

A memóriák „ötpróbája”

A FRAM-technológia minden „versenyszámban” a beágyazott memóriák legjobbja

Matthias Poppel - Texas Instruments

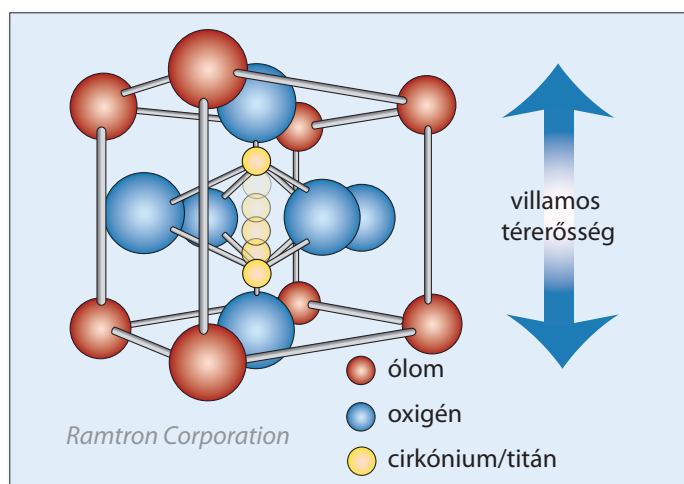
A Texas Instruments új „versenyzővel” indul a beágyazott memóriák bajnokságában. A FRAM-technológiának meglepő tulajdonságai vannak. Öt „versenyszámban” hasonlítjuk össze képességeit a hosszú időn át első helyezett flash-memóriáéval. Az egyértelmű győztes a FRAM.

Mielőtt hozzálátnánk a felhasználó szempontjából valóban érdekes tulajdonságok részletes összehasonlításának, vizsgáljuk meg...

Hogyan működik a FRAM és a flash?

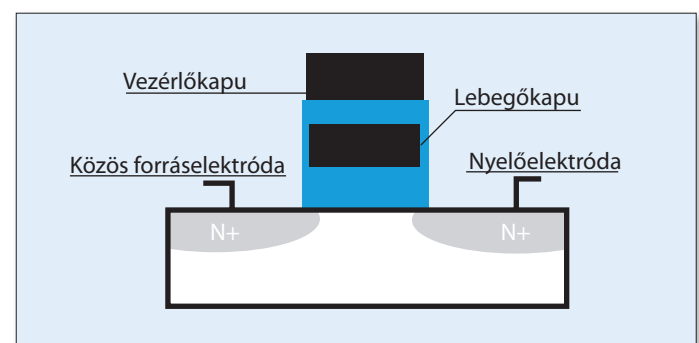
- A **FRAM** felépítése annyiban hasonló a dinamikus memóriákéhoz (DRAM), hogy az elemi memóriacella egy tranzisztort tartalmaz az áram kapcsolására és egy kondenzátort az információ tárolására. A különbség a kondenzátor dielektrikumában van, ugyanis az FRAM-ban a kapacitás fegyverzetei között egy ferroelektromos tulajdonságú anyag, ólom-cirkonát-titanát (PZT) található. A „ferroelektromos” kifejezést nem szabad összetéveszteni a „ferromágnessel”. Csak annyi a közös bennük, hogy a PZT-dielektrikumú kapacitás feszültsége és töltése a ferromágneses anyagoknál jól ismert hiszterézises tulajdonságot mutatja. A FRAM tehát nem tartalmaz vasat vagy más ferromágneses anyagot, tehát nem is érzékeny a mágneses térre. Ezzel szemben elektromos tér jelenlétében a kristályban elhelyezett dipólusos molekula belsejében „eltolódnak” az atomok (1. ábra), és az elektromos tér irányának megfelelő elektromos töltés jön létre. A két lehetséges polarizációs állapotnak két logikai érték, „0”, vagy „1” feleltethető meg. A FRAM ezeket az állapotváltozásokat a polarizáló elektromos tér megszűnése után is megbízhatóan megőrzi, tehát az ilyen elven szerkesztett memóriaelem kikapcsoláskor sem törlődik. Az „átkapcsolás”, a dipólus állapotváltozása gyors, és kevés energiát igényel.

1. ábra A PZT-kristály szerkezete – a kristálypolarizáció változása



- A **flash-memóriák** közül mikrokontrollerekben jellemzően a NOR-típusút használják. Ennek egy memóriacellája egy MOSFET-et tartalmaz, amelynek két kapulelektrodája van egymás fölött elhelyezve (2. ábra). A **vezérlőkapu** szabályos NMOS-tranzisztorként vezérli a forrástól (source) a nyelő (drain) felé folyó áramot. A vezérlőkapu alatt elhelyezkedő „**lebegőkapu**” egy oxidréteg teljesen elszigeteli a környezetétől. A logikai „1” szintet az jelképezi, ha a lebegőkapu nem tárol töltést. Ha most a vezérlőkapura egy küszöbértéket meghaladó feszültséget kapcsolunk, az bekapcsolja a csatornát, és azon áram folyik keresztül. Ahhoz, hogy a tárolócellát logikai „0” értékre programozzuk, egy nagyobb, jellemzően 12...14 V-os feszültséget kell a vezérlőkapura kapcsolni. Ebben az esetben a forrás és nyelő között folyó áram elég nagy lesz ahhoz, hogy egy bizonyos mennyiségű elektron az oxidrétegen „átugorva” a lebegőkapuban töltést hozzon létre. Ezt a folyamatot „forróelektron-injekciónak” nevezzük. A lebegőkapuban tárolt töltés miatt a normál kiolvasási művelet nem tudja annyira „kinyitni” a tárolótranzisztort, hogy elegendő áram folyhasson rajta – következésképpen a cella logikai „1” értéket tárol. A flash-memória egyetlen cellájának „0”-értékre való visszatörlése a gyakorlati megoldásokban nem lehetséges, ezt rendszerint csak a cellák egy blokkján lehet végrehajtani, amelyet szektornak nevezünk. A szektor törlése a nagy programozófeszültség ellentétes polaritású rákapcsolásával történik, mivel ennek hatására a lebegőkapuban felhalmozott töltéshordozók a kvantum-alagúteffektus révén eltávoznak onnan. A flash-memória programozása és törlése ezért bizonyos időt igényel, és a tápfeszültségnél nagyobb feszültségek előállítását teszi szükségessé, amelyet rendszerint töltésszivattyús feszültségnövelő kapcsolás állít elő.

2. ábra A lebegőkapus memóriatranzisztor NOR-flash-memóriákban alkalmazott változata



A bináris információt reprezentáló elektronok általában évekig megbízhatóan a lebegőkapuban maradnak, de a szigetelő oxidréteg bármilyen gyengesége vagy valamilyen sugárzás fizikai hatása következtében a vezérlőkapuból elektronok szivároghatnak ki, vagy épp szivároghatnak oda. Ekkor jön létre a bit átbillenése (bit flip), ami információvesztést okoz(hat).

A FRAM szereplése a „memória-ötpróbában”

Az univerzális atléta

Van-e valaki, aki nem ismerné a típuskérdéseket, amelyek mindjárt a projekt kezdetén, a processzorválasztásnál merülnek fel (különös tekintettel a memóriakonfigurációra)? Mennyi nem törölődő programmemóriára és mennyi adatmemóriára lesz szükségünk? Mekkora a programbetöltő program (boot loader) memóriáigénye? Mennyi memóriára lesz szükségünk a járulékos programfunkciók számára? Kell-e külső flash-memóriát alkalmaznunk? Elég lesz-e az eszközbe integrált RAM-tároló? Mennyi statikus RAM kell a programfutás közbeni átmeneti adatok tárolásához? Kell-e gyakran változó, de tartósan megőrzendő „naplóadatok” számára külső EEPROM-tárolót beépítenünk?

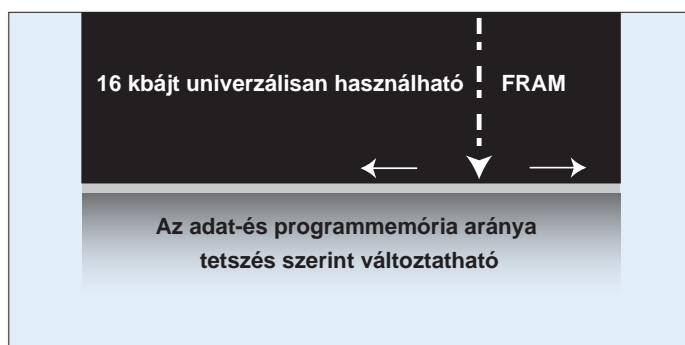
A FRAM megjelenésével itt az „univerzális játékos”, amely nem jön zavarba, akár flash-, SRAM- vagy EEPROM-tárolót kell helyettesítenie. Először is a FRAM tartalma kikapcsoláskor nem törölődik. Az MSP430FR57xx mikrokontroller-család tagjai elegendő energiát tárolnak a csipben ahhoz, hogy befejezhessék a folyamatban levő írási műveletet, még ha a tápkimaradás váratlanul következik is be. Ezáltal ezek az alkatrészek váratlan kikapcsoláskor képesek egy jól meghatározott állapotot megőrizni. Fontos továbbá, hogy a tervezőnek nem kell foglalkoznia a szektorméretekkel és a szektortörölési korlátozásokkal, mivel a FRAM „bitszinten” programozható. A tervezők igényeiknek megfelelően, szabadon oszthatják fel a teljes integrált memóriát (3. ábra).

Alig fogyaszt valamit

Végeztünk egy kísérletet, melynek során 13 kbájt/s sebességgel írtunk adatokat először egy MSP430FR6739 MCU FRAM-jába, majd egy MSP430F2274 flash-memóriájába. A 4. ábra diagramja mutatja az áramfelvételt mindkét esetben. Ha a FRAM 9 µA-es fogyasztását egyetlen banánnak tekintjük, amely atlétánk energiájának fenntartásához szükséges, ugyanezen feladat végrehajtására a flash-memóriás megoldás egy egész hátizsáknyi, 244 banánt igényel. Ezt a súlyelőnyt bárki értékelni tudja, aki életében megpróbálkozott néhány futólépéssel.

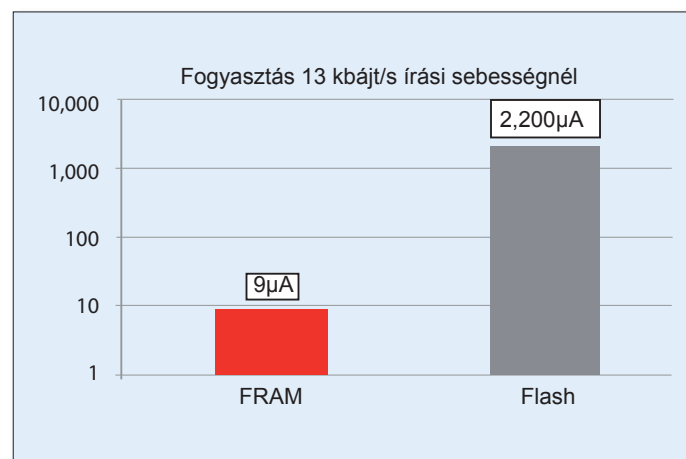
A beágyazott adatfeldolgozás világába visszatérve ez jelentős energiamegtakarítást jelent, hiszen a memóriáhozáférés minden mikrovezérlő-alkalmazás alapvető funkciója. Az ultrakicsiny energiaigény oka az, hogy a FRAM nagyon kevés energiát és csupán 1,4 V programozófeszültséget igényel programozáskor, míg a flash a 12...14 V-os programozófeszültséget csak töltésszivattyúval tudja előállítani.

3. ábra A szabad felhasználhatóság javítja a memóriakihasználást



A 400 m-es síkfutóbajnok

Hasonlítsuk össze ismét az előző kísérletünk szereplőit. Legyen a feladat 64 bájt adat írása, és mérjük, hogy mekkora idő alatt hajtódik végre ez a FRAM- és a flash-memóriás MCU-ban. Az eredmény: a FRAM-memóriás MSP430FR5738-nek ehhez 1,6 µs-ra, a flash-memóriás MSP430F54381-nak 1,6 ms-ra van szüksége. A különbség oka, hogy a FRAM-kristály dipólusátbillenése villámgyos ahhoz képest, ahogy a flash-memóriában a vastag oxidrétegen a lebegőkapuba jutnak a töltéshordozók. Hogy a különbséget szemléletessük, állítsuk a két atlétát a 400 m-es síkfutás rajtvonalához. A startpisztoly eldördülése után a flash-versenyző a maga „emberi léptékű” reakcióidejével még be sem fejezte az első blokk írását, mire a FRAM már a harmadik futamon is túl van. És mire a flash túl van a maga 400 m-es körén, a FRAM már az ezredik kört fejezi be. A nagyon kis energiafelvételre méretezett alkalmazásokban rendkívül előnyös az ilyen extrém nagy írási sebesség, amikor a processzort „alvó” állapotából ébresztjük fel. Ezért az írási idő megrövidülése növeli a telep élettartamát. A teljes memóriataralom újraírását igénylő szoftverfrissítés távoli megoldásánál is előnyös a rövidebb programozási idő.

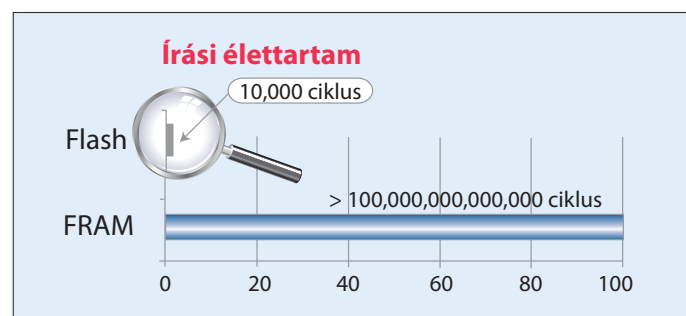


4. ábra A FRAM és a flash áramfelvételének összehasonlítása 13 kbájt/s sebességű írásnál

A maraton

A vágatszám után jön a verseny, amely a kitartásról szól. A beágyazott flash-memóriák írási/törölési ciklusainak maximális száma kb. 10 000, amely csak kivételes esetekben éri el a 100 000 ciklusnyi élettartamot. A FRAM viszont akár 10¹⁴ írási ciklust is kibír. Ha ezt megpróbáljuk szemléletessé tenni, tegyük fel, hogy 10⁵ írási ciklus tesz ki egy 42 km-es maratoni távot. Ennyit teljesítenek a legjobb flash-memóriák, mielőtt tönkremennének. A FRAM élettartamát ehhez képest úgy jellemezhetnénk, hogy az Egyenlítő mentén körbefutja a Földet – de nem egyszer, hanem egymilliószor (5. ábra).

5. ábra A FRAM és a flash teljes élettartam alatti írási ciklusszámának összehasonlítása



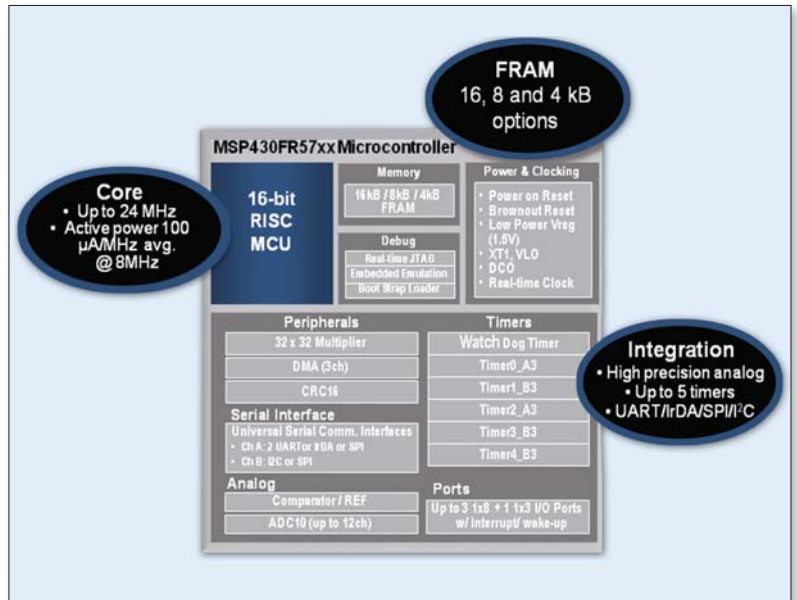
A FRAM dipólusos tárolómechanizmusa rendkívül robusztus, és semmiféle „fáradási” jelenséget nem mutat a 10^{14} ciklusra becsült élettartama alatt. Újabb tanulmányok szerint az élettartam akár 10^{16} cikluson túlra is növelhető. Ez pedig sokkal több, mint amire manapság bármilyen nem törlődő memóriaalkalmazásban szükség lehet. Azonban a flash nem az egyetlen memóriefajta, amellyel a FRAM-nak versenyeznie kell. A FRAM-ról azt állítottuk, hogy univerzális memória, tehát az SRAM szerepében is helyt kell állnia. Teleptáplálású készülékeknél, 10%-os aktív időhányaddal, ugyanazon memóriahelyhez 8 MHz-es frekvenciával hozzáférve az eszköz élettartama – az FRAM 1014 ciklusos élettartamát feltételezve – 8 év, és ez 80 évre¹ növekszik, ha elérhetővé válik a ma lehetségesnek feltételezett 10^{16} ciklusos élettartamú új generáció.

A „rúgásálló” játékos

FRAM-atlétánk nemcsak gyors, kitartó és igénytelen (már ami az energiafogyasztást illeti), hanem robusztus és védett a külső behatások ellen is, mint egy jó futballjátékos. Amint azt már leírtuk, az FRAM nem tartalmaz vasat vagy más ferromágneses anyagot, következésképpen nem hatnak rá a mágneses terek. Ugyanakkor a villamos térre is nagyon kevésbé érzékeny. Még az eszköz közvetlen közelébe helyezett, 50 kV-os feszültségre töltött tárgy sem képes elegendő villamos télerősséget létrehozni ahhoz, hogy megváltoztassa a memóriacella állapotát. Ismert, hogy az alfarészecskék, ionok, a kozmikus sugárzás, a gamma- és röntgensugárzás is képes egy memóriacella állapotát ellentétes logikai állapotba billenteni – ezek előfordulási gyakoriságát nevezzük SER-nek (Soft Error Rate – „puha hiba gyakoriság”²) Ezek a jelenségek minden memóriatechnológiára hatással vannak, amelyekben az információt elektromos töltés hordozza. Az FRAM-ra azonban ez nem jellemző. Valószínűtlen, hogy az FRAM-kristály dipólusmolekulája egy részecske hatására állapotot váltson. A földfelszín sugárzási viszonyai között az FRAM-nál „puha hibák” gyakorlatilag nem fordulnak elő.

A Texas Instruments MSP430 ultra-kisfogyasztású mikrokontrollere FRAM-ot kap

A beágyazott feldolgozás nem „egyéni sport”. Még a „sztárjátékosoknak” is „kell egy csapat”. Ha az MSP430 mikrovezérlő-családba FRAM kerül, az tovább gyarapítja e család kis teljesítményfelvétellel és nagy teljesítménnyel jellemezhető kedvező tulajdonságait. Az első termékvonallal, amelyben az FRAM szerephez jut, az MSP430FR57xx MCU-család (6. ábra), amelyben a jól ismert 16 bites MSP430 processzormag fut 24 MHz-es órafrekvenciával. A családtagok fogyasztása csupán 100 µA/MHz. Az FRAM nagy írássebessége és kis fogyasztása hozzáadódik a mag saját jótulajdonságaihoz, és ezzel növekszik a telep élettartama hordozható alkalmazásokban, sőt, az energiaellátás új alkalmazásai is szerephez juthatnak. Az MSP430 integrált, nagy pontosságú, analóg perifériái nagy rugalmasságot tesznek lehetővé az analóg adatok kondicionálása és digitalizálása terén,



6. ábra Az MSP430FR57xx MCU-család tömbvázlata

és az adatok akár folytonosan újra is írhatók az FRAM-ban. Az MSP430FR57xx-család TSSOP- és QFN-tokozatban kerül forgalomba, és az utóbbi mindössze 4×4 mm méretű.

A fejlesztést segítő eszközök közt az MSP-EXP430FR5739 Experimenter Board (kísérletező panel) az első, amellyel kipróbálhatók az eszköz tulajdonságai, és támogatja az adagyűjtő- és napenergia-termelő-, a vezetékmentes szenzor- és automatikus fogyasztásmérő-alkalmazások fejlesztését. Az olcsó eszköz jó néhány szenzort és adatátviteli lehetőséget is magában foglal a fejlesztés megkönnyítésére:

- háromtengelyű gyorsulásmérő
- termisztoros hőmérséklet-érzékelő
- 8 db állapotjelző led
- kísérleti panelfelület furatszerelt kiegészítők, fényérzékelők számára
- 2 db felhasználói kezelőkapcsoló
- csatlakozófelület a TI Wireless Daughter Card (vezetékmentes vendégkártya) legtöbb típusához

A kísérletezőpanelen levő MSP430FR5739 eszköz táplálására és hibakeresésére az integrált ezFET vagy a Texas Instruments flash-emulációs készlete, például az MSP-FET430UIF használható.

Összefoglalás

Az FRAM a „memória-ötpróban”, a fogyasztás, az írássebesség, az írásciklusban kifejezett élettartam, az elektromágneses és részecske-ellenállóképesség és az univerzalitás terén messze meghaladja minden hagyományos memóriatípust (flash és EEPROM), és új kategóriát alkot a teleptáplálású, vezetékmentesen kommunikáló és adatgyűjtő alkalmazások számára fontos minőségi jellemzőkben. Az ultra-kisfogyasztású, nagy teljesítményű, 16 bites MSP430-architektúra kiváló kombinációt alkot az FRAM-mal. Alacsony készenléti áramfelvétele, gyors „felébredése” és nagy teljesítményű processzormagja nagyon jól egészíti ki a FRAM előnyös tulajdonságait. A végére hagyva a legjobbat: a FRAM már a piacon kipróbált, még különösen nehéz működési feltételek között is bevált technológia; majd egy évtizede gyártja a Ramtron és a Texas Instruments.

¹ A 10^{14} és 10^{16} közötti arány nem 1:10, hanem 1:100, amiből - a szerző gondolatmenetét követve - 800 éves élettartam következne. Azonban a szerző nem feltétlenül téved, mivel az élettartamot a PZT-kristály élettartamán kívül más hatások is befolyásolhatják. – A szerk. megj.

² Az ilyen hibákat azért nevezik „soft error”-nak, mert hibakereséskor nem reprodukálhatók, ezért gyakorlatilag lehetetlen is őket „kinyomozni”. Gondoljunk csak meg: egy mai asztali számítógép memóriájában egy bitnyi információt néhány száz elektron jelenléte vagy hiánya reprezentál. Egy nagyenergiájú kozmikus részecske áthaladásakor keletkező ionizáció könnyen billentheti át egy memóriacella állapotát anélkül, hogy „megfogható”, tartós nyomot hagyna maga után. Az ilyen hiba megismétlődése teljesen valószínűtlen. – A szerk. megj.