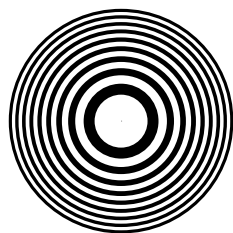
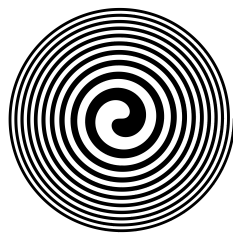


Jak skupiać światło przy użyciu drukarki i folii i co z tego wyniknąć może

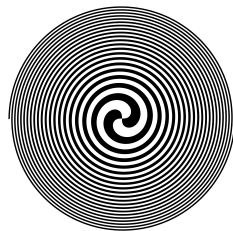
Artykuł jest skrótem pracy autorów, zatytułowanej „Spiralne soczewki dyfrakcyjne”, która była prezentowana na finale 21. Konkursu Prac Młodych Naukowców Unii Europejskiej w Paryżu, odbywającym się w dniach 11–16 września 2009. Praca otrzymała pierwszą nagrodę oraz nagrodę honorową. Badania zostały przeprowadzone w 2008 roku na Wydziale Fizyki UW, pod okiem prof. dr. hab. Czesława Radzewicza i Piotra Migdała, i były kontynuacją warsztatów Krajowego Funduszu na rzecz Dzieci.



Rys. 1. Binarne płytki strefowe Fresnela – promienie pierścieni są proporcjonalne do pierwiastka z kolejnych liczb naturalnych. Przedstawiona płytka strefowa składa się z dziewięciu nieprzezroczystych obszarów.



(a) SZP z jednym ramieniem



(b) SZP z dwoma ramionami



(c) SZP z trzema ramionami

Rys. 2. Binarne spiralne płytki strefowe różniące się liczbą ramion i główną ogniskową.

* student Kolegium Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych, Uniwersytet Warszawski

** student Wydziału Elektrycznego, Politechnika Poznańska

Aleksander M. KUBICA*, Wiktor A. PILEWSKI**

Czy można skupić światło, mając jedynie do dyspozycji przezroczystą folię, komputer i drukarkę? Okazuje się, że nie ma z tym najmniejszego problemu – trzeba jedynie wykorzystać dyfrakcję! Właśnie ten pomysł wykorzystaliśmy podczas naszych badań.

By skupić światło, wykorzystując dyfrakcję, należy przygotować odpowiednią przesłonę. Można pokazać, że przesłona składająca się z na przemian przezroczystych i nieprzezroczystych pierścieni, przedstawiona na rysunku 1, skupia monochromatyczne światło nie tylko w jednym punkcie. Przez analogię do zwykłej skupiającej soczewki, punkty te nazywamy ogniskami. Co ciekawe, ogniska te są w odległościach $f, f/2, f/3, \dots$ od płytki, gdzie f to główna ogniskowa dla zadanej długości fali światła.

W naszej pracy zajmowaliśmy się badaniem ognisk spiralnej płytki strefowej (ang. *Spiral Zone Plate*, SZP), przedstawionej na rysunku 2. Interesował nas zarówno wygląd ognisk, jak i natężenie skupionego w ogniskach światła. SZP jest uogólnieniem płytki strefowej Fresnela. W biegunowym układzie współrzędnych, którego środkiem jest środek płytki, granice oddzielające obszary przezroczyste i nieprzezroczyste opisane są zależnością

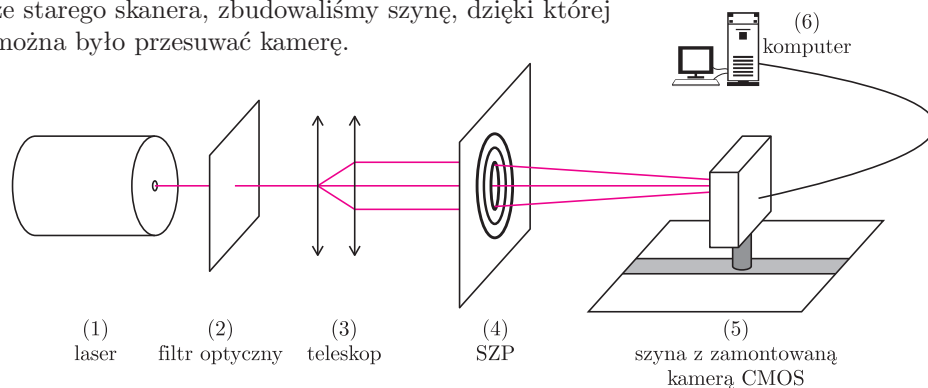
$$(1) \quad -\frac{p\varphi}{\pi} + \frac{r^2}{\lambda f} \in \mathbb{Z}_+ \cup \{0\},$$

gdzie f to główna ogniskowa SZP dla fali o długości λ , natomiast p to liczba ramion SZP (w szczególności może być $p = 0$ i dostajemy wtedy przypadek płytki strefowej Fresnela – granicami są koncentryczne okręgi o promieniach $r_m = \sqrt{\lambda f m}$, gdzie m to liczba całkowita dodatnia).

Oto najtrudniejsze wyzwania, z którymi musieliśmy się zmierzyć przy badaniu SZP:

- jak przygotować SZP w sposób tani, łatwy i precyzyjny?
- jak zautomatyzować nasz eksperyment?
- w jaki sposób analizować otrzymane dane i porównywać je z symulacjami numerycznymi?

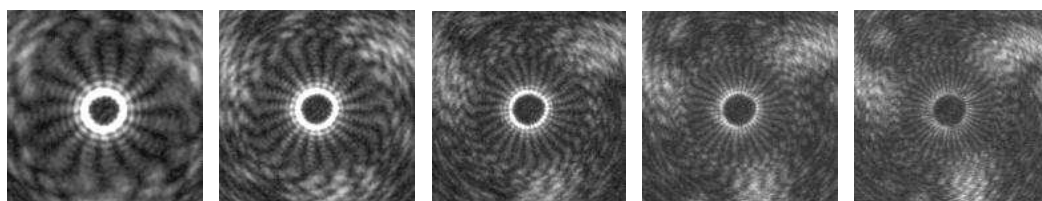
Spiralne płytki strefowe zostały przez nas przygotowane w języku **PostScript**, a następnie naświetlone na przezroczystej folii. Dzięki wysokiemu kontrastowi, jakość otrzymanych w ten sposób SZP była bardzo dobra – według informacji z punktu kserograficznego rozdzielczość wynosiła 4000 dpi. Następnie przystąpiliśmy do eksperymentu. Schematyczny wygląd układu doświadczalnego przedstawiony jest na rysunku 3. W trakcie eksperymentu wykonaliśmy około 20 000 zdjęć, dlatego też niezwykle ważnym technicznym problemem była automatyzacja pomiarów. W tym celu, wykorzystując części ze starego skanera, zbudowaliśmy szynę, dzięki której można było przesuwac kamerę.



Rys. 3. Schematyczny wygląd układu doświadczalnego. W czasie eksperymentu kamera była przesuwana (dzięki zbudowanej przez nas szynie) wzdłuż osi optycznej układu.

By sterować silnikiem krokowym, przygotowaliśmy układ elektroniczny składający się m.in. z mikroprocesora, który sami zaprogramowaliśmy. Chcąc dokonać analizy otrzymanych wyników, musieliśmy napisać kilka programów w języku C++, natomiast by porównywać eksperyment z obliczeniami numerycznymi, stworzyliśmy symulację w programie Mathematica.

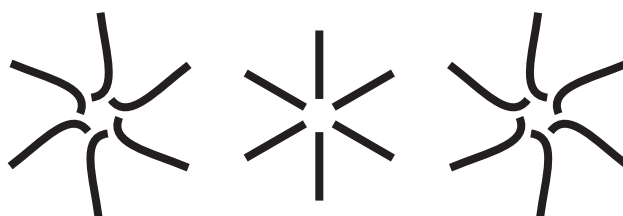
Analizując zdjęcia ognisk, zauważyliśmy, że położenie ognisk SZP może być opisane taką samą zależnością jak dla płytki strefowej Fresnela, tzn. wzorem f/n , gdzie f jest główną ogniskową dla zadanej długości fali, a n liczbą całkowitą dodatnią, którą nazywamy rzędem ogniska. Ponadto natężenie skupionego światła jest wykładniczą funkcją liczby ramion SZP oraz rzędu badanego ogniska.



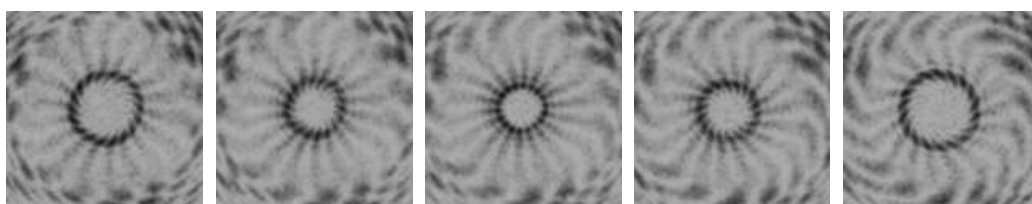
(a) Ognisko rzędu 5 (b) Ognisko rzędu 7 (c) Ognisko rzędu 9 (d) Ognisko rzędu 11 (e) Ognisko rzędu 13

Rys. 4. Zdjęcia ognisk nieparzystego rzędu od 5 do 13. Pomiary wykonane dla SZP z trzema ramionami i głównej ogniskowej $f = 1470$ mm, dla światła o długości $\lambda = 632,8$ nm.

Obserwowane ogniska są regularne (rys. 4), składają się z jasnego pierścienia i jasnych, radialnych linii. Średnica jasnego pierścienia jest proporcjonalna do liczby ramion SZP, a liczba jasnych linii obserwowanych dla SZP z p ramionami w ognisku rzędu n wynosi $p \cdot n$. Przy przechodzeniu przez ognisko, wspomniane już jasne linie zmieniają „skrzyżność” („skrzyżność” jasnych linii tuż przed ogniskiem jest inna niż tuż za ogniskiem, natomiast gdy kamera jest dokładnie w ognisku – linie prostują się). Opisane zachowanie przedstawione jest na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Schematyczne zachowanie jasnych linii wychodzących z jasnego pierścienia – podczas przechodzenia przez ognisko skrzyżność linii ulega zmianie.



Rys. 6. Podczas przechodzenia przez ognisko skrzyżność jasnych linii ulega zmianie – zdjęcia dla SZP z trzema ramionami i głównej ogniskowej $f = 1470$ mm, dla światła o długości $\lambda = 632,8$ nm. Kolory na zdjęciach są odwrócone.

Spiralne płytki strefowe możemy też wykorzystać do skupiania promieni Röntgena, lecz wtedy ich średnice zewnętrzne są rzędu 100 nm (dla porównania – średnice spiralnych płytek strefowych wykorzystywanych w naszych badaniach wynosiły około 1 cm). Tak małe obiekty możemy otrzymać, korzystając z technik litograficznych.

Światło po przejściu przez SZP zyskuje orbitalny moment pędu i dzięki temu możliwe jest obracanie np. cząsteczek koloidu jedynie wskutek świecenia na nie!

Nasze obserwacje dotyczące zachowania jasnych linii mogą mieć zastosowanie w detektorze frontu falowego Shacka–Hartmanna (urządzenie to pozwala badać kształt frontu falowego). Dzięki zastosowaniu w nim spiralnych płytek strefowych będzie można uzyskiwać dodatkowe informacje z tych samych pomiarów. Detektor frontu falowego może być wykorzystywany m.in. w astronomii w celu poprawy jakości obrazów odległych gwiazd lub też w okulistyce podczas badania wad wzroku.

Mamy nadzieję, że Czytelnicy przekonali się, iż można skupiać światło, mając jedynie do dyspozycji komputer, drukarkę i folię. Warto pamiętać, że nawet w najprostszych eksperymentach mogą pojawić się zaskakujące rezultaty, pozwalające na wydarcie przyrodzie kolejnych jej tajemnic.