

Che cosa è, come funziona: proiettori a microspecchi (DMD™, DLP™)

ing. Marzio **Barbero**
(Rai - Radiotelevisione Italiana
Centro Ricerche e Innovazione
Tecnologica)

ing. Natasha **Shpuza**
(RTSH - Radio Televizion Shqiptar)

1. Premessa

L'articolo "Sistemi a proiezione basati su microspecchi", nel n. 3 del dicembre 2000 di *Elettronica e Telecomunicazioni* descriveva il principio di funzionamento dei sistemi a proiezione e retroproiezione basati sui dispositivi DMD™ e prospettava che tale tecnologia avesse un futuro molto promettente, anche per la visualizzazione di immagini televisive (a definizione normale e in alta definizione).

Tali prospettive si stanno concretizzando sia in termini di prestazioni che di prezzi, come si evince nella sezione 6 di questa scheda. In particolare ormai tutte le aziende che operano nel settore dei proiettori per applicazioni *business* includono sistemi basati su microspecchi, in alternativa a quelli basati sulla tecnologia dei cristalli liquidi (TFT). Per quanto riguarda i retroproiettori, adatti per l'*home theatre*, i modelli recentemente annunciati sono caratterizzati da minor ingombro e peso e i prezzi si sono ridotti ad un terzo (rispetto ai modelli precedenti): sono quindi un'alternativa valida (anche se non possono rivaleggiare per quanto riguarda la profondità) agli schermi al plasma (PDP). Sono stati finora prodotti più di un milione di sottosistemi basati sulla tecnologia DLP

Le restanti sezioni, dalla 2 alla 5, ripropongono, aggiornate, le informazioni già presenti nel citato articolo.

2. Cenni storici

Nel 1987 venne inventato il DMD (Digital Micromirror Device), il dispositivo microspecchio digitale è alla base dei sistemi DLP (Digital Light Processing). DMD™ e DLP™ sono marchi della Texas Instruments Incorporated. Nel 1991 venne avviato il progetto per la realizzazione di prodotti basati su tale tecnologia ed il primo di tali sistemi venne commercializzato nell'aprile 1996. Il Centro Ricerche della Rai fu uno dei primi a dotarsi di un sistema (risoluzione 1024 x 768, luminosità 5000 lumen, peso 91 kg) per valutare prestazioni e limiti di questi sistemi per applicazioni televisive.

3. Principio di funzionamento dei sistemi a microspecchi

Vi sono sistemi di visualizzazione basati sulla emissione da parte di fosfori colpiti da elettroni (CRT - *Cathode Ray Tube* e PDP - *Plasma Display Panel*), altri funzionanti sul principio della valvola di luce (LCD - *Liquid Crystal Device* o di quelli a film d'olio, sviluppati all'inizio degli anni '40 dall'Istituto Federale Svizzero della Tecnologia). I dispositivi a microspecchi sono invece alla base di sistemi di proiezione a riflessione: l'immagine si forma su un dispositivo in grado di riflettere la luce e quindi, attraverso un insieme di lenti, consentire la proiezione dell'immagine sullo schermo.

I sistemi DLP sono basati sulla riflessione della luce da parte di una schiera di veloci interruttori, ciascun interruttore è uno specchio quadrato in alluminio di lato pari a 16 µm (per meglio valutare le dimensioni si osservi la figura 1).

Il DMD fa parte di una classe di dispositivi noti come sistemi microelettromeccanici (MEMS, microelectromechanical systems) definibili come "dispositivi, o insiemi di dispositivi, ad elevata miniaturizzazione che combinano componenti elettrici e meccanici e che sono fabbricati usando tecniche per la produzione dei circuiti integrati". Questa classe comprende altri dispositivi, ad esempio sensori di pressione e accelerometri, che trovano applicazione in vari campi: nell'industria automobilistica (sensori di pressione dei pneumatici, accelerometri per airbag ...) e in campo medico (sensori della pressione sanguigna, stimolatori dei muscoli ...).

Il DMD è costituito da una matrice, o schiera, di specchi (fino a 1,3 milioni di specchi) disposti su una superficie analoga a quella di un'unghia) ciascuno dei quali può assumere

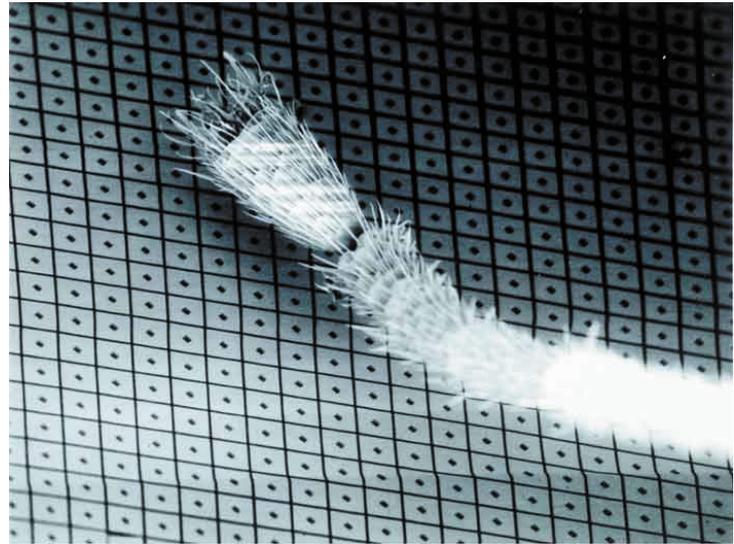


Fig. 1 - Microfotografia di una zampa di formica sulla superficie DMD. Ciascun specchio, quadrato di lato 16 µm, è separato dagli adiacenti di 1 µm.

due posizioni (acceso o spento, on e off, 1 o 0) e ruota di $\pm 10^\circ$ o $\pm 12^\circ$ (vi sono due varianti di chip) in funzione della attrazione elettrostatica tra la struttura dello specchio e gli elettrodi connessi alla sottostante cella di memoria. In figura 2 è schematizzata la struttura di un singolo elemento.

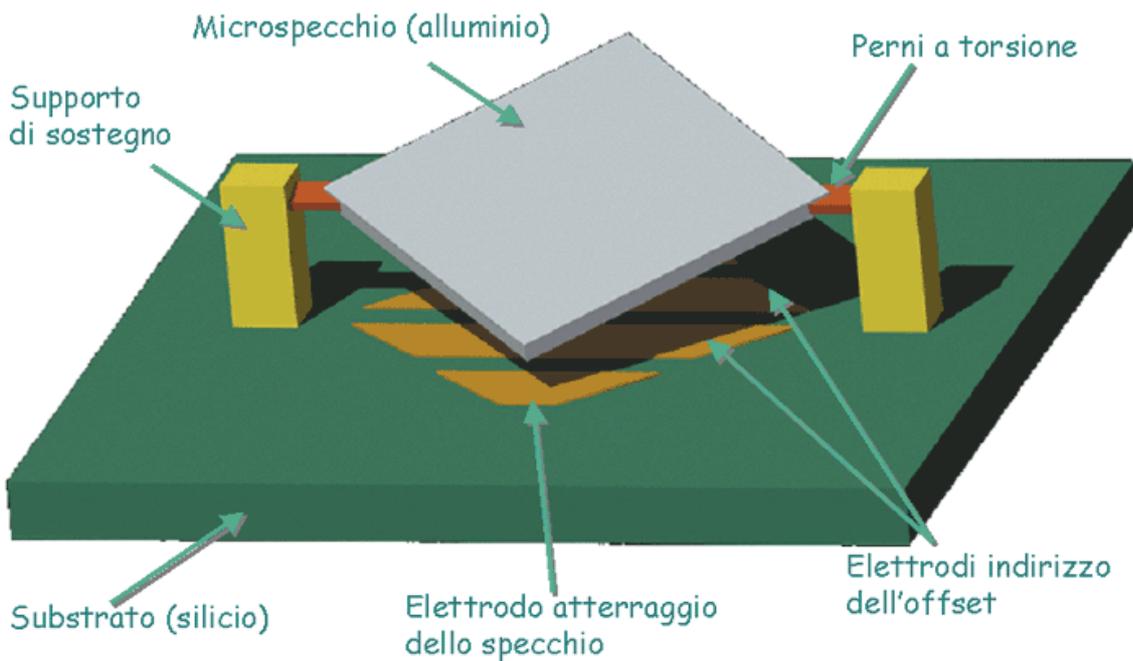
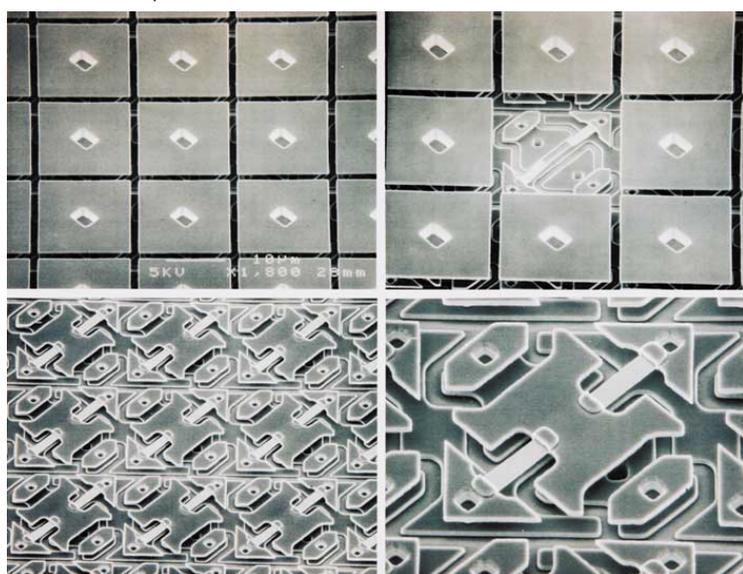


Fig. 2 - Rappresentazione semplificata di un singolo elemento di DMD (un pixel).

Fig. 3 - Rappresentazione esplosa di un singolo elemento DMD. Ciascun specchio quadrato di 16 µm di lato consiste di tre strati fisici e due strati di separazioni intermedi che consentono allo specchio di inclinarsi di +10 o -10 gradi.



Fig. 4 - Queste microfotografie illustrano una porzione di DMD™. In alto a sinistra sono visibili 9 microspecchi. Nella foto in alto a destra è stato rimosso quello centrale ed è così visibile la struttura dei perni. Nella foto in basso a sinistra tutti i microspecchi sono stati rimossi. Infine, la foto in basso a destra mostra un ulteriore ingrandimento della struttura sottostante al microspecchio.



La figura 3 è una rappresentazione esplosa di un singolo microspecchio e in figura 4 alcune microfotografie illustrano la struttura reale della schiera di specchi.

Per quanto riguarda l'affidabilità, in letteratura, basata su test di laboratorio, viene indicata una stima di MTBF (tempo medio fra guasti) superiore a 119 000 ore. In pratica i dispositivi dovrebbero operare oltre 10 anni, fino a 50 anni nel caso di uso non particolarmente frequente.

Queste sono alcune delle motivazioni di tale elevata affidabilità:

I perni, che permettono agli specchi di ruotare migliaia di volte al secondo, non si piegano o non si rompono perché le leggi della meccanica hanno effetti diversi quando si applicano a oggetti miniaturizzati. Un materiale, sottoposto a "fatica", cioè piegato ripetutamente, si rompe a causa dello spostamento, all'interno della struttura cristallina, dei singoli cristalli che lo compongono. Nel caso del perno del microspecchio, a ragione delle dimensioni microscopiche, tutti i cristalli si trovano sulla superficie della struttura: non esiste una struttura di cristalli interni e quindi il fenomeno di stress dovuto allo spostamento non ha conseguenze.

Gli specchi non rimangono "incollati" perché il progetto del dispositivo ha portato all'eliminazione delle possibili cause di blocco dello specchio: vi sono delle minuscole molle che spingono lo specchio lontano dalla superficie di atterraggio, quando cessa la forza elettrostatica; sono stati ridotti al minimo gli effetti delle forze di van der Waals che causano l'attrazione dei materiali a livello molecolare; gli effetti dovuti alla possibile condensazione dell'umidità sono ridotti poiché il dispositivo è sigillato in ambiente secco in un package ermetico che assicura l'assenza di umidità per l'intera vita del dispositivo.

I microspecchi non sono fragili. La rottura, ad esempio di un vetro, è normalmente causata dalle vibrazioni; nel caso di superstrutture DMD i modi di vibrazione sono caratterizzati da frequenze almeno di due ordini di grandezza

superiori a quelle generate nell'uso normale (la frequenza di risonanza più bassa è 100 kHz, le successive armoniche sono dell'ordine dei MHz). In pratica le sorgenti di vibrazione e di shock di esperienza quotidiana, ad esempio la caduta sul pavimento, non hanno particolari conseguenze sui dispositivi a microspecchi.

La probabilità di un microspecchio difettoso è bassa: i processi di fabbricazione dei DMD sono gli stessi utilizzati per la produzione dei circuiti integrati (*clean-room* per la fabbricazione dei *wafers*) e l'attuale resa è così elevata da consentire di soddisfare la richiesta di dispositivi garantiti, al momento della fabbricazione, privi di difetti al 100%.

4. Il sistema di proiezione

La figura 5 schematizza il principio di funzionamento di un proiettore a riflessione basato su DMD: gli specchi sono comandati singolarmente e indirizzano la luce generata da un'opportuna sorgente o verso lo schermo (attraverso il sistema di lenti) oppure verso una superficie assorbente.

La scala dei grigi viene ottenuta utilizzando una tecnica di modulazione di ampiezza d'impulso (PWM, *pulse width modulation*): il singolo microspecchio viene rapidamente commutato (tempo di commutazione meccanica ~15 ms e di commutazione ottica ~2 ms) e il rapporto tra il tempo in cui è "on" e il tempo in cui è "off" è direttamente proporzionale al livello di luminosità del punto corrispondente sullo schermo.

Questo modo di funzionamento è alla base di due delle caratteristiche principali di questi sistemi di visualizzazione:

- i DMD sono pilotati direttamente da parole binarie che individuano i singoli livelli di luminosità ed è quindi realizzabile un sistema completamente digitale, dove l'informazione relativa all'immagine numerica (derivata ad esempio da un segnale video MPEG oppure generata direttamente da un PC) viene trasformata in informazione visuale

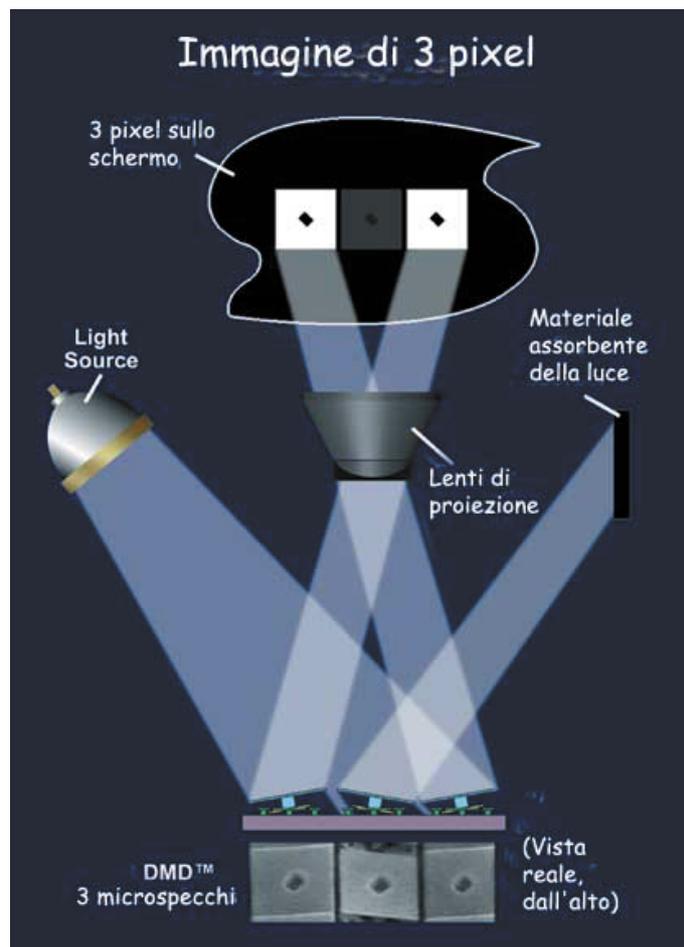


Fig. 5 - In questa rappresentazione schematica la luce incide su tre specchi (ovvero tre pixel). Due specchi (nello stato "on") riflettono la luce che attraverso il sistema di lenti arriva allo schermo producendo due pixel bianchi. Lo specchio centrale (nello stato "off") riflette la luce incidente verso una superficie assorbente e quindi il corrispondente pixel sullo schermo risulta nero.

senza necessità di utilizzare un convertitore digitale/analogico;

- grazie all'elevata frequenza di commutazione, il sistema psico-visivo umano non percepisce flicker.

Sono state commercializzate configurazioni differenti di proiettori, che utilizzano uno, due o tre DMD. I proiettori con un solo dispositivo sono quelli caratterizzati da un minor costo, basso peso, assenza di problemi legati alla convergenza: sono adatti per sistemi portatili

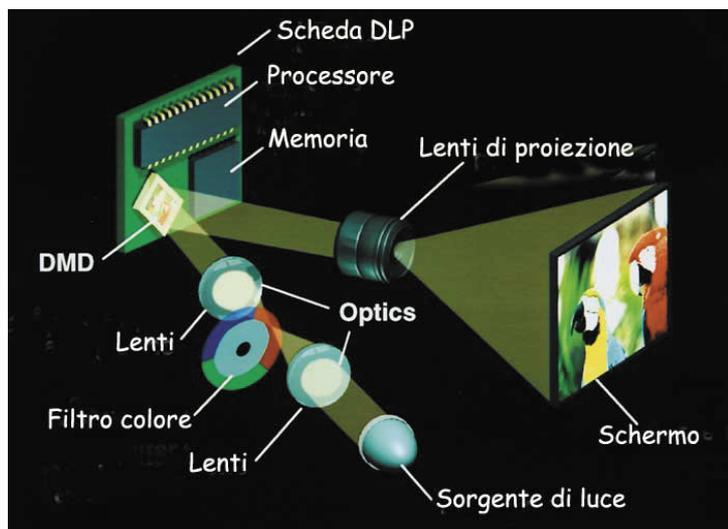


Fig. 6 - Schema di funzionamento di un sistema basato su un solo DMD™. Gli specchi sono commutati in modo da riflettere la luce sulla base dell'informazione video e il sistema visivo umano integra i colori in sequenza, si ottiene così la percezione dell'immagine a colori.

e i retroproiettori. I sistemi a tre dispositivi forniscono le maggiori prestazioni in termini di luminosità e sono utilizzati per proiezioni in luoghi pubblici (fiere, sale per conferenza e teatri).

In figura 6 è schematizzato lo schema di funzionamento della configurazione che utilizza un solo DMD. La luce monocromatica passa attraverso tre filtri (rosso, verde, blu) che costituiscono le tre porzioni di una ruota: quindi l'informazione di cromaticità, così come quella di luminanza, viene ottenuta grazie alla tecnica di modulazione d'impulso della luce e alla elevata velocità di commutazione dei microspecchi. Per migliorare l'efficienza è stato recentemente sviluppato un sistema che permette di minimizzare la luce non trasmessa attraverso la ruota, ma assorbita all'interno del proiettore (figura 7). Con queste nuove tecniche è possibile raggiungere con un solo modulatore l'efficienza che caratterizzava precedentemente i sistemi basati su tre DMD.

Fig. 7 - La luce bianca passa attraverso un integratore e diretta su una ruota denominata SCR (Sequential Color Recapture). La luce è scomposta nelle componenti rosso, verde, blu, la luce che non transita viene riflessa indietro all'integratore e catturata nuovamente. Viene quindi ridiretta sulla ruota SCR. In questo modo si ha un aumento del 40% in termini di lumen rispetto ad un sistema tradizionale, che non sfrutta la luce riflessa, di generazione di colori sequenziale a ruota.

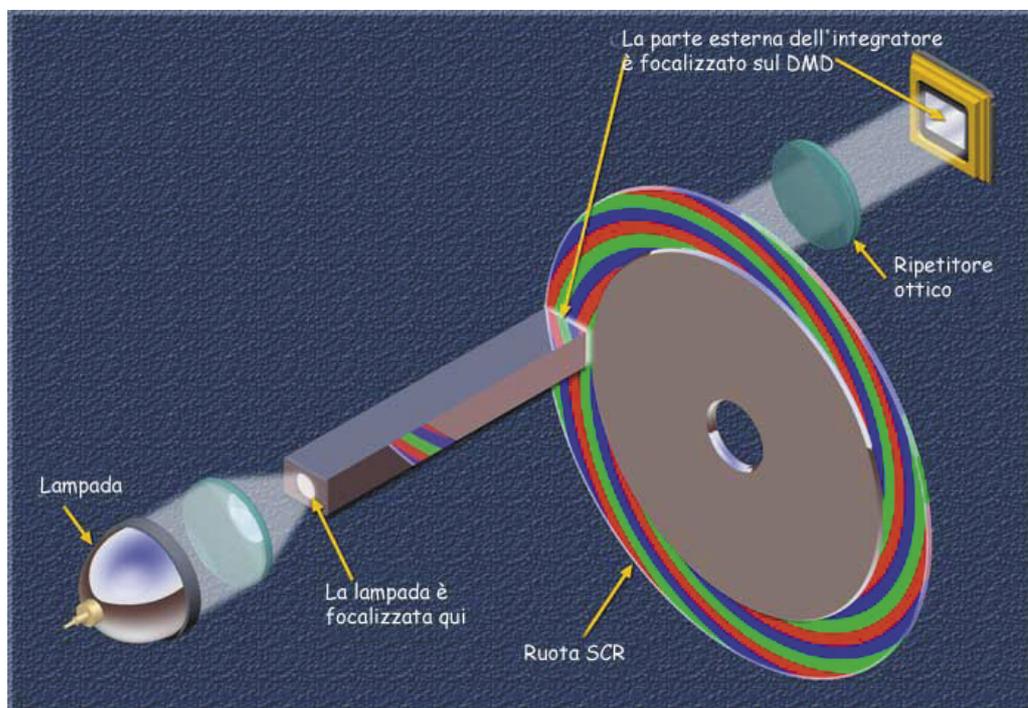




Fig. 8 - Schema di flusso generico che rappresenta le elaborazioni a cui è soggetto il segnale video per adattarlo alla visualizzazione

5. Pre-elaborazione dell'immagine

I microspecchi sono il cuore di un sistema molto articolato che implica una complessa elaborazione del segnale video in ingresso.

Il diagramma di flusso che rappresenta i possibili stadi di pre-elaborazione del segnale video prima della visualizzazione è in figura 8.

Il primo blocco funzionale comprende la demodulazione e la decodifica del segnale video, che può essere in formato analogico (ad esempio un segnale televisivo PAL) oppure digitale (ad esempio MPEG).

Successivamente si adatta il formato dell'immagine a quello ottimale per il sistema di visualizzazione mediante microspecchi. Questo è intrinsecamente digitale, pertanto nel caso di segnale di tipo analogico si effettua la conversione analogico-digitale. La schiera di microspecchi è adatta a visualizzare immagini di tipo progressivo, quindi, nel caso in cui il segnale di ingresso sia interlacciato (i segnali televisivi, sia NTSC che PAL) si provvede alla conversione da interlacciato a progressivo. In tal modo si possono ridurre alcuni artefatti tipici delle immagini interlacciate (flicker di riga e di quadro, visibilità della struttura a righe). Il deinterlacciamento può essere effettuato utilizzando tecniche di varia complessità. Quelle più semplici (ripetizione di riga, media fra righe adiacenti, e in generale FIR intra-field) sono meno costose, poiché non richiedono memorie di quadro, ma presentano difetti quali flicker di riga e perdita di risoluzione. Le tecniche inter-field e inter-frame di tipo adattativo basate sulla rilevazione del movimento hanno prestazioni decisamente migliori a spese di una complessità via via crescente (fino a tre memorie di semiquadro e circa 90

kgates per la realizzazione dell'algoritmo). Nel caso di proiezione mediante DMD il pixel è quadrato, inoltre la schiera di microspecchi ha un numero di pixel per riga ed un numero di righe per quadro ben definito (figura 9). Per adattare i vari formati video d'ingresso vengono quindi applicate delle operazioni di ricampionamento e scalamento, orizzontale e verticale, mediante filtri FIR (finite impulse response). Occorre inoltre effettuare la conversione delle componenti di cromaticità (da luminanza e differenze di colore agli appropriati valori RGB, rosso, verde e blu). Per compensare la caratteristica non lineare dei CRT, ai segnali video viene applicata, in fase di codifica, una pre-correzione denominata gamma: poiché i DMD hanno invece una caratteristica di trasferimento segnale-luce lineare, occorre applicare una funzione di degamma.

Il miglioramento dell'immagine, cioè della qualità percepita, è attuata in gran parte sfruttando le risorse (in termini di memoria e di complessità circuitale) necessarie per le operazioni precedentemente descritte. La memoria di quadro necessaria per il deinterlacciamento e per lo scalamento, viene sfruttata per realizzare anche un filtro temporale per la riduzione del rumore di luminanza. È applicato un algoritmo adattativo di espansione dei livelli nero/bianco in modo da migliorare la percezione soggettiva del contrasto: la dinamica dei neri (bassi livelli dei segnali) è estesa

Fig. 9 - Sono stati realizzati differenti formati di DMD: SVGA (848x600; 508 800 specchi), XGA (1024x768, 786 432 specchi), SXGA (1280x1024, 1 310 720 specchi)

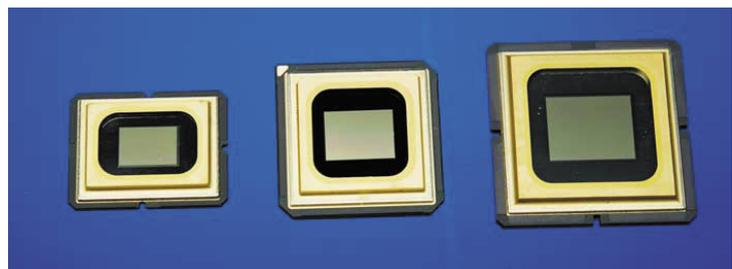
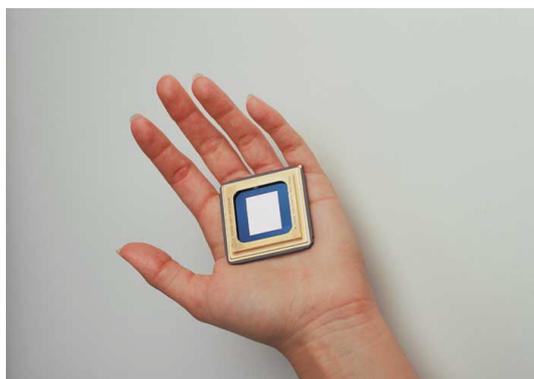


Fig. 10 -
Comparazione fra
le dimensioni di una
mano umana e quelle
del dispositivo SXGA:
1280x1024; 1,310,720
specchi.



verso il basso, ma solo nel caso in cui la scena presenti una dinamica complessiva sufficientemente estesa, al fine di evitare una saturazione al nero nel caso di scene particolarmente scure. Analoga operazione può essere applicata per estendere la dinamica dei bianchi. Ulteriori miglioramenti della qualità percepita sono attuati per quanto riguarda il dettaglio di luminanza (per il video e per la grafica), e le transizioni di cromaticità (si riducono i difetti dovuti alla limitazione in banda delle componenti di cromaticità del segnale video codificato PAL, NTSC o MPEG).

La riduzione degli artefatti ha lo scopo di ridurre al di sotto della soglia di visibilità la percettibilità dei difetti tipici dei sistemi di visualizzazione digitali (quali il DMD). L'aggiunta di rumore bianco (dithering) riduce la comparsa di contorni spaziali dovuti all'operazione di degamma. Sempre operazioni di dithering, selettive spazio/temporali, evitano la percezione di contorni temporali dovuti all'uso della PWM per modulare la luce e ottenere la scala dei grigi: i movimenti dell'occhio o la temporanea ostruzione dell'immagine dalla vista possono essere la causa della comparsa di questi artefatti.

Infine vengono attuate le operazioni di formattazione per generare i segnali PWM, di generazione di informazioni di sfondo, nel caso

in cui l'immagine non riempia l'intera area visualizzabile, memorizzazione delle opportune informazioni per la generazione delle immagini nella memoria di buffer e in quella DMD, supporto dei diversi formati di proiezione, frontale e a retroproiezione.

Il sistema DLP, di cui DMD (figura 10) è il cuore, è un sistema complesso, in cui funzioni e algoritmi sono integrati in ASIC (Application Specific Integrated Circuit) sviluppati per soddisfare al meglio i requisiti di qualità richiesti per la visualizzazione di immagini nei diversi campi di applicazione.

6. Il mercato

La gamma di sistemi di proiezione è estremamente ampia e numerosi sono i fornitori, benché tutti gli apparati siano basati su sottosistemi DLP prodotti da una sola industria. I prodotti si differenziano in termini di luminosità e contrasto, di peso e ingombro, di prezzo. Le caratteristiche tecniche e di affidabilità stanno rapidamente migliorando. Sono stati recentemente introdotti modelli da 2500 lumen (ad un costo di circa 4500 € e con un peso poco superiore ai 4 kg) e annunciati prodotti di peso inferiore a 1 kg (2,2 libbre, 1000 lumen, rapporto di contrasto 1800:1). Sempre a titolo di esempio, da settembre sarà disponibile un proiettore, basato su singolo DMD, che presenta le migliori caratteristiche in termini di risoluzione (nativa SXGA, 1280 x 1024 pixel), luminosità (3000 lumen), e rumorosità (28 dB), con un peso di 3 kg.

L'obiettivo indicato dall'industria per quanto riguarda i prezzi è di produrre in un futuro prossimo proiettori per applicazioni business a circa 1000 € (attualmente il prezzo minimo è circa il doppio, ma normalmente i prezzi superano i 3000 €).

Un elemento importante, per valutare il costo

di manutenzione del proiettore, è la vita della lampada, che indica il momento in cui la luminosità è dimezzata rispetto a quello che caratterizza la lampada nuova [Nota 1](#)

Nel campo dei retroproiettori, di particolare interesse per l'*home theatre* e quindi per riproduzione televisiva, recentemente è stato presentato un modello da 43", dal peso di 36 kg, con un ingombro in profondità di 40 cm ad un prezzo inferiore ai 4000 \$, un terzo del costo dei primi retroproiettori basati su questa tecnologia. Il modello da 50" avrà un prezzo di circa 4500 \$. Utilizzano il DMD con una risoluzione nativa da 1280 x 720 pixel, formato

16:9, accettano in ingresso segnali televisivi analogici e digitali, anche in formato HDTV.

L'obiettivo dell'industria è quello di produrre retroproiettori da 50" con un peso di 25 kg ed una profondità di circa 30 cm. Per quanto riguarda il prezzo, l'obiettivo indicato è quello di scendere fino a 1500 \$.

Le informazioni contenute in questa scheda sono principalmente ricavate dal sito web www.dlp.com. Tale sito è estremamente ricco di informazioni sia commerciali che tecniche. Le foto e i disegni che illustrano questa scheda sono disponibili su tale sito.

Nota 1

Attualmente la maggior parte dei proiettori utilizzano le lampade UHP™ (*Ultra High Performance*) inventate dalla Philips. Esse si basano su un arco in vapore di mercurio puro ad alta pressione. L'arco può essere da 1,3 a 1,0 mm e crea una sorgente luminosa molto piccola, con una elevata efficienza (una UHP da 100 W può fornire una quantità di luce sullo schermo superiore a quella fornita da una lampada metal halide da 250 W).

Esistono lampade per proiettori da 120 W fino a 250 W; per i retroproiettori da 100 e 120 W.

La vita delle lampade per proiettori arriva a 2000 ore, per i retroproiettori a 10000 ore (si prevede che potrà essere estesa in futuro fino a 20000 ore).

Indicativamente, il costo di lampade UHP è superiore ai 300 €.