

# Diverse soluzioni e sfide per gli schermi AMOLED e OLED

Leonardo Testolin VR436823

Settembre 2019

## 1 Breve panoramica

In questa relazione si vuole presentare alcune tecniche e sfide che si sono proposte per risolvere problemi riguardanti gli schermi AMOLED e OLED. All'inizio vengono definiti alcuni concetti base per poter spiegare le diverse soluzioni e approcci adottati.

In particolare affrontiamo, 24-inch wide uxga TFT-LCD per applicazioni HDTV, pixel AMOLED basati su circuiti in poly-Si TFTs con relative comparazioni, display pieghevoli e sfida tecnologica per la creazione di uno schermo AMOLED di larghe dimensioni.

## 2 Introduzione: alcuni concetti base

Per **TFT** si intende Thin Film Transistor, il quale è un particolare tipo di MOSFET, realizzato depositando sottili (thin) strati di semiconduttore attivo, di dielettrico e i relativi contatti metallici su un substrato di supporto non conduttivo. Come substrato di supporto viene comunemente utilizzato il vetro, in quanto l'applicazione principale dei TFT è nella costruzione dei display a cristalli liquidi (LCD). Il TFT differisce dal MOSFET convenzionale, in quanto nel secondo il materiale semiconduttore è tipicamente il substrato, come un wafer di silicio.

Quando si parla di **TFT-LCD** si intende la tipologia di pannello LCD che utilizza una matrice attiva, ovvero ogni pixel è collegato ad un transistor ed un condensatore individualmente. Il vantaggio principale di questa tecnologia è il costo di produzione relativamente basso, mentre lo svantaggio è l'impatto che ha il TFT sulla batteria, dato dalla grande quantità di energia che consuma.

La televisione in alta definizione, in sigla **HDTV** (acronimo dell'analogo termine inglese High Definition TeleVision), o anche semplicemente alta definizione, è la televisione con video di qualità significativamente superiore a quella degli standard televisivi maggiormente diffusi nel mondo nella seconda metà del XX secolo, standard televisivi che rientrano nella SDTV. È in altre parole un termine che sta a indicare genericamente un livello qualitativo dell'immagine televisiva.

A differenza della definizione standard, che utilizza sia il tradizionale formato 4:3 sia quello widescreen 16:9, l'alta definizione moderna utilizza unicamente il formato 16:9.

**Active Matrix**, già incontrato nella versione TFT degli LCD, indica che ogni pixel è connesso ad un transistor ed un capacitor individualmente, mentre OLED è semplicemente un termine diverso per dire Thin Film display.

**OLED** è un materiale organico, come suggerisce il nome stesso, che emette luce quando attraversato dalla corrente. Al contrario dei pannelli LCD, che sono retroilluminati, gli schermi OLED sono sempre accesi a meno che i singoli pixel non siano fulminati. Ciò significa che i display OLED offrono neri più intensi e consumano meno batteria se si utilizzano sfondi neri o se vengono visualizzati colori più scuri, allo stesso tempo però i temi più chiari consumano più energia. Proprio perchè i pixel neri sono "spenti" sui display OLED, i contrasti sono maggiori rispetto a quelli mostrati dai pannelli LCD. Lo stesso non può essere detto della visibilità sotto la diretta luce del sole, nettamente migliore per i display LCD grazie alla retroilluminazione. Trattandosi di un display organico, il degrado dei diodi e le bruciature del display sono fattori da prendere in considerazione.

I display **AMOLED** rispetto agli LCD sono più costosi da produrre.

Un vantaggio dato dagli AMOLED è che possono essere resi più sottili e quindi più flessibili rispetto agli LCD perchè non richiedono lo strato dedicato alla retroilluminazione.

Prima di iniziare, introduciamo anche il concetto che sta alla base della **tecnologia IGZO** e le sue caratteristiche. Questo tipo di tecnologia è simile a quella LCD ma ne cambia il processo produttivo. Infatti, invece del classico silicio viene utilizzato, l'Ossido di Indio-Gallio-Zinco. Questa scoperta è avvenuta casualmente: un gruppo di ricercatori presso Sharp ha scoperto questa nuova struttura cristallina conosciuta con il nome di CAAC (c-axis aligned crystal) mentre studiava dei semiconduttori a base proprio di Indio, Gallio e Zinco convenzionali amorfi. A livello strutturale possiamo trovare un miglioramento della conduzione elettrica che si traduce in un passaggio più veloce e facilitato degli elettroni. Quindi si raggiunge una notevole ottimizzazione al livello energetico grazie ai minori consumi ed inoltre si ottiene una risposta nel display più rapida, cioè il tempo che intercorre tra la nuova schermata che bisogna visualizzare e quello in cui viene effettivamente visualizzato diminuisce.

Grazie a questo particolare tipo di display, sono anche ridotte le interferenze con l'hardware. A livello cromatico ci troviamo davanti ad un netto miglioramento: i contrasti sono migliori e il bianco è realmente bianco. L'unica nota dolente, se proprio dolente possiamo definirla, riguarda i neri: ci troviamo molto vicino a ciò che ci offre un AMOLED ma manca ancora qualcosa per essere sugli stessi livelli. Lo spessore è minore rispetto ad un LCD, quindi abbiamo display più luminosi e consumi dimezzati. Le bande nere laterali sono state ridotte rispetto ai predecessori, quindi ci ritroveremo con uno schermo quasi edge-to-edge con bande larghe solo 1.75 mm, rispetto a quelle di un LCD che misurano tra i 2.55 e 4.7 mm nelle parti laterali, e 2.78 in quella superiore. Questo cambiamento nel processo produttivo porta numerose novità sia al livello strutturale che al livello

qualitativo. Prima di tutto bisogna dire che questo tipo di display si basa sulla tecnologia TFT (Thin Film Transistor), quindi ne sposa alcune caratteristiche.

Il nuovo reticolo cristallino presente nei materiali di questo display permette di aumentare notevolmente la risoluzione. Infatti rispetto agli altri display, questo può raggiungere altissime risoluzioni e densità di pixel impressionanti su schermi dalle dimensioni molto ridotte.

Il silicio policristallino a bassa temperatura (LTPS) è silicio policristallino che è stato sintetizzato a temperature relativamente basse (  $\leq 650^\circ$  e inferiori) rispetto ai metodi tradizionali (sopra i  $900^\circ$ ). L'LTPS è importante per i display industriali, poiché l'uso di pannelli di vetro di grandi dimensioni proibisce ai pannelli a temperature deformative elevate. Più specificamente, l'uso del silicio policristallino nei transistor a film sottile (LTPS-TFT) ha un alto potenziale per la produzione su larga scala di dispositivi elettronici come display LCD a schermo piatto o sensori di immagine.

Il silicio policristallino (p-Si) è una forma pura e conduttiva dell'elemento composto da molti cristalliti, o grani di un reticolo cristallino altamente ordinato. Nel 1984, gli studi hanno dimostrato che il silicio amorfo (a-Si) è un eccellente precursore per la formazione di film di p-Si con strutture stabili e bassa rugosità superficiale. Il film di silicio è sintetizzato dalla deposizione chimica in fase vapore a bassa pressione (LPCVD) per ridurre al minimo la rugosità superficiale. Innanzitutto, il silicio amorfo viene depositato a  $560\text{--}640^\circ$ . Quindi viene ricotto termicamente (ricristallizzato) a  $950\text{--}1000^\circ$ .

A partire dal film amorfo, anziché depositare direttamente i cristalli, si ottiene un prodotto con una struttura superiore e una levigatezza desiderata. Nel 1988, i ricercatori hanno scoperto che un ulteriore abbassamento della temperatura durante la ricottura, insieme alla deposizione di vapore chimico avanzata al plasma (PECVD), potrebbe facilitare livelli di conducibilità ancora più elevati. Queste tecniche hanno avuto un profondo impatto sulle industrie di microelettronica, fotovoltaica e di miglioramento del display.

I TFT in silicio amorfo sono stati ampiamente utilizzati nei pannelli piatti con display a cristalli liquidi (LCD) perché possono essere assemblati in complessi circuiti di pilotaggio ad alta corrente. Gli elettrodi amorfi Si-TFT guidano l'allineamento dei cristalli negli LCD. L'evoluzione verso LTPS-TFT può avere molti vantaggi come una maggiore risoluzione del dispositivo, una temperatura di sintesi più bassa e un prezzo ridotto dei substrati essenziali. Tuttavia, gli LTPS-TFT presentano anche diversi inconvenienti. Ad esempio, l'area dei TFT nei tradizionali dispositivi a-Si è ampia, con un rapporto di apertura ridotto (la quantità di area che non è bloccata dal TFT opaco e quindi ammette la luce). L'incompatibilità dei diversi rapporti di apertura impedisce l'integrazione di circuiti e driver complessi basati su LTPS in materiale a-Si. Inoltre, la qualità di LTPS diminuisce nel tempo a causa di un aumento della temperatura all'accensione del transistor, che degrada il film rompendo i legami nel materiale. Ciò provocherebbe la rottura del dispositivo e la perdita di corrente del dispositivo, in particolare nei transistor piccoli e sottili, che dissipano male il calore.

Oltre al miglioramento degli stessi TFT, l'applicazione di successo di LTPS al display grafico dipende anche da circuiti innovativi. LTPS-TFT è comunemente



usato per pilotare display a diodi organici a emissione di luce (OLED) perché ha un'alta risoluzione e una sistemazione per pannelli di grandi dimensioni. Tuttavia, le variazioni nella struttura LTPS comporterebbero una tensione di soglia non uniforme per i segnali e una luminosità non uniforme utilizzando i circuiti tradizionali.

In elettronica il transistor a effetto di campo, abbreviato **FET**, dall'inglese field-effect transistor, è un tipo di transistor largamente usato nel campo dell'elettronica digitale e diffuso, in maniera minore, nell'elettronica analogica.

Si tratta di un substrato di materiale semiconduttore drogato, solitamente in silicio, al quale sono applicati quattro terminali: il gate, il source, il drain ed il bulk; quest'ultimo, se presente, è generalmente connesso al source e se non presente è connesso al terminale esterno del gate. Il principio di funzionamento del transistor ad effetto di campo si fonda sulla possibilità di controllare la conduttività elettrica del dispositivo, e quindi la corrente elettrica che lo attraversa, mediante la formazione di un campo elettrico al suo interno. Il processo di conduzione coinvolge solo i portatori di carica maggioritari, pertanto questo tipo di transistor è detto unipolare.



### 3 24-INCH WIDE UXGA TFT-LCD per applicazioni HDTV

Questo paper spiega com'è stato possibile sviluppare uno schermo a 24-inch con tecnologia TFT-LCD con una risoluzione pari a 1920x1200. Questo display, oltre ad essere ad alta risoluzione, permette di avere un buon angolo di visione dimostrando che l'ideale per questi display sono appunto di essere ad alta risoluzione e che permettono di sostenere la visione su pannelli di grandi dimensioni.

Questo tipo di tecnologia è stata introdotta per applicazioni di ingegneria e mercato finanziario. Si è visto che gli schermi LCD per applicazioni digitali di TV portano grandi opportunità nell'ambito di utilizzo della tecnologia TFT-LCD. Però, si sono notati molti problemi per quanto riguarda la tecnica e i costi di realizzazione in rapporto alla dimensione dello schermo. Ci sono stati molti approcci per cercare di superare l'insufficienza della ricarica del pannello, cercando di usare tecniche guidate, cercando di manipolare il tempo di ricarica. Il caricamento dei pixel è principalmente relativo alla qualità del pannello di immagine. In questo lavoro, si propone una serie di criteri pratici per modellare uno schermo di dimensione pari a 24-inch.

#### 3.1 Design del pannello

Quando pixel e dimensione dello schermo aumentano, il consumo energetico che deve essere fornito ai pixel diventa un problema molto critico. La maggior

difficoltà è il ritardo e la distorsione data dall'alta resistenza e capacità parassitarie dovute alle lunghe colonne e linee per la gestione dei pixel. Inserire i gate all'interno dello schermo nella maniera più opportuna, permette di ridurre il delay che è il fattore che influenza di più la qualità dell'immagine. In questo modo, si evitano gli sfarfallii che possono causare la mancanza di energia sufficiente per i pixel in rapporto all'area dello schermo.

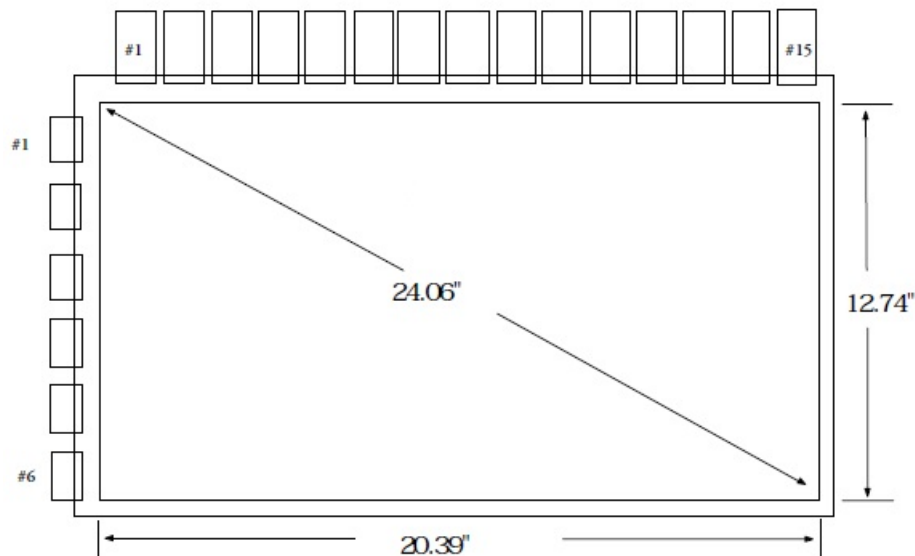


Figure 1: 24-inch TFT-LCD panel dimensions

E' una fase critica per cercare di ridurre la resistenza che si crea tra i gate e con il design degli TFT si cerca di minimizzare i parassiti con l'uso di tecniche tipo single-scan, single-sided.

Dall'analisi di alcuni risultati, condotti con le diverse tecniche, si è potuto notare che le gate line delay causano insufficienza con addebito di pixels causando lo sfarfallio dello schermo, mentre le data line delay causano insufficienza con addebito di pixels relativi al cross-talk verticale.

### 3.2 Metodi guidati

La configurazione Single Scan delle colonne causa condizioni di alta frequenza comparate nelle due zone di colonna. Con questo metodo è stato possibile fare lo split della linea dati del bus, riducendo così il clock e il data rate abbastanza da usare un device con frequenze molto più basse. Nel dettaglio, per ridurre la frequenza di clock dei dati, il display è stato diviso in 4 blocchi, 4 differenti bus dati sono richiesti per poter gestire questi 4 blocchi di dati differenti.

Così alla fine si ottiene un data rate per ogni ciclo di clock dove dovrebbe essere di 8 pixels/clk, questo perché i driver delle colonne hanno 2 porte input per dati.

Il sistema di interfacce di input non può essere suddiviso in 2 pixel/clock, il controllore riceve due segnali di dato digitali (even/odd) per clock. Il seguente sistema per riuscire a mantenere 4 differenti bus dati allo stesso tempo due T-CON devono essere usati, perché ci sono anche linee di segnali che vanno fuori dal singolo chip. Ogni T-CON può controllare 4 data bus digitali, 2 data bus inviano 2 dati pixel/clock uno per ogni blocco simultaneamente.

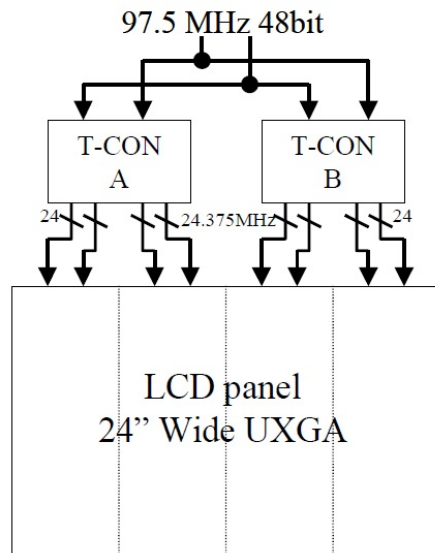


Figure 2: Driving schematics of 24-inch Wide UXGA panel

### 3.3 Configurazione di sistema

Un sistema totale usato per un display WUXGA consiste di 3 parti:

- Scheda video, interfaccia IC, modulo TFT-LCD di 24-inch

IBM-PC compatibile con il computer che può supportare alte performance grafiche. Queste schede grafiche hanno output di tipo DVI (Digital Video Interface) oppure output analogici standard di tipo RGB. In questo caso la scheda che ha la funzione di display on screen, controlla il software che supporta la sincronizzazione della variazione dei tempi e delle immagini con circuiti di logica supportando varie risoluzioni.



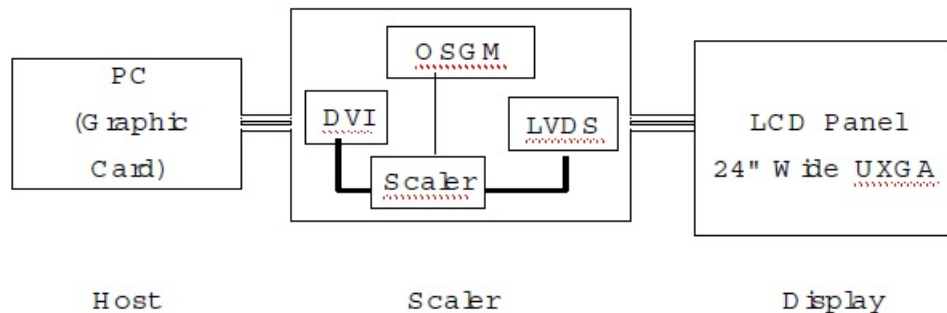


Figure 3: System design of 24-inch WUXGA

### 3.4 Processo del pannello con tecnologia ad angolo di visione

Per migliorare la visione d'angolo dello schermo è stato sviluppato un nuovo modello VA (vertical alignment). Si denomina la modalità PVA (patterned vertical alignment), che utilizza dei campi della frontiera che sono guidati rispettivamente con il modello VA. Attraverso la combinazione di simulazioni ed esperimenti si è potuto ottimizzare i parametri e le condizioni delle celle.

### 3.5 Applicazioni di monitor a 24-inch

Lo schermo a 24-inch è largo abbastanza da contenere la grandezza di due fogli A4. La dimensione di questo schermo permette di poter lavorare con applicazioni di uso professionale. Per le applicazioni di tipo HDTV, il display a 24-inch va a soddisfare molte dei vincoli che si possono manifestare in queste applicazioni.

### 3.6 Conclusioni

E' stato sviluppato un monitor da 24-inch multi-funzione che possono essere applicate a HDTV e contenute in multi-task molteplici informazioni di alta qualità. Il primo TFT-LCD sviluppato che può ricevere un segnale vero HDTV a 1920x1080 interlacciato oppure 1280x720. Per poter avere una soluzione più flessibile per quanto riguarda l'angolo di visione, è stato sviluppato uno schermo di larghe dimensioni con performance del pannello molto elevate. Alla fine, infatti, si è proposto una soluzione con un'interfaccia multi-sync che collega il pc al formato LCD da 1920x1080.

## 4 Pixel AMOLED basati su circuiti in poly-Si TFTs con relative comparazioni

In questo documento sono state analizzate 4 differenti circuiti basati su active matrix organic light-emitting diode (AMOLED) su thin film transistor (TFT). In particolare si fa una comparazione tra accuratezza, velocità di guida, consumo energetico e area occupata.

Organic light-emitting diode (OLED) sono display che sono efficienti dal punto di vista del consumo energetico, vivido e ideale per applicazioni portatili. Sono costituiti da materiali a basso costo e vengono utilizzati meno processi di produzione per la loro creazione rispetto agli LCDs. Per queste ragioni gli OLED appaiono i migliori candidati per le diverse applicazioni mobili. L'OLED è un device guidato da corrente dove il livello di luminosità è determinato dal livello di corrente che lo attraversa. Questa corrente può essere fornita da una matrice passiva OLED (PMOLED) oppure da una matrice attiva (AMOLED). La composizione della matrice passiva e attiva è creata tramite TFT.

Questa soluzione è preferibile con un approccio in cui si tende ad utilizzare la matrice passiva e in particolare quando la dimensione dello schermo va aumentando. Questo perché la matrice passiva richiede un alto picco di corrente per poter funzionare e ottenere così alta luminosità dei pixel. Un consumo elevato di energia ha dimostrato effetti di maggior affidabilità da parte degli schermi OLED. In questo articolo, si va ad analizzare 4 circuiti differenti per gli AMOLED, i quali hanno 2 o 3 linee di input (data e select) e una semplice gestione del segnale. In particolare, si analizzano e si confrontano le differenti caratteristiche.

### 4.1 Circuiti driver per gli schermi OLED

I circuiti OLED possono essere divisi in due grandi classi: circuiti programmati, basandosi sul voltaggio e altri basati su corrente. Per entrambe le classi è preferibile che gli OLED siano connessi ad un connettore di drain al circuito TFT. Infatti, connettere gli OLED alla sorgente del circuito TFT ha come risultato che nel circuito TFT tra gate e source ci sono dipendenze di voltaggio tra gli OLED, che potrebbe cambiare nel tempo.

### 4.2 Voltage-programming driver circuits

Il più semplice circuito per gli OLED è realizzato usando la configurazione comune di TFT. Infatti, la corrente derivante dal TFT drain, è settata come segnale di voltaggio applicato al gate del TFT. Ci sono alcune formule che permettono di ottenere la corrente voluta. Seguendo questo tipo di concetto, si possono creare differenti circuiti. Il più semplice circuito chiamato 2-TFT, può essere creato tramite due TFT (T1 e T2). In particolare, il transistor T1 e T2 sono transistor di guida e transistor di selezione, rispettivamente. Quando la linea di selezione è alta, transistor T2 si attiva e i dati passano dalla linea dei dati al gate T1 ricaricando la capacità del gate (condensatore). Mentre, quando



la linea di selezione viene disattivata, il transistor T2 è impostato a off e il dato è salvato nel gate di T1 dove, si trascurano le perdite di corrente, mantenendo il livello di corrente costante per lo schermo OLED e questo rimarrà tale finché non ci sarà un nuovo dato da mantenere. Ci sono due limiti sulla topologia proposta in questa soluzione: dovuta al pesante drenaggio di corrente dovuto alla threshold del TFT e poi alla variazione di mobilità.

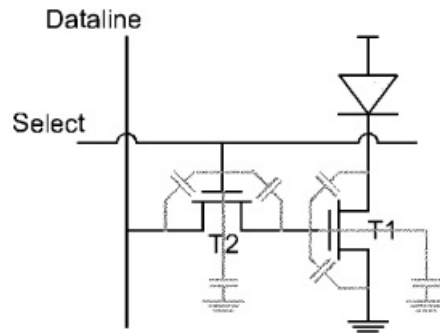


Figure 4: 2-TFT OLED driver circuit.

Per poter superare questo inconveniente deve essere introdotto un circuito che si auto-compensa, è semplice da realizzare, ma ha bisogno di più componenti. Introducendo questa miglioria, il circuito risultante sarà denominato 4-TFT. Se assumiamo che il gate T1 è precedentemente pre-caricato da un valore di alta corrente attraverso il transistor T4, successivamente quando la linea dati è applicata la linea dati T4 è posta ad off mentre la linea dati di T3 è posta a on.

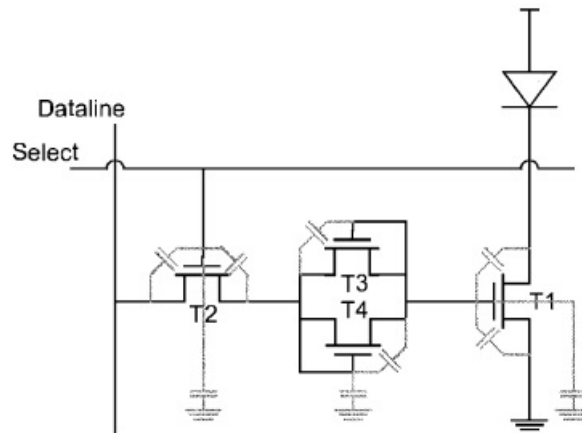


Figure 5: 4-TFT OLED driver circuit

### 4.3 Current-programming driver circuits

Possiamo settare in maniera precisa la corrente che viene data allo schermo OLED con un approccio basato sulla programmazione di corrente. Il circuito centrale scelto, in questo caso, è basato su TFT. Se i due transistor che costituiscono la fonte di corrente sono collegati e si trascurano la modulazione dei canali possiamo ottenere il nodo output di corrente. In particolare, quando il

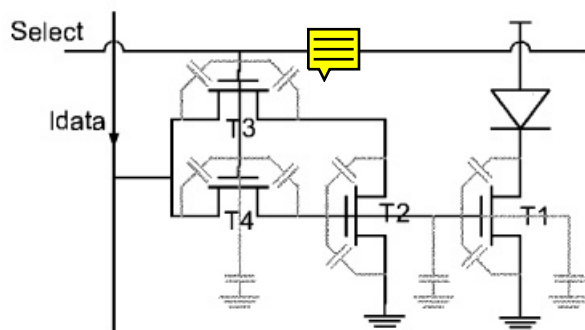


Figure 6: Current mirror

segnale select1 permette al TFT T3 e T4 di attivarsi e il TFT è un diodo che permette di far scorrere e connettere la corrente. Inoltre, una volta che TFT T2 si apre grazie al segnale di select2, T1 è disconnesso dall'OLED. Quando T3 e T4 sono aperti e T2 è chiuso, il gate T1 detiene, con il capacitore, il voltaggio settato.

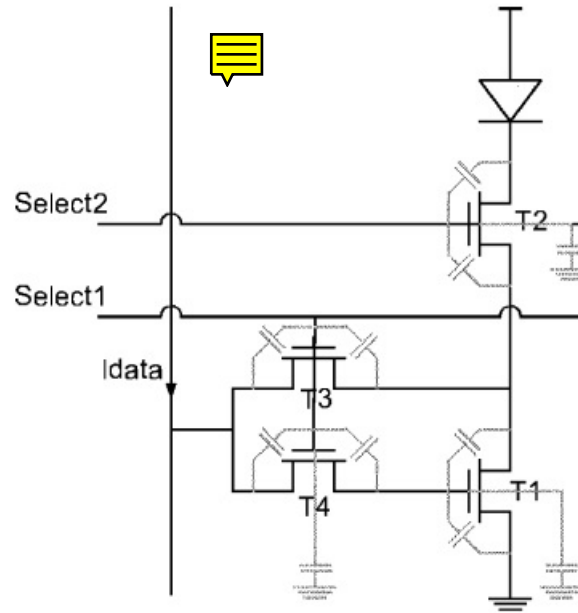


Figure 7: One-transistor current memory driver circuit

#### 4.4 Metriche dei circuiti

Assumiamo che tutti i circuiti visti fin'ora abbiano la stessa quantità di corrente. Quindi, la topologia specifica è stata analizzata solo in termini di velocità di guida, consumo energetico e occupazione d'area.

#### 4.5 Velocità di guida

Il frame rate FR dei pixel che formano la matrice è una caratteristica importante per il display e la relativa velocità di guida. Per calcolare il frame rate dei pixel si utilizza una formula che considera il numero di righe per matrice, il tempo di ricarica dei capacitori, il tempo di ricarica del capacitore TFT e il tempo di carica e scarica delle righe della matrice. Si è notato, però, che se consideriamo le formule per il calcolo delle resistenze poste sulle linee di selezione si considerano anche le capacità parassite. Quindi, si assume che quando la linea di select va a fare il drenaggio e il source del voltaggio diventa switch rimane costante.

#### 4.6 Consumi energetici

L'energia utilizzata dai circuiti dipende dalla varietà di fattori includendo la corrente richiesta dall'OLED, il voltaggio impostato, la dimensione del TFT e il tempo di salita della corrente. Si hanno consumi energetici sia contributi statici che dinamici.

## 4.7 Area

In questa specifica applicazione, l'area del silicio rappresenta un'importante caratteristica, specialmente per un display AMOLED. Di certo i circuiti con il più basso e più piccoli componenti permettono un alto livello di luminosità.

## 4.8 Comparazione

Dagli studi che sono emersi si è potuto notare che il circuito che mostra migliori performance in termini di velocità, consumo energetico e area è il 2-TFT. E' più sensibile alla mobilità e alla threshold di variazione del voltaggio. La topologia 4-TFT mostra di essere più performante grazie alla migliore velocità e consumo energetico comparato con i circuiti basati su corrente.

## 4.9 Conclusioni

In questo articolo sono stati presentati dei circuiti AMOLED, i quali possono essere divisi in due gruppi principali, circuiti basati su corrente e voltaggio. Tutte le topologie, a parte la 2-TFT, sono in grado di compensare la threshold di variazione del voltaggio. Il confronto eseguito viene fatto controllando la velocità, energia consumata e l'area di occupazione. Tra le differenti topologie, la migliore è la 4-TFT con la quale la velocità è 10 volte più alta rispetto alla topologia basata su corrente e con un risparmio del 30% più alto. Però, se il 10% della variazione sul drenaggio della corrente è dovuto alla variazione di mobilità, questo non può essere accettato e quindi si passa ad una topologia basata su corrente.

# 5 Display AMOLED pieghevoli

In questo studio si è sviluppato un display AMOLED pieghevole di 5.9-inch. Sono sempre più diffusi i dispositivi mobile, come tablet e pc. I display che vengono utilizzati per dispositivi mobili devono avere buone specifiche, per esempio, alta risoluzione, basso consumo energetico, essere leggeri e durevoli nel tempo. La fisicità del display risulta essere molto importante in termini di portabilità e design. Un display AMOLED flessibile può essere applicato su devices che richiedono un grado fissato di curvatura, una curvatura statica oppure una forma circolare. Si possono installare display anche su devices che richiedono curvature dinamiche, ma, questo provoca una difficoltà maggiore nella loro realizzazione. Ci sono alcuni punti chiave da dover tenere in considerazione quando si parla di display OLED pieghevoli ed è la rottura della curvatura del display. Di solito, un display OLED include un sottostrato di plastica piuttosto che un sottostrato di vetro. La plastica trasmette condensa/umidità; quindi, dei film passivi sono richiesti per poter reagire con l'umidità e la degradazione. Un OLED richiede un film passivo con rate di trasmissione del vapore acqueo (WVRT) che sia minore del  $1 \times 10^{-5} \text{ g/m}^2 \cdot \text{giorno}$ . Per esempio, un film inorganico, come l'ossido di silicio, silicio nitruro o ossido di alluminio è generalmente usato per film passivi.

Per ridurre, invece, WVRT in maniera sufficiente, un film inorganico deve essere inserito ed essere sufficientemente sottile. Il substrato di plastica dell'OLED non può resistere ad alte temperature. Infatti, un film inorganico deve essere formato a basse temperature. Sotto basse temperature, quindi, il film inorganico non può avere un'alta densità. Così, il film inorganico necessita di essere formato in maniera ordinata, in maniera da eliminare le possibili condense o umidità che si possono generare. Però, quando un film inorganico molto sottile è usato, la produttività è ridotta e la probabilità che si creino delle rotture sulla curvatura risulta più facile. Per risolvere questi problemi, si è fabbricato un display AMOLED flessibile usando un trasferimento di tecnologia che implementa la separazione inorganica dei vari livelli. Il processo di trasferimento tecnologico richiede un array di transistor field-effect (FET) formati da un substrato di vetro che è separato da un livello inorganico. I transistor Field-effect formati direttamente sul substrato di plastica devono essere fabbricati a basse temperature. Nel caso si usasse un laser per definire un Si film oppure un PI film, le radiazioni del laser danneggerebbero gravemente il PI film. Però, perché ci sia un'alta resistenza da parte del livello inorganico, il trasferimento tecnologico abilita la formazione dei FETs alla stessa temperatura in cui sono formati i sottostati di vetro. Si ha così come risultato un FET che ha alte performance e alta affidabilità le quali possono essere ottenuti in maniera semplice. Si è sviluppato un c-axis-aligned-crystal oxide semiconduttore (CAAC-OS) chiamato anche c-axis-aligned-nano-crystal oxide semiconduttore (CANC-OS), utilizzato in questo caso per creare il display FET.

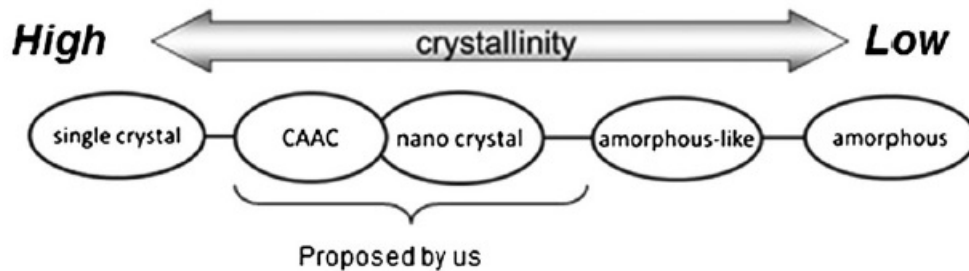


Figure 8: Relation

## 5.1 Prototipi di display creati

Con la tecnica creata fin'ora, si sono potuti creare diversi tipi di prototipi. Un prototipo a libro pieghevole a 5.9-inch con display AMOLED e un display 3-pieghevole il quale si può applicare allo smartphone o ai tablet.



Figure 9: Display Flexible



Figure 10: Display Flexible



Figure 11: Display 3-Book

## 5.2 Metodo di fabbricazione di display amoled flessibile

Il metodo per la fabbricazione vede diversi step:

- Prima cosa, una separazione di livello, un livello passivo e un livello FET e un livello organico elettroluminescente (EL) dove si forma un sottostrato di vetro
- Per la separazione dei livelli, un film è creato dal tungsteno usato
- Il livello compone un insieme di livelli di materiale inorganico che forma il livello separato





Si è sviluppato successivamente un'emissione bianca di OLED per il livello EL organico. La componente del livello organico EL ha una struttura a due livelli, la quale è costituita da un materiale blu fluorescente e da un altro materiale rosso e verde. I pixel sono creati tramite Ti Film che sono formati sopra un elettrodo AI che previene l'incremento di resistenza dovuta all'ossidazione della base AI, e un ITO Film che è formato sopra il Ti Film. Lo spessore dell'ITO film varia in base al colore scelto dei pixel. La struttura descritta non ha una produzione molto pura dei colori, quindi, la soluzione è stata quella di inserire un filtro colore. Quindi, la separazione del livello, il livello passivo e i filtri colore sono formati e posti sopra il substrato di vetro.

### 5.3 Test di piegatura

Il display flessibile con tecnologia AMOLED è stato sottoposto a ripetitivi test di piegatura.

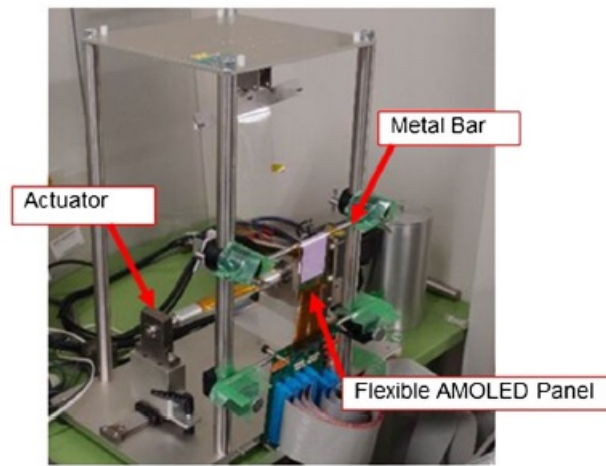


Figure 12: Repeated folding test

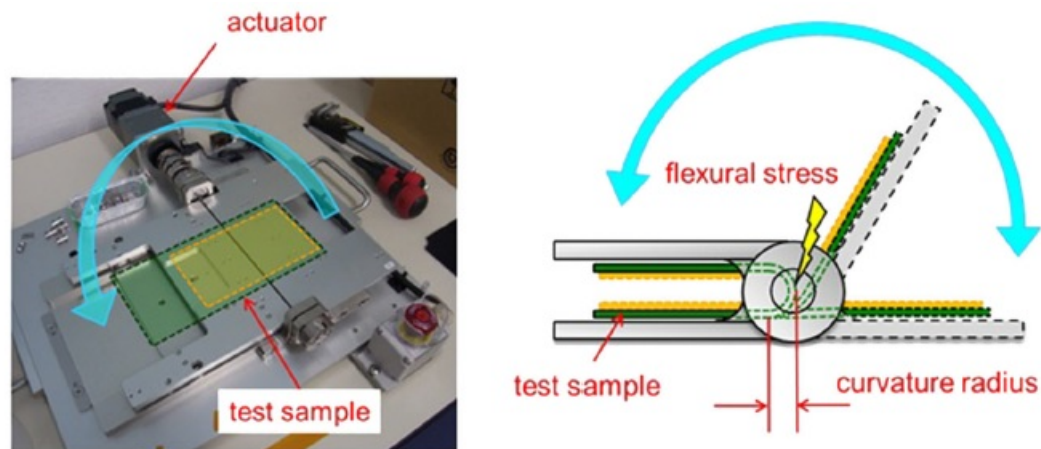


Figure 13: Repeated folding test

#### 5.4 Test su pannello flessibile ad alte temperature e alte umidità

Un test ad alta temperatura e ad alta umidità è stato eseguito su un display fabbricato come visto in precedenza. (Nella sezione: Metodo di fabbricazione di display amoled flessibile).

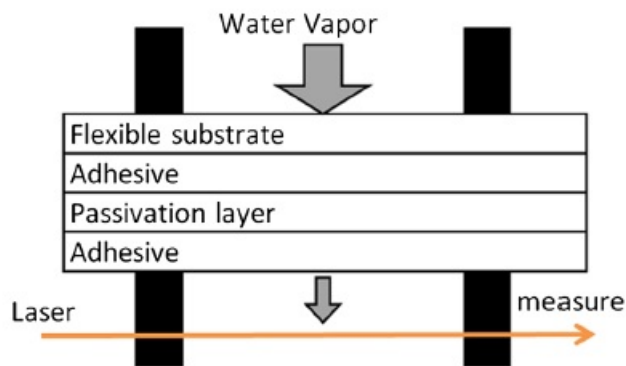


Figure 14: Structure of sample for measurement of WVTR

Sono eseguiti dei test su display flessibili attraverso alta temperatura e alta umidità. Il display è posto in un ambiente con il 90% di umidità e a 65° per un lungo tempo.

La figura mostra il micrografo dei pixel nell'area centrale del display dove si può osservare lo stato prima e dopo il test. La generazione di punti neri nel display visibili solo dopo un test durato circa 500 ore. Il risultato è che il film passivo

ha una alta qualità e una durevolezza molto elevata.

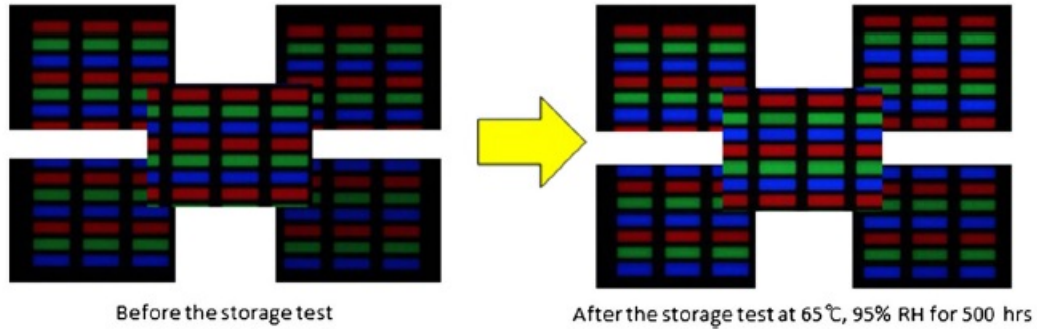


Figure 15: High-temperature and high-humidity storage test

## 5.5 Conclusioni

In definitiva si sono creati degli schermi AMOLED flessibili con l'inclusione di CAAC-OS FET fabbricati tramite la separazione dei livelli inorganici. I display sono stati sottoposti a una serie di test di piegatura con un raggio di piegatura pari a 2mm.

## 6 Sfida tecnologica per implementare schermi AMOLED di grandi dimensioni

In questo articolo, si va ad analizzare una "challenge" che si è voluto fare per la creazione di uno schermo AMOLED di grandi dimensioni. Si va ad analizzare come la nuova tecnologia, cioè l'ossido dei TFTs combinato con i vantaggi del LTPS e a-Si TFTs, portino delle soluzioni ottimali per piattaforme molto grandi. In particolare, si va a rivelare la sfida tecnologica con l'uso dell'ossido di TFTs da comparare con le differenti caratteristiche dei devices con l'uso dell'ELA (excimer laser annealing) LTPS e l'utilizzo di indium-gallium-zinc-oxide (a-IGZO) amorfo. Alla fine viene presentato un prototipo di display da 12.1-inch WXGA AMOLED fabbricato tramite a-IGZO TFT. Tra i diversi tipi di display, l'AMOLED permette di ottenere una soluzione migliore, perché permette di avere una risposta d'immagine molto veloce, colori molto vividi, alto contrasto e poter creare degli schermi molto sottili. Per esempio, nel 2007 Samsung ha prodotto in massa display AMOLED di piccole dimensioni per vari dispositivi, quali, cellulari e MP4. Il problema nasce quando si cerca di creare un display di dimensioni maggiori rispetto a quelli prodotti fin'ora. Infatti, questo provoca diverse sfide da portare a termine. Le sfide possono essere categorizzate dentro 3 parti principali:

- Fabbricazione e performance dei TFT

- Il design degli OLED
- L'incapsulamento

Prima di tutto, ELA-based, LTPS TFT, i quali sono usati per il pannello posteriore dei display AMOLED dovuto al fatto che loro permettono di avere alta mobilità e stabilità. Da notare che l'ampliamento del substrato è limitato a causa delle piccole dimensioni del raggio laser e dal lungo processo di creazione. Come secondo punto, riguarda il fatto del design degli OLED riferiti a quel device, si considera anche una maschera d'ombra in metallo pregiato denominata (FMM), che è un metodo utilizzato per poter introdurre negli OLED i colori primari. Però, FMM ha un limite intrinseco di piegatura meccanica quando la dimensione del pannello si incrementa notevolmente. Per eludere al problema, dei pattern sequenziali possono essere implementati, ma il metodo ha una debolezza nell'uniformità e nel tempo impiegato. L'ultima parte riguarda l'incapsulamento che è un altro importante problema per i display di grandi dimensioni. L'incapsulamento è necessario per prevenire il degradamento dello schermo OLED provocato dall'ossigeno e dall'umidità presente nell'atmosfera.

## 6.1 Stato di corrente e problemi sulla tecnologia di cristallizzazione

I 4 maggiori problemi negli schermi OLED sono la riduzione dei numeri di maschera fotografica, il miglioramento della luminosità non uniforme e l'affidabilità del display. La fabbricazione del TFT in silicene, attualmente sviluppato in cristalli liquidi (LCD) permette di essere fabbricato in maniera facile e scalabile. Da notare che questa tipologia di TFT rende il display meno mobile e soprattutto instabile. Infatti, per avere maggiore mobilità e stabilità intrinseca dei TFTs è meglio utilizzare Si policristallino (LTPS) fabbricato a basse temperature. Il processo chiave nella fabbricazione dei TFTs LTPS è il metodo di cristallizzazione che converte a-Si nel silicio policristallino Si. Questo metodo può essere classificato come cristallizzazione senza laser oppure con cristallizzazione tramite laser. Con il metodo della cristallizzazione senza laser, il più semplice metodo è la fase di cristallizzazione solida (SPC). Ma SPC richiede una cottura a 600° per circa 10 ore, nel quale si crea non in maniera del tutto confortevole la vasta area del sottostrato di vetro. Mentre, tra i metodi con l'utilizzo del laser, si può citare excimer laser annealing (ELA) che è usato ampiamente dal fatto che permette di ottenere una cristallizzazione eccellente, veloce e con alta mobilità. ELA, anche se è utilizzato ormai nella produzione di massa, ha alcuni difetti; ha alti costi di investimento e di mantenimento. Ma il maggior limite è dovuto al fatto che non è possibile utilizzarlo su pannelli molto grandi a causa della limitatezza del raggio laser e della sua instabilità. Una soluzione alternativa per lo sviluppo tramite il laser può essere la sequential laser solidification (SLS), ma ci sono ancora problemi che riguardano la luminosità non uniforme nei pannelli OLED. Infatti, tutti gli LTPS TFTs soffrono il problema derivante dalla non uniformità perché esistono dei vincoli che non possono essere

risolti. Come alternativa alla soluzione di poter creare uno schermo di larghe dimensioni e di tecnologia AMOLED, si utilizza l'amorfo ossido TFTs che permette di fornire delle proprietà uniche che combinano i vantaggi sia dell'a-Si che LTPS TFTs.

La dimensione dello schermo può essere creata in maniera molto semplice senza dover utilizzare apparecchiature troppo costose. Il processo principale è essenzialmente lo stesso di quello degli a-Si TFTs così che la produzione che esiste già, non debba avere grossi cambiamenti. In aggiunta, l'ossido TFTs può essere depositato in stanze ad alta temperatura, nelle quali, è possibile creare una produzione di massa per gli schermi AMOLED su uno strato flessibile di plastica o comunque un vetro poco costoso. In questo articolo, la struttura e il processo di indium-gallium-zinc-oxide amorfo (a-IGZO) di TFT è introdotto. Si comparano poi le caratteristiche che si ottengono con ELA.

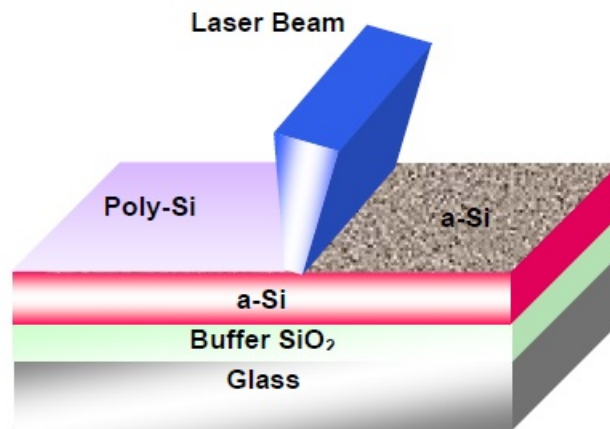


Figure 1. The schematic diagram of ELA crystallization in LTPS TFT

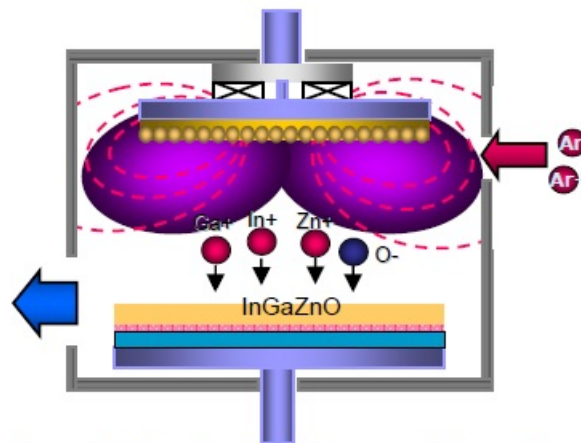


Figure 2. The schematic diagram of the sputtering system of IGZO channel layer in oxide TFT.

## 6.2 Tecnologia di Ossido di TFT

Questa figura mostra lo schema della sezione del IGZO TFTs il quale ha un'architettura con il gate invertito con un etch stopper layer (ESL).

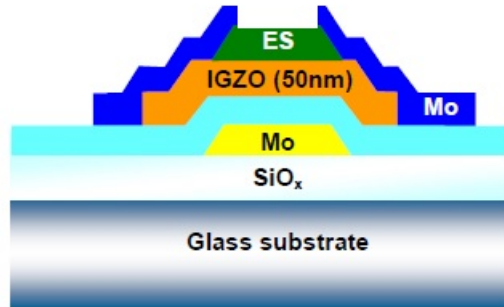


Figure 16: The schematic cross-section of a-IGZO TFT

### 6.3 Prototipo di display da 12.1-inch

In questo lavoro, si è sviluppato un display a full-color 12.1-inch WXGA AMOLED, il quale è stato fabbricato utilizzando un pannello a a-IGZO TFTs. La lunghezza del canale per la guida dei transistor è disegnato a 10 micron, ma l'effetto del nodo, il quale appare anche nei TFT poly-Si con la stessa lunghezza del canale, non ci si accorge di alcuna caratteristica in output. I driver di scan che sono integrati nel pannello e le loro funzionalità si sono dimostrate molto buone. Recentemente, LG Eletronic ha creato un prototipo di display QCIF+ AMOLED, il quale ha un pannello creato tramite a-IGZO. Si è sviluppato anche un ulteriore pannello a 4.1-inch trasparente QCIF AMOLED usando a-IGZO TFTs.

### 6.4 Conclusione

In ordine di espansione degli schermi AMOLED nel mercato, la scheda madre potrebbe essere incrementata notevolmente. Se si utilizza la tecnologia ELA, si ottiene una buona scalabilità in termini di dimensione dello schermo, mentre, se si utilizza la creazione del pannello con a-IGZO c'è la possibilità di aumentare le dimensioni dello schermo in maniera significativa. Si è dimostrato che su uno schermo 12.1-inch WXGA con a-IGZO TFTs questo può essere rimpiazzato il pannello con tecnologia LTPS-based.

## References

- **Articolo:** <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1889/1.1832978>
- **Articolo:** <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1889/1.3069649>
- **Articolo:** <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jsid.276>
- **Articolo:** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167926007000727>
- <https://www.tuttoandroid.net/android/display-igzo-cosa-sono-71193/>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Low-temperature\\_polycrystalline\\_silicon](https://en.wikipedia.org/wiki/Low-temperature_polycrystalline_silicon)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Amorphous\\_silicon](https://en.wikipedia.org/wiki/Amorphous_silicon)
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_a\\_effetto\\_di\\_campo](https://it.wikipedia.org/wiki/Transistor_a_effetto_di_campo)