Transistorji SIPMOS: Pregled delovanja in uporabe

Leon Kos
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo
4. letnik Avtomatike - Robotika

16. september 1995

Abstract

On SIPMOS transistors: A Survey
Tracking down the roots of SIPMOS transistors is easy. Siemens-Power-Metal-Oxide-Semiconductors were first FET transistors with high switching power[1]. Their characteristics are discussed, together wit their quality, reliability and precautions necessary for succesfull circuit design. Other devices on SIPMOS technology such as IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*), small signal transistors[2, 3], depletion transistors and smart SIPMOS (PROFET) are also discussed[4]. Finaly a selection of applications is given to emphasize presented technology.

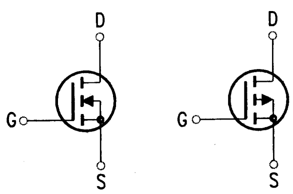
Povzetek

Transistorji SIPMOS (*Siemens-Power-Metal-Oxide-Semiconductor*) so bili prvi transistorji FET z večjimi stikalnimi močmi[1]. Močnostni transistorji SIPMOS omogočajo množico novih rešitev z lastnostmi kot so temperaturna neobčutljivost, visoka stikalna hitrost, majhna energija za krmiljenje in robustnost. Na tehnologiji SIPMOS so se razvili tudi polprevodniki, kot so transistorji IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), signalni transistorji malih moči, PROFET (*Smart SIPMOS*)[2, 3], m-FET-i in AC stikala SITAC[4].

Poznavanje naštetih komponent je pogoj za za uspešno konstruiranje vezij. V prispevku so prikazane lastnosti, principi delovanja, osnovni podatki in nekatere aplikacije, ki kažejo prednost uporabe predstavljene tehnologije.

1 Splošne lastnosti

Transistorji SIPMOS s samozaporni transistorji na poljski efekt[1] s priključki: vrata - G (*Gate*), izvor - S (*Source*) in ponor - D (*Drain*). Simbola N-kanalnega in P-kanalnega transistorja sta prikazana na sliki 1. Upornost



Slika 1: Simbola transistorja SIPMOS

med izvorom in ponorom se nadzira z napetostjo med vrati in izvorom. N-kanalni transistorji se kontrolirajo s pozitivno napetostjo U_{GS}, P-kanalni pa se krmilijo z negativno napetostjo.

Število N-kanalnih transistorjev je zaradi boljše prevodnosti kanala večje od P-kanalnih transistorjev. Vklopna upornost P-kanalnih transistorjev $R_{DS(on)}$ je tudi več kot dvakrat večja pri isti reverzni napetosti. Transistorji SIPMOS imajo naslednje pomembne lastnosti[5]:

- napetostno krmiljenje
- visoke preklopne moči
- enostavna paralelna vezava za večje moči
- kratki stikalni časi
- nimajo zahtev po izpraznitvi nosilcev, kot je to primer pri bipolarnih transistorjih (*storrage time*)
- zaščita pri preobremenitvi
- linearna karakteristika
- dobra odpornost na prebojno napetost

Naštete lastnosti transistorjev SIPMOS so primerne za široko množico uporab kot so:

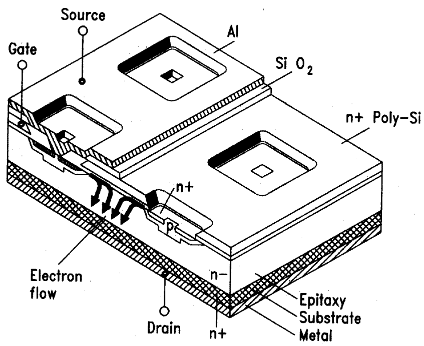
- stikalni napajalniki (SMPS)
- DC pretvorniki
- inverterji
- frekvenčni pretvorniki za trifazne motorje
- brezprekinitveni napajalniki (UPS)
- zvočni ojačevalniki (AF)
- napajalniki za varjenje
- monitorji brez utripanja

2 Tehnologija

Transistoji SIPMOS imajo vertikalno strukturo z dvojno implantacijo kanala. Tako govorimo tudi o DIMOS procesu.

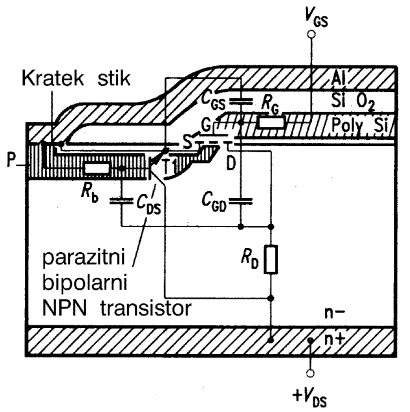
V primeru N-kanalnega transistorja služi substrat n^+ kot nosilec pod katerim se nahaja ponor. Na substrat je nanešena epitaksialna plast spremenljive debeline. Potrebna debelina epitaksialne plasti je odvisna od zaporne napetosti. Vrata (gate) iz polisilicija n^+ vgrajena v izolacijski silicijev dioksid, ki deluje kot implantacijska maska za zaporno plast p (p-tub) in izvor n^+ (source).

Izvor prekriva celotno področje in povezuje posamezne celice transistorja na rezini v paralelno strukturo. V močnostnih transistorjih SIPMOS je na rezini paralelno povezano do 6000 osnovnih celic.

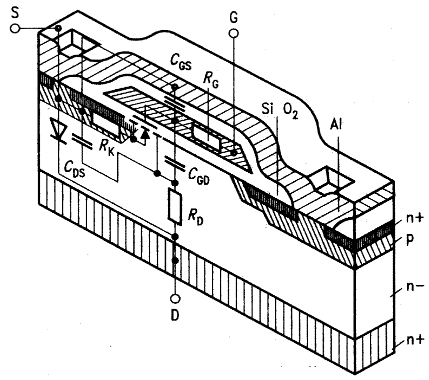


Slika 2: Zgradba N-kanalnega SIPMOS transistorja

Na sliki 2 je prikazana zgradba N-kanalnega SIPMOS transistorja s plastmi in nekaj osnovnimi celicami. Metalizacija izvora kratko sklene spoj baza–emitor parazitnega transistorja n^+pn^-, kar je nujno potrebno, da se prepreči vklop tega transistorja pri prehodnih pojavih, kit so hitri dvižni časi ($> 2 \times 10^4 V/\mu$). Prehodni pojavi so pogosti tudi pri hitrih komutacijskih ciklih na inverzni diodi, ki jo predstavlja bazno–kolektorski spoj pn^-.



Slika 3: Prerez N-kanalnega transistorja z označenim parazitnim bipolarnim transistorjem



Slika 4: Prerez N-kanalnega SIPMOS transistorja s prikazanimi prevodnostmi v nadomestni vezavi

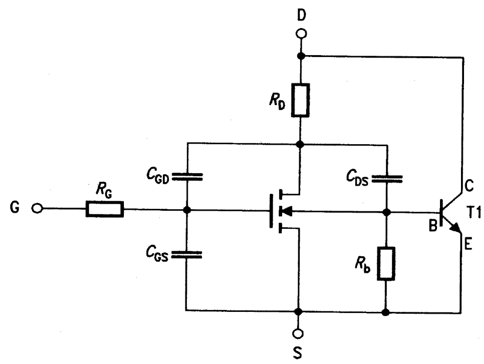
Na sliki 3 je prikazan prerez in nadomestna vezava SIPMOS transistorja. Vertikalna izgrandja transistorja omogoča optimalno izrabo površine rezine in dobro odvajanje transistorja. Dvojna implantacija zatradi kratkih dolžin kanala omogoča enakomerno porazdelitev toka med posamezne celice. Silicijeva rezina je pritrjena na ohišje s postopkom mehkega spajkanja, medtem ko so priključni kontakti pritrjeni z ultrazvokom. Priključni material je aluminij in je enak metalizaciji transistorja. Debelina priključkov je določena z maksimalnim dopustnim tokom skozi transistor.

3 Nadomestna vezava

Med ponorom in izvorom obstaja več upornosti in prevodnosti. Prevodnosti imajo pri zaprtem transistorju kapacitiven značaj. Kapacitete so:

- drain–source kapacitivnost C_{DS}
- gate–drain kapacitivnost C_{GD} (tudi imenovana Millerjeva kapacitivnost C_{Mi})
- gate–source kapacitivnost C_{GS}

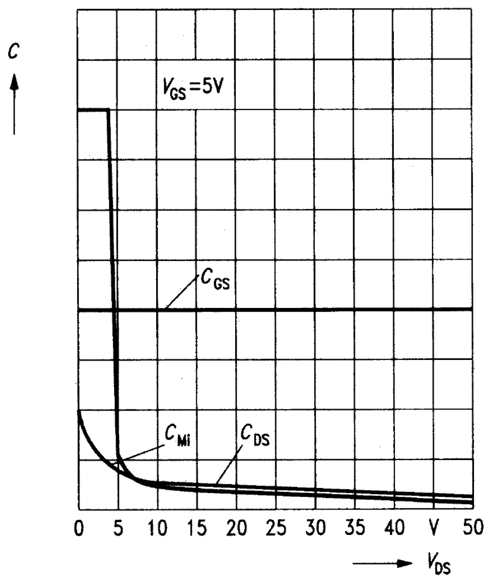
Upornost plasti vrat R_g je močno odvisna od geometrije in je velikostnega razreda 1Ω. Slika 4 prikazuje prerez tipičnega N-kanalnega transistorja za katerega lahko nastavimo ekvivalentno nadomestno vezavo, ki je prikazana na sliki 5.



Slika 5: Nadomestna vezava N-kanalnega SIPMOS transistorja s parazitnim bipolarnim transistorjem

Upornos med izvorom in ponorom pri popolnoma odprtih vratih je označena kot $R_{DS(on)}$ in je sestavljena iz upornosti n^- epitaksialne plasti R_D in upornosti kanala R_K.

Pri nizkonapetostnih transisstorjih ($V_{DS} < 100V$) dominira upornost kanala R_K, medtem ko je pri visokonapetostnih transistorjih dominantna upornost epitaksialne plasti R_D. Prikazana nadomestna vezavaj je le približek, sej moramo vedno imeti v mislih paralelno vezavo nekaj tisoč oznovnih celic, ki so prostorko pporazdeljene in odvisne od U_{DS}. Millerjeva kapacitivnost je najbolj napetostno odvisna. Slika 6 prikazuje odvisnost parazitnih kapacitivnosti od napetosti V_{DS}. Prikazane kapacitivnosti so



Slika 6: Odvisnost parazitnih kapacitivnosti v odvisnosti od napetosti V_{DS}

medsebojno povezane zato se v praksi uporabljajo skupne kapacitivnosti, za katere veljajo naslednje relacije:

Vhodna kapacitivnost

$$C_{iss} \sim C_{GS} + C_{GD}$$

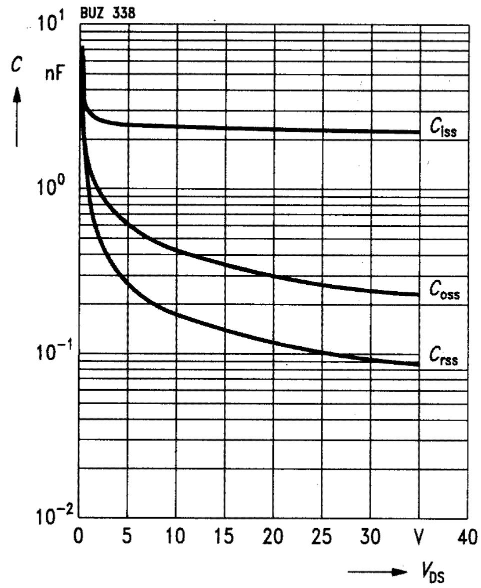
Milerjeva kapacitivnost

$$C_{rss} \sim C_{GD} \quad (C_{GD} = C_{Mi})$$

Izhodna kapacitivnost

$$C_{oss} \sim C_{DS} + C_{Mi}$$

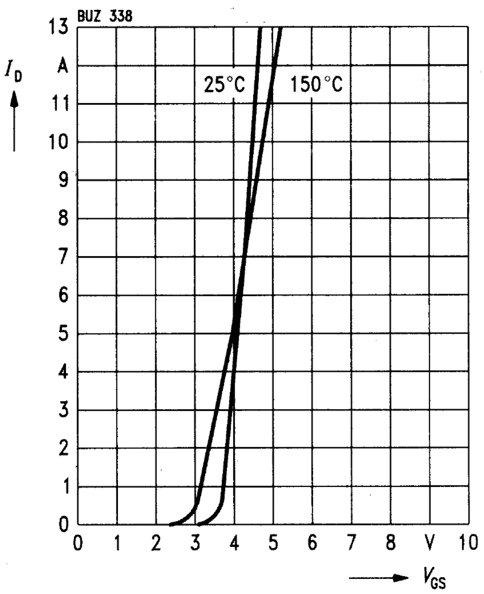
Skupne kapacitivnosti so prikazane na sliki 7. Odvisnost kapacitivnosti je vedno podana za delovno točko. Pri podajanju karakteristike se izključno podajajo skupne kapacitivnosti. V nadomestni vezavi se namesto parazitnega bipolarnega transistorja raje uporablja reverzna dioda.



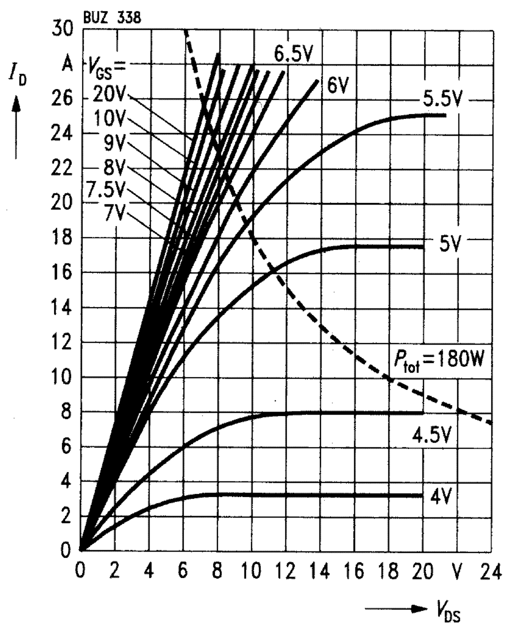
Slika 7: Odvisnost skupnih kapacitivnosti od napetosti V_{DS}

4 Opis delovanja

Pri pozitivno priključeni napetosti med ponorom in izvorom V_{DS} N-kanalnega transistorja s kotrolno napetostjo $V_{GS} = 0V$, teče skozi transistor le zaponi tok, ki je odvisen od temperature in priključene napetosti. Pri sobni temperaturi je ta tok zanemarljiv in je velikostnega razreda nekaj nA.



Slika 8: Prenosna karakteristika transistorja BUZ 338 pri pulznem testu $80\mu s$, $V_{DS} = 25V$, $T_j = 25°C$ in $150°$



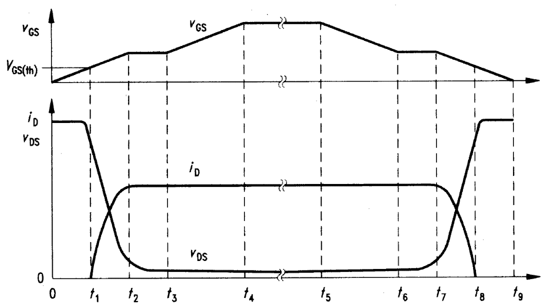
Slika 9: Tipična izhodna karakteristika (BUZ 338 pri $80\mu s$ pulznem testu in $T_C = 25°C$)

Z dvigovanjem kontrolne napetosti V_{GS} se približujemo preklopni napetosti $V_{GS(th)}$ pri kateri prične transistor prevajati s karakteristiko kot jo kaže slika 8. Videti je, da pri prekoračenju prožilne vhodne napetosti $V_{GS(th)}$ tik skokovito naraste, kar kaže primernost transistora za stikalne aplikacije, saj je pri maksimalni vhodni napetost V_{GS}, upornost kanala nekaj deset $m\Omega$.

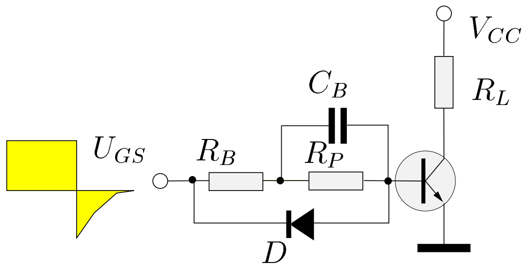
Slika 9 prikazuje izhodno karakteristiko tipičnega transistorja v pozitivnem območju. Ker pa se transistor v stanju ON obnaša kot upor, je možno delovanje tudi negativno področje z omejitvijo, ki jo postavlja reverzna dioda. Tako je to področje omejeno do največ $V_{DS} > -1V$.

4.1 Stikalno delovanje

Transistorji SIPMOS so kontrolirani z napetostjo V_{GS} in za stcionarno delovanje ne potrebujejo nobene moči na vhodu. Sprememba stacionarnega stanja pa zahteva polnilno/praznilne tokove vhodnih kapacitivnosti. V visokofrekvenčnem področju delovanja ti tokovi niso zanemarljivi. Tako je stikalni čas transistorjev SIPMOS odvisen predvsem od vhodne in Milerjeve kapacitivnosti ter parazitne vhodne upornosti. Slika 10 prikazuje stikalno delovanje transistorja. Pomembno vlogo pri preklopnih časih igra predvsem Milerjeva kapacitivnost, ki se spreminja skupaj s spreminjanjem napetosti V_{DS} (slika 6). Prehodni pojavi s praznenjem in polnjenjem parazitnih kapacitivnosi so tudi najbolj kritični dejavniki za pravilno delovanje transistorja. Takrat tečejo veliki tokovi pri velikih upornostih, kar sprošča veliko toplotne energije v kanalu. Toda tudi pri prehodnih pojavih mora transistor delovati v področju varnega obratovanja.



Slika 10: Stikalno delovanje pri upornostnem bremenu



Slika 11: Stikalno krmiljenje bipolarnega tranzistorja

5 Področje varnega obratovanja (SOA)

Transistorji SIPMOS so zaradi svojih tehnoloških lastnosti zelo robusti elektronski elementi. Podatki, ki jih proizvajalci navajajo so običajno mejne vrednosti za delovanje elementa v nekem okolju in se jih ne sme prekoračiti niti v najslabšem možnem primeru. Primerjamo lahko določanje področja varnega med bipolarnim in SIPMOS transistorjem.

Eden od pomembnih stikalnih parametrov pri bipolarnem transistorju je saturacijska napetost med kolektorjem in emitorjem $U_{CE(sat)}$, ki je podan za vsiljen bazni tok $I_{B(sat)}$ in napetost U_{CE}. Pri tem je podan tudi makzimalni ali trenutni (*peak*) tok in je določen z maksimalno temperaturo spoja. Za zmanjšanje $U_{CE(sat)}$ bipolarnih se največkrat pretirava z večanjem baznega toka, kar pa hkrati povečuje spominski čas t_s bipolarnega transistorja[6]. Primer krmiljenja baze hitrega bipolarnega transistoja kaže slika 11. Za hitrejše praznenje baze se pri bipolarnih transistorjih uporablja tudi negativna U_{BE}, ki pa je lahko pri napačni izvedbi praznenja destruktivna za transistor.

Pri SIPMOS transistorjih, zaradi drugačnega principa delovanja, izhodni tok ni omejen z vhodnim, zato računamo maksimalni dopustni tok glede na maksimalno dopustno temperaturo spoja[7, 8]. Ta pa je višja, večje ko je hladilno telo. Trenutno moč izračunamo z enačbo

$$P_D = I_D^2 R_{DS(on)} \tag{1}$$

Disipacija moči na hladilnem telesu je:

$$P_D = \frac{T_{j,max} - T_C}{R_{th(j-c)}} \tag{2}$$

kjer je $T_{j,max}$ najvišja dovoljena temperatura spoja, T_C temperatura ohišja in $R_{th(j-c)}$ toplotna upornost za spoj–ohišje.

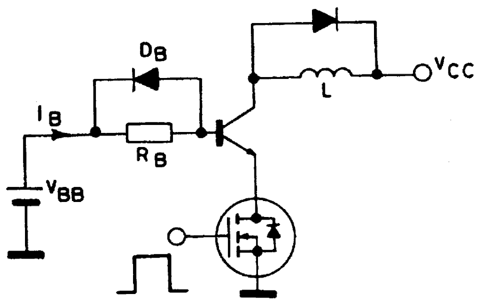
Iz enačb (1) in (2) lahko zapišemo enačbo za maksimalni tok ponora

$$I_{D,max} < \sqrt{\frac{T_{j,max} - T_C}{R_{th(j-c)} R_{DS}}} \tag{3}$$

Enačba (3) mora biti zagotovljena vedno, kar v stacionarnih stanjih niti ni tako težko doseči. Večji problem pri zagotavljanju temperature spoja T_j so preklopni časi pri induktivnih bremenih, kjer si pomagamo z vezji, ki pri preklopih prevzemajo energijo prehodnih pojavov (*snubber network*)[6].

6 Aplikacije s transistorji SIPMOS

Pri visokonapetostnih aplikacijah je težko dobiti cenene močnostne transistorje, ki bi bili hitri in imeli visoko napetostno prebojnost. Pri takih zahtevah se lahko uporabijo prednosti posamezne tehnologije bipolarnih in MOS transistorjev z vezavo emiterskega stikala (*emitter switching*)[9]. Z združitvijo dveh transistorjev dobimo hitri močnostni element z vezavo, ki jo prikazuje slika 12.



Slika 12: Osnovno emitersko stikalo

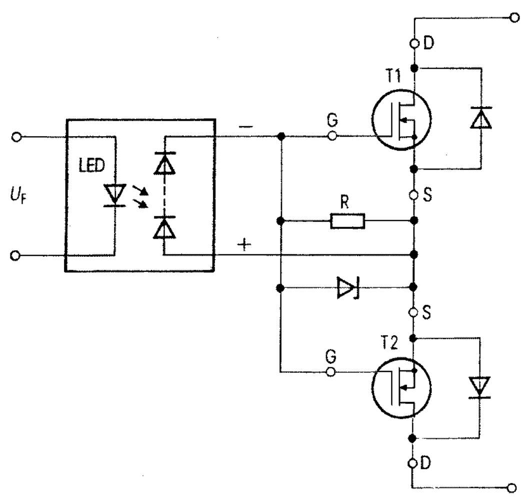
V vezju je uporabljen nizkonapetostni MOS transistor. Bipolarni visokonapetostni transistor je standardne hitrosti. Pomembna lastnost vezja je hitro polnjenje baze in še hitrejše praznjenje baze brez možnosti prevelike negativne bazne napetosti. Taka vezava optimalno krmili bipolarni stikalni transistor.

Transistorje SIPMOS je možno uporabiti v različne namene z izrabo dobrih stikalnih lastnosti. Problem lahko predstavlja le relativno visoka stikalna napetost $V_{GS} \geq 10V$, ki jo je potrebno zagotoviti za dobro delovanje. Pri hitrih stikalnih vezjih morajo krmilniki napetosti V_{GS} imeti čim nižjo izhodno upornost za premagovanje vhodnih parazitnih kapacitivnosti transistorja. Moč krmilnikov pa ne predstavlja velikih omejitev, saj se energija porablja le za prehodne pojave.

Zaradi boljše prevodnosti se v večini uporabljajo N-kanalni transistorji, katerim je v mostičnih vezjih včasih težko zagotoviti pozitivno napetost U_{GS}. Pomagamo si s črpalko naboja oz. podvojevalnikom napetosti, ki s pomočjo kondenzatorjev črpa naboj na željen nivo.

7 Ostali elementi s tehnologijo SIPMOS

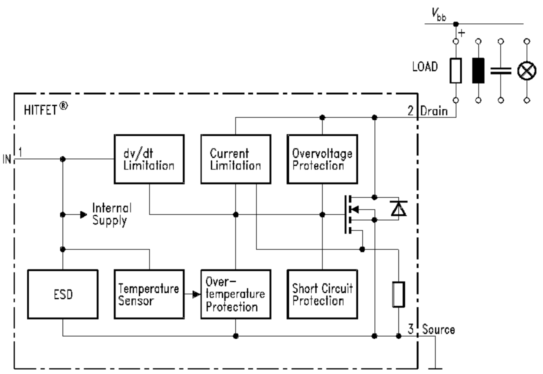
Poleg močnostnih transistorjev SIPMOS se v novejšem času tudi transistorji IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)[10]. Za nekatere visokonapetostne aplikacije visokonapetostni MOSFET transistorji ne morejo biti uporabljeni ker imajo visoko upornost pri vklopu $R_{DS(on)}$. IGBT je rešitev nadaljnjega razvoja tehnologije SIPMOS, ki kombinira prednosti bipolarnih in MOSFET transistorjev. IGBT ima lastnosti, kot je visoka stikalna hitrost, majhna krmilna moč in visoka robustnost elementa. Vklopna upornost $R_{DS(on)}$ je veliko nižja od vklopne upornosti bipolarnih transistorjev v vezavi Darlington. Strukturi transistorjev SIPMOS in IGBT sta si podobni, le da ima IGBT PN^- spoj na dnu substrata, kar zmanjšuje vklopno upornost. Pri stikalnih hitrostih do $30kHz$ in napetostih med $600V$ in $1000V$ je IGBT v vseh pogledih boljša re[itev kot ustrezen SIPMOS transistor. Pri večjih frekvencah pa je transistor SIPMOS boljši izbor. IGBT tudi nima reverzne diode, ki jo dobimo v SIPMOS "free of charge".



Slika 13: Dvosmerno stikalo

Za razliko od navadnih transistorjev, transistorji SIPMOS z vgrajenim kanalom prevajajo brez priključene vhodne napetosti. Takšna lastnost lahko poenostavi konstrukcijo vezij[11, 12]. Slika 13 kaže uporabnost transistorjev z vgrajenim kanalom v dvosmernem stikalu, ki je optično izoliran. Neodvisno od polaritete priključne napetosti sta oba transistorja krmiljena z istim signalom.

Inženirji so vedno iskali močnostne elemente, ki bi se sami zaščitili proti uničenju v primeru napak. Tako s v novejšem času pojavljajo pametni transistorji (*Smart SIPMOS*), ki imajo vgrajene senzorje proti uničenju s kratkim stikom, prevelikim napetostim in pregrevanju[3]. Visoka zanesljivost je tako zagotovljena v sistemih, kjer je varnost prva zahteva[3]. Taki elementi imajo lahko tudi prirejene nivoje vhodnih napetosti, ki so primerne za neposredno krmiljenje z mikroprocesorji, brez velikih vhodnih kapacitivnosti. V močnostnih ohišjih je lahko združeno tudi več transistorjev [2, 13, 14, 15].



Slika 14: Pametni močnostni element BTS 117

Slika 14 prikazuje najbolj osnoven močnostni transistor na tehnologiji SIPMOS. Vgrajen je v klasično ohišje TO220, obstaja pa tudi v izvedbi SMD. Vhod elementa je prirejen 5V CMOS (TTL) logiki z minimalno obremenitvijo krmilnega izhoda. Izhodna karakteristika je podobna SIPMOS transistorju s $V_{DS} = 60V$, $I_{F(lim)} = 7A$, $R_{DS(on)} = 100m\Omega$ in $E_{AS} = 350mJ$.

Element je zaščiten proti plazivitim tokovom, pregrevanju, preobremenitvi, kratkemu stiku, previsoki napetosti in toku. Te lastnosti ga uvrščajo v aplikacije, kjer ga lahko zamenjamo z elektromehanskimi releji in ostalimi diskretnimi diskretnimi elementi. Uporaben je za vse vrste uporovnih, induktivnih in kapacitivnih bremen v stikalnih in linearnih aplikacijah.

8 Zaključek

Brez poznavanja lastnosti močnostnih MOS transistojev si ni mogoče zamišljati uspešneka konstruiranja novih stikalnih modulov. V pregledu so bile prikazane lastnosti in bistvene prednosti transistorjev SIPMOS, ki prekašajo bipolarne trasistorje v vseh stikalnih aplikacijah, zaradi svoje cenenosti in enostavnosti uporabe. Prikazano je nekaj zanimivih aplikacij v katerih so bile odpravljene slabosti posameznih elementov vezja.

Močnostne transistorje MOSFET danes izdeluje večina proizvajalcev. Najdemo jih v prav vseh elektronskih napravah. Z uvajanjem pametnih močnostnih elementov se bo konstrukcija novih vezij še bolj poenostavila, saj se taki elementi sami ščitijo proti vsem nepredvidenim dogodkom, ki jih največkrat konstrukterji zaradi varčevanja zavestno izključujejo. S pametnimi transistorji pa to ni več potrebno.

Z razvojem litografske tehnologije se izboljšujejo tudi lastnosti novih elementov. Če je bila včasih frekvenčna meja primernosti uporabe IGBT-jev $30kHz$, se je danes ta meja gotovo zvečala za $10kHz$ in več. Spremljanje razvoja novih elektronskih komponent je tako pogoj za uspešen razvoj.

Literatura

[1] Siemens, *SIPMOS Components*, 1987/88.

[2] SGS, "Smart two channel highside power switch BTS611L1." PROFET Preliminary data on http://www.siemens.de/, 2 1995.

[3] P. Brauschke and P. Sommer, "Smart SIPMOS: Inteligent power semiconductors," *Siemens Components*, vol. 22, no. 5, pp. 182–184, 1987.

[4] Siemens, *SIPMOS – Halbleiter*, Datenbuch 1993/94. Leistungstransistoren und Dioden.

[5] E. Kaifler, F. Mollmer, and J. Tihanyi, "Basic circuits using SIPMOS FET drivers," *Siemens Components*, vol. 24, no. 1, pp. 18–23, 1989.

[6] K. Rischmuller, "Bipolar transistors and darlingtons – design function drive and protection," in *Power Transistors application manual* [17], pp. 105–126.

[7] SGS-Thomson Microelectronics, *Power MOS devices databook*, 3 ed., 7 1993.

[8] SGS-Thomson Microelectronics, *Industrial and Computer Peripherial ICs databook*, 2 ed., 2 1992.

[9] M. Sutera, "High voltage transistors with power MOS emitter switching," in *Power Transistors application manual* [17], pp. 57–62.

[10] H. Hauenstein and J. Tihanyi, "IGBT - a new high-voltage component in SIPMOS technology," *Siemens Components*, vol. 24, no. 4, pp. 151–153, 1989.

[11] E. Kaifler, "SIPMOS depletion transistors conduct without gate signals," *Siemens Components*, vol. 22, no. 3, pp. 104–107, 1987.

[12] E. Kaifler and J. Tihanyi, "Improved circuit design using new SIPMOS small-signal transistors," *Siemens Components*, vol. 23, no. 5, pp. 195–198, 1988.

[13] SGS, "Smart lowside power switch BTS117." PROFET Preliminary data on http://www.siemens.de/, 2 1995.

[14] SGS, "Smart lowside power switch BTS917." PROFET Preliminary data on http://www.siemens.de/, 2 1995.

[15] SGS, "Smart highside power switch BTS442E2." PROFET Preliminary data on http://www.siemens.de/, 2 1995.

[16] H. Hertrich and K. Reinmuth, "m-FETs: rugged SIPMOS transistors with 50% lower drain-source on resistance," *Siemens Components*, vol. 19, pp. 18–21, 4 1994.

[17] SGS, *Power Transistors application manual*, 1 ed., 1989.

[18] SGS-Thomson Microelectronics, *Power applications*, 2 ed., 2 1991.