

monochromatyczna emitancji świetlnej tej samej lampy, którą otrzymuje się przez przemnożenie wartości z wykresu 2.98b przez względną skuteczność świetlną promieniowania monochromatycznego V_λ oka.

Coraz powszechniejsze zastosowanie, zwłaszcza w projekcji kinowej, uzyskują *lampy ksenonowe*. Są to lampy wysokoprężne (ciśnienie ksenonu w czasie pracy dochodzi do kilkudziesięciu atmosfer), w związku z czym widmo jest ciągłe (rys. 2.98d — linie ciągła), dobrze aproksymujące w obszarze widzialnym promieniowanie dla ciała czarnego o temperaturze 5200 K (rys. 2.98d — linia przerywana). Rozkład widna jest praktycznie niezależny od zmiany parametrów prądowo-napięciowych. Wysoka luminancja, białe światło i niezmiennosc charakterystyki widmowej mają szczególne znaczenie przy projekcji filmów barwnych.

Tablica 2.6. Wartości luminancji niektórych źródeł światła

Rodzaj źródła światła	Luminancja w Mnt
Zarówka projekcyjna	15
Zarówka jodowo-kwarcowa	30
Lampa rtęciowa wysokociśnieniowa	100–850
Lampa ksenonowa	90–700
Łuk wysokointensywny	150–950

W tabl. 2.6 przytoczone są dla porównania średnie wartości luminancji różnych źródeł światła. Szczegóły o źródłach światła można znaleźć w [7] i [8].

2.7.3. Odbiorniki promieniowania

Promieniowanie padające na płaszczyznę odbiornika zostaje częściowo lub całkowicie przez niego pochłonięte i zamienione na inną postać energii (np. ciepłą, elektryczną lub chemiczną), którą w dogodny sposób można mierzyć. W zależności od rodzaju powstającej energii odbiorniki można podzielić na *chemiczne* (emulsja fotograficzna), *elektryczne* (odbiornik fotoelektryczny), *cieplne* (bolometr) itp.

Odbiornikiem jest również oko, a dokładniej siatkówka oka. Sygnał powstały w procesie chemiczno-elektrycznym pod wpływem pochłanianej przez siatkówkę energii elektromagnetycznej jest przesyłany do mózgu tworząc w ten sposób informację. Z uwagi na szczególne znaczenie oka w odbiorze promieniowania elektromagnetycznego, jego własnościom został poświęcony rozdział 4.

W każdym z odbiorników może występować wielokrotna przemiana energii. Na przykład w bolometrze wykorzystana jest zmiana oporności elektrycznej ciała w funkcji temperatury powodująca zaburzenia równowagi obwodu elektrycznego i pozwalająca mierzyć pochłanianą energię za pomocą elektrycznego miernika wychyłowego. Poza tym w odbiorniku może występować jednocześnie kilka postaci energii (np. emulsja fotograficzna nagrzewa się pod wpływem promieniowania), co najczęściej komplikuje pomiar podstawowej wielkości, ponieważ uboczna postać energii może wpływać na parametry zamiany energii promieniowania na postać energii mierzonej.

Emulsja fotograficzna

Proces fotograficzny jest oparty na zdolności absorbowania promieniowania elektromagnetycznego przez pewne związki chemiczne (w większości sole srebra), wskutek czego następuje zmiana ich stanu molekularnego. Z cząstek, które zaabsorbowały dostateczną ilość energii, w procesie wywoływania wytrącane jest metaliczne srebro, natomiast w czasie utrwalania — usuwane cząstki nieuczulone (z niewytrąconym srebrem). W rezultacie w miejscach bardziej naświetlonych emulsja jest więcej zaczer-niona (obraz negatywowy).

W materiałach fotograficznych o podłożu przezroczystym miarą zaczer-nienia jest gęstość optyczna zaczer-nienia D zdefiniowana przez

$$D = \log \frac{1}{\tau} = \log \frac{\Phi_0}{\Phi_p} \quad (2.139)$$

gdzie $\tau = \Phi_p / \Phi_0$ — współczynnik przepuszczania, będący stosunkiem strumienia przechodzącego Φ_p przez dany element powierzchni do strumienia padającego Φ_0 na ten element.

Dla emulsji o podłożu nieprzezroczystym gęstość optyczna definiowana jest przez współczynnik odbicia.

Zaczer-nienie danego elementu powierzchni emulsji będzie tym większe, im więcej energii zostanie pochłoniętej przez cząstki substancji światłoczułej, to znaczy im będzie większe natężenie napromienienia na tej powierzchni i czas w jakim ono będzie działało.

Iloczyn natężenia napromienienia przez czas działania $\Delta t = t_2 - t_1$ promieniowania nazywa się *napromienieniem* H_e

$$H_e = \int_{t_1}^{t_2} E_e dt \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \quad (2.140)$$

Odpowiednikiem fotometrycznym napromienienia jest naświetlenie

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E dt \text{ lx} \cdot \text{s} \quad (2.141)$$

Wykreślną zależność gęstości zaczer-nienia od logarytmu dziesiętnego naświetlenia, nazywa się *krzywą charakterystyczną emulsji*¹⁾ (rys. 2.99). Na krzywej można wydzielić pewne typowe dla każdej emulsji elementy. Gęstość D_0 odpowiadająca zaczer-nieniu nienaświetlonej (ale wywołanej i utrwalonej) emulsji nazywana jest *gęstością optyczną zadymienia*. Dolna część zakrzywiona AB odpowiadająca rejestrowanym już zaczer-nieniom pochodzącym od napromieniania nosi nazwę zakresu niedoświetlenia, natomiast poza punktem C — zakresu prześwietlenia. Część prostoliniowa BC , dla której przepuszczalność emulsji jest odwrotnie proporcjonalna do naświetlenia (gęstość proporcjonalna do logarytmu naświetlenia) jest zakresem normalnego naświetlenia.

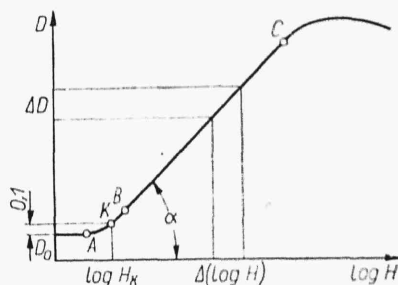
Wytwórnice materiałów fotograficznych podają dla danej emulsji tylko pewne jej wielkości charakterystyczne, a mianowicie współczynnik kontrastowości, czułość ogólną i barwoczułość.

¹⁾ Zagadnienie charakteryzowania odbiorników za pomocą wielkości fotometrycznych poruszono przy omawianiu odbiorników fotoelektrycznych.

Współczynnik kontrastowości jest zdefiniowany jako

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta D}{\Delta(\log H)} \quad (2.142)$$

Określa on nachylenie prostoliniowej części krzywej, a więc wyznacza przyrost gęstości optycznej dla danej zmiany naświetlenia w zakresie normalnego naświetlenia. Wartość współczynnika γ zależy od warunków wywoływania i np. przy przedłużaniu czasu wywoływania wzrasta kontrast, ale równocześnie rośnie i gęstość optyczna zadymienia D_0 . W katalogach lub na opakowaniach materiałów fotograficznych podaje się zwykle zalecany współczynnik kontrastowości, który powinno się otrzymać wywołując i utrwalając materiał według receptury fabrycznej.



Rys. 2.99

Zgodnie z polskimi (PN) i niemieckimi (DIN) normami *światłoczułością* S materiału fotograficznego negatywowego dla danego współczynnika kontrastowości, nazywana jest odwrotność naświetlenia odpowiadająca gęstości o 0,1 większej od gęstości optycznej zadymienia (rys. 2.99)

$$S = \frac{1}{H_K} \quad \text{lx}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.143)$$

Polskie normy rozróżniają światłoczułość: dla średniego południowego światła słonecznego (temperatura 5000 K) oznaczana przez S_s i dla światła żarówki (temperatura barwowa 2854 K) oznaczana przez S_z . Światłoczułość charakteryzuje początek możliwości rejestrowania skali naświetlenia przez dany materiał fotograficzny. Zależy ona od średnicy ziarna substancji światłoczułej, która waha się od 0,5—3 μm . Im większa średnica ziaren, tym większa światłoczułość emulsji, ponieważ dla danego naświetlania pochłaniają one więcej energii. Dlatego materiały drobroziarniste, pozwalające dokładniej odwzorować szczegóły przedmiotu, mają niską czułość.

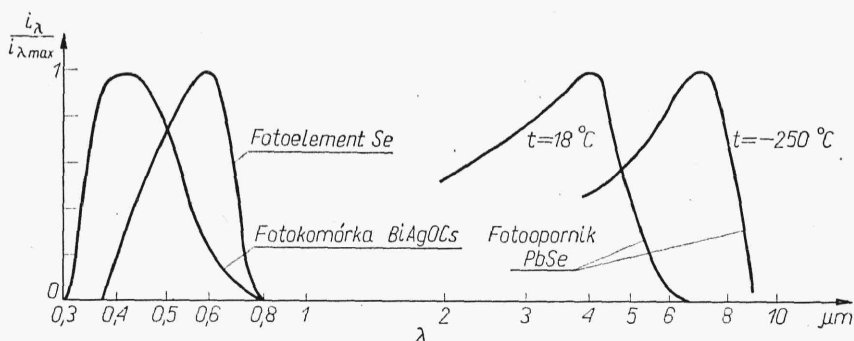
Przez *barwoczułość* rozumie się uczulenie emulsji na różne części widma promieniowania elektromagnetycznego. Rozróżnia się emulsje: *nieczułe* (zakres czułości 350—520 nm), *ortochromatyczne* (górna granica przesunięta do 600 nm), *panchromatyczne* (górna granica do 700 nm) i *podczerwone* (uczulone w różnych zakresach widma podczerwonego).

Bardziej szczegółowe dane dotyczące systematyki materiałów fotograficznych, ich obróbki, światłoczułości papierów fotograficznych, błon odwracalnych (pozytywowych) itp. można znaleźć w [9].

Odbiorniki fotoelektryczne

Zagadnieniami właściwości świetlno-elektrycznych odbiorników fotoelektrycznych, ich podziału oraz powiązania z układami wzmacniającymi i pomiarowymi zajmuje się elektronika. Z tego powodu ograniczymy się tu tylko do zwrócenia uwagi na charakterystyczne ich parametry istotne z punktu widzenia optyki.

Do najważniejszych należy *gęstość monochromatyczna reakcji* (czułość widmowa), która określa jednocześnie przedział widma, w którym odbiornik jest czuły i wielkość reakcji na jednostkę mocy promieniowania dla danej długości fali. Zwykle podaje się *niezależnie względną gęstość monochromatyczną reakcji* odniesioną do jej maksymalnej wartości przyjętej za 1 oraz *czułość ogólną* określaną jako reakcję odbiornika na promieniowanie źródła wzorcowego A wyrażoną w amperach na lm. Na rys. 2.100 po-



Rys. 2.100

dano charakterystyki widmowe komórki fotoelektrycznej z fotokatodą bizmutowo-cezową, fotoelementu selenowego i fotoopornika PbSe. Gęstość monochromatyczna reakcji w istotny sposób i bardzo różny dla różnych odbiorników zależy od temperatury odbiornika. Np. maksimum czułości fotoopornika PbSe w temperaturze 18°C przypada na $4\text{ }\mu\text{m}$. Przy oziębieniu do -250°C maksimum przesunęło się do $7\text{ }\mu\text{m}$. Zakres czułości prawie wszystkich odbiorników fotoelektrycznych obejmuje obszar widzialny widma, lub nieco poza niego wykracza (w nadfiolet, lub podczerwień). Jedynie fotooporniki przy odpowiednim oziębianiu pokrywają cały obszar podczerwieni (do $100\text{ }\mu\text{m}$).

Celem scharakteryzowania reakcji odbiorników najczęściej używa się pojęć fotometrycznych z uwagi na łatwość wzorcowania przyrządów pomiarowych. Gęstość monochromatyczna reakcji dowolnego odbiornika nie pokrywa się prawie nigdy z krzywą spektralnej czułości oka i może to prowadzić do poważnych nieporozumień, zwłaszcza wtedy, gdy odbiornik jest czuły również na promieniowanie nadfioletowe lub podczerwone. W tym ostatnim przypadku, jeżeli na odbiornik pada fala elektromagnetyczna o długości fali większej niż $0,76\text{ }\mu\text{m}$, to zgodnie z definicją pojęć fotometrycznych, naświetlenie będzie równe zeru, natomiast wystąpi reakcja odbiornika. Odwrotna sytuacja jest również możliwa. Jeżeli odbiornik jest czuły tylko na promieniowanie podczerwone, natomiast dociera do niego promieniowanie o długości fali poniżej $0,76\text{ }\mu\text{m}$, to mimo, że na powierzchnię odbiornika pada energia o ustalonym naświetleniu, odbiornik nie wykaże żadnej reakcji.

W przypadku, gdy gęstość monochromatyczna reakcji odbiornika nie pokrywa się z krzywą spektralnej czułości oka, to zależność reakcji od wielkości fotometrycznych ma tylko wtedy sens, gdy zakłada się, że rozkład spektralny energii docierającej do odbiornika nigdy nie ulega zmianie. Np. komórki fotoelektryczne są wzorcowane przy użyciu promieniowania ciała czarnego w temperaturze 2854 K oznaczonym przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową literą *A*. Przy obliczeniach układów, w których energia padająca na fotokatodę ma odmienny rozkład widmowy niż źródło *A*, posługiwanie się wartością czułości komórki fotoelektrycznej w jej cedulce prowadzi do błędów. Konieczne jest wtedy wzorcowanie odbiornika dla nowego źródła światła lub, jeżeli jest znana jego gęstość monochromatyczna reakcji, operowanie skomplikowanym rachunkiem obliczeń energetycznych (wzór 2.130).

Z punktu widzenia zastosowań w pomiarach fotometrycznych korzystną charakterystykę widmową ma fotoelement selenowy, którego maksimum czułości prawie pokrywa się z maksimum czułości spektralnej oka. Przez nałożenie na powierzchnię fotoelementu odpowiednich filtrów o selektywnym pochłanianiu można dopasować względną gęstość monochromatyczną reakcji odbiornika do czułości spektralnej oka i w ten sposób otrzymać obiektywny miernik wielkości fotometrycznych.

Największą czułość ogólną zapewniają fotopowielacze ale mają one duży poziom szumów własnych, co ogranicza dokładność pomiaru. Przy uwzględnieniu wpływów szumów odbiornika na sygnał mierzony należy pamiętać również o fluktuacjach promieniowania źródła światła, wynikających z jednej strony ze spontanicznej emisji fotonów przez źródło (szumy własne źródła, szczególnie zauważalne przy małej intensywności promieniowania), z drugiej strony z fluktuacji parametrów zasilania (np. wahania napięcia zasilania, zasilanie prądem zmiennym). Poza tym każde ciało jest źródłem promieniowania termicznego fal elektromagnetycznych, którego intensywność zależy od temperatury i współczynnika emisyjności ciała. Energia promieniowania ciał w temperaturach w pobliżu 20°C, pomijalna w zakresie widzialnym, w istotny sposób powiększa poziom szumów w podczerwieni. Poza tym powierzchnia światłoczuła odbiornika nie jest jednorodna i przy zestawieniu układu pomiarowego należy dążyć do niezmienności położenia na niej strumienia, ponieważ w przeciwnym przypadku dojdą jeszcze fluktuacje mające swe źródło w powierzchniowych zmianach czułości odbiornika. Należy również unikać skupienia strumienia energetycznego na małym obszarze powierzchni światłoczułej, ponieważ może to spowodować, zwłaszcza przy dużych strumieniach, zjawisko zmęczenia odbiorników.

Bliższe szczegóły o odbiornikach fotoelektrycznych można znaleźć w [11].

2.7.4. Wyznaczenie charakterystyki energetycznej obrazu danego przez układ optyczny

Niech będzie dany dostatecznie skorygowany układ *U* (rys. 2.101) ze źrenicą wejściową *Z* i wyjściową *Z'* i niech *dS* będzie elementem powierzchni przedmiotu (źródła) o znanej gęstości monochromatycznej luminancji energetycznej $L_{e,\lambda}$ znajdujący się dla uproszczenia na osi i prostopadły do niej. Jeżeli przez *dZ* oznaczony będzie element powierzchniowy źrenicy, to zgodnie z wzorem (2.123) i oznaczeniami na rysunku gęstość monochroma-