

LCD-be integrálható, ujjlenyomat binarizációs képfeldolgozására alkalmas hardver tervezése

Zeffer Tamás¹, Csikósné Dr. Pap Andrea Edit²

Óbudai Egyetem Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest¹

zeffer.tamas@kvk.uni-obuda.hu

Mikroelektronikai és Technológiai intézet, 1084 Budapest²

pap.andrea@kvk.uni-obuda.hu

Absztrakt: Ebben a tanulmányban egy olyan ujjlenyomat érzékelő és feldolgozó áramkört mutatunk be, amely LCD kijelzőbe integrálható és hidrogénezett amorf Si (a-Si:H) vékonyréteg-tranzisztor technológiával készül. Ez az áramkör képes az ujjlenyomatot kialakító fodrokból bináris információt előállítani és az érzékelőjére vetült képet párhuzamosan, pixelenként feldolgozni. A pixel áramkör kis számú félvezető eszközből épül fel, azaz négy TFT tranzisztorból, két kondenzátorból és egy fotoelektromos érzékelőből. Tervezésünk fő célja, hogy az LCD kijelző gyártási technológiájára jellemző meglehetősen alacsony jel-zaj arányt (SNR) jelentősen megnöveljük és ennek érdekében a jelfeldolgozás nagyobb részét az érzékelőhöz közel végezzük el. Megoldásunk újdonsága, hogy hasonló ujjlenyomat képfeldolgozó hardvert az irodalomban nem találunk. Ebben a megoldásban egy neuromorf áramkör segítségével az a-Si:H alapú félvezető elemek mismatch-ből adódó nagy szórása csökkenthető. A megoldás része még, hogy az áramkör pixelenkénti binarizációs képfeldolgozást végez hardveresen, párhuzamos számítással. Az érzékelő pixeláramkör érzékenysége széles megvilágítási tartományban megmarad, vagyis a környezeti megvilágítás által meghatározott új munkapontban ismét kialakul. Az áramkör ezért képes a környezeti fény adaptációjára, hasonló módon, ahogy ez történik a gerincesek szemében megtalálható fotoreceptorokban.

Keywords: vékonyréteg tranzisztor (TFT); neuromorf áramkör; SNR; ujjlenyomat olvasó, hidrogénezett amorf Si (a-Si:H), binarizáció, LCD képernyő

1. Bevezető

Az aktív mátrixú folyadék kristályos kijelzők (AMLCD) gyártása folyamán létrehozott integrált áramkörök az alacsony előállítási költségük miatt rendkívül vonzó lehetőséget nyújtanak a képernyőket gyártó cégeknek [4]. Az a-Si:H vékonyréteg-technológia előnye még, hogy a CMOS technológiával szemben, az üveg megvédi a szenzort a zordabb körülményektől, pl. műhelyben vagy ipari

környezetben is jól működik [5]. Az olvasó képernyőbe integrálása pedig a teljes képernyő felületen lehetőséget biztosít egyéb biometrikus hitelesítésekre: az egy ujjbegy mellett több ujjbeggyel vagy tenyérrel azonosíthatjuk magunkat. Másrészt viszont a technológia által biztosított lehetőségek a tervező számára igen korlátozottak. A kevésbé összetett áramkörök tervezése és létrehozása is nagy kihívást jelentenek. Ennek oka, hogy a vékony rétegű tranzistorok teljesítménye gyenge, mert alacsony a töltés mobilitásuk, jelentős ID(VDS) karakterisztikában megmutatkozó "kink" hatás, nagy a szivárgó áramuk, és sajnos számtalan egyéb előnytelen tulajdonságukat tartjuk még számon[6]. Ezek a tervezési nehézségek a CMOS technológiában nem vagy kisebb mértékben jellemzők. Továbbá a tömb érzékelőket leíró FPN vagy „rögzített mintájú zaj” (angolul: fixed pattern noise) is magas ebben a technológiában. Ez viszont a hasznos kimeneti jel nagy részét felemésztí még az analóg-digitális átalakítás előtti áramkörrészekben. Az FPN jelenséget a pixelenként ismétlődő azonos méretű áramköri félvezető elemek nem azonos erősítése (device mismatch) hozza létre, ami végeredményül alacsony jel-zaj arányt okoz. Publikációnkban az alkalmazott neuromorf áramkörrel ujjlenyomat képfeldolgozást oldunk meg, a technológia nagy villamos paraméter szórásaiból adódó rossz jel-zaj arányt javítjuk, és széles tartományban érzékelni tudjuk a fényt. Az általunk ajánlott ujjlenyomat-olvasó alkalmazás egy swipe-sensor, vagyis olyan eszköz, ami az érzékelő sor felett elhúzott ujjbegy kép feldolgozását végzi.

2. Hardver követelmények

Ujjlenyomat olvasásra alkalmas áramkör tervezésének első lépéseként érdemes megismerni a bűnüldözésben használt olvasók minőségi követelményeit. Ezeket fogalmazza meg az FBI (Federal Bureau of Investigation) által kiadott verifikációs és minősítő eljárások gyűjteménye [7, 8]. A dokumentumok alapján az 1. táblázatban hasonlítjuk össze az FBI megfeleltetésű olvasók és a kereskedelemben megtalálható, nem bűnüldözésben használt ujjlenyomat-olvasók specifikációs adatait. Látható, hogy a kereskedelemben használt eszközök nem minden szempontból felelnek meg szigorúan az FBI követelményeknek vagy nincs is róluk fontosabb minősítésre alkalmas adat.

A táblázatból kiolvasható, hogy a felbontás nem mindenütt felel meg az FBI specifikációnak. Mivel a nagyobb szenzoros felületen több ujjlenyomat jellemző (minutiae-t) állapítható meg, ezért kompromisszum van a szenzor nagysága és a sikeres azonosítások arány mérőszáma között. A táblázat második sorából látszik az a nyilvánvaló tény is, hogy nagyobb képinformációhoz juthatunk a nagyobb szürkeárnyaltos felbontású olvasóval. Ennek ellenére néhány kereskedelmi terméknél a 2-3 bites felbontás is megfelelőnek tűnik [9]. Itt érdemes megjegyezni, hogy kisebb felbontás legtöbbször speciális algoritmus megalkotását teszi szükségessé vagy rosszabb minőségű képet állít elő. A táblázat utolsó két sorában az MTF-en (Modular Transfer Function) alapuló és a geometrikus pontosságot mérő követelmények láthatók. Ezen verifikációs mérési eljárások a

legyártott olvasókon végezhető a képminőség biztosítása érdekében és a Mitre cég által kiadott technikai dokumentációban vannak megfogalmazva [10]. A dokumentáció célja a bűnözésben használt ujjlenyomat olvasó eszközök verifikációja FBI direktívák alapján, melyet világszerte több ország is alkalmaz.

1 táblázat: IBM szabvány [10] kontra nem szabványos, egyéb, kereskedelmben megtalálható ujjlenyomat-olvasó összehasonlítása

	FBI megfeleltetésű érzékelők	Kereskedelmi egyéb olvasók
Érzékelő felület nagysága	Minimum 12,8 mm széles és 16,5 mm magas	Azonosításokból származó hiba lehet kompromisszum
Felbontás vagy Nequest frekvencia	Minimum 500 dpi	Minimum 250 dpi
Kép típus és szürke tartomány	Monokróm képet állít elő, pixelenként 8 bit mélységűt, minimum 256 szürkeárnyalattal (tömörítés előtt)	Mnokróm kép minimum 2-3 bites szürkeárnyalat
Térfrekvenciás válasz: MTF vagy Modular Transfer Function	$MTF_{min}(f) \leq MTF(f) \leq 1.12$ lásd [8] a PIV $MTF_{min}(f)$ -ről	Specifikációkban nem szerepel
Geometrikus Pontosság	A teszt 99% -ban legyen: DAC $\leq \max\{0.0013'', 0.018 \cdot X\}$ DAL $\leq 0.027''$	Specifikációkban nem szerepel

Egy olvasó például robusztusabbnak mondható, ha a feldolgozásra került kép a nyirkos bőr vagy az alacsony bőrredők esetében is azonosítható. Az alacsony magasságú redők főleg idős embereknél vagy fizikai munkásoknál figyelhetők meg. A geometria pontosság az x és y irányú kép torzulásának mérését célozza meg. Az MTF alapú mérés pedig a kép élességének jószágát irányzó eljárás, ahol a beolvasott képet NIST szoftverekkel minősítik és a kép tárgya egy speciálisan elkészített, adott frekvenciájú, szinuszosan változó fehér/átlátszó-fekete mintát tartalmaz. A NIST intézet az Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Szabványügyi és Technológiai Intézete.

3. Tervezési célok

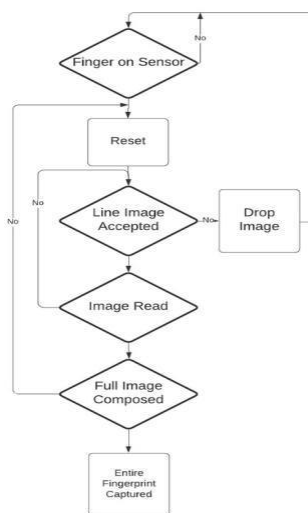
Képfeldolgozó érzékelő áramkör tervezése során kigyűjtöttük az általunk leginkább hasznosnak bizonyuló főbb kutatás- fejlesztési területeket. Ennek eredményeként vizsgálni érdemes a hardver és szoftver interfész kialakítását (hardware and software interfacing), a különböző optikai hatásokat (fénytörések és tükröződések az anyagban), meglévő kiolvasó áramkör vagy feldolgozó modulok tanulmányozását beépíthetőségük szempontjából, és a jel-zaj arányt a nagyobb zaj források helyének azonosításával. A fejlesztést igénylő feladatokat részletesen a 2. táblázatban gyűjtöttük ki. Érdemes megjegyezni más kutatók munkáját az LCD-be integrálható ujjlenyomat olvasók területén, ahol az egyes kutatások fókusza leginkább az újabb érzékelők létrehozása volt. Úgy gondoljuk, hogy ez viszont a gyártás technológia folyamatának megváltoztatásával jár, ami a gyártó cégnek költséges vagy az LCD termékre nézve negatív hatással is lehet. Ezért ezek vizsgálata tervezési céljainkba nem szerepelnek. A táblázatban a mismatch fogalma az egyes félvezetők anyag inhomogenitásából származó konstansok szórását jelenti. Ez okozza például két azonos méretű és azonosan előfeszített tranzisztor drain árambeli különbségét. Szintén ezért lesz pixelenként jelbeli különbsége azonosan megvilágított és egyforma méretű fotószenzoroknak.

Táblázat 2: FBI és az egyéb kereskedelmi ujjlenyomat-beolvasó specifikációs adatainak összehasonlítása

	SIGNAL TO NOISE RATIO	feladatok
SNR	Dioda Mismatch	teszt céljából legyártott érzékelő tömbök mismatch összehasonlítása, ahol a tömbök csupán a diódák méretében különböznek egymástól
	Tranzisztor Mismatch	Vékony réteg tranzisztorok teszt struktúrájának legyártása és tesztelése különböző méretekből, hogy a mismatch optimális méretét megtaláljuk az analóg áramkörti részekhez. A digitális részeknél érdemes vizsgálni a szivárgó áramot.
	Reszet Zaj	Reset Schemes vagy reset sémák
	Dark vagy sötét áram	áramkörti (kontra komponens) szinten mérni
	Néhány ígéretes érzékelő tesztelése	néhány ígéretes, a gyártási technológia változtatását nem igénylő, egyéb, félvezető érzékelő tömbös és pixelenkénti tesztelése fény érzékenység és mismatch céljából
	technológiai folyamat változtatása	kompromisszumos vizsgálat az érzékelő minősége és a gyárthatóság egyszerűsége között
	A kis méretű PPS, APS, vagy Smart Pixellek összehasonlítása	saját technológiával elkészített meglévő teszt struktúrák összehasonlítása és levonható következtetések
	HW-SW INTERFACE ÉS ALGORITMUS	
Rendszer	Kép rekonstrukció	Kép rekonstrukcióhoz szükséges swipe sebesség mérése (10-30 sorból is állhat a "line" vagy "swipe" olvasó)
	adat "feed through" vagy feldolgozási sebesség	Feldolgozási sebesség vizsgálata, áramkörti szinten
	PROCESSING ELEMENTS	
Analóg tervezés	pixel szintű kiolvasás	méret és félvezető mismatch tervezési kihívások
	kiolvasó modul	Erősítő elkészítése, ahol választ kell adni az a-Si:H tervezési kihívásokra
	OPTICAL ISSUES	
Egyéb tanulmányok	Estimate Image Contrast	Diffúz fény szimulációs vagy teszt vizsgálata
	Minőségre tervezni módszerek kikutatása	Új optikai tervezői módszerek felfedezése

4. „Line” vagy vonali szenzor működésének általános vizsgálata

„High Level Design” koncepcióját alkalmazva érdemes meghatározni a vonali vagy „line” szenzor általános működését. Egy általános modell felállításának az lehet a célja, hogy új ötleteket generáljon, esélyt adjon azok kifejlesztésére, vagy akár létező hardver modul leegyszerűsítését is elvégezhessek. Alacsonyabb szinten kezelt problémák, mint például a fizikai (layout) tervezés során elvégezendő „parasitic extraction”, vagy a rendszer finomhangolása az általános modell kialakításánál még nem annyira fontosak. Viszont a rendszer egészét befolyásoló, már ismert jelenségeket ezzel a tervezési elgondolással még ebben a tervezési fázisban számításba lehet venni. Az ujjlenyomat érzékelő működésének általánosítása végeredményben a tervezői szabadság lehetőségét nyújtja az alacsonyabb szintű funkciók jobb meghatározásához.



Ábra 1: Sorérzékelő tömb általános működése

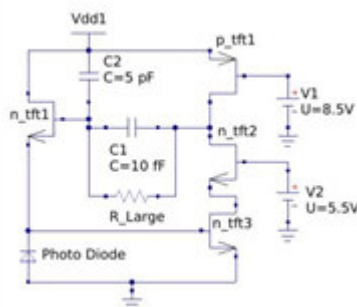
A szenzor működésének állapot diagramja az 1. ábrán látható. Az ábra négy jól megkülönböztethető állapotot mutat, „Finger On Sensor”, „Line Image Accepted”, és „Full Image Composed” elnevezésekkel. „Finger On” állapot detektálja az ujjlenyomat jelenlétét és ezzel az olvasó soronként elkezd beszkenyelni az ujjlenyomatot. „Line Image Accepted” határozza meg, hogy az egy soros kép megfelelő minőségű vagy az egész ujjlenyomat képet újra kell szkennelni. „Image Read” jelzi, ha egy képsor sikeresen be lett olvasva. Amennyiben elegendő számú, azonosításra alkalmas, ujjlenyomat jellemző beolvasásra került, a „Full Image Composed” állapotnak megfelelő jel aktív lesz. Ez az állapot vagy egy új sor olvasását kezdeményezi vagy befejezi az ujjlenyomat olvasás folyamatát.

5. Ujjbegy sebességét figyelembe vevő tervezés

Vonali szenzor (line szenzor) egy mozgó ujj képrészleteit gyűjti és a háttérben összeállítja egyetlen képpé. Ezzel szemben a 2D felületű szenzorok állóképe készítenek. Az ujjbegy mozgatásán alapuló line szenzorok tervezésének egyik nehézsége a mozgásból adódik. Túl gyors mozgásnál a felvételtől hiányozhatnak képsorok, míg a lassú mozgásnál a képfelvételek elnyújtott képet mutatnak. Ha ideális sebesség környezetében mozog az ujj, akkor is létrejöhetnek nagyobb sebesség változások az ujjbegy erőteljesebb nyomása vagy a bőrfelület állapota miatt.

6. A Pixel Áramkör

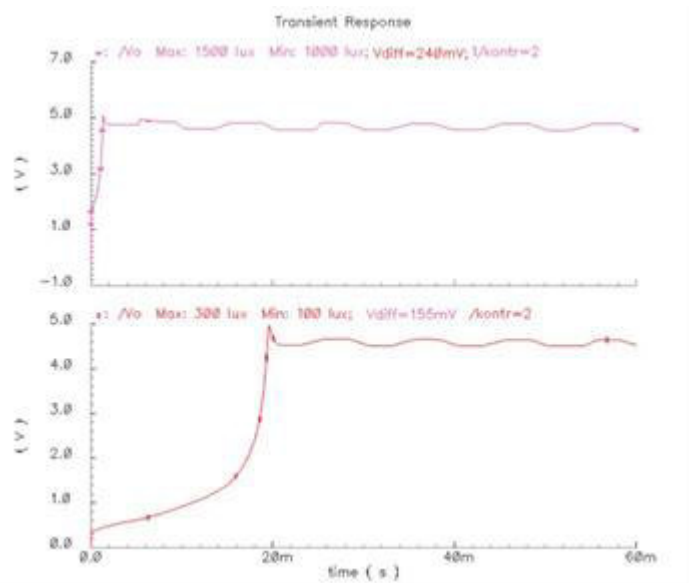
A pixel áramkör a fotodiódával a 2. ábrán látható. Ez a neuromorf áramkör működésében hasonlít a gerincesek szemében megtalálható fotoreceptor neuronhoz [14]. Az áramkör működése a következő: Az érzékelő beállítja az érzékenységet a környezeti megvilágítás figyelembevételével. Amikor az ujjbegyet az érzékelőre helyezzük, akkor a környezeti megvilágítást a bőrfelületről visszatükröződő fénymennyiség és az LCD belső strukturális kialakítása meghatározza. Ezt a környezeti megvilágítást az érzékelő adoptálja egy hosszú idejű erősítési tényezővel. A szenzor operációs pontja így kialakul a fodorszálak csúcsai és völgyei intenzitásainak környékén, azaz azokra érzékennyé válik. Ujjbegy mozgásra vagyis hirtelen intenzitás változtatására, amit a bőrredők csúcsainak és völgyeinek váltakozása okoz (csúcs $\rightarrow$ völgy vagy völgy $\rightarrow$ csúcs), a kimenet is változik. Az áramkör a kimenetén négyszöghöz hasonló jeleket produkál visszaadva ezzel az ujjlenyomatok kontraszt változásait. Mikor a kimenet magasabb feszültség értékre megy fel, jelzi a bőrredő csúcsát, mikor alacsonyabbra változik jelzi a bőrfodor völgyét. A kimeneti jel tekinthető logikai nullának a völgyeknél és logikai egynek a csúcsokon. A széles dinamikájú áramkör lehetővé teszi alacsonyabb környezeti megvilágításban a szenzor érzékenységét.



Ábra 2: Fotódiódás pixeláramkör

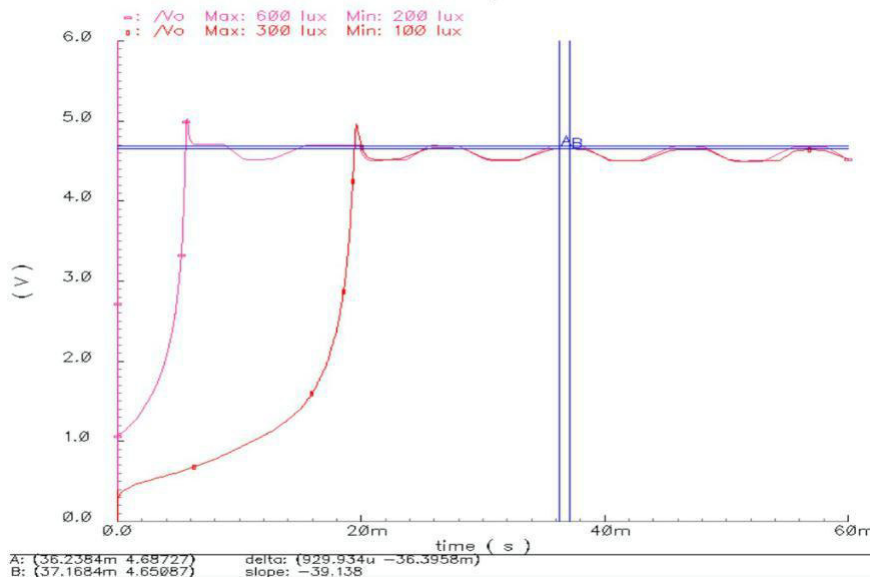
7. Áramköri szimulációs eredmények

Az áramkör szimulációs eredménye a 3. ábrán látható. A szimulációnál két különböző intenzitással megvilágított környezetet feltételezünk. Egy magas és egy alacsony megvilágítás mellett vizsgáljuk az áramkör működését. Minkét esetben a kontraszt megegyezik. Ennek értéke kettő, ami ujjlenyomatképeknél normális érték. Az ábrán látható maximum és minimum értékek rendre megfelelnek az ujjlenyomatot alkotó redők csúcsainak és völgyeinek miközben az ujjbegy mozog. Az áramkör modellezése a TFT tranzisztorok mellett kiterjedt a fotószenzorra is. Analóg modell segítségével a szenzor bemenetét lux egységben lehet megadni. A két szimulációt összehasonlítva megfigyelhető, hogy a nagy környezeti megvilágítás különbség ellenére (felső és alsó szimulációs ábrák), ugyanazon kontraszt változás mellett hasonlóan nagyok a kimeneti változások: 240mV és 155 mV feszültségek. Szintén látható, hogy az ujjbegy térfrekvenciás mintázatát időben változó jelalak írja le. Az eredményből látszik, hogy a kimenet változása a bemenet mintegy tízed részének változására is megkülönbözteti a kontrasztos képet.



Ábra 3: Kimeneti jelválasz szimulációs vizsgálata két teljesen különböző megvilágítási környezetben (0,1 szeres)

A következő 4. ábrán mutatott szimuláció célja, hogy megvizsgáljuk a pixelek áramkörei milyen mértékben csökkentik a mismatch-ből adódó szórást. Pixelenként egyforma méretű fotodiódákat és áramköri elemeket feltételezve a két a szimulációs görbe alig eltérő kimeneteket produkál, majdnem fedik egymást. A mismatch szimulálásához itt kétszer akkora bemenetet állítottunk elő egyenlő nagyságú kontraszt mellett, ahol az áramkörök kimenetének egymáshoz viszonyított különbsége kicsi eltérést mutat: csupán 1mV feszültséget.



Ábra 4: Alacsony megvilágítási környezetben vizsgált mismatch-ből származó alacsony 1 mV kiemeneti feszültségesés szimulációja

8. Konklúzió

Erre a technológiára jellemző, hogy a képolvasó érzékelő tömbök pixelenként általában tartalmaznak egy fotóérzékelőt és kis méretű kapcsoló és reszet tranzisztorokat. Mások kutató munkái nagyobb érzékenységű, új fotóreceptorok kialakítását célozzák meg a gyártási folyamat megváltoztatása mellett. Ez utóbbi megoldás viszont drágíthatja az LCD képernyők előállítását. Talán ezért is lehetséges, hogy ilyen áramkörök a kereskedelemben még nem jelentek meg.

Úgy gondoljuk, hogy a képolvasó érzékelők javítására irányuló kutatások erre a technológiára hardveres ujjlenyomat képfeldolgozással még nem történtek. Ezen tanulmány próbálja ezt a kutatási hiányt betölteni, ami a technológiából adódó jel-zaj arányt javítja és az ujjlenyomat képfeldolgozását is megoldja egyben.

Referenciák

- [1]. L. COETZEE and E. BOTHA, “Fingerprint Recognition in Low Quality Images,” in *Pattern Recognition Journal*, Volume 26, Issue 10, Elsevier, October 1993, Pages 1441-146
- [2]. D. Maltoni, D. Maio A. K. Jain S. Prabhakar, “Handbook of Fingerprint Recognition”, Second Edition, page 143-154
- [3]. S. Bae Y. Ling W Lin H Zho, “Optical Fingerprint Sensor Based on a-Si:H TFT Technology”, 2018
- [4]. Liao, Y. H., Chang, C., Lin, C. H., You, J. Y. & Lin, “Flat panel fingerprint optical sensor using TFT technology”, *IEEE Sensors*, 2015
- [5]. K. Rosan and G. Brunst, A-Si:H “Image Sensors: Some Aspects of Physics and Performance”, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol.70, pp.683-688, 1986
- [6]. S.D. Brotherton, “Introduction to Thin Film Transistors” pp. 141-182, 2013
- [7]. IAFIS Image Quality Specification, Appendix F, January 29, 1999
- [8]. A. Alessandroni, R. Cappelli, M. Ferrara, and D. Maltoni, “Definition of Fingerprint Scanner Image Quality Specifications by Operational Quality”, 2008
- [9]. Cappelli, R., Ferrara, M., Maltoni, “On the Operational Quality of Fingerprint Scanners. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* (to appear)
- [10]. Xia X. and O’Gorman L., “Innovations in Fingerprint Capture Devices,” *Pattern Recognition*, vol. 36, no. 2, pp 361-369, 2003
- [11]. Norman B. Nill, “Test Procedures For Verifying Image Quality Requirements For Personal Identity Verification (PIV) Single Finger Capture Devices”, 2006
- [12]. Sweep sensors in timely order:
http://pagesperso-range.fr/fingerchip/biometrics/types/fingerprint_sweep.htm
- [13]. TFT optical Sensors:
[http://pagesperso-orange.fr/fingerchip/biometrics/types/fingerprint_sensors - _physics.htm#optic_TFT](http://pagesperso-orange.fr/fingerchip/biometrics/types/fingerprint_sensors_-_physics.htm#optic_TFT)
- [14]. Y. Qi, A. Li, Y. Xu, K. Wang, “Amorphous silicon 3-D one-transistor active pixel sensor enabling large area imaging”, *Society of Information Display*, 2021
- [15]. T. Delbrück & C.A. Mead, “Analog VLSI Phototransduction by Continuous-time, Adaptive, Logarithmic Photoreceptor Circuits,” *Memo No. 30*, April 2, 1996, California, Institution of Technology Computation and Neural System Program