

Oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z materią

Część IV. Dlaczego złoto jest złote?

Doc. dr Jerzy GINTER

W poprzednich trzech częściach tego cyklu mówiliśmy o własnościach optycznych substancji, które — z punktu widzenia elektrostatyki — są dielektrykami. Oznacza to, że dodatnie i ujemne ładunki są w nich ze sobą związane tak, jak na przykład w atomach czy cząsteczkach. Zupełnie inaczej oddziałuje fala elektromagnetyczna z przewodnikami, czyli substancjami, w których istnieją swobodne nośniki ładunku. Metale, jak wiadomo, dobrze przewodzą prąd elektryczny. Wiemy także, że większość metali słabo absorbuje i emituje promieniowanie elektromagnetyczne, natomiast bardzo dobrze je odbija. Na przykład srebro — używane do pokrywania lusterek — odbija przeszło 90% promieniowania widzialnego. Zdolność absorpcyjna i emisyjna metali w podczerwieni także jest bardzo niewielka, a odbijająca znaczna. Wiemy to np. z doświadczeń, omawianych w pierwszej części tego cyklu. Łatwo także stwierdzić, że bardzo duża jest zdolność odbijania promieniowania radiowego. Każdy może zrobić proste doświadczenie: włożyć grający odbiornik tranzystorowy do aluminiowego garnka z pokrywką i zaobserwować wywołaną tym zmianę w odbiorze audycji. Dobrze dla porównania umieścić ten sam odbiornik w pojemniku plastikowym i pudełku tekturowym. (Uwaga — nie można posłużyć się odbiornikiem sieciowym, bo przewody zasilające działają jak antena).

Wiemy jednak, że zdolność odbijająca metali musi zależeć od długości fali. Folia aluminiowa nie przepuszcza praktycznie zupełnie promieniowania widzialnego, a jest bardzo przezroczysta dla promieni Roentgena. Przebieg współczynnika odbicia dla trzech typowych metali — złota, srebra i glinu — w zakresie podczerwieni, obszaru widzialnego i bliskiego nadfioletu przedstawia rysunek. Przyjrzyjmy się przebiegowi dla srebra: dla małych częstotliwości odbicie jest bardzo duże (powyżej 90%) i stałe w dość szerokim zakresie — aż do połowy obszaru widzialnego. Natomiast w bliskim nadfiolecie odbicie spada gwałtownie (poniżej 10%), a potem znów wzrasta (do ok. 30%).

Czy możemy zrozumieć, dlaczego tak się dzieje? Aby zjawisko opisać dokładnie, należałoby rozwiązać równania Maxwella dla ośrodka materialnego ze swobodnymi ładunkami. Tego robić tu nie będziemy; ograniczymy się do rozważań jakościowych.

1. Swobodny nośnik ładunku w polu periodycznie zmiennym

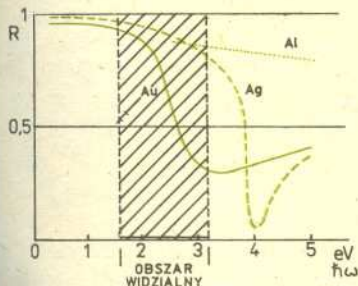
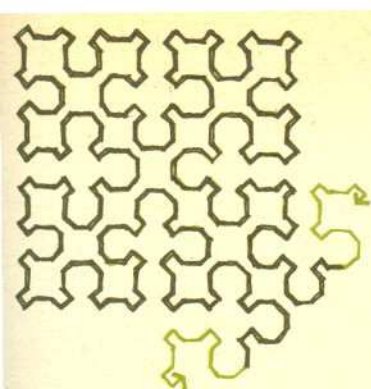
Zastanówmy się przede wszystkim, czym różni się ruch ładunku związanego w „mikrooscylatorze” od ruchu ładunku swobodnego. Fakt, że ładunek jest swobodny, oznacza, że współczynnik sprężystości k równy jest zeru. A więc formalnie $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = 0$. Ruch odbywa się więc tylko pod wpływem zewnętrznej, periodycznie zależnej od czasu, siły

$$(1) \quad F = F_0 \sin \omega t.$$

Pod wpływem pola elektrycznego fali swobodne ładunki mogą poruszać się ruchem periodycznym, a amplitudę określa wzór wyprowadzony w części II, w którym trzeba położyć $\omega_0 = 0$. W ten sposób otrzymujemy następującą zależność wychylenia od czasu:

$$(2) \quad x = -\frac{F_0}{m\omega^2} \sin \omega t.$$

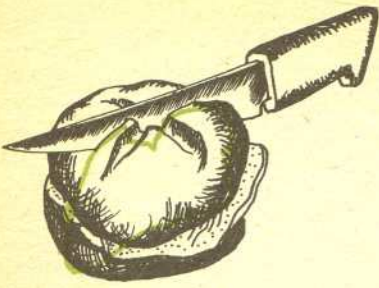
Wynik jest dość dziwny: pod wpływem periodycznie zmiennej siły ładunki swobodne poruszają się periodycznie, ale wychylenie ma zawsze zwrot przeciwny do zwrotu działającej siły. Ruch harmoniczny ma więc fazę przeciwną w stosunku do działającej siły, podobnie jak to miało miejsce dla oscylatora przy $\omega > \omega_0$. Widać ponadto, że amplituda tego ruchu silnie zależy od częstotliwości — maleje odwrotnie proporcjonalnie do jej kwadratu.



W części II znaleźliśmy amplitudę drgań oscylatora, na który działa periodycznie mienna siła wymuszająca o częstotliwości ω i amplitudzie F_0 . Jest ona równa

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)},$$

gdzie $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, k jest współczynnikiem sprężystości, a m masą oscylatora.



2. Budowa metalu i oddziaływanie z promieniowaniem

W metalu istnieją dwa rodzaje ładunków — swobodne i związane. Typowe swobodne atomy metalu mają elektrony silnie związane (wypełniają one powłoki wewnętrzne) oraz elektrony związane słabo, tzw. elektrony walencyjne. Te ostatnie stosunkowo łatwo oderwać. Zachodzi to na przykład wtedy, kiedy powstaje wiązanie jonowe atomu metalu z atomem niemetalu. Na przykład przy tworzeniu chlorku sodu elektron walencyjny sodu oddawany jest atomowi chloru (powstają w ten sposób jony Na^+ i Cl^-). W metalu oddziaływanie elektronów walencyjnych wybranego atomu z innymi atomami jest tak silne, że elektrony walencyjne odrywają się od swoich atomów „macierzystych” i zaczynają się prawie swobodnie poruszać w całej objętości substancji. Są to właśnie ładunki swobodne, odpowiedzialne za przepływ prądu.

Oprócz tego istnieją jednak elektrony związane, „mikrooscylatory” w sensie omawianym w poprzednich częściach cyklu. Chmury elektronowe powłok wewnętrznych atomów mogą wykonywać drgania. Częstotści tych drgań są na ogół większe od częstotści odpowiadających obszarowi widzialnemu i bliskiemu nadfioletowi.

Ważne jest to, że wychylenia elektronów swobodnych są w przeciwfazie z siłą, a ich amplituda maleje ze wzrostem częstotści. Wychylenia chmur elektronowych są natomiast w fazie z siłą (jesteśmy poniżej częstotści rezonansowej), a ich amplituda rośnie ze wzrostem częstotści (zbliżamy się do rezonansu). Możliwe jest więc, że dla pewnej częstotści, prądy związane z ruchem drgającym obu tych rodzajów ładunków będą równe, ale przeciwnie skierowane i sumaryczny prąd będzie równy zeru. Innymi słowy — dla tej częstotści fala elektromagnetyczna nie wywołuje żadnego prądu w materiale. Ośrodek powinien zachowywać się więc „jak próżnia” i nie powinien odbijać promieniowania. Tak właśnie można wyjaśnić występowanie ostrego minimum w zależności odbicia od częstotści dla srebra.

Dla częstotści większych od częstotści obserwowanego minimum przeważa prąd elektronów związanych i srebro zachowuje się jak dielektryk. Promieniowanie (nadfioletowe) odbija się od niego, jak światło od szyby szklanej czy od kryształku cukru.

Dla częstotści mniejszej od częstotści minimum odbicia przeważa prąd nośników swobodnych, dla którego wychylenie jest przeciwne w fazie do przyłożonej siły, pochodzącej od pola elektrycznego fali. W tym zakresie częstotści pojawia się zupełnie nowy efekt: w materiale nie może się rozchodzić zwykła fala o sinusoidalnej zależności pola elektrycznego (i magnetycznego) od położenia. Może istnieć tylko pole, zanikające wykładniczo z odległością od powierzchni. A więc prąd płynie tylko w cienkiej warstewce pod powierzchnią metalu — tylko tam gdzie wnika pole fali (jest to tzw. „warstwa naskórkowa”). Zjawisko to związane jest z faktem, że faza prądu nie jest zgodna z fazą pola — niestety nie możemy tutaj tego efektu szczegółowo opisać matematycznie.

Ładunki płynące w warstwie naskórkowej wysyłają falę elektromagnetyczną. Fala ta ma taką fazę, że całkowicie wygasa w materiale (w zjawisku interferencji) falę przychozącą. W głębi metalu fala więc nie istnieje. Na zewnątrz metalu pojawia się jednak nowa fala — ta, którą nazywamy falą odbitą.

Dla większości metali obszar minimum odbicia przypada w nadfiolecie. Cały zakres widzialny jest bardzo silnie odbijany — metale są „srebrne”. Wyjątek stanowią miedź i złoto (oraz ich stopy), dla których minimum odbicia przypada w obszarze widzialnym. Odbijają one dobrze promieniowanie o niskiej częstotści (długofalowe) — a więc czerwone, pomarańczowe i żółte — a słabo światło o wysokiej częstotści — zielone, niebieskie i fioletowe. Dlatego złoto i miedź mają charakterystyczne zabarwienie.

Jeżeli promieniowanie niebieskie jest przez złoto odbijane słabo, powinno ono lepiej przez ten metal przechodzić. Łatwo to stwierdzić, przyglądając się cienkiej warstewce złota — na przykład na kieliszku ze złoconym brzożkiem. Obserwowana w świetle przechodzącym („pod światło”) jest ona wyraźnie niebieska.

Pozostaje jeszcze wyjaśnić, dlaczego minimum odbicia dla złota i miedzi przypada w obszarze widzialnym, a nie w nadfiolecie. Sprawy te wykraczają jednak poza zakres naszego artykułu. Poza tym należy powiedzieć, że w powyższych rozumowaniach zaniedbywaliśmy procesy rozpraszania energii w czasie ruchu nośników. Jeżeli wziąć je pod uwagę, należy zmodyfikować wzór (2), który dla $\omega \rightarrow 0$ przewiduje nieskończony wzrost prądu. Dla bardzo małych częstotści prędkość (a więc i prąd) jest zgodna w fazie z polem elektrycznym. Tak jest przy przepływie prądu zmiennego o niskiej częstotści w przewodnikach. Przypadku tego nie będziemy tu jednak dokładniej omawiać.

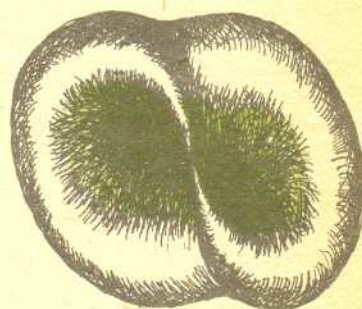
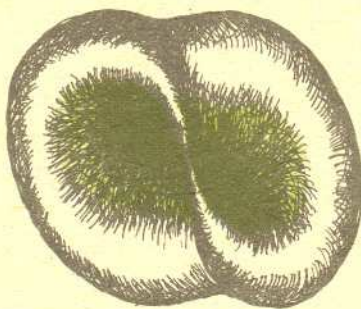
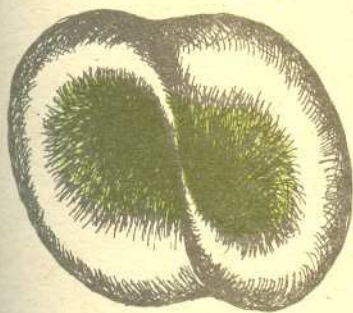
3. Podsumowanie

W czterech kolejnych krótkich artykułach starałem się pokazać, na czym polega oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z materią. Starałem się uzmysłowić Czytelnikowi, że wszystko zależy od tego, jaki jest ruch ładunków, czyli jaki prąd płynie w ośrodku materialnym. W szczególności — jaki prąd wzbudza przychodząca fala elektromagnetyczna. Omówiliśmy tylko dwa stosunkowo proste przypadki: ośrodek nieprzewodzący (dielektryczny), w którym istnieją „mikroosylatory” z dobrze określonymi częstotliwościami drgań własnych, oraz ośrodek przewodzący, w którym istnieją nośniki swobodne. Pominięliśmy natomiast wiele innych interesujących zjawisk związanych z oddziaływaniem promieniowania elektromagnetycznego z materią.

Do takich należą na przykład:

emisja widma ciągłego (a nie liniowego) przez rozgrzane ciała stałe i ciecze, zależność rozchodzenia się światła w tzw. kryształach dwójłomnych od jego polaryzacji i fakt, że fala elektromagnetyczna może być wysyłana nie tylko przez powłoki elektronowe atomów, ale także przez ich jądra.

Wszystkie te zjawiska można jednolicie wyjaśnić w ramach współczesnej fizyki.



Zadania

Redaguje mgr Krzysztof S. NOWIŃSKI

M 298. Wyrazy a_1, a_2, \dots, a_{15} rosnącego postępu arytmetycznego są liczbami pierwszymi. Wykazać, że $a_{15} > 400000$.

Rozwiązanie na str. 14

M 299. Mając dany punkt A i proste p, q zbudować trójkąt ABC podobny do danego trójkąta $A_0B_0C_0$ i taki, że $B \in p, C \in q$.

Rozwiązanie na str. 15

M 300. Znaleźć wszystkie trójki liczb naturalnych x, y, z spełniające układ równań

$$\begin{cases} x^3 - y^3 - z^3 = 3xyz \\ x^2 = 2y + 2z. \end{cases}$$

Rozwiązanie na str. 7

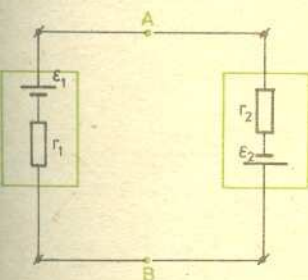
Redaguje mgr Tomasz TRATKIEWICZ

F 115. Dwa źródła o siłach elektromotorycznych \mathcal{E}_1 i \mathcal{E}_2 oraz opornościach wewnętrznych r_1 i r_2 połączone według schematu pokazanego na rysunku 1. Jaki prąd popłynie przez bezoporowy przewód po zwarciu nim punktów A i B ? Dla jakich wartości parametrów prąd nie popłynie, jeśli obwód zewrzymy przewodem o oporności R ?

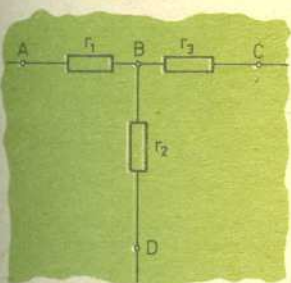
Rozwiązanie na str. 9

F 116. Rysunek 2 przedstawia dostępną część układu oporników. Jak, nie rozrywając połączeń, zmierzyć oporności r_1, r_2, r_3 , jeżeli dysponuje się omomierzem i przewodami do zestawiania obwodów?

Rozwiązanie na str. 13



Rys. 1



Rys. 2