

Sławomir Mackiewicz
IPPT PAN

ZAPISYWANIE OBRAZU UTAJONEGO NA PAMIĘCIOWYCH PŁYTACH LUMINOFOROWYCH – PODSTAWY FIZYCZNE

1. Wstęp

Radiografia cyfrowa na pamięciowych luminoforowych płytach obrazowych, zwana także radiografią komputerową CR, w wielu aspektach przypomina tradycyjną radiografię błonową, w której zmieniono detektor promieniowania. Zamiast błony radiograficznej stosuje się płytę IP, która funkcjonalnie pełni tę samą rolę co błona radiograficzna (zapis obrazu utajonego) jednak swoje działanie opiera na zupełnie innych podstawach fizycznych.

Różnice w sposobie zapisu i odczytu obrazu utajonego na stosowanych detektorach decydują o podstawowych różnicach między radiografią CR a radiografią błonową. Wśród najważniejszych zalet płyt IP wymienia się dużo większy zakres dynamiki zobrazowania (5 rzędów wielkości) oraz krótszy czas ekspozycji niezbędny do uzyskania radiogramu tej samej klasy. Jednak specyfika działania pamięciowych płyt obrazowych prowadzi do szeregu mniej znanych efektów, które mogą w istotnym stopniu wpływać na praktyczne aspekty stosowania systemów CR (koszty, organizacja pracy) oraz jakość uzyskiwanych radiogramów. Należy do nich np. efekt blednięcia (zaniku) obrazu utajonego w funkcji czasu czy też efekt pojawiania się na odczytywanym radiogramie obrazów z poprzednich ekspozycji, tzw. *ghost images*, pomimo każdorazowego kasowania płyt po odczycie.

Podstawą do zrozumienia specyficznych aspektów radiografii CR jest dokładne poznanie podstaw fizycznych, na których opiera się proces tworzenia, przechowywania oraz odczytu obrazu utajonego na płycie IP. Na poprzednich konferencjach KKBR prezentowane były referaty opisujące ogólne zasady działania systemów CR [1,2,3,4] a także wymagania normowe dotyczące ich stosowania w radiografii przemysłowej [5,6]. Brak było jednak pogłębionego spojrzenia na procesy fizyczne leżące u podstaw radiografii komputerowej, które determinują zarówno jej podstawowe możliwości jak też specyficzne ograniczenia ważne dla praktycznego zastosowania.

W poniższym artykule skoncentrowano się na podstawach fizycznych tworzenia, przechowywania oraz odczytu obrazu utajonego na pamięciowych luminoforowych płytach obrazowych, zwanych w skrócie płytami IP. Należy, zauważyć, że detektory te zostały opracowane, stosunkowo niedawno tj. w latach 80-tych ubiegłego wieku. Opierają się one zarówno na wynikach badań podstawowych z zakresu fizyki ciała stałego jak też na osiągnięciach inżynierii materiałowej oraz optyki i techniki laserowej. W tym sensie płyty IP i systemy CR nie są pojedynczym, odosobnionym wynalazkiem lecz wynikiem systematycznego postępu w wielu dziedzinach nauki i techniki dokonanego w drugiej połowie XX wieku.

Podstawowym zjawiskiem fizycznym, na którym opiera się działanie płyt IP jest efekt *fotostymulowanej luminescencji*, który nierozdzielnie wiąże się z *defektami punktowymi* i *centrami barwnymi* w kryształach jonowych. Omówienie tych pojęć jest punktem wyjścia do wyjaśnienia mechanizmów tworzenia obrazu utajonego w luminoforze płyt IP.

2. Zjawisko fotostymulowanej luminescencji - PSL

Podstawą radiografii CR jest złożone i stosunkowo niedawno odkryte zjawisko *fotostymulowanej luminescencji*, w skrócie PSL (od *Photo Stimulated Luminescence*). Należy jednak zauważyć, że efekt o podobnym charakterze nazywany *scyntyłacją* lub *fluorescencją* znany był od dawna i wykorzystywany w luminoforach stosowanych na okładki wzmacniające w radiografii błonowej oraz w fluoroskopii medycznej i przemysłowej. Efekt scyntyłacji polega na tym, że luminofor emituje światło widzialne pod wpływem padającego promieniowania rentgenowskiego lub w ogólniejszym ujęciu promieniowania jonizującego. Tradycyjny luminofor emituje światło natychmiast po pochłonięciu promieniowania jonizującego. Podstawową różnicą *fotostymulowanej luminescencji* w stosunku do scyntyłacji jest to, że światło widzialne nie jest emitowane bezpośrednio po naświetleniu promieniowaniem jonizującym lecz dopiero po dodatkowej stymulacji naświetlonego luminoforu za pomocą promieniowania widzialnego pochodzącego np. z lasera. Oznacza to, że luminofor taki może przez pewien czas przechowywać (pamiętać) obraz utajony wytworzony w nim podczas ekspozycji radiograficznej. Odtworzenie obrazu następuje dopiero podczas odczytu płyty w specjalnym czytniku w wyniku skanowania powierzchni płyty promieniem laserowym. To właśnie możliwość zapisywania i przechowywania obrazu utajonego stanowi kluczową cechę pamięciowych płyt luminoforowych stosowanych w radiografii CR.

Dla lepszego zrozumienia zjawiska fotostymulowanej luminescencji PSL dobrze jest rozpatrzeć najpierw prostsze i lepiej poznane zjawisko *scyntyłacji* wykorzystywane w tradycyjnych luminoforach. Zjawisko *scyntyłacji* występuje w kryształach jonowych domieszkowanych jonami aktywatorów (np. Tb^{3+} , Eu^{2+} , Tl^+), których zawartość molowa w kryształach nie przekracza setnych części procenta. Przykładami takich kryształów są: $Gd_2O_2S:Tb^{3+}$, $BaFCl:Eu^{2+}$, $CsI:Tl^+$.

Mechanizm klasycznej scyntyłacji jest następujący. Po naświetleniu kryształu promieniowaniem jonizującym liczne elektrony zostają przeniesione z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa pozostawiając po sobie dodatnie *dziury* w paśmie walencyjnym (tzw. efekt fotoelektryczny wewnętrzny). Zarówno elektrony w paśmie przewodnictwa jak i dziury w paśmie walencyjnym mogą swobodnie przemieszczać się w objętości kryształu. Ujemne elektrony i dodatnie dziury mogą łączyć się w pary tworząc tzw. *ekscytony*, które również mogą swobodnie poruszać się wewnątrz kryształu. Ekscytony nie żyją jednak długo ponieważ przemieszczając się w kryształach trafiają w końcu na jon aktywatora, który przechwytuje je i doprowadza do rekombinacji. Energia wyzwolona w wyniku rekombinacji elektronu i dziury zostaje zużyta na wzbudzenie jonu aktywatora do wyższego stanu energetycznego. Po krótkiej chwili jon aktywatora powraca do swojego stanu podstawowego emitując przy tym foton promieniowania widzialnego. Energia tego fotonu, czyli długość fali promieniowania scyntyłacyjnego, jest ściśle określona przez różnicę poziomów energetycznych jonu aktywatora. Jak widać niewielka domieszka jonów aktywatora jest warunkiem koniecznym dla uzyskania efektu scyntyłacji. Rodzaj jonu aktywatora determinuje długość fali i czas zaniku promieniowania luminescencyjnego.

Zjawisko fotostymulowanej luminescencji PSL jest bardziej złożone od opisanego efektu scyntyłacyjnego ponieważ oprócz mechanizmów opisanych powyżej obejmuje również mechanizm pułapkowania swobodnych elektronów zanim zdążą one dojść do jonu aktywatora. Elektrony uwięzione w pułapkach nie mogą ich opuścić dopóki nie uzyskają dodatkowej energii np. w wyniku oświetlenia promieniowaniem laserowym. Dopiero uwolnione elektrony mogą dojść do jonów aktywatora gdzie spotykają dziury i ulegają rekombinacji. W czasie pomiędzy wykonaniem ekspozycji radiograficznej i odczytem płyty IP uwięzione elektrony tworzą *obraz utajony* przechowujący informację o dawce promieniowania, pochłoniętej przez poszczególne obszary płyty. Zazwyczaj odczyt laserowy

nie uwalnia wszystkich uwieczonych elektronów tak więc w celu całkowitego wymazania obrazu utajonego płyta IP musi być dodatkowo naświetlona silnym światłem widzialnym.

Mechanizm fotostymulowanej luminescencji zostanie szczegółowo omówiony na przykładzie luminoforu BaFBr:Eu²⁺ czyli fluorohalogenku baru aktywowanego jonami europu. Jest to podstawowy luminofor z pamięcią wykorzystywany z niewielkimi modyfikacjami do produkcji płyt IP od ich czasu wynalezienia w latach 80-tych do chwili obecnej.

Jak wynika z przedstawionego opisu kluczową cechą luminoforu z pamięcią jest obecność w jego strukturze krystalicznej pułapek elektronowych przechwytyjących swobodne elektrony poruszające się w paśmie przewodnictwa. W wyniku wszechstronnych badań kryształów BaFBr:Eu²⁺ [8,9,10] stwierdzono, że pułapki takie mają postać defektów punktowych w strukturze kryształu. Początkowo sądzono, że defekty takie występują w kryształach luminoforu samoistnie wskutek równowagi termodynamicznej lub też w wyniku domieszkowania kryształu jonami aktywatora. Obecnie przeważa jednak pogląd, że większość defektów punktowych biorących udział w procesie PSL powstaje w kryształach luminoforu dopiero w wyniku naświetlenia promieniowaniem jonizującym. Oznacza to, że promieniowanie jonizujące nie tylko wzbudza elektrony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa lecz również generuje defekty punktowe stanowiące pułapki dla tych elektronów.

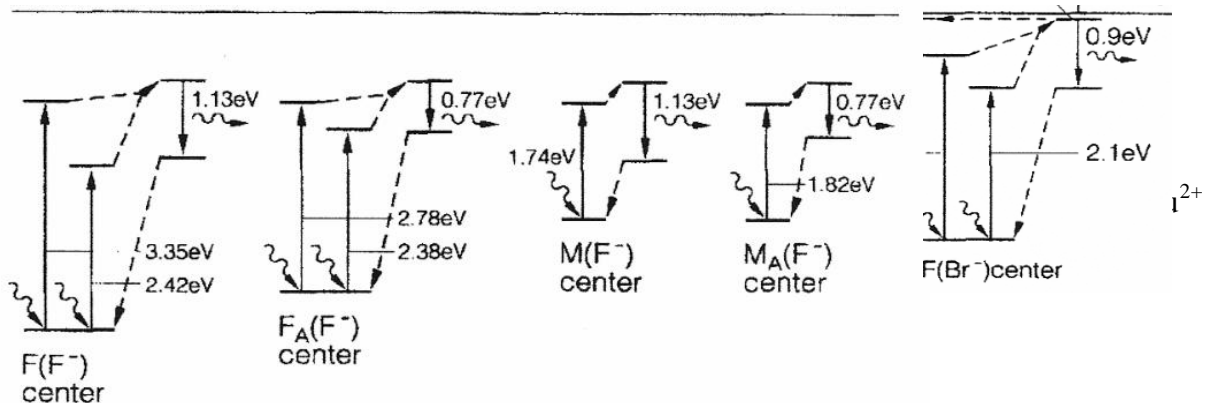
Wszechstronne badania spektrometryczne kryształów BaFBr:Eu²⁺ doprowadziły do zidentyfikowania kilku rodzajów struktur stanowiących pułapki energetyczne dla swobodnych elektronów przemieszczających się paśmie przewodnictwa. Defekty punktowe z uwieczonymi w nich elektronami noszą nazwę centrów barwnych (centrów typu F) i mogą mieć następujące postacie:

- F(Br⁻) – wakans w sieci krystalicznej w miejscu jonu Br⁻ z jednym elektronem
- F(F⁻) – wakans w sieci krystalicznej w miejscu jonu F⁻ z jednym elektronem
- F_A(Eu²⁺,F⁻) - wakans w sieci krystalicznej w miejscu jonu F⁻ stowarzyszony z jonem aktywatora z jednym elektronem
- M(F⁻) – para sąsiadujących wakansów w sieci krystalicznej w miejscach jonów F⁻ z dwoma elektronami
- M_A(Eu²⁺,F⁻) – para sąsiadujących wakansów w sieci krystalicznej w miejscach jonów F⁻ stowarzyszona z jonem aktywatora z dwoma elektronami

Nie wszystkie centra barwne wnoszą wkład do efektu PSL. Warunkiem koniecznym jest to aby energia potrzebna do wyrwania elektronu z centrum była na tyle duża by uniemożliwić samoistne opuszczenie pułapki przez elektron pod wpływem drgań termicznych sieci krystalicznej i na tyle mała aby umożliwić jego wzbudzenie do pasma przewodnictwa wskutek oddziaływania promieniowania laserowego.

Na rys. 1 pokazano schematy energetyczne centrów barwnych zidentyfikowanych w kryształach BaFBr:Eu²⁺ przez von Seggerna i współpracowników [8,9]. Stwierdzono, że jedynie centra barwne typu F(Br⁻) posiadają swój stan wzbudzony na tyle blisko pasma przewodnictwa, że elektrony przeniesione do tego stanu przez promieniowanie laserowe mogą łatwo przejść do pasma przewodnictwa. Pozostałe centra barwne mają poziomy energetyczny położone znacznie głębiej tak, że promieniowanie laserowe nie jest w stanie wzbudzić uwieczonych w nich elektronów do pasma przewodnictwa. Tym samym centra te nie wnoszą wkładu do obserwowanego efektu PSL i stanowią czynnik obniżający jego efektywność. Dodatkowo, głębokie pułapki energetyczne mogą być źródłem problemów związanych z niemożnością pełnego skasowania obrazu utajonego z naświetlonych płyt IP.

Pasmo przewodnictwa



Rys. 1. Modele pasmowe centrów barwnych w kryształach BaFBr:Eu²⁺ wg. [8].

W tabeli 1. zestawiono podstawowe dane dotyczące centrów barwnych zidentyfikowanych w kryształach BaFBr:Eu²⁺.

Typ centrum	Względna koncentracja	Liczba centrów na 1 keV	Wkład do PSL
F(Br ⁻)	16,1 %	7,98	tak
F(F)	13,8 %	6,86	nie
F _A (Eu ²⁺ ,F)	15,6 %	7,75	nie
M(F)	39,0 %	10,36	nie
M _A (Eu ²⁺ ,F)	4,8 %	2,35	nie
scyntylacja	10,7 %	5,21	nie

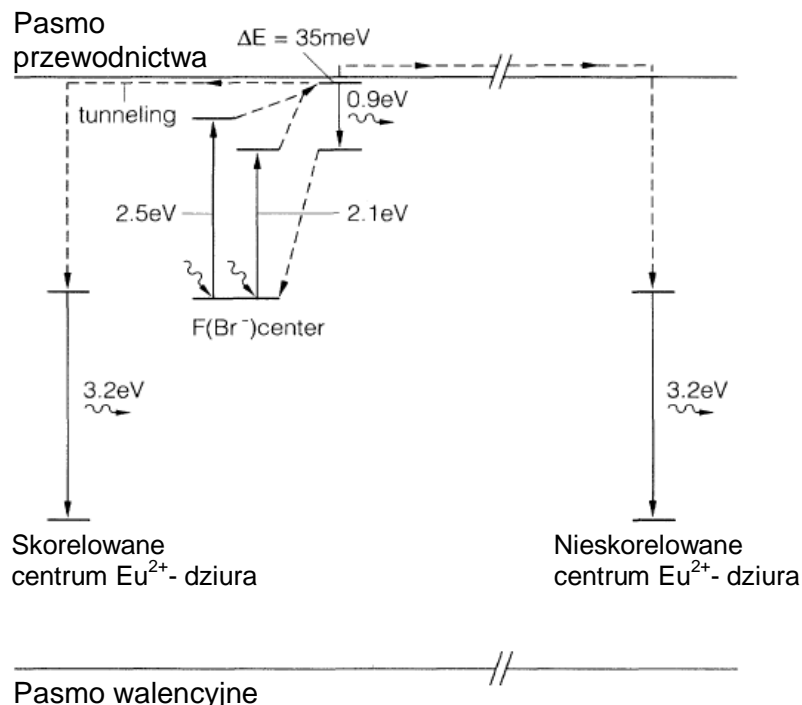
Tab. 1. Podstawowe parametry centrów barwnych generowanych przez promieniowanie jonizujące w kryształach BaFBr:Eu²⁺ (na podstawie [9]).

Jak wynika z tabeli zaledwie ok. 16% centrów generowanych przez promieniowanie wnosi swój wkład do efektu PSL. Pozostałe centra przechwytyją elektrony jednak elektrony te nie mogą zostać uwolnione przez promieniowanie laserowe odczytujące obraz utajony. Z tabeli wynika również, że dla wygenerowania w kryształach luminoforu jednego fotostymulowanego centrum F(Br⁻) potrzeba średnio 125 eV pochłoniętej energii promieniowania jonizującego.

Szczegółowy mechanizm efektu fotostymulowanej luminescencji w kryształach BaFBr:Eu²⁺ nie został dotychczas jednoznacznie ustalony i wiele jego aspektów wymaga dalszych badań. Poniżej przedstawiono model zaproponowany przez von Seggera, który wydaje się być najbardziej zgodny z wynikami dotychczasowych badań doświadczalnych.

Schemat energetyczny procesu PSL uwzględniający jedyne aktywne w tym procesie centrum F(Br⁻) pokazano na rys. 2. Promieniowanie jonizujące padające na kryształy luminoforu powoduje przeniesienie elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa i wytworzenie odpowiedniej liczby dziur w paśmie walencyjnym. Swobodne elektrony szybko łączą się w pary ze swobodnymi dziurami tworząc ekscytyny również łatwo

przemieszczające się w kryształach. Część ekscytonów dochodzi do jonów aktywatora Eu^{2+} gdzie ulega natychmiastowej rekombinacji emitując promieniowanie luminescencyjne (klasyczny efekt scyntylicyjny). Jednak większość wygenerowanych ekscytonów podlega tzw. procesowi Itoha, w wyniku którego energia ekscytonu zostaje zużyta na wybicie atomu Br z węzła sieci krystalicznej i zastąpienie go pojedynczym elektronem. Tym samym w miejscu wybitego atomu Br powstaje centrum $\text{F}(\text{Br}^-)$ zaś wybity atom Br łączy się z najbliższym jony Br^- tworząc centrum typu H zawierające uwięzioną dziurę. Centrum takie dyfunduje przez kryształ do momentu gdy zostanie przechwycone przez jon aktywatora Eu^{2+} tworząc tzw. kompleks rekombinacyjny. Tymczasem jednak swobodne elektrony zostały uwięzione w centrach $\text{F}(\text{Br}^-)$ i stanowią obraz utajony zapisany w luminoforze płyty IP. Tak więc w naświetlonym luminoforze płyty IP mamy rozkład uwięzionych elektronów i dziur, które nie mogą samodzielnie wydostać się ze swoich pułapek. Opisany stan luminoforu stopniowo zanika w wyniku drgań termicznych i promieniowania tła jednak utworzony obraz utajony może być skutecznie odczytany nawet po kilkudziesięciu godzinach po naświetleniu promieniowaniem jonizującym.



Rys. 2. Pasmowy model energetyczny fotostymulowanej luminescencji dla kryształów $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ [7].

Aby odczytać obraz utajony płyta IP musi zostać oświetlona promieniowaniem laserowym stymulującym elektrony uwięzione w centrach $\text{F}(\text{Br}^-)$ do pasma przewodnictwa. Współczesne czytniki CR wykorzystują lasery półprzewodnikowe emitujące promieniowanie o długości fali ok. 670 nm czyli o energii fotonów 1,85 eV. Jak widać z diagramu energetycznego jest to energia nieco zbyt mała dla optymalnej stymulacji centrów $\text{F}(\text{Br}^-)$ w kryształach $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$. Dlatego też w praktyce stosuje się nieco zmodyfikowane luminofory typu $\text{BaFBr}_{0.85}\text{I}_{0.15}:\text{Eu}^{2+}$ charakteryzujące się niższymi energiami fotostymulacji lepiej dopasowanymi do współczesnych laserów półprzewodnikowych.

W czasie odczytu laserowego elektrony uwięzione w centrach $\text{F}(\text{Br}^-)$ zostają przeniesione ze stanu podstawowego do stanów wzbudzonych gdzie ulegają szybkiej relaksacji do luźno związanego z F-centrum stanu RES. Stan RES leży zaledwie 35 meV poniżej pasma przewodnictwa, tak więc w normalnych temperaturach elektrony te szybko

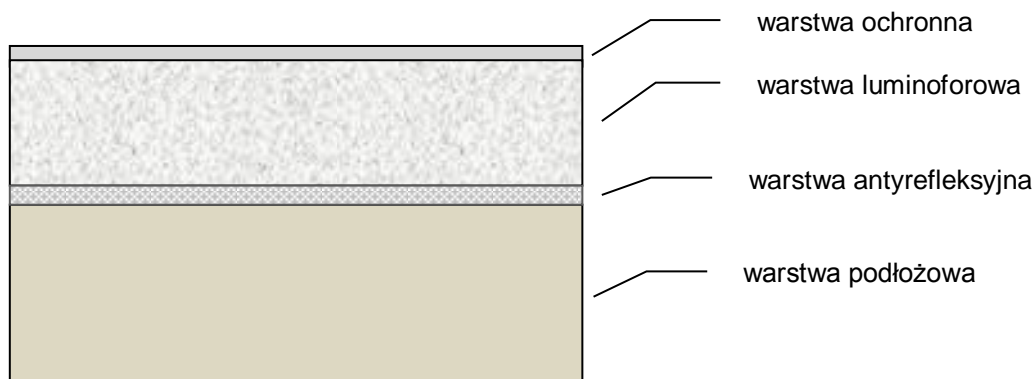
przechodzą do pasma przewodnictwa pod wpływem drgań termicznych sieci. Po wzbudzeniu do pasma przewodnictwa elektrony swobodnie poruszają się w kryształach do momentu spotkania kompleksu rekombinacyjnego w pobliżu jonu Eu^{2+} . W wyniku takiego spotkania następuje rekombinacja elektronu i dziury połączona ze wzbudzeniem jonu Eu^{2+} do stanu energetycznego wyższego o 3,2 eV i jego niemal natychmiastową ($\tau=0,7 \mu\text{s}$) relaksacją do stanu podstawowego. Energia uwalniana wskutek powrotu jonu Eu^{2+} do stanu podstawowego emitowana jest w postaci fotonu promieniowania PSL o długości fali 390 nm.

Należy zauważyć, że w przypadku fotostymulacji (inaczej niż w przypadku naświetlania promieniowaniem jonizującym) generowane są jedynie swobodne elektrony bez towarzyszących dziur. Oznacza to, że nie powstają tutaj ekscytony i nie występuje efekt Itoha prowadzący do pułapkowania elektronów. Tym samym elektrony wzbudzone do pasma przewodnictwa mogą bez przeszkód docierać do kompleksów rekombinacyjnych i generować promieniowanie luminescencyjne.

Należy zauważyć, że w bardzo niskich temperaturach (poniżej 60 K) elektrony nie mogą przejść ze stanów RES do pasma przewodnictwa wskutek wzbudzeń termicznych. Pomimo tego część elektronów może przeskoczyć bezpośrednio ze stanu RES do kompleksu rekombinacyjnego wskutek efektu tunelowania. Warunkiem zajścia takiego procesu jest odpowiednio bliskie położenie centrum $\text{F}(\text{Br}^-)$ i kompleksu rekombinacyjnego czyli przestrzenne skorelowanie obu centrów. Schemat takiej niskotemperaturowej ścieżki procesu PSL pokazano po lewej stronie rys. 2. Ponieważ jednak liczba centrów skorelowanych stanowi jedynie pewien ułamek całkowitej liczby centrów efekt fotostymulowanej luminescencji będzie wyraźnie malał z obniżaniem temperatury.

3. Budowa płyty IP

Opisany powyżej efekt fotostymulowanej luminescencji wykorzystany został w płytach IP będących detektorami promieniowania w radiografii CR. Podstawowy schemat budowy płyty IP przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat budowy pamięciowej luminoforowej płyty obrazowej.

Warstwa ochronna płyty IP ma za zadanie ochronić podstawową warstwę luminoforową przed uszkodzeniem mechanicznym oraz wpływem wilgoci. Konieczność ochrony warstwy luminoforowej przed uszkodzeniem mechanicznym (np. zarysowaniem) wynika z faktu, że nawet niewielkie uszkodzenia powierzchni płyty będą widoczne na cyfrowym radiogramie jako artefakty utrudniające prawidłową interpretację wskazań. Konieczność ochrony luminoforu przed wilgocią wynika z kolei z faktu, że kryształki fluorohalogenku $\text{BaFBr}_{(1-x)}\text{I}_x$ ulegają szybkiemu rozkładowi pod wpływem wody.

Jednocześnie warstwa ochronna musi mieć możliwie małą grubość (4 do 10 μm) tak aby nie blokowała elektronów wytworzonych w przedniej okładce metalowej, która jest często stosowana z płytą IP w celu poprawy jakości obrazu.

Warstwa luminoforowa nowoczesnych płyt IP wykonana jest z drobnych kryształków $\text{BaFBr}_{(1-x)}\text{I}_x\text{:Eu}^{2+}$ połączonych polimerowym spoiwem, którym może być nitroceluloza, poliester, akryl lub poliuretan. Zawartość molowa Jodu (I) w kryształach luminoforu wynosi zazwyczaj ok. 15%. Jak już wspomniano wynika to z faktu, że kryształy $\text{BaFBr}_{0,85}\text{I}_{0,15}$ są lepiej dostosowane do stymulacji za pomocą laserów półprzewodnikowych niż stosowane w latach 80-tych luminofory BaFBr gdy w czytnikach CR wykorzystywano głównie lasery He-Ne o nieco krótszej długości fali.

Typowy rozmiar kryształków luminoforu wynosi 4-5 μm . Im mniejsza wielkość kryształków tym wyższa rozdzielczość przestrzenna zobrazowania jaką można uzyskać z danej płyty IP. Bardzo istotna jest też jednorodność składu oraz równomierność grubości warstwy luminoforowej. Warunkuje to uzyskanie jednakowej czułości płyty na całej powierzchni. Wagowy stosunek fazy krystalicznej do fazy spoiwa w warstwie luminoforu wynosi zazwyczaj 8:1. Dodatkowo w niektórych typach płyt IP, zaprojektowanych do zastosowań w radiografii komputerowej wysokiej rozdzielczości (CR-HR), do spoiwa dodaje się specjalny niebieski barwnik mający za zadanie ograniczyć rozpraszanie promieniowania laserowego skanującego powierzchnię płyty podczas odczytu. Barwnik taki charakteryzuje się tym, że pochłania czerwone promieniowanie laserowe nie pochłaniając jednak niebieskiego promieniowania luminescencyjnego. Rozpraszanie promieniowania luminescencyjnego w luminoforze nie prowadzi bowiem do dużego pogorszenia rozdzielczości płyty jak rozpraszanie promieniowania stymulującego.

Grubość warstwy luminoforowej jest podstawowym parametrem, który decyduje zarówno o czułości płyty IP na promieniowanie jak też o jej rozdzielczości przestrzennej. Czym większa grubość luminoforu tym wyższa czułość płyty ale gorsza rozdzielczość. Standardowe płyty IP stosowane w medycynie oraz w mniej wymagających zastosowaniach przemysłowych mają grubość warstwy luminoforowej w zakresie od 300 do 370 μm . W płytach wysokiej rozdzielczości IP-HR grubości warstwy luminoforu są znacznie mniejsze i wynoszą od 130 do 150 μm .

Bezpośrednio pod warstwą luminoforową znajduje się warstwa antyodblaskowa, której podstawowym zadaniem jest pochłanianie promieniowania laserowego skanującego powierzchnię płyty. Podobnie jak obecność niebieskiego barwnika w warstwie luminoforowej pomaga to w ograniczeniu rozpraszania promieniowania laserowego w luminoforze i redukuje efektywną średnicę obszaru odczytu. W zależności od rodzaju płyty warstwa antyrefleksyjna może pochłaniać lub odbijać niebieskie promieniowanie luminescencyjne. Warstwa antyrefleksyjna pochłaniająca promieniowanie PSL poprawia rozdzielczość przestrzenną płyty kosztem jej czułości, natomiast warstwa odbijająca promieniowanie luminescencyjne niemal dwukrotnie powiększa liczbę fotonów PSL wychodzących na powierzchnię płyty i tym samym prowadzi do odpowiedniego podwyższenia jej czułości.

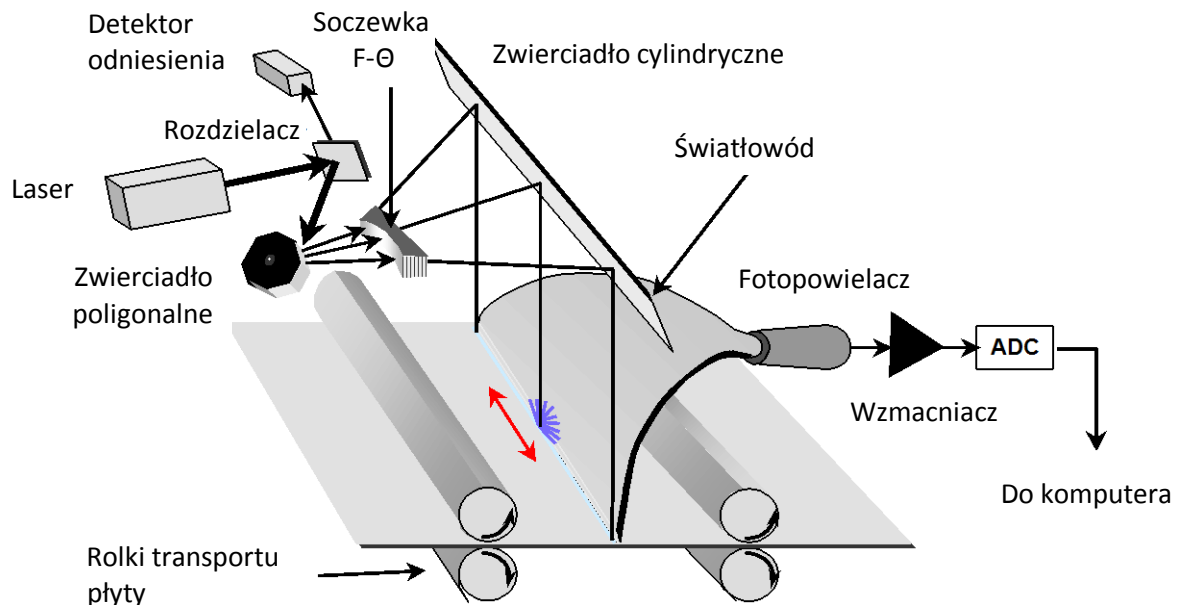
Pod warstwą antyrefleksyjną znajduje się warstwa podłożowa mająca za zadanie zapewnić mechaniczną wytrzymałość i spójność całej płyty. Warstwa podłożowa ma grubość rzędu 0,5 mm i wykonana jest z tworzywa sztucznego na bazie poliestru. Cała struktura płyty IP jest wystarczająco elastyczna i wytrzymała aby można było dopasowywać ją do krzywizny badanego obiektu w sposób podobny jak robi się to w przypadku standardowych błon.

Płyty obrazowe IP są czułe na światło widzialne i podobnie jak błony rentgenowskie powinny być pakowane w zaciemnionym pomieszczeniu do światłoszczelnych kopert lub kaset. Ochrona przed światłem jest szczególnie istotna po wykonaniu ekspozycji radiograficznej gdyż naświetlenie płyty silnym światłem widzialnym prowadzi do osłabienia lub nawet całkowitego wymazania zapisanego na płycie obrazu utajonego.

4. Odczyt obrazu utajonego z płyty IP

Odczytu obrazu utajonego z naświetlonej płyty IP wymaga zastosowania skomplikowanego urządzenia technicznego jakim jest laserowy czytnik CR. Typowy schemat działania czytnika CR pokazano na rys.4.

Odczytywanie obrazu polega na skanowaniu powierzchni płyty zogniskowanym promieniem laserowym punkt po punkcie i linia po linii. W czasie odczytu płyta IP transportowana jest przez mechanizm rolkowy w kierunku prostopadłym do kierunku skanowania wiązki laserowej tak aby w kolejnych skanach odczytywać kolejne linie obrazu.



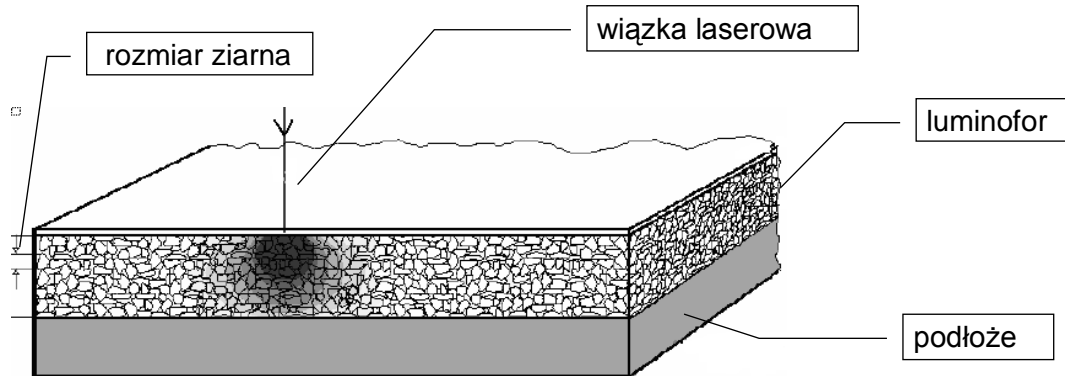
Rys. 4. Schemat odczytu obrazu utajonego z płyty IP w czytniku CR.

Ponieważ podstawowe zasady działania czytników CR były szeroko omawiane na konferencjach KKBR w niniejszym artykule skupimy się na wybranych aspektach odczytywania obrazu utajonego z płyt IP.

Podstawowym parametrem czytnika CR eksponowanym przez producentów jest rozdzielczość przestrzenna skanowania odpowiadająca średnicy plamki laserowej skanującej powierzchnię płyty. Rozdzielczości obecnie produkowanych skanerów CR zawierają się w zakresie od 25 do 100 μm . W tym miejscu należy zauważyć, że rozdzielczość skanera jest tylko jednym z czynników wpływających na faktyczną rozdzielczość (SR_b) uzyskiwanych radiogramów. Wyjaśnienie tego faktu przedstawiono na rys. 5.

Warstwa luminoforowa płyty IP składa się z wielu drobnych kryształków rozmieszczonych w sposób przypadkowy w spoiwie polimerowym. Padając na taki układ światło lasera załamuje się i odbija w różnych kierunkach penetrując obszar luminoforu znacznie szerszy niż wynikałoby to ze średnicy wiązki laserowej padającej na powierzchni płyty. Oznacza to, że wielkość obszaru pobudzonego do luminescencji, z którego odczytywany jest sygnał pojedynczego piksela zdeterminowana jest przez efekt rozpraszania światła laserowego w warstwie luminoforowej. Samo zmniejszanie średnicy skanującej plamki laserowej bez jednoczesnego zastosowania odpowiedniej płyty IP nie spowoduje poprawy rozdzielczości uzyskiwanych radiogramów a doprowadzi jedynie do znacznego przedłużenia czasu skanowania oraz powiększenia rozmiarów plików obrazowych. Stosowaną

rozdzielczość skanowania należy zawsze dostosować do rozdzielczości używanych płyt IP a także do faktycznych wymagań konkretnego zastosowania. Np. nie ma potrzeby stosowania wysokich rozdzielczości do badań ubytków korozyjnych czy wykrywania wad w odlewach ogólnego zastosowania.



Rys. 5. Rozpraszanie wiązki laserowej w warstwie luminiforowej płyty IP.

Drugim zasygnalizowanym już problemem jest szybkość odczytywania płyt obrazowych w czytniku CR. Nie może ona być zbyt duża nie tyle z powodu ograniczeń technicznych skanera co z uwagi na właściwości fizyczne luminoforu stosowanego obecnie w płytach IP. Obszar luminoforu pobudzony do emisji promieniowania PSL promieniem laserowym emituje to promieniowanie jeszcze przez pewien czas po naświetleniu. Czas połowicznego zaniku fotostymulowanej luminescencji w kryształach $\text{BaFBr}_{(1-x)}\text{I}_x\text{:Eu}^{2+}$ wynosi $\tau=0,75 \mu\text{s}$. Oznacza to, że dla pełnego odczytu sygnału z pojedynczego piksela, w taki sposób aby nie nakładał się on na sygnały z sąsiadujących pikseli, potrzeba aby czas odczytu jednego piksela wynosił przynajmniej 5τ czyli ok. $4 \mu\text{s}$. Efekt ten limituje minimalny czas skanowania płyty IP w sposób niezależny od technicznej doskonałości urządzenia skanującego. Przykładowo dla radiogramu cyfrowego o rozmiarze 2000×2000 pikseli minimalny czas skanowania nie może być krótszy niż 16 sekund. Z punktu widzenia modelu fizycznego procesu PSL przedstawionego na rys. 2 czas zaniku fotostymulowanej luminescencji τ w luminiforze limitowany jest czasem życia stanu wzbudzonego jonu aktywatora Eu^{2+} , który wynosi ok. $0,7 \mu\text{s}$. Zastosowanie w tym samym kryształcie luminoforu domieszki innego aktywatora może zasadniczo zmienić czas zaniku efektu PSL. Przykładowo zastosowanie jako aktywatorów jonów Ce^{3+} zamiast Eu^{2+} prowadzi do niemal 8-krotnego skrócenia czasu połowicznego zaniku efektu PSL ($\tau=0,095 \mu\text{s}$).

Kolejnym ważnym w praktyce problemem jest pojawianie się na odczytywanych radiogramach resztkowych obrazów z poprzednich ekspozycji radiograficznych (tzw. *ghost images*) pomimo każdorazowego kasowania płyt IP po ich odczycie. Efekt ten pojawia się zwłaszcza w przypadku silnego naświetlenia fragmentów płyty IP dużą dawką promieniowania lub w przypadku sukcesywnego naświetlania na jednej płycie obiektów o jednakowym kształcie. Co ciekawe w niektórych przypadkach efekt *ghost images* nie pojawia się bezpośrednio po skasowaniu płyty lecz występuje dopiero po kilku, kilkunastu dniach od ostatniego kasowania. Wyjaśnienie tego wysoce niekorzystnego zjawiska opiera się modelu pasmowym kryształów luminoforu. W tym przypadku „winne” są głębokie pułapki elektronów, które nie wnoszą swego udziału do efektu fotostymulowanej luminescencji (patrz rys. 1 i tab. 1). Uwięzione w nich elektrony nie zostają uwolnione ani podczas laserowego odczytu płyty ani podczas jej standardowego kasowania światłem widzialnym. Można przyjąć, że stanowią one swego rodzaju dodatkowy obraz utajony niemożliwy do odczytu lub

skasowania w standardowym czytniku CR. Jednak w przypadku ponownej ekspozycji radiograficznej takiej niezupełnie skasowanej płyty wysokoenergetyczne promieniowanie rentgenowskie może wzbudzić te głęboko uwięzione elektrony do pasma przewodnictwa skąd mogą one trafić do fotostymulowalnych pułapek F(Br⁻). W ten sposób wniosą one swój dodatkowy wkład do podstawowego obrazu utajonego wytworzonego przez nową ekspozycję. Oczywiście przestrzenny rozkład dodatkowych F centrów będzie odpowiadał ukrytemu obrazowi utajonemu przeniesionemu z poprzednich ekspozycji. W ten sposób przy standardowym odczycie nowego radiogramu uwidoczni się słabszy obraz z poprzednio wykonanych ekspozycji.

Problem całkowitego skasowania obrazu utajonego z silnie naświetlonych płyt IP nie jest sprawą prostą. Jedną ze skutecznych metod opisywanych przez autorów pracy [11] było wygrzewanie płyt IP wykazujących *ghost effect* w temperaturze 120°C przez okres 28 dni. Ponieważ w praktyce metoda taka jest raczej kłopotliwa przetestowali oni inną metodę polegającą na jednoczesnym naświetlaniu płyt IP ultrafioletem i światłem widzialnym. Metoda ta bazuje na znajomości schematu energetycznego kryształów luminoforu (rys. 1), który wskazuje, że elektrony mogą być pułapkowane nie tylko w fotostymulowalnych centrach typu F(Br⁻) lecz także w głębiej położonych centrach niemożliwych do stymulacji światłem widzialnym. Stwierdzono jednak, że centra te mogą być skutecznie stymulowane promieniowaniem ultrafioletowym. W szczególności dla luminoforów typu BaFBr_(1-x)I_x:Eu²⁺ najbardziej efektywne okazało się promieniowanie ultrafioletowe o długości fali w zakresie 320 – 330 nm.

Bazując na tej wiedzy opracowano specjalną dwuetapową procedurę kasowania płyt IP polegającą na jednoczesnym 6 godzinnym naświetlaniu płyt ultrafioletem i światłem widzialnym z następującym po tym 1,5 godzinnym naświetlaniem samym światłem widzialnym. W wyniku testów przeprowadzonych na 3 różnych typach płyt IP produkcji Agfa, Kodak i Fuji stwierdzono, że w celu pełnego wyeliminowania efektu *ghost images* z silnie naświetlonych płyt konieczne było wykonanie sześciu opisanych wyżej cykli kasowania. Oznacza to znaczne skrócenie procesu kasowania w porównaniu do opisanego wcześniej wygrzewania płyt (45 godz. zamiast 28 dni) jednak nadal proces ten jest stosunkowo długotrwały i energochłonny.

Z praktycznego punktu widzenia najlepszym rozwiązaniem jest unikanie nadmiernego napromieniowania płyt. W przypadku prześwietleń elementów o niejednorodnej grubości lub skomplikowanym kształcie wskazane jest stosowanie maskownic ograniczających naświetlanie odkrytych fragmentów płyty. W przypadku badań spoin kluczowe jest dokładne obliczanie czasów ekspozycji tak aby z jednej strony były one wystarczające do uzyskania wymaganego SNR a z drugiej możliwie jak najkrótsze [3],[7].

5. Podsumowanie

W artykule opisano podstawy fizyczne zapisywania i odczytywania obrazu utajonego na pamięciowych luminoforowych płytach obrazowych IP. Procesy te opierają się na zjawisku fotostymulowanej luminescencji i stanowią najważniejszą podstawę radiografii komputerowej. Jak wynika z przedstawionego opisu radiografia CR oparta jest na zaawansowanych podstawach fizycznych, które w niektórych aspektach nie zostały jeszcze dostatecznie wyjaśnione.

Praktyczne wykorzystanie opisanych zjawisk wymagało stworzenia zaawansowanych technologicznie detektorów promieniowania (płyt IP) oraz skomplikowanych urządzeń odczytujących (czytników CR). Pomimo wielu podobieństw do tradycyjnej radiografii błonowej technika CR posiada swoją specyfikę wymagającą, w niektórych aspektach, odmiennego podejścia niż stosowane dotychczas w radiografii błonowej.

Jednym z istotnych źródeł odmienności radiografii CR od radiografii błonowej jest fakt, że błony radiograficzne używane są jednorazowo natomiast płyty IP są detektorami wielokrotnego użytku, które powinny wystarczyć na wykonanie kilkuset ekspozycji. Oznacza to konieczność zachowania szczególnie wysokich standardów podczas obsługi systemów CR a w szczególności ochrony płyt IP przed zanieczyszczeniem, wilgocią, uszkodzeniem mechanicznym czy też przypadkowym napromieniowaniem.

Innym aspektem kluczowym dla przedłużenia żywotności płyt IP jest precyzyjna kontrola czasów ekspozycji w celu minimalizacji sumarycznej dawki promieniowania pochłanianej przez płyty przy jednoczesnym spełnieniu wymagań jakościowych. Nie ma tutaj miejsca na metodę prób i błędów, konieczne jest stosowanie profesjonalnych kalkulatorów ekspozycji.

Ważny jest także odpowiedni dobór rodzaju płyt IP oraz parametrów skanera CR do określonego zastosowania tak aby niepotrzebnie nie przydłużać czasów ekspozycji i odczytu płyt oraz rozmiarów plików obrazowych.

Literatura

1. P. Descheper, Zastosowania radiografii komputerowej w badaniach nieniszczących, Krajowa Konferencja Badań radiograficznych – Popów 2005
2. B. Józwiak, T. Morawski, Aktualne możliwości zastosowania przemysłowej radiografii komputerowej., czasopismo Badania Nieniszczące nr 3/2006
3. S. Mackiewicz, Rola i znaczenie czasu ekspozycji w radiografii komputerowej, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych – Popów 2008
4. S. Mackiewicz, Ocena jakości radiogramów komputerowych – aspekty praktyczne i metodologiczne, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych – Stary Młyn 2012
5. J. Kielczyk, Przemysłowa radiografia komputerowa (CR) z użyciem płyt obrazowych według norm europejskich, Krajowa Konferencja Badań radiograficznych – Popów 2005
6. S. Mackiewicz, Badania złączy spawanych technikami radiografii cyfrowej w świetle wymagań normy EN ISO 17636-2, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych – Popów 2013
7. S. Mackiewicz, Metodyka obliczania czasu ekspozycji w radiografii komputerowej, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych – Stary Młyn 2011
8. M. Thoms, H. von Seggern and A. Winnacker, Spatial correlation and photostimulability of defect centers in the x-ray-storage phosphor BaFBr:Eu²⁺, Physical Review B, Volume 4, Number 17, November 1991
9. H. von Seggern, Photostimulable X-ray Storage Phosphors: a Review of Present Understanding, Brazilian Journal of Physics, Volume 29, Number 2, June 1999
10. J.A. Rowlands, The physics of computed radiography., Physics in Medicine and Biology, Vol. 47, 2002.
11. H. Ohuchi-Yoshida, Y. Kondo, Complete erasing of ghost images on computed radiography plates and role of deeply trapped electrons. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 659 (2011) 247-251