

The background features a series of concentric circles, some solid and some dashed, radiating from the center. A large red speech bubble is centered on the page, containing the title and author information.

LA POLARIZZAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Professoressa CORONA PAOLA

Nelle antenne che trasmettono segnali radiofonici e televisivi gli elettroni si muovono avanti e indietro lungo un determinato asse; di conseguenza danno origine a campi elettrici e magnetici che oscillano in direzioni fisse e conservano la loro direzione di oscillazione mentre si propagano. Per questo motivo, le **antenne riceventi** sui tetti non possono essere orientate in modo casuale, ma devono avere le asticelle in direzione parallela al vettore campo elettrico \vec{E} dell'onda che le investe: solo così il campo può compiere lavoro sugli elettroni di conduzione e metterli in movimento.

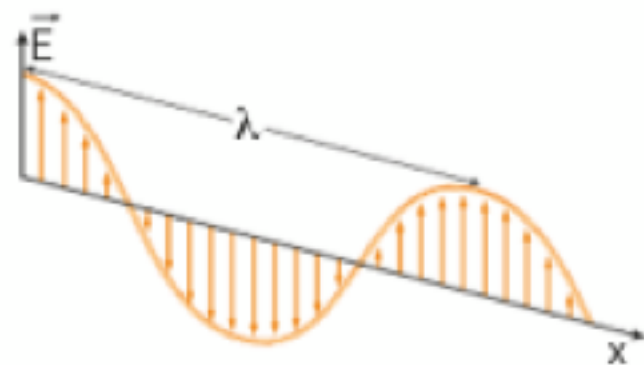
La direzione del *campo elettrico* di un'onda elettromagnetica piana è detta **direzione di polarizzazione** dell'onda.

Le onde radio emesse da un'antenna, per il fatto di mantenere fissa la direzione del campo elettrico, sono dette *polarizzate*. In generale,

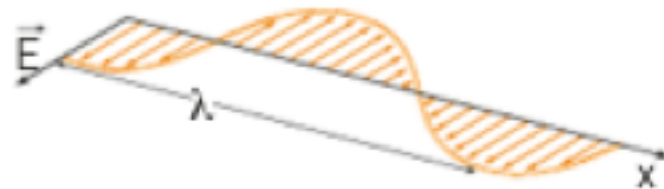
un'onda elettromagnetica piana è polarizzata quando la direzione del suo campo elettrico è costante, oppure varia con una legge ben precisa in funzione del tempo e della posizione.

Consideriamo un'onda elettromagnetica che si propaga lungo un asse x orizzontale. A seconda di come appare il profilo dell'onda in un istante fissato, si distinguono diversi tipi di polarizzazione:

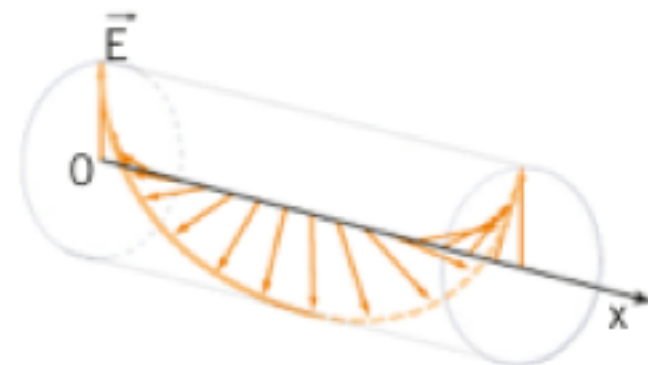
■ se \vec{E} oscilla sempre in un piano verticale, l'onda è *polarizzata verticalmente*;



■ se \vec{E} oscilla sempre in un piano orizzontale, l'onda è *polarizzata orizzontalmente*;



■ se \vec{E} ruota attorno alla direzione di propagazione, l'onda è *polarizzata circolarmente*.



La polarizzazione verticale e quella orizzontale sono due esempi di **polarizzazione lineare**.

Un'onda elettromagnetica piana è *polarizzata linearmente* quando il suo campo elettrico \vec{E} oscilla restando sempre parallelo a se stesso.

In caso di polarizzazione lineare, nel profilo istantaneo dell'onda il vettore \vec{E} giace ovunque sullo stesso piano, tra gli infiniti piani che contengono l'asse x di propagazione: ciò non avviene se la polarizzazione è circolare o per tipi di polarizzazione più complessi che qui non descriviamo.

Tuttavia, qualunque sia il tipo di polarizzazione dell'onda, \vec{E} è perpendicolare all'asse x in ogni punto e a ogni istante, ed è uguale, pertanto, alla somma di un vettore componente verticale e uno orizzontale. Di conseguenza,

ogni onda polarizzata che si propaga lungo un asse orizzontale può essere descritta come sovrapposizione di un'onda polarizzata verticalmente e un'onda polarizzata orizzontalmente.

Il campo magnetico \vec{B} di un'onda elettromagnetica, come sappiamo, è completamente determinato, in modulo, direzione e verso, se sono noti il campo elettrico \vec{E} e la direzione di propagazione. Quindi, per un'onda che viaggia in una data direzione, specificare \vec{E} significa descrivere l'onda in tutte le sue proprietà.

Il caso della luce

La polarizzazione è una proprietà delle onde radio emesse dalle antenne e di tutte le onde elettromagnetiche, compresa la luce. Le «antenne» che emettono luce visibile sono gli atomi, per effetto dei moti degli elettroni al loro interno.

La luce naturale è una sovrapposizione di più onde elettromagnetiche provenienti da un grande numero di atomi ed emesse in modo casuale, per cui non è polarizzata.

La luce *non polarizzata* è una miscela di molte (infinite) onde luminose, che singolarmente sono polarizzate, ma hanno polarizzazioni diverse e casuali.

Con l'uso di opportuni filtri è possibile estrarre, dalla luce non polarizzata, le onde componenti che hanno una determinata polarizzazione.

Il filtro polarizzatore

Un filtro che si lascia attraversare dalle onde luminose polarizzate linearmente in una certa direzione, e assorbe tutte le altre, è detto **polarizzatore lineare**.

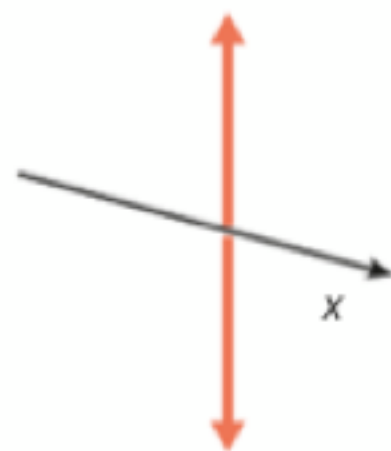
Se un polarizzatore lineare è colpito da un fascio di luce naturale di irradiazione $E_R^{(0)}$, la luce da esso trasmessa ha un irradiazione E_R dimezzato:

$$E_R = \frac{1}{2} E_R^{(0)}. \quad [26]$$

La luce naturale, infatti, è una miscela di onde con polarizzazione casuale e tutte le onde polarizzate sono la sovrapposizione di un'onda polarizzata linearmente in una direzione (per esempio, verticale) e un'onda polarizzata linearmente nella direzione perpendicolare (nello stesso esempio, orizzontale). Pertanto, in media, la luce naturale è composta per metà da onde con la polarizzazione «giusta» e per metà da onde con la polarizzazione «sbagliata»: la prima metà viene trasmessa dal polarizzatore e la seconda viene eliminata.

Nelle rappresentazioni grafiche useremo, per comodità, una coppia di vettori opposti per indicare la direzione di polarizzazione della luce polarizzata linearmente e due di queste coppie, in direzioni mutuamente perpendicolari, per indicare un'onda non polarizzata (FIGURA 10).

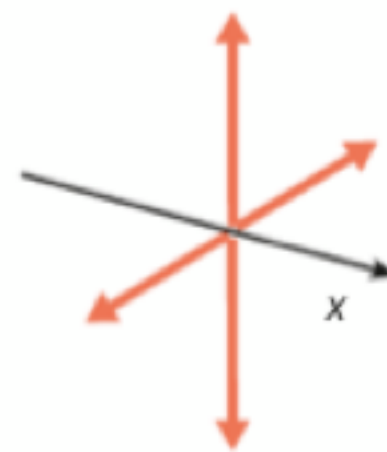
luce polarizzata
verticalmente



luce polarizzata
orizzontalmente

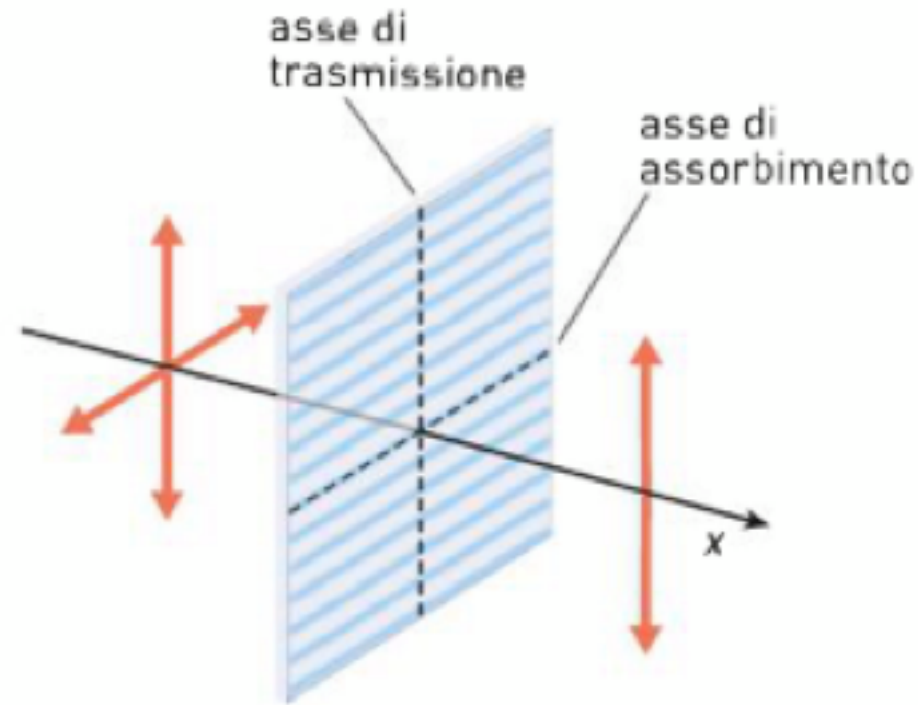


luce non polarizzata



Un esempio di filtro polarizzatore è la *lamina polaroid*, che contiene fibre conduttrici allineate tra loro. Quando la luce non polarizzata arriva sulla lamina, le onde componenti

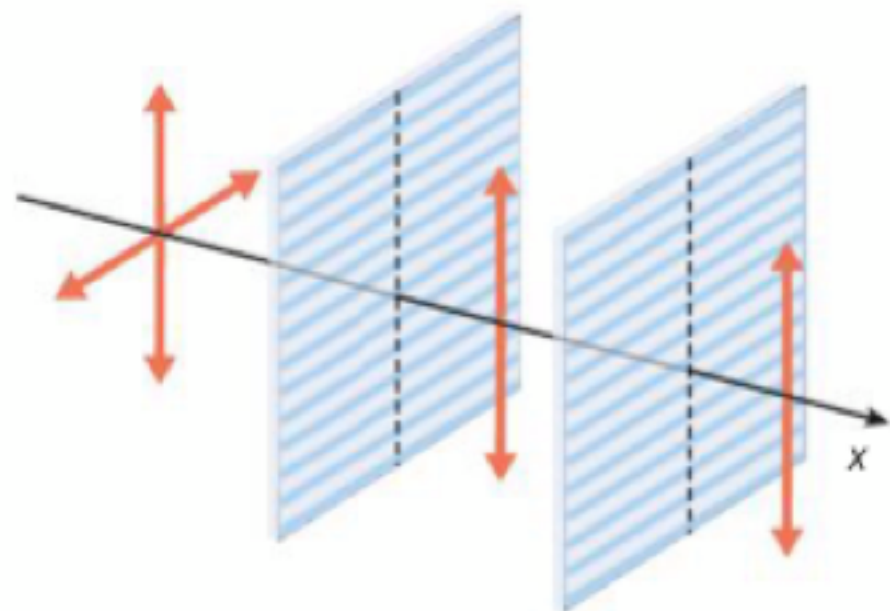
che hanno il campo elettrico parallelo alle fibre vengono assorbite, poiché compiono lavoro sui portatori di carica; le onde componenti con campo elettrico perpendicolare, invece, passano indisturbate. La direzione delle fibre è l'*asse di assorbimento* della lamina e la direzione perpendicolare è il suo *asse di trasmissione* (FIGURA 11).



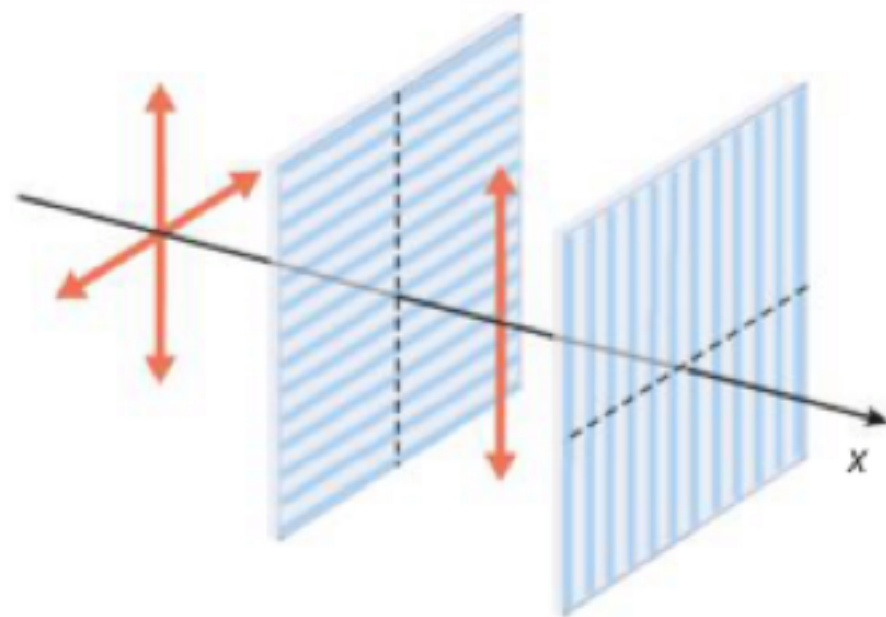
La luce che emerge da una lamina polaroid è sempre polarizzata linearmente lungo l'asse di trasmissione.

Supponiamo che un fascio di luce non polarizzata attraversi un polarizzatore lineare e poi ne colpisca un secondo. La luce trasmessa dal primo polarizzatore:

- attraversa anche il secondo se questo ha asse di trasmissione parallelo all'asse di trasmissione del primo;

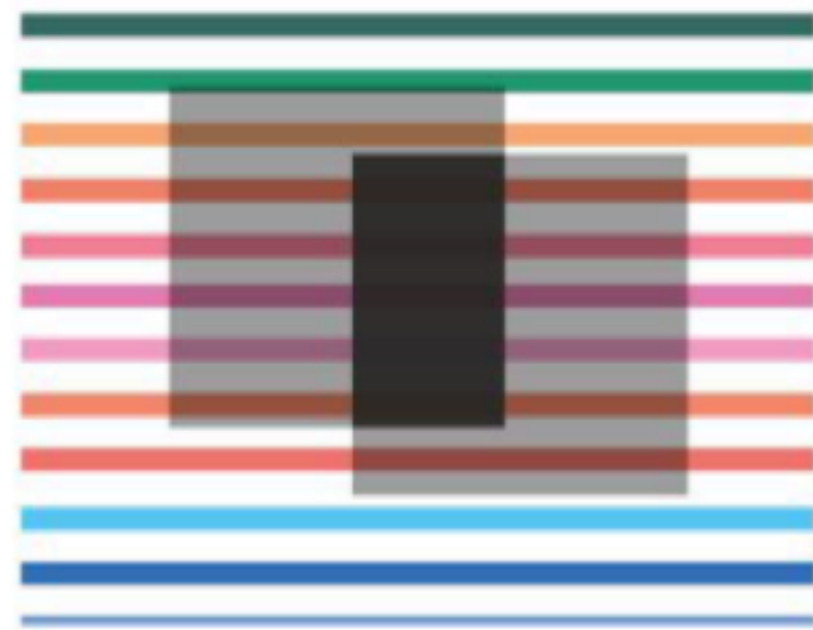


- viene bloccata se l'asse di trasmissione del secondo è perpendicolare all'asse di trasmissione del primo.



Due polarizzatori lineari con assi di trasmissione perpendicolari tra loro si dicono *incrociati*.

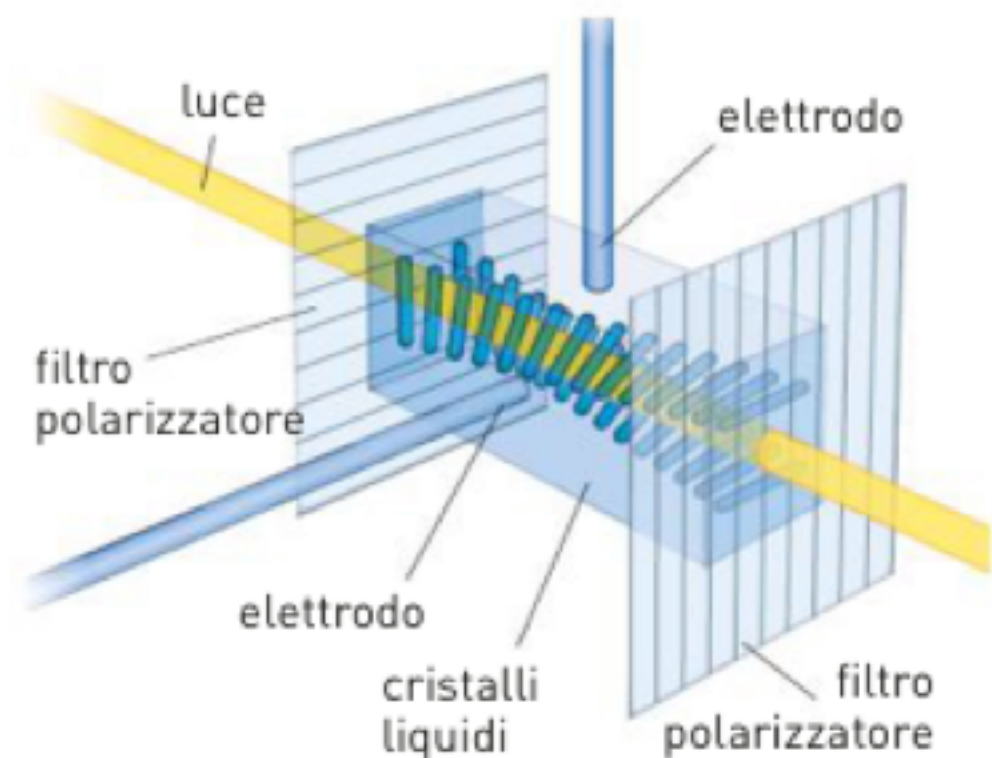
La fotografia mostra **due lamine polaroid incrociate**, che appaiono nere, cioè assorbono completamente la luce, nella zona in cui si sovrappongono. I filtri polarizzatori selezionano le componenti della luce in base alla loro polarizzazione e indipendentemente dalla loro frequenza: infatti, come si vede, attenuano ogni colore allo stesso modo.



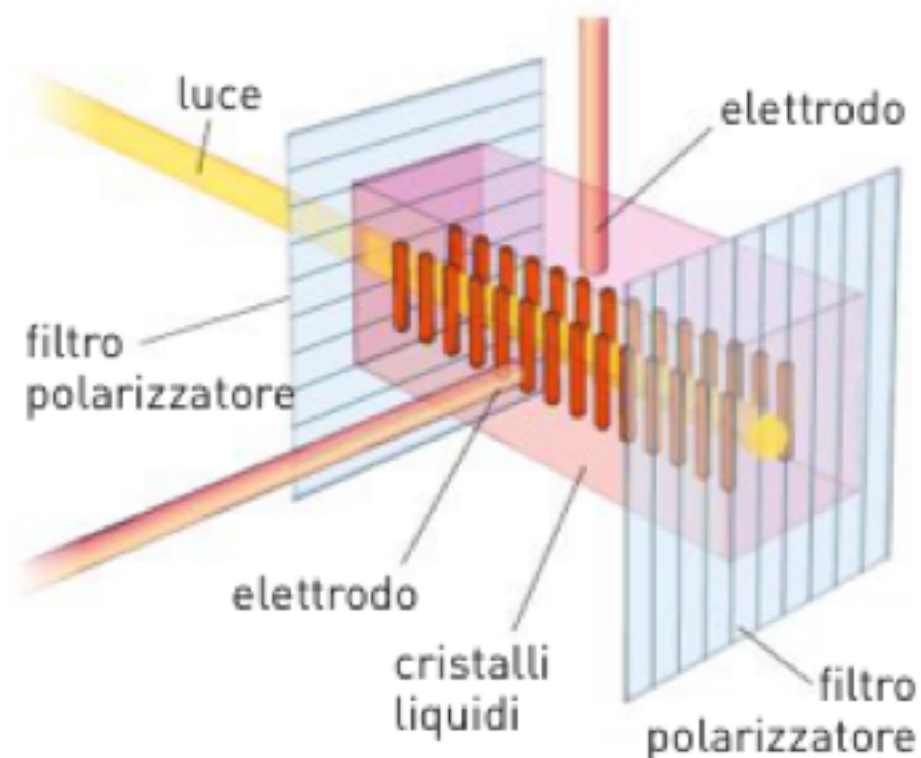
I pixel di uno schermo a cristalli liquidi sono illuminati da dietro e ciascuno di essi è costituito da due filtri polarizzatori incrociati, con uno strato di cristalli liquidi interposto.

I cristalli liquidi hanno la proprietà di ruotare progressivamente la direzione di polarizzazione della luce che li attraversa.

■ La luce emerge dal primo filtro con polarizzazione verticale, ma cambia polarizzazione attraversando lo strato dei cristalli; così, quando arriva sul secondo filtro, è polarizzata orizzontalmente e lo attraversa. In questo caso il punto sullo schermo è chiaro.



■ Un campo elettrico deforma i cristalli liquidi e li rende incapaci di ruotare la direzione di polarizzazione della luce. Quando al pixel è applicata una tensione elettrica, la luce che oltrepassa il primo filtro viene bloccata dal secondo e il punto sullo schermo diventa scuro.



La luce riflessa da superfici isolanti e quella diffusa dall'atmosfera terrestre sono parzialmente polarizzate. Per questo motivo, certi occhiali da sole hanno lenti provviste di un filtro polarizzatore.

La luce riflessa è polarizzata in direzione parallela alla superficie riflettente e quella che ci giunge agli occhi ha polarizzazione prevalentemente orizzontale, perché il più delle volte proviene da superfici orizzontali (mare, strada bagnata). Perciò, per attenuare efficacemente i riverberi, i filtri degli occhiali hanno assi di trasmissione verticali.

La legge di Malus

Abbiamo visto (formula [26]) che un filtro polarizzatore dimezza l'irradiamento della luce se la luce che lo attraversa non è polarizzata. Che cosa accade se il filtro è colpito da luce di irradiamento $E_R^{(0)}$, che sia polarizzata linearmente?

L'irradiamento E_R della luce trasmessa dipende dall'angolo α tra la direzione di polarizzazione della luce incidente e l'asse di trasmissione del filtro, secondo la formula

The diagram shows the Malus law equation $E_R = E_R^{(0)} \cos^2 \alpha$ centered in a light green box. Three lines extend from the box to labels: one from the top left to 'irradiamento della luce trasmessa [W/m²]', one from the bottom left to 'irradiamento della luce incidente [W/m²]', and one from the top right to 'angolo tra direzione di polarizzazione e asse di trasmissione [° o rad]'.

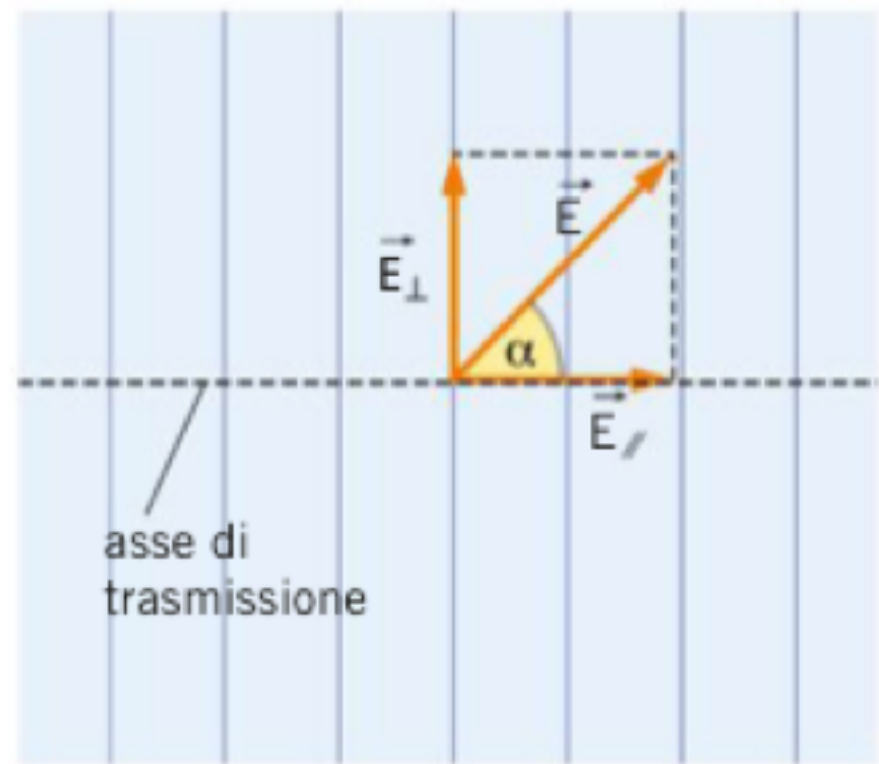
$$E_R = E_R^{(0)} \cos^2 \alpha$$

irradiamento della luce trasmessa [W/m²]

irradiamento della luce incidente [W/m²]

angolo tra direzione di polarizzazione e asse di trasmissione [° o rad]

[27]



La [27] esprime la legge di Malus, così chiamata dal nome del fisico francese Étienne-Louis Malus (1775-1812). Per dimostrarla, scomponiamo il campo elettrico \vec{E} della luce incidente nei due vettori componenti \vec{E}_{\parallel} , parallelo all'asse di trasmissione, ed \vec{E}_{\perp} , perpendicolare (FIGURA 12).

In altri termini, possiamo dire di scomporre l'onda incidente in un'onda componente polarizzata linearmente lungo l'asse di trasmissione e una polarizzata linearmente nella direzione perpendicolare. Questa seconda componente viene assorbita dal polarizzatore.

Se l'ampiezza di oscillazione del campo \vec{E} è E_0 , quella del vettore componente \vec{E}_{\parallel} è

$$E_{\parallel 0} = E_0 \cos \alpha.$$

Allora, per la formula [23], l'irradiamento della luce che emerge dal filtro, polarizzata lungo l'asse di trasmissione, è

$$E_R = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_{10}^2 = \frac{1}{2} c \epsilon_0 (E_0 \cos \alpha)^2 = \left(\frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \right) \cos^2 \alpha$$

Sempre per la [23], il fattore tra parentesi è l'irradiamento $E_R^{(0)}$ della luce incidente: perciò la formula [27] è dimostrata.