

Lucyna HEMKA
Maciej RAFAŁOWSKI

WPŁYW POLARYZACJI ŚWIATŁA NA SPOSÓB I JAKOŚĆ POMIARU JEGO PARAMETRÓW SPEKTORADIOMETRYCZNYCH

STRESZCZENIE *W pracy omówiono wpływ polaryzacji światła na wyniki pomiarów spektroradiometrycznych. Przeprowadzono pomiary testowe, które wykazały zmienność wyników pomiaru w funkcji kierunku i stopnia polaryzacji (całkowitej lub częściowej). Fakt częściowej polaryzacji światła odbitego od powierzchni np. wody (na drodze lub na jeziorach itp.) występuje w praktyce częściej niż mogłoby się wydawać, a w zastosowaniach technicznych może być realizowany celowo. Może to mieć znaczenie np. przy procesach identyfikacji barw w zautomatyzowanej aparaturze pomiarowej. W niezbędnych przypadkach, zwłaszcza w przypadku wymagań wysokich dokładności pomiarowych (np. w zastosowaniach badawczych), może to wymagać indywidualnej kalibracji urządzenia pomiarowego.*

Słowa kluczowe: *światło spolaryzowane, pomiary spektroradiometryczne, błędy pomiaru, identyfikacja barw*

dr Lucyna HEMKA

e-mail: l.hemka@iel.waw.pl

Zakład Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego
Instytut Elektrotechniki

prof. dr hab. inż. Maciej RAFAŁOWSKI

e-mail: wmr@aster.pl

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

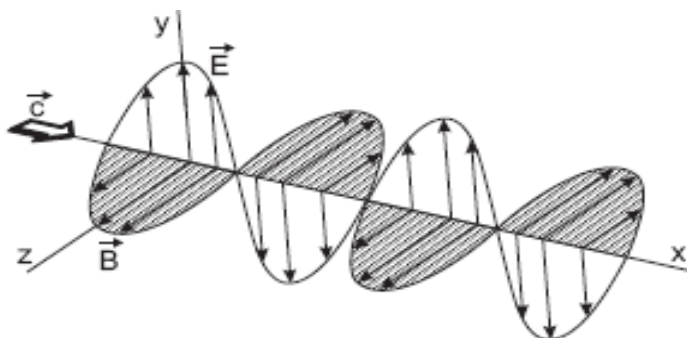
1. WSTĘP

W związku ze znacznym wzrostem zastosowania światła spolaryzowanego w różnych dziedzinach gospodarki, takich jak medycyna, materiałoznawstwo, technika kinowa i telewizyjna, kosmetologia, pojawił się problem kontroli parametrów tego światła. Można przewidywać, że wartości wielkości charakteryzujących światło częściowo lub całkowicie spolaryzowane, analizowane za pomocą typowych urządzeń pomiarowych (np. spektrofotometrów), mogą ulegać przekłamanom w uzyskanych wynikach pomiarów.

Wynika to w szczególności z zaburzeń transmisji promieniowania tego rodzaju w torach pomiarowych ww. aparatury. W celu uniknięcia tego typu zafałszowań, należałoby praktycznie zawsze przy pomiarach parametrów światła stosować depolaryzatory – powodujące oczywiście nieuniknione straty energetyczne w wiązce, lub – stosowane w fotografii – układy ćwierćfalowe, wprowadzające polaryzację kołową w torze pomiarowym. Powoduje to oczywiście szereg konsekwencji [1], szczególnie w zakresie ograniczeń, wynikających ze skuteczności procesu wprowadzania polaryzacji kołowej w całym zakresie widmowym, podlegającym analizie – na ogół (400-800 nm.). Niestety, najczęściej jest to problem lekceważony lub z przyczyn technicznych niemożliwy do zrealizowania. W ramach niniejszej pracy zbadano wpływ stanu polaryzacji światła (spolaryzowanego w różnym stopniu) na wyniki pomiarów, ze szczególnym uwzględnieniem zaburzeń oceny barwy i temperatury barwowej.

2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

Światło widzialne jest falą elektromagnetyczną o długości z zakresu 380-760 nm. Jest to fala poprzeczna; oznacza to, że w ośrodkach izotropowych płaszczyzna drgań wektora pola elektrycznego E oraz płaszczyzna drgań wektora pola magnetycznego B są prostopadłe do kierunku wektora falowego, tzn. do kierunku propagacji światła. Zwykła wiązka światła emitowana jest przez wiele niezależnych atomów lub molekuł źródła promieniowania. Każde z tych źródeł emituje falę elementarną (foton) z jej własną orientacją wektora E . Przy dużej liczbie atomów źródła, wszystkie kierunki wektora E są równie prawdopodobne i sumaryczna fala, będąca superpozycją fal emitowanych przez poszczególne atomy, jest światłem niespolaryzowanym.

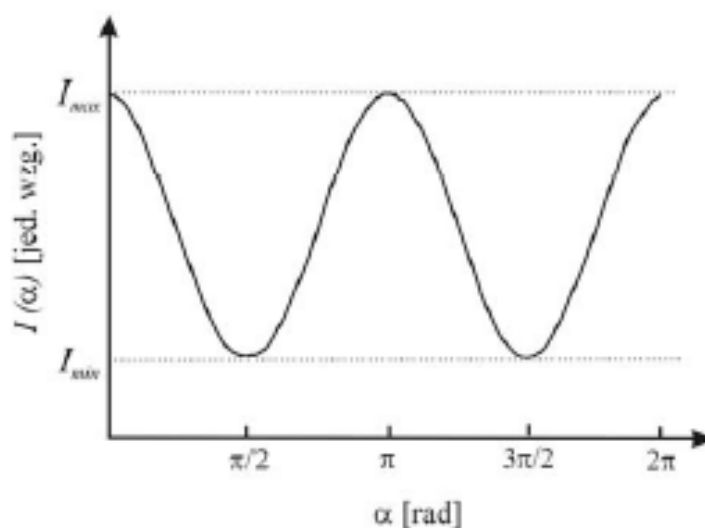


Rys. 1. Fala elektromagnetyczna rozchodząca się w kierunku x

Światło, w którym kierunki drgań są w jakiś sposób uporządkowane, nazywamy światłem spolaryzowanym. Zjawisko polaryzacji występuje tylko dla fal poprzecznych. Za kierunek polaryzacji przyjmujemy kierunek wektora natężenia pola elektrycznego E , który nazywany jest „wektorem świetlnym”. Polaryzacja fali polega na uporządkowaniu kierunków drgań poprzecznych fali elektromagnetycznej. Uporządkowanie to może być częściowe (polaryzacja częściowa) lub całkowite (polaryzacja całkowita). Gdy uporządkowanie polega na ograniczeniu kierunku drgań do tylko jednej płaszczyzny, nosi ono nazwę polaryzacji liniowej fali. Płaszczyzna, w której zachodzą drgania wektora E , nazywa się płaszczyzną polaryzacji. Światło spolaryzowane liniowo jest granicznym przypadkiem światła spolaryzowanego eliptycznie, dla którego wektor natężenia pola elektrycznego zmienia się w czasie tak, że koniec jego wektora opisuje elipsę. W ogólnym przypadku polaryzacji eliptycznej wektor natężenia pola elektrycznego E fali zakreśla w przestrzeni linię śrubową (helisę) – analogicznie, jak wektor natężenia pola magnetycznego B , przy czym warunek wzajemnej prostopadłości E i B spełniany jest stale. Światło spolaryzowane eliptycznie może być traktowane jako złożenie dwu drgań wektora E wzajemnie prostopadłych, różniących się między sobą określoną różnicą faz (przy równych amplitudach składowych drgań w obu kierunkach staje się ono spolaryzowane kołowo) [2].

Graficznie stopień polaryzacji najłatwiej zobrazować, korzystając z założenia, że źródło wiązki świetlnej jest częściowo-liniowo spolaryzowane, a na jej drodze

Światło, w którym kierunki drgań są w jakiś sposób uporządkowane, nazywamy światłem spolaryzowanym. Zjawisko polaryzacji występuje tylko dla fal poprzecznych. Za kierunek polaryzacji przyjmujemy kierunek wektora natężenia pola elektrycznego E , który nazywany jest „wektorem



Rys. 2. Zależność natężenia wiązki świetlnej w funkcji kąta polaryzatora α dla częściowo-liniowo spolaryzowanej wiązki świetlnej

ustawiono ruchomy (obrotowo) polaryzator. Wówczas obrót polaryzatora prowadzi do zmian natężenia wiązki świetlnej, jak pokazano to na rysunku 2.

Określając stąd natężenie maksymalne I_{max} i minimalne I_{min} wiązki świetlnej po przejściu przez polaryzator, stopień polaryzacji definiuje się jako stosunek różnicy i sumy tych natężeń [3]:

$$p = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \quad (1)$$

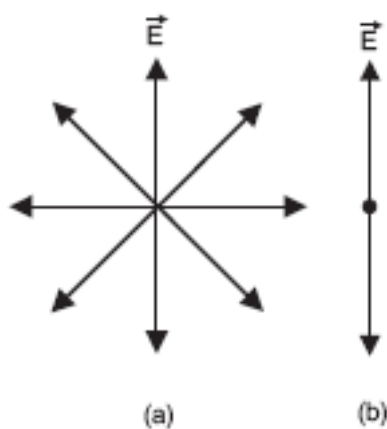
gdzie:

$$I_{max} = I_P + \frac{1}{2} I_N; \quad I_{min} = \frac{1}{2} I_N$$

a stąd

$$p = I_P / (I_P + I_N) = I_P / I_0$$

I_{max} i I_{min} to maksymalne i minimalne natężenia światła o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji; I_N – natężenie niespolaryzowanej części wiązki świetlnej.



Rys. 3. a) światło niespolaryzowane, b) światło spolaryzowane liniowo

Światło spolaryzowane uzyskuje się stosując urządzenia polaryzujące.

Warto jednak na wstępie podkreślić fakt, że – co jest istotne przy wprowadzaniu polaryzacji liniowej do wiązki świetlnej w celach użytkowych – zawsze następują nieuniknione straty energii rzędu 50-75%. Wyjątkiem są pewne typy rezonatorów laserowych – wykraczają one jednak poza zakres niniejszych analiz.

3. PRZEBIEG POMIARÓW

Układ doświadczalny

Celem eksperymentu jest określenie uwarunkowań, wpływających na efektywność i dokładność pomiarów spektrometrycznych w zakresie światła widzialnego.

Jest to istotne w przypadku, gdy należy oczekiwać, że oświetlenie użytkowe lub realizowane w celach terapeutycznych, medycznych i kosmetycznych bądź w technikach kinowych (np. projekcja 3D) będzie w jakimś stopniu częściowo spolaryzowane. Powstaje problem określenia, czy zmierzone i przyjęte do analiz projektowych (lub np. do oceny przydatności terapeutycznej albo wymagań ergonomii) cechy promieniowania, takie jak energia, rozkład spektralny lub np. temperatura barwowa, odpowiadają rzeczywistości lub potrzebom praktycznym z wystarczającą dokładnością.

W skład układu doświadczalnego wchodzi: źródło światła; dwa polaryzatory liniowe; dwie płytki ćwierćfalowe $\lambda/4$; badany przyrząd pomiarowy (analizator promieniowania). Wszystkie elementy układu doświadczalnego umieszczone zostały w uchwytach, co umożliwia łatwą zmianę ich położenia na ławie optycznej.

Opis stanowiska i metodyki oraz przebiegu eksperymentu

Badaniom wpływu światła spolaryzowanego na przebieg pomiarów poddano spektrometr.

Przeprowadzono eksperyment pomiaru transmisji w zakresie widzialnym dla wiązek:

- niespolaryzowanej;
- spolaryzowanej liniowo równolegle do płaszczyzny schematu optycznego przyrządu (poziomo);
- spolaryzowanej liniowo prostopadle do płaszczyzny schematu optycznego przyrządu (pionowo);
- spolaryzowanej liniowo pod kątem 45° do płaszczyzny schematu optycznego przyrządu;
- spolaryzowanej kołowo, np. dla średniej długości fali (ca 532 nm);
- spolaryzowanej eliptycznie w stos. $1/2$, np. dla średniej długości fali dla orientacji (równolegle, prostopadle, pod kątem 45°).

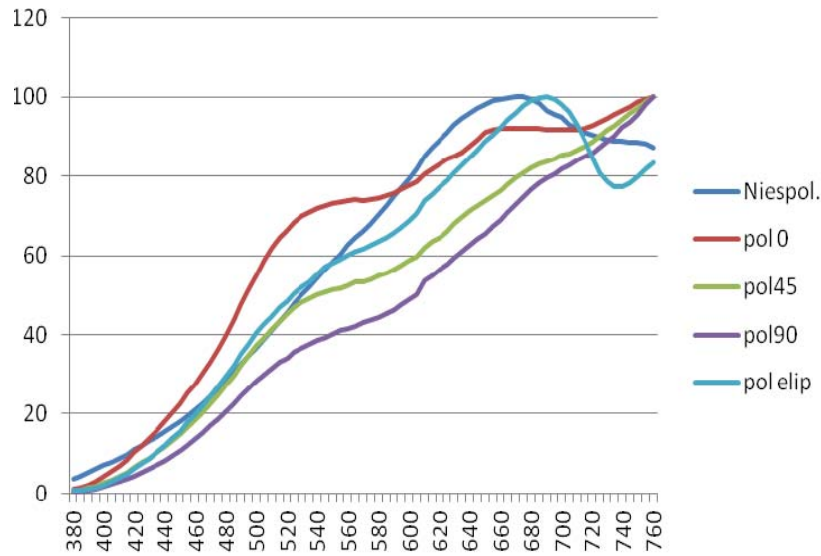
Warto przypomnieć, że dyskutowane tutaj aspekty metodyczne pomiarów promieniowania optycznego, choć niewątpliwie wykazujące wpływ na mierzone wartości (a więc również na ocenę analizowanego światła), nie są powiązane z własnościami samego układu pomiarowego. Jeżeli w jego konfiguracji optycznej istnieją elementy odbijające lub światłdzielące, implikuje to poszerzenie analizy o czynniki zmieniające polaryzację wiązek analizowanych (np. dla różnych zakresów widmowych) wewnątrz samego układu optycznego miernika. Wyraźnie ilustrują to przedstawione poniżej w tabeli 1 pomiary spektrometryczne.

TABELA 1Wpływ polaryzacji wiązki świetlnej na wyniki pomiarów spektrometrycznych [$\mu\text{W}/\text{cm}$]

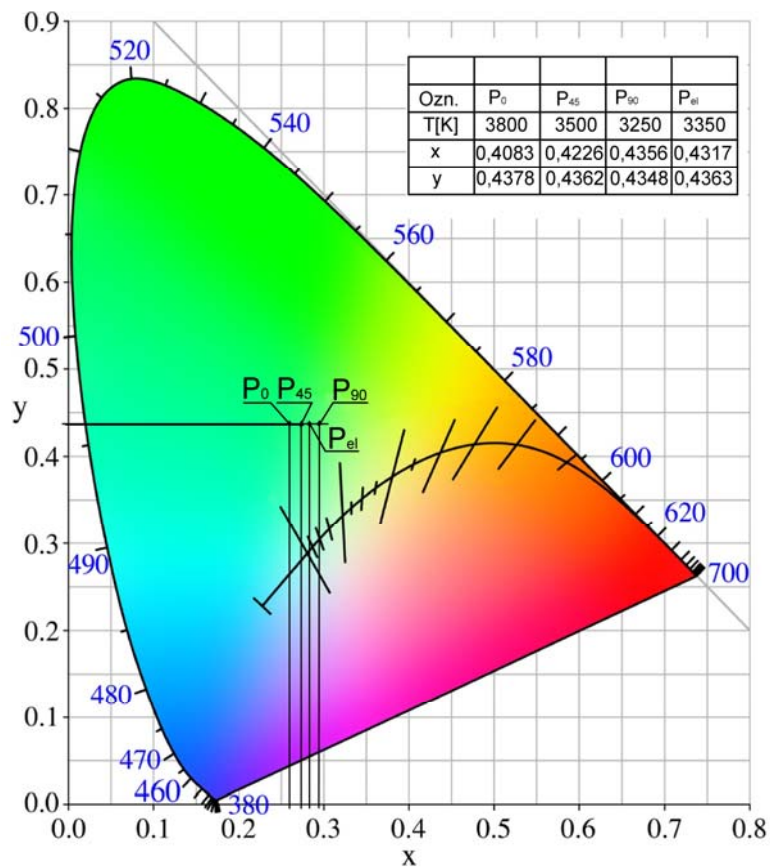
Długość fali [nm]	Niespolaryzowane	Polaryzacja liniowa 0°	Polaryzacja liniowa 45°	Polaryzacja liniowa 90°	Polaryzacja eliptyczna
380	3,69	0,96	0,56	0,34	0,71
385	4,34	1,43	0,85	0,53	0,66
390	5,25	2,13	1,28	0,81	1,03
395	6,16	3,04	1,83	1,19	1,53
400	7,03	4,16	2,53	1,66	2,17
405	7,93	5,43	3,34	2,23	2,95
410	8,83	6,88	4,27	2,87	3,85
415	9,85	8,51	5,32	3,59	4,92
420	10,93	10,25	6,46	4,37	6,12
425	12,07	12,11	7,68	5,24	7,46
430	13,16	14,01	8,93	6,17	8,87
435	14,37	15,91	10,26	7,15	10,39
440	15,52	17,97	11,65	8,21	12,03
445	16,75	20,29	13,18	9,39	13,77
450	17,99	22,56	14,77	10,66	15,62
455	19,37	25	16,45	12,05	17,6
460	20,94	27,46	18,28	13,65	19,73
465	22,61	30,2	20,34	15,32	22,03
470	24,4	33,12	22,53	17,01	24,39
475	26,37	36,42	24,91	18,8	26,95
480	28,46	39,97	27,23	20,66	29,53
485	30,46	43,69	29,66	22,59	32,26
490	32,52	47,45	32,22	24,47	34,98
495	34,7	51,29	34,73	26,36	37,7
500	36,68	55,05	37,16	28,15	40,63
505	38,89	58,7	39,22	29,84	42,64
510	41,1	61,79	41,41	31,51	44,72
515	43,37	64,38	43,24	32,96	46,88
520	45,61	66,55	45,17	34,21	48,58
525	47,87	68,46	46,85	35,61	50,4
530	50,05	69,91	48,15	36,73	51,88
535	52,14	71,02	49,21	37,59	53,27
540	54,33	71,87	49,94	38,47	55,36
545	56,34	72,55	50,75	39,34	57,23
550	58,33	73,06	51,4	40,29	58,22
555	60,33	73,45	51,78	41,01	59,19
560	62,58	73,74	52,47	41,45	60
565	64,42	74,02	53,34	42,12	60,84

c.d. tabeli 1

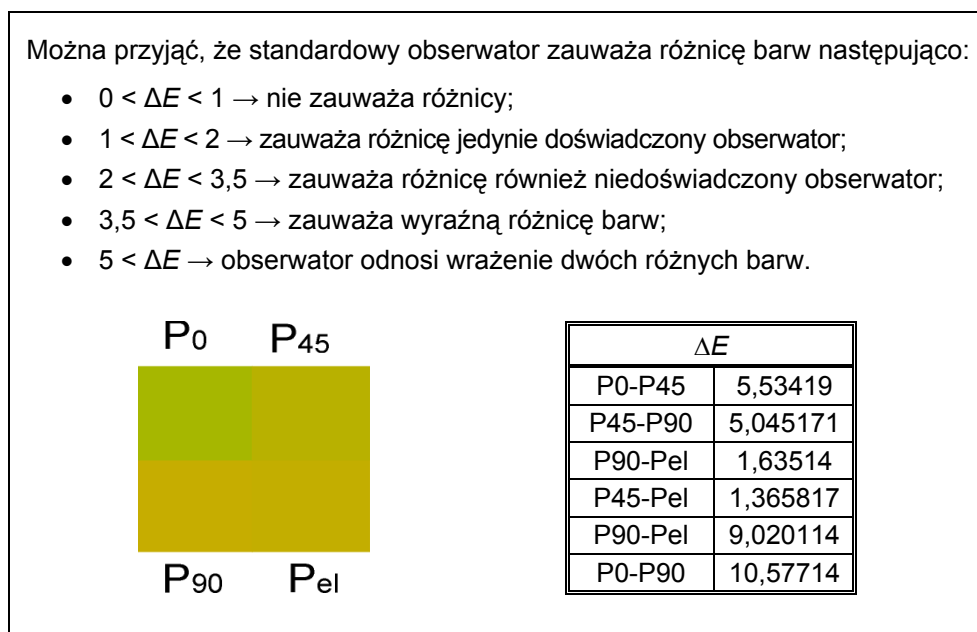
570	66,22	73,88	53,38	42,93	61,62
575	68,16	74,14	54,08	43,55	62,62
580	70,31	74,4	54,99	44,41	63,46
585	72,63	74,96	55,5	45,29	64,55
590	74,99	75,72	56,48	46,26	65,87
595	77,1	76,67	57,46	47,42	67,2
600	79,36	77,66	58,61	48,68	68,8
605	81,75	78,57	59,58	50,08	70,52
610	84,92	80,48	62,06	53,48	73,79
615	87,18	81,77	63,39	54,9	75,46
620	89,26	82,93	64,66	56,4	77,2
625	91,17	84,21	66,13	57,88	78,87
630	92,92	85,05	68,04	59,39	80,83
635	94,5	86,11	69,56	60,93	82,89
640	96,01	87,71	71,18	62,48	84,53
645	97,22	89,25	72,62	64,12	86,56
650	98,26	90,95	73,88	65,57	88,91
655	99,1	91,84	75,03	67,27	90,34
660	99,52	91,97	76,34	69	92,36
665	99,89	91,91	77,98	70,89	94,42
670	100	92,02	79,48	72,77	95,97
675	99,9	92,05	80,72	74,65	97,66
680	99,28	92,12	82	76,54	99,15
685	98,4	91,97	83,06	78,16	99,84
690	96,55	91,82	83,83	79,45	100
695	95,45	91,76	84,48	80,63	99,34
700	94,77	91,8	85,32	81,76	98,22
705	93,01	91,7	85,78	82,91	96,13
710	92,06	91,57	86,54	83,92	93,05
715	91,02	92,01	87,49	84,87	89,31
720	90,34	92,53	88,57	85,75	84,93
725	89,9	93,52	89,99	87,1	80,95
730	89,04	94,67	91,65	88,77	78,53
735	88,84	95,66	92,81	90,27	77,31
740	88,73	96,44	94,36	92,22	77,26
745	88,63	97,37	95,96	93,73	78,24
750	88,58	98,84	97,26	95,59	79,75
755	88,27	99,44	98,81	97,99	81,69
760	87,17	100	100	100	83,26



Rys. 4. Względne rozkłady widmowe wiązki światła niespolaryzowanego oraz spolaryzowanego liniowo i eliptycznie



Rys. 5. Pozorny efekt zmiany barwy światła spolaryzowanego w zależności od kierunku polaryzacji (względem płaszczyzny układu optycznego miernika) wykazywany przez pomiary z tabeli 1



Rys. 6. Wizualizacja i ocena widoczności zmiany barwy według pomiarów z tabeli 1 i rysunku 5

Przestrzeń CIE_{XYZ} można przekształcić na przestrzeń barwną CIE_{Lab} według związków:

$$L = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - 16 \quad (2)$$

$$a = 500 \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} \right) \quad (3)$$

$$b = 200 \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}} \right) \quad (4)$$

gdzie: $X_0 = 94,81$; $Y_0 = 100,0$; $Z_0 = 107,3$ – są współrzędnymi barwy ciała nominalnie białego.

CIE_{Lab} jest obecnie najpopularniejszym sposobem opisu barwy i stanowi podstawę współczesnych systemów zarządzania barwą. Różnica ΔE pomiędzy dwiema barwami w przestrzeni CIE_{Lab} ma postać:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (5)$$

i jest zwykłą odległością euklidesową pomiędzy dwoma punktami w przestrzeni trójwymiarowej.

Należy wyraźnie podkreślić, że symulowane efekty wykazane na rysunkach 4 i 5 są pozorne i mogą mieć znaczenie przy procesach identyfikacji barw w zautomatyzowanej aparaturze pomiarowej. W rzeczywistych warunkach obserwacji wizualnej nie są one widoczne, ponieważ oko ludzkie nie wykazuje wrażliwości na kierunek i charakter polaryzacji światła widzialnego.

Interpretacja wyników pomiarowych składowych barwnych oraz temperatury barwowej uzyskanych eksperymentalnie podczas modelowania wiązki spolaryzowanej oraz badania jej wpływu na własności pomiarowe analizowanego przyrządu nie jest jednoznaczna. Składa się na to kilka czynników:

- najczęściej stosowane urządzenie polaryzujące – polaroidy absorpcyjne błonowe – poza zjawiskiem selektywnej absorpcji, zależnej od kierunku drgań (zgodnie z zasadą działania polaroidów), wykazują również nierównomierną absorpcję widmową, co musi wpływać na rozkład widmowy mierzonego promieniowania;
- analizując przyczyny częściowej polaryzacji światła w środowisku naturalnym, nie sposób nie zauważyć, że najczęstszą przyczyną tego zjawiska jest odbicie (częściowe lub całkowite) na granicy ośrodków dielektrycznych (np. szkło, powierzchnia wody itp.). Stopień i kierunek polaryzacji zależą wtedy oczywiście od dyspersji ww. materiałów oraz od kierunku odbicia. W takiej sytuacji zastosowanie dowolnych układów selekcji kierunku polaryzacji w układzie badawczo-pomiarowym musi powodować zmiany intensywności rejestrowanej dla różnych długości fali, a więc również zmieniać wyniki pomiarów badanego promieniowania;
- ponieważ ww. zjawiska są trudne do opisu uogólniającego i w oczywisty sposób zależne od konkretnej sytuacji, należy przypuszczać, że w niezbędnych przypadkach będzie wymagana indywidualna kalibracja urządzenia pomiarowego, zwłaszcza w przypadku wymagań wysokich dokładności pomiarowych (np. w zastosowaniach badawczych).

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono istotny wpływ stanu polaryzacji światła na wyniki pomiarów spektrometrycznych.

W zależności od przeznaczenia badanych układów, wytwarzających światło całkowicie lub częściowo spolaryzowane, podczas prowadzenia pomiarów określających ich charakterystyki emisyjne, należy zwracać szczególną

uwagę na sprecyzowanie faktycznych wymagań nt. polaryzacji emitowanego światła (stanu, kierunku i stopnia), ponieważ wiąże się to na ogół z istotnymi stratami energetycznymi.

W aspekcie oceny parametrów spektralnych problem uściślenia wymagań aplikacyjnych nt. stanu polaryzacji poszczególnych obszarów widma emisji nabiera specyficznej wagi ze względu istotne trudności technologiczne w zapewnieniu jednoznacznej i powtarzalnej charakterystyki takiej emisji.

Zagadnienie opracowania praktycznie użytecznego sposobu opisu ww. parametrów w kontekście ich zastosowań technicznych i medycznych pozostaje na dzisiaj problemem nierozstrzygniętym.

LITERATURA

1. Brosseau C.: *Fundamentals of polarized light: a statistical optics approach*, Wiley, 1998.
2. Crawford F.C.: *Berklejowski kurs fizyki, tom 3: Fale*, PWN, Warszawa, tłumaczenie z *Berkeley Physics Course – Volume 3: Waves*.
3. Halliday D., Resnick R.: *Fizyka dla studentów nauk przyrodniczych, Tom 2*, PWN, Warszawa.
4. Hecht E.: *Optics*, Addison Wesley, 4th edition 2002.
5. Können G.P.: *Polarized Light in Nature*, Translated by G.A. Beerling, Cambridge University Press, 1985.
6. *Principles of Optics*, M. Born & E. Wolf, Cambridge University Press, 7th edition 1999.
7. Pye D.: *Polarised Light in Science and Nature*, Institute of Physics Publishing, 2001.
8. Shurcliff W.A.: *Polarized Light, Production and Use*, Harvard University Press, 1962.
9. http://www.optyczne.pl/7.1-Inne_testy-Test_filtrów_polaryzacyjnych.html.
10. Szczurowski M.: *Test filtrów polaryzacyjnych*, http://www.optyczne.pl/7.30-Inne_testy-Test_filtrów_polaryzacyjnych.html.
11. Wolf E.: *Selected Works of Emil Wolf with Commentary*, World Scientific, Singapore, 184-188, 198-214, 2001.

THE INFLUENCE OF LIGHT POLARIZATION
ON THE WAY AND QUALITY OF ITS
SPECTRORADIOMETRIC PARAMETERS

Lucyna HEMKA
Maciej RAFAŁOWSKI

ABSTRACT *In this work Influence of light polarization on results of spectroradiometric measurements of light parameters is discussed. Test measurements are carried out, which have exerted variability of result of measurement in function of direction and degree of polarization (full or partial). Fact of partial polarization of light reflected from flat surface (on roads or lakes etc) often takes a stand in practice – in different degree. It can be realized in technical employment expediently. It can be meaning full e.g. at process of color identification in automated measuring equipment. In essential cases, especially in high claimed measuring accuracy requirements (e.g. in investigative employment) the individual i calibration of measuring device can be necessary. The influence of light polarization on the method and quality of its spectrofotometric parameters.*

Keywords: *polarized light, spectroradiometric measurements, measuring errors, colour identification*