

## طراحی و ساخت سیستم آشکارساز نوری حساس به مکان با استفاده از آرایه فوتودیود با قابلیت

### کنترل از راه دور

آرام، رادنیا\*؛ امیرحسین، فقهی؛ حمید، جعفری

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

#### چکیده:

تصویر برداری نوری یکی از روش‌های تشخیصی در پزشکی و صنعت می‌باشد که از آشکارساز دیجیتال آن می‌توان برای تصویر برداری ایکس، گاما و نوترون نیز بهره برد. در این کار با بکارگیری یک آرایه از فوتودیودهای مسطح با ویژگی‌های منحصر به فرد و ساخت یک برد کنترلی به منظور جمع‌آوری داده‌ها و ارسال آن به کامپیوتر، سیستم تصویربرداری نوری  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  طراحی و ساخته شد. درستی کارکرد این سیستم با استفاده از یک منبع نور مرئی و چند نمونه آزمایشی مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌ای از کاربرد این سیستم در ضخامت سنجی اجسام شفاف در مقابل نور مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همچنین این سیستم قابلیت کنترل از راه دور را نیز دارد.

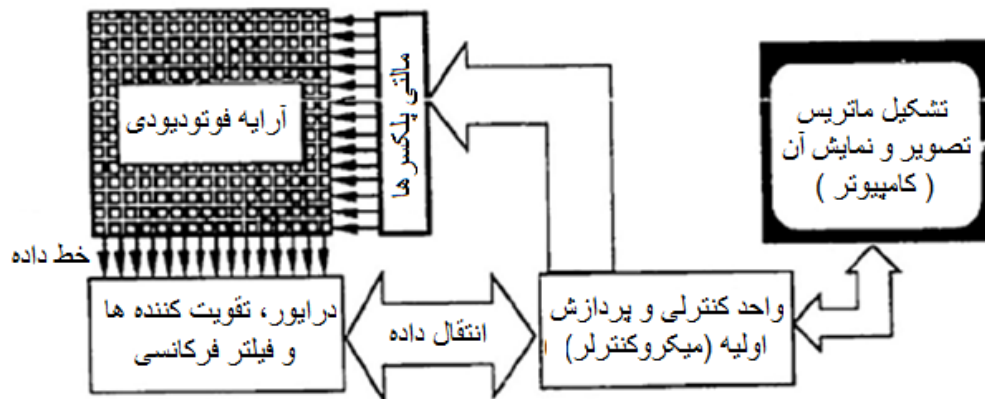
**کلید واژه -** فوتودیود، بازسازی تصویر، برد کنترلی، سیستم تصویر برداری نوری

#### مقدمه:

تصویربرداری پرتویی از کارآمدترین روش‌های تشخیصی در پزشکی و آزمون‌های غیرمخرب در کاربردهای صنعتی می‌باشد [۱،۲]. یک سیستم تصویر برداری دیجیتال پرتویی شامل دو جزء اصلی صفحه آشکارساز حساس به پرتو و برد کنترلی مورد نیاز می‌باشد. آشکارساز لازم برای تصویر برداری باید حساس به مکان باشد و این ویژگی با ایجاد آرایه‌ای از سنسورهای حساس به پرتو مورد نظر در هر مکان حاصل می‌شود [۳،۴]. در مواردی می‌تواند از یک سوسوزن حساس به پرتو برای تولید نور به همراه یک سنسور حساس به نور برای تولید یک پالس الکتریکی استفاده کرد.

یکی از پرکاربردترین و مدرن‌ترین سنسورهای حساس به نور، فوتودیود می‌باشد که فوتودیودها قطعات الکترونیکی از جنس نیمه رسانا هستند که می‌توانند در برخی کاربردها به عنوان جانشینی برای PMT برای تبدیل نور حاصل از سوسوزنی به جریان خروجی مورد استفاده قرار بگیرند. این آشکارسازها دارای مزایای متعددی نسبت به PMT از جمله بالاتر بودن بازده کوانتومی، قدرت تفکیک انرژی بالاتر، توان مصرفی کمتر و اندازه‌ی بسیار کوچکش می‌باشند. همچنین فوتودیودها مانند PMT حساس به میدان مغناطیسی نیستند و در محیط‌هایی که میدان مغناطیسی حضور دارد کاربردی‌تر خواهند بود. همچنین فوتودیودها دارای پاسخ زمانی کوتاهتری هستند و می‌توان از آنها برای کاربردهای زمان‌گیری و بهبود همزمان سازی استفاده کرد [۵].

می توان از کنار هم قراردادن فوتودیودها به صورت یک آرایه، یک صفحه آشکارسازی حساس به مکان بوجود آورد و از آن برای تولید تصویر استفاده کرد، برای طراحی سیستم در آشکارساز فوتودیودی نور تابش شده موجب ایجاد تپ ولتاژ متناسب با انرژی پرتو می شود و با جمع آوری این تپ های ولتاژ با تبدیل آنالوگ به دیجیتال، برای بازسازی تصویر و ترسیم رادیوگرافیکی به یک پردازشگر فرستاده می شود [۶، ۷].  
در این کار از سنسورهای فوتودیودی برای ساخت صفحه آشکارساز حساس به مکان استفاده شده است. در شکل ۱ نمایی از یک سیستم تصویربرداری نوری دیجیتال نشان داده شده است که در صفحه آشکارساز آن از یک آرایه فوتودیودی استفاده شده است. برد کنترلی آن نیز شامل درایور، تقویت کننده ها، مبدل آنالوگ به دیجیتال، فیلتر فرکانسی برای حذف نویز، کنترل از راه دور برای کار با پرتوهای پرخطر و میکروکنترلر برای آدرس دهی، فعال سازی به موقع فوتودیودها و ارسال داده ها به کامپیوتر می باشد.



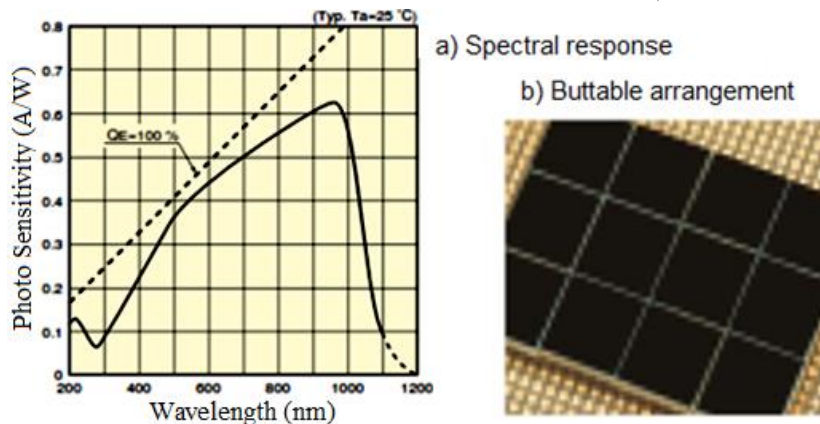
شکل ۱- نمایی از بلوک دیاگرام سیستم تصویربرداری نوری دیجیتال با آرایه فوتودیودی

### روش کار:

همان طور که اشاره شد آرایه فوتودیودی طراحی شده دارای ابعادی برابر با  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  می باشد. این آرایه شامل ۱۰۰ فوتودیود است که مربوط به شرکت هاماماتسو<sup>۱</sup> می باشد [۸]. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این فوتودیود دارای بازه گسترده حساسیت طول موجی (از ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر) و یکنواختی حساسیت در تمامی سطح آن می باشد. یکی دیگر از مزیت های مهم این فوتودیود داشتن حداقل فضای مرده در سطح حساس خود است که باعث قرار گرفتن آن ها بصورت آرایه ای در کنار یکدیگر می باشد.  
درایور مربوط به این فوتودیودها شامل ۱۶ کانال می باشد یعنی در هر لحظه تنها ۱۶ فوتودیود شامل ۱۶ کانال را بطور هم زمان تغذیه می کند. بدین خاطر از مالتی پلکسر برای تعویض ولتاژ معکوس مورد نیاز از درایور به تمامی آرایه ی فوتودیودی استفاده کردیم. مالتی پلکسرهای آنالوگ انتخابی باید دارای کمترین مقاومت داخلی، بیشترین سرعت سوئیچ زنی و حداقل دارای ۱۰ کانال ورودی باشد. مالتی پلکسر استفاده شده دارای مقاومت

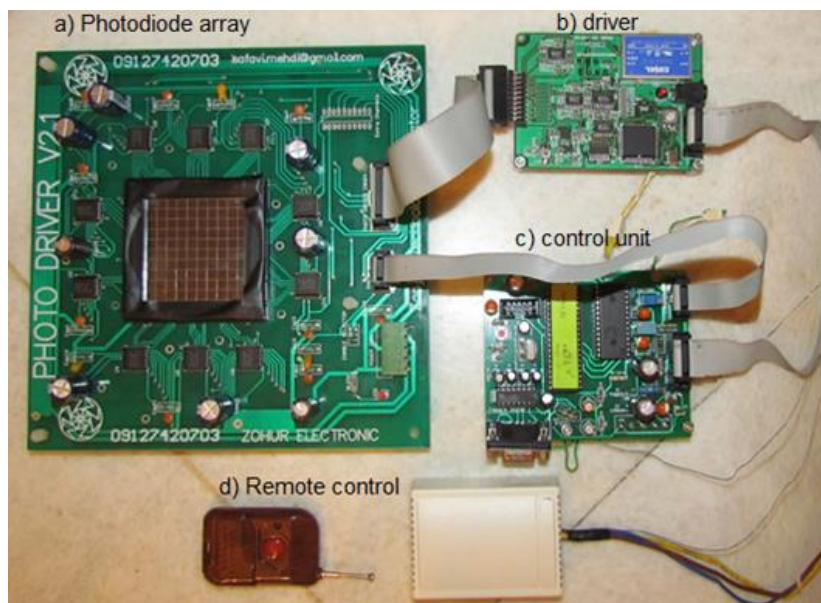
<sup>۱</sup> HAMAMATSU

داخلی ۸۰ اهم و سوییچزنی سریع ( $t_{on-off} < 160ns$ ) و ۱۶ کانال ورودی می باشد. آدرس دهی برای این مالتی پلکسرها بطور موازی انجام می گیرد.



شکل ۲: نمایی از فوتودیود استفاده شده در شبکه فوتودیودی. (a) تابع پاسخ این نوع فوتودیود. (b) چیدمان آرایه ای از این فوتودیودها [۸].

خروجی مالتی پلکسرها توسط یک کابل تخت به کانکتور ورودی درایور وارد می شود. بدین صورت در هر لحظه، ۱۰ فوتودیودی که در خروجی مالتی پلکسرها قرار می گیرند، درایو شده و سیگنال آن ها تقویت و شکل دهی می شود و نهایتاً بصورت سری یعنی ۱۰ سیگنال پشت سر هم تبدیل می شود. خروجی کابل تختی برای اعمال فیلترینگ نویز و تبدیل آنالوگ به دیجیتال به برد جداگانه ای انتقال می یابد. این برد شامل فیلتر فرکانسی، مبدل آنالوگ به دیجیتال، با یک میکروکنترلر و خروجی پورت سریال برای انتقال داده های دیجیتال شده به یک کامپیوتر می باشد. نمایی از این بردهای طراحی و ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



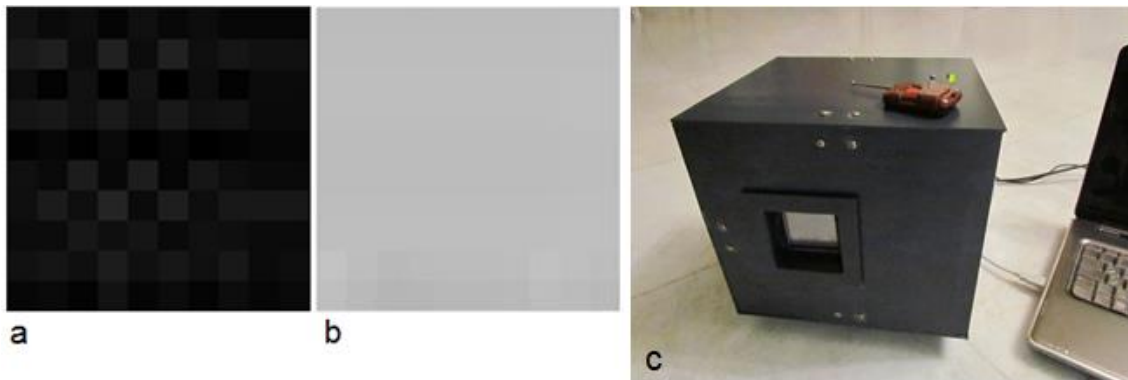
شکل ۳: (a) برد حسگر شامل شبکه فوتودیودی و مالتی پلکسرها. (b) درایور. (c) برد کنترلر برای فیلتر فرکانسی، مبدل A/D، میکروکنترلر و پورت سریال خروجی. (d) کنترل از راه دور.



خروجی درایور پس از ورود به برد، ابتدا توسط فیلتر فرکانسی پایین گذر فیلتر می‌شود. برای حذف نویز باید فرکانس‌های بالای ۲ برابر فرکانس نمونه برداری حذف شوند. سپس سیگنال وارد مبدل A/D پرسرعت متناسب با رنج فرکانسی شده و بعد خروجی‌های دیجیتال به ورودی‌های میکروکنترلر وارد می‌شوند. میکروکنترلر استفاده شده از نوع AVR (ATMEGA۳۲) با کریستال خارجی ۱۶ مگاهرتز می‌باشد که علاوه بر گرفتن خروجی‌های دیجیتال شده‌ی مبدل A/D و انجام پردازش ابتدایی بر روی داده‌ها برای فرستادن آن‌ها به کامپیوتر، عمل آدرس‌دهی به مالتی‌پلکسرها را نیز انجام می‌دهد. نرم‌افزاری که در اینجا برای پردازش داده‌ها در کامپیوتر مورد استفاده قرار دادیم، نرم‌افزار محاسباتی و پر قدرت Matlab است.

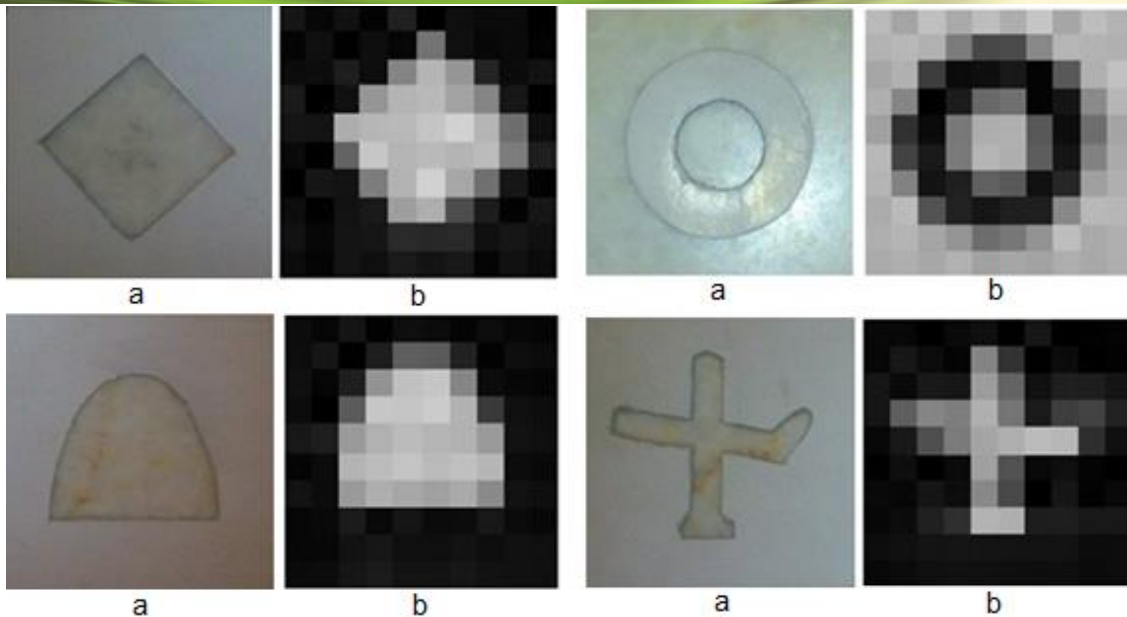
### نتایج:

برای بررسی درستی کارکرد این سیستم تصویربرداری ساخته شده از یک منبع نور مرئی و چندین جسم نمونه با اشکال مختلف استفاده شده است. ابتدا می‌بایست در نبود نور جریان تاریکی پیکسل‌ها را بدست آورده، سپس در تصویر برداری‌های بعدی این مقادیر را از مقادیر متناظر پیکسل‌ها کم کنیم و سپس ماتریس تصویر را تشکیل دهیم. برای چشمه نور با شدت یکنواخت در تمام سطح شبکه فوتودیودی از یک ویدیو پروژکتور استفاده شده است. در شکل شماره ۴ نمایی از سیستم طراحی شده، تصویر حاصل از جریان تاریکی و منبع نور را مشاهده می‌کنید.



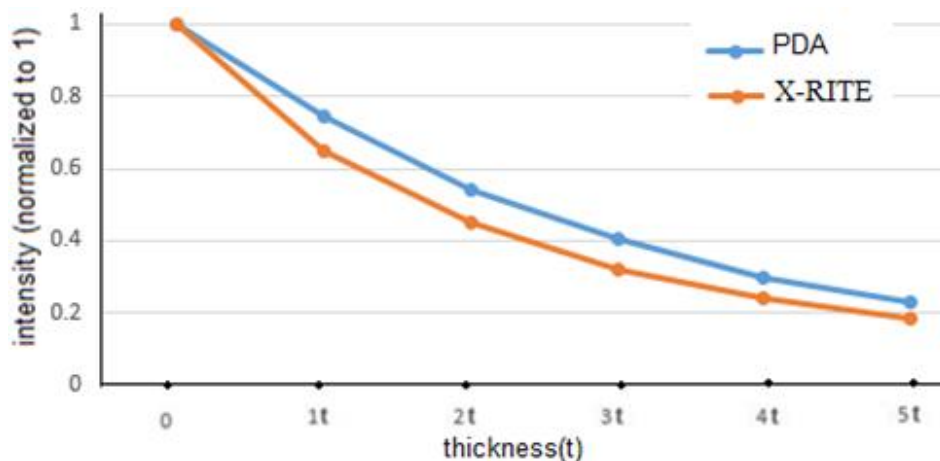
شکل ۴: (a) تصویر حاصل از جریان تاریکی پیکسل‌ها. (b) تصویر حاصل از منبع نور پس از کم کردن جریان تاریکی از آن. (c) سیستم نهایی تصویر برداری نوری

چندین نمونه‌ی آزمایشی مختلف با انحنای متفاوت به همراه تصویر در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به قدرت تفکیک سیستم، اشکال با انحنای و شکستگی‌های متفاوت قابل تشخیص می‌باشند، نمونه‌های با ضخامت و ابعاد بزرگتر بهتر قابل تشخیص بوده و نقاط باریک در تصویر محو می‌شوند.



شکل ۵: (a) نمونه آزمایشی، (b) تصاویر گرفته شده از نمونه‌های مختلف

از این سیستم می‌توان برای تعیین ضخامت اجسام شفاف در برابر نور نیز استفاده کرد. برای ضخامت سنجی ابتدا باید با قرار دادن نمونه با ضخامت‌های مشخص، منحنی تغییرات تابش به ازای تغییرات ضخامت جسم آن را بدست آورد (شدت تابش با عدد سطح خاکستری جسم متناسب است) این کار برای کالیبراسیون سیستم است تا سپس با قرار دادن ضخامت مجهول در مقابل سیستم تصویر برداری، از میزان سطح خاکستری آن و انطباق آن با نمودار ضخامت آن را درونیابی کرد. شکل ۶ منحنی شدت نرمالیزه شده به رنج قابل تشخیص سیستم است برای یک نمونه شفاف بدست آمده است.



شکل ۶: منحنی تغییرات شدت نور دریافتی با تغییرات ضخامت بر حسب  $t$  ( $t=0, 1, 2, 3, 4, 5$ ) برای آشکارساز

فوتودیود طراحی شده و دستگاه دانسیتومتری X-RITE

ضریب تضعیف خطی بدست آمده از این منحنی  $1/66 \text{ mm}^{-1}$  می‌باشد که برای اعتبار سنجی مقدار آن را با مقدار بدست آمده توسط دستگاه دانسیتومتری X-RITE ( $1/76 \text{ mm}^{-1}$ ) مقایسه کردیم، همان‌طور که مشاهده



می‌کنید اختلاف نسبی ۵/۶٪ دارند، این اختلاف اندک می‌تواند ناشی از منابع نوری مختلف و نوبزهای متفاوت دو سیستم باشد.

### بحث و نتیجه‌گیری:

در این کار یک سیستم تصویر برداری نوری دیجیتال با استفاده از آشکارساز شبکه فوتودیودی طراحی و ساخته شد. در این سیستم برای آشکارسازی حساس به مکان نور از فوتودیودهایی به ابعاد ۵×۵ mm در یک آرایه‌ی ۱۰×۱۰ استفاده شده‌است و تمامی مدارها و بردهای الکترونیکی لازم، طراحی و ساخته شدند. درستی کارکرد این سیستم با قدرت تفکیک ۵ mm با استفاده از یک منبع نور مرئی و چندین نمونه آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه قدرت تفکیک فضایی برای این سیستم در حد اندازه هر پیکسل از صفحه‌ی آشکارساز، یعنی در حد ۵ mm می‌باشد، انتظار آن می‌رفت که تنها ابعاد کلی از این نمونه‌ها قابل مشاهده باشد و برای افزایش قدرت تفکیک یا باید از نظر سخت افزاری شبکه‌ی آشکارسازی با قدرت تفکیک بالاتر و پیکسل‌بندی ریزتری ساخت و یا به روش پردازش تصویر، برخی جزئیات را از این تصاویر درون‌یابی کرده و با هزینه بسیار کمتر قدرت تفکیک را افزایش داد. همچنین درستی عملکرد آن برای ضخامت سنجی مورد بررسی قرار گرفت. می‌توان با اضافه کردن یک صفحه سوسوزن به آرایه حساس فوتودیودی، از این سیستم برای تصویربرداری با استفاده از پرتوهای ایکس و گاما و یا نوترون‌ها نیز استفاده کرد.

### مراجع:

- [۱]. Bushberg, J. Anthony; Leidhold Jr., Edwin M.; Boone, John M. (۲۰۰۱), The Essential Physics of Medical Imaging (۲nd ed.), Lippincott Williams & Wilkins
- [۲]. U. Ewert, H. Heidt, Current Status of European Radiological Standards for NDT, ASNT spring conference and IIW micro symposium, Orlando, ۰۳/۲۲-۰۳/۲۷, ۱۹۹۹, proceedings p. ۱۷۱-۱۷۳.
- [۳]. Anssi Makynen: Position-Sensitive Devices and Sensor Systems for optical Tracking and Displacement sensing application dissertation, Faculty of Technology, University of Oulu, ۲۰۰۰.
- [۴]. Henrik Andersson, Position sensitive detectors: device technology and applications in spectroscopy. Dissertation, department of information technology and media, mid sweden university, sundsvall, sweden, ۲۰۰۸.
- [۵]. R.Farrell, F.Olschner, E.Fredrick, L.McConchie, K.Vanderpuye, M. R. Squillante, and G. Enline, "Large area silicon avalanche photodiodes for scintillation detectors", Nucl. Instrum. Meth., vol. A۲۸۸, pp.۱۳۷, ۱۹۹۰.
- [۶]. R. A. Street, S. Nelson, L. E. Antonuk and V.Perez Mendez, "Amorphous silicon sensor arrays for radiation imaging", Mat. Res. Soc.Sym. Proc., vol. ۱۹۲, pp. ۱۹۲-۱۹۶, ۱۹۹۰.
- [۷]. L. E. Anlonuk, J. Yorkston, C.W. Kim, W.Huang, E.J. Morton, M.J. Longo, and R. A. street, "Light response characteristics of amorphous silicon arrays for megavoltage and diagnostic imaging", Mat. Res. Soc. Sym. Proc., vol. ۲۱۹, pp. ۵۳۱-۵۳۶
- [۸]. <http://www.hamamatsu.com>