

Właściwości kryształów fotonicznych umożliwiające ich wykorzystanie w poligrafii

Słowa kluczowe: kryształ fotoniczny, fotoniczna przerwa wzbroniona, współczynnik załamania światła, zabezpieczenie dokumentów

Wprowadzenie

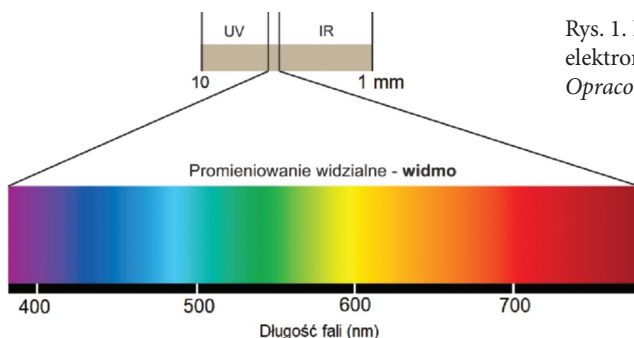
Światło od zawsze jest ważne dla człowieka. Współczesna technologia fizykochemiczna powoli wypiera konwencjonalną elektronikę, zastępując ją właśnie światłem, które służy nie tylko do obserwowania świata, ale również do komunikowania się. Stanowi bowiem podstawę obiegu informacji w całej cywilizacji. Sygnał sterowany przepływem elektronów zostaje zamieniany na przepływ fotonów.

Jedną z najnowszych rewolucji w nauce oraz technologii jest odkrycie niezwykłych właściwości kryształów fotonicznych, nad którymi obecnie prowadzone są liczne badania w wielu ośrodkach naukowo-badawczych. Mają one na celu gruntowne poznanie właściwości oraz wykorzystanie już poznanych. Kryształy fotoniczne – dzięki swojej budowie – umożliwiają swobodną zmianę barwy w kontrolowany sposób. Z tego powodu znalazły już zastosowanie w poligrafii, przede wszystkim jako rodzaj zabezpieczenia dokumentów oraz marki produktu.

Informacje ogólne

Dla zrozumienia mechanizmu zmiany barwy w kryształach fotonicznych, należy przypomnieć jedną z najważniejszych cech światła, czyli jego dualizm korpuskularno-falowy.

Światło jest promieniowaniem optycznym, czy też inaczej: rodzajem promieniowania elektromagnetycznego fali o długości w zakresie $380\div 760$ nm, które jest widzialne okiem ludzkim [16]. Fragment widma fali elektromagnetycznej przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Fragment widma fali elektromagnetycznej
Opracowanie własne na podstawie [14]

W oddziaływaniu światła z materią uwidaczniają się jego właściwości falowe i korpuskularne, które wykazują obiekty kwantowe. Właściwości falowe światła ujawniają się w takich zjawiskach, jak:

- odbicie,
- załamanie,
- dyfrakcja,
- interferencja,
- polaryzacja.

Z kolei korpuskularność przejawia się w:

- absorpcji światła doprowadzającej do luminescencji, fotoefektu i jonizacji,
- ciśnieniu promieniowania wywieranym przez światło.

Ze względu na fakt, że światło oddziałuje z materią i przejawia właściwości korpuskularne, zachowuje się jak strumień cząstek zwanych fotonami, których energia jest równa:

$$E = h\nu \quad (1)$$

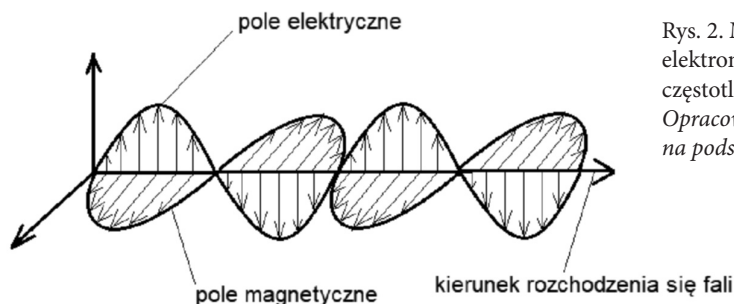
gdzie:

h – stała Plancka = $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

ν – częstotliwość fali elektromagnetycznej [5], [15].

Wraz ze wzrostem częstotliwości promieniowanie świetlne traci charakter falowy. Fale elektromagnetyczne – w miarę zwiększania ich częstotliwości – coraz bardziej zachowują się jak promieniowanie korpuskularne, ponieważ przy bardzo małej długości fali nie obserwuje się już zjawiska ugięcia. Wzrasta natomiast energia kwantu, która przy małej częstotliwości nie wystarcza, by wywołać obserwowalny efekt. Przy krótkofalowym promieniowaniu już pojedynczy kwant świetlny wywołuje istotne przekształcenia w układach atomowych [15].

Zmieniające się w czasie pola: elektryczne i magnetyczne, powodują powstanie fal elektromagnetycznych. Oba pola powstają na przemian i są ze sobą sprzężone, dlatego umożliwiają rozchodzenie się fali. Na rysunku 2 przedstawiono schemat rozchodzenia się fali elektromagnetycznej.



Rys. 2. Monochromatyczna fala elektromagnetyczna o określonej częstotliwości i długości
Opracowanie własne na podstawie [15]

Wektory natężeń pól: elektrycznego i magnetycznego są prostopadłe do siebie i do kierunku rozchodzenia się fali. Kierunek ten stanowi wektor falowy. Należy dodać, że fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi a całkowita ich energia

jest sumą energii elektrycznej i magnetycznej, które są sobie równe. Fala wiąże się z przepływem energii, przy której energia zawarta w danej jednostce objętości jest przenoszona z prędkością światła c w kierunku rozprzestrzeniania się fali [15].

Kryształy fotoniczne (ang. *photonic crystals*) są materiałami makroskopowymi, składającymi się z przynajmniej dwóch warstw dielektrycznych o naprzemiennie zmiennej wartości współczynnika załamania światła. W związku z tym w pewnych warunkach następuje uniemożliwienie *propagacji*¹ fal dla określonego przedziału widma fal [6]. To z kolei doprowadza do utworzenia tzw. fotonicznej przerwy wzbronionej (ang. *photonic band gap*). Grubość warstw aktywnych równa jest od 200 do 300 nm, a to znaczy, że rozmiary liniowe elementów budowy są porównywalne z długością fali elektromagnetycznej [20].

Kryształy fotoniczne – dzięki obecności fotonicznej przerwy wzbronionej – umożliwiają kontrolowaną transmisję światła. Prezentują nieskończoną liczbę kolorów w trybie ciągłego ich przesuwania. Utworzenie barwy odbywa się poprzez zachodzące w ich strukturze fotoniczne zmiany, co wcześniej można było osiągnąć tylko poprzez syntezę uzupełniających się kolorów:

- dla mieszaniny addytywnej RGB,
- dla mieszaniny subtraktywnej CMYK [18].

Mieszanina addytywna jest to pojęcie określające syntezę światła emitowanego, wykorzystywaną w pracy monitorów czy innych wyświetlaczy. Emitują one wiązki światła barw podstawowych: czerwonej R (*red*), zielonej G (*green*), niebieskiej B (*blue*). Czarny ekran jest wynikiem braku emisji światła, natomiast biały to wynik sumy barw podstawowych [3].

Mieszanina subtraktywną określamy natomiast mieszanie barw światła odbitego, np. wydruk na papierze. Przyjmuje się, że w takim wypadku kolorami podstawowymi są: cyjan C, magenta M i yellow Y. W tym wypadku czarny jest wynikiem sumy kolorów podstawowych. Podczas drukowania farba drukowa tworzy transparentny filtr. Niepochłonięte długości fal elektromagnetycznych docierają do oka, tworząc wrażenie określonej barwy [3].

Przykłady naturalnego występowania kryształów fotonicznych występują w przyrodzie: motyl Blue Morpho z Ameryki Południowej, opal australijski jako kamień szlachetny czy też kameleon. U tego ostatniego zmianę barwy umożliwiają komórki skóry składające się z warstw o naprzemiennie zmiennych wartościach współczynnika załamania światła, wynoszących odpowiednio: 1,33 dla cytoplazmy i 1,83 dla guaniny. Uczucie zagrożenia powoduje w komórkach skóry przekształcenia geometryczne, a to doprowadza do zmiany jej barwy [18].

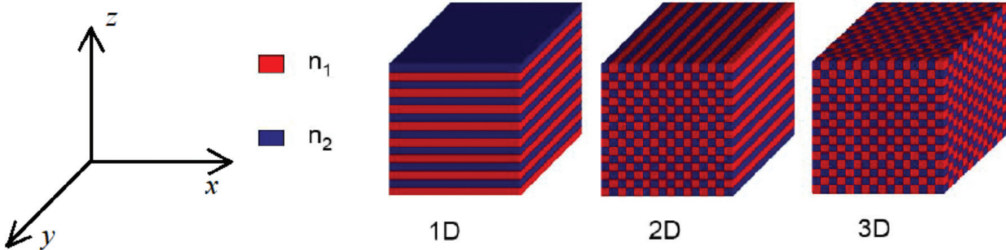
Rodzaje kryształów fotonicznych

Zmiana wartości współczynnika załamania światła może występować w trzech kierunkach, dlatego wyróżnia się kryształy fotoniczne:

[1] Propagacja – to całokształt zjawisk związany ze swobodnym rozchodzeniem się fal w jakimś ośrodku [11].

- jednowymiarowe,
- dwuwymiarowe,
- trójwymiarowe [22].

Kryształy jednowymiarowe charakteryzują się zmianą wartości współczynnika załamania światła tylko w jednym kierunku. W kryształach dwuwymiarowych ta zmiana może wystąpić w dwóch kierunkach, a w trójwymiarowych we wszystkich. Przykłady tych kryształów przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Kryształy fotoniczne: 1D, 2D, 3D [10]

Kierunek zmiany wartości współczynnika załamania światła decyduje o kierunku występowania przerwy spektralnej, czyli fotonicznej przerwy wzbronionej. Przykładowo, jeżeli kryształ fotoniczny jest jednowymiarowy i zmiana wartości współczynnika załamania światła występuje w kierunku x , to tylko w tym kierunku może wystąpić wspomniana przerwa spektralna.

Współczynnik załamania światła wyraża się wzorem (2):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

gdzie:

n – współczynnik załamania światła [–],

c – prędkość światła w próżni o wartości ok. $3 \cdot 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$,

v – prędkość światła w danym ośrodku $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ [16].

i mocno wiąże się ze względną przenikalnością dielektryczną, co przedstawiono równaniem (3):

$$n \cong \sqrt{\varepsilon_r} \quad (3)$$

gdzie:

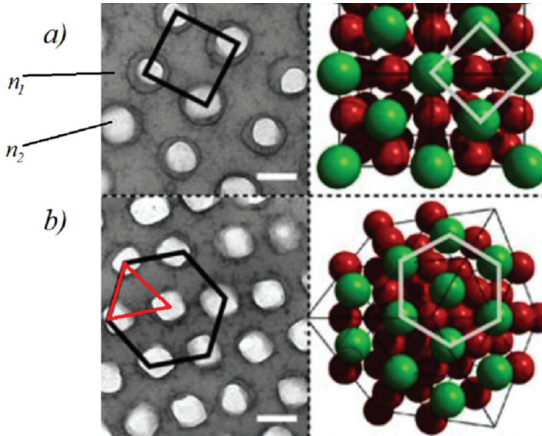
n – współczynnik załamania światła [–],

ε_r – względna przenikalność dielektryczna $\left[\frac{\text{F}}{\text{m}} \right]$ [21].

Podsumowując: kierunek zmiany wartości współczynnika załamania światła, a tym samym wartości względnej przenikalności elektrycznej wpływa na obecność w tymże kierunku fotonicznej przerwy wzbronionej, co ostatecznie powoduje zmianę barwy.

Konfiguracje kryształów fotonicznych

Warstwy tworzące kryształ fotoniczny, czyli te o naprzemiennie zmiennych wartościach współczynnika załamania światła, ułożone są w konfiguracji kwadratowej lub trójkątnej [22], które pokazano na rysunku 4.

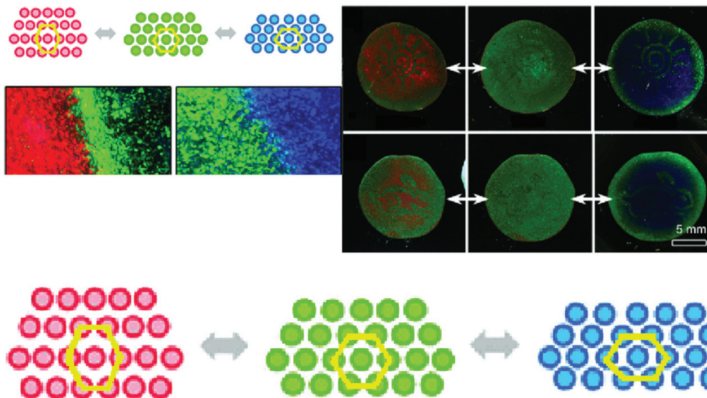


Rys. 4. Kryształ fotoniczny o konfiguracji:
a) kwadratowej,
b) trójkątnej [18]

Zmianę barwy powodują:

- 1) zmianę konfiguracji sieci z kwadratowej na trójkątną lub odwrotnie,
- 2) zmianę odległości pomiędzy komórkami o tej samej wartości współczynnika załamania światła,
- 3) nieznaczne zmiany geometrii w kryształ fotonicznym, np. kształt komórki.

Rysunek 5 schematycznie pokazuje mechanizm zmiany barwy, zależnej od czynników: 1), 2), 3) w kryształ fotonicznym 2D o konfiguracji trójkątnej.



Rys. 5. Zmiana barwy zależna od przekształceń geometrycznych konfiguracji dla sieci trójkątnej [12]

Można zauważyć, że komórki sieci o konfiguracji trójkątnej tworzą sześciokąt. W wypadku gdy jest idealnie symetryczny, jak na rysunku, barwa jest zielona. Po nieznacznym spłaszczeniu sześciokąta w pionie lub w poziomie, jego barwa zmienia się na czerwoną lub niebieską.

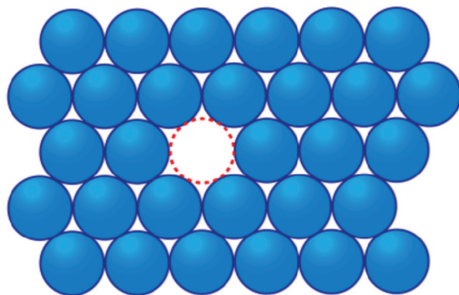
Fotoniczna przerwa wzbroniona

Jedną z najważniejszych właściwości kryształów fotonicznych jest występowanie fotonicznej przerwy wzbronionej, czyli przerwy spektralnej dla określonej długości i częstotliwości fal elektromagnetycznych. O kryształach fotonicznych, mówi się że są to materiały „pułapkujące” światło [7].

Do kryształów fotonicznych celowo wprowadza się defekty struktury i wyróżnia się wówczas:

- punktowe, gdy zostaje usunięty element budowy,
- liniowe, gdy zostaje usunięta linia elementów budowy,
- liniowe z dodatkową ingerencją w defekt [22].

Na rysunku 6 przedstawiono punktowy defekt w strukturze.



Rys. 6. Punktowy defekt w strukturze kryształu fotonicznego [13]

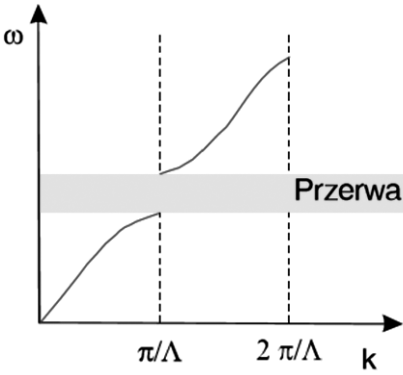
Fale elektromagnetyczne rozprzestrzeniają się w kryształ, który nie jest jednorodny optycznie. Oznacza to, że nawet niewielka niejednorodność ośrodka zaburza prostoliniowy bieg fali. Oddziałujące z elementami struktury światło, rozchodzi się nierównomiernie. Konsekwencją tej niejednorodności optycznej są zachodzące w strukturze zjawiska załamania bądź odbicia światła oraz konstruktywnej i destruktywnej interferencji. Defekty pozwalają zlokalizować oraz ukierunkować bieg fali elektromagnetycznej i wtedy jej część ulega zjawisku rozproszenia. [20]

Strefa Brillouina

Fotoniczna przerwa wzbroniona jest ściśle powiązana z obecnością *strefy Brillouina*². W przypadku kryształów półprzewodnikowych w tej strefie energia potencjalna zmienia się w przestrzeni kryształu w sposób okresowy, a elektrony znajdujące się w kryształach układają się w pasma energetyczne. Dozwolone stany energetyczne są skwantowane, a ich poziomy grupują się w odpowiednie pasma przewodnictwa oddzielone od siebie pasmami wzbronionymi, czyli takimi, w których stany energetyczne nie mogą być obsadzone [17]. Strefa Brillouina w kryształach półprzewodnikowych jest zależnością energii elektronu od wektora falowego, a w przypadku kryształów fotonicznych jest zależnością częstości kołowej *fononu*³ od wektora falowego, co przedstawiono na rysunku 7.

[2] Strefa Brillouina to obszar, w którym wszystkie wartości własne energii są dopuszczalne, wtedy elektrony tworzą pasmo dozwolone [4].

[3] Fonony to drgania cieplne sieci krystalicznej [2].



Rys. 7. Zależność energii elektronu od wektora falowego [4]

Można zauważyć, że funkcja nie jest ciągła dla liczb falowych o wartościach wyrażonych wzorem (4):

$$k = \frac{\pi}{\Lambda} \tag{4}$$

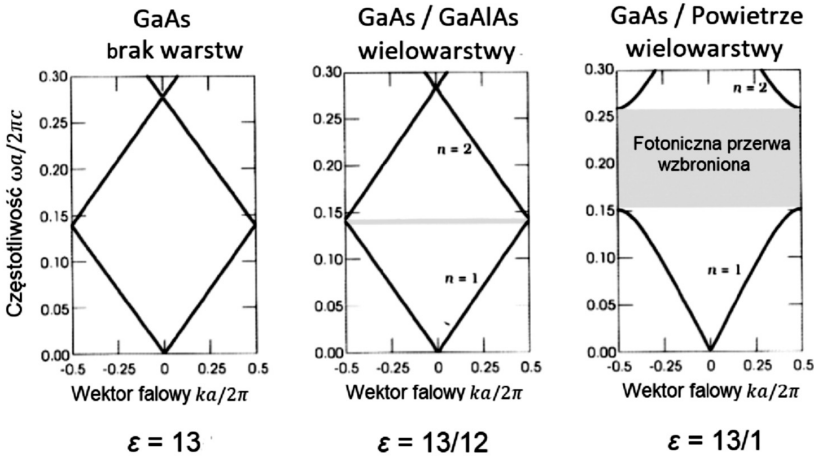
gdzie:

k – liczba falowa $\left[\frac{1}{m}\right]$ [21],

Λ – długość fali elektromagnetycznej m.

Właśnie przy tych wartościach powstaje fotoniczna przerwa wzbroniona. Częstota kołowa, zwana pulsacją jest wielkością określającą, jak szybko powtarza się dane zjawisko okresowe. Przedstawiana jest jako iloczyn obwodu okręgu i częstotliwości drgań. Fotoniczna przerwa wzbroniona pozwala na przeniesienie światła dla tylko wybranych długości fali.

Szerokość przerwy zależy od dużej różnicy wartości współczynnika załamania światła, a tym samym od wartości względnej przenikalności dielektrycznej, co ukazano na rysunku 8.



Rys. 8. Szerokość fotonicznej przerwy wzbronionej zależna od dużej różnicy wartości względnej przenikalności dielektrycznej
Opracowanie własne na podstawie [1]

Dla kryształu składającego się z jednego rodzaju warstw, w tym wypadku z GaAs, nie powstaje fotoniczna przerwa wzbroniona. Jeżeli warstwy kryształu fotonicznego składają się z GaAs oraz z GaAlAs, a różnica wartości względnej przenikalności dielektrycznej jest mała, to wówczas powstaje wąska fotoniczna przerwa wzbroniona umożliwiającą słabą kontrolę biegu fali elektromagnetycznej. Natomiast jeśli kryształ składa się z GaAs i powietrza, tworzy się duża różnica wartości względnej przenikalności dielektrycznej, co wpływa na wartość współczynnika załamania światła. Wtedy fotoniczna przerwa wzbroniona jest szeroka i umożliwia dużą kontrolę biegu wiązki.

Konkludując:

- zmiana szerokości przerwy spektralnej wpływa na zmianę barwy i jest spowodowana zależnością (3),
- im większą różnicę wykazują wartości względnej przenikalności dielektrycznej warstw, od których zależą ich wartości współczynnika załamania światła, tym szersza jest ta przerwa,
- obecność fotonicznej przerwy wzbronionej zależy od rodzaju kryształu fotonicznego, czyli 1D, 2D i 3D, oraz od konfiguracji sieci kryształu,
- proces zmiany barwy, czyli manipulacji szerokością przerwy wzbronionej, jest odwracalny.

Większą kontrolę transmisji światła w kryształach, a tym samym projektowanie barwy, umożliwia kryształ 3D, składający się z warstw o dużej różnicy wartości współczynnika załamania światła.

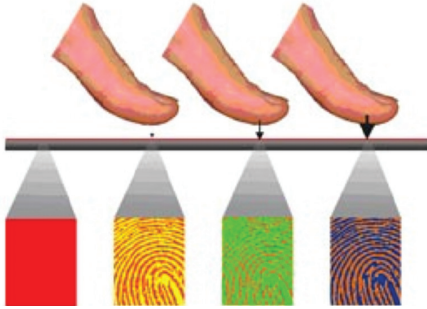
Zastosowania kryształów fotonicznych

Kryształy fotoniczne wykorzystywane są w poligrafii przede wszystkim do zabezpieczania dokumentu lub marki produktu. Pigment zawierający kryształy fotoniczne, powoduje zmienność barwy przykładowo zależną od:

- warunków oświetlenia przedmiotu,
- kąta jego widzenia,
- przyłożonego pola elektrycznego lub magnetycznego,
- bodźców mechanicznych, termicznych, chemicznych.

Firma Opalux z siedzibą w Toronto opatentowała wiele optycznie zmiennych urządzeń zabezpieczających, służących do zwalczania fałszerstwa oraz poprawy uwierzytelniania banknotów, paszportów czy innych dokumentów wartościowych. Głównym zabezpieczeniem znajdującym się w produkcie jest opal, będący kamieniem szlachetnym, a zarazem naturalnym kryształem fotonicznym oraz syntetyczne kryształy fotoniczne wytwarzane przez firmę Opalux.

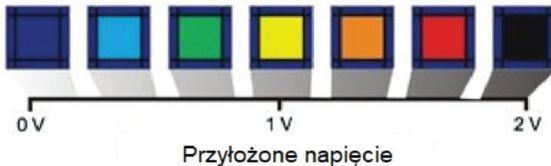
Jednym z głównych produktów firmy Opalux są tusze ElastInk. Oprócz zmienności optycznej, tusz odwracalnie lub nieodwracalnie przekazuje zawartość informacji w odpowiedzi na nacisk palca. Technologia nie wymaga zasilania prądem. Siłę nacisku, czas aktywacji i inne aspekty można dopasować do potrzeb. Mechanizm zmiany barwy przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Zmiana barwy pod wpływem nacisku palca [8]

Tusze są dostępne w wielu kolorach podstawowych, w tym dla czerwonego, żółtego, zielonego i niebieskiego oraz dla różnej siły nacisku. Kilka wariantów Elast-Ink jest zarezerwowanych dla dokumentów wymagających wysokiego poziomu bezpieczeństwa [8].

Kolejnym produktem firmy Opalux są tusze *Photonic*, czyli produkt wykorzystujący właściwości kryształów fonicznych, pełniący funkcję zabezpieczania, aktywowaną przez *RFID* (ang. *radio-frequency identification*) – system identyfikacji radiowej. Pod wpływem obecności pola działania RFID zadrukowany tuszem fonicznym przedmiot zmienia swój kolor w pobliżu czytnika, a po odsunięciu od niego następuje powrót do pierwotnego koloru [19]. Tusz foniczny jest żelem opalizowanym metalopolimerem. Odwracalnie pęcznieje i kurczy się w zależności od przyłożonego napięcia lub natężenia prądu [19]. Powstaje wtedy foniczna przerwa wzbroniona, zmieniająca swoją szerokość. Jest też w stanie utrzymywać statyczne obrazy o niskiej energii [9]. Na rysunku 4 przedstawiono zmianę barwy, w zależności od przyłożonego napięcia do folii zadrukowanej fonicznym tuszem.



Można zauważyć, że barwa – wraz ze zwiększaniem napięcia prądu w pobliżu folii – stopniowo przesuwa się w zakresie widzialnym. W wypadku braku napięcia barwa jest ciemnoniebieska i następuje jej zmiana na żółtą, gdy napięcie prądu przyjmie wartość równą 1 V oraz na czarną, jeśli to napięcie przyjmie wartość 2 V [19]. Tusz foniczny reaguje na ładunek elektryczny. Może zatem być stosowany zarówno do sztywnych, jak i elastycznych powierzchni [9].

Podsumowanie

Kryształy foniczne wykazują wiele właściwości, nad którymi prowadzone są badania. Dzięki nim możliwa jest świadoma kontrola transmisji światła, a tym samym przemyślane projektowanie barwy, ponieważ nie powstaje ona poprzez mieszaninę addytywną lub subtraktywną, a dzięki fonicznym zmianom.

Prowadzenie eksperymentów pogłębiających stan wiedzy na temat kryształów fonicznych jest bardzo kosztowne. Nie udało się – jak dotychczas – opracować warunków ich masowej produkcji. Można domniemywać, że struktura tych kryształów odsłania przed badaczami możliwości nowego spojrzenia na zagadnienia dotyczące światła.

Być może, po opracowaniu technologii i warunków masowej produkcji kryształów fonicznych, konwencjonalne metody drukowania w przyszłości zostaną zastąpione przez powlekanie produktów lub podłoży drukowych warstwą fonicznego kryształu.

Bibliografia

1. Armstrong E., O'Dwyer C., *Artificial opal photonic crystals and inverse opal structures – fundamentals and applications from optics to Energy storage*, Wydział Chemii, University College Cork, wyd. 3, nr 3109-6143, 2015,.
2. *Fonon*, Encyklopedia PWN [online], Wydawnictwo Naukowe PWN, (2018) <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/fonon;3901824.html> [data dostępu: 15 lutego 2018].
3. Komza M., *Sztuka książki*, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, 2003.
4. *Kryształy foniczne*, Wydział Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, http://fizyka.umk.pl/~bezet/pdf/Krysz_fot.pdf [data dostępu: 25 lutego 2018].
5. Kubiacyk A., *Dyfrakcja elektronów i światła na sieci krystalicznej* [online], Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, http://www.if.pw.edu.pl/~labfiz1p/cmsimple2_4/1instrukcje_pdf/37.pdf [data dostępu: 16 lutego 2018]
6. Liu D., Gao Y., Gao D., Han X., *Photonic band gaps in two-dimensional photonic crystals of core-shell-type dielectric nanorod heterostructures*, Optics Communications, t. 285, 1 kwietnia 2012, 7.
7. *Materiały pułapkujące światło*, Sajeev John <https://www.physics.utor-onto.ca/~john/> [data dostępu: 08 listopada 2018].
8. Opalux – Firma z siedzibą w Toronto, zajmująca się tworzeniem technologii zabezpieczającej druk, <http://opalux.com/> [data dostępu: 16 lutego 2018].
9. Opalux – Firma z siedzibą w Toronto, zajmująca się tworzeniem technologii zabezpieczającej druk, <http://opalux.com/> [data dostępu: 17 lutego 2018].
10. Peters I., Bielawny A., Blasi B., Willeke G., *Photonic concepts for solar cells*, Nova Science Publishers, 2010, ISBN: 978-1-60876-110-4.
11. *Propagacja*, Słownik Języka Polskiego PWN [online], Wydawnictwo Naukowe PWN, (2018) <https://sjp.pwn.pl/sjp/;2572667> [data dostępu: 15 lutego 2018].
12. Rysunek obrazujący zmianę barwy, spowodowaną zmianą przekształceniami geometrycznymi warstw. https://www.researchgate.net/profile/Qing_Wang21/publication/323564556/figure/fig14/AS:631069460148251@1527470092652/a-Optical-microscopy-images-of-mechanochromic-photonic-crystals-and-illustration-of.png [data dostępu: 08 listopada 2018].
13. Rysunek ukazujący punktowy defekt kryształu, <https://agordon75.files.wordpress.com/2015/07/vacancy-021.png?w=446&h=329>, [data dostępu 08 listopada 2018].
14. Rysunek widma optycznego. <https://www.lettero.com.pl/color-matching/c-o-to-jest-swiatlo/> [data dostępu: 08.11.2018].
15. *Struktura materii*. Przewodnik encyklopedyczny, pod red. Kazimierza Kotarskiego, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1980, s. 86, ISBN: 8301012943.
16. Światło, Encyklopedia PWN, wyd. 3, s. 414, t. IV, Warszawa 1983.

17. *Teoria stanów elektronowych*, wykład AGH, <http://home.agh.edu.pl/~zak/-downloads/FCS-cialo%20stale-2016.pdf>.
18. Teyssier L., Saenko S., Van der Marel D., Milinkovitch M., *Photonic crystals cause active colour change in chameleons*, nr 6368, 2015, <https://ww-w.nature.com/articles/ncomms7368> [data dostpu 10 października 2018].
19. *The Future of Things*, P-Ink Technology Under Development [online], września 2007, <http://thefutureofthings.com/3195-p-ink-technology-und-erdevelopment/> [data dostępu: 16 lutego 2018].
20. Wionczyk M., *Wyznaczanie struktury fotonicznej wybranych kryształów fotonicznych przy użyciu pakietu MPB*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, 2008.
21. Wysmolek A., Wykład *Własności optyczne półprzewodników*, <http://ww-w.fuw.edu.pl/~wysmolek/Optyczne2015/wyklad1-2012.pdf> [data dostępu: 08 listopada 2018].
22. Zakrzewski A., *Czujniki optyczne na bazie kryształów fotonicznych – projektowanie, analiza i wytwarzanie*, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, 2015.

Abstract

Properties of photonic crystals that enable their use in polygraphy

Photonic crystals are an innovative material and have recently been used in printing. They consist of dielectric layers of a variable refractive index. The change of this value may occur in one, two or three directions. Thanks to it, photonic crystals give the possibility of conscious control of the electromagnetic wave in the structure, which leads to the creation of photonic band gap, and this allows the conscious creation of color.

It turns out therefore that the color is created not only as a result of the mixture of additive or subtractive basic colors, but also due to photonic changes as in the case of photonic crystals.

Photonic crystals are used in printing as a method of securing documents. The deliberately designed width of the photonic band gap creates any color that can change under the influence of certain factors, such as the application of a magnetic field or a change in the angle of observation.

Pigments containing photonic crystals make the item difficult to forge. So far, research has been conducted on the use of cognition of new properties of these crystals and on the use of those already known. Conducting experiments is expensive, however, the premonition of scientists allow to conclude that photonic crystals are a valuable material on which to focus more attention.

