

Optoelektroniczna metoda wizualizacji śladów daktyloskopijnych za pomocą luminescencji opóźnionej

Luminescencyjne metody ujawniania śladów kryminalistycznych, a zwłaszcza śladów daktyloskopijnych, należą do najczulszych technik wizualizacyjnych i są często wykorzystywane w praktyce¹. Polegają one na wzbudzeniu za pomocą specjalnych źródeł promieniowania (np. laserów argonowych lub oświetlaczy z zespołem filtrów krawędziowych i pasmowych) luminescencji śladów uaktywnionych barwnikami (np. safranina O, ardrex, basic yellow 40, TEC). Świejące ślady są rejestrowane fotograficznie lub za pomocą kamery CCD z wykorzystaniem filtrów optycznych odcinających promieniowanie wzbudzające i jednocześnie przepuszczających luminescencję śladów².

Niestety rutynowo stosowane metody luminescencyjne zawodzą w przypadku podłoża wykazujących silną fluorescencję własną (np. puszki po napojach, barwne czasopisma,

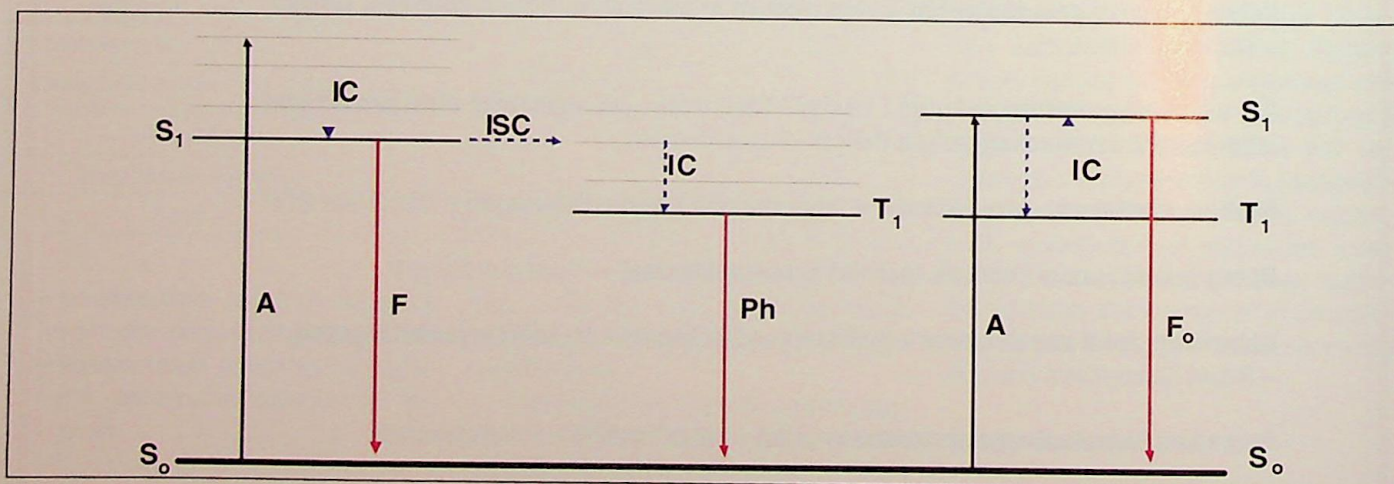
banknoty), zwłaszcza jeśli zakres ich świecenia pokrywa się z zakresem (długością fal) luminescencji śladów. Do rozwiązania tego problemu można wykorzystać różnice w czasie zaniku fluorescencji podłoża oraz fosforescencji lub fluorescencji opóźnionej śladów obserwowanych po wygaszeniu źródła promieniowania wzbudzającego.

Pojęcie luminescencji opóźnionej

Promieniowanie elektromagnetyczne w oddziaływaniu z materią może ulec zarówno odbiciu, jak i pochłonięciu. Zazwyczaj zjawiska te występują równocześnie, tzn. część fotonów ulega odbiciu, a część pochłonięciu przez cząsteczki substancji, na którą padają. Fotony pochłonięte przez cząsteczki podłoża mogą przekazywać swoją energię w różny sposób. Z punktu widzenia metody wizualizacji śladów poprzez obser-

wowanie ich luminescencji opóźnionej ważny jest następujący proces: padający foton jest pochłaniany przez cząsteczkę, która uczulona została substancją połowo-tłuszczowa tworząca odcisk palca. Energia pochłoniętego fotonu powoduje zmianę stanu energetycznego cząsteczki, która przechodzi przez różną na wyższy poziom oscylacyjny stanu wzbudzonego. Na skutek zderzeń z cząsteczkami ośrodka przechodzi się bezpromieniście nadmiar energii oscylacyjnej. W stanie wzbudzonego przebywa przez krótki czas, by następnie z najniższego poziomu oscylacyjnego tego stanu powrócić do stanu podstawowego. Może się to dokonać na kilka sposobów: cząsteczka może na przykład powrócić na niższy poziom energetyczny, emitując światło. Świecenie to nazywa się luminescencją³.

Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje przejść promienistych: fluorescencję i fosforescencję, i dodatkowo



Ryc. 1. Schemat luminescencji: S₀ – podstawowy poziom singletowy; S₁ – wzbudzony poziom singletowy; T₁ – wzbudzony poziom trypletowy; IC (internal conversion) – przejścia bezpromieniste; ISC (internal system crossing) – przejścia międzysystemowe; A – absorpcja promieniowania wzbudzającego; F – fluorescencja; Ph – fosforescencja; F₀ – fluorescencja opóźniona

Fig. 1. Scheme of luminescence: S₀ – basic singlet level; S₁ – induced singlet level; T₁ – induced triplet level; IC – internal conversion (radiantless crossing); ISC – internal system crossing; A – absorption of inductive radiation; F – fluorescence; Ph – phosphorescence; F₀ – delayed fluorescence

fluorescencję opóźnioną. Fluorescencja zachodzi, gdy elektron przechodzi bezpośrednio ze stanu wzbudzonego singletowego do stanu singletowego o niższej energii. Na najniższym wzbudzonym poziomie singletowym cząsteczka może przebywać około 10–8 s. Fosforescencja jest procesem bardziej złożonym. W tym przypadku wzbudzony atom lub cząsteczka, zanim przejdzie do stanu podstawowego, znajdzie się w stanie zmetałowym o czasie życia rzędu 10–3 s, co odpowiada sytuacji przejścia cząsteczki ze stanu wzbudzonego trypletowego do stanu podstawowego singletowego. Przejścia o różnej skuteczności są formalnie zabronione, dlatego są mniej prawdopodobne i wiążą się z dłuższym czasem życia stanu wzbudzonego cząsteczek. Fluorescencja opóźniona zanika znacznie wolniej niż zwykła fluorescencja tej samej cząsteczki i pojawia się w wyniku kilku różnych mechanizmów, z których najlepiej poznany jest: anihilacja tryplet-tryplet i termicznie aktywowana fluorescencja opóźniona. Przykładem fluorescencji opóźnionej może być sytuacja, gdy cząsteczka, która znalazła się w stanie wzbudzonym singletowym, przechodzi bezpromieni-

ście do niższego stanu trypletowego, a następnie – przy odpowiednio wysokiej temperaturze otoczenia – powraca do wyższego stanu wzbudzonego singletowego i stamtąd do stanu podstawowego, emitując światło. Proces ten charakteryzuje się więc składem spektralnym jak dla fluorescencji i czasem zaniku emisji jak dla fosforescencji⁴.

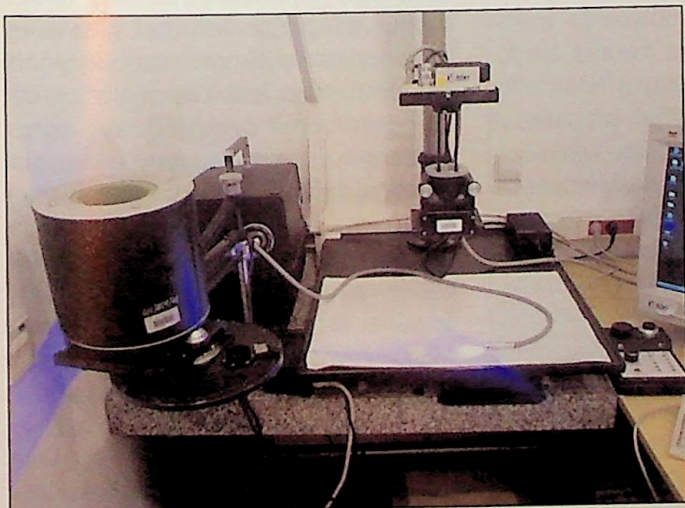
Przez pojęcie luminescencji opóźnionej będziemy rozumieli zjawisko fosforescencji oraz fluorescencji opóźnionej, które charakteryzują się podobnym czasem zaniku świecenia, znacznie dłuższym niż w przypadku fluorescencji. Na rycinie 1 zostały przedstawione schematycznie zmiany poziomów energetycznych cząsteczki odpowiedzialne za poszczególne rodzaje luminescencji.

Urządzenia mechaniczno-optyczne do rejestracji luminescencji opóźnionej śladów

Pierwsze badania nad rozwiązaniem problemu ujawniania śladów daktyloskopijnych na podłożach wykazujących silną fluorescencję, która przesłaniała ich świecenie pod wpływem wzbudzającego promieniowania laserów lub specjalnych oświetla-

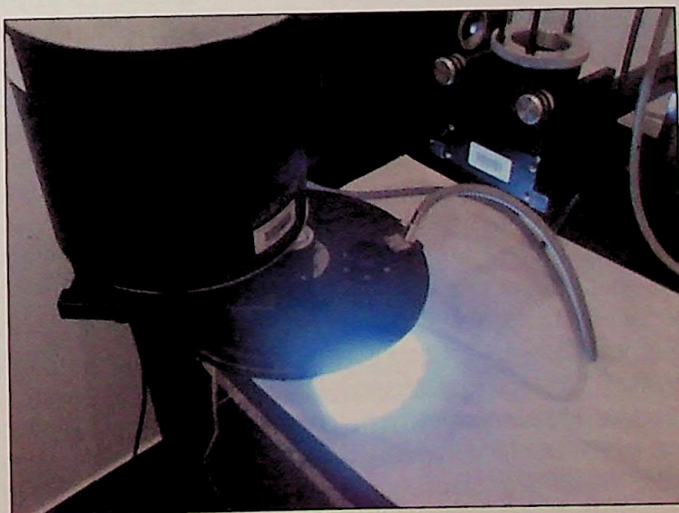
czy, podjęto w latach 90. w USA. Naukowcy skonstruowali kilka prototypów urządzeń mechanicznych (tzw. czoperów) w postaci wirujących tarcz lub cylindrów z otworami powodującymi przerywanie (ze stosunkowo dużą częstotliwością) ciągłego promieniowania wzbudzającego i na przemian – przesłanianie osi optycznej kamer przed fluorescencją podłoża oraz odsłanianie jej w momencie zaniku fluorescencji podłoża i trwania jeszcze luminescencji opóźnionej śladów. Pozwoliło to na rejestrację luminescencji opóźnionej śladów aktywowanych odpowiednimi barwnikami⁵.

W połowie lat 90., na potrzeby Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego KGP, firma LASAR ELEKTRONIKA zbudowała czoper w postaci wirującej z prędkością ok. 30 000 obrotów na minutę tarczy, na której obwodzie znajdowały się cztery otwory. Mechanizm jej działania jest następujący: podczas wirowania otwór, przez który przechodzi promieniowanie wzbudzające emitowane z oświetlacza, jest odsłaniany, a następnie przysłaniany przez powierzchnię wirującej tarczy. W chwili gdy zostanie on przysłonięty całkowicie, następuje odsłonięcie otworu po-



Ryc. 2. Zestaw mechanicznego czopera z oświetlaczem, kamerą i komputerem

Fig. 2. Mechanical chopper with light source, camera and computer



Ryc. 3. Czoper z odsłoniętym otworem, przez który emitowane jest promieniowanie wzbudzające

Fig. 3. Chopper with uncovered opening through which inductive radiation is emitted

krywającego się z osią optyczną obiektywu aparatu fotograficznego (lub kamery CCD) rejestrującego obserwowany obraz śladu (ryc. 2–3).

Taki sposób rejestracji luminescencji opóźnionej okazał się wystarczający do rejestracji śladów za pomocą luminescencji opóźnionej, jednak nie było to rozwiązanie optymalne. Wynika to z faktu, że mechaniczne urządzenia wirujące nie pozwalają na uzyskanie stromych krawędzi charakterystyki promieniowania wzbudzonego ani rejestrowanej luminescencji, a zatem nie zapewniają dostatecznie krótkiego odstępu czasu pomiędzy wygaszeniem świetlnego impulsu pobudzającego a chwilą odsłonięcia toru optycznego aparatu fotograficznego (kamery). W związku z tym obserwowany obraz śladu jest nadal w dużym stopniu zakłócany fluorescencją podłoża. Brak też możliwości regulacji czasu trwania impulsu świetlnego oraz momentu otwarcia migawki kamery po jego wygaśnięciu. Dodatkową wadą tego typu urządzeń jest bardzo długi czas rejestracji śladów (kilkadziesiąt minut) oraz duży poziom hałasu wytwarzanego przez wirujące elementy.

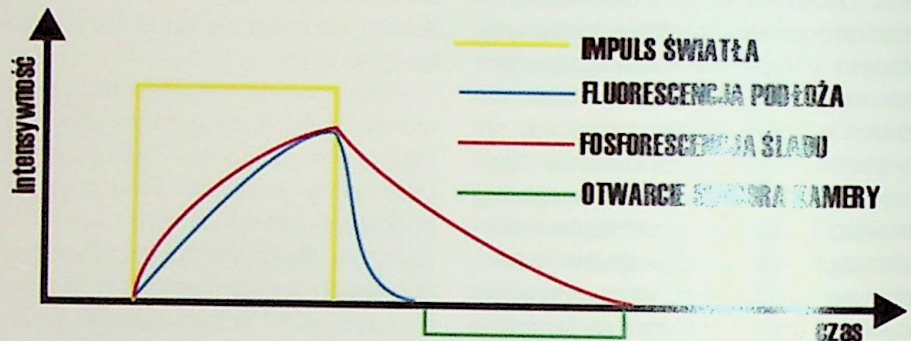
Urządzenie optoelektroniczne do rejestracji luminescencji opóźnionej śladów

Obecny stan rozwoju optoelektroniki umożliwia konstrukcję specjalnego stanowiska bez stosowania jakichkolwiek ruchomych elementów mechaniczno-optycznych. Rozwiązanie oparte na założeniu, że charakterystyka światła emitowanego z oświetlacza musi pokrywać się z charakterystyką absorpcyjną substancji użytej do fotosensybilizacji śladów kryminalistycznych, pozwala na uzyskiwanie optymalnych warunków rejestracji śladów. Mechanizm działania takiego stanowiska polega na wykorzystaniu impulsowego oświetlacza sprzężonego z komputerowo sterowaną kamerą, która jest

uruchamiana w chwili wygaśnięcia promieniowania oświetlacza oraz fluorescencji podłoża. Cykl pracy optoelektronicznego stanowiska do rejestracji luminescencji opóźnionej przedstawia rycina 4.

Parametr $[Ti]$ decyduje o tym, jaka ilość energii zostanie „wpompowana” w substancję świecącą i w podłoże, na którym znajduje się wizualizowany ślad.

Czas opóźnienia $[To]$, który zwykle wynosi od kilku do kilkunastu mi-



Ryc. 4. Pojedynczy cykl wzbudzenia, emisji oraz rejestracji luminescencji opóźnionej.
Fig. 4. Single cycle of induction, emission and recording of delayed luminescence

W idealnym przypadku rejestracja luminescencji śladu powinna nastąpić po całkowitym wygaśnięciu podłoża. Czas trwania świetlnego impulsu wzbudzonego powinien być dobrany tak, aby niewielka ilość zawartej w śladzie substancji aktywnej optycznie całkowicie nasyciła się światłem. Z przeprowadzonych badań wynika, że czas ten (dla chelatu europu) wynosi od 200 do 800 mikrosekund. Ze względu na znikomą ilość substancji aktywnej optycznie znikoma jest również ilość światła emitowanego po jednokrotnym naświetleniu. W celu skutecznej wizualizacji śladu niezbędne jest także wielokrotne powtórzenie cyklu: naświetlanie – rejestracja. O skutecznej rejestracji śladu decyduje wiele parametrów, takich jak:

- 1) natężenie i czas trwania świetlnego impulsu wzbudzonego $[Ti]$,
- 2) czas opóźnienia mierzony od chwili wygaśnięcia świetlnego impulsu wzbudzonego do chwili otwarcia migawki $[To]$,
- 3) czas otwarcia migawki $[Tm]$,
- 4) ilość powtórzeń cyklu: naświetlanie – rejestracja $[N]$.

W praktyce, należy dobierać tak, aby moment otwarcia migawki nastąpił w chwili, gdy luminescencja podłoża będzie już wystarczająco wygaszona, zaś czas otwarcia migawki $[Tm]$, aby zgromadzić w sensorze kamery wystarczającą ilość energii. W praktyce czas opóźnienia jest porównywalny ze stałą czasową zaniku luminescencji opóźnionej. Jak już wspomniano, w odpowiednio uczulonej substancji potowo-tłuszczowej zdeponowana jest niewielka ilość optycznie aktywnej substancji. Niezbędne jest zatem wielokrotne powtórzenie cyklu $[N]$, aby zgromadzona i zsumowana energia świetlna dała odpowiedni efekt wizualizacyjny.

Zbudowane w ramach projektu badawczego i z wykorzystaniem najnowszej technologii unikalne stanowisko zawiera wyłącznie elementy optoelektroniczne⁶. W jego skład wchodzi komputerowo sterowany, impulsowy oświetlacz diodowy, kamera CCD pozwalająca na rejestrację i sumowanie słabych sygnałów luminescencji opóźnionej oraz komputerowa stacja sterująco-rejestrująca. Kamera wraz z oświetlaczem za-

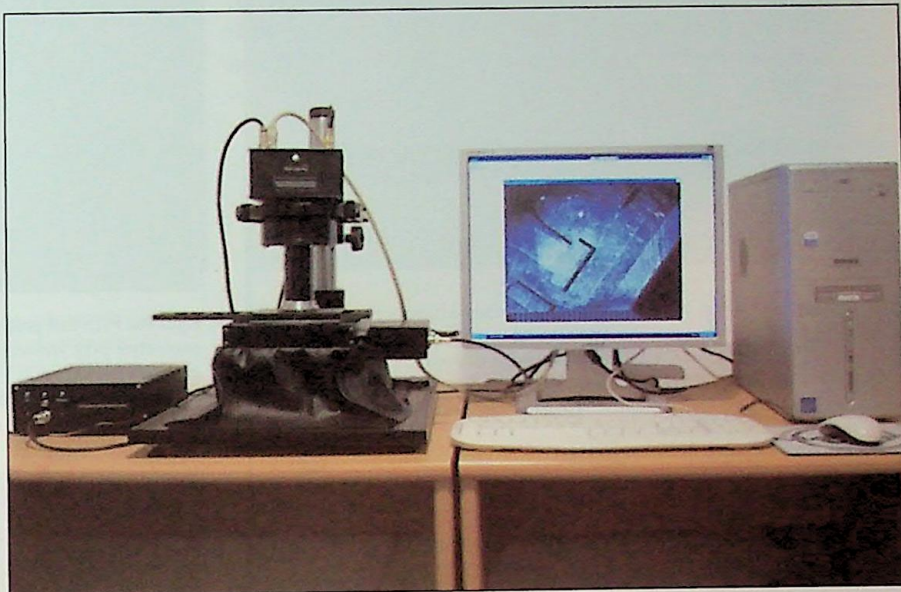
mocowana jest na specjalnym stabilnym statywie. Tor optyczny zestawu jest całkowicie osłonięty, co sprawia, że badania można wykonywać w niezaciemnionym pomieszczeniu. Rejestracja luminescencji odbywa się z pominięciem stacji graficznej – jedynie zarejestrowane przez kamerę, „scałkowane” obrazy są przesyłane do komputera w postaci specjalnych pakietów, właściwych dla tego sposobu obserwacji obiektów aktywnych optycznie. Diody oświetlacza zasilane są prostokątnymi impulsami prądowymi o stromym zboczach opadającym. Tym samym i impulsy świetlne mają niemal identyczny kształt. Opadające zbocze impulsu pobudzającego powoduje otwarcie kamery cyfrowej, która po krótkim czasie opóźnienia rozpoczyna rejestrację śladu. Czas otwarcia kamery jest dostosowany do czasu życia luminescencji substancji uczulającej ślad. Po zapisaniu informacji cały cykl powtarza się w sensorze kamery, a jego krotność zależy od intensywności luminescencji opóźnionej śladu. Rycina 5 przedstawia ogólny widok stanowiska, natomiast jego schemat blokowy widoczny jest na rycinie 6.

Najważniejszym elementem kamery jest wysokoczuły, monochromatyczny sensor CCD. Zawartość pikseli odczytywana jest za pomocą 10-bitowego przetwornika A/C. Kamera zaopatrzona jest ponadto w specjalny układ chłodzenia, dzięki czemu poziom szumów zbieranych sygnałów jest minimalny. Umożliwia to sumowanie sygnałów luminescencji opóźnionej emitowanej w ponad 60 tys. cykli: naświetlanie – rejestracja. Możliwa jest również długotrwała ekspozycja z czasem dochodzącym do kilkudziesięciu minut. Impulsowy oświetlacz emituje promieniowanie elektromagnetyczne w paśmie ultrafioletowym z maksimum dla długości fali 365 nm. Czas trwania impulsów może być regulowany w zakresie od 20 mikrosekund do 25 mi-

nut. Oświetlacz jest sterowany impulsami generowanymi przez kamerę, zaś sterowanie kamerą i akwizycję obrazu realizuje komputer – sta-

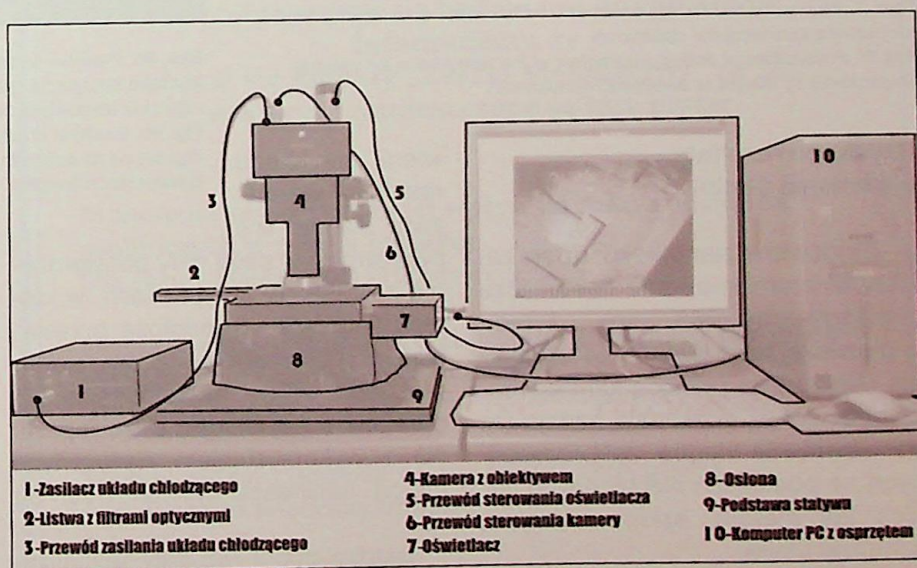
cja graficzna ze specjalnym oprogramowaniem.

Oprogramowanie urządzenia pozwala na bardzo wygodną zmianę



Ryc. 5. Optoelektroniczne stanowisko do rejestracji śladów daktyloskopijnych z wykorzystaniem luminescencji opóźnionej (stanowisko zostało zbudowane w ramach projektu badawczego nr 0 T00A 001 29, finansowanego przez MNiSW, realizowanego w Zakładzie Kryminalistyki i Medycyny Sądowej Wydziału Prawa i Administracji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Podobne stanowisko funkcjonuje także w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym KGP).

Fig. 5. Optoelectronic station for imaging fingerprints by means of delayed luminescence (workstation as constructed within the research project no. 0 T00A 001 29 financed by Ministry of Science and Higher Education and implemented in the Institute of Forensic Science and Medicine at Warmia and Mazury Law and Administration Department in Olsztyn. A similar workstation is operational also in the Central Forensic Laboratory of the Polish Police).

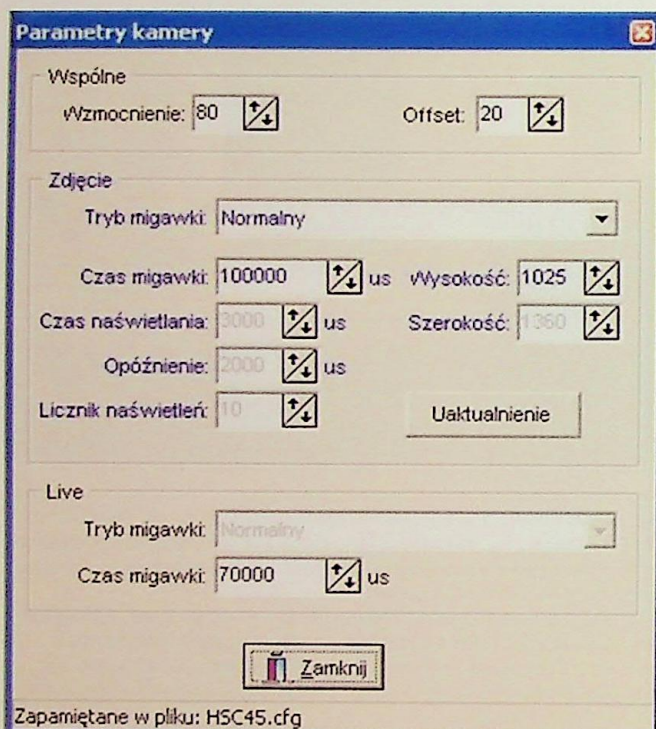


Ryc. 6. Schemat blokowy stanowiska optoelektronicznego do rejestracji śladów daktyloskopijnych z wykorzystaniem zjawiska luminescencji opóźnionej

Fig. 6. Block scheme of optoelectronic workstation for imaging fingerprints by means of delayed luminescence phenomenon

wszystkich parametrów ekspozycji. Odbywa się to przez wpisanie nowych wartości w odpowiednie rubryki wyświetlane na monitorze urządzenia (ryc. 7). Zarówno zapamiętywane obrazy, jak i obraz po całkowitej ekspozycji można poddać obróbce cyfrowej.

sorpcji promieniowania elektromagnetycznego w obszarze bliskiego nadfioletu. Opóźniona emisja ma miejsce w obszarze czer-



Ryc. 7. Możliwości ustawiania parametrów stanowiska do rejestracji śladów za pomocą luminescencji opóźnionej

Fig. 7. Possibilities of setting parameters of the workstation for imaging fingermarks by means of delayed luminescence

Uzyskane rezultaty ujawniania śladów

Zbudowane stanowisko, dzięki zakresowi promieniowania oświetlacza impulsowego (365 nm) użytego w pierwszej fazie badań nad rejestracją obrazów za pomocą luminescencji opóźnionej, doskonale nadaje się do ujawniania śladów daktyloskopijnych na podłożach niechłonnych, takich jak metale, szkło, tworzywa sztuczne i inne.

Podczas badań stosowano najpierw metodę cyjanoakrylową, a następnie roztwór chelatu europu⁷, który wykazuje zdolność do silnej ab-

wieni. Uzyskane rezultaty wizualizacji śladów linii

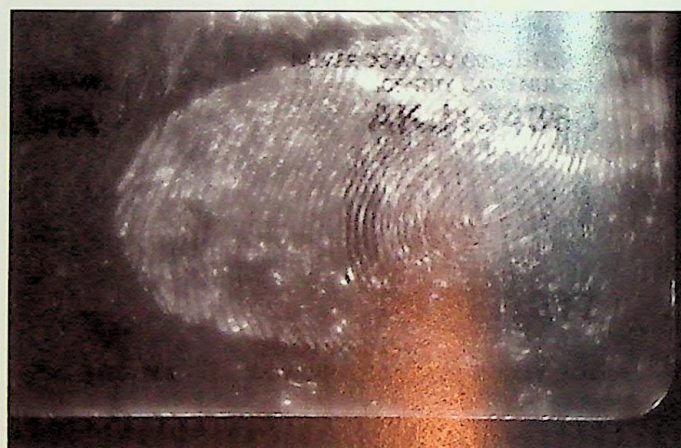
papilarnych w pełni dały potwierdzenie założeń. W przypadkach, w których fluorescencja podłoża przesłaniała fosforescencję śladów, stanowisko pozwalało na rejestrację ich obrazów o czytelności dużo lepszej niż z wykorzystaniem klasycznych metod luminescencyjnych (ryc. 8a i b)

Bardzo dobre rezultaty wizualizacji śladów otrzymano także na podłożach powodujących odbłyски światła (bliki), takich jak zmięta folia aluminiowa, które mogły być skutecznie



Ryc. 8a. Przykład próby wizualizacji śladu linii papilarnych na dowodzie osobistym przy wykorzystaniu cyjanoakrylanu, chelatu europu oraz oświetlacz UV

Fig. 8a. Example of attempted visualisation of a fingermark on ID card with use of cyanoacrylate, europium chelate and UV light



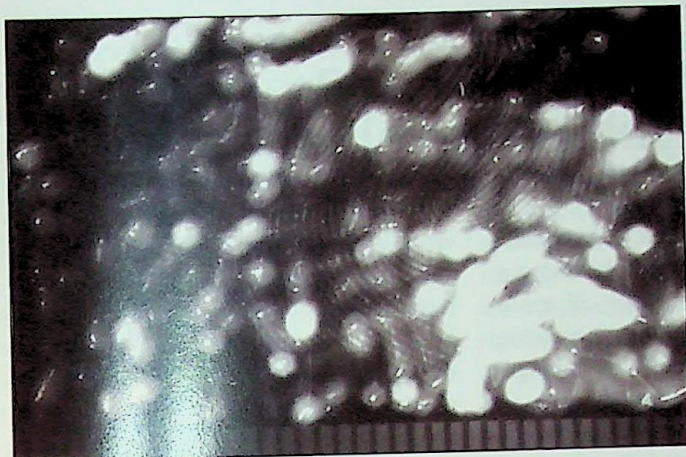
Ryc. 8b. Przykład wizualizacji śladu linii papilarnych na dowodzie osobistym (ten sam ślad jak na ryc. 8a) z wykorzystaniem cyjanoakrylanu, chelatu europu oraz stanowiska do rejestracji luminescencji opóźnionej

Fig. 8b. Example of attempted visualisation of fingermark (the same as in Fig. 8a) on ID card with use of cyanoacrylate, europium chelate and delayed luminescence imaging

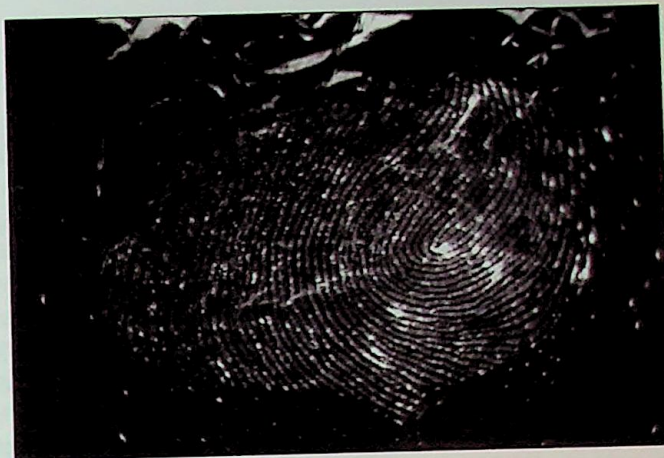
wygaszone, w chwili gdy wykorzystywano zjawisko luminescencji opóźnionej (9a i b).

W zależności od wybranych parametrów w panelu sterującym, jeśli nie występuje fluorescencja podłoża, stanowisko może być używane jako uniwersalne urządzenie do rejestracji śladów w świetle odbitym i z wykorzystaniem ich „zwykłej” luminescencji.

Badania będą kontynuowane także z użyciem podłoży chłonnych, zwłaszcza różnego rodzaju papie-



Ryc. 9a. Przykład wizualizacji śladu linii papilarnych na folii aluminiowej z wykorzystaniem cyanoakrylanu, chelatu europu oraz oświetlacza UV
Fig. 9a. Example of visualisation of fingerprint on aluminium foil with use of cyanoacrylate, europium chelate and UV light source



Ryc. 9b. Przykład wizualizacji śladu linii papilarnych na folii aluminiowej (ten sam ślad jak na ryc. 9a) z wykorzystaniem cyanoakrylanu, chelatu europu oraz stanowiska do rejestracji luminescencji opóźnionej
Fig. 9b. Example of visualisation of fingerprint (same marks as in Fig. 9a) on aluminium foil with use of cyanoacrylate, europium chelate and delayed luminescence imaging

arów. W tym celu niezbędne jest zbudowanie impulsowego oświetlacza emitującego promieniowanie odpowiednie dla metod fluorescencyjnych stosowanych na tego rodzaju podłożach.

Jarosław Moszczyński
Antoni Siejca
Łukasz Ziemnicki
zdj.: Ł. Ziemnicki
wykres: J. Moszczyński

PRZYPISY

- ¹ **E.R. Menzel:** Fingerprint Detection with Lasers, Marcel Dekker, New York 1999;
- ² **M. Rybczyńska-Królik, M. Pękała:** Przewodnik po metodach wizualizacji śladów daktyloskopijnych, CLK KGP, Warszawa 2006, s. 25–29;
- ³ **Z. Kęcki:** Podstawy spektroskopii molekularnej, PWN, Warszawa 1975, s. 162–164;
- ⁴ **J.P. Simons:** Fotochemia i spektroskopia, PWN, Warszawa 1976, s. 25–30;
- ⁵ **R.H. Murdoch, E.R. Menzel:** A Computer Interfaced Time – Resolved Luminescence Imaging System, „Journal of Forensic Sciences” 1993, nr 38 (3), s. 521–529.

⁶ Projekt badawczy o nr. 0 T00A 001 29, finansowany przez MNiSW, realizowany jest w Zakładzie Kryminalistyki i Medycyny Sądowej Wydziału Prawa i Administracji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

⁷ Stosowano recepturę roztworu chelatu europu wg „Processing Guide for Developing Latent Prints”, US Department of Justice, Federal Bureau of Investigation, Laboratory Division, 2000.

Czytelniku,

jeśli interesujesz się badaniami dokumentów,
informujemy, że
ukazał się kolejny „Zeszyt Metodyczny” nr 25,
w którym zamieszczone są trzy prace:

Monotonia sensoryczna i jej wpływ na zakres odchyień osobniczych w piśmie ręcznym
Stanisławy Masłowskiej i Hanny Tydelskiej

Ocena stopnia stabilności cech identyfikacyjnych podpisów składanych na kartach płatniczych
Iwony Sanewskiej

Wpływ rodzaju podłoża na zmienność cech pisma wykonanego wielkimi literami alfabetu
Beaty Urbanik