



Tömbi szcintillátor kristályt és szilícium fotoelektron-sokszorozó alapú PET detektor modulok modellezése

PhD tézisfüzet

Játékos Balázs

Témavezető:
Dr. Erdei Gábor

BMEatomfizika

Atomfizika Tanszék,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
2018.

A kutatások előzménye

A pozitron emissziós tomográfia (PET) egy 3D orvosi képalkotási technológia, mely mind kutatásban mind hagyományos orvosi diagnosztikában széles körben elterjedt. A technika alkalmazásával lehetőség nyílik élő szervezetbe fecskendezett kontrasztanyag térbeli eloszlásának meghatározására. A kontrasztanyagot olyan úgy készítik el, hogy az meghatározott biológiai folyamatokban vegyen részt, tehát eloszlásából következtetni lehet az élő szervezet vagy egyes szervek állapotára.

A kontrasztanyag pozitronokat bocsát ki, amik a szervezet elektronjaival ütközve rekombinálnak. Egy-egy ilyen eseményből egy-egy γ -foton kerül kibocsátásra. A PET berendezés detektor moduljainak szerepe, hogy ezeket elnyelje és meghatározza az esemény bekövetkeztének idejét, az elnyelődés helyét (point of interaction - POI) és a detektornak átadott energia mennyiségét. Ennek az információnak a segítségével a pozitron kibocsátó anyag térbeli eloszlása rekonstruálható. A rekonstruált kép felbontása nagyban függ a PET detektor modul térbeli, időbeli és energia felbontásától.

A γ -foton érzékelés szcintillációs kristályokon és fotonszámláló detektorokon alapul. A szcintillátor kristály feladata, hogy látható fotonokká átalakítsa a γ -foton energiáját, amiket a fotonszámlálók érzékelnek. A PET detektorok felbontásának javítása érdekében azok optikai kialakítását optimalizálni kell.

A hagyományos PET detektor modulok szorosan egymás mellé helyezett, tű-szerű, néhány milliméter alapterületű szcintillátor kristályokból és nagyméretű – néhány négyzetcentiméter érzékeny felületű – fotoelektron-sokszorozó csövekből állnak. Ilyen detektorok esetén a POI becslését annak a kristálytűnek az azonosításával érik el, amiben a szcintilláció történt. Ennek következtében a detektor térbeli felbontását a legkisebb kristálytű méret korlátozza, továbbá ilyen módon a kristály hosszabb oldal irányában a pozíció nem becsülhető (úgynevezett mélységi információ).

Napjainkban az újonnan kifejlesztett szilícium alapú fotoelektron-sokszorozók néhány négyzetmilliméteres vagy annál is kisebb pixelekből állnak. Ennek az új technológiának az alkalmazása lehetővé teszi tömbi szcintillátor kristályok alkalmazását. Ez a megoldás azért előnyös, mert a tömbi szcintillátor kristályok olcsóbban előállíthatók illetve segítségükkel a mélységi információ is helyreállítható. Másrészt viszont ilyen detektorok optikai kialakítását optimalizálni a hagyományos modulokénál sokkal bonyolultabb feladat, mivel a PET detektor modul által mért paraméterek mindegyikének felbontása változhat az elnyelés helyének függvényében (mindhárom koordináta). Az optimalizáció célja, hogy ezt a változást a lehető legkisebbre csökkentse, miközben biztosítja legjobb felbontás elérését minden paraméter esetén.

Célkitűzések

Munkám a SPADnet projekthez kapcsolódik, aminek célja új, teljesen digitális, szilícium alapú fotonszámláló és hozzájuk kapcsolt tömbi szcintillátor kristályon alapuló PET detektorok fejlesztése. A munkám célja egy olyan szimulációs módszer kifejlesztése volt, ami támogatja az említett optimalizációs és tervezési folyamatot. A munka három fő területre bontható: (1) a PET detektor elrendezésekben használt anyagok és komponensek optikai tulajdonságainak elemzése; (2)

matematikai és szimulációs modellek megalkotása a vizsgálatok alapján és egy olyan szimulációs eszköz kifejlesztése, ami alkalmas új típusú PET detektor összeállítások részletes modellezésére. Végezetül (3) szimulációs eszköz és az alkalmazott modellek validációja. Mivel módomban volt részt venni az említett fotonszámláló fejlesztésében az (1) feladat részeként megvizsgáltam több fotonszámláló geometriát, hogy meghatározzam az újonnan kifejlesztésre kerülő PET detektor számára legkedvezőbb elrendezést.

Vizsgálati módszerek

Az optikai szimulációkat kereskedelmi forgalomban kapható optikai tervezőeszközben, Zemax OpticStudio-ban végeztem. Az alkalmazott anyagok és a fotonszámláló szenzor optikai modelljeit és elrendezését ebben az eszközben építettem föl. Azokat a modellezési feladatokat, amik nem végezhetők el Zemax OpticStudio-ban, MATLAB környezetben valósítottam meg. A szimulációs és mérési adatok feldolgozását is MATLAB-ban végeztem.

Az optikai anyagok és komponensek vizsgálatához kereskedelmi forgalomban kapható műszereket használtam és ahol szükséges volt saját kísérletet elrendezést építettem és kidolgoztam a hozzá tartozó kiértékelési eljárást. Végezetül a szimulációs eszköz validációját saját magam által épített kísérleti elrendezéssel végeztem, amit a fent leírt feladat által támasztott követelményekhez alapján terveztem.

Új tudományos eredmények

- 1) *Kidolgoztam egy spektroszkópiai ellipszométer használatán alapuló módszert az axiális diszperzió meghatározására biaxiális kettőtörő kristályok esetén; ennek használatával azt találtam, hogy a LYSO:Ce szcintillátor anyag Z index ellipszoid tengelyének irányváltozásának értéke 400 nm és 700 nm közötti hullámhossz tartományban maximum $2,4^\circ$, változás menete pedig monoton. [J1]*
- 2) *Meghatároztam a SPADnet-1 szenzor lavinadióda (SPAD) mátrix mérettartományát, ahol tömbi szcintillátor alapú PET detektor térbeli- és energiafelbontása maximális. Eredményeim szerint egy pixelnek 16×16 és 32×32 közötti SPAD-et kell tartalmaznia. [J2, J3, J4]*
- 3) *Kifejlesztettem egy új mérési módszert, ami lehetővé teszi fedőüveggel ellátott szilícium foton-számlálók foton érzékelési hatásfokának és reflektanciájának meghatározását polarizáció, hullámhossz és szög függvényében, 80° beesési szögig. [J5]*
- 4) *Kifejlesztettem egy szimulációs eszközt (SCOPE2), amely képes SPADnet típusú digitális, szilícium fotoelektron-sokszorozó alapú PET detektormodulok választását megbízhatóan szimulálni, pontszerű γ -foton gerjesztés esetén, az alkalmazott anyagok és komponensek részletes optikai modelljének felhasználásával; a szimulációs eszköz GATE szimulációs eszközzel összeköthető. [J3, J4, J6, J7, J8]*
- 5) *Kifejlesztettem egy validációs eljárást és megterveztem a hozzá kapcsolódó kísérleti elrendezést LYSO:Ce szcintillátor kristály alapú PET detektormodulok SCOPE2 eszközzel (4. tézisponthoz) történő szimulációjához; a kísérleti detektormodulok pontszerű gerjesztését γ -foton ekvivalens UV gerjesztéssel értem el. [J3, J4, J9]*

- 6) Validációs módszerem használatával (5. tézispont) megmutattam, hogy a SCOPE2 szimulációs eszköz (4. tézispont) és a használt optikai komponens- és anyagmodellek segítségével a vizsgált PET detektor modulok válasza kevesebb, mint 13% átlagos alakeltéréssel szimulálható és statisztikus eloszlásuk megegyezik a mérésben tapasztalttal. [J7, J8]

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- J1) G. Erdei, N. Berze, Á. Péter, B. Játékos and E. Lőrincz, *Refractive index measurement of cerium-doped $\text{Lu}_2\text{Y}_2\text{-xSiO}_5$ single crystal*, Opt. Mater. 34 (2012) 781.
- J2) E. Gros D'Aillon, L. Maingault, L. André, V. Reboud, L. Verger, E. Charbon, C. Bruschini, C. Veerappan, D. Stoppa, N. Massari, M. Perenzoni, L. H. C. Braga, L. Gasparini, R. K. Henderson, R. Walker, S. East, L. Grant, B. Játékos, E. Lőrincz, F. Ujhelyi, G. Erdei, P. Major, Z. Papp, G. Nemeth, *First characterization of the SPADnet sensor: A digital silicon photomultiplier for PET applications*, J. Instrum 8 (2013) C12026.
- J3) E. Charbon, C. Bruschini, C. Veerappan, L. H. C. Braga, N. Massari, M. Perenzoni, L. Gasparini, D. Stoppa, R. Walker, A. Erdogan, R. K. Henderson, S. East, L. Grant, B. Játékos, F. Ujhelyi, G. Erdei, E. Lőrincz, L. André, L. Maingault, V. Reboud, L. Verger, E. Gros-d'Aillon, P. Major, Z. Papp, G. Németh, *SPADnet: Embedded coincidence in a smart sensor network for PET applications*, Nucl. Instrum. Methods A 734 (2014) 122.
- J4) E. Charbon, C. Bruschini, C. Veerappan, L. H. C. Braga, N. Massari, M. Perenzoni, L. Gasparini, D. Stoppa, R. Walker, A. Erdogan, R. K. Henderson, S. East, L. Grant, B. Játékos, F. Ujhelyi, G. Erdei, E. Lőrincz, L. André, L. Maingault, V. Reboud, L. Verger, E. G. d'Aillon, P. Major, Z. Papp, G. Németh, *SPADnet: A fully digital, scalable, and networked photonic component for time-of-flight PET applications*, Proc. SPIE 9129 (2014) 11.
- J5) B. Játékos, F. Ujhelyi, E. Lőrincz, G. Erdei, *Investigation of photon detection probability dependence of SPADnet-I digital photon counter as a function of angle of incidence, wavelength and polarization*, Nucl. Instrum. Methods A 769 (2015) 59.
- J6) B. Játékos, G. Erdei and E. Lorincz, *Simulation tool for optical design of PET detector modules including scintillator material and sensor array*, Proc. 2nd Inter. Conf. on Advanc. in Nucl. Instrum. (2011) 1.
- J7) B. Játékos, L. Gasparini, E. Lorincz and G. Erdei, *Validated simulation for $\text{LYSO}:\text{Ce}$ scintillator based PET detector modules built on fully digital SiPM arrays*, J. Instrum. 11 (2016) P03028.
- J8) B. Játékos, G. Patay, E. Lőrincz, G. Erdei, *Integrated optical and nuclear simulation of a monolithic $\text{LYSO}:\text{Ce}$ based PET detector module*, J. Instrum. 12 (2017) P05018.
- J9) B. Játékos, E. Lorincz, A. Barócsi and G. Erdei, *Gamma-photon equivalent UV excitation of $\text{LYSO}:\text{Ce}$ scintillator material*, J. Instrum. 10 (2015) P04007.

További, dolgozathoz kapcsolódó tudományos közlemények

- J10) B. Játékos, Z. Kolozsi, E. Lőrincz, F. Ujhelyi, A. Barócsi, G. Erdei, *Characterization of MRI-compatible PET detector modules by optical excitation of the scintillator material*, Proc. SPIE 8432 (2012) 10.
- J11) B. Játékos, Á. O. Kettinger, E. Lőrincz; F. Ujhelyi; G. Erdei, *Evaluation of light extraction from PET detector modules using gamma equivalent UV excitation*, IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. (2012) 3746.
- J12) B. Játékos, E. Lőrincz, F. Ujhelyi, G. Erdei, *High probability crystal pin identification in scintillator matrix-based PET detector with a prototype digital SiPM*, IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. (2013) 1.
- J13) E. Charbon, C. Bruschini, C. Veerappan, L. H. C. Braga, N. Massari, M. Perenzoni, L. Gasparini, D. Stoppa, R. Walker, A. Erdogan, R. K. Henderson, S. East, L. Grant, B. Játékos, F. Ujhelyi, G. Erdei, E. Lőrincz, L. André, L. Maingault, V. Reboud, L. Verger, E. G. d'Aillon, P. Major, Z. Papp, G. Németh, *Updates from the SPADnet project (fully digital, scalable and networked photonic component for Time-of-Flight PET applications)*, Proc. 3rd PSMR Conf. (2014) A11.

További tudományos közlemények

- J14) S. Kálvin, G. Anda, D. Dunai, G. Petravich, S. Zoletnik, G. Pokol, B. Játékos, I. Pusztai, D. Réfy, *Reconstruction of plasma edge density profile from Lithium beam data using statistical analysis*, 36th EPS Conf. Plasma Phys. (2009) 5.211.
- J15) J. A. Molins, B. Játékos, *Control system for a treadmill including a control unit and a lased distance sensor*, Patent Application US20170128784A1, Published, 11 May 2017.
- J16) B. Játékos, *Light source device, vehicular headlight, and manufacturing method of light source device*, Patent Application DE201610200582, Published, 27 July 2017.
- J17) B. Rösener, M. Busch, R. Kákonyi, B. Játékos, *An apparatus for emitting a laser beam and corresponding production method*, Patent Application DE102016207644A1, Published, 09 November 2017.
- J18) R. Kákonyi, B. Játékos, *MOEMS device and corresponding manufacturing method*, Patent Application DE102016208926A1, Published, 30 November 2017.
- J19) B. Játékos, B. Rösener, C. Ohl, D. Nesser, H-J. Faisst, J. Class, P. Tröbner, R. Kákonyi, T. Brückner, *Method and device for ascertaining the orientation of a drill relative to a plane*, Patent Application US2017361452A1, Published, 21 December 2017.
- J20) B. Játékos, *Vacuum cleaner*, Patent Application DE102016210939A1, Published, 21 December 2017.

- J21) B. Játékos, *System for preventing head injury, laser-based distance measuring device for attachment to headrest and method for preventing head injury*, Patent Application DE102016211985A1, Published, 4 January 2018.
- J22) C. Ohl, B. Játékos, B. Rösener, F.Grabmaier, *Light-emitting device and method for manufacturing a light emitting device*, Patent Application DE102016213001A1, Published, 18 January 2018.
- J23) D. Scholten, S. Pinter, I. Ramsteiner, R. Kákonyi, B. Játékos, *Particle sensor having at least two laser Doppler sensors*, Patent Application DE102016221989A1, Published, 9 May 2018.