

A kezdetektől a NexFET-ig

A kapcsolófetek teljesítményelektronikai alkalmazásai

Jacek Korec, Chris Bull – Texas Instruments

A kapcsolófetek egyik legdinamikusabban fejlődő alkalmazása a teljesítményelektronika. A cikk áttekinti az eszköz fejlődéstörténetét egészen a Texas Instruments legújabb eredményéig, a NexFET™-technológiáig, és bepillantás nyújt egy olyan kevesek által művelt szakterületre, mint a félvezetők optimalizálása – sajátos alkalmazási szempontok szerint.

Bevezetés

A MOSFET-ek teljesítményelektronikai alkalmazásához az indítólökést a bipoláris tranzisztorok helyettesítése adta. Ennek fő oka a MOSFET-teljesítménykapcsolók azon tulajdonsága, hogy nagy a bemeneti impedanciájuk. Ez azt jelenti, hogy a teljesítmény-MOSFET feszültségvezérelt eszköz, ellentétben az áramvezérelt, bipoláris kapcsolótranzisztorokkal. Más szóval a MOSFET-teljesítménykapcsoló még akkor is alkalmas a gyors kapcsolásra, ha kisteljesítményű meghajtóáramkör vezérli. Az idők folyamán a teljesítmény-MOSFET-ek a legnépszerűbb kapcsolóeszközökké váltak az olyan alkalmazásokban, ahol a bemenőfeszültség nem éri el a 200 V-ot.

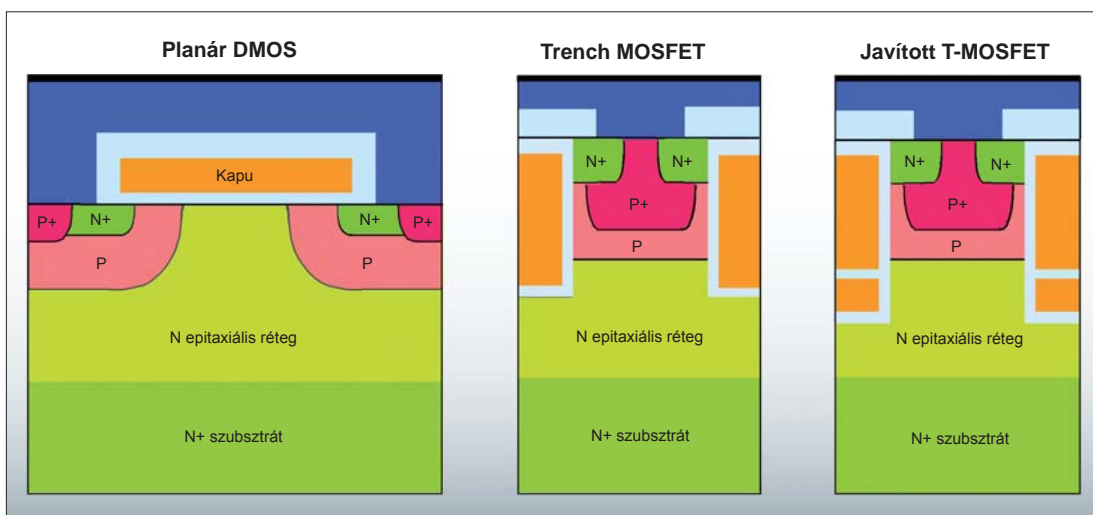
A MOSFET-kapcsolók tulajdonságainak javulását az 1970-es évek végén bevezetett CMOS-technológia gyors fejlődése kísérte az integrált áramkörök gyártásában. Jellemző, hogy a „leharcolt” CMOS-gyártókapacitások felhasználásával készített teljesítménykapcsoló MOSFET-ek három-öt évvel lemaradva követik az élvonalat a fő méretek tekintetében: 1 μm, 800, 500, 350, 250, 180 nm stb. Az élvonalat képviselő, informatikában, szórakoztató elektronikában és telekommunikációban használt „igen nagy integráltságú” (VLSI) áramkörök méretcsökkentése a tápfeszültség csökkenésével jár együtt. Ennek következménye, hogy a VLSI-élvonalat kiszolgáló, kapcsolóüzemű tápegység-topológiáknak is egyre kisebb feszültségről egyre nagyobb áramokkal kell működniük, a terhelésen egyre jobban „kézben tartható”, pontosan szabályozható és vezérelhető teljesítményt előállítva.

Az első generációs, „makrocellás” teljesítménykapcsoló MOSFET-ek a kettős diffúziós tech-

nológiával (Double diffused MOS – DMOS) készültek, amelyet az 1980-as évek elején az International Rectifier vezetett be nagy sikerrel a piacra. Ez lényegében egy vertikális elrendezésű, sík kapuelektrodás MOSFET-struktúrát jelent, ezért is szokás planár teljesítmény-MOSFET-nek nevezni.

A makrocellás technológia következő generációja a Siliconix által bevezetett TrenchFET® volt, amely a 90-es években vált népszerűvé. Ennek bevezetésével sokat javult a bekapcsolási ellenállás ($R_{DS(on)}$). A TrenchFET-technológia – a 100 V-nál kisebb drainfeszültségű kapcsoló alkalmazásokban – egyértelműen előnyösnek bizonyult a DMOS-szal szemben a bekapcsolási ellenállás és a kapuelektrodában tárolt töltés szempontjából. Ez ma a piac leggyakoribb, kisfeszültségű kapcsolótechnológiája, amely csaknem minden MOSFET-gyártó választékában megtalálható. Ennek használatával, az alacsony bekapcsolási ellenállás révén, jelentősen csökkent a bekapcsolási teljesítményveszteség a tápegységekben. Ezzel szemben a kapcsolóüzemű tápegységek veszteségeinek másik fontos okozója, az átkapcsolási veszteség lényegében változatlan maradt, noha a 90-es évek végére az ár és a méret csökkentése, valamint a minőség javítása (például a gyors terhelésváltozások hatásának csökkentése) a kapcsolási frekvencia növelését tette szükségessé.

1. ábra A planár DMOS és a TrenchFET-szerkezet összehasonlítása



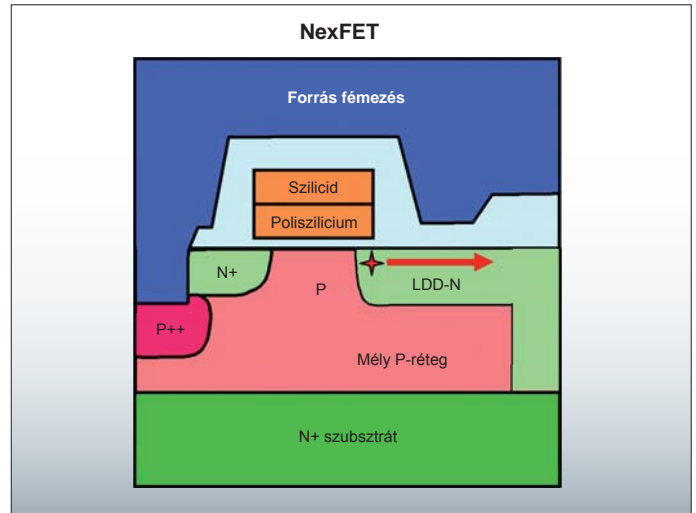
A makrocellás teljesítmény-MOSFET-technológiák harmadik generációját nemrég vezette be a Texas Instruments. Ez a NexFET™-technológia olyan alacsony R_{DSon} bekapcsolási ellenállást tesz lehetővé, amely versenyképes a TrenchFET-tel, emellett pedig jelentősen kisebb a bemeneti és Miller-kapacitása. Ez kis kapuelektrodában tárolt töltést és gyors kapcsolási tranzienszt tesz lehetővé az átkapcsolás során. Ez az új generációs MOSFET csökkenti a kapcsolóüzemű tápegységek átkapcsolási veszteségeit, és nagy kapcsolási frekvenciák alkalmazását is megengedi. Az új eszközök alkalmazása elsősorban a 30 V-os vagy kisebb bemeneti feszültségnél előnyös. Ez pedig az elosztott, sínrendszerű tápfeszültség-ellátó rendszereknél használható ki különösen jól, amelyek a korszerű rendszerek jellegzetes megoldásai.

Technológiai generációk

A DMOS- és a TrenchFET-tranzisztorok közötti különbségeket az 1. ábra szemlélteti. A DMOS-eszköz sík kapuelektroda-elrendezésének az az előnye, hogy a forrás- és nyelőelektroda közötti áram iránya „függőleges”, a lapka elő-és hátlapja közötti irányt követi. Az áram a sík kapuelektroda alatt indul, a két p-szennyezésű régió közt, az epitaxiális rétegen át a szubsztrátig. Az enyhén szennyezett epitaxiális réteg révén magas letörési feszültség érhető el. A függőleges áramirány nagy áramsűrűséget tesz lehetővé, és általa elkerülhetők azok a nehézségek, amelyek a „laterális” (a lapka síkjával párhuzamos) áramiránynál a méretek növelése esetén lépnének fel. A laterális méretek aránylag szélesek annak érdekében, hogy elegendő távolság legyen a p-szennyezésű rétegek közt. A nagy térköz igen fontos annak a parazita rétegfeteffektusnak a lehető legkisebb mértékre csökkentéséhez, amely az egymással szembe fordított PN-átmeneteknek tulajdonítható. A DMOS-tranzisztorok R_{DSon} bekapcsolási ellenállásában a csatornazóna kapuelektroda alatti részének ellenállásából, a p-szennyezésű régiók rétegfeteffektusából, valamint az epitaxiális réteg és a szubsztrát ellenállásából tevődik össze. Minél nagyobb az a letörési feszültség, amelyre az eszközt tervezik, annál nagyobb részt képvisel a bekapcsolási csatorna-ellenállásban az epitaxiális réteg ellenállása. Az alacsony feszültségű alkalmazásokban viszont a rétegfeteffektus és a MOS csatornaellenállása képvisel jelentősebb részarányt.

A TrenchFET-ekben a MOS-csatorna egy „árok” függőleges falai között húzódik. Ez nagy csatornasűrűséget tesz lehetővé egy közös szilícium hordozólapkán. A parazita rétegfetszerkezet hiányában a cella keskenyre készíthető, amely révén kisebb fajlagos R_{DSon} (felületegységre eső MOSFET-csatornaellenállás) adódik. A 90-es évek vége felé a tranzisztorok alacsony R_{DSon} értéke a TrenchFET-technológiát a kisfeszültségű, teljesítménykapcsoló MOSFET-ek „de facto szabványává” tette. Ugyanakkor viszont az „árok” falának nagy felülete jelentős kapacitást képvisel. Ha az árok alsó pereme belenyúlik a nyelőelektroda részét alkotó epitaxiális rétegbe, az jelentős kapacitást (C_{GD}) képvisel a kapu- és a nyelőelektroda között. Ez nagy hátrány, különösen, ha nagy kapcsolási sebességre van szükség.

A XXI. század elején a nagyobb kapcsolási frekvenciájú DC/DC-konverterek iránti igény növekedése lendületet adott a MOSFET-ek kapcsolási veszteségeinek csökkentésére irányuló törekvéseknek: folytatódott a TrenchFET-ek szerkezeti továbbfejlesztése. Első lépésként, a Miller-kapacitás (C_{GD}) csökkenésére, egy vastag oxidréteget alakítottak ki az „árok” alján. További jelentős minőségjavulást eredményezett az, hogy kettéosztották a kapuelektrodát, és az alsó felét



2. ábra A NexFET kapcsoló-MOSFET-struktúra

a forráselektrodához kapcsolták. Ennek árnyékoló hatása elválasztja a kapu- és a nyelőelektrodát, jelentősen csökkentve a C_{GD} értékét. A 2000-es évtized közepére az árokszerkezetű teljesítmény-MOSFET lett a kisfeszültségű teljesítményelektronikai alkalmazásokban legelterjedtebben használt megoldás.

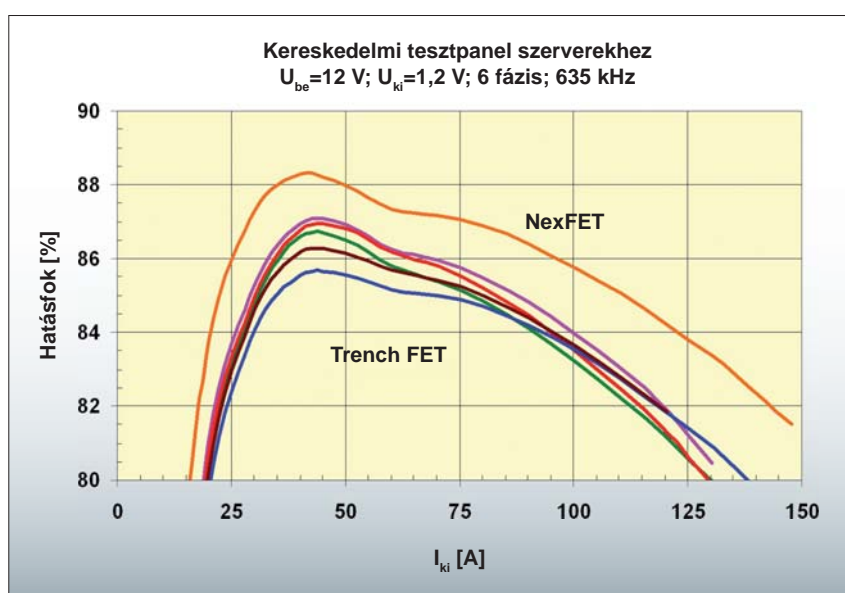
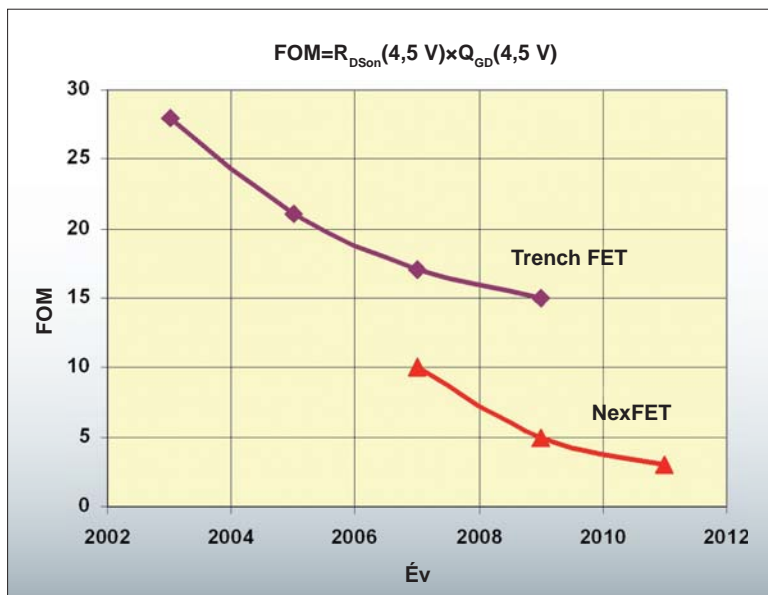
A harmadik generációs, NexFET-struktúrájú MOSFET-teljesítménykapcsolók (2. ábra) a kapcsolók dinamikus viselkedésében jelentettek áttörést. Ennek az eszköznek a gyökerei a 2 GHz-ig terjedő RF-tartomány erősítésére használt LDMOS-tranzisztorokig nyúlnak vissza. Az ehhez szükséges jó dinamikus viselkedés eléréséhez a Miller-kapacitást néhány pF-ra kellett csökkenteni. Ennek érdekében a kapuelektroda és a nyelőelektroda enyhén szennyezett régiója (Lightly Doped Drain – LDD) közt csak minimális átfedést lehetett megengedni. Ezenkívül a forráselektroda fémezésének eredeti kialakításával és az LDD-zóna feletti árnyékolósíkkal jelentős elektrosztatikus elválasztás keletkezik a kapu- és a nyelőelektroda között. Az árnyékolófelület azért is fontos, mert kiterjeszti azt a zónát, amely szétteríti az elektromos teret az LDD-felület mentén. Ez a megoldás „elsimítja” az elektromos térerősség kiugró értékeit a kapuelektrodának a nyelő felőli végénél. Ezáltal a hagyományos LDMOS-eszközöknél megbízhatósági problémákat okozó „forró töltéshordozó effektus” is elkerülhető. Az LDD-zónát egyébként a töltésegyensúlyra vonatkozó tervezési szabályok figyelembevételével tervezik. Eszerint az LDD-zóna töltése ellensúlyozza a kiürített, p-szennyezett „mélyréteg” töltését, amelyet a forráselektrodához kapcsolt árnyékolósík is befolyásol. A töltésegyensúlyra törekvő megközelítés következtében az LDD-régió töltéshordozó-koncentrációja nagyjából egy nagyságrenddel növelhető. A NexFET-eszközök R_{DSon} ellenállását kedvezően befolyásolja a MOS-csatorna és az enyhén szennyezett LDD-zóna rövidege. Ráadásul a korszerű, finom vonalkialakítást is megengedő litográfiával elérhető kis cellaméret olyan alacsony fajlagos R_{DSon} értéket eredményez, amely versenyképesé teszi a TrenchFET-technológiával is, viszont a NexFET alacsony kapuelektroda-töltése és nagyon kicsiny C_{GD} kapacitása elérhetetlen a TrenchFET-eszközökkel.

A NexFET tulajdonságai

A NexFET kiváló értékszáma (Figure Of Merit – FOM) rendkívül fontos a kapcsolóüzemű tápegység-alkalmazásokban. Ez

a klasszikus módszer annak eldöntésére, mennyire felel meg egy teljesítmény-MOSFET-technológia a kapcsolóüzemű alkalmazásokra. Lényege: a bekapcsolási ellenállást meg kell szorozni a teljes kapuelektroda-töltéssel vagy a Miller-kapacitással. A 3. ábrán szemléltetjük a FOM értékének javulását az elmúlt években, és megmutatjuk a NexFET-technológia bevezetésével járó áttörésszerű fejlődést is. Jól látható, hogy a TrenchFET-technológia minőségi jellemzői két évtizednyi fejlődés után telítődésszerű jelenséget mutatnak; a fejlődés lelassult, és a TrenchFET-eszközök FOM-értékének további lényeges javulása nem várható. A NexFET-szerkezet azonban – a termék érettségének korai szakaszában lévén – jelentős fejlődést ígér az előrelátható jövőben.

3. ábra A NexFET- és a TrenchFET-technológia FOM-értékének összehasonlítása



4. ábra Egy NexFET-alapú, hatfázisú DC/DC-átalakító hatásfokának alakulása

A NexFET-eszközök fejlettségének mai szintjén már megvalósítható az a 12 V-os, 635 kHz-es kapcsolási frekvenciájú, hatfázisú, feszültségcsökkentő típusú, kapcsolóüzemű tápegység, amelynek hatásfokdiagramját a 4. ábra mutatja. Általánosságban elmondható, hogy ha semmi mást nem teszünk, mint egy régebbi, kész áramkör teljesítménykapcsolóit ezekkel az új eszközökkel helyettesítjük, egy DC/DC-átalakító kapcsolási frekvenciáját akár meg is kétszerezhetjük anélkül, hogy ezért a konverziós hatásfok jelentős csökkenésével kellene fizetnünk. Természetesen a kapumeghajtó áramkörnek az új eszközhöz történő optimalizálásával további minőségjavulás is elérhető.

Következtetések

A NexFET-technológia a szilíciumalapú teljesítmény-MOSFET-ek olyan új generációja, amely működési elvéből következően különösen kis töltésmennyiségeket tárol.

Ezzel megnövelhető a létező kapcsolóüzemű feszültségátalakítók hatásfoka, de azok következő generációjában lehetővé teszi majd akár a több MHz-es kapcsolási frekvenciájú működést is.

A NexFET-technológiáról bővebb információk a www.ti.com/mosfet-ca webhelyen található.

A NexFET a Texas Instruments által megvásárolt CICLON Semiconductor Device Corporation védjegye. A cikkben említett többi védjegyeket a megfelelő tulajdonosok birtokolják.

A szerzők

A félvezetőiparban több mint 30 éves tapasztalatot szerzett Dr. Jacek Korec a Ciclon Semiconductor cégtől érkezett a Texas Instruments teljesítményelektronikai üzletághoz, amelynek jelenleg vezető szakértője. A Ciclon előtt a Silicon Semiconductor fejlesztési alelnöke volt, és dolgozott a Vishay-Siliconix vezető tervezőjeként és az eszközfejlesztési részleg igazgatójaként is. E pozíciójában Jacek az új diszkrét MOSFET-ek fejlesztésének és megvalósításának tevékeny résztvevője volt. Pályája elején 10 évet töltött a Daimler Benz németországi kutatóközpontjában a teljesítményelektronikai félvezető eszközök fejlesztésének vezetőjeként. Több mint 60 tudományos publikáció szerzője vagy társszerzője, és több mint 35 szabadalom tulajdonosa.

Christopher (Chris) Bull jelenleg a Texas Instruments teljesítményelektronikai részlegének marketingvezetője. Ezt megelőzően a Ciclon Semiconductor marketingigazgatójaként dolgozott. A tápellátó rendszerek és félvezetők témakörében szerzett 15 éves tapasztalatát vezető értékesítési, marketing és vevőspecifikus fejlesztési munkakörökben szerezte. Chris a nagy-britanniai Bath egyetemén szerzett BSc fokozatot fizikából és elektronfizikából.

A szerzőket a nexfet@list.ti.com e-mail címen érhetik el az érdeklődők.