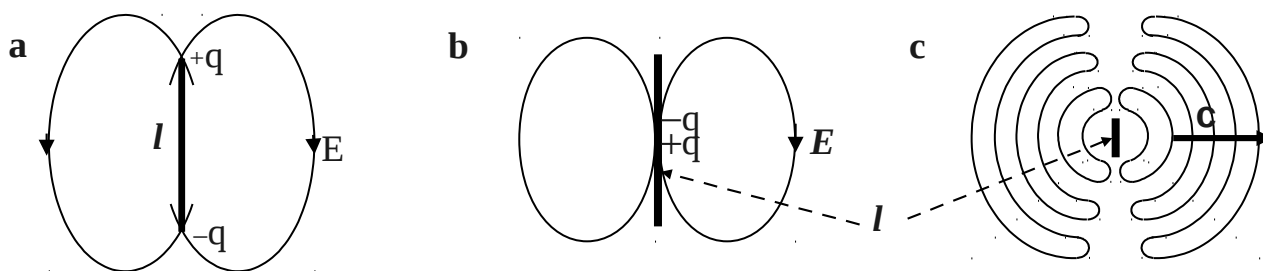


SPRAWDZENIE PRAWA MALUSA 62

Światło to część widma fal elektromagnetycznych. Fale elektromagnetyczne są wysyłane przez wzbudzone jądra atomowe (promieniowanie γ), przez wzbudzone atomy i cząsteczki (promieniowanie rentgenowskie, ultrafioletowe, widzialne i podczerwone), a także przez anteny radiowe i telewizyjne. Uproszczony mechanizm emisji fal elektromagnetycznych najłatwiej jest przedstawić na przykładzie metalowego pręta. Jeśli w pewnym momencie naładujemy jego końce ładunkami $+q$ i $-q$, to w otoczeniu pręta wytworzy się pole elektryczne E (Rys. 1a), identyczne z polem dipola elektrycznego. Ponieważ pręt taki posiada określoną pojemność elektryczną C oraz indukcyjność L ¹, to w takim obwodzie będą zachodzić drgania elektromagnetyczne, podobnie jak w „zwykłym” obwodzie LC. Ponieważ pręt stanowi obwód otwarty, drgania pól elektrycznego i magnetycznego mogą rozchodzić się w przestrzeni. Pokazano to na Rys. 1b i 1c. W otoczeniu pręta powstają zmienne w czasie wirowe² pola elektryczne i nie pokazane na rysunku, prostopadłe do nich wirowe pola magnetyczne. Te pola, zgodnie z teorią Maxwella, rozchodzą się w otaczającej dipol przestrzeni, we wszystkich kierunkach, z wyjątkiem kierunku osi dipola. Dipol nie promieniuje w kierunku swojej osi (patrz Rys. 1c). Dlatego np. maszty radiostacji nadającej na falach



Rys. 1. Wybrane linie pola elektrycznego w otoczeniu dipola: a – w momencie naładowania, b – gdy ładunki $+q$ i $-q$ przechodzą przez środek pręta, c – po trzech okresach oscylacji ładunków wzdłuż osi pręta.

długich jest ustawiony pionowo, po to, by wysyłał fale tylko stycznie do powierzchni Ziemi a nie w przestrzeń kosmiczną. Można się o tym przekonać zmieniając położenie anteny elektrycznej lub magnetycznej odbiornika radiowego względem anteny stacji nadawczej. W przypadku fal ultrakrótkich ($\lambda \approx 1\text{m}$), często wykorzystuje się poziome ustawienie dipoli nadawczych i odbiorczych (zaobserwuj ustawienie anten odbiorników TV). W falach elektromagnetycznych wektory elektryczny E i magnetyczny H drgają w kierunkach prostopadłych do siebie i prostopadłe do kierunku rozchodzenia fali v . Wektory E i H są także prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Fale elektromagnetyczne są więc falami poprzecznymi. Fale wysyłane przez promieniujący dipol ze względu na jeden, ściśle określony kierunek drgań wektora elektrycznego E fali (kierunek osi dipola) nazywamy falami spolaryzowanymi liniowo. Ze względów historycznych, płaszczyznę prostopadłą do kierunku drgań wektora elektrycznego nazywa się płaszczyzną polaryzacji.

Podobnie, jak omówiony wyżej metalowy dipol, promieniować może atom, który przechodząc ze stanu wzbudzonego (o wyższej energii), do stanu podstawowego (o niższej energii) emituje promieniowanie elektromagnetyczne. Kierunek drgań wektora E emitowanych fal zależy od orientacji

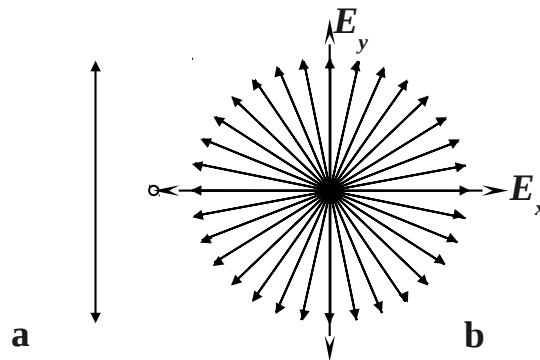
¹ W odróżnieniu od „zwykłego” obwodu LC, w którym L i C można przedstawić jako oddzielne elementy, pręt stanowi obwód o tzw. stałych rozłożonych, a każdy jego odcinek stanowi część całkowitej pojemności i indukcyjności.

² Tworzące linie zamknięte.

dipola atomowego w momencie emisji. Długość fali λ promieniowania emitowanego przez atom jest zależna od różnicy energii atomu w stanach wzbudzonym i podstawowym. Długość ta może odpowiadać światłu widzialnemu ($400 \text{ nm} > \lambda > 700 \text{ nm}$), promieniowaniu ultrafioletowemu ($\lambda < 400 \text{ nm}$), lub nawet rentgenowskiemu ($\lambda \approx 1 \text{ nm}$). Zwykle źródło światła różni się tym od nadajnika radiowego, że każdy promieniujący atom wysyła swoją falę w postaci krótkiego błysku ($t \approx 10^{-8} \text{ s}$) w sposób spontaniczny, tzn. w przypadkowym momencie czasu i przy przypadkowym kierunku orientacji osi dipola atomowego w momencie aktu emisji. Światło wysyłane przez wiele atomów jest więc zbiorem krótkich impulsów falowych, zwanych paczkami falowymi, w którym wszystkie kierunki drgań wektora elektrycznego E , prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali są jednakowo prawdopodobne. W każdej pojedynczej paczce falowej wektor E drga w określonej płaszczyźnie (emitowana fala jest więc "spolaryzowana liniowo"), ale wiązka fal emitowanych przez wiele różnych atomów nie jest spolaryzowana jako całość. Pokazano to na Rys. 2.

Aby otrzymać światło spolaryzowane liniowo trzeba wymusić równoległe ustawienie dipoli atomowych w momencie emisji, np. umieszczając atomy w silnym, stałym w czasie, polu magnetycznym. Światło emitowane w takich warunkach jest spolaryzowane liniowo (np. w zjawisku Zeemana).

Drugi sposób uzyskania fal spolaryzowanych liniowo polega na przepuszczeniu wiązki fal niespolaryzowanych (takich jak pokazano na Rys. 2b), przez ośrodek przepuszczający tylko fale o jednym, wyróżnionym kierunku drgań wektora elektrycznego E . Drgania prostopadłe do tego kierunku są pochłaniane. Do tego celu stosuje się folie polimerowe zawierające długie łańcuchy cząsteczek, ustawionych równoległe do siebie. W praktyce wykorzystuje się folie poliwinylowe lub poliwinilene, które w wyniku jednokierunkowego rozciągania oraz domieszkowania chemicznego pochłaniają ten

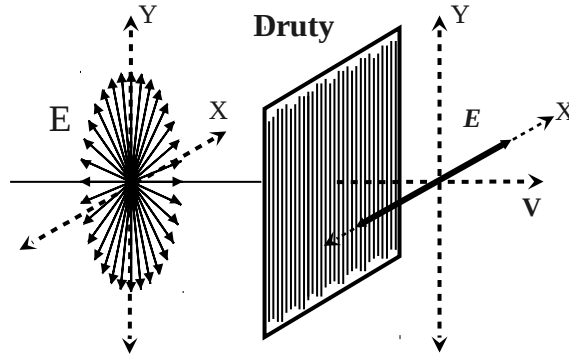


Rys. 2. Kierunki drgań wektora E fali elektromagnetycznej emitowanej przez pojedynczy atom (a), oraz przez wiele atomów (b). Kierunek rozchodzenia fali jest prostopadły do płaszczyzny rysunku.

kierunek drgań wektora E , który jest równoległy do łańcuchów cząsteczkowych. Dzieje się tak dlatego, że wzdłuż domieszkowanych cząsteczek, pod wpływem pola elektrycznego fali mogą przemieszczać się elektrony przewodnictwa i energia tego pola zostaje zamieniona na ciepło. W kierunku prostopadłym do osi cząsteczek możliwości ruchu elektronów są niewielkie i energia fali elektromagnetycznej nie jest pochłaniana. Folie mające takie właściwości nazywamy **polaroidami**. Są one tanie w produkcji i mają szerokie zastosowania³. Dla mikrofal (fal elektromagnetycznych o długości rzędu centymetrów) takim „polaroidem” może być układ równoległych do siebie drutów naciągniętych na ramkę (patrz instrukcja do ćwiczenia Mikrofale, oraz Rys. 3). Przyrządy służące do otrzymywania światła spolaryzowanego liniowo ze światła niespolaryzowanego nazywa się polaryzatorami, a te same przyrządy wykorzystywane do wyznaczania kierunku drgań wektora E w świetle spolaryzowanym liniowo – analizatorami.

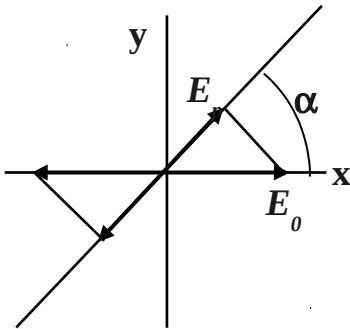
³ Np. w wyświetlaczach ciekłokrystalicznych

Oprócz podanych wyżej dwu metod uzyskiwania światła spolaryzowanego liniowo wykorzystuje



Rys. 3. Spośród wektorów E niespolaryzowanej fali elektromagnetycznej (lewa strona rysunku) przez siatkę pionowych drutów przechodzą tylko te, które drgają w płaszczyźnie poziomej. Druty siatki spełniają rolę taką, jak cząsteczki w folii polaroidu.

się kilka innych (polaryzacja przy odbiciu światła od dielektryków, rozpraszaniu prostym, przy przejściu przez kryształy dwójłomne), ale ze względu na to, że nie są wykorzystywane w tym ćwiczeniu nie będziemy ich omawiać.



Rys. 4. Objaśnienia w tekście

Celem ćwiczenia jest sprawdzenie tzw. prawa Malusa, które określa związek pomiędzy natężeniami światła spolaryzowanego liniowo, przed przejściem (J_0) i po przejściu (J) przez analizator. Jeśli kierunek drgań przepuszczanych przez analizator (np. polaroid) jest poziomy (kierunek osi x na Rys. 4), a pada na niego światło spolaryzowane liniowo, w którym kierunek drgań wektora elektrycznego tworzy kąt α z osią x , to zależność natężenia pola elektrycznego E_p fali przechodzącej od kąta α będzie miała postać:

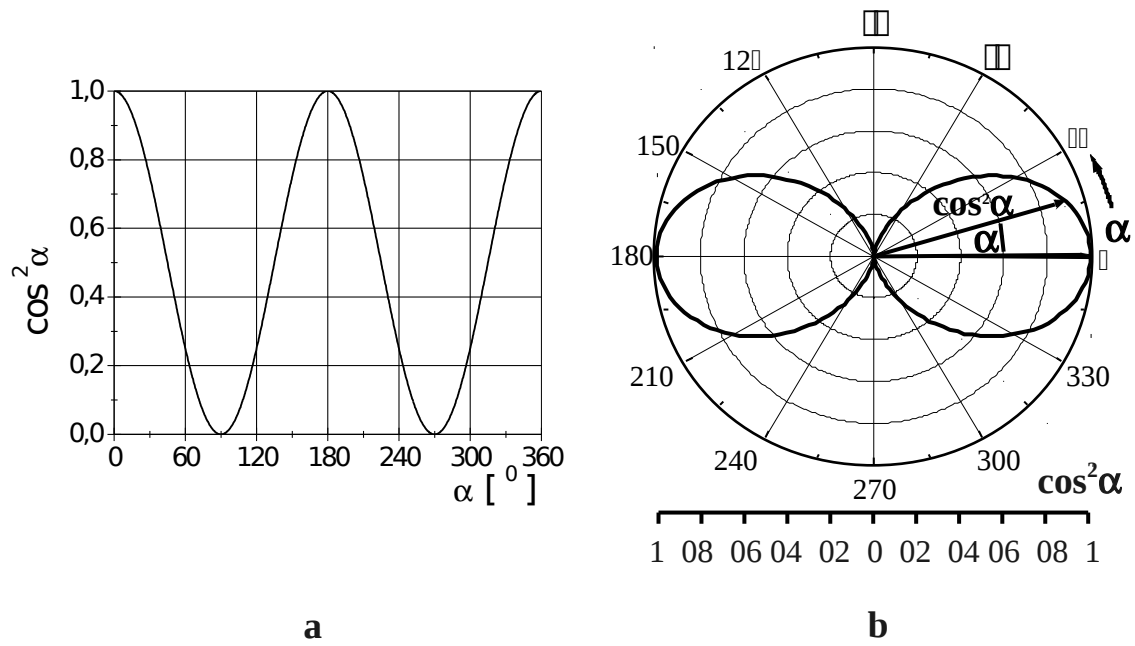
$$E_p = E_0 \cos \alpha$$

Ponieważ natężenie fali świetlnej J jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy drgań, to

$$J = J_0 \cos^2 \alpha$$

gdzie α jest kątem pomiędzy płaszczyzną polaryzacji światła i płaszczyzną drgań przepuszczanych przez polaryzator.

DODATEK



Wykresy funkcji $\cos^2 \alpha$ w układach współrzędnych prostokątnym (a) i biegunowym (b)