

Il segnale video

Richiami di fisica: luce e materia

* La **luce** è costituita da **onde elettromagnetiche** (e.m.) che l'*occhio umano* è in grado di percepire e di tradurre in *diversi colori* quando la loro *lunghezza d'onda* è compresa all'incirca tra 0,38μm (*violetto*) e 0,78μm (*rosso*), ovvero tra $7,90 \cdot 10^{14}$ Hz e $3,85 \cdot 10^{14}$ Hz (ricorda che $f=c/\lambda$, con λ lunghezza d'onda e c velocità¹).

Tabella 1: colori della luce solare

| Colore | λ [μm] | F [10^{14} Hz] |
|----------|----------------|-------------------|
| Violetto | 0,38÷0,43 | 7,90÷7,00 |
| Indaco | 0,43÷0,46 | 7,00÷6,50 |
| Blu | 0,46÷0,49 | 6,50÷6,10 |
| Verde | 0,49÷0,56 | 6,10÷5,35 |
| Giallo | 0,56÷0,58 | 5,35÷5,15 |
| Arancio | 0,58÷0,62 | 5,15÷4,85 |
| Rosso | 0,62÷0,78 | 4,85÷3,85 |

La *radiazione luminosa* può interagire con la **materia** dando luogo all'**effetto fotoelettrico**, *interno* od *esterno*, interpretabile in base alla **teoria dei quanti**, secondo la quale l'energia trasportata da un'onda e.m. è sempre multipla della quantità minima (quanto di radiazione o fotone): $w=h \cdot f$ dove f è la frequenza ed h la *costante universale di Planck* ($h \approx 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s).

L'**effetto fotoelettrico interno** si verifica nei *semiconduttori*, con generazione di *coppie elettrone-lacuna*, conseguente all'assorbimento di quanti di energia radiante di valore pari o superiore al dislivello energetico (*energy gap*) esistente tra il limite superiore della *banda di valenza* ed il limite inferiore della *banda di conduzione* del semiconduttore considerato.

La frequenza f_s per cui si verifica l'uguaglianza tra l'energia dei fotoni e il gap energetico definisce la **soglia fotoelettrica interna** del semiconduttore: $h \cdot f_s = E_g$

Trova applicazione nella realizzazione delle *fotoresistenze a semiconduttore* (trasduttori a variazione di resistenza, basati sull'aumento di conducibilità di un semiconduttore conseguente al passaggio di elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione per effetto della radiazione incidente), di alcuni tubi da ripresa televisiva (*vidicon* e *plumbicon*), e degli elementi fotoelettrici a giunzione (quali ad esempio i *diodi fotorivelatori* impiegati nei sistemi di trasmissione in fibra ottica).

L'**effetto fotoelettrico esterno** consiste invece nell'emissione di elettroni da parte di una *superficie metallica* quando questa viene adeguatamente illuminata.

Vale al riguardo la *legge di Einstein*: $\frac{1}{2} \cdot m v^2 = h f - w_0$ dove v è la massima velocità che può assumere l'elettrone all'atto della sua emissione e w_0 il lavoro necessario per estrarre l'elettrone dal metallo considerato (quindi la massima energia cinetica è uguale all'energia del quanto di luce hf diminuita della quantità w_0). La **soglia fotoelettrica esterna** (frequenza minima al di sotto della

¹ Come tutte le onde e.m., la luce si propaga nel vuoto con velocità: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ dove

$\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m e $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m sono, rispettivamente, la *costante dielettrica* e la *permeabilità magnetica* del vuoto. In un mezzo dielettrico diverso dal vuoto con costanti $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ e $\mu = \mu_r \mu_0$ la velocità della luce si riduce secondo la

relazione $v = \frac{c}{n}$ con $n = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$ *indice di rifrazione* del mezzo considerato.

quale non può manifestarsi la fotoemissione di elettroni) si ricava ponendo a zero la velocità nella relazione di Einstein: $f_s = w_0/h$

Trova applicazione nella realizzazione dei tubi da ripresa televisiva basati sulla scansione elettronica delle immagini (*iconoscopia*).

Elementi di colorimetria

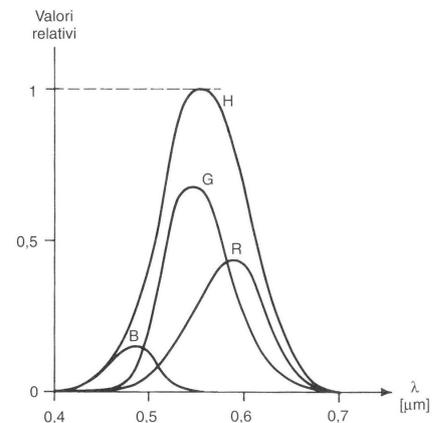
Dicevamo che la diversità di lunghezza d'onda (frequenza) delle onde e.m. viene percepita dall'occhio umano come diversità di colore.

Se la radiazione visibile è composta da una sola frequenza, viene detta **monocromatica**; se invece comprende in egual misura tutte le frequenze dello spettro visibile, si parla di **luce bianca**.

Nell'occhio la luce viene riportata sulla *retina*, dove esistono degli organi sensibili alla luce, **i coni ed i bastoncelli**, che costituiscono la parte terminale dei nervi ottici; i coni sono sensibili ai *colori*, mentre i bastoncelli sono sensibili alla *luminosità*.

La sensibilità dei bastoncelli è molto più elevata di quella dei coni e ciò spiega perché, quando l'illuminazione è scarsa, gli oggetti appaiono più o meno grigi anche se sono variamente colorati.

I coni sono di tre tipi, ciascuno particolarmente sensibile ad uno dei *tre colori fondamentali*: rosso (Red), verde (Green) e blu (Blue).



In **figura** le curve R, G, B mostrano la **sensibilità** dei tre tipi di coni. Le *sensibilità cromatiche* si sommano, fornendo la *curva di sensibilità dell'occhio* H.

La **mescolanza additiva** (proiezione simultanea su una stessa superficie) dei colori fondamentali consente di imitare tutte le gradazioni di colore esistenti: questa possibilità è utilizzata nella ripresa e riproduzione televisiva a colori.

In particolare la mescolanza additiva con pari intensità di due dei tre colori fondamentali fornisce i seguenti colori intermedi:

- Rosso + Verde = Giallo
- Verde + Blu = Ciano (Turchese)
- Blu + Rosso = Porpora (Magenta)

mentre Rosso + Verde + Blu = Bianco

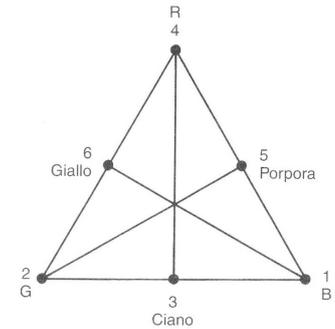
* In **tabella** sono riportate tutte le possibili **mescolanze dei colori fondamentali** (1 e 0 indicano rispettivamente la presenza o l'assenza del colore considerato). I **codici decimali** sono ottenuti dalla traduzione delle terne binarie, e sono utilizzati per calcolare la combinazione di più colori.

Esempio: 4 [Rosso] + 2 [Verde] + 1 [Blu] = 7 [Bianco]

Tabella 2: mescolanza additiva dei colori fondamentali con pari intensità

| R | G | B | Colore risultante | Codice Decimale |
|---|---|---|-------------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | Nero | 0 |
| 0 | 0 | 1 | Blu | 1 |
| 0 | 1 | 0 | Verde | 2 |
| 0 | 1 | 1 | Ciano | 3 |
| 1 | 0 | 0 | Rosso | 4 |
| 1 | 0 | 1 | Porpora | 5 |
| 1 | 1 | 0 | Giallo | 6 |
| 1 | 1 | 1 | Bianco | 7 |

In **figura** è mostrata la **terna dei colori fondamentali**, i colori fra essi intermedi e le coppie di colori complementari: variando le intensità relative dei colori mescolati si possono ottenere le varie gradazioni dei colori intermedi.



Sistema di trasmissione televisivo

Per capire quali siano le caratteristiche del *segnale video* e come esso possa essere trasmesso e riprodotto occorre definire gli elementi principali che compongono un **sistema televisivo**:

- telecamera: trasduttore ottico-elettrico
- microfono: trasduttore acusto-elettrico
- sistema di trasmissione via radio (audio e video, con modulazione)
- sistema di ricezione (audio e video, con demodulazione)
- tubo catodico del televisore: trasduttore elettro-ottico
- altoparlante: trasduttore elettro-acustico

Trasduttori ottico-elettrici: dispositivi da ripresa televisiva

Convertono un'immagine luminosa in un segnale elettrico, detto *segnale video*.

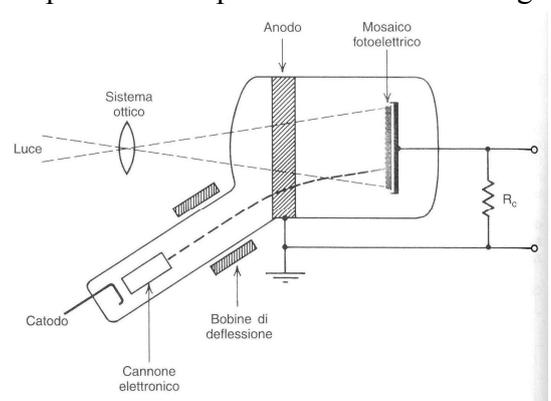
* In base al principio di funzionamento si può operare la seguente **classificazione** dei dispositivi da ripresa:

- tubi fotoemissivi ad elettroni veloci (*iconoscopio*) o ad elettroni lenti (*orthicon*), basati sull'*effetto fotoelettrico esterno*;
- tubi fotoconduttivi (*vidicon, plumbicon*), basati sull'*effetto fotoelettrico interno*;
- dispositivi allo stato solido, basati sull'impiego di componenti elettronici ad accoppiamento di carica (*CCD, Charge Coupled Device*).

* Le principali **caratteristiche** che definiscono il funzionamento ed il tipo di utilizzazione di un dispositivo da ripresa sono:

- sensibilità: ampiezza del segnale di uscita corrispondente ad un determinato "illuminamento" del dispositivo fotosensibile;
- risoluzione (verticale e orizzontale): attitudine del dispositivo da ripresa a risolvere i dettagli fini dell'immagine.

* L'**Iconoscopio**, il primo dispositivo da ripresa televisiva a *scansione elettronica* (Zworykin, 1934), è essenzialmente costituito da un *mosaico fotoelettrico* ed un *cannone elettronico*, racchiusi in un *bulbo di vetro* ad alto vuoto, e da un sistema di *lenti ottiche* per la focalizzazione delle immagini sul mosaico. Il mosaico fotoelettrico è costituito da una *piastra metallica* ricoperta da microscopiche *cellule fotoemittenti*, isolate sia dalla piastra che tra loro.



In assenza di radiazione luminosa incidente, gli elementi del **mosaico fotoelettrico** hanno tutti lo stesso potenziale della piastra (ovvero i rispettivi condensatori sono scarichi), ma quando, mediante il sistema esterno di lenti ottiche, l'immagine luminosa da convertire in segnale video viene proiettata sul mosaico, i minuscoli *fotocatodi* del

mosaico emettono elettroni verso l'*anodo*, in numero proporzionale all'intensità della luce che li ha colpiti, acquistando così un potenziale positivo rispetto alla piastra.

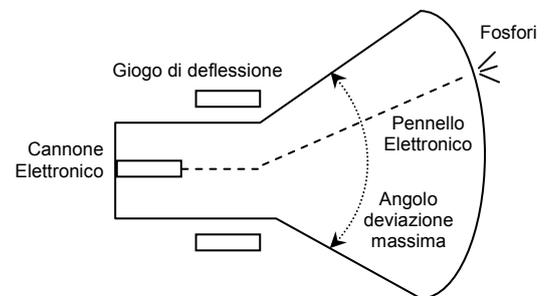
Sul mosaico si forma in tal modo un'**immagine elettronica**, costituita da una distribuzione di *cariche positive* corrispondente alla distribuzione della luminosità sull'immagine ottica. Ciascuna cellula del mosaico, essendo isolata da tutte le altre, conserva la sua carica positiva, accumulata nel rispettivo condensatore, fino a che non verrà scaricata al passaggio su di essa del fascio focalizzato di elettroni proveniente dal cannone elettronico.

Il **pennello elettronico** esplora per tracce parallele l'intera superficie del mosaico, sotto il comando del *giogo di deflessione* (due coppie di bobine ortogonali fra loro, percorse da due distinte correnti a *dente di sega*), trasformando così l'immagine elettronica del mosaico in una sequenza ordinata nel tempo di impulsi elettrici, che forniscono ai capi della *resistenza di carico* il segnale video di uscita.

Trasduttori elettro-ottici: dispositivi di presentazione video

Il **Cinescopio** è un particolare *tubo a raggi catodici* (CRT, *Cathode Ray Tube*) nel quale l'intensità del *pennello elettronico*, che determina la traccia luminosa sullo *schermo fluorescente*, è funzione dell'ampiezza del *segnale video*.

Grazie alla presenza di opportuni **impulsi di sincronismo**, aggiunti in trasmissione al segnale video (*segnale video composto*), il pennello elettronico si muove in perfetto sincronismo con la *scansione elettronica* relativa al dispositivo da ripresa, e ciò consente di riprodurre, riga per riga, l'immagine originaria.



I **fosfori** impiegati (vengono così chiamati i materiali luminescenti che compongono lo schermo, benché non contengano tale elemento) sono normalmente del tipo *P4* per i cinescopi in bianco e nero, e del tipo *P22* per quelli a colori, secondo una nomenclatura americana.

La **persistenza** della radiazione emessa al cessare dell'eccitazione del fosforo è definita *lunga*, *media* o *breve* a seconda che la sua durata sia dell'ordine, rispettivamente, del secondo, del millisecondo o del microsecondo.

La forma del tubo è tale da realizzare una grande superficie dello schermo con le *minime dimensioni di ingombro*. Al riguardo è importante l'**angolo di deviazione massima** del pennello elettronico, definito come l'angolo di transizione fra il collo e la parte svasata del tubo: il passaggio dai 70° dei primi tubi ai 110° dei modelli più recenti ha determinato una riduzione di oltre il 40% della lunghezza del tubo.

La realizzazione di angoli di deviazione ancora più grandi incontra **difficoltà**, non solo nella costruzione del tubo, ma anche nella progettazione del sistema di comando della deflessione, costituito essenzialmente da due coppie di bobine fra loro ortogonali, montate su un complesso denominato *giogo di deflessione* posto attorno al collo del tubo, dalla parte della svasatura.

Nei cinescopi è infatti impiegata la **deflessione magnetica**, in luogo di quella *elettrostatica* adottata nei tubi per *oscilloscopi*. Le bobine del giogo di deflessione, percorse da correnti a *denti di sega*, generano due campi magnetici tra loro ortogonali e ortogonali all'asse del tubo, producendo lo spostamento *orizzontale* e *verticale* del puntino luminoso sullo schermo, in modo da comporre un quadro luminoso mediante una serie di righe parallele e pressoché orizzontali, una sotto l'altra.

Nello **standard televisivo europeo** le frequenze sono di 625 righe per quadro, con 50 semiquadri *interallacciati* al secondo (alternativamente un semiquadro per le righe pari ed uno per quelle dispari). Tali concetti saranno più chiari tra breve.

Interallacciamento

* Come avete avuto modo di capire, il **segnale video** è la rappresentazione, in forma elettrica, di un'immagine in movimento (e quindi variabile nel tempo), data da variazioni di luminosità (da un valore massimo, per il *bianco*, ad un valore minimo, per il *nero*) nello spazio (ovvero su una superficie bidimensionale).

Un segnale di questo tipo è molto complesso ed è quindi necessario adottare un qualche metodo per **ridurre** la quantità di informazione da trasmettere, nel caso lo si voglia inviare a distanza.

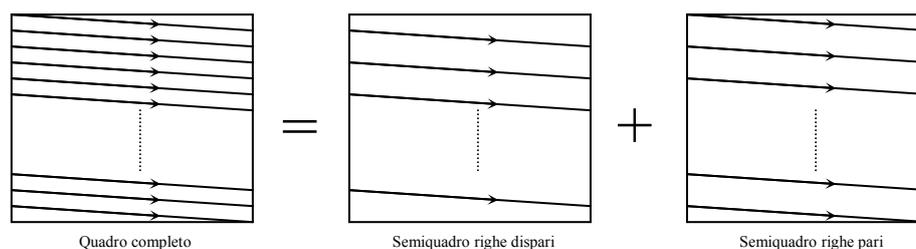
Il metodo utilizzato sfrutta un fenomeno che avviene all'interno dell'occhio e che è noto come **persistenza dell'immagine sulla retina**: qualora l'occhio riceva un numero sufficiente di immagini statiche al secondo (per l'esattezza: 16) esso fornisce comunque la continuità della *percezione visiva*, ricreando la sensazione del movimento. Grazie a questo fenomeno un'immagine in movimento può essere scomposta in una serie di *quadri* (immagini statiche).

Si indica con **definizione temporale** (DT) il numero di *quadri al secondo* che si trasmettono. La **frequenza di quadro** (f_q) ne è l'inverso.

Ogni quadro viene trasmesso come successione di *righe*. Il numero di righe adottato fornisce la **definizione verticale** (DV).

Le righe sono scandite dal pennello elettronico da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso, partendo dall'angolo in alto a sinistra. Ogni volta che il pennello raggiunge l'estremo destro viene spento e riportato sul lato sinistro dove è riacceso per ricominciare la scansione. Il comando viene dato dai **segnali di sincronismo**: *orizzontale* (alla fine di ogni riga) e *verticale* (alla fine di ciascun semiquadro).

La definizione verticale adottata in Europa è DV=625 righe.



Per evitare **problemi di interferenza** con la rete di alimentazione che in Europa è di 50Hz, sarebbe necessario trasmettere 50 quadri al secondo. Per ridurre tale frequenza (e risparmiare sulla quantità di informazioni da trasmettere) si usa la tecnica dell'**interallacciamento**: si scandisce il quadro una prima volta seguendo le righe dispari e la volta successiva seguendo le righe pari: l'occhio non si accorge della differenza.

In Europa si utilizza una DT=25 quadri/s $\rightarrow f_q=25\text{Hz}$ (*frequenza di semiquadro* = 50Hz).

* Altro parametro importante è il **rapporto d'aspetto**, ovvero il rapporto tra la larghezza e l'altezza dello schermo. Per la TV normale $R_a=4/3$, mentre per la TV ad alta definizione (HDTV) $R_a=16/9$.

Trasmissione televisiva a colori

Partendo dalla constatazione che un'immagine a colori può essere ottenuta mediante la combinazione dei tre colori fondamentali (R-G-B), in linea di principio un sistema di televisione a colori può essere realizzato mediante **tre diversi trasmettitori e ricevitori**, uno per ogni colore. Proiettando su una superficie bianca le tre immagini ricevute, si ottiene per *mescolanza additiva* l'immagine a colori originaria.

Un sistema di questo tipo può trovare applicazione nella *televisione a circuito chiuso*, ma è inaccettabile per il servizio diffusivo di televisione, perché non rispetta il requisito della **compatibilità** con i televisori in bianco e nero (B/N). Infatti, per consentire la coesistenza dei sistemi B/N ed a colori, il segnale video a colori deve essere in grado di produrre immagini in B/N sui televisori monocromatici, e reciprocamente i televisori a colori devono poter ricevere il segnale dei trasmettitori monocromatici, producendo naturalmente immagini in B/N.

Il sistema utilizzato per il servizio televisivo a colori si basa sulla constatazione che non è indispensabile la presenza diretta dei colori fondamentali, ma è sufficiente trasmettere **tre loro qualsiasi combinazioni**.

Indicando con E_R , E_G ed E_B le componenti relative al rosso, al verde ed al blu, le tre combinazioni possono essere:

$$\begin{aligned} E_1 &= a_1 E_R + b_1 E_G + c_1 E_B \\ E_2 &= a_2 E_R + b_2 E_G + c_2 E_B \\ E_3 &= a_3 E_R + b_3 E_G + c_3 E_B \end{aligned}$$

dove a_n , b_n , c_n costituiscono una *matrice di costanti numeriche*, comune al trasmettitore ed al ricevitore.

Il segnale E_1 , denominato **segnale di luminanza**, è identico a quello del sistema in B/N e pertanto rende compatibile un televisore monocromatico con il sistema a colori; se invece il televisore è a colori, tale segnale definisce la luminosità (è infatti dimostrabile che con il 30% di rosso, il 59% di verde e l'11% di blu è possibile ottenere la luminosità, ovvero $E_1 = 0,30 * E_R + 0,59 * E_G + 0,11 * E_B$).

I segnali E_2 ed E_3 , denominati **segnali di crominanza** ($E_2 = E_B - E_1$ ed $E_3 = E_R - E_1$), non contengono invece alcuna informazione sulla luminosità dell'immagine, ma definiscono il colore, e vengono scartati in ricezione dai televisori monocromatici.

In conclusione, nel complesso trasmettente della televisione a colori sono presenti tre dispositivi da ripresa, muniti di filtri colorati, che forniscono tre segnali video proporzionali al contenuto di rosso, di verde e di blu nell'immagine. Da questi tre segnali si ottengono, attraverso combinazioni lineari



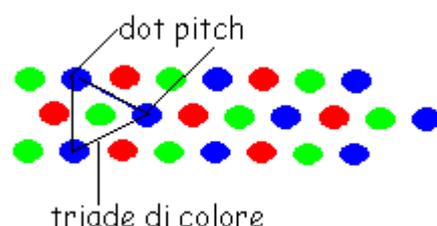
eseguite in un organo denominato **matrice di compatibilità**, sia il segnale di *luminanza*, identico al segnale video standard monocromatico, che i due segnali di *crominanza*; questi ultimi vengono opportunamente modulati e quindi sommati al segnale di luminanza, ottenendo così il segnale

video a colori, dotato del requisito di compatibilità richiesto.

In ricezione, dal segnale video a colori si riottengono i segnali corrispondenti ai tre colori fondamentali, che possono essere applicati ad un unico dispositivo di uscita a visione diretta, realizzato con un tubo a raggi catodici.

Nel caso dei cinescopi a colori (**a maschera forata**) tale tubo comprende tre cannoni elettronici che forniscono tre fasci localizzati, uno per ogni colore fondamentale, controllabili in intensità separatamente.

Lo schermo è formato da un gran numero (circa 400.000) di **triadi cromatiche**, cioè di terne di punti fra loro isolati



che emettono, se colpiti da elettroni, luce rossa, verde e blu.

I pennelli elettronici formati dai tre cannoni, prima dello strato fluorescente, trovano una **lastra metallica perforata** con un numero di fori pari a quello delle triadi cromatiche. Un sistema di convergenza allinea i pennelli in modo tale che ogni pennello, passando attraverso i fori della maschera, possa eccitare, su tutto lo schermo, soltanto i punti del suo colore.