



آشکارساز صفحه تخت (Flat Panel Detector)

از مبانی فیزیکی تابش تا کاربردهای پیشرفته در تصویربرداری پزشکی

چکیده	۱
مقدمه	۲
۱. مبانی فیزیکی تابش پرتو ایکس	۳
۲. سازوکار آشکارساز فلت پنل: اجزا، خوانش و پردازش تصویر	۵
۳. کاربردهای واقعی آشکارساز فلت پنل	۹
جمع بندی	۱۳
پرسش های متداول	۱۴
منابع	۱۵

چکیده

- پرتو ایکس زمانی تولید می‌شود که الکترون‌های پرسرعت به هدف آند برخورد کنند. طیف آن از تابش مشخصه و تابش ترمزی تشکیل می‌شود.
- تضعیف پرتو در بدن بیمار نتیجه‌ی پراکندگی کلاسیک، پراکندگی کامپتون و جذب فوتوالکتریک است.
- آشکارساز فلت‌پنل از یک ماتریس فعال با پیکسل‌های ترانزیستور لایه‌نازک (Thin-Film Transistor | TFT) ساخته می‌شود و در دو نوع تبدیل مستقیم و تبدیل غیرمستقیم وجود دارد.
- خوانش بار الکتریکی، تصحیح فلت‌فیلد و پردازش تصویر، داده‌ی خام را به تصویر قابل تفسیر تبدیل می‌کنند.
- این آشکارساز در رادیوگرافی عمومی، توموگرافی کامپیوتری پرتو مخروطی (Cone-Beam CT | CBCT) و آزمون غیرمخرب (Non-Destructive Testing | NDT) کاربرد دارد. در توموگرافی کامپیوتری (CT) ماریپیچی چندردیفه و تصویربرداری دینامیک پرسرعت محدودیت‌هایی دارد.

مقدمه

آشکارساز فلت پنل (Flat Panel Detector | FPD) پرتو ایکس را با آرایه‌ای از پیکسل‌های کنترل‌شده‌ی الکتریکی به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌کند. این فناوری در رادیوگرافی دیجیتال (Digital Radiography | DR) در بسیاری از کاربردها جای فیلم‌های سنتی و رادیوگرافی کامپیوتری (Computed Radiography | CR) را گرفته است. برای فهمیدن نحوه‌ی کار آن باید ابتدا تولید پرتو ایکس و برهم‌کنش آن با ماده را بشناسیم. این مقاله از مبانی فیزیکی تابش شروع می‌کند و به ساختار، انواع، خوانش، پردازش تصویر، کیفیت تصویر و کاربردهای آشکارساز فلت پنل می‌رسد.

۱. مبانی فیزیکی تابش پرتو ایکس

برای فهمیدن کار آشکارساز فلت پنل باید با تولید پرتو ایکس، برهم کنش آن با ماده و مفهوم تضعیف آشنا باشیم. این مبانی پیش نیاز درک فرایندهایی هستند که درون آشکارساز رخ می دهند.

تولید پرتو ایکس

پرتو ایکس زمانی تولید می شود که الکترون های پرسرعت به یک هدف برخورد کنند. در تصویربرداری پرتو ایکس، این اتفاق در تیوب پرتو ایکس رخ می دهد. اجزای اصلی تیوب شامل مجموعه ی کاتد و مجموعه ی آنود است. دو نوع تیوب پرتو ایکس وجود دارد: آنود ثابت و آنود چرخان. تیوب های آنود چرخان دو اندازه ی فوکال اسپات (Focal Spot) دارند، بزرگ و کوچک. فوکال اسپات کوچک به تولید تصاویر واضح کمک می کند و فوکال اسپات بزرگ برای بیماران بزرگ تر و معاینه های پیچیده تر استفاده می شود.

تابش مشخصه

تابش مشخصه زمانی تولید می شود که الکترون های پرسرعت فیلامان با الکترون های لایه ی داخلی اتم های هدف آنود برهم کنش کنند. اگر انرژی الکترون فرودی از انرژی پیوند الکترون لایه ی داخلی بیشتر باشد، آن الکترون از اتم جدا می شود و جای خالی ایجاد می شود.

الکترونی از سطح انرژی بالاتر این جای خالی را پر می کند و هنگام پایین آمدن، انرژی اضافی را به شکل یک فوتون پرتو ایکس آزاد می کند. این پدیده تابش مشخصه نام دارد. پرتو ایکس مشخصه در رادیوگرافی بافت نرم، مثل ماموگرافی پرتو ایکس، بهترین کاربرد را دارد.

تابش ترمزی (Bremsstrahlung)

تابش ترمزی زمانی رخ می‌دهد که یک الکترون پرسرعت با میدان هسته‌ای اتم‌های هدف برهم‌کنش می‌کند و در این فرایند کند می‌شود. محدوده‌ی انرژی این تابش گسترده است. همین ویژگی برای تصویربرداری از بیشتر اعضای بدن در تصویربرداری تشخیصی پرتو ایکس مفید است.

تضعیف پرتو ایکس

تضعیف، کاهش شدت پرتو ایکس هنگام عبور از بیمار است و نتیجه‌ی برهم‌کنش فوتون‌های پرتو ایکس با بافت‌های بیمار است. برای فهمیدن تضعیف باید سه پارامتر را بشناسیم: ضریب تضعیف خطی، ضریب تضعیف جرمی و لایه‌ی نیم‌مقدار.

برهم‌کنش پرتو ایکس تشخیصی با ماده

وقتی پرتو ایکس به بیمار می‌تابد، برخی فوتون‌ها جذب می‌شوند، برخی پراکنده می‌شوند و برخی از بیمار عبور می‌کنند و به گیرنده‌ی تصویر می‌رسند تا تصویر ساخته شود. سه برهم‌کنش در تصویربرداری تشخیصی اهمیت دارند: پراکندگی کلاسیک، پراکندگی کامپتون و جذب فوتوالکتریک.

سازوکار آشکارساز فلت پنل: اجزا، خوانش و پردازش تصویر

۲. سازوکار آشکارساز فلت پنل: اجزا، خوانش و پردازش تصویر

چرا آشکارساز فلت پنل مطرح شد؟

رادیوگرافی کامپیوتری (CR) محدودیتهایی دارد: بازده تشخیص پایین تر، وضوح فضایی (Spatial Resolution) کمتر و صفحات تصویربرداری (Imaging Plate | IP) که با افتادن تصادفی آسیب می بینند، ترک می خورند یا خراش برمی دارند. این محدودیت ها انگیزه ی توسعه ی آشکارسازهای دیجیتال فلت پنل برای رادیوگرافی دیجیتال شدند.

اجزای سامانه ی رادیوگرافی دیجیتال فلت پنل

سامانه ی رادیوگرافی دیجیتال فلت پنل (Flat-Panel Digital Radiography | FPD) چهار جزء اصلی دارد: تیوب و ژنراتور پرتو ایکس، آشکارساز فلت پنل (FPD)، کامپیوتر میزبان و مانیتور نمایش تصویر. کامپیوتر میزبان و مانیتور بخشی از ایستگاه کاری FPD هستند.

کامپیوتر میزبان ارتباط اپراتور را با تیوب، ژنراتور و سایر اجزا برقرار می کند و با FPD هم تعامل دارد. برای مثال، تولید پرتو ایکس و خوانش سیگنال را همین کامپیوتر کنترل می کند. این کامپیوتر در پردازش تصویر، مثل تصحیح تصویر و بهینه سازی نمایش، نقش عمده ای دارد.

آشکارساز فلت پنل و ماتریس فعال

FPD یک واحد منفرد و نازک است. این واحد شامل آشکارساز ماتریس فعال (Active Matrix Array) و الکترونیک مرتبط با آن است: پیش تقویت کننده ها، کنترل سوئیچینگ، مدارهای منطقی مرکزی، مبدل های آنالوگ به دیجیتال (ADC) و حافظه ی داخلی.

سازوکار آشکارساز فلت پنل: اجزا، خوانش و پردازش تصویر

آشکارساز ماتریس فعال تابش عبوری از بیمار را در حین تصویربرداری تشخیص می‌دهد. همچنین سیگنال الکترونیکی خروجی آشکارساز را دیجیتالی می‌کند.

FPD در اندازه‌های مختلفی برای بدن‌هایی با اندازه‌های متفاوت موجود است. ابعاد رایج آن 43×43 ، 40×30 و 18×18 سانتی‌متر است. اندازه‌ی ماتریس فعال هم با اندازه‌ی آشکارساز تغییر می‌کند.

اندازه‌های رایج ماتریس فعال عبارت‌اند از 1536×1920 ، 2500×2000 ، 2736×2736 ، 3072×2560 ، 2688×2688 ، 2336×2836 و 3121×3121 .

اندازه‌ی پیکسل و گام پیکسل (Pixel Pitch)، یعنی فاصله‌ی نقطه‌ی میانی یک پیکسل تا نقطه‌ی میانی پیکسل مجاور، مشخصه‌های مهم ماتریس هستند، چون بر وضوح فضایی تصویر اثر می‌گذارند. تعداد پیکسل‌ها از ابعاد ماتریس به دست می‌آید؛ برای مثال ماتریس 3000×3000 برابر ۹,۰۰۰,۰۰۰ پیکسل دارد.

اندازه‌ی پیکسل از یک سازنده به سازنده‌ی دیگر فرق می‌کند. مقادیر رایج آن ۲۰۰، ۱۶۷، ۱۶۰، ۱۴۳ و ۱۳۹ میکرومتر است.

ضریب پرشدگی (Fill Factor)

هر پیکسل ماتریس فعال از سه جزء الکترونیکی ساخته می‌شود: ترانزیستور لایه‌نازک (TFT)، خازن و ناحیه‌ی حس‌کننده‌ی تابش. از همین اجزا ضریب پرشدگی تعریف می‌شود. ضریب پرشدگی نسبت مساحت ناحیه‌ی حس‌کننده‌ی پیکسل به مساحت کل پیکسل است و می‌توان آن را به صورت درصد نوشت. برای مثال، ضریب پرشدگی ۸۰٪ یعنی ۲۰٪ مساحت پیکسل را الکترونیک آشکارساز اشغال کرده و ۸۰٪ ناحیه‌ی حس‌کننده است.

ضریب پرشدگی بر کیفیت تصویر آشکارساز اثر می‌گذارد؛ هم بر وضوح فضایی و هم بر وضوح کنتراست (Contrast Resolution) که به نسبت سیگنال به نویز (Signal-to-Noise Ratio | SNR) مربوط است. ضریب پرشدگی بالا نسبت به ضریب پرشدگی پایین، کیفیت تصویر بهتری می‌دهد.

سازوکار آشکارساز فلت پنل: اجزا، خوانش و پردازش تصویر

فرایند خوانش (Readout)

پس از آنکه آشکارساز فوتون‌های پرتو ایکس را جذب و به بار الکتریکی تبدیل کرد، باید بار پیکسل‌ها به صورت سیستماتیک خوانده شود تا تصویر دیجیتال ساخته شود. خوانش هشت مرحله دارد:

۱. ذخیره‌ی بار در پیکسل‌ها: وقتی پرتو ایکس به آشکارساز می‌رسد، در هر پیکسل باری متناسب با شدت تابش دریافتی تولید می‌شود. این بار در خازن ذخیره‌سازی همان پیکسل جمع می‌شود.
۲. آماده‌سازی برای خوانش: پس از پایان مواجهه، خوانش شروع می‌شود. الکترونیک کنترل، سیگنال‌های لازم را به آرایه‌ی TFT می‌فرستد.
۳. آدرس‌دهی سطرها: آرایه‌ی TFT مثل شبکه‌ای از سطر و ستون عمل می‌کند. درایور گیت (یا مالتی‌پلکسر سطر) سطرها را یکی‌یکی فعال می‌کند و با اعمال ولتاژ روشن به خط گیت هر سطر، تمام TFT‌های آن سطر روشن می‌شوند.
۴. انتقال بار به خطوط داده: با روشن شدن TFT هر پیکسل در سطر فعال، بار ذخیره‌شده در خازن آن پیکسل از راه TFT به خط داده‌ی ستون مربوط می‌رود. بار همه‌ی پیکسل‌های یک سطر به صورت موازی منتقل می‌شود.
۵. تقویت سیگنال: سیگنال‌های آنالوگ بسیار ضعیف‌اند. پیش‌تقویت‌کننده‌ها (Preamplifiers) در الکترونیک خوانش، آن‌ها را تقویت می‌کنند تا قابل پردازش شوند.
۶. تبدیل آنالوگ به دیجیتال: مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) سیگنال‌های تقویت‌شده را به داده‌ی دیجیتال تبدیل می‌کند. دامنه‌ی دینامیکی ADC دست‌کم ۱۴ بیت (ترجیحاً ۱۶ بیت) است که دقت بالایی در تبدیل می‌دهد.
۷. تکرار برای همه‌ی سطرها: مراحل ۳ تا ۶ برای همه‌ی سطرها، آرایه به صورت متوالی تکرار می‌شود. این کار به سرعت انجام می‌شود و تصویر در چند ثانیه آماده می‌شود.
۸. ارسال داده به کامپیوتر میزبان: داده‌های دیجیتال به کامپیوتر میزبان فرستاده می‌شوند. این کامپیوتر پردازش تصویر، مثل تصحیح و بهینه‌سازی نمایش، را انجام می‌دهد.

سازوکار آشکارساز فلت پنل: اجزا، خوانش و پردازش تصویر

پردازش تصویر

سامانه‌های تصویربرداری دیجیتال پرتو ایکس از پردازش تصویر دو هدف دارند: تصحیح داده‌های خام آشکارساز و بهینه‌سازی تصویری که برای تفسیر به ناظر نشان داده می‌شود. هدف اول، کاهش آرتیفکت‌ها، با پیش‌پردازش انجام می‌شود. هدف دوم، افزایش کنتراست و وضوح و کاهش نویز، با پس‌پردازش انجام می‌شود. داده‌ی خام پس از پیش‌پردازش، تصویر برای پردازش (For Processing) در قالب استاندارد Digital Imaging and Communications in Medicine است. پس‌پردازش این تصویر را به تصویر برای ارائه (For Presentation) تبدیل می‌کند.

پیش‌پردازش تصویر

ممکن است برخی عناصر آشکارساز فعال نباشند یا طبق انتظار کار نکنند. این مسئله آرتیفکت‌هایی مثل پیکسل‌های مرده یا معیوب و حتی یک ستون کامل پیکسل معیوب ایجاد می‌کند. پیش‌پردازش این مشکل را با ابزار نرم‌افزاری تخصصی تصحیح فلت‌فیلد (Flat-Field Correction) برطرف می‌کند. این تصحیح بخش اجباری کالیبراسیون آشکارساز است و یکپارچگی عملکرد آن را تضمین می‌کند.

پس‌پردازش تصویر

دامنه‌ی وسیع مواجهه در آشکارساز دیجیتال، تصویر اولیه‌ای با کنتراست ضعیف می‌سازد. این تصویر همان تصویر برای پردازش است و برای مشاهده و تفسیر ارائه نمی‌شود. پس‌پردازش آن را به تصویر برای ارائه تبدیل می‌کند که رادیولوژیست می‌بیند. مراحل رسیدن به تصویر «برای ارائه» عبارت‌اند از تشخیص و قطعه‌بندی مواجهه، تحلیل هیستوگرام، مقیاس‌بندی هیستوگرام و پردازش برای افزایش کنتراست. تصویر نمایش داده‌شده را می‌توان با فرکانس‌های فضایی بیشتر پس‌پردازش کرد تا جزئیات و وضوح بیشتر و نویز کمتر شود. فرکانس‌های بالا جزئیات ریز تصویر را دارند و فرکانس‌های پایین اطلاعات کنتراست را. فیلتر بالاگذر فرکانس‌های پایین را سرکوب می‌کند و تصویر را تیزتر می‌کند. فیلتر پایین‌گذر فرکانس‌های بالا را سرکوب می‌کند و تصویر را صاف‌تر می‌کند.

۳. کاربردهای واقعی آشکارساز فلت پنل

آشکارسازهای فلت پنل به دلیل دقت بالا، سرعت تصویربرداری، قابلیت تصویربرداری بلادرنگ و توانایی تولید تصاویر دیجیتال باکیفیت، در کاربردهای گسترده‌ای استفاده می‌شوند.

کاربردهای پزشکی و بالینی

این آشکارساز در کاربردهای پزشکی زیر استفاده می‌شود:

- رادیوگرافی عمومی: رایج‌ترین کاربرد این آشکارساز رادیوگرافی عمومی است و برای تصویربرداری از قفسه‌ی سینه، استخوان‌ها، اندام‌ها و مفاصل استفاده می‌شود. در این کاربرد، مزیت‌هایی نسبت به سامانه‌های فیلم‌صفحه و سایر دستگاه‌های رادیوگرافی دیجیتال نشان داده است.
- ماموگرافی: آشکارسازهای فلت پنل با وضوح بالا برای تشخیص دقیق بافت پستان استفاده می‌شوند. در ماموگرافی، آشکارسازهای دولایه برای ماموگرافی کنتراست‌افزوده (Contrast-Enhanced Digital Mammography | CEDM) و توموسنتز دیجیتال پستان کنتراست‌افزوده (CEDBT) توسعه یافته‌اند تا ضایعات را دقیق‌تر تشخیص دهند.
- فلوروسکپی و آنژیوگرافی: این دو از کاربردهای دینامیک آشکارساز فلت پنل هستند. قابلیت تصویربرداری بلادرنگ، مشاهده‌ی حرکت‌های داخلی بدن و هدایت کاتترها در حین عمل را ممکن می‌کند.
- CBCT: دستگاه‌های CBCT مدرن با آشکارساز فلت پنل دیجیتال و منبع پرتو ایکس مخروطی ساخته می‌شوند. این سامانه‌ها در هدایت رادیوتراپی، جراحی هدایت‌شده با تصویر و تصویربرداری از اندام‌های انتهایی استفاده می‌شوند.
- CT حجمی (fpVCT): در این سامانه‌ها یک آشکارساز فلت پنل دوبعدی 40×30 سانتی‌متر به کار می‌رود.
- تصویربرداری دندان: تیوب‌های پرتو ایکس آند ثابت در واحدهای فلوروسکپی دندان با آشکارسازهای فلت پنل کوچک ترکیب می‌شوند تا تصاویر دیجیتال باکیفیتی از دندان‌ها و فک بدهند.

کاربردهای واقعی آشکارساز فلت پنل

- سامانه‌های قابل حمل (سیار): آشکارسازهای فلت پنل بی‌سیم و سبک برای تصویربرداری در بالین بیمار یا بخش مراقبت‌های ویژه (ICU) مناسب‌اند.
- تصویربرداری اطفال: آشکارسازهای فلت پنل با سوسوزن CsI برای تصویربرداری از بیماران اطفال استفاده می‌شوند. این آشکارسازها به دلیل حساسیت بالا و امکان تصویربرداری با دوز کمتر، برای کودکان مناسب‌ترند.
- تصویربرداری مداخله‌ای: سامانه‌های C-Arm مدرن اغلب با CBCT مبتنی بر فلت پنل تجهیز می‌شوند. این کار تصویربرداری توموگرافی و حجمی با وضوح فضایی بالا از ابزارهای مداخله‌ای و عروق پر شده با ماده‌ی کنتراست یددار را ممکن می‌کند.

کاربردهای صنعتی (آزمون غیرمخرب)

در صنعت، آشکارساز فلت پنل برای بازرسی و کنترل کیفیت بدون آسیب رساندن به قطعه استفاده می‌شود:

- بازرسی قطعات الکترونیکی: تشخیص عیوب در بردهای مدار چاپی.
- صنایع هوافضا: بررسی ترک‌های داخلی و خوردگی در قطعات هواپیما.
- نفت، گاز و خطوط لوله: بازرسی خوردگی اتصالات لوله‌ها.
- صنایع غذایی: بررسی عیوب داخلی مواد نرم با پرتوی ایکس نرم.
- پرتونگاری صنعتی: بازرسی قطعات ریخته‌گری و جوش‌ها.

کاربردهای امنیتی و ایمنی

این آشکارساز در دو کاربرد امنیتی استفاده می‌شود:

- اسکن بار و چمدان در فرودگاه‌ها: شناسایی مواد ممنوعه و مواد منفجره.
- بازرسی افراد: اسکن و شناسایی اشیای پنهان روی بدن یا لباس.

کاربردهای علمی و تحقیقاتی

در پژوهش، این آشکارساز کاربردهای زیر را دارد:

- تصویربرداری علمی: تصویربرداری از نمونه‌های بیولوژیکی و مواد.
- کریستالوگرافی: تعیین ساختار مولکولی کریستال‌ها.

مزایا

آشکارساز فلت پنل این مزیت‌ها را دارد:

- کاهش دوز پرتو: حساسیت بالا می‌تواند تصویربرداری با دوز کمتر را ممکن کند.
- تصویربرداری بلادرنگ: تصویر تقریباً بلافاصله قابل مشاهده و تحلیل است.
- کیفیت تصویر بالا: دامنه‌ی دینامیکی بزرگ، حساسیت بالا و تصاویر بدون اعوجاج.
- قابلیت حمل: آشکارسازهای سبک و بی‌سیم، بازرسی در محل را ممکن کرده‌اند.
- گردش کار بهتر: تصویر فوراً در دسترس است و پردازش فیلم لازم نیست.

محدودیت‌ها

آشکارساز فلت پنل در برخی کاربردها محدودیت دارد:

- CT ماریپچی چندردیفه (Multi-Detector CT | MDCT): به دلیل پاسخ کندتر سوسوزن CsI و بازده کوانتومی پایین‌تر، آشکارساز فلت پنل در CT استاندارد توصیه نمی‌شود.
- تصویربرداری دینامیک پرسرعت: وضوح زمانی محدود آشکارسازهای CsI ممکن است در برخی کاربردهای دینامیک مشکل ایجاد کند.

نکات مهم و کاربردی

این نکته‌ها هنگام انتخاب و استفاده از آشکارساز فلت پنل مهم‌اند:

- ضریب پرشدگی و اندازه‌ی پیکسل را هنگام انتخاب آشکارساز در نظر بگیرید؛ هر دو بر وضوح و کیفیت تصویر اثر می‌گذارند.
- تصحیح فلت‌فیلد را بخش اجباری کالیبراسیون آشکارساز بدانید تا عملکرد آشکارساز یکپارچه بماند.
- تصویر برای پردازش برای تفسیر ارائه نمی‌شود؛ رادیولوژیست تصویر برای ارائه را می‌بیند.
- برای رادیوگرافی عمومی معمولاً سوسوزن GOS و برای تصویربرداری اطفال سوسوزن CsI به کار می‌رود.
- پیش از استفاده در CT ماریپچی چندردیفه یا تصویربرداری دینامیک پرسرعت، محدودیت‌های آشکارساز را بررسی کنید.

جمع بندی

آشکارساز فلت پنل پرتو ایکس عبوری از بیمار را با ماتریس فعال و پیکسل های TFT به بار الکتریکی و سپس به تصویر دیجیتال تبدیل می کند. این کار در دو نوع تبدیل غیرمستقیم (با سوسوزن) و تبدیل مستقیم (با فوتورسانا) انجام می شود. خوانش، تصحیح فلت فیلد و پردازش تصویر، داده ی خام را به تصویر قابل تفسیر تبدیل می کنند.

این آشکارساز از رادیوگرافی عمومی تا CBCT و آزمون غیرمخرب کاربرد دارد، اما در CT ماریپیچی چندردیفه و تصویربرداری دینامیک پرسرعت محدودیت هایی دارد. اگر می خواهید درباره ی DQE، MTF، بهره (Gain) و افسست (Offset) بیشتر بدانید، پست های واژه نامه ی پرتو ایکس را بخوانید.

پرسش‌های متداول

ضریب پرشدگی چیست؟

ضریب پرشدگی نسبت مساحت ناحیه‌ی حس‌کننده به مساحت کل پیکسل است. ضریب پرشدگی بالاتر، کیفیت تصویر بهتری می‌دهد.

چرا آشکارساز فلت پنل به جای رادیوگرافی کامپیوتری (CR) مطرح شد؟

CR محدودیت‌هایی مثل بازده تشخیص پایین‌تر، وضوح فضایی کمتر و آسیب‌پذیری صفحات تصویربرداری دارد. آشکارساز فلت پنل برای رفع این محدودیت‌ها توسعه یافت.

تصویر "برای پردازش" با تصویر "برای ارائه" چه فرقی دارد؟

تصویر برای پردازش داده‌ی پیش‌پردازش‌شده‌ی آشکارساز با کنتراست ضعیف است. تصویر برای ارائه پس از پس‌پردازش برای تفسیر رادیولوژیست آماده است.

آیا آشکارساز فلت پنل برای CT ماریپیچی چندردیفه مناسب است؟

خیر، در CT استاندارد توصیه نمی‌شود. علت‌ها پاسخ کندتر سوسوزن CsI و بازده کوانتومی پایین‌تر است.

Euclid Seeram. X-Ray Imaging Systems for Biomedical Engineering Technology:An Essential Guide

