

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD dissertation

**Félvezető és szcintillációs detektorok alkalmazása
részecskefizikai kísérletekben**

**Applications of semiconductor and scintillation
detectors in particle physics experiments**

Sipos Attila

Témavezető/supervisor: Dr. Molnár József



Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája
Debrecen, 2012

University of Debrecen
PhD School in Physics
Debrecen, 2012

Készült

A Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Magfizika programja keretében a Magyar Tudományos
Akadémia Atommagkutató Intézetében (ATOMKI)

Prepared at

the University of Debrecen PhD School in Physics
and
the Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of
Sciences (ATOMKI)

Bevezetés

A Metal-Oxide Semiconductor (MOS) és Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) technológiával gyártott áramkörök jelentik napjaink mikroelektronikai ipara termékskálájának legfontosabb szeletét. Amikor egy ilyen eszközt nagyenergiájú radioaktív sugárzás vagy részecske ér, ronthatja annak működési paramétereit vagy akár csökkentheti élettartamát. 1962-ben az amerikai űrprogram kapcsán különböző űreszközök meghibásodását követően világszerte az ionizáló sugárzásoknak a félvezetőkre gyakorolt hatását célzó intenzív kutatások indultak meg. Ez a - radioaktív térben is működő áramkörökre való igény által hajtott - kutatás az ún. sugárzástűrő eszközök fejlesztésére, alkalmazásukra fókuszált. Ezek az áramkörök nélkülözhetetlen alkatrészek a különböző műholdakban, továbbá a fejlett fegyverrendszerekben, a nukleáris erőművekben és a nagyenergiás fizikai kísérleteknél.

A kutatás másik hajtóereje a még nagyobb integráltságú és még nagyobb teljesítményű áramkörökre, mikroprocesszorokra való igény volt. Az ilyen áramkörök rendkívül bonyolult gyártástechnológiája gyakran alkalmaz olyan nagyenergiájú részecskéket vagy fotonokat, amelyek jelentős sugárkárosodást okozhatnak. Nyilvánvaló, hogy a gyártott mikroáramkör működőképességének biztosítása megköveteli a gyártás során az eszközt érő radioaktív behatások ismeretét és közben tartását. Mindkét fentebb említett alkalmazás esetében alapvető fontosságú megérteni a sugárzás által keltett töltéshordozók keletkezési mechanizmusait és mind tranziens, mind hosszú távú hatásaikat.

A mindennapi gyakorlatban előfordul, hogy egy félvezető alkatrész speciális alkalmazása során további tanulmányozásra érdemes jelenséggel találkozunk, amint az a CERN Compact Muon Solenoid (CMS) detektorának műonkamra-pozícionáló rendszerében alkalmazott egyszerű CMOS Active Pixel Sensor videokamera sugártűrési vizsgálatai során előfordult. A sugártűrési tesztek tapasztalatai további kutatásokat motiváltak,

amelyek nélkülözhetetlenek voltak az eszközök hosszú távú, megbízható működésének biztosításához. Az azóta elkészült CMS-ben a CMOS kamerákat helyzetérzékeny szenzorként használják.

A félvezető detektorok mellett az ezen a területen és a nagyenergiás fizikában is használt másik igen fontos detektortípus a szcintillációs detektorok, amelyeknek orvosi alkalmazása is igen jelentős. A pozitron emissziós tomográfokban (*PET*) használt lutécium-ittrium-oxiortoszilikát (YLu_2SiO_5 , *LYSO*) szcintillátor kristály ma az egyik legmodernebb eszköznek számít. Esetünkben különböző gyártóktól szereztünk be szcintillátorokat, így lényeges volt annak eldöntése, hogy melyik gyártmány milyen minőségű és ezeknél mekkora a szórása a kérdéses paramétereknek.

Célkitűzés

A CERN CMS detektorában alkalmazott CMOS kamerák sugárzástűrési vizsgálatai során megfigyelték, hogy egy fénytől elzártan működő videokamera kimenő jelében láthatóvá válnak a bejövő ionizáló részecskék nyomai. A megfigyelés több kérdést is felvetett: hogyan függnek a részecskenyomok a nyaláb intenzitásától, a nyomok mérése útján miként lehetséges a részecskék típusának azonosítása és azok energiájának meghatározása, továbbá mi a lehetősége a kamerák protonterápia-nyalábdozimetriában való alkalmazásának.

A fenti kérdések megválaszolására szisztematikus kísérlatsorozatba kezdtünk az alábbi területeken:

- azonos energiájú de különböző áramú proton besugárzással a CMOS kamera kvantitatív képfeldolgozásban való alkalmazása,
- különböző energiájú protonokkal, α -részecskékkal, valamint szén- és szilícium-ionokkal végzett részecskeazonosítás.
- célunk volt a CMOS kamera alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata proton-nyalábdozimetriában, valamint

- célul tűztük ki a CMOS kamera alkalmazhatóságának vizsgálatát alfa-sugárzás hatótávolságának a nyomás függvényében való mérésére.

A CMOS kamerával folytatandó kísérleteken kívül célunk volt kisállat-PET készülék fejlesztése során felmerült igény alapján egy mérési módszer kifejlesztése, amely az annihilációs gamma-fotonok mérésére szolgáló szcintillátor kristályok fényhozamának és felbontóképességének a meghatározására alkalmas. Ezenkívül tervbe vettük fényhozam növelését célzó kísérlet elvégzését is.

Új tudományos eredmények

1. A CMOS kamerán alapuló rendszert állítottunk össze klinikai protonterápiában és nyaláb-dozimetriában való alkalmazásokra. Kifejlesztésre került egy új típusú, a kísérleti adatok statisztikus feldolgozásához használt adatgyűjtő rendszer. A kísérlet során videomagnetofonra rögzített jelet először digitalizáljuk, majd képkockák sorozatává alakítjuk. A képszekvenciák ezután a kívánt cél elérésének szempontja szerint egyenként és automatizáltan értékelhetők ki.

A szerző szerepe : az adatfeldolgozó rendszer kifejlesztése és képessé tétele a gyakorlati felhasználásokra. A kísérleti adatok kiértékelése ezen új módszer nélkül nem lett volna lehetséges. [1]

2. Nagy energiájú protonokkal történő bombázás esetén egyértelmű kapcsolatot találtam a küszöbfényesség feletti jelet adó "fényes" pixelek száma és a kamera érzékeny felületét érő részecskenyaláb áramerőssége között. Az arányosság értelmezhető, ha figyelembe vesszük az érzékeny réteg vastagságát, a protonok energiájától függő fékezőképességet, a protonok által az érzékeny térfogatban keltett töltések mennyiségét és az érzékeny térfogat atommagjain kiváltott magreakciók gyakoriságát. Ezzel bebizonyítottam, hogy ezek a kamerák használhatók egyszerű, olcsó de kvalitatív sugárzásdetektorként, és tumorterápiában való nyalábmonitorozásra. 180MeV energiájú protonokkal teszteltük a kamera

használhatóságának felső határát, amely információ hasznos a CMS-beli alkalmazásokban.

A szerző szerepe : részt vettem a kísérleti berendezések beállításában és a besugárzásban, az adatgyűjtő rendszer beállításában és tesztelésében. A rögzített videók feldolgozása az általam kifejlesztett módon történt, részt vettem az adatok kiértékelésében, az eredmények publikációra való előkészítésében. A videofeldolgozó-kiértékelő rendszerről előadást tartottam egy nemzetközi konferencián. [1, 7]

3. Bebizonyítottuk hogy a CMOS szenzor mint detektor alkalmas bombázó részecskék energia szerinti szelekciójára, a fényes foltok megszámlálásával pedig dozimetriai célokra, továbbá hogy a különféle folyamatokat a kamera érzékeny rétegében létrehozott lenyomat alapján el tudjuk különíteni, és meg tudjuk határozni a lenyomatok jellemzőinek a részecske fajtájától és energiájától való függését. Megmutattuk, hogy azonos energia mellett a részecskenyomok átmérője a részecske fajtájától, azonos részecskék esetén a részecske energiájától függ. A részecskenyomok elkülöníthetők a besugárzás hatása alatt károsodott cellák okozta hatástól.

A szerző szerepe : részt vettem a kísérlet előkészítésében, az adatok kiértékelésében, az elvégzett kísérletet egy nemzetközi konferencián bemutató előadás elkészítésében. [3, 9]

4. Kimutattuk, hogy korlátozott érzékenysége ellenére a CMOS kamera időben jelentéktelen háttér-változást, alacsony öregedést, rövid és hosszú idejű jelstabilitást és előzetes besugárzás szükségessége nélkül is állandó hatásfokot mutat. A chipet kis mérete ideálissá teszi in vivo dozimetriában való alkalmazásra és protonnyaláb valós idejű monitorozására. Emellett a chip főleg gyors neutronokra is érzékeny, de termikus neutronok is detektálhatók vele, ha felületén egy vékony ${}^6\text{Li}$ réteget alakítunk ki. A kísérletekhez modernizáltam az adatfeldolgozó rendszert, így a kamera videojele közvetlenül a számítógépen került rögzítésre, kiküszöbölve ezzel az analóg videoszalagos technika

korlátozott kontrasztját és lecsökkentve a korábban a szalagsebesség változása miatt elveszett képkockák számát.

A szerző szerepe : továbbfejlesztettem az adatgyűjtő rendszert, a rögzített videók feldolgozása már a javított módszerrel történt. [2, 8]

5. LYSO szcintillátor kristályok minősítése céljából fényhozam és felbontóképesség-meghatározási módszert dolgoztunk ki. A módszer az irodalomból ismert ún. „Monte-Carlo refractive index matching” (*MCRIM*) módszer továbbfejlesztése. Alapelve az, hogy a komplett szcintillációs összeállítást (szcintillátor + optikai rendszer + PMT) jellemző, a felbontóképességet leíró komplex kifejezés egyes összetevőit lépésenként, fordított sorrendben határozzuk meg (PMT + optikai rendszer + szcintillátor).

Az MCRIM módszert alkalmaztuk különböző gyártóktól származó kristályok vizsgálatához mind eredeti, mind levegőben végzett hőkezelés utáni állapotukban. A hőkezelés célja feltételezett oxigén-vakanciák oxigén diffúzió révén történő kompenzációja volt LYSO és GSO (Gd_2SiO_5) kristályokban. A kezelés után 5-10% fényhozam-növekedést tapasztaltunk.

A szerző szerepe : részt vettem a fényhozam-meghatározási módszer kifejlesztésében, meghatározó szerepet játszottam a kísérleti berendezések és az adatgyűjtő rendszer megtervezésében és összeállításában, a hőkezelések végrehajtásában, valamint a fényhozam mérésekben. [4, 5, 6, 10, 11]

Introduction

When a Metal-Oxide-Semiconductor (*MOS*) device is exposed to a flux of energetic photons or particles, the resulting effect from this radiation can cause severe degradation of the device and of its operating life. The research which started in 1961 to investigate the effects of ionizing radiation on semiconductor devices was driven by the need for circuits that can function properly in a radiation hard environment. Such circuits are essential for space exploration, nuclear power plants, and detectors for high-energy physics experiments.

Another driving force has been the quest for ever higher density, higher performance integrated circuits and microprocessors. For both of the above applications, it is important to understand the fundamental mechanisms involved in the creation of radiation-induced charge carriers and bonding effects, and their effects (both transient and long term) on the electrical properties of devices.

In daily practice we can sometimes observe unusual effects on well known devices, for example in the case of a commercial CMOS Active Pixel Sensor (*APS*) used as part of the CMS Muon Barrel Alignment system of the LHC accelerator at *CERN*. The radiation tolerance of this component was tested in a radiative environment. When testing the radiation hardness of the video camera with protons and neutrons, it became obvious that the device has a potential for usage in other applications.

Aims

During hardness tests we have observed bright spots of different size on the image of the sensor. These bright spots were interpreted as results of different nuclear interactions caused by the proton and neutron irradiation. A nuclear reaction in silicon initiated by a neutron or proton frequently results in emission of a light particle.

The investigation of the above mentioned observation has split into different directions. The first one concerns the use of

this image sensor as radiation detector for proton beam therapy applications. In the second, the effects of the secondary particles in the image sensor are systematically investigated as a function of energy and type of ion. Our third goal was to investigate the use of the CMOS image sensor as a Radiation Field Detector for clinical dosimetry in advanced proton therapy.

In addition a further aim was to develop a method for measuring Lutetium Yttrium Oxyorthosilicate (YLu_2SiO_5 , *LYSO*) scintillator parameters such as light yield and scintillation efficiency. For developing a Small Animal PET we could obtain the scintillation crystals from different manufacturers at different prices. Therefore, it was necessary to have a classification system to qualify the parameters of the crystals, and to determine the variation of the important parameters.

Results

Proton irradiation of the CMOS sensor

In this experiment a CMOS sensor was irradiated with a 180MeV proton beam. The irradiation experiments were performed at the TSL Laboratory at Uppsala, Sweden. The video signal of the sensor was collected on VHS videotapes and analysed off-line after digitization. The camera chip with 110000 pixels each having $12 \times 12 \mu m^2$ size, shows the nuclear reactions occurring in the sensitive layer as bright spots or tracks. For evaluation a new digitization system and method has been developed. The output signal of the sensor was recorded on a videotape for 2 min. First, the videos were converted to MPEG1 streams, and then, exported into frame sequences. The analysis of the video frames started with an evaluation of the distribution of brightness values of all pixels for each frame. Every bright spot indicates where a nuclear reaction has occurred and a charged particle has reached the sensitive volume of the pixel. For automated and detailed evaluation, all pixels of the picture are scanned for each frame to assemble the frequency of the possible 256 gradation intensity values. The resulting brightness frequency histogram is created for each individual frame. The

evaluation of the experiments wouldn't have been possible without the new data processing method.

The present experiments have proven that the CMOS sensor (even without evaluation software) can be used as simple, inexpensive, but qualitative radiation detector, to detect charged particles for educational purposes, for radiation monitoring in tumor therapy, etc., and also after removal of the protecting glass window, to detect heavy charged particles. [1, 7]

Participation of the author: I was responsible for the development of the new evaluation system and method which was also used in our further experiments. I participated in the preparation of the targets, in setting up the equipment at the TSL bio-medical beam-end, the irradiation process and the recording and converting of the videos.

Heavy ion irradiation of the CMOS sensor

The electron-hole pairs created by nuclear interaction caused by proton and neutron irradiation are visualized as bright spots or tracks in the sensor images. Because the spots are caused by the charges created by the interaction of the secondary particles with the detector material, one analyzes the effect of some mixture of secondary projectiles. It was therefore decided to study the effect of individual secondary particles at different energies. The heavy ion irradiations were performed at the Tandem Laboratory at Uppsala, Sweden. In order to design the measurement and also to help interpret the results, a simple model of the image sensor was used. For automated and detailed evaluation all pixels are scanned for each frame to find the bright spots. The bright spots are defined as a cluster of pixels, where each of the pixels have brightness above some threshold level and the pixels have at least one neighbour joining it side by side from the same cluster. After identifying the individual clusters (spots), different types of statistical analysis can be performed. The limited thickness of the sensitive layer still enables the chip to be used as a particle detector with high spatial resolution ($<100\mu\text{m}$) and with limited energy resolution for particle identification. These features enable the use of the image sensor for energy

selection of projectiles, while simple counting of the bright spots can be used in dosimetry applications. [3, 9]

Participation of the author: I participated in the preparation of the targets, and the evaluation of the videos.

Proton therapy beam dosimetry with CMOS image sensors

In this experiment a CMOS sensor was irradiated with 48, 95 and 180MeV protons at the TSL Laboratory. The detector efficiency, linearity, and angular dependence for proton beams of different therapeutic energy and current were studied. The achievable statistical accuracy of the quantitative data analysis of the video image was also evaluated.

Even though the charge collection around the interaction point in the chip might be incomplete due to the very low bias supplied to the device, the number of resultant electron-hole pairs diffusing around the interaction spot might be correlated with the type and energy of the recoil nuclei. For radio therapeutic purposes the irradiation time is less than 1 min per single delivered beam. With the use of the CMOS sensor as detector, despite such a short exposure time a sufficient number of frames can be collected and analysed. Si-diode detectors used in proton beam dosimetry require a suitable level of pre-irradiation to stabilize the detector signal. Since the use of this CMOS image sensor is based on detection of nuclear reactions, the radiation hardness of this device is high. The deterioration due to radiation will be observed as a change of the background level of the image. However, during the present experiments, which lasted for more than 20h, no serious damage of the chip was found and the analysis method also eliminates the influence of damaged pixels. In addition to other well-established detectors, the CMOS detector could make a good candidate for proton radiation dosimetry, and has the following advantages (or due to the following factors): direct read out, lack of pile up effects, the well-established proton interaction cross-sections, the stability of the signal, the detector linear response with proton energy and current and the very low cost. In addition, since the video chip detects nuclear interactions, it is also sensitive to neutrons. [2, 8]

Participation of the author: in this experiment my duty was to update the digitization and evaluation system. The generated read out video signal displaying the proton–silicon nuclear reactions in the CMOS sensor, was directly recorded in a PC by using a 50Hz sampling frequency video-grabber unit. The generated MPEG video file was then converted frame by frame to separate JPEG files.

Development of a method for measuring of light yield and energy resolution of LYSO scintillation crystal.

We developed a method that we used in the crystal qualification. This method is an upgrade of the so called Monte-Carlo refractive index matching method. With the new method we can determine the components of the complex mathematical expression which can be used to describe the light yield and energy resolution of the whole scintillation system (scintillator + optical system + PMT).

Using the MCRIM method we made experiments to compare the light yield of different LYSO cube crystals. We didn't find significant differences between the crystals. Our second experiment was to increase the light yield of LYSO and Gadolinium Orthosilicate (Gd_2SiO_5 , GSO) crystals.

We have performed the annealing experiment with 4x60 crystals. After annealing we tested the crystals using the MCRIM method, and the results clearly show that the achievable improvement of the light yield is 5-10%. The reason probably is that the quality of the crystals is very good in advance. [4, 5, 6, 10, 11]

Participation of the author: I was involved in the development of the measuring method, I participated in the light yield and the annealing experiments.

A tézisek alapjául szolgáló közlemények (List of publications relating to the dissertation)

Referált közlemények (Scientific papers)

[1] **A. Sipos**, E. Grusell, A. Kerek, W. Klamra, J. Molnár, L.-O. Norlin, D. Novák, A. Sanchez-Crespo, J. Van der Marel and J. Végh : *Visualization of neutron and proton induced particle production in a CMOS image sensor*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 509 (2003) 328-332

[2] A. Sanchez-Crespo, A. Kerek, W. Klamra, J. Molnár, L.-O. Norlin, B. Skatt, E. Grusell, D. Novák, **A. Sipos**, J. Van der Marel, J. Végh. : *Proton therapy beam dosimetry with silicon CMOS image sensors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 525 (2004) 289-293

[3] J. Végh, A. Kerek, W. Klamra, J. Molnár, L.-O. Norlin, D. Novák, A. Sanchez-Crespo, J. Van der Marel, A. Fenyvesi, I. Valastyán, **A. Sipos**. : *Visualization of heavy ion-induced charge production in a CMOS image sensor*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 525 (2004) 229-235

[4] Simon A., Balkay L., Kalinka G., Kerek A., Novák D., **Sipos A.**, Végh J., Trón L., Molnár J.: *High spatial resolution measurement of depth-of-interaction of a PET LSO crystal*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 546 (2005) 33-36

[5] Imrek J., Hegyesi Gy., Kalinka G., Molnár J., Novák D., Valastyán I., **Sipos A.**, Balkay L., Emri M., Opposits G., Kis S. A., Trón L. : *Distributed online coincidence detection using IP multicast for the miniPET-II detector*. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 2009. NSS/MIC 2009. Orlando, Florida, USA, 24 Oct. - 1 Nov., 2009. Proceedings (2010) 2434-2436

[6] Valastyán I., Imrek J., Hegyesi Gy., Kalinka G., Molnár J., Novák D., **Sipos A.**, Bagaméry I., Balkay L., Kerek A. : *Experimental scanner setup from miniPET-II detector modules*, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 2008. NSS 08. Dresden, Germany, 19-25 Oct., 2008. Proceedings (2009) 3846-3849

Előadások (Talks)

[7] **A. Sipos**, E. Grusell, A. Kerek, W. Klamra, J. Molnár, L.-O. Norlin, D. Novák, A. Sanchez-Crespo, J. Van der Marel and J. Végh: *Visualization of Neutron and Proton Induced Particle Production in a CMOS Image Sensor*, IWORID 2002 International Workshop, Amsterdam, The Netherlands. 8-12 Sept., 2002

[8] Sanchez-Crespo, A., Kerek, A., Klamra, W. Molnár J. Norlin, L.-O. Skatt, B., Novák D., **Sipos A.**, van der Marel, J., Végh J.: *Proton therapy beam dosimetry with silicon CMOS image sensors*. International Conference on Imaging Techniques in Subatomic Physics, Astrophysics, Medicine, Biology and Industry. Stockholm, Sweden, 24-27 June, 2003

[9] Végh J., Fenyvesi A., Kerek A., Klamra W., Molnár J., Norlin L-O., Novák D., Sanchez-Crespo A., **Sipos A.**, Van der Marel J., A., Valastyán I. : *Visualization of Heavy Ion Induced Particle Production in a CMOS Image Sensor*. International conference on imaging techniques in subatomic physics, astrophysics, medicine, biology and industry. Stockholm, Sweden, 24-27 June, 2003

[10] Simon A., Balkay L., Chalupa I., Kalinka G., Kerek A., Molnár J., Novák D., **Sipos A.**, Végh J. : *A High spatial resolution measurement of depth-of-interaction of a PET LSO crystal*. 6th International Workshop on Radiation Imaging Detectors. Glasgow, Scotland, 25-29 July, 2004

[11] Valastyán I., Imrek J., Hegyesi Gy., Kalinka G., Molnár J., Novák D., **Sipos A.**, Bagaméry I., Balkay L., Kerek A. : *Experimental scanner setup from miniPET-II detector modules*. IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop. Dresden, Germany, 19-25 Oct., 2008

