- \rightarrow \gamma$ fotóny dodržiava tieto základné zákony zachovania:

1. zákon zachovania energie,
2. zákon zachovania hybnosti,
3. zákon zachovania náboja,
4. zákon zachovania momentu hybnosti,
5. zákon zachovania parity.

Pozitrón sa v materiáli zachytáva na defektoch s prítlačlivým potenciálom, ktorého zdrojom sú objemové defekty, najmä vakancie, vakančné klastre a dislokácie. Hlavnou príčinou vzniku takéhoto potenciálu v objemovom defekte je nedostatok odpudivých kladne nabitých častíc. Hranica citlivosti na skúmanie vakančných defektov v kovoch začína už pri jednej vakancii na 10^7 atómov. Takáto vysoká citlivosť je spôsobená tým, že pozitrón po termalizácii pri svojej difúzii až po anihiláciu v mriežke interaguje na dráhe 100 nm s veľkým počtom atómov. Po zachytení pozitrónu v objemovom defekte sa anihilačné parametre menia nasledujúcim spôsobom: doba života pozitrónu narastá z dôvodu nižšej hustoty elektrónov. Zákon zachovania hybnosti pri anihilácii a vyžiarení dvoch anihilačných γ -kvánt zapríčiňuje malú odchýlku uhla kolineárnych γ -kvánt alebo Dopplerove posunutie anihilačných energií. Hustota a rozdelenie hybnosti elektrónov zúčastňujúcich sa na anihilácii sú vlastnosti, ktoré sú zistiteľné

pozitrónovým meraním. Analýza žiarenia po anihilácii je teda metódou zisťovania defektov v materiáli. Zhlukovanie vakancií ako typická vlastnosť defektov vedie k ďalšiemu poklesu hustoty elektrónov. Toto je potom pozorovateľné ako nárast doby života súvisiacej s defektom. Pozitrón difundujúci materiálom môže byť zachytený v zachytnom mieste, v tzv. pasci. Pasce predstavujú nedokonalosti v kryštálovej mriežke, napr. vakancie a dislokácie. Vlnová funkcia pozitrónu zachyteného defektom sa lokalizuje s elektrónom v najbližšom okolí, až po ich anihiláciu a vznik γ -fotónov. Keďže hustota elektrónov a rozdelenie ich momentu hybnosti sa menia vzhľadom na kryštál bez defektov, anihilačné žiarenie môže slúžiť na podrobný popis miesta lokalizácie. Techniky skúmania materiálov pozitrónmi sú založené na analýze anihilačného žiarenia. Elektrón-pozitrónové páry sa pri premene hmoty na energiu najčastejšie zmenia na dve γ -kvantá s energiou 511 keV. V špeciálnych prípadoch, napr. pri povrchu materiálu, môže pozitrón vytvoriť väzobný stav s elektrónom. Anihiláciou takto vzniknutej častice, nazývanej pozitronium (Ps), sa môžu vyžiariť až tri γ -kvantá. V závislosti na relatívnej orientácii spinu, pozitronium vzniká v dvoch rozdielnych stavoch [14], para-pozitronium, ak majú elektrón a pozitrón antiparalelné spiny ($\uparrow\downarrow$) a ortopozitronium, ak sú spiny paralelné ($\uparrow\uparrow$). Princípy rôznych techník pozitronovej anihilácie sú zobrazené na obr. 2.1. Delia sa na dve principiálne skupiny: 1) rozdelené podľa citlivosti pozitronov na hustotu elektrónov (meranie doby života pozitronov) 2) podľa rozdelenia momentu hybnosti elektrónov vo vzorke (spektroskopia Dopplerovho rozšírenia a uhlová korelácia anihilačného žiarenia). Keďže hustota elektrónov a rozdelenie hybnosti elektrónov v defektoch schopných zachytiť pozitrón sa líši od dokonalej mriežky, potom tieto postupy predstavujú nástroj na skúmanie typov a počtu kryštalických porúch [21].



Obr. 2.1. Metódy pozitronovej anihilácie.

Dobu života pozitrónu predstavuje časový rozdiel medzi emisiou γ -kvanta s energiou 1274,5 keV generovaného takmer naraz s pozitrónom v izotope ^{22}Na (najčastejšie používaný zdroj pozitronov) a jedným z 511 keV anihilačných γ -kvant [14]. Ostatné dva postupy sú založené na princípe zachovania momentu hybnosti v procese anihilácie. Rozdelenie momentov hybnosti páru elektrón-pozitrón sa zachováva aj v anihilačnom žiarení. Vplyv momentu hybnosti na vzdialenosť šírenia γ -kvanta zapríčini malé Dopplerove posunutie anihilačnej energie ΔE . ΔE spôsobí predĺženie dráhy γ -kvanta v smere pohybu (os z). Sumáciou energií dostatočne veľkého počtu anihilácií je možné dospieť k Dopplerovmu rozšíreniu spektra 511 keV anihilačnej

čiarly o ΔE nameranej na energeticky citlivom spektrometri

$$\Delta E = \frac{p_z \cdot c}{2}, \quad (1)$$

kde:

ΔE je zmena energie,

p_z moment hybnosti v smere osi z,

c rýchlosť svetla.

Vplyv momentu hybnosti na zvyšné dve priestorové súradnice (osi x, y) sa prejaví na odklone anihilačných γ -kvánt od kolinearity o priestorový uhol φ , spôsobeným momentom hybnosti elektrónu [14],

$$\varphi_{x,y} = \frac{p_{x,y}}{m_0 c}, \quad (2)$$

kde:

$\varphi_{x,y}$ je priestorový uhol,

$p_{x,y}$ moment hybnosti,

m_0 pokojová hmotnosť elektrónu,

c rýchlosť svetla.

Tento odklon je možné merať na γ - γ koincidenčnom uhlovom korelačnom spektrometri pre jednu alebo dve priestorové súradnice.

Spomínané pozitronové metódy merania sú obmedzené na analýzu vzoriek hrúbky aspoň 100 μm . Kvôli širokému energetickému spektru pozitronov z β^+ rozpadu je hĺbka prieniku do materiálu tiež široká, takže tieto metódy nie sú vhodné na skúmanie defektov blízky k povrchu materiálu, tzv. hĺbkové profilovanie. Začiatkom 80-tych rokov bola vyvinutá technika pomalých pozitronových zväzkov, ktorá využíva monoenergetické pozitrony z moderátorov. Energia pozitronového zväzku môže byť asi 1 až 30 keV a umožňuje hĺbkové profilovanie blízko k povrchu materiálu. Použitím zväzku nízkoenergetických moderovaných pozitronov možno uskutočniť merania doby života, ale aj Dopplerovho rozšírenia a aj uhlovej korelácie.

Ako ďalšie, ale menej významné pozitronové metódy možno uviesť napr. difrakciu nízkoenergetických pozitronov, pozitronovou anihiláciou indukovanú Augerovu elektrónovú spektroskopiu, koreláciu doby života s momentom hybnosti a pozitronovú mikroskopiu.

2.3.1. Meranie doby života pozitronov (PALS)

Doba života pozitronu je funkciou hustoty elektrónov v mieste anihilácie. Rýchlosť anihilácie λ je obrátenou hodnotou doby života pozitronu τ , sa dá vyjadriť ako integrál súčinu hustoty pozitronov $n_+(r) = |\psi^+(r)|^2$ a hustoty elektrónov $n_-(r)$,

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \pi \cdot r_0^2 \cdot c \int |\psi^+(r)|^2 n_-(r) \gamma dr, \quad (3)$$

kde:

$|\psi^+(r)|^2$ je hustota pozitronov,

$\psi^+(r)$ vlnová rovnica pozitronu,

$n_-(r)$ hustota elektrónov,

γ korelačná funkcia,

r_0 polomer elektrónu,

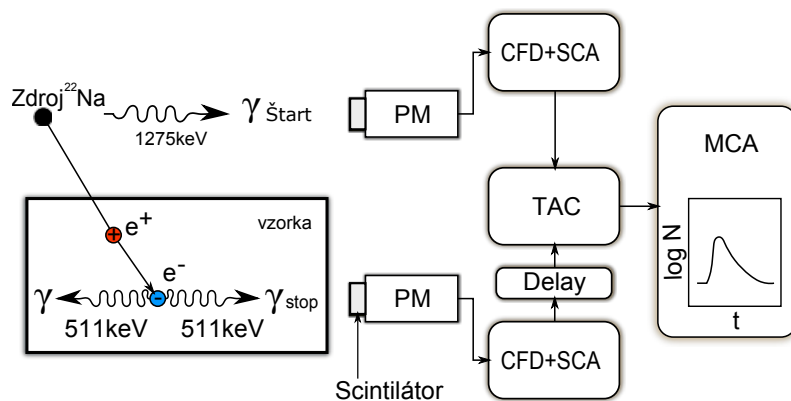
c rýchlosť svetla,

r polohový vektor.

Korelačná funkcia $\gamma = \gamma[n_-(r)] = 1 + \frac{\Delta n_-}{n_-}$ opisuje nárast Δn_- hustoty elektrónov v dôsledku príťažlivých Coulombových síl medzi pozitronom a elektrónom.

Po zachytení pozitronu v objemovom defekte (vakancie a ich zhľuky) jeho doba života narastá vzhľadom na materiál bez defektov. Je to dôsledok lokálneho zníženia hustoty elektrónov v defekte. V spektre sa objaví komponent s dlhšou dobou života a jeho intenzita je v priamej súvislosti s koncentráciou porúch.

Vďaka 1 274,5 keV γ -kvantu vyžiarenému zároveň s pozitronom zo zdroja ^{22}Na je možné určiť čas zrodu pozitronu. Energia pozitronu (až do 540 keV) sa vo vzorke znižuje nepružnými zrážkami za čas niekoľko pikosekúnd. Za tento čas, nazývaný termalizácia, prejde pozitron hlavnú časť svojej dráhy (asi do 100 až 500 μm hĺbky vzorky v závislosti od hustoty ρ materiálu). Čas termalizácie je vzhľadom na celkovú dobu života pozitronu v látke zanedbateľný. Po dosiahnutí tepelnej energie pozitron difunduje pravidelnou mriežkou materiálu a môže byť zachytený v poruche mriežky. Difúzna dĺžka môže dosiahnuť rádovo 100 nm. Táto vzdialenosť určuje počet atómov, čiže potenciálnych zachytných pascí, s ktorými pozitron interaguje. Preto difúzna dĺžka silne ovplyvňuje citlivosť metódy na detekciu porúch. Doba života jedného pozitronu sa meria detekciou časového rozdielu medzi štartovým γ -kvantom z β^+ rozpadu v zdroji a jedného 511 keV anihilačného kvanta. Aktivita zdroja musí byť dostatočne malá, aby bol vo vzorke len jeden pozitron. Tým sa zamedzí zámene „štart“ a „stop“ kvánt vznikajúcich z viacerých anihilácií. Zachytené fotóny v scintilačnom detektore sa vo fotonásobiči premene na analógové elektrické impulzy, ktoré sa ďalej spracujú v diskriminátoroch. Výstupné impulzy z diskriminátorov spúšťajú a zastavujú časovo-amplitúdový prevodník (TAC), pracujúci ako „elektronické stopky“. Amplitúda výstupného impulzu z TAC zodpovedá časovému rozdielu medzi štartovacím γ a anihilačným fotónom, čo predstavuje dobu života pozitronu. Priebeh jednej anihilácie sa po premene analógového signálu na digitálny uloží v pamäti mnohokanálového analyzátora (MCA). Čísla kanálov reprezentujú časovú os. Pre vytvorenie relevantného časového spektra je potrebné zaznamenať viac ako 10^6 anihilácií.



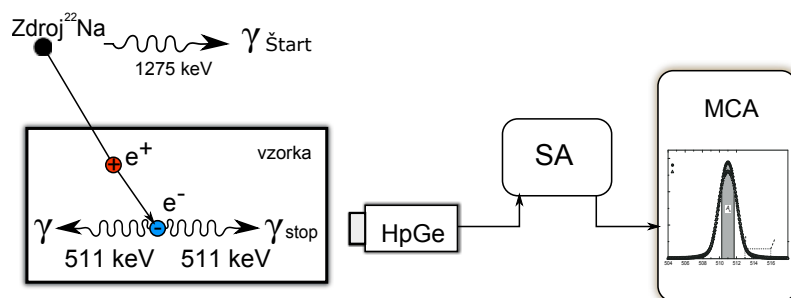
Obr. 2.2. Principiálna schéma aparatury na meranie doby života pozitronov.

Zjednodušená schéma aparatury na meranie PALS je na obr. 2.2. Scintilačné detektory sú buď krištálické, napr. BaF_2 alebo plastické (Pilot U) s krátkou nábežnou hranou (cca 0,6 až 2 ns). Diskriminátor potláča šumy a formuje štandardné časovacie impulzy. Diferenciálny diskriminátor (jedenkanalový analyzátor – SCA) zabezpečuje filtráciu 1 274,5 keV a 511 keV kvánt, nastavením zodpovedajúceho rozsahu pre vstupné signály.

Časovacie impulzy štartujú a zastavujú nabíjanie kondenzátora v TAC. Časovú lineárnosť zaisťuje nabíjanie konštantným prúdom, ktorý je zastavený príchodom stop impulzu od anihilačného kvantu. Stop impulz je oneskorený v koaxiálnom kábli, aby sa časové spektrum posunulo do lineárnej oblasti TAC. Spektrum sa ukladá v mnohokanalovom analyzátoe (MCA). Meranie času a výber energií môže prebiehať v rýchlych kanáli. Ak sa použije pomalá vetva na výber energií, ide o zapojenie aparatury fast-slow (rýchlo-pomalá koincidencia).

2.3.2. Spektroskopia Dopplerovho rozšírenia energie anihilačného žiarenia (DB, CDB)

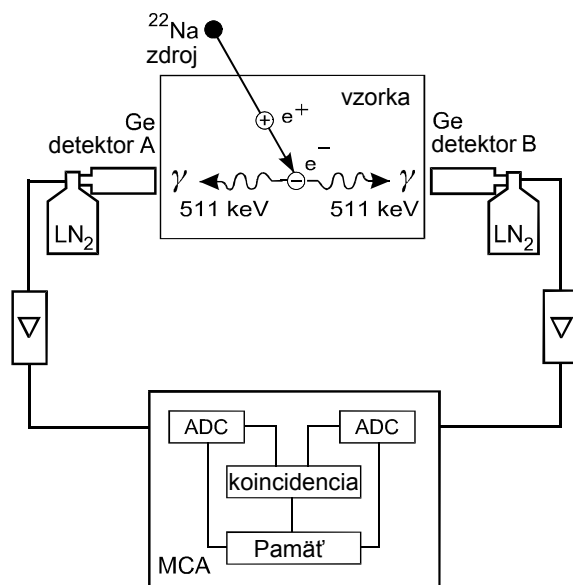
Zo zákona zachovania hybnosti počas anihilácie vyplýva, že hybnosť elektrón pozitronového páru \mathbf{p} , sa transformuje do páru fotónov. Ortogonálny komponent momentu hybnosti \mathbf{p}_z zo vzťahu 1 v smere pohybu anihilačného žiarenia je preto ovplyvnený Dopplerovým posunom, meraný pomocou aparatury, ktorej schematické zapojenie je na obr. 2.3. Ide v podstate o klasickú spektroskopickú trasu pre meranie gama žiarenia s germániovým detektorom.



Obr. 2.3. Aparatúra pre meranie Dopplerovho rozšírenia energie anihilačného žiarenia.

Merané anihilačné spektrum je ovplyvňované niekoľkými rušiacimi vplyvmi ako sú: Comptonov rozptyl, kozmické žiarenie, sumácia viacerých fotónov, atď. Tieto vplyvy

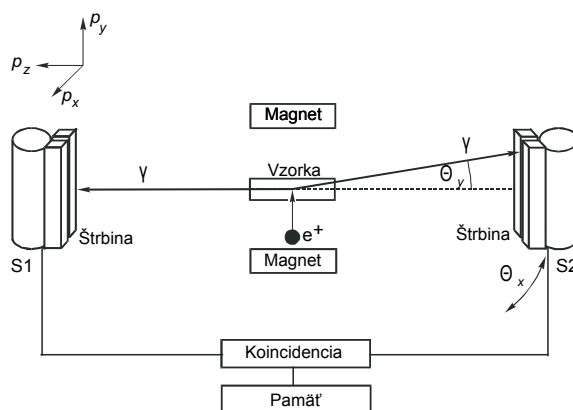
je možné potlačiť a tým zredukovať pozadie pomocou koincidenčného zapojenia (obr. 2.4). Zároveň, keďže pri anihilácii vznikajú najčastejšie dve gama kvantá, bude Dopplerov posuv energie rozdelený do oboch fotónov rovnako. Tento posuv energie má rovnakú veľkosť, ale opačné znamienko, čo sa dá výhodne využiť na spresnenie merania. Spektrum sa následne získava extrakciou z 3D spektra dvojjstupového mnohokanálového analyzátora.



Obr. 2.4. Aparatúra pre koincidenčné meranie Dopplerovho rozšírenia energie anihilačného žiarenia [9].

2.3.3. Meranie uhlovej korelácie anihilačných fotónov (ACAR)

Odklon momentu hybnosti (vzťahu 2 na str. 8) je možné merať pomocou aparátúr ACAR. Na obrázku 2.5 je znázornená aparatúra pre meranie uhlovej korelácie anihilačného žiarenia. Aparatúra má dve ramená, pričom jedno sa vychyľuje v horizontálnej aj vertikálnej rovine. Následne sa meria počet koincidií anihilačných fotónov meraných detektormi S1 a S2 v rôznych polohách ramena s detektorom S2. ACAR meranie je časovo náročné a vyžaduje si vysoko aktívny zdroj pozitronov.

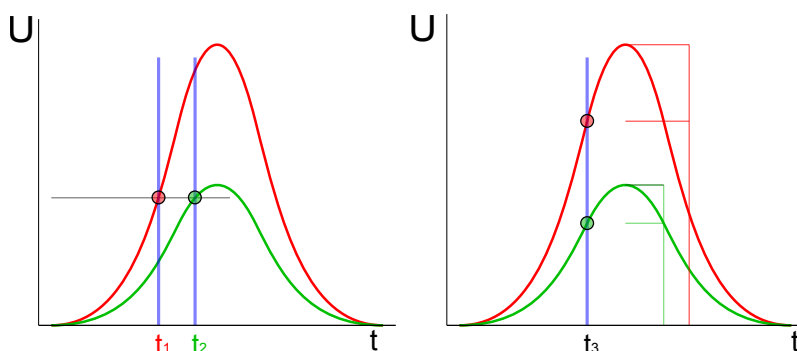


Obr. 2.5. Aparatúra pre meranie uhlovej korelácie anihilačného žiarenia [9]

Spektroskopia Dopplerovho rozšírenia energie anihilačného žiarenia spolu s metódou ACAR patria k takzvaným metódam momentu hybnosti, ktorých výhodou oproti metóde PALS je citlivosť na chemické zloženie v mieste anihilácie. Je to preto, že rozloženie momentu hybnosti je viac ovplyvnené chemickým prostredím ako hustotou elektrónov, ktorá je základom PALS metódy.

2.3.4. Konverzia časovacieho signálu

Časovací výstupný signál z detektora má rôzne amplitúdy, závisiace od energie dopadajúceho žiarenia. Pre účely presného merania časových intervalov, je potrebné tieto signály vyhodnotiť a stanoviť čas prislúchajúci dopadu žiarenia na detektor.



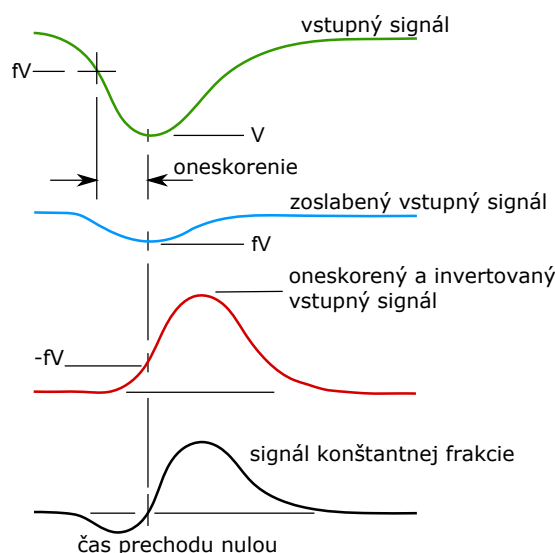
Obr. 2.6. Porovnanie časovania pomocou prekročenia úrovne signálu (vľavo) a metódou konštantnej frakcie (vpravo).

Na určenie presného času z impulzu je možné použiť rôzne metódy. Na obr. 2.6 sú pre porovnanie dve metódy časovania. Prvá používa na určenie okamihu, v ktorom nastal skúmaný jav prechod signálu impulzu cez určitú konštantnú úroveň napätia (Leading Edge, Threshold). Ako vidno na obrázku, pre dva impulzy rôznej amplitúdy je tento okamih v rôznych častiach impulzu (t_1, t_2). Táto metóda sa používa napríklad v osciloskopoch na spúšťanie merania (Trigger). Impulzy zo scintilačných detektorov majú rovnaké časy nábežných hrán, ale rôzne amplitúdy. Preto je pre ne vhodnejšie použiť metódu konštantnej frakcie, ktorá je na obrázku vpravo. Pri tejto metóde sa za čas udalosti (t_3) považuje prechod úrovne signálu cez úroveň, ktorá je úmerná amplitúde impulzu.

2.3.5. Analógová CFD

Úlohou diskriminátora konštantnej frakcie (CFD) je spracovať vstupné impulzy rôznych amplitúd z detektora a na výstupe generovať unifikovaný impulz jednotného tvaru časovo prislúchajúceho dopadu fotónu do scintilačného detektora. Okrem toho diskriminátor odstraňuje zo signálu impulzy nízkej úrovne (šum).

Princíp analógovej CFD je na obr. 2.7. Zoslabený vstupný signál sa sčítava s inverzovaným časovo oneskoreným vstupným signálom. Následne sa vyhodnocuje prechod súčtového signálu konštantnej frakcie nulou. Prechod nulou spôsobí vygenerovanie unifikovaného impulzu na výstupe CFD. Pre správnu funkciu CFD je potrebné vhodne zvoliť oneskorenie kópie vstupného signálu, ktoré sa realizuje oneskorovacím vedením. Dĺžka vedenia určuje oneskorenie impulzu voči vstupu. Správne nastavenie oneskorenia je také, pri ktorom prechod súčtu nulou je v nábežnej hrane impulzu.

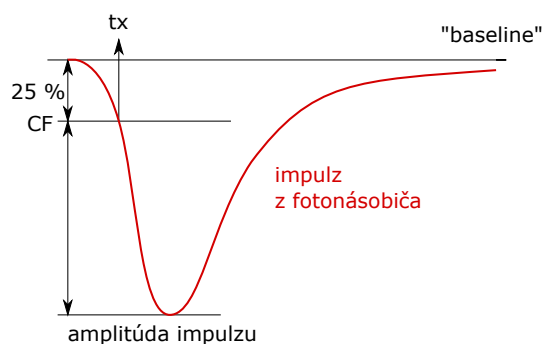


Obr. 2.7. Princíp analógového časovania pomocou metódy konštantnej frakcie, signál konštantnej frakcie vzniká súčtom invertovaného oneskoreného impulzu (červený) z pôvodným zoslabeným (modrý).

Jemnejšie nastavenie CFD úrovne je možné uskutočniť zmenou amplitúdy vstupného signálu. Predstaviteľmi analógových diskriminátorov konštantnej frakcie v prevedení NIM sú Ortec 584, Ortec 583, Canberra 2126, Fast ComeTec 7029A.

2.3.6. Digitálna CFD

Pri digitálnom spracovaní vstupného signálu, vzhľadom na dostupné vzorkovacie frekvencie ADC prevodníkov, máme k dispozícii len niekoľko desiatok vzoriek snímaného impulzu. Na impulz zosnímaný v pravidelných časových intervaloch je možné otestovať rôzne techniky určenia času dopadu žiarenie do scintilátora. V prácach [13, 10, 12] možno nájsť porovnania rôznych techník extrakcie času z navzorkovaného impulzu. Výsledky týchto prác ukázali, že aparátúra vykazuje najlepšie výsledky pri použití princípu digitálnej CFD.



Obr. 2.8. Princíp digitálnej CFD.

Digitálna realizácia CFD sa robí matematicky priamo podľa definície CFD-diskriminácie konštantnej frakcie. Princíp digitálnej CFD je na obr. 2.8. V prvom kroku sa vypočíta ustálená hladina („baseline“) ako priemer úrovní niekoľkých vzoriek pred nábežnou hranou impulzu. V druhom kroku sa určí amplitúda impulzu, ako rozdiel minimálnej hodnoty impulzu určenej napríklad parabolickou aproximáciou cez

body v okolí vzorky s minimálnou úrovnou a ustálenej hladiny. Násobok konštantnej frakcie (CF) s amplitúdou určuje hodnotu, pre ktorú potrebujeme zistiť z priebehu nábežnej hrany čas t_x , v ktorom ju signál dosiahol.

Zistenie času sa robí aproximáciou krivky cez vzorky nábežnej hrany. Body nábežnej hrany je potrebné vzhľadom na požadovanú presnosť merania a vzorkovaciu frekvenciu aproximovať polynómom alebo pomocou „spline“ funkcií. Vypočítaný čas korešponduje s časom kedy, dopadol fotón na detektor a predstavuje výstupnú veličinu digitálneho CFD modulu.

3. Ciele dizertačnej práce

Cielom tejto práce je zdokonaľiť meracie systémy pozitronovej anihilačnej spektroskopie určených na skúmanie vlastností materiálov reaktorov nových generácií. Tieto materiály sú často rádioaktívne, čo si vyžaduje špecifický prístup pre odstránenie vplyvu žiarenia zo vzorky na meranie. Najväčšie problémy pre jednoznačnú detekciu štartovacieho signálu s energiou 1274,5 keV tvorí izotop ^{60}Co , ktorý vzniká najčastejšie dvojitým záchytnom neutrónu na ^{58}Co a tvorí síce limitovanú, ale predsa významnú súčasť ocelí. Indukovaná aktivita kovových konštrukcií jadrového reaktora je jedným z dôležitých obmedzujúcich faktorov pri prevádzke, údržbe či likvidácii jadrových zariadení. Izotop ^{60}Co je navyše charakterizovaný výraznou súčasne vyžarovanou dvojicou γ -žiarení s energiami 1,17 a 1,33 MeV, ktorá ovplyvňuje detekciu štartovacieho signálu, čo sa prejaví zvýšením pozadia v spektre. Na druhej strane Comptonov rozptyl jedného z dvojice fotónov, spôsobí chybné vyhodnotenie udalosti rozpadu ^{60}Co ako udalosti zrodu a zániku pozitronu, čo má vplyv na tvar PALS spektra a teda aj na vyhodnotenie dôb života pozitronu v danom materiáli.

Ciele práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

1. Zlepšiť rozlišovaciu schopnosť aparatury PALS (nižšie FWHM, cieľ 100 ps).
2. Zefektívniť meranie – urýchliť meranie, dosiahnutie počtu nameraných dát za kratšiu dobu.
3. Zabezpečiť stálosť vlastností aparatury, reprodukovateľnosť meraní, nezávislosť nameraných údajov od zmien teploty, tlaku, magnetického poľa ...
4. Zjednodušiť nastavenie a udržiavanie aparatury v prevádzke.
5. Eliminovať vplyv rušiaceho žiarenia na PALS spektrum pri meraní ocelí s rádioaktívnym ^{60}Co .
6. Nahradiť analógové bloky digitálnymi za účelom zlepšenia parametrov i jednoduchšej archivácie.

4. Experimentálna časť

4.1. Digitálna aparatura pre meranie doby života pozitronov

Vývoj rýchlych digitalizačných kariet a znižovanie ich cien umožnilo vznik nového typu aparatur, v ktorých je časť analógového zariadenia nahradená digitalizačnou

kartou. Princíp merania vychádza z analógovej aparatúry, v ktorej funkcie zabezpečované blokmi CFD, TAC, MCA nahrádza software. Software digitálnej aparatúry vyhodnocuje digitalizovaný priebeh impulzov nasnímaných detektormi a z neho extrahuje čas prislúchajúci dopadu žiarenia na detektor. Vypočítaný časový rozdiel medzi impulzmi z detektorov ukladá do histogramu. Softvérová realizácia pôvodne analógových blokov umožňuje použitie rôznorodých techník analýzy impulzov pre spresnenie merania a taktiež efektívnejšie využitie nasnímaných impulzov. Napríklad v analógovej aparatúre je primárne určený jeden detektor na meranie „start“ signálu a druhý „stop“ signálu. V skutočnosti dopadajú fotóny „start“ aj „stop“ na obidva detektory a analógová časť vyberá len tie udalosti, keď signál z požadovanými energiami dopadol na príslušné detektory. Využitie obidvoch detektorov v úlohe „start“ aj „stop“ analógovým princípom by si vyžadovalo ďalšie moduly CFD, TAC a MCA. V digitálnej aparatúre túto funkciu zabezpečí kópia bloku programu. Týmto sa zvýši celkový počet nameraných dôb života pozitronu za ten istý čas na dvojnásobok. Nevýhodou digitálnych aparatúr je ich vyššia náročnosť na výpočtový hardware a digitalizačnú kartu.

4.1.1. Vzorkovacia frekvencia

Dosahovaná presnosť merania dôb života pozitronov u analógových aparatúr je rádovo 1 ps. Ak by sme mali vychádzať zo Shanon-Kotelnikovho teorému, tak vzorkovacia frekvencia prevodníka schopného rozlíšiť takéto časové intervaly by bola v našom prípade cca $2 \cdot 10^{-12}$ vzoriek za sekundu, čo je 2 000 Giga vzoriek za sekundu. Vzorkovacie frekvencie najrýchlejších AD prevodníkov, ktoré sú v súčasnosti k dispozícii (rok 2010) sa pohybujú okolo 30 GS/s. V skutočnosti však nemerame len jednu hodnotu doby života pozitronu, ale niekoľko miliónov hodnôt, ktoré sa vyhodnocujú štatisticky, čo umožňuje použiť prevodníky s nižšími vzorkovacími frekvenciami. Použitie nižšej vzorkovacej frekvencie súvisí aj s tvarom snímaného impulzu, ktorého šírka je v prípade scintilátora BaF₂ a fotonásobiča XP2020Q cca 6 ns. Skúsenosti iných pracovníkov [13, 19, 3] ukázali, že pre meranie je možné použiť aj digitalizačné karty so vzorkovacími frekvenciami od 1 GS/s do 4 GS/s. Pre výber vhodnej vzorkovacej frekvencie treba zohľadniť aj tvar meraného impulzu. Pre detektory s anódovým výstupom a plastickým scintilátorom je možné použiť nižšie vzorkovacie frekvencie [13], pretože tvar týchto impulzov neobsahuje anomálie v podobe zvlnenia impulzu alebo aditívneho scintilačného komponentu. V prípade použitia dynódového výstupu detektora s BaF₂ scintilátorom na extrakciu časovej informácie je vzhľadom na anomálie v tvare impulzu potrebné použiť vyššie vzorkovacie frekvencie [15].

4.1.2. Počet vstupných kanálov digitalizačnej karty

Výber počtu vstupných kanálov súvisí s počtom použitých detektorov. V prípade jednoduchej dvojdetektorovej aparatúry môžeme použiť kartu s dvoma vstupnými kanálmi, ktoré snímajú signál z detektorov samostatne. Použitie tohto princípu pre viacdetektorové systémy vyžaduje zvýšiť počet vstupných kanálov digitalizačnej karty úmerne s počtom detektorov. Viackanálové digitalizačné karty vo väčšine prípadov umožňujú zlučovanie prevodníkov jednotlivých vstupných kanálov za účelom zvýšenia vzorkovacej frekvencie. Tak napríklad digitalizačná karta Acqiris DP240 s dvoma vstupnými kanálmi pracuje s maximálnou vzorkovacou frekvenciou 1 GS/s. V prípade zlúčenia kanálov do jedného však dokáže pracovať s dvojnásobnou vzorkovacou

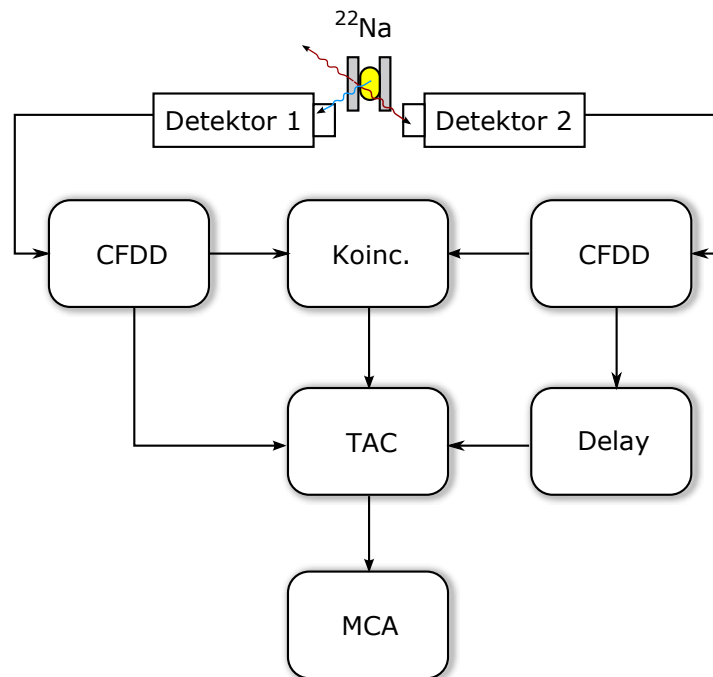
frekvenciou 2 GS/s. Pre zníženie počtu potrebných kanálov digitalizačnej karty na meranie je možné s výhodou využiť časový multiplex. Dosiachneme ho tak, že signál z druhého detektora oneskoríme a zlúčime so signálom z prvého detektora. Získame tak dvojicu impulzov, zodpovedajúcich signálom „start“ a „stop“, ktoré privádzame na jeden vstupný kanál AD prevodníka. Toto zapojenie odstraňuje chybu, vznikajúcu synchronizáciou spúšťania vzorkovania jednotlivých AD prevodníkov viackanálových kariet, ale na druhej strane znižuje pomer signál/šum.

4.1.3. Dátová priepustnosť karty

Okrem počtu vstupných kanálov a vzorkovacej frekvencie je veľmi dôležitá aj rýchlosť prenosu dát z prevodníka do PC. Frekvencia prísunu impulzov z detektorov do digitalizačnej karty sa dá určiť buď výpočtom z aktivity použitého zdroja, účinnosti scintilátora a geometrie usporiadania detektorov a vzorky, alebo prakticky z merania početnosti na výstupe detektora. V praxi pri použití pozitronového zdroja ^{22}Na s aktivitou 1 MBq je početnosť impulzov na výstupe detektora okolo 60 000 impulzov za sekundu.

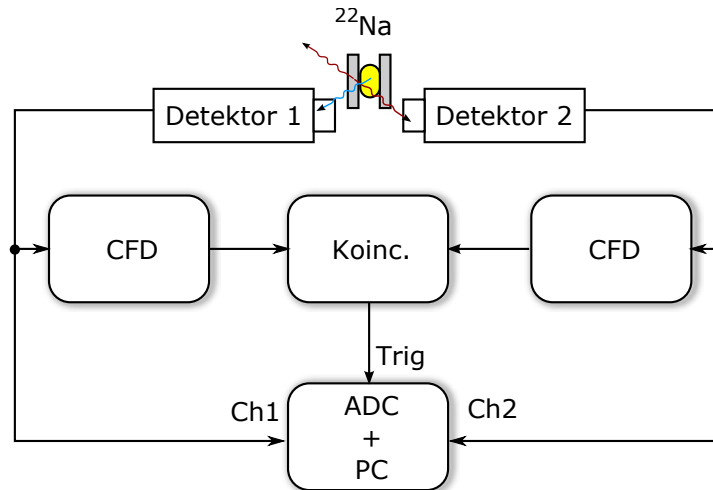
Pre zníženie počtu potrebných digitalizácií je možné s výhodou využiť externý spúšťací obvod. Jeho funkciu môže zabezpečiť dvojica CFD modulov a koincidenčnej jednotky z analógovej aparatury, prípadne sa dá vyrobiť samostatný spúšťací modul [13]. Externý spúšťací obvod zabezpečí, že digitalizačná karta digitalizuje iba tie impulzy, ktoré majú požadované úrovne a prídu na detektory súčasne v istom časovom intervale a s najväčšou pravdepodobnosťou prislúchajú jednej anihilácii. Užší výber s presnejším určením energie žiarenia sa robí následne softwarovo.

Na základe prác [13, 19, 3] a vlastných skúsenosti s rôznymi typmi aparátúr boli odskúšané zapojenia na obr. 4.2 a 4.3.



Obr. 4.1. Analógová aparatúra PALS.

Návrh digitálnej aparatury vychádzal z predpokladu použitia blokov pôvodnej analógovej aparatury obr. 4.1. Rozdiel medzi digitálnou a analógovou aparaturou spočíva

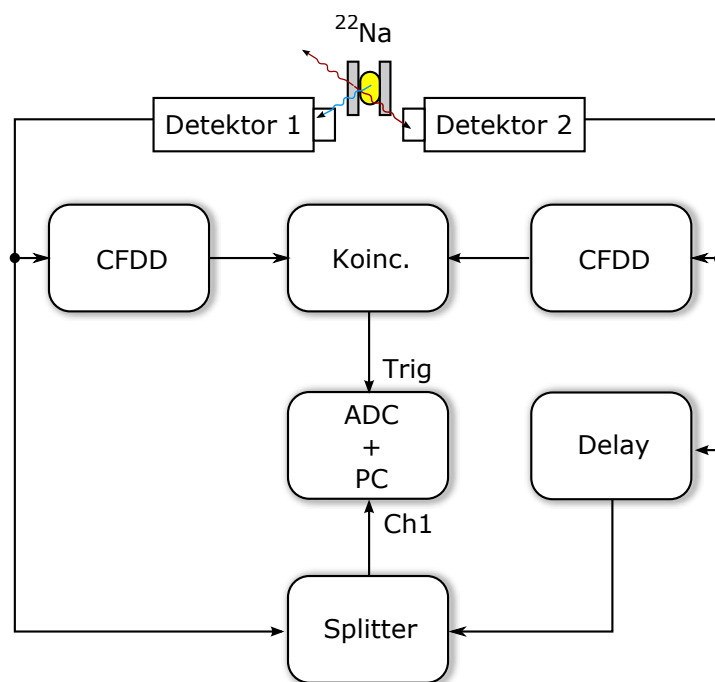


Obr. 4.2. Bloková schéma dvojdetektorovej digitálnej aparatury.

vo vynechaní oneskorovacieho bloku (Delay) a nahradení blokov TAC (prevodník čas – napätie) a MCA (mnohokanálový analyzátor) AD prevodníkom. Vzhľadom na vzorkovacie frekvencie ADC karty rádovo v GHz, nie je možné so súčasou technikou zabezpečiť kontinuálne vzorkovanie a spracovanie vstupného signálu. Z toho dôvodu sa používa externé spúšťanie (Trigger), ktoré zabezpečujú CFDD moduly s koincideniou. Bloky CFDD možno nahradiť jednoduchšími CFD blokmi bez jednokanálových analyzátorov. Pre porovnanie digitálnej a analógovej aparatury je možné obidva typy aparatur skombinovať do jednej, v ktorej sa AD prevodník pripojí k existujúcej analógovej aparatúre a meranie môže prebiehať súčasne s použitím TAC, MCA a ADC. V prípade použitia jedného vstupného kanálu (obr. 4.3) je možné spojiť signál s oneskoreným signálom z druhého detektoru a vyhodnocovať dvojicu impulzov s vyššou vzorkovacou frekvenciou, ktorú umožňuje použiť AD prevodník v jednokanálovom móde. Tento mód je vhodný pre detektory s plastickými scintilátormi. U BaF₂ scintilátorov je potrebné brať do úvahy aj dlhotrvajúci komponent spektra scintilátora, ktorý je teplotne závislý.

4.2. Spúšťanie merania digitálnych aparatur PALS

Digitalizačné karty DRS4, ZTEC 4612, aj Acqiris DP210 disponujú rôznymi funkciami pre spúšťanie merania. V práci som sa zamerlal na možnosti použitých kariet DRS4 a ZT4612. Najjednoduchší spôsob je spúšťanie pri prekročení nábežnej alebo úbežnej hrany signálu o prednastavenú úroveň. Ako referenčný signál spúšťania môže byť jeden zo štyroch signálov privedených na vstupy ADC prevodníka alebo externý vstup. Externý vstup musí mať predpísané parametre. Spúšťanie je realizované komparátormi pripojenými ku vstupom ADC karty. U staršej verzie DSR4 rev2 bol len jeden komparátor, ktorý je možné prepínať na jednotlivé vstupy karty. Novšia revízia 4 má samostatné komparátory na každom vstupe. Na spúšťanie tejto karty je možné využiť logické operácie AND a OR medzi jednotlivými vstupmi. Pri logickom OR, AND sa predpokladá okamžitý stav na vstupe, t.j. keď sa vstupné pulzy prekrývajú, čo je v našom prípade šírka impulzu z fotonásobiča cca 7 ns. Tento režim nie je vhodný pre merania PALS, kde je potrebná doba koincidence cca 50 ns. Z tohto dôvodu je potrebné použiť externý koincidenčný obvod. Na jeho realizáciu



Obr. 4.3. Digitálna aparatúra so zlúčením signálov start a stop do jedného kanálu.

je možné použiť NIM bloky CFD a FC. Lacnejšou variantou je sčítanie blokovacích impulzov BLK z CFD, u ktorých nastavíme šírku impulzu na 50 ns. Ak súčet týchto impulzov prekročí 1,5-násobok výšky jedného blokovacieho impulzu, na vstupoch v okne 50 ns sa nachádzajú naraz dva impulzy.

4.3. Testované digitalizačné karty

4.3.1. Acqiris DP240

Na mieste AD prevodníka bola použitá digitalizačná karta Acqiris DP240 zapožičaná pracoviskom EC-JRC Petten v 2005 roku.

Tabuľka 1. Základné parametre digitalizačnej karty DP240.

Zbernica	PCI
Počet vstupných kanálov	2
Maximálna vzorkovacia frekvencia	2 GS/s pri použití jedného kanálu alebo 1GS/s pri použití dvoch vstupných kanálov
Dátová priepustnosť	133 MB/s (PCI)

Karta DP240 bola zapojená v režime jedného zlúčeného kanálu a vzorkovacia frekvencia bola 2 GS/s. Výsledky merania s touto aparatúrou sú v tabuľke 2. Bola zostrojená aj aparatúra podľa obr. 4.2, avšak výsledok merania bol vzhľadom na nedostatočnú vzorkovaciu frekvenciu v dvojkanálovom móde nepoužiteľný [15].

Tabuľka 2. Namerané doby života pozitronov v ciachovných vzorkách Si a Ni.

Aparatúra	Mat.	τ_1 [ps]	τ_2 [ps]	I_1 [%]	I_2 [%]	FWHM [ps]
Digitálna	Si	222,2±2,0	1690±150	97,34±0,12	2,63±0,012	230,4
	Ni	110,6±0,2	3910±370	98,81±0,05	1,19±0,050	214,9
Analogová	Si	222,9±1,7	1609±43	97,40±0,08	2,60±0,080	244,4
	Ni	118,3±0,5	3310±83	96,06±0,07	3,94±0,070	210,6

Ako vidno z výsledkov merania medzi analógovou a digitálnou aparatúrou, nie sú veľké rozdiely, čo sa týka nameraných hodnôt. Merania ukázali, podobne ako [3], že obidve aparatúry sú, čo sa týka dosiahnutej FWHM, rovnocenné. Zníženie FWHM sa podarilo dosiahnuť použitím trojdetektorového systému [19]. H. Saito vo svojej trojdetektorovej aparatúre čas anihilácie (Stop) meral naraz dvoma detektormi a vo výpočte doby života pozitronu použil ich priemer. Okrem toho na digitalizáciu použil osciloskop so vzorkovacou frekvenciou 4 GS/s, čo mohlo tiež prispieť k zlepšeniu FWHM.

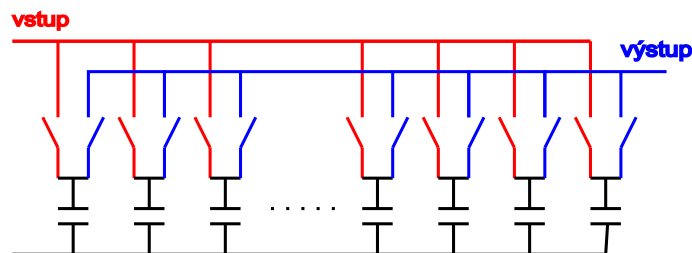
4.3.2. Ztec ZT4612

Zariadenie ZT4612 firmy Ztec je v prevedení LXI (LAN eXtension for Instrumentation). Táto digitalizačná karta má štyri samostatné vstupy s možnosťou vzorkovania štyroch vstupných signálov frekvenciou 2 GS/s, alebo pri použití dvoch vstupov vzorkovanie až 4 GS/s. K počítaču sa pripája pomocou ethernet rozhrania. Bitové rozlíšenie karty je 8 bitov podobne ako u predchádzajúcej karty. Okrem vzorkovania signálu ponúka toto zariadenie aj nadštandardné funkcie, ako sú filtrovanie signálu, FFT analýza, pokročilé nastavenia spúšťania – samostatné spúšťacie obvody na jednotlivých kanáloch s možnosťou logických operácií medzi nimi („pattern match“). Vykonávanie matematických operácií na vzorkovanom signáli je zabezpečené vstavaným signálovým procesorom firmy Texas Instruments. Praktické použitie tejto karty však ukázalo niekoľko jej slabín. Prvou je prenos dát medzi kartou a PC. Napriek tomu, že karta sa pripája k PC cez 100 Mbit ethernet, maximálne dosahované rýchlosti prenosu nameraných hodnôt z karty do PC umožňovali v konečnom dôsledku dosahovať rýchlosti merania okolo 150 meraní za sekundu v PALS spektre. Pre porovnanie ten istý program s predchádzajúcou PCI kartou Acqiris dosahoval početnosti okolo 3 000 meraní za sekundu. Z tohto dôvodu som otestoval iný spôsob, využívajúci vstavané funkcie DSP procesora na karte, pri ktorom sa namiesto všetkých nameraných vzoriek signálu posielali do PC iba dve hodnoty z každej udalosti (amplitúda impulzu a následne čas, kedy nábežná hrana dosiahla 0.25 (CFD) hodnotu). Čiže namiesto 500 hodnôt pre jeden pulz som potreboval dva krát čítať a raz vyslať do karty cez ethernet rozhranie. Praktické testy ukázali, že tento druhý spôsob bol ešte pomalší ako iba čítanie a spracovanie v PC. Avšak pri meraní klasickou analógovou aparatúrou dosahujeme početnosť okolo 50 hodnôt za sekundu v PALS spektre, takže je možné za použitia externého spúšťacieho obvodu použiť aj túto kartu.

4.3.3. Vývojový kit s DRS4

V švajčiarskom inštitúte PSI bol vyvinutý špeciálny čip DRS4 [17]. Čip DRS4 pracuje na báze ultra rýchlych prepínacích kapacitných polí (Ultra fast switched capacitor arrays). Štandardné AD prevodníky vzorkujú vstupný signál nepretržite v rovnakých

pravidelných intervaloch, taktovaných vnútorným oscilátorom. Princíp digitalizácie signálu pomocou SCA je na obrázku 4.4. Na vstup je pripojený meraný signál. Pri spustení merania sa postupne zľava doprava na krátku dobu zopnú hradlá, ktoré sú na obrázku označené červeno. Tým dôjde k nabitíu kondenzátorov vstupným signálom v čase zopnutia hradla. V druhom kroku sa postupne spínajú modré hradlá a napätia na kondenzátoroch sa odčítajú AD prevodníkom, ktorého rýchlosť nie je až tak kritická, ale závisí od nej „mŕtva doba“ zariadenia. Princíp je kritický v prvej fáze, kedy presnosť zopnutia hradla udáva okamih, kedy sa signál odmeria. Na rozdiel od klasických AD prevodníkov, kde perióda vzorkovania je stála, u SCA polí v DRS4 najprv očiachujeme spínanie jednotlivých hradiel na kalibračnom signály a následne na výstupe dostávame napätia na kondenzátoroch a časy, kedy boli zopnuté v prvej fáze. Časy zopnutia medzi dvoma hradlami za sebou spravidla nie sú úplne rovnaké, čo sťažuje prácu s digitalizovaným signálom. Tento fakt treba zohľadniť pri spracovaní signálu. Čip DSR4 (obr. 4.5) obsahuje celkovo deväť polí každé s 1 024 kondenzátormi, čo umožňuje vytvoriť osem kanálový AD prevodník. Posledný kanál sa nepoužíva na meranie. Pri vzorkovacej frekvencii 5,2 GS/s pripadá na jedno meranie cca 200 ns úsek nameraných hodnôt.



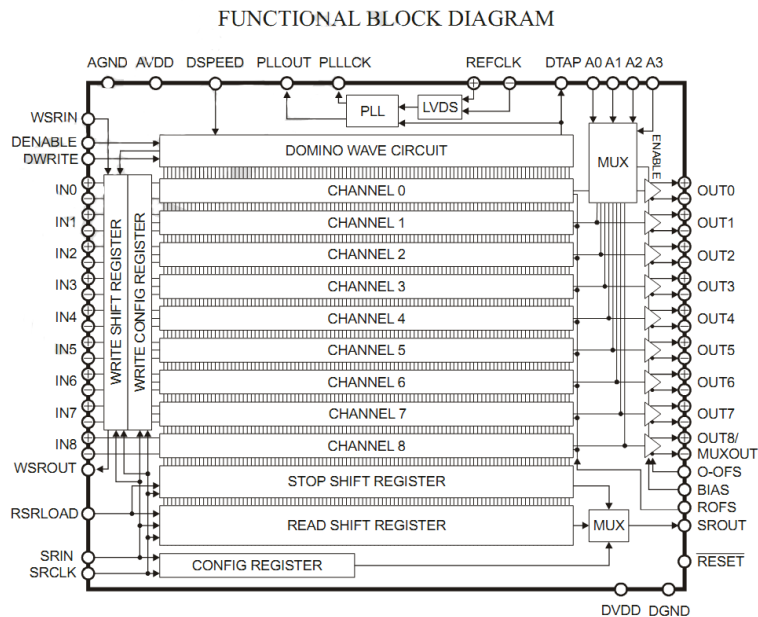
Obr. 4.4. Princíp SCA

Ako vidno na blokovej schéma čipu DRS4 na obr.4.5, na jednom čipe je umiestnených všetkých osem meracích kanálov, vďaka čomu odpadá problém s medzikanálovou synchronizáciou.

Pre výskumné účely dodáva inštitút PSI vývojový kit s čipom DRS4, ktorý sa pripája k PC cez USB rozhranie. Na meranie napätí z DSR4 čipu sa používa 14 bitový AD prevodník AD9245. Vývojový kit má zapojené štyri vstupné kanály čipu z ôsmich. Cena tohto kitu (~1 000 Euro) predstavuje približne desatinu ceny klasickej digitalizačnej karty s podobnými parametrami (Ztec 4612).

4.4. Meranie doby života pozitronov v radiačne poškodených materiáloch

V rámci skúmania poškodenia materiálov reaktorovej nádoby reaktorov VVER bola použitá aj metóda PALS [20]. Vzorky z reaktorovej nádoby obsahujú rádioaktívny ^{60}Co , ktorý vyžaruje γ -žiarenie s energiami 1 173,2 keV a 1 332,5 keV. Energie týchto žiarení sú blízko energie γ -žiarenia 1 274,5 keV používaného na spúšťanie merania. Po druhé, veľká časť žiarenia sa v scintilátore mení na svetelné záblesky po Comptonovom rozptyle a veľká časť energie týchto zábleskov leží aj v oblasti okolo píku, ktorý sa štandardne vyhodnocuje ako energetický pík 511 keV. Výsledkom je, že súčasne vyžarované dvojice gama kvánt kobaltu ^{60}Co sú vyhodnocované klasickeou dvojdetektorovou aparátúrou v okolí bodu, zodpovedajúcemu nulovej dobe života



Obr. 4.5. DRS4 bloková schéma.

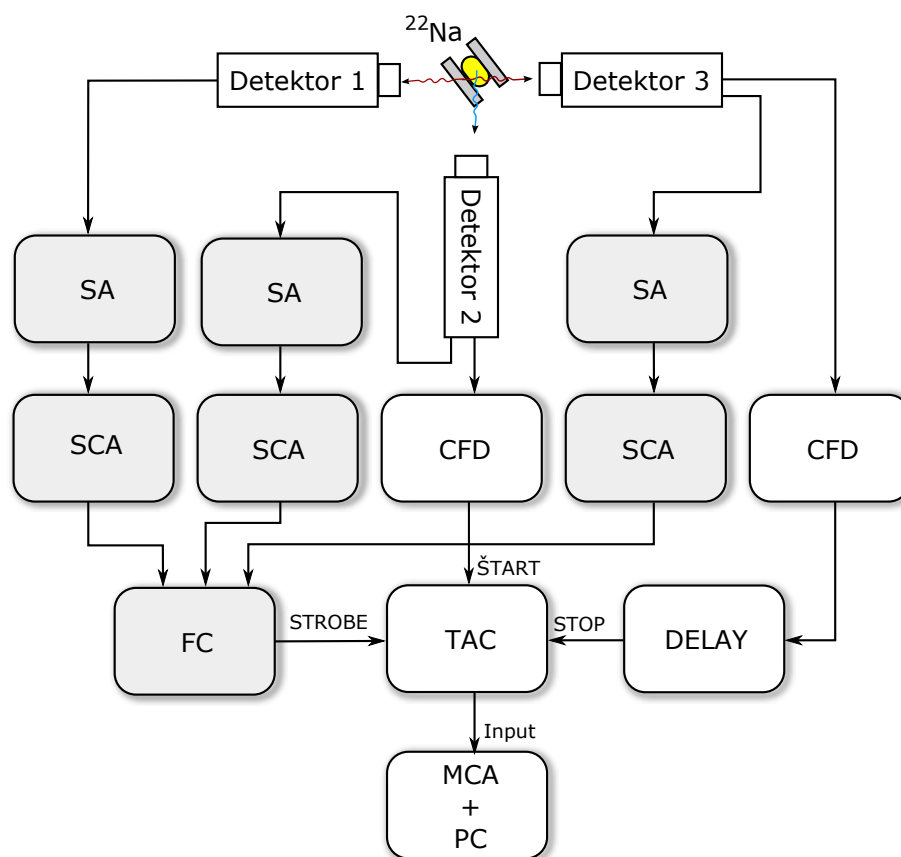
pozitrónu. V sumáre toto žiarenie nepriaznivo ovplyvňuje schopnosť aparátúry PALS korektne merať dobu života pozitrónov v materiáli. Vplyv žiarenia je možné korigovať niekoľkými spôsobmi:

1. Zúženie energetických okien jednokanálových spektrálnych analyzátorov.
2. Separácia chybných meraní využitím druhého anihilačného žiarenia v trojdetektorovom systéme PALS.
3. Použitie systému merania doby života pozitrónov v látke s impulzným generovaním pozitrónového zväzku (PLEPS – Pulsed Low Energy Positron System), kde vzorka nevplyva na štartovací impulz.

4.4.1. Analógová trojdetektorová aparátúra PALS

Na základe prác [22, 5] a dostupných dielov pôvodnej dvojdetektorovej aparátúry nášho pracoviska bola navrhnutá nasledujúca trojdetektorová aparátúra (obr. 4.6).

Trojdetektorová aparátúra vznikla doplnením dvojdetektorovej aparátúry s rýchlo-pomalými vetvami o tretí detektor. Tretí detektor zachytáva druhé anihilačné žiarenie, ktoré je vyžiarené pod uhlom 180 stupňov vzhľadom na prvé. Pre spustenie prevodníka TAC je potrebné, aby boli zachytené všetky tri fotóny, vznikajúce pri zrode a anihilácii pozitrónu. Týmto spôsobom sa redukuje vplyv rušiaco žiarenia vzorky. Zároveň však dochádza k výraznému spomaleniu merania, spôsobeného zmenšením priestorového uhla, z ktorého aparátúra vyhodnocuje „stop“ signál a nutnosti trojitej koincidencie. Taktiež účinnosť scintilátorov nie je 100 % (BaF₂ 35 %, PilotU 9 % pre 10 mm hrubý scintilátor [16]), a preto ak druhý detektor nezachytí anihilačný fotón, meranie sa neuskutoční, hoci v dvojdetektorovom móde áno. Zrýchlenie merania je možné použitím silnejšieho pozitrónového zdroja.



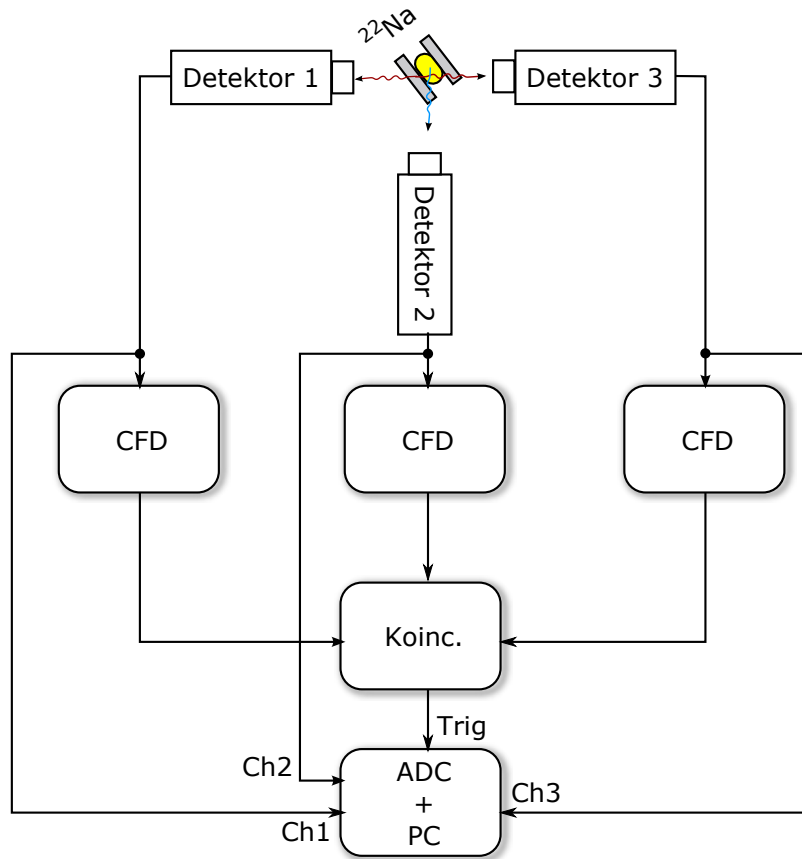
Obr. 4.6. Schéma trojdetektorovej analógovej aparatúry PALS pre meranie aktívnych vzoriek. SA – spektrálny zesilňovač, SCA – jednocanálový spektrálny analyzátor, FC – rýchla koincencia, TAC – prevodník čas-napätie, MCA – mnohokanálový analyzátor, CFD – diskriminátor konštantnej frakcie, DELAY – oneskorovacie vedenie.

4.4.2. Digitálna trojdetektorová aparatúra PALS

Ako ukázala práca [19], použitie troch detektorov v digitálnej aparatúre umožňuje ďalšie zníženie FWHM až na hodnotu 118 ps. Zároveň použitie trojdetektorového módu je vhodné pre meranie radiačne poškodených materiálov s rušiacim zbytkovým žiarením, spôsobeným aktiváciou. Použitie digitálnej trojdetektorovej aparatúry na meranie rádioaktívnych materiálov bolo overené v [8]. Podobne bola navrhnutá trojdetektorová digitálna aparatúra, ktorej bloková schéma je na obr. 4.7. Na mieste ADC prevodníka boli použité karty ZTec 4612 a DRS4. U karty ZTec 4612 vzhľadom na časovú nesynchronicitu medzi kanálmi 1 a 3, využitie informácie z tretieho detektora na upresnenie meraného času nebolo možné. Pri karte DRS4 tento problém nenastal.

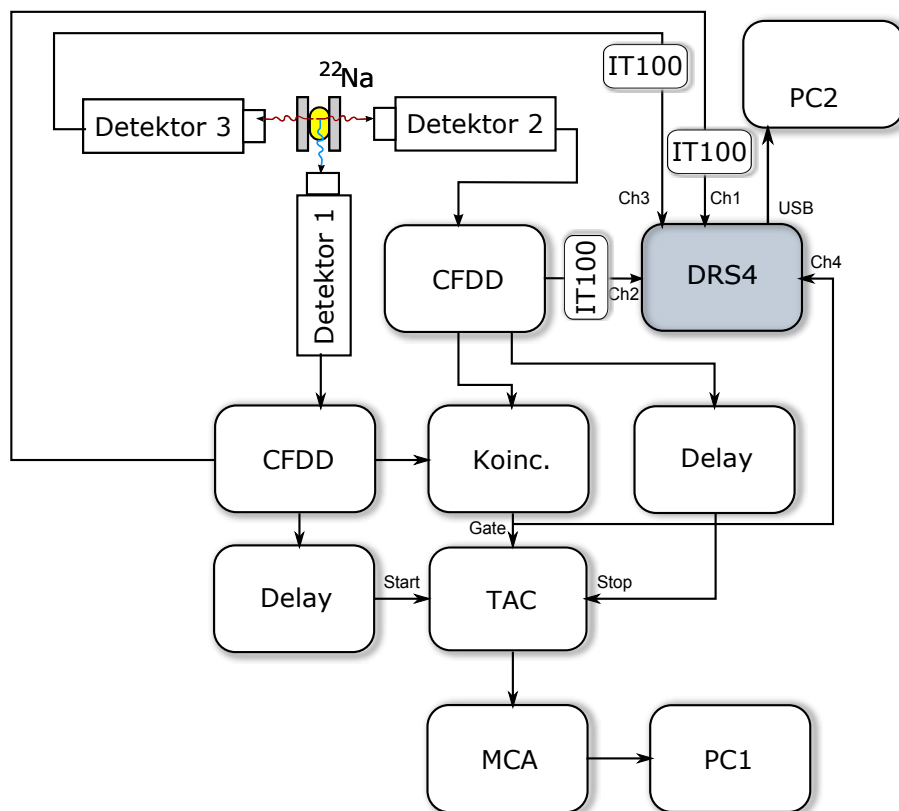
4.4.3. Polodigitálna aparatúra PALS

Klasickú dvojdetektorovú analógovú aparatúru je možné jednoducho rozšíriť na polodigitálnu trojdetektorovú aparatúru. Na rozdiel od plne digitálnej aparatúry sa naďalej používajú analógové CFDD moduly pre presnú konverziu časovej informácie z výstupného signálu detektora na uniformný pulz detektorov „start“ a „stop“. Digitizér bol použitý namiesto prevodníka TAC a mnohokanálového analyzátor



Obr. 4.7. Digitálna trojdetektorová aparátúra.

MCA. Na digitalizáciu bol použitý vývojový kit DRS4 [18]. Ide o štvorkanálovú digitalizačnú kartu s USB2 rozhraním. Vzorkovacia rýchlosť je 5,12 GS/s, bitové rozlíšenie 12 bitov. Schéma zapojenia je na obrázku 4.8. Toto zapojenie je vhodné, pokiaľ je funkčná klasická analógová aparátúra a chceme ju používať paralelne s digitálnou. Digitalizačná karta sa v tomto prípade používa ako analógový TAC prevodník pre prvé dva detektory, na treťom detektore môžeme testovať digitálne metódy CFD.



Obr. 4.8. Polodigitálna aparatúra s digitizérom DRS4, IT100 – pasívne inventory signálu.

5. Záver

V práci som sa venoval systémom PALS postupne od prvého analógového rýchlo-pomalého systému s plastickými scintilátormi, cez rýchlo rýchle zapojenie s BaF₂ scintilátormi a dynódovým výstupom. Tento systém som následne doplnil o tretí detektor, čím vznikla trojdetektorová analógová aparátúra pre meranie vzoriek obsahujúcich rádioaktívny ⁶⁰Co.

S príchodom rýchlych digitalizačných kariet som začal tvoriť aparátúru digitálnu. Za týmto účelom bolo potrebné vyvinúť software, nahradzujúci pôvodné analógové bloky. Prvý mnou vyvinutý digitálny systém používal kartu Acqiris DP240 a bol vyrobený pre pracovisko EC-JRC Petten, ktoré nám kartu zapožičalo [15]. Z tejto práce vyplynulo, že pre typy detektorov, ktoré používame, je potrebná karta s vyššou vzorkovacou frekvenciou. Následne sme zakúpili digitalizačnú kartu ZT4612 so vzorkovacou frekvenciou 4 GS/s a štyrmi meracími vstupmi. Pre túto kartu bol vyvinutý nový software a bol testovaný počas mojej stáže v TKK Helsinky, Fínsko. Ako ukázali testy, kartu je možné použiť na meranie PALS, avšak je nutné použiť externý spúšťač obvod, z dôvodu nízkej priepustnosti dát medzi kartou a PC. Počas ďalšieho roku som sa venoval digitálnemu systému pre koincidenčné merania Dopplerovho rozšírenia energie anihilačného žiarenia. Časť software pre CDB boli neskôr základom pre nový systém PALS s vývojovým čipom DRS4. Ako ukázali merania, aj keď je vývojový kit primárne určený na overenie funkcie čipu, je možné použiť ho aj v tomto stave v digitálnych PALS systémoch s nižšími početnosťami počas merania ako je napríklad trojdetektorové zapojenie. Porovnanie DSR4 s ZT4612 vyšlo výrazne v prospech nového čipu DSR4, najmä kvôli vyššiemu bitovému rozlíšeniu (12 bit) a prakticky nulovému časovému posunu vzorkovania medzi jednotlivými kanálmi DSR4 čipu. Pre lepšie využitie vlastností tohto čipu v meraniach PALS by bolo potrebné použiť kartu zo špeciálnym spúšťačím obvodom, nastaviteľným zosilnením vstupov a rýchlejším prenosom dát z karty do PC (USB3, PCIe). Napriek tomu je možné konštatovať, že prechod z analógovej PALS na digitálnu sa v podmienkach laboratória pozitronovej anihilačnej spektroskopie UJFI FEI STU osvedčil.

6. Summary

This work is focused on advanced measurement systems in the area of positron annihilation techniques as well as on the application in the investigation of radiation treated materials. The innovative approach can be seen in application of new electronic units based on upgrade of the analog PALS systems to digital. New technique was successfully proved on high irradiated steels foreseen for new generation of fission or fusion nuclear facilities.

Literatúra

- [1] ANDERSON, C. D. The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives. *Science*. September 1932, 76, 1967, s. 238–239. ISSN 0036-8075, 1095-9203. doi: 10.1126/science.76.1967.238. Dostupné z: <http://www.sciencemag.org/content/76/1967/238>.
- [2] ANDERSON, C. D. The Positive Electron. *Physical Review*. March 1933, 43, s. 491–494. ISSN 1536-6065. doi: 10.1103/PhysRev.43.491. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1933PhRv...43..491A>.
- [3] BEČVÁŘ, F. et al. The asset of ultra-fast digitizers for positron-lifetime spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. February 2005, 539, 1–2, s. 372–385. ISSN 0168-9002. doi: 10.1016/j.nima.2004.09.031. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900204021862>.
- [4] BLACKETT, P. M. S. – OCCHIALINI, G. P. S. Some Photographs of the Tracks of Penetrating Radiation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. March 1933, 139, 839, s. 699–726. ISSN 09501207. doi: 10.2307/96057. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/96057>. ArticleType: research-article / Full publication date: Mar. 3, 1933 / Copyright © 1933 The Royal Society.
- [5] ČÍŽEK, J. – BEČVÁŘ, F. – PROCHÁZKA, I. Three-detector setup for positron-lifetime spectroscopy of solids containing ^{60}Co radionuclide. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. August 2000, 450, 2–3, s. 325–337. ISSN 0168-9002. doi: 10.1016/S0168-9002(00)00277-1. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900200002771>.
- [6] DEUTSCH, M. Evidence for the Formation of Positronium in Gases. *Physical Review*. May 1951, 82, 3, s. 455–456. doi: 10.1103/PhysRev.82.455. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.82.455>.
- [7] DIRAC, P. A. M. Quantised Singularities in the Electromagnetic Field. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. September 1931, 133, 821, s. 60–72. doi: 10.1098/rspa.1931.0130. Dostupné z: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/133/821/60.short>.
- [8] JARDIN, M. et al. Digital positron lifetime spectrometer for measurements of radioactive materials. *physica status solidi (c)*. 2007, 4, 10, s. 4001–4003. ISSN 1610-1642. doi: 10.1002/pssc.200675816. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssc.200675816/abstract>.
- [9] KRAUSE-REHBERG, R. – LEIPNER, H. S. *Positron Annihilation in Semiconductors: Defect Studies*. Springer, 1999. ISBN 9783540643715.
- [10] KRILLE, A. Simulation and Practice of Digital Timing. In *DSP in Nuclear Science*, 2009.

- [11] MOHOROVIČIĆ, S. Möglichkeit neuer Elemente und ihre Bedeutung für die Astrophysik. *Astronomische Nachrichten*. January 1934, 253, 4, s. 93–108. ISSN 1521-3994. doi: 10.1002/asna.19342530402. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1002/asna.19342530402>.
- [12] NELSON, M. A. et al. Analysis of digital timing methods with BaF2 scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2003, 505, 1–2, s. 324–327. ISSN 0168-9002. doi: 10.1016/S0168-9002(03)01078-7. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203010787>.
- [13] NISSILÄ, J. et al. Performance analysis of a digital positron lifetime spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. February 2005, 538, 1–3, s. 778–789. ISSN 0168-9002. doi: 10.1016/j.nima.2004.08.102. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900204020005>.
- [14] PETERSEN, K. Crystal defects studied by positrons. Technical report, Trykkeriet Viborg, 1978.
- [15] PETRISKA, M. et al. Application of fast-digitizer card Acqiris DP-240 in positron lifetime spectroscopy. *physica status solidi (c)*. 2009, 6, 11, s. 2465–2467. ISSN 1610-1642. doi: 10.1002/pssc.200982095. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssc.200982095/abstract>.
- [16] RAJAINMÄKI, H. High-resolution positron lifetime spectrometer with BaF2 scintillators. *Applied Physics A*. March 1987, 42, 3, s. 205–208. ISSN 0947-8396, 1432-0630. doi: 10.1007/BF00620601. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00620601>.
- [17] RITT, S. *Development of high speed waveform sampling ASICs*. 2010. Dostupné z: www.psi.ch/drs/DocumentationEN/nsni10.pdf. NSNI 2010.
- [18] RITT, S. *DRS4 Evaluation Board User's Manual*. 4.0 edition, February 2012. <http://drs.web.psi.ch>.
- [19] SAITO, H. et al. A new positron lifetime spectrometer using a fast digital oscilloscope and BaF2 scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. July 2002, 487, 3, s. 612–617. ISSN 0168-9002. doi: 10.1016/S0168-9002(01)02172-6. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201021726>.
- [20] SLUGENĚ, V. et al. Positron annihilation and Mössbauer spectroscopy applied to WWER-1000 RPV steels in the frame of IAEA High Ni Co-ordinated Research Programme. *NDT & E International*. December 2004, 37, 8, s. 651–661. ISSN 0963-8695. doi: 10.1016/j.ndteint.2004.05.001. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869504000507>.

- [21] SVETLÍK, M. *Pozitronová anihilačná spektroskopia a jej využitie na sledovanie zmien v mikroštruktúre materiálov jadrových elektrární*. Dipl. práca, KJFT FEI STU, 2001.
- [22] VAN HOOREBEKE, L. et al. A three-detector positron lifetime setup suited for measurements on irradiated steels. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. March 1996, 371, 3, s. 566–571. ISSN 0168-9002. doi: 10.1016/0168-9002(95)01007-6. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900295010076>.

7. Publikačná činnosť

Vedecké články v zahraničných karentovaných časopisoch (9)

1. Kršjak, V. - Slugeň, V. - Mikloš, Marek - Petriska, M. - Ballo, P.: Application of Positron Annihilation Spectroscopy on the Ion Implantation Damaged Fe-Cr Alloys. In: *Applied Surface Science*. - ISSN 0169-4332. - Vol. 255 (2008), s. 153-156
 - a) Ohlasy(4): x2010 Chen, C. A. - Xiang, X. - Sun, Y. - Zhou, C.L. - Ma, C. X. - Wei, L.: Vacancy-type defects near Al surface studied by slow positron annihilation spectroscopy before and after He+ implantation. In: *Fusion Engineering and Design*. - ISSN 0920-3796. - Vol. 85, Iss. 5 (2010), s. 734-738.
 - b) x2011 Kuksenko, V. - Pareige, C. - Genevois, C. - Cuvilly, F. - Roussel, M. - Pareige, P.: Effect of neutron-irradiation on the microstructure of a Fe-12at.%Cr alloy. In: *Journal of Nuclear Materials*. - ISSN 0022-3115. - Vol. 415, Iss. 1 (2011), s. 61-66.
 - c) x2012 Babu, S. Hari - Rajaraman, R. - Amarendra, G. - Govindaraj, R. - Lalla, N. P. - Dasgupta, Arup - Bhalerao, Gopal - Sundar, C. S.: Dislocation Driven Chromium Precipitation in Fe-9Cr Binary Alloy: a Positron Lifetime Study. In: *Philosophical Magazine*. - ISSN 1478-6435. - ISSN 1478-6443 (zrušené). - Vol. 92, Iss. 23 (2012), s. 2848-2859.
 - d) x2012 Koegler, R. - Anwand, W. - Richter, A. - Butterling, M. - Ou, A. Xin - Wagner, A. - Chen, C. -L.: Nanocavity Formation and Hardness Increase by Dual Ion Beam Irradiation of Oxide Dispersion Strengthened FeCrAl Alloy. In: *Journal of Nuclear Materials*. - ISSN 0022-3115. - Vol. 427, Iss. 1-3 (2012), s. 133-139.
2. Lüley, J. - Vrban, B. - Farkas, G. - Haščík, J. - Petriska, M.: Determination of Criticality Safety MCNP5 Calculation Bias by Using Different Libraries of Cross Section Data. In: *Progress in Nuclear Energy*. - ISSN 0149-1970. - Vol. 59 (2012), s. 96-99
3. Slugeň, V. - Kršjak, V. - Egger, Werner - Petriska, M. - Sojak, S. - Veterníková, J.: Fe-Cr Alloys behavior after Helium Implantation. In: *Journal of Nuclear Materials*. - ISSN 0022-3115. - Vol. 409 (2011), s. 163-166

- a) Ohlasy(1): x2012 Koegler, R. - Anwand, W. - Richter, A. - Butterling, M. - Ou, A. Xin - Wagner, A. - Chen, C. -L.: Nanocavity Formation and Hardness Increase by Dual Ion Beam Irradiation of Oxide Dispersion Strengthened FeCrAl Alloy. In: Journal of Nuclear Materials. - ISSN 0022-3115. - Vol. 427, Iss. 1-3 (2012), s. 133-139.
4. Slugeň, V. - Kügel, G. - Kuriplach, J. - Ballo, P. - Sperr, P. - Egger, Werner - Triftshäuser, W. - Domonkoš, P. - Petriska, M. - Zeman, A.: Investigation of Defects in Copper Alloys Selected for Nuclear Fusion Technology. In: Materials Science Forum. - ISSN 0255-5476. - Vol. 445-446 (2004), s. 183-185
- a) Ohlasy(2): x2005 Dutta, D. - Chatterjee, Sukhen - Pillai, C.N. - et al.: Pore structure of silica gel: a comparative study through BET and PALS. In: Chemical Physics. - ISSN 0301-0104. - Vol. 321 (2005), 319-324, Iss. 1-3.
- b) x2008 Kršjak, V. - Mikloš, Marek: Non-Destructive Techniques Study of the FE-CR Based Alloys. In: Structural Materials for Innovative Nuclear Systems (SMINS) : Workshop Proceedings. Karlsruhe, Germany 4.-6.6.2007. - Paris : OECD Publishing, 2008. - ISBN 9789264048065. - on-line.
5. Slugeň, V. - Hein, H. - Sojak, S. - Egger, Werner - Pavúk, M. - Veterníková, J. - Petriska, M. - Sabelová, V. - Hincá, R.: Microstructural Examination of Reactor Pressure Vessel Steels by Positron Annihilation Point of View. In: Progress in Nuclear Energy. - ISSN 0149-1970. - Vol. 62 (2013), s. 1-7
6. Slugeň, V. - Kuriplach, J. - Ballo, P. - Domonkoš, P. - Kögel, G. - Sperr, P. - Egger, Werner - Triftshäuser, W. - Dománková, Mária - Kováč, P. - Vávra, Ivan - Stanček, S. - Petriska, M. [autor pôvodného diela] - Zeman, A.: Positron annihilation investigations of defects in copper alloys selected for nuclear fusion technology. - registrovaný: Web of Science, Master Journal List, Scopus. In: Fusion Engineering and Design. - ISSN 0920-3796. - Vol. 70, Iss. 2 (2004), s. 141-153
- a) Ohlasy(1): x2008 Kršjak, V. - Mikloš, Marek: Non-Destructive Techniques Study of the FE-CR Based Alloys. In: Structural Materials for Innovative Nuclear Systems (SMINS) : Workshop Proceedings. Karlsruhe, Germany 4.-6.6.2007. - Paris : OECD Publishing, 2008. - ISBN 9789264048065. - on-line.
7. Slugeň, V. - Zeman, A. - Petriska, M. - Kršjak, V.: Positron Study of Radiation Embrittlement of Steels Used in Water Cooled, Water Moderated Energy Reactors. In: Applied Surface Science. - ISSN 0169-4332. - Vol. 252 (2006), s. 3309-3315
- a) Ohlasy(3): x2009 Kuri, G. - Cammelli, S. - Degueldre, C. - Bertsch, J. - Gavillet, D.: Neutron induced damage in reactor pressure vessel steel: An X-ray absorption fine structure study. In: Journal of Nuclear Materials. - ISSN 0022-3115. - Vol. 385 (2009), s. 312-318.
- b) x2012 Liu, Xiangbing - Wang, Rongshan - Ren, Ai - Huang, Ping - Wu, Yichu - Jiang, Jing - Zhang, Chonghong - Wang, Xitao: Positron annihilation study of proton-irradiated reactor pressure vessel steels. In: Radiation Physics and Chemistry. - ISSN 0146-5724. - Vol. 81 (2012), s. 1586-1592.
- c) x2009 Lipka, J.: Reactor Pressure Vessel Steel Degradation Studied by Mössbauer and Positron Annihilation Spectroscopy. In: Jordan Journal of Physics. - ISSN 1994-7607. - Vol. 2, No. 2 (2009), s. 73-88.
8. Veterníková, J. - Degmová, J. - Kilpeläinen, S. - Slugeň, V. - Tuomisto, Filip - Räisänen, Jyrki - Kršjak, V. - Petriska, M. - Sojak, S. - Hincá, R. - Stacho, M.:

Non-Destructive Examination of Helium Implanted HTRs Construction Materials. In: Nuclear Engineering and Design. - ISSN 0029-5493. - Vol. 251 (2012), s. 354-359

9. Veterníková, J. - Chudý, Michal - Slugeň, V. - Eisterer, M. - Weber, H.W. - Sojak, S. - Petriska, M. - Hince, R. - Degmová, J. - Sabelová, V.: Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy Study of Neutron Irradiated High Temperature Superconductors YBa(2)Cu(3)O(7-delta) for Application in Fusion Facilities. In: Journal of Fusion Energy. - ISSN 0164-0313. - Vol. 31 (2012), s. 89-95

Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch (8)

1. Kršjak, V. - Egger, Werner - Petriska, M. - Sojak, S.: Helium Implanted FeCr Alloys Studied by Positron Annihilation Lifetime Technique. In: Problems of Atomic Science and Technology. - ISSN 1562-6016. - Iss. 4 (2009), s. 109-115
2. Kršjak, V. - Slugeň, V. - Petriska, M. - Sojak, S. - Egger, Werner: Microstructural Study of He-Implanted Fe-Cr Alloys with the Use of Conventional Lifetime Technique and Pulsed Low Energy Positron Beam. In: Physica Status Solidi (C). - ISSN 1610-1642. - Vol. 6 (2009), s. 2339-2341
3. Petriska, M. - Zeman, A. - Slugeň, V. - Kršjak, V. - Sojak, S. - Debarberis, Luigi: Application of Fast-Digitizer Card Acqiris DP-240 in Positron Lifetime Spectroscopy. In: Physica Status Solidi (C). - ISSN 1610-1642. - Vol. 6 (2009), s. 2465-2467
4. Petriska, M. - Pavúk, M. - Slugeň, V. - Kršjak, V. - Migliorini, M.: Nanocrystalline Alloys Studied by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy. In: Physica Status Solidi (C). - ISSN 1610-1642. - Vol. 4, No. 10 (2007), s. 3903-3906
5. Slugeň, V. - Lipka, J. - Haščík, J. - Kršjak, V. - Petriska, M. - Zeman, A.: Application of Mössbauer and Positron Annihilation Spectroscopies for Monitoring of WWER RPV Steel Degradation. In: International Journal of Nuclear Energy Science and Technology. - Vol. 3, No. 3 (2007), s. 254-277
6. Slugeň, V. - Kršjak, V. - Petriska, M. - Sojak, S. - Veterníková, J.: Microstructural Study of High Irradiated Reactor Steels. In: Physica Status Solidi (C). - ISSN 1610-1642. - Vol. 6 (2009), s. 2342-2345
7. Slugeň, V. - Kršjak, V. - Petriska, M. - Zeman, A. - Mikloš, Marek: Positron Annihilation Study of Alloys for Fission and Fusion Technology. In: Physica Status Solidi (C). - ISSN 1610-1642. - Vol. 4, No. 10 (2007), s. 3481-3484
 - a) Ohlasy(1): x2009 Nambissan, P.M.G.: Characterisation of Ion Implantation-induced Defects in Certain Technologically Important Materials by Positron Annihilation. In: Defence Science Journal. - ISSN 0011-748X. - Vol. 59 (2009), s. 329-341.
8. Sojak, S. - Kršjak, V. - Slugeň, V. - Petriska, M. - Veterníková, J.: PALS Investigation of Chromium Effect in Ferritic/Martensitic Steels Implanted with Helium. In: Physica Status Solidi (C). - ISSN 1610-1642. - Vol. 6 (2009), s. 2346-2348

Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch (3)

1. Sojak, S. - Kršjak, V. - Slugeň, V. - Egger, Werner - Petriska, M. - Stanček, S. - Vitázek, K. - Stacho, M. - Veterníková, J.: Investigation of Chromium Effect in Ferritic/Martensitic Steels for Application in Fusion and Gen. IV Nuclear Power Plants. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 15, mimoriadne č (2009), s. 65-69
2. Veterníková, J. - Slugeň, V. - Petriska, M. - Sojak, S.: Konštrukčné ocele tlakovej nádoby vysokoteplotného reaktora. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 15, mimoriadne č (2009), s. 79-81
3. Sojak, S. - Slugeň, V. - Kršjak, V. - Egger, Werner - Ravelli, Luca - Petriska, M. - Stanček, S. - Skarba, Michal - Priputen, Pavol - Vitázek, K. - Stacho, M. - Veterníková, J. - Sabelová, V.: Thermal Annealing influence on Ions implanted Fe-Cr model alloys. - registrovaný: Scopus. In: Materials Science Forum. - ISSN 0255-5476. - Vol. 733 (2013), s. 274-277

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách (23)

1. Farkas, G. - Haščík, J. - Petriska, M.: Calculation of the Change in Power Distribution around the Joining Structure of the Absorber and Fuel Part of the WWER-440 Control Assembly Using MCNP5 Code. In: Proceedings of the 18th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety : Eger, Hungary, 6.-10.10.2008. - Budapest : AER, 2008. - ISBN 978-963-372-639-6. - S. 799-804
2. Farkas, G. - Lüley, J. - Vrban, B. - Haščík, J. - Petriska, M. - Hinca, R. - Slugeň, V. - Šimko, Juraj: Determination of Thermal Coefficients of Reactivity for NPP Mochovce - 3,4 Start-up Conditions Using MCNP5. In: 22. Symposium of Atomic Energy Research : Proceedings, AER, 1-5 October 2012, Průhonice, Czech Republic. - , 2012. - ISBN 978-963-508-625-2. - S. 503-510
3. Farkas, G. - Slugeň, V. - Haščík, J. - Michálek, S. - Stacho, M. - Petriska, M.: Universal Model of WWER-440 and Calculation of Weighting Functions of Ex-Core Detection by MCNP5 Code. In: ENC 2010 : European Nuclear Conference. Barcelona, Spain, 30.5.-2.6.2010. - Brussels : European Nuclear Society, 2010. - CD-Rom
4. Farkas, G. - Petriska, M. - Michálek, S. - Slugeň, V. - Vanková, Alena: WWER-440 Criticality Calculations Using MCNP5 Code. In: Proceedings of the 18th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety : Eger, Hungary, 6.-10.10.2008. - Budapest : AER, 2008. - ISBN 978-963-372-639-6. - S. 121-130
5. Haščík, J. - Farkas, G. - Lüley, J. - Vrban, B. - Hinca, R. - Petriska, M. - Slugeň, V. - Lipka, J. - Urban, P.: Criticality Safety Analysis of Spent Fuel Storage Pool for NPP Mochovce using MCNP5 Code. In: 9th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids : Proceedings; Zadar, Croatia, 3-6 June 2012. - Zagreb : Croatian Nuclear Society, 2012. - ISBN 978-953-55224-4-7. - S10-119.1-12

6. Kršjak, V. - Sojak, S. - Slugeň, V. - Petriska, M.: Ion Implantation Induced Defects in Fe-Cr Alloys Studied by Conventional Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy. In: Journal of Physics: Conference Series. - ISSN 1742-6588. - Vol. 265 : International Workshop on Positron Studies of Defects (PSD 08); 1-5 September 2008, Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Praha, Czech Republic (2011), Art. No. 012014
7. Kršjak, V. - Sojak, S. - Petriska, M. - Veterníková, J.: Non Destructive Examination of Helium Implanted Fe-Cr Model Alloys. In: Proceedings of the ASME pressure vessels and piping conference 2009 : Prague, Czech Republic, 25.-30.7.2009. - : ASME, 2009. - ISBN 978-07918-3854-9. - CD-Rom
8. Kršjak, V. - Slugeň, V. - Mikloš, Marek - Petriska, M. - Sojak, S.: Structural Materials for Fusion Technologies Studied by Non-Destructive Techniques. In: ICONE 15 : 15th International Conference on Nuclear Engineering. Nagoya, Japan, 22.-26.4.-2007. - : JSME, 2007. - ISBN 978-4-88898-159-0. - CD-Rom
9. Lüleý, J. - Vrban, B. - Farkas, G. - Haščík, J. - Petriska, M.: Ohodnotenie vplyvu rôznych knižnic mikroskopických účinných priereзов na kombinovaný bias MCNP5 simulácií. In: Jaderná energetika, transmutační a vodíkové technologie v pracích mladé generace - 2011 : Mikulášské setkání mladé generace ČNS. Brno, Czech Republic, 7.-9.12.2011. - Praha : Česká nukleární společnost, 2012. - ISBN 978-80-02-0236-9. - S. 89-94
 - a) Ohlasy(1): x2012 Čerba, Štefan - Nečas, V.: Determination of the Isotopic Composition of Neutron Irradiated Nuclear Fuel Materials by MCNPX. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 107-110.
10. Petriska, M.: Aparatúra pre meranie doby života pozitronov. In: Jaderná energetika v pracích mladé generace - 2006 : Mikulášské setkání mladé generace ČNS. Brno, Czech Republic, 7.12.2006 (2007). - Praha : Česká nukleární společnost. - S. 71-73
11. Petriska, M. - Slugeň, V. - Kršjak, V. - Zeman, A.: Application Possibilities of Acqiris digital Card DP240 for Positron Lifetime Measurement. In: Journal of Physics: Conference Series. - ISSN 1742-6588. - Vol. 265 : International Workshop on Positron Studies of Defects (PSD 08); 1-5 September 2008, Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Praha, Czech Republic (2011), Art. No. 012029
 - a) Ohlasy(1): x2011 Jäger, Markus - Iwig, Kornelius - Butz, Tilman: A compact digital time differential perturbed angular correlation- spectrometer using field programmable gate arrays and various timestamp algorithms. In: Review of Scientific Instruments. - ISSN 0034-6748. - Vol. 82, Iss. 6 (2011), Art. no. 065105.
12. Petriska, M. - Vitázek, K. - Farkas, G. - Stacho, M. - Michálek, S.: Computation Cluster for Monte Carlo Calculations. In: ENC 2010 : European Nuclear Conference. Barcelona, Spain, 30.5.-2.6.2010. - Brussels : European Nuclear Society, 2010. - CD-Rom
13. Petriska, M. - Sabelová, V. - Slugeň, V. - Sojak, S. - Stacho, M. - Veterníková, J.: Digital Coincidence Doppler Broadening setup at FEI STU. In: Physics Procedia. - ISSN 1875-3892. - Vol. 35 : 7th International Workshop on Positron Studies of Defects (PSD), Delft Univ Technol, Delft, Netherlands, August 28 - September 02, 2011 (2012), s. 117-121

14. Sabelová, V. - Petriska, M. - Veterníková, J. - Slugeň, V. - Kilpeläinen, S.: Detekcia defektov vytvorených He a H Implantáciou v zliatine Fe-9Cr. In: Jaderná energetika, transmutační a vodíkové technologie v pracích mladé generace - 2011 : Mikulášské setkání mladé generace ČNS. Brno, Czech Republic, 7.-9.12.2011. - Praha : Česká nukleární společnost, 2012. - ISBN 978-80-02-0236-9. - S. 202-207
15. Slugeň, V. - Stacho, M. - Sabelová, V. - Petriska, M.: Advanced Evaluation of Spent Fuel in Long Term Wer Storage in Slovakia. In: ICAPP 2011 : Proceedings of International Congress on Advanced in Nuclear Power Plants. Nice, France, 2 - 6 May 2011. - Paris : SFEN, 2011. - S. 2136-2139
16. Slugeň, V. - Farkas, G. - Haščík, J. - Vrban, B. - Lüley, J. - Petriska, M. - Urban, P.: Criticality Safety Analysis of Fresh and Spent Fuel Storage and Handling for VVER Reactor Unit Using MCNP5. In: TopFuel 2012 : Proceedings; Reactor Fuel Performance 2012, Manchester, United Kingdom; 2-6 September 2012. - Brussels : European Nuclear Society, 2012. - ISBN 978-92-95064-16-4
17. Slugeň, V. - Kršjak, V. - Egger, Werner - Petriska, M. - Sojak, S.: Fe-Cr Alloys Studied by Positron Annihilation Lifetime Technique after Helium Implantation. In: Jahrestagung Kerntechnik 2009 : Dresden, Germany, 12.-14.5.2009. - Berlin : Inforum Verlag, 2009. - CD-Rom
18. Slugeň, V. - Veterníková, J. - Degmová, J. - Kršjak, V. - Petriska, M. - Sojak, S. - Sabelová, V. - Hincá, R. - Stacho, M.: Radiation Resistant Steels for HTRs. In: 5th International Conference on High Temperature Reactor Technology HTR 2010 : Prague, 18.-20.20.2010. - Praha, 2010. - Flashdisc
19. Sojak, S. - Kršjak, V. - Slugeň, V. - Egger, Werner - Stanček, S. - Petriska, M. - Vitázek, K. - Stacho, M.: Application of Positron Lifetime Techniques on Vacancy-Type Defects Investigation in Fe-Cr Model Alloys. In: 14th Workshop on Multiscale Modelling of Fe-Cr Alloys for Nuclear Applications : Genoa, Italy, 30.-31.3.2009. - , 2009. - CD-Rom
20. Sojak, S. - Kršjak, V. - Slugeň, V. - Stanček, S. - Petriska, M. - Vitázek, K. - Vitázek, K. - Stacho, M.: Application of the Positron Annihilation Spectroscopy for Chromium Effect Investigation in Binary Fe-Cr Alloys. In: International Youth Nuclear Congress 2008 : Interlaken, Switzerland, 21.-26.9.2008. - , 2008. - S. 409.1-8
21. Sojak, S. - Slugeň, V. - Kršjak, V. - Egger, Werner - Ravelli, Luca - Petriska, M. - Stanček, S. - Skarba, Michal - Priputen, Pavol - Vitázek, K. - Stacho, M. - Veterníková, J. - Sabelová, V.: Different Chromium Content and Thermal Annealing Influence on Ions Implanted Fe-Cr Model Alloys. - registrovaný: Web of Science. In: Physics Procedia. - ISSN 1875-3892. - Vol. 35 : 7th International Workshop on Positron Studies of Defects (PSD), Delft Univ Technol, Delft, Netherlands, August 28 - September 02, 2011 (2012), s. 80-85
22. Veterníková, J. - Degmová, J. - Kršjak, V. - Slugeň, V. - Hincá, R. - Petriska, M. - Sojak, S.: Barkhausen Noise Applying in Residual Stress Study of 9% Cr Ferritic/Martensitic Steels. In: 9th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing : Hejnice, Czech Republic, 27-30 June 2011. - Vaajakoski : Stresstech Qy, 2011. - ISBN 978-952-67247-5-1. - S. 1-7
23. Vrban, B. - Lüley, J. - Farkas, G. - Haščík, J. - Hincá, R. - Petriska, M. - Slugeň, V. - Šimko, Juraj: MCNP Start-up Calculation for The First Fuel Loading of the Reactor Core of NPP Mochovce-3,4. In: Nuclear Energy for New Europe 2012 [elektronický

zdroj] : 21st International Conference Nuclear Energy for New Europe; - Ljublj. : Nuclear Society of Slovenia, 2012. - ISBN 978-961-6207-35-5. - CD-Rom 708.1-708.8

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách (18)

1. Domonkoš, P. - Slugeň, V. - Petriska, M.: Copper Alloys for ITER Investigation by PAS Using PLEPS : 5th Scientific Conference on Electrical Engineering & Information Technology, Bratislava, Slovak Republic, 19.9.2002. In: ELITECH 2002 : The Fifth Scientific Conference on Electrical Engineering & Information Technology for Ph.D. Students. - Bratislava : STU v Bratislave, 2002. - ISBN 80-227-1760-8. - S. 27-29
2. Domonkoš, P. - Slugeň, V. - Petriska, M.: Merania dĺžky doby života pozitronov vo vybraných zliatinách medi pre ITER použitím PLEPS : Konferencia 'Elektrotechnika a energetika 2002', Trenčín, Slovak Republic, 15.-18.10.2002. In: Elektrotechnika a energetika 2002 : Konferencia 'Elektrotechnika a energetika 2002', Trenčín, Slovak Republic, 15.-18.10.2002. - Bratislava : STU v Bratislave, 2002. - S. 54-55
3. Domonkoš, P. - Slugeň, V. - Ballo, P. - Petriska, M.: Positron Lifetime Measurements for Nuclear Technology : 6th Scientific Conference on Electrical Engineering & Information Technology for Ph.D. Students, Bratislava, Slovak Republic, 25.11.2003. In: ELITECH 2003. The sixth conference on Electrical engineering and information technology for PhD students : Bratislava, Slovak Republic. 25. Nov. 2003. - Bratislava : STU v Bratislave, 2003. - S. 37-40
4. Domonkoš, P. - Slugeň, V. - Petriska, M.: Positron Lifetime Measurements in Copper Alloys for ITER by PAS Using PLEPS : 8th International Workshop on Applied Physics of Condensed Matter, Liptovský Mikuláš, Slovak Republic, 19.-21.6.2002. In: APCOM 2002. Applied physics of condensed matter : Proceedings of the 8th international workshop. Liptovský Mikuláš, Slovak Republic. 19.- 21. June 2002. - Liptovský Mikuláš : Military Academy, 2002. - S. 127-132
5. Domonkoš, P. - Slugeň, V. - Ballo, P. - Petriska, M. - Degmová, J.: Study of Defect Behaviour in Proton Irradiated Copper Alloys Using Positron Annihilation and Transmission Electron Microscopy : 9th International Workshop on Applied Physics of Condensed Matter, Malá Lučivná, Slovak Republic, 11.-13.6.2003. In: APCOM 2003. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 9th International Workshop. Malá Lučivná, Slovak Republic. 11.- 13. June 2003. - Žilina : Žilinská univerzita, 2003. - ISBN 80-8070-088-5. - S. 228-232
6. Lüley, J. - Vrban, B. - Haščík, J. - Hincá, R. - Petriska, M. - Slugeň, V. - Farkas, G.: Determination of Thermal Reactivity Coefficients for the First Fuel Loading of MO34. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 83-86
7. Sabelová, V. - Petriska, M. - Veterníková, J. - Slugeň, V. - Sojak, S.: Application of Doppler Broadening Spectroscopy for Detection of Vacancy Defects. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 75-78

8. Sabelová, V. - Petriska, M. - Slugeň, V.: Microstructural Damage Detection Via Coincidence Doppler Broadening Spectroscopy. In: ELITECH '12 : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22 May 2012. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2012. - ISBN 978-80-227-3705-0. - CD Rom, [4] s.
9. Sabelová, V. - Petriska, M. - Veterníková, J. - Slugeň, V. - Kilpeläinen, S.: PAS Doppler Broadening Spectroscopy Application in Defects Detection in Alloys. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, mimoriadne č. : ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011 (2011), s. 166-170
10. Slugeň, V. - Kryukov, A. - Sojak, S. - Petriska, M. - Veterníková, J. - Sabelová, V. - Hinca, R. - Stacho, M.: Application of PAS and Charpy-V Tests at WWER Reactor Pressure Vessel Steels. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 341-344
11. Sojak, S. - Kršjak, V. - Slugeň, V. - Petriska, M. - Vitáček, K. - Stacho, M.: Application of the Positron Annihilation Spectroscopy for Study of Chromium Effect in Radiation Treated Ferritic/Martensitic Steels. In: ELITECH '08 : PhD Students Conference. Bratislava, Slovak Republic, 20.5.2008. - Bratislava : STU v Bratislave, 2008. - ISBN 978-80-227-2878-2. - CD-Rom
12. Sojak, S. - Slugeň, V. - Kršjak, V. - Petriska, M. - Stanček, S. - Vitáček, K. - Stacho, M. - Veterníková, J.: Influence of Thermal Annealing on Defects Formation in Ferritic/Martensitic Steels. In: ELITECH '10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom
13. Sojak, S. - Slugeň, V. - Kršjak, V. - Egger, Werner - Ravelli, Luca - Petriska, M. - Stanček, S. - Skarba, Michal - Priputen, Pavol - Vitáček, K. - Stacho, M. - Veterníková, J. - Sabelová, V.: PLEPS Study of Thermal Annealing Influence on Binary Fe-11.62%Cr Alloys. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 91-94
14. Sojak, S. - Kršjak, V. - Slugeň, V. - Stanček, S. - Petriska, M. - Vitáček, K. - Stacho, M.: Study of the Chromium Effect on the Radiation Damage Resistance of the Ferritic/Martensitic Steels. In: NUSIM 2008 : 16th Annual Nuclear Seminar and Information Meeting. Častá-Papiernička, Slovakia, 24.-25.4.2008. - Bratislava : SNUS, 2008. - CD-Rom
15. Veterníková, J. - Chudý, M. - Slugeň, V. - Sojak, S. - Petriska, M. - Sabelová, V. - Degmová, J. - Hinca, R.: A Study of Radiation Resistance of High Temperature Superconductors for Fusion Reactors. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, mimoriadne č. : ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011 (2011), s. 185-188
16. Veterníková, J. - Slugeň, V. - Degmová, J. - Sabelová, V. - Petriska, M. - Stanček, S.: Positron Study of Implanted ODS Steels. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 79-82

17. Veterníková, J. - Slugeň, V. - Degmová, J. - Sabelová, V. - Petriska, M. - Stanček, S.: Study of Helium Implanted ODS Steels by Positrons. In: ELITECH '12 : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22 May 2012. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2012. - ISBN 978-80-227-3705-0. - CD Rom, [4] s.
18. Vrban, B. - Lüleý, J. - Farkas, G. - Haščík, J. - Hincá, R. - Petriska, M. - Slugeň, V.: MCNP Calculation of the Critical H₃BO₃ Concentrations for the First Fuel Loading into the Reactor Core of NPP MO-3-4 Units. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 87-90

