

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra teoretické elektrotechniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zapojení a řízení neutronového zdroje NG

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin RODÁK**
Osobní číslo: **E12B0092K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Zapojení a řízení neutronového zdroje NG**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se podrobně se specifickou problematikou elektronických součástek, pracujících v radiačně ztížených podmínkách.
2. Proveďte rešerši obvyklých zapojení, používaných pro měření, řízení a optimalizaci u neutronového generátoru OJR v soustavě s izochronním cyklotronem, s ohledem na konkrétní podmínky v ÚJF AVČR v Řeži u Prahy.
3. Proveďte analýzu bezpečnosti a stability provozu Li neutronového generátoru.
4. Zpracujte charakteristiky vybraného experimentu na NG, případně doporučte možné optimalizace.
5. Navrhněte alternativní řídicí systém neutronového zdroje s využitím PLC Annex a napište příslušný program v jazyce SIMPLE 3.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

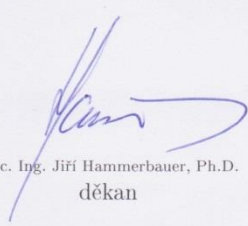
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

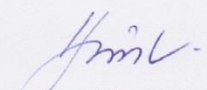
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Preuss, CSc.**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce nastiňuje problematiku provozu polovodičových součástek v ionizujícím záření, respektive v neutronovém poli. Další části práce se zabývají popisem lithiové stanice ÚJF AV ČR, v.v.i., její stabilitou při provozu, případně možným řešením některých abnormálních stavů a charakteristikami vybraného experimentu. Na závěr práce je navrhnout alternativní řídicí systém pro ovládání stínítka s příslušným programem.

Klíčová slova

Cyklotron, ionizační záření, neutronové pole, degradace polovodičů, lithium, vakuum, vakuová vývěva

Abstract

This bachelor thesis outlines the way semiconductors work under nuclear radiation, or more precisely in the neutron field. Next part of the thesis describes the lithium station of Nuclear Physics Institute of ASCR, the safety issues during its operation, possible solution of non-standard situations and attributes of given experiment. In the final part the thesis offers an alternative operating system for controlling the shade.

Key words

Cyclotron, ionizing radiation, neutron field, degradation of semiconductors, lithium, vakuum, vacuum pump

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2015

Martin Rodák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Preussovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 ROZBOR PROBLEMATIKY PROVOZU POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK VE SPECIFICKÉM PROSTŘEDÍ.....	11
1.1 ZÁKLADNÍ EFEKTY PROBÍHAJÍCÍ V POLOVODIČÍCH	11
1.1.1 Ionizace.....	12
1.1.2 Srážky mezi jádrem a částicemi atomu	13
1.1.3 Teplotní klin	14
1.1.4 Změny chemické podstaty a chemických vlastností.....	14
1.2 EFEKTY NA KONKRÉTNÍ POLOVODIČOVÉ PRVKY	14
1.2.1 Změny probíhající v diodách.....	14
1.2.2 Změny probíhající v tranzistorech	16
2 ZAPOJENÍ LITHIOVÉ STANICE NG-2 ÚJF A CHLADÍČÍHO OKRUHU.....	19
2.1 POPIS LITHIOVÉ STANICE	19
2.2 CHLADÍČÍ OKRUH.....	23
2.3 ZÁPIS DAT.....	24
2.3.1 Možný výskyt defektů v databázi	24
3 BEZPEČNOST A STABILITA LITHIOVÉ STANICE NG-2 ÚJF.....	25
3.1 RIZIKA BĚHEM EXPERIMENTU	26
3.1.1 Snížení efektivity chlazení terče, výpadek chlazení kolimátorů.....	26
3.1.2 Výpadek chlazení terčkové hlavy	26
3.1.3 Výpadek dodávky elektrické energie.....	27
3.1.4 Defekt elektronického prvku.....	27
3.2 MOŽNÁ OPTIMALIZACE.....	28
4 POPIS PRŮBĚHU EXPERIMENTU S LITHIOVOU STANICÍ	29
4.1 NASTŘELENÍ	29
4.2 UMÍSTĚNÍ STANICE	29
4.3 KABELOVÉ PROPOJENÍ A KONTROLA STANICE	30
4.4 ZKUŠEBNÍ PROVOZ.....	31
5 OVLÁDÁNÍ POHYBU STÍNÍTKA LITHIOVÉ STANICE NG-2	32
ZÁVĚR	34
PŘÍLOHY.....	35
PŘÍLOHA A: ŘÍDÍCÍ PROGRAM MOTORU	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37

Seznam symbolů a zkratk

Gy.....	gray jednotka absorbované dávky záření
Si.....	křemík
Ge.....	germanium
eV.....	elektronvolt
μ A	mikroampér
ms.....	milisekunda
mbar	milibar
GIR 2002.....	greisinger 2002
SEL	single event latchup (destruktivní poškození polovodiče)
SEU.....	single event upset (nedestruktivní poškození polovodiče)
PLC	programovatelný logický automat
BNC	bayonet neill cancelman konektor

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku polovodičových prvků používaných ve speciálním prostředí, konkrétně v provozu isochronního cyklotronu U-120M. Tento provoz je specifický přítomností ionizačního záření, které způsobuje degradaci polovodičových prvků.

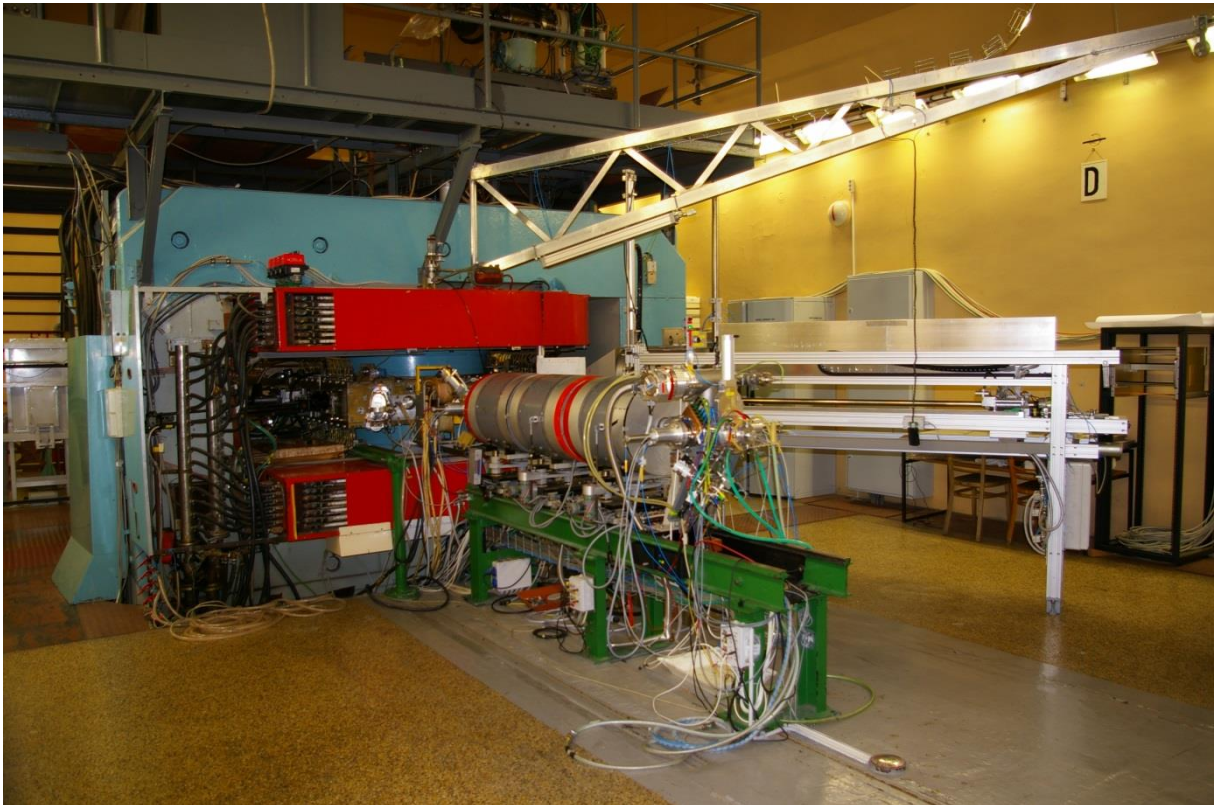
Práce je rozdělena do několika částí. První část se zabývá problematikou samotných polovodičů v ionizujícím záření, degradačním efektem, kterým podléhají, a zamezení těchto důsledků degradace.

V další části je popsána podrobněji lithiová stanice, možná rizika spojená s provozem a průběh experimentu s aparaturou.

Poslední část práce je věnována alternativnímu návrhu ovládání stínítka uvnitř aparatury, schématu ovládání a programu napsaném v jazyce SIMPLE 3 pro programovatelný logický automat.

1 Rozbor problematiky provozu polovodičových součástek ve specifickém prostředí

Tato část práce je zaměřena na vzniklé defekty a efekty v polovodičových prvcích, způsobené ionizujícím zářením. Budou vyjmenovány jednotlivé poruchy a příčiny těchto degradací. Specifické prostředí představuje prostor cyklotronové haly 101, isochronního cyklotronu U-120M (obrázek 1).



Obr. 1. Cyklotron U-120M s trasou HM

1.1 Základní efekty probíhající v polovodičích

Polovodiče jsou pevné látky, u kterých je elektrická vodivost závislá na vnitřních a vnějších podmínkách, které můžeme relativně snadno ovlivnit. Změnu vnitřních podmínek docílíme příměsí jiného prvku v polovodiči. Jako vnější podmínky chápeme dodání jiné energie, například elektrické, světelné nebo tepelné. Polovodičové součástky jsou v dnešní době součástí prakticky všech složitějších elektrotechnických zařízení. Jejich objevem a užitím se zařízení značně minimalizovala a optimalizovala. Vzhledem k jejich principu funkce jsou značně závislé na okolním prostředí, ve kterém se provozují.

Za běžných podmínek je jejich chod bezproblémový, avšak práce je zaměřena na jejich chod v neutronovém poli, které může mít velmi podstatné efekty na jejich funkčnost. Za běžných podmínek v obvyklém prostředí také dochází k jistému ozáření součástek, avšak vzhledem k malé intenzitě jsou tyto efekty zanedbatelné. Významnější důsledky ionizujícího záření můžeme pozorovat ve specifických provozech, jako je kosmický výzkum, nebo při provozu isochronního cyklotronu. Tyto změny můžeme dělit na přechodné, které časem odezní, a na trvalé, které zapříčiní nevratnou změnu jejich charakteristik. Trvalé změny můžeme pozorovat u polovodičů při dávkách 10^4 Gy a více. Jednotlivé polovodiče nepodléhají záření vždy stejně. Jsou typy, které jsou odolnější, co se dávky týče, ovšem záleží také na typu záření [1].

Přítomnost ionizujícího zdroje zkracuje životnost polovodičových prvků. Snižování životnosti je individuální jak podle druhu polovodiče, tak podle druhu záření, a jeho intenzity. Hledisko životnosti je u polovodičových prvků velmi významné, a proto je každá změna životnosti velmi důležitá.[1].

Trvalé změny mohou být pro některé účely přínosné, například pro detekci ionizujícího záření. Nicméně v našem případě je jakákoliv změna charakteristiky nepříjemným důsledkem prostředí, ve kterém se zařízení vyskytuje [1].

1.1.1 Ionizace

Ionizace způsobuje tvorbu volných nosičů náboje v polovodičích kovalentního typu. V některých situacích může docházet k chycení nosičů v takzvaných pastech, které jsou způsobeny defekty struktury polovodičového krystalu nebo vznikají v důsledku některých příměsí v materiálu. Degradace ionizací způsobuje přechodné změny některých fyzikálních vlastností, hlavně způsobuje vyšší vodivost. Tato vlastnost se používá právě u polovodičových detektorů ionizujícího záření [1].

Ionizace sama o sobě nepředstavuje příliš velké riziko trvalých změn v polovodičích. Avšak v důsledku změny fyzikálních vlastností může dojít k trvalým změnám případně k poškození zařízení, protože například zvýšení vodivosti se může chovat v zařízení jako zkrat a následky průchodu vysokých proudů mohou být pro polovodič fatální. Neméně

podstatné jsou povrchové chemické změny v důsledku ionizujícího záření. Například tranzistory jsou velmi citlivé na znečištění povrchu, které pak mění charakteristiky prvků. Tyto efekty způsobené ionizací úzce závisí na nábojových poměrech, ve kterých nastávají změny právě ionizací [1], [2].

1.1.2 Srážky mezi jádrem a částicemi atomu

Tento typ interakcí je velmi významný. K této interakci dochází, je-li energie bombardující částice dostatečně velká. Při srážce dojde k vyražení jádra atomu z jeho polohy v krystalové mřížce. Elektronový obal následuje vyražené jádro ze své původní polohy. Jen elektrony s vazbou menší mají pravděpodobnost, že zůstanou na místě a odtrhnou se od atomu. Vznikne vakance a atom se usadí v mimo-mřížkové poloze. Tuto poruchu nazýváme Frenkelova a řadíme ji mezi izolované poruchy v krystalové mřížce [1].

Pokud je energie při srážce s atomem menší než prahová energie, která je nutná k vyražení atomu z jeho polohy, dochází ke srážce s jeho sousedním atomem (při vhodném směru), a atom zaujme jeho místo, přičemž druhý atom zaujme místo dalšího v řadě. Tato reakce pokračuje dále a k poruše dochází až na rozhraní dvou prostředí, případně v jiné oblasti, kde není pravidelná mřížka. Této kolizi se nazývá fokusovaná [1].

Energie potřebná k vyražení atomu z jeho mřížkové polohy, musí být několika násobně větší, než je hodnota sublimační energie daného materiálu. V případě křemíku (Si) je hodnota této prahové energie 12 eV. Pokud se jedná o sloučeniny, má materiál více prahových hodnot, pro každý prvek sloučeniny samostatně. Z prahových hodnot můžeme řádově určit, jak velká musí být energie bombardující částice, aby došlo k vyražení atomu z jeho původní polohy. Pokud má bombardující elektron energii alespoň 360 keV, dochází u germania k vyražení atomu (prahová hodnota Ge je 15 eV). Elektrony s energií v řádech stovek keV budou tedy vytvářet hlavně poruchy Frenkelova typu [1].

Rychlé neutrony předávají při srážce s atomem mnohem více energie než elektrony. Pokud se atomu v krystalové mřížce udělí větší energie, než je potřebná na samotné vyražení, může se stát samotný atom také bombardující částicí a vyvolat další efekty. Tyto efekty se

zastaví, až poslední z vyražených atomů bude mít udělenou energii menší, než je energie prahová [1].

1.1.3 Teplotní klín

Interakce probíhá na krátké vzdálenosti, pokud již částice nemají dostatek energie k ionizaci jiných částic. V jejich místě dochází k velkému teplotnímu ohřevu a následnému vychladnutí. Může dojít i k lokálnímu roztavení materiálu. Tento jev může mít za následek mnoho poruch. Efekt lze pozorovat velmi často, pokud je bombardující částicí rychlý neutron [1].

1.1.4 Změny chemické podstaty a chemických vlastností

Jaderné reakce také způsobují přeměnu jader, neboli dochází ke změnám jejich chemické podstaty a jejich chemických vlastností. Této vlastnosti se může dokonce využívat, například k dopování křemíku fosforem.

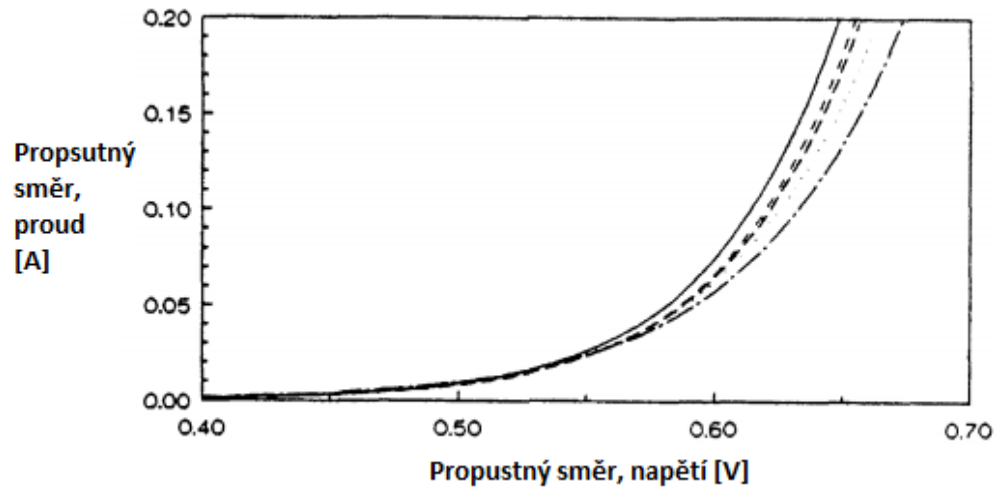
1.2 Efekty na konkrétní polovodičové prvky

V následujícím textu jsou definovány konkrétní polovodičové prvky a změny, které u nich nastávají. Na obrázcích jsou pak znázorněny změny jejich volt-ampérových charakteristik.

1.2.1 Změny probíhající v diodách

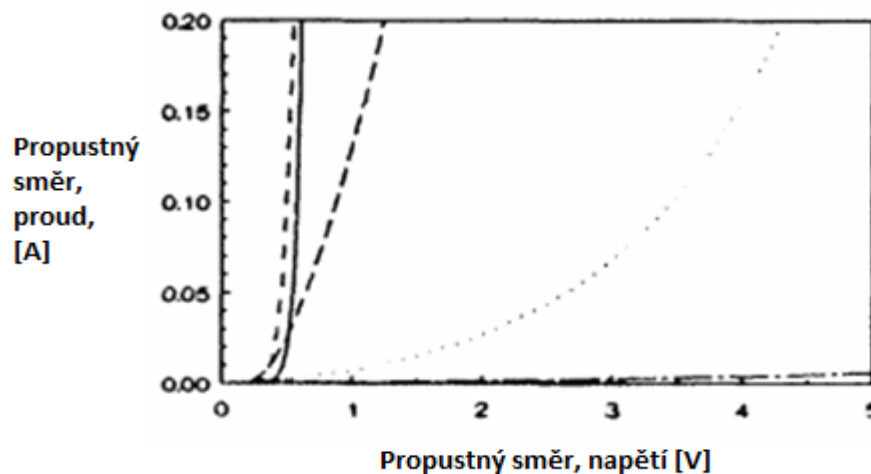
Mezi nejjednodušší polovodičové prvky s jedním PN přechodem patří diody. U diod je předmětem sledování především závěrný klidový proud. Tento proud je spojen s vytvářením poruch. Dalším důsledkem degradace je také omezení propustnosti v propustném směru diod.

Po ozáření diody dochází k posuvu napětí v propustném směru k vyšším hladinám. Tento jev může způsobovat problémy jak z krátkodobého, tak z dlouhodobého hlediska [3]. Příklad změny charakteristiky diody 1N914 jsou vyobrazeny na obrázku 1.



Obr. 2. Dioda 1N914, převzato z [3].

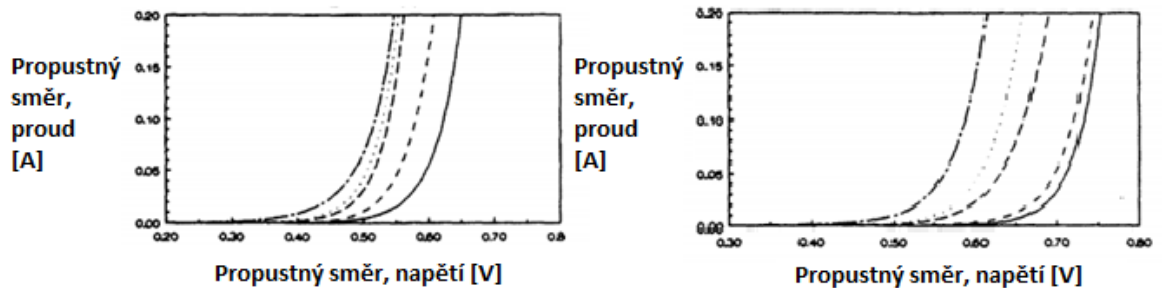
Posunutí charakteristik k vyššímu napětí není pravidlem. U diod může docházet nejdříve k poklesu napětí a při dosažení určité hodnoty následně ke zvýšení napětí (viz obrázek 3). Kvůli tomuto efektu musíme mít dostatečný čas k projevení některých efektů, aby nedošlo k jejich záměně [3].



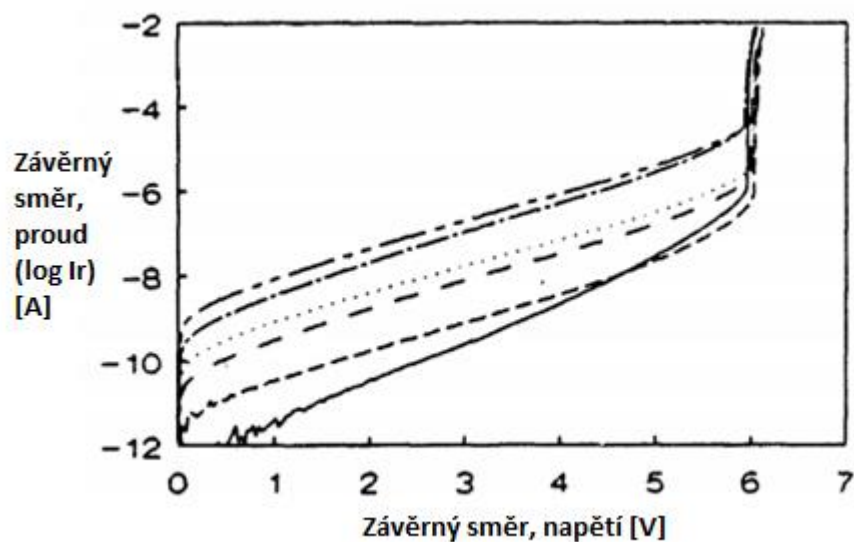
Obr. 3. Dioda 1N4006, převzato z [3].

Dochází také k trvalému poklesu napětí v propustném směru. Tento jev můžeme pozorovat u zástupců varikapů, nebo u Zenerových diod (viz obrázek 4). Je třeba zmínit, že

u Zenerových diod dochází ke změně jak v propustném, tak v závěrném směru. Tato skutečnost je podstatná například u napět'ových stabilizátorů [3]. Příklad dané charakteristiky je vyobrazen na obrázku 5.



Obr. 4. Varikap, Zenerova dioda, převzato z [3].



Obr. 5. Zenerova dioda, převzato z [3].

1.2.2 Změny probíhající v tranzistorech

Velmi významní zástupci polovodičů jsou tranzistory. Tranzistor má oproti diodám více PN přechodů a nikoliv pouze jeden. Bylo vybráno několik příkladů tranzistorů, které budou dále více zkoumány a popíšeme si příčiny a důsledky jejich degradace.

1.2.2.1 Bipolární tranzistory

Nejzávažnější změnou u bipolárních tranzistorů je změna proudového zesilovacího činitele. Jelikož je báze-emitor v propustném směru, stává se častějším jevem rekombinace, kvůli větší koncentraci nosičů ve vodivostním pásu. Rekombinace závisí na době průchodu skrze přechod. Zmenšením báze můžeme vylepšit odolnost vůči záření. Rychlost tranzistoru je silně závislá na šířce báze, z toho plyne, že fyzicky menší tranzistory jsou odolnější vůči ionizačnímu záření než větší [3].

1.2.2.2 Unipolární tranzistory

U unipolárních tranzistorů dochází ke dvěma efektům v MIS (kov-izolant-kov) strukturách důsledkem ionizujícího záření.

- a) Vytváří se kladný nekompenzovaný náboj ve vrstvě dielektrika. Při přítomnosti unipolárního tranzistoru v ionizujícím poli dochází ke vzniku párů elektron-díra v dielektriku. Elektrony se přesouvají v závislosti na polaritě polovodiče nebo kovu. Díry zůstávají v dielektriku, protože nejsou tak pohyblivé jako elektrony. Dochází tedy ke vzniku kladného nekompenzovaného náboje. Nově vzniklý náboj ovlivňuje prahové napětí tranzistoru. Ke vzniku náboje dochází u všech typů záření, liší se však svou velikostí pro každý typ záření [3].
- b) Dochází ke vzniku přídavných povrchových stavů v hraničních oblastech mezi polovodičem a dielektrikem. Vznik povrchových stavů má za následek omezení pohyblivosti nosičů. To souvisí s větší strmostí volt-ampérové charakteristiky [3].

1.2.2.3 Tranzistory typu MOSFET

Značně náchylná na záření je u MOSFET tranzistorů (pro chod velmi důležitá) vrstva oxidu křemíku mezi hradlem gate a vodivým kanálem. Nejfatálnějším efektem záření je nárůst náboje na rozhraní křemíku a oxidu křemíku. Díky těmto jevům dochází ke změnám

parametrů tranzistorů. Velmi podstatný parametr je prahové napětí. Posuvem prahového napětí dochází ke změně fyzikálních charakteristik a tím i ke změně spínacích časů. U PMOS tranzistorů prahové napětí stoupá, u NMOS tranzistorů klesá [3].

1.2.2.4 Změny probíhající v integrovaných obvodech

Integrované obvody mají svá specifika v problematice degradace vlivem ionizujícího záření. Musíme zde zohlednit jak vlivy na jednotlivé součástky individuálně, tak z celkového hlediska, kde mohou vznikat chyby zjevů jindy pro nás nepodstatných. Blíže jsou specifikovány hlavně pro jednotlivé izolační metody [3].

Integrované obvody podléhají efektům, které se dostávají na povrch a ovlivňují tak chod a funkčnost zařízení. Efekty jsou způsobené jednou energetickou částí, která může mít destruktivní nebo nedestruktivní charakter. Zástupcem nedestruktivních chyb je například SEU, u které dochází ke změně logických stavů a k jeho nápravě stačí restartovat postižené zařízení do původního stavu. Zkratkou SEL se označují potenciálně destruktivní chyby, jejichž následkem může být nárůst proudů až za mezní pracovní podmínky zařízení, což může zapříčinit nevratné poškození obvodů. Při projevení efektu SEL musí dojít k okamžitému odpojení zdroje, aby se zabránilo destruktivním účinkům proudů. U integrovaných obvodů dochází k dalším možným změnám, jako je vyhoření MOSFET, roztržení hradel, vzniku šumu aj. [3].

a) Izolační ostrůvky

Izolační hradba je realizována závěrně orientovanými PN přechody. Vytváří tedy ohmické a zároveň i kapacitní oddělení. Dříve se používalo pro bipolární tranzistory, v současné době pro NMOS a PMOS [3].

b) Izolace oxidem

Jde o vrstvy oxidu s velmi důkladně kontrolovanými vlastnostmi rozhraní. Zbavují sousední křemíkový substrát pohyblivého náboje. Dříve bylo této metody využíváno u MOS tranzistorů [3].

c) Izolace příkopem

V současné době používaný moderní způsob izolace. Dochází k vytvoření fyzického příkopu mezi zařízeními [3].

2 Zapojení lithiové stanice NG-2 ÚJF a chladicího okruhu

Druhá kapitola je zaměřena na popis zapojení a konstrukci lithiové stanice. Podrobněji je zde popsáno konkrétní zapojení samotné stanice a lithiového chladicího okruhu během experimentu.

2.1 Popis lithiové stanice

Neutronový generátor na ÚJF AV ČR, v.v.i. s lithiovou terčovou stanicí využívá tenký lithiový terčik pro produkci kvazi-monoenergetických neutronů v energetickém rozsahu 18 až 35 MeV a slouží tak pro měření jaderných dat, zejména aktivačních účinných průřezů (pravděpodobnost reakce neutronu s daným materiálem). Před experimentem se terčová stanice připojuje k iontooptické trase isochronního cyklotronu U-120M, kterou se na lithiový terčik přivádí svazek urychlených nabitých částic (standardně jde o protony).

Po technické stránce stanice sestává z terčové komory obsahující konvertor protonů na neutrony, dvou kolimátorů, nosného systému stanice, vakuové jednotky, autonomního chladicího okruhu terče a systému diagnostiky provozních parametrů a ochran. Samotná lithiová aparatura je zkonstruována z nerezové ocele. Nerezová ocel byla zvolena z důvodu výhodných materiálových vlastností při dosahování vyššího vakua v terčové komoře. Tak např. použití lehčího duralu by způsobovalo potíže při dosahování hlubokého vakua s ohledem na uvolňování molekul zinku. Jednotlivé sektory stanice jsou od sebe izolovány teflonovými kroužky.

Těleso terčové stanice obsahuje vstupní průchod (připojuje se na iontovod cyklotronu), kterým prochází svazek nabitých částic z cyklotronu. Ve stanici je svazek vedený trasou se

dvěma uhlíkovými clonami různých průměrů a následně se přivádí na samotný terčík, kde se spotřebuje pouze malá část svazku (řádově jednotky procent). Zbylá část svazku se zastaví v uhlíkovém zhášeci s aktivním chlazením těsně za terčíkem, případně bezprostředně za ozařovanými vzorky. Za provozu se sleduje proud na terči i obou kolimátorech, přičemž nízké hodnoty proudů na kolimátorech (desetiny μA) vypovídají o přesném nastavení osy terčové stanice do optické osy svazku nabitých částic.



Obr. 6. Měřicí přístroje proudu

Z výše uvedeného pramení požadavek na přesné nastavení neutronového generátoru před každým experimentem, který je vždy zahájen fokusováním svazku nabitých částic vystupujících z cyklotronu. Cílem je dosáhnout toho, aby svazek protonů procházel trasou aparatury. Fokusaci svazku provádí operátor cyklotronu prostřednictvím dvou elektromagnetických čoček, umístěných na vývodu z isochronního cyklotronu. Přesná trasa zaostřeného svazku se sleduje v průběhu celého experimentu měřením proudů na clonách. Clony jsou umístěny na začátku aparatury a těsně před lithiovým terčíkem.



Obr. 7. Lithiová stanice

Na samém konci aparatury je situován nosič terče, do kterého se umísťuje lithiové kolečko o dané tloušťce (0,5 resp. 2,0 mm v závislosti na druhu experimentu). Samotný terč je také připojen k mikroampérmetru, který měří proud svazku dopadajícího na lithium. V důsledku interakcí nabitých částic svazku s lithiovou fólií vznikají monoenergetické rychlé neutrony, jejichž osa je totožná s osou primárních nabitých částic. Produkovaný svazek neutronů je dále vyváděn do měřicí haly, kde slouží k ozařování zkoumaných vzorků,

umístěných v přímé ose svazku. Například se do neutronového pole mohou umístit některé polovodičové součástky a může se tak určovat jejich degradace v důsledku ozáření.

Veškeré elektronické prvky se musí umísťovat mimo měřicí halu. V případě jejich nutné přítomnosti co nejdále od svazku, aby se omezilo snížení životnosti nebo případné znehodnocení vlivem radiačního poškození rychlými neutrony. Měření proudů je vyvedeno na svorkovnici na BNC konektory, kde se připojí stíněné koaxiální kabely a signál se přenáší na velín cyklotronu a zde se provádí měření. Nejpodstatnější měřenou hodnotou je proud na terčiku, který je měřen (ostatní proudy jsou měřeny stejným způsobem) na universálním měřicím a regulačním přístroji GIR 2002 [4]. Měřené hodnoty se zapisují v daném intervalu (nejčastěji po jedné sekundě) na měřicí počítač v měřicím středisku. Také se provádí měření teploty samotného lithia bezdotykovou sondou. Tato hodnota je rovněž zaznamenávána.

V prostoru mezi clonou blíže k terči a terčem, je umístěna elektroda, na kterou se přivádí ze zdroje, umístěného na velínu cyklotronu, stejnosměrných -700V . Toto napětí by mělo mít za následek zhuštění svazku nabitých částic. Nicméně účinky vysokého napětí jsou stále předmětem zkoumání.



Obr. 8. Velín cyklotronu

Celý vnitřní prostor aparatury musí být před propojením s cyklotronem odčerpán na vyšší vakuum, aby nedocházelo k snižování energie svazku případnou přítomností jiných částic nebo molekul v aparatuře. Vakua se docílí kombinací rotační vývěvy (nízké vakuum) a turbo-pumpy (vysoké vakuum) a je měřeno přístrojem TPG 300 [5]. Po dosažení vyššího vakua (většinou hodnoty okolo 10^{-5} mbar), se provede propojení aparatury s cyklotronem oddělovacím ventilem. V případě poklesu vakua v aparatuře dochází k samočinnému zavření ventilu a tudíž odpojení měřicí stanice od cyklotronu.

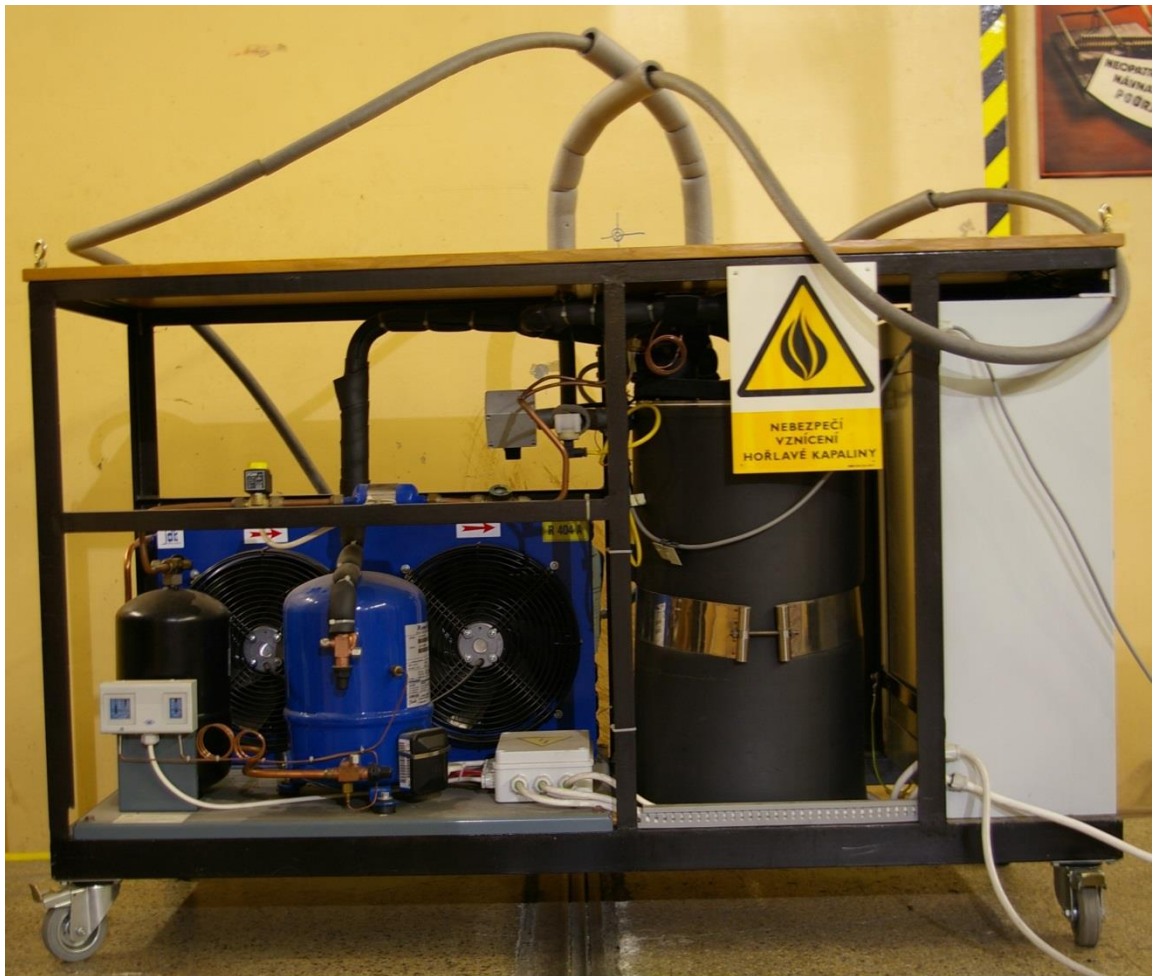
2.2 Chladicí okruh

Jelikož při ozařování dochází k ohřevu lithia a především uhlíkového zhášече svazku, musí být uhlíkový hasič i držák terče za provozu chlazeny, aby nedošlo k jejich propálení. Chlazení zhruba na 12 °C je realizováno lihem, který protéká terčovou hlavici a vrací se zpět do chladicího zařízení.

U chladicího lihu se musí sledovat teplota na vstupu a výstupu terče i jeho tlak. V případě poklesu tlaku nebo snížení efektivity chlazení musí dojít k okamžitému přerušení experimentu. Tyto hodnoty jsou hlídány sondami v chladicím zařízení a ze sond je signál přenášen do měřicího střediska na příslušné měřicí přístroje a je zapisován. Sondy jsou umístěny na vstupu i výstupu z terčové hlavy.

Kromě teploty a tlaku lihu je hlídán také jeho průtok. Na tuto hodnotu je navázána havarijní signalizace, která v případě překročení sledovaného parametru informuje obsluhu cyklotronu o aktuálním stavu, případně dává pokyn k vypnutí cyklotronu.

Samotné clony musí být rovněž chlazeny, ale v tomto případě se již používá chladicí voda, která se přivádí z chladicího okruhu cyklotronu. Průtok chladicí vody je monitorován a zapisován.



Obr. 9. Lihové chladicí zařízení

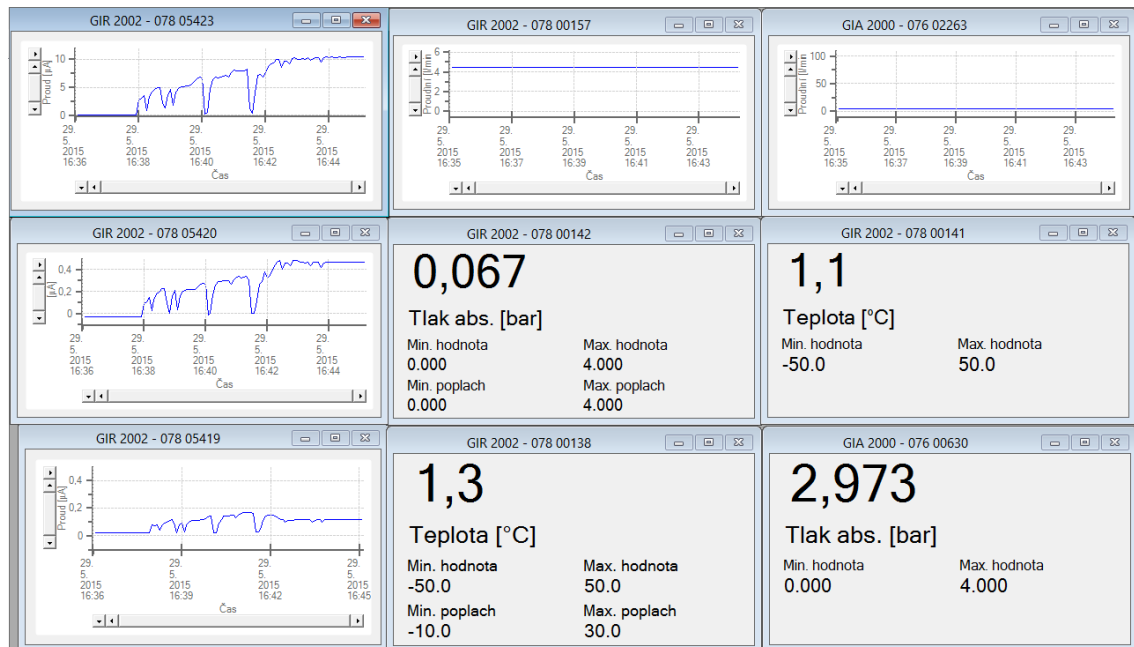
2.3 Zápis dat

Všechny signály jsou přenášeny do měřicího střediska, kde se provádí jejich zápis a je zde také zapojena havarijní signalizace. O zapisování dat se stará program EBS 20M [6], ve kterém se vytvoří databáze a po skončení měření se vyexportuje dokument požadovaného typu. Ten je dále vyhodnocován. Program je dimenzovaný na zápis maximálně dvaceti signálů současně.

2.3.1 Možný výskyt defektů v databázi

Při zápisu většího množství signálů se projevuje časové zpoždění způsobené pomalejší reakcí měřicích přístrojů. Důsledkem pomalejší odezvy dochází k překročení jednosekundového intervalu (doporučený minimální interval je 2,5 s) řádově o desítky ms.

Toto překročení je z hlediska experimentálních hodnot zanedbatelné, avšak představuje problém při zpracování velkého objemu dat, jelikož jsou hodnoty k sobě náležející rozmístěny v tabulce na nesouhlasné řádce. Nejen proto se volí při delším experimentu (např. 48 hodinovém a více) právě interval zápisu 2,5 s.



Obr. 10. Prostředí programu EBS 20M [6]

Další možností by byla výměna měřicích přístrojů a programu. Šlo by však o nákladnou variantu a hlavně by bylo méně přesvědčivé srovnání hodnot s již dříve naměřenými daty. Proto se u delších experimentů jeví jako optimální řešení delší interval zápisu (při dlouhodobém měření je problém menší koncentrace zapisovaných dat méně významný).

3 Bezpečnost a stabilita lithiové stanice NG-2 ÚJF

Samotná lithiová stanice je relativně stabilní a rizika spojená s jejím provozem jsou z hlediska bezpečnosti malá. Lithium jako takové je toxické pouze při požití. Celá aparatura je opatřena několika stupni kontroly pro každý rizikový faktor.

Před začátkem každého experimentu probíhá řada kontrol funkčnosti jednotlivých prvků a ověřování zapojení. Tato kontrola je zakončena krátkodobým testem využitím svazku

protonů ze samotného cyklotronu, kdy dojde ke kontrole usazení aparatury do osy svazku protonů.

3.1 Rizika během experimentu

Rizik během experimentu je několik, od méně závažných, kde hrozí pouze zpoždění experimentu, až po ta vážnější, kde by mohlo dojít k nehodě s rizikem uvolnění radioaktivního materiálu a bylo by nutné odstavit provoz cyklotronu na delší dobu. Samotný cyklotron má svůj systém ochran, které by měly zabezpečit bezproblémové vypnutí probíhajícího ozařování za všech okolností. Tedy případné rizikové situace by měly za důsledek pouze nesplnění rozpisu chodu cyklotronu, jsou však spojeny s vysokými finančními náklady. Funkce ochran ve výjimečných situacích jsou definovány pro jednotlivé havárie obdobně. Jednotlivé modelové situace jsou popsány níže.

3.1.1 Snížení efektivity chlazení terče, výpadek chlazení kolimátorů

Tato situace neohrožuje samotný provoz cyklotronu, pouze by mohly negativně ovlivnit měřená data. V prvotní fázi by došlo k detekci abnormálního stavu některou z průběžně sledovaných hodnot. Systém ochrana a havarijní signalizace zajistí okamžité informování operátora cyklotronu, který dále seznámí se současným stavem vedoucího experimentu. V této chvíli se rozhodne, jestli je možné pokračovat za stávajícího stavu, nebo dojde k odstavení cyklotronu a k opětovné kontrole všech zařízení a zjištění příčiny dané události. Konkrétně by mohlo jít například o snížení efektivity chlazení terčičku následkem snížení tlaku nebo zvýšení teploty chladícího lihu, případně o přerušení chladícího okruhu kolimátorů.

3.1.2 Výpadek chlazení terčkové hlavy

Závažnější poruchy mohou mít za následek úplný výpadek chlazení terče, který by mohl způsobit propálení lithiového kolečka, eventuálně vznik požáru. V případě téměř nulového průtoku lihu (je nastavena malá, avšak nenulová hodnota k předejití nevratnému poškození

ozařovaného vzorku a pro zvýšení možné reakční doby) sepne měřič průtoku lihu svorky relé, které okamžitě spustí havarijní signalizaci a dá pokyn operátorovi cyklotronu k neodkladnému vypnutí cyklotronu. Poté je přivolán vedoucí experimentu. Opět by následovalo zjišťování příčiny výpadku a případně k zjištění škod.

3.1.3 Výpadek dodávky elektrické energie

V letních měsících mohou být více častá chvilková přerušení dodávky elektrické energie a z tohoto důvodu je koncentrace experimentů během nejrizikovějších týdnů omezena. Nemusí se jednat přímo o výpadek dodávky, stačí chvilkový výkyv a z bezpečnostních důvodů dojde k odstavení cyklotronu. Řídící počítače a ostatní zařízení potřebná k ovládní cyklotronu jsou připojena na záložní zdroj energie. Žádné bezpečnostní ohrožení v tomto případě nehrozí, ale je zde problém nízké kvality výsledků experimentu.

3.1.4 Defekt elektronického prvku

Během celého experimentu se snažíme co nejvíce odstínit od neutronového pole a ochránit řídicí elektroniku všech zařízení. Ovšem i přes tuto snahu je nezbytná přítomnost některých prvků v prostoru cyklotronové haly. Jmenovitě jde o vakuový ventil od firmy Pfeiffer [7], umístěný mezi rotační vývěvou [8] a stanicí. Tento ventil je řízen elektronikou. Časové relé [9] otevírající zmíněný ventil a v případě použití Rootsovy vývěvy [10] jsou citlivé ovládací prvky. Této elektronice se postupným ozařováním snižuje její životnost a mohlo by dojít k trvalému poškození a ztrátě odčerpávání vakua.

Ztráta kontroly nad ventilem [7] nebo nad časovým relé [9] není nikterak závažná, protože ventil má výchozí polohu zavřenou a nedojde ke snížení vakua.

Pokud je však postižena Rootsova vývěva [10], je situace komplikovanější, protože není v sérii s ventilem. Havarijní stav není možné okamžitě detekovat a to z důvodu již propojené stanice s cyklotronem. Cyklotron je vybaven vlastním a výkonnějším zařízením na vytváření vakua a tedy by docházelo k odčerpávání i experimentální aparatury. Tato porucha by se tedy

projevila až ve chvíli, kdy by nebyla cyklotronová vakuová zařízení schopna výpadek kompenzovat (po odstavení vývěvy zůstává otevřený průchod pro odčerpávaný vzduch a dochází tedy k vyrovnávání atmosférického tlaku s tlakem ve stanici). Poté se zaznamená zhoršení vakua a je zavřen oddělovací ventil cyklotronu. Cyklotronové vakuum je tedy stabilizované, avšak v aparatuře se vyrovná tlak s atmosférou a dojde k odstavení cyklotronu. V případě pokračování experimentu musí být postižené zařízení vyměněno a před opětovným propojením musí být ve stanici dosaženo požadovaného vakua.

3.2 Možná optimalizace

Případné problémy s chlazením mohou být způsobeny mnoha faktory, proto proti nim neexistuje stoprocentní ochranné opatření. Stejně tak jako nelze ovlivnit výkyvy v dodávce elektrické energie. Jiným případem je degradace polovodičových prvků, které by mohly být ovlivněny.

Účinky na tyto prvky by se daly minimalizovat efektivnějším stíněním. Není však možné odstínit zařízení kompletně. Proto se musíme soustředit na rychlejší zjištění defektu některého z prvků, případně zajištění bezproblémového chodu bez Rootsovy vývěvy [10].

Jak bylo uvedeno výše, problém nenastává odstavením vývěvy, ale následným neuzavřením vývodu. Vznikne volný průchod skrze vývěvu do stanice a dochází ke ztrátě vakua. Řešením by tedy mohlo být uzavření průchodu ze stanice směrem k vývěvě. Způsob zvolený u rotační vývěvy [8] není ideální, jelikož ovládací prvky ventilu podléhají také degradaci. Řešením by mohlo být použití ventilu Pfeiffer [11], ovládaného pouze pneumaticky. Ovládání ventilu by se dalo do závislosti na měřič vakua TPG 300 [5], který by měl nastavenou relativně malou hranici poklesu vakua k sepnutí ventilu, aby došlo k včasnému odpojení vývěvy a nedošlo k automatickému oddělení od cyklotronu a k jeho vypnutí.

4 Popis průběhu experimentu s lithiovou stanicí

Příprava experimentu s lithiovou aparaturou začíná jeden den před měřením. Je nutné provést nezbytné kroky, jako je příprava lithiového terče, které se musí vystříhnout do požadovaného kolečka a usadit do nosiče terče (provádí se v argonové atmosféře). Vakua musí být dosaženo v prostoru aparatury před umístěním lithia, aby se zamezilo jeho reakci se vzduchem. Dalším krokem je kontrola izolačních odporů stanice. Izolační odpor jednotlivých částí musí být dostatečně velký, aby nedocházelo ke zkreslení měřených proudů na terči a clonách. Jednotlivé části jsou od sebe izolovány teflonovými kroužky.

4.1 Nastřelení

Nastřelení je první fází samotného experimentu. Provádí se na nástřelnou trubku, která se namontuje na cyklotronovou HM trasu. Cyklotron se nastaví na požadovaný režim a energii. Poté je na přírubu, která je umístěna na konci nástřelné trubky, vypálen do slídové folie bod. Na začátku nástřelné trubky je umístěno stínítko, které je pozorováno kamerou (kamera zde může být umístěna pouze v době nastřelení, aby nedošlo k jejímu zničení). Druhý bod vznikne zakreslením stopy svazku procházející skrze stínítko. Poté se vynuluje vždy jedna elektromagnetická čočka a rozostřením svazku vznikne vodorovná, respektive svislá osa svazku. Průsečík těchto os určí jádro svazku při daném nastavení obou čoček. Tato stopa a průsečík os se vyznačí na připojeném LCD displeji.

4.2 Umístění stanice

Aby byla stanice umístěna na správném místě a svazek částic procházel přesně požadovanou trasou, musí být stanice přesně instalována. Při nastřelení jsou zaznamenány dva body na ose svazku, jeden na konci nástřelné trubky, druhý na začátku. Do získaných bodů se zaměří osa laseru. Laser se umístí na svoji polohu, která byla vyznačena již při minulých experimentech. Postupně se laserem pohybuje ve všech směrech, dokud osa neprotíná oba dva body. Laser tedy bude vyznačovat přesnou dráhu částic a nástřelnou trubku je možno demontovat.

Lithiová stanice se přesune pomocí mostového jeřábu na přibližné místo usazení. Postupně je její poloha upravována, dokud trasa nastaveného laseru není shodná s průchodem stanicí. Dále za stanicí se do pozice laseru mohou umisťovat další ozařované vzorky, které již budou vystaveny neutronovému poli. Za ozařované vzorky se umístí chlazený zhášec, aby nedocházelo k ozařování posuvných vrat, na které by jinak dopadl svazek neutronů. Po skončení nastavení všech prvků laser nezůstává v experimentální hale, aby nedošlo k jeho znehodnocení vlivem urychlených neutronů.

4.3 Kabelové propojení a kontrola stanice

Všechny sondy se propojí s měřícím střediskem, kde jsou umístěny měřicí přístroje (viz obrázek 9). Propojení se realizuje pomocí konektorů umístěných na zdi cyklotronové haly. Propojení měření proudů je provedeno rozdílně, jelikož nevede do měřícího střediska, nýbrž na velín cyklotronu. Až poté pokračují data do měřícího střediska. Vedou se kabelovými kanály a signál je přenášen koaxiálním kabelem. Před zapojením těchto kabelů, je nutné znovu ověřit, že izolační odpor jednotlivých částí je dostatečně velký, a že nedošlo při instalaci ke zkratu mezi jednotlivými částmi stanice. Měření se provádí měřičem izolačního odporu [12], při napětí 1000 V. Pokud je izolační odpor vyhovující, připojí se kabely ke stanici a v zapisovacím programu EBS 20M [6], je spuštěn testovací záznam dat.

Všechny sondy jsou již připojené a naměřené hodnoty se zapisují do vytvořené databáze. Pouze hodnoty proudů zůstávají nulové, ověření funkčnosti měření a zápisu se provádí připojením zkušební baterie na příslušné měřené úseky. Jestliže je zapisování proudů spolehlivé, následuje test havarijní signalizace.

Test se provede vypnutím čerpadla chladícího lihu. Hodnota průtoku klesne na mezní hodnotu, přičemž dojde ke spuštění signalizace na velínu a v zázemí kanceláří. Tímto se považuje kontrola stanice za dostatečnou a provede se zkušební provoz cyklotronu.



Obr. 11. Měřicí přístroje chladícího zařízení

4.4 Zkušební provoz

Provoz a stabilita cyklotronu se ověří krátkým dosažením požadovaného proudu na terči. Z počátku provozu se projeví jisté kolísání výkonu cyklotronu (možno vidět na prvním grafu obr. 10), které se však během delšího ozařování neprojeví. Následně může dojít ke změně proudu na terči, čímž se ověří funkčnost změny nastavování za dané energie. Není totiž vždy pravidlem, že by proud na terčičku byl po celý experiment identický. Test je úspěšný, pokud jsou poměry proudů na kolimátorech a na terči vyhovující.

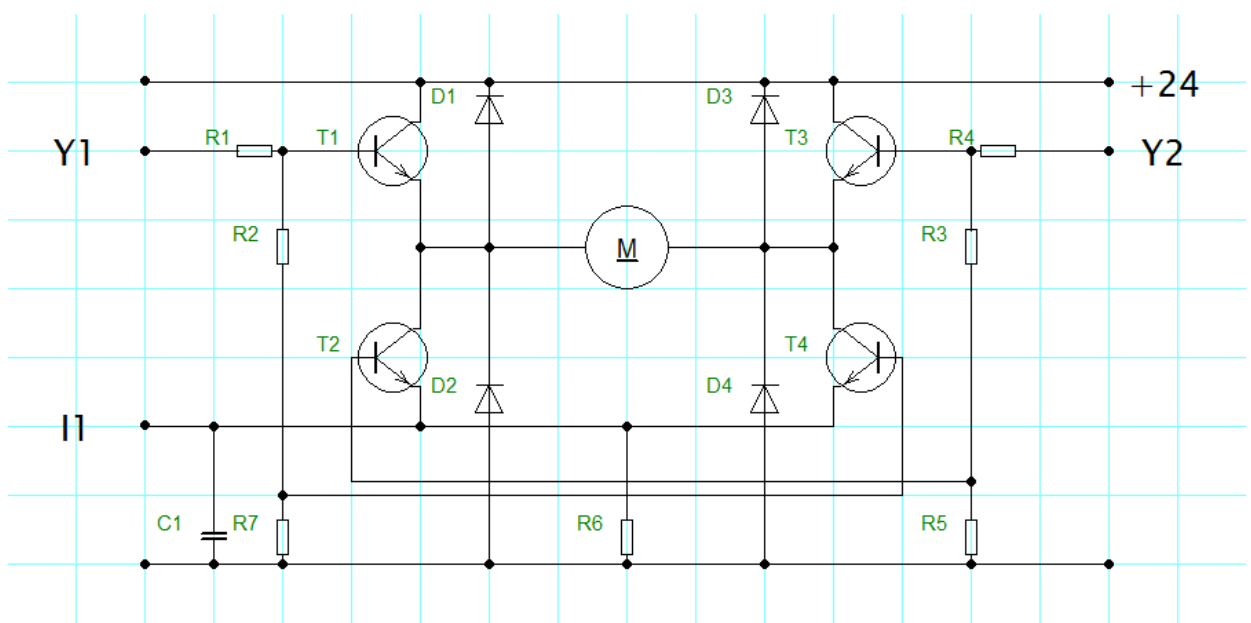
Po každém i krátkodobém provozu cyklotronu je nutné, aby byla, před vstupem do cyklotronové haly, provedena dozimetrická kontrola a byla zjištěna možná rizika a hlavně proběhlo předání informací, jak těmto potenciálně nebezpečným situacím předejít. Po zkušebním testu následuje dozimetrická kontrola situace a poté se může provést finální vizuální kontrola a umístění vzorků, které budou předmětem experimentu (při zkušebním provozu nemohou být tyto vzorky přítomny v prostoru cyklotronu).

Osoby, které budou vykonávat pracovní činnost v prostoru experimentální haly, musí být oděny dle předpisů provozu rizikových pracovišť s ionizujícím zářením, splňovat veškeré podmínky z toho vyplývající a musí být vybaveny páskovým dozimetrem (umístěným na těle), prsténkovým dozimetrem a digitálním osobním dozimetrem [13], měřícím aktuální stav prostředí. Páskový a prsténkový dozimetr se pravidelně vyhodnocuje a ze získaných dat se poté sestavuje statistika obdržené dávky záření za celý kalendářní rok.

5 Ovládání pohybu stínítka lithiové stanice NG-2

Lithiové stínítko slouží k sekundární kontrole fokusace svazku. Při průchodu skrze stínítko je zobrazována plocha svazku částic, který prochází stanicí.

Stínítko je umístěno v prostoru mezi kolimátory, a slouží ke kontrole stopy svazku, který prochází aparaturou. Aktuální poloha stínítka je monitorována kamerou, která snímá stínítko proskleným průhledem do stanice. Pohyb stínítka je ovládán z velínu. Výchozí poloha stínítka je zcela mimo svazek protonů, jeho pohyb zajišťuje stejnosměrný motor, napájený 24 V. Řízení motoru navrhuji realizovat pomocí PLC (program je obsažen v příloze a schéma ovládacího obvodu je vyobrazeno na obrázku 12).



Obr. 12. Schéma řídicího obvodu motorku

Tabulka 1. Hodnoty prvků

Rezistory [Ω]	
R1	33
R2	2200
R3	2200
R4	33
R5	1000
R6	1
R7	1000
Kondenzátor [nF]	
C1	100

Závěr

Hlavním předmětem práce byla lithiová stanice ÚJF AV ČR, v.v.i., která se používá k produkci rychlých neutronů.

V první kapitole je nastíněna problematika využití polovodičových součástek v ionizačním záření. Proběhlo seznámení s jevy vyskytujícími se u konkrétních elektronických prvků a s efekty v nich vznikajícími. U vybraných polovodičů, je vyobrazena změna Volt-Ampérové charakteristiky.

Druhá kapitola se zaměřila na popis lithiové stanice, chladičového zařízení, a na zvolený způsob zaznamenávání dat. Proběhlo vyhodnocení problému s tímto zápisem a vybrání optimálního řešení s minimalizací těchto chyb. Popisované části aparatury jsou vyobrazeny na odpovídajících obrázcích pro ilustraci.

Následující kapitola se zabývala bezpečností a stabilitou provozu lithiové stanice. Byly uvedeny jednotlivé rizikové situace, které mohou nastat v průběhu experimentu. Dále je zde uvedený návrh možné optimalizace pro předejití těchto krizových stavů.

Ve čtvrté kapitole byl charakterizován konkrétní průběh experimentu s lithiovou stanicí. Rovněž jsou popsány jednotlivé kroky a procesy nezbytné k realizaci daného měření a přiblížení specifik provozu elektrotechnických zařízení v neutronovém poli.

Poslední kapitola je věnována návrhu realizace řízení lithiového stínítka pomocí stejnosměrného motoru. Obsahem kapitoly je seznámení s ovládáním a návrh vlastního řídicího obvodu motoru a možná podoba vytvořeného programu obsaženého v příloze.

Přílohy

Příloha A: Řídící program motoru

V příloze je ovládací program motoru pohybující lithiovým stínítkem.

```
{TERC01
  Martin Rodák                                Pohon stínítka lithiové stanice
  27.05.2015
  =====}

#Configuration "ANNEX F"

CONST
  44001 # verze          ; // <-- verze programu --
  00100 # imax          ; //omezení proud motoru
  10000 # timelimit     ; //omezení běhu motoru
END

SUBROUTINE RST
D0=verze; //číslo verze programu
M1';M2';M4';M9';
Y1';Y2';Y10;Y13';Y14';Y15';
D3=0;
TEN1';TPA1';TDM1';TOE1';T1=0; //čítač doby chodu motorku (nepřetéká)
TEN2';TPA2';TDM2';TOE2';T2=0; //prodleva při změně směru
RESET';
RETURN

//----- Start smyčky -----
IF RESET THEN RST;ENDIF

//filtrace vstupních signálů
IF X1 AND X2' THEN D1=D1+2; ELSE D1=D1-3;ENDIF //tlačítko DO (M1)
IF D1>999 THEN D1=0;M1';ENDIF
IF D1>100 THEN D1=100;M1;ENDIF

IF X2 AND X1' THEN D2=D2+2; ELSE D2=D2-3;ENDIF //tlačítko OD (M2)
IF D2>999 THEN D2=0;M2';ENDIF
IF D2>100 THEN D2=100;M2;ENDIF

IF I0>D3 THEN D3=D3+1;ELSEIF I0<D3 THEN D3=D3-1;ENDIF //měření proudu motorku (D3)
IF D3>999 THEN D3=0;ENDIF

//nastavení výstupů
TEN2=(M1 AND M4) OR (M2 AND M4'); //podleva po změně směru
IF T2=100 THEN T2=0; TEN2'; //prodleva 100 ms
IF M1 THEN M4';ELSEIF M2 THEN M4;ENDIF //záznam posledního směru
Y1=M1 AND TEN2';Y2=M2 AND TEN2'; //zapnutí výstupů

TEN1=(Y1 OR Y2);IF (D3<2 AND Y1' AND Y2') THEN T0=0;ENDIF //doba chodu (T1)

//ochrana motorku
D4=imax; //nastavení proudového omezení
IF D3>D4 THEN M9;Y13; ENDF //zastavení nadproudem
IF T1>timelimit THEN M9;Y14;ENDIF //zastavení překročením doby
IF (M1 OR M2 OR D3>1)' THEN M9';Y13';Y14';ENDIF //obnovení
IF M9 THEN Y1';Y2';ENDIF

//diagnostika chyb
IF (Y1 OR Y2) AND D3<5 AND T1>50 THEN Y10';Y15;ENDIF //odpojený motor
```

```
Y10=M9';  
END
```

```
{Konec programu
```

```
=====
```

Přehled vstupních proměnných:

```
=====
```

X0	(nepoužito)
X1	tlačítko DO
X2	tlačítko OD

Přehled výstupních proměnných:

```
=====
```

Y0	(nepoužito)
Y1	pohyb směrem DO
Y2	pohyb směrem OD
Y3	(nepoužito)
Y4	(nepoužito)
Y5	(nepoužito)
Y6	(nepoužito)
Y7	(nepoužito)
Y8	(nepoužito)
Y9	(nepoužito)
Y10	ready
Y11	(nepoužito)
Y12	(nepoužito)
Y13	error - nadproud
Y14	error - časový limit
Y15	error - přerušený obvod

Přehled proměnných typu WORD:

```
=====
```

D0	číslo verze programu
D1	pomocná proměnná - filtrace vstupu tl.
D2	pomocná proměnná - filtrace vstupu tl.
D3	filtrovaná hodnota proudu
D4	mezní hodnota proudu

Přehled proměnných typu BIN:

```
=====
```

M1	filtrovaný signál tlačítka DO
M2	filtrovaný signál tlačítka OD
M3	(volné)
M4	pomocná proměnná - paměť směru
M5	(volné)
M6	(volné)
M7	(volné)
M8	(volné)
M9	příznak chyby

```
}
```

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ŠEDA, Josef. *Dozimetrie ionizujícího záření: vysokoškolská učebnice*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983, 418 s.
- [2] FRANK, Luděk. *Metody analýzy povrchů: iontové, sondové a speciální metody*. Praha: Academia, 2002, 489 s. ISBN 80-200-0594-3.
- [3] Khanna, S. M., Pepper, G. T., Stone, R. E.: *Neutron Radiation Induced Degradation of Diode Characteristics* [online]. Ottawa, 1992 [cit. 2015-04-010]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a263277.pdf>
- [4] *Bartex* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.bartex.cz/Default3.aspx?ln=cs&guid=05f03398-6593-4668-a828-9c7f8507bba7&id=181>
- [5] *Pfeiffer vacuum* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/measurement/moduline/controllers/?detailPdoId=3407>
- [6] *Bartex* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.bartex.cz/Default3.aspx?ln=cs&guid=84949e53-478a-401c-8198-c8bad583b05f&id=207>
- [7] *Pfeiffer vacuum* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/valves/angle-valves/?detailPdoId=1698>
- [8] *Pfeiffer vacuum* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/rotary-vane-pumps/single-stage/unoline/uno-30-m/?detailPdoId=5140&>
- [9] *Elko EP* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.elkoep.cz/produkty/elektronicke-pristroje/casova-rele/multifunkcni-casova-rele/casove-rele-multifunkcni-crm-93h-5/>
- [10] *Pfeiffer vacuum* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/multi-stage-roots-pumps/light-duty-applications/air-cooled/sd-versions/?detailPdoId=12269&>
- [11] *Pfeiffer vacuum* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/valves/angle-valves/?detailPdoId=525>
- [12] *GM electronic* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/meric-izolacniho-odporu-cem-dt-6605-p729-112>
- [13] *ISOTRAK* [online]. 2015. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://qishop.zahas-sro.cz/09-Detekcni-a-merici-technika/Osobni-detekce-zareni/Kapesni-dozimetr-ISOTRAK-_d74388_10939.aspx