

Många möjligheter med

Det finns ett stort överlapp i intervallet 10 kW till 50 kW mellan diskreta MOSFET-transistorer i kiselkarbid och moduler. Moduler är enkla att använda men diskreta komponenter finns i fler varianter vilket ger större frihet i designen. Om det inte räcker med en går det dessutom att parallellkoppla två stycken.

Effekten är inte det enda skälet, energin som behöver switchas kan bli lägre och värmeavledningen bättre. Tillsammans med temperaturns påverkan på ledningsbundna förluster är parallellkoppling ett bra verktyg för att sänka förlusterna, förbättra kylningen och öka effekten.

Inte alla komponenter passar för att parallellkopplas, särskilt som spridningen i olika parametrar kan påverka resultatet.

I diskreta komponenter finns det endast ett chip per kapsel, till exempel en MOSFET eller en diod. Kapslarna kan vara av olika typer och vara hålmonterade eller ytmonterade. Det finns inga begränsningar i konstruktionen när det gäller topologi eller att använda olika kapslar i samma design.

Effektmoduler är raka motsatsen: komponenterna inuti är arrangerade i en specifik topologi, till exempel en helbrygga. När modulen väl är tillverkad finns det ingen möjlighet att ändra vare sig topologin eller enheternas parametrar. Därför läggs det, till skillnad från vid prototyper med diskreta komponenter, mycket större vikt vid simuleringar när man arbetar med moduler.

DE TVÅ HUVUDSAKLIGA FÖRDELARNA med effektmoduler:

1. Effektiv värmeavledning: En effektmodul består av en kylande basplatta, en keramisk elektrisk isolator och plana kopparledare, på vilka kisel- eller kiselkarbidchip (som MOSFET:ar) är direkt sintrade. Denna konfiguration är optimal för kylning: bakplattan ansluts direkt till kylflänsen utan att det behövs ytterligare elektrisk isolering. Det enda som ligger mellan kylflänsen och bakplattan är ett värmeöverförande material, en kylpasta.



Av David Kudelasek, ST Microelectronics

David Kudelasek började arbeta på ST redan under sina studier för att få en fast anställning 2019 på ST:s kraftlab i Prag. Fokus ligger på kraftaggregat men också diskreta kraftkomponenter som MOSFET:ar, IGBT:er, bipolära transistorer, dioder och överspänningsskydd i både kisel och kiselkarbid.

2. Minskad kommuteringsslinga:

Den andra fördelen med moduler är att de minskar kommuteringsslingan – ett mer komplext område än kylning, men med stor effekt. Det handlar om att minska parasitparametrarna. Varje ledarbanan har sin egen resistans och induktans; ju längre ledaren är, desto sämre blir båda. Resistansen ger upphov till ledningsförluster i proportion till RMS-strömmen genom ledaren, vilket i detta effektområde inte är försumbart. Induktansen reagerar på snabba strömförändringar och orsakar överspänningar. Ju snabbare transienten är, desto högre blir spänningsspiken – vilket kan bli skadligt för komponenten.

DISKRETA KOMPONENTER kan aldrig mäta sig med moduler i dessa avseenden:

- **Kylning:** Kylplattan i diskreta kapslar är vanligtvis inte elektriskt isolerad och är ofta kopplad till drain i MOSFET:en. Därför måste det termiska gränsskiktetsmaterial inte bara ge god värmeöverföring, utan även garantera elektrisk isolation.
- **Ledningslängd:** Avståndet mellan chippen i två diskreta lösningar är längre. Strömmen går via bondtrådar till kapselns anslutningar, vidare till kretskortet och sedan till nästa komponent vilket ökar både resistans och induktans jämfört med en integrerad modul.

I MODULER ÄR PARALLELLKOPPLING av komponenter enkelt: två chip sintras bredvid varandra, och återstående noder kopplas samman med korta bondtrådar. Den ter-

miska kopplingen mellan chippen är utmärkt.

I diskreta komponenter är den termiska kopplingen inte lika bra. Värmen leds från chipet till kapseln, vidare genom det termiska gränsskiktetsmaterial till kylflänsen, och därefter tillbaka till den andra MOSFET:en. Varje material och varje övergång mellan dem introducerar termiskt motstånd, vilket orsakar ett temperaturfall i värmeflödet.

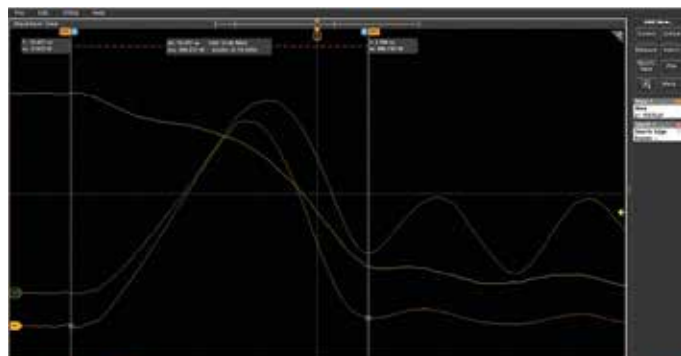
Låt oss inte avfärda parallellkoppling av diskreta MOSFET:ar riktigt än. Som redan nämnts finns det flera fördelar: betydligt större designfrihet, möjlighet till alternativa leverantörer (second sourcing) samt enklare prototyparbete. Ytterligare fördelar ligger i de grundläggande principerna för parallellkoppling.

Den termiska resistansen är proportionell mot kapselns kylande yta. Om kapseln är densamma och vi fördelar förlusterna mellan två identiska enheter, får vi dubbelt så stort sammanlagt kylområde – eller hälften så stor effektförlust per kapsel. Det innebär att den termiska resistansen mellan övergång och kylfläns halveras, vilket i sin tur gör att MOSFET:arnas faktiska temperatur ligger närmare kylflänsens temperatur.

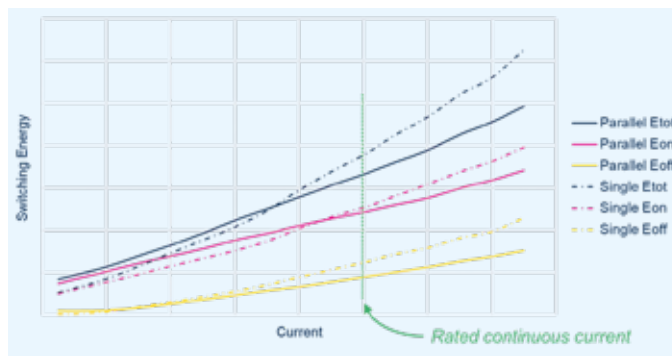
I MOSFET:ar kommer förlusterna huvudsakligen från två delar: ledningsförluster och switchförluster.

Ledningsförlusterna uppstår när ström flyter genom kanalen. Det inre motståndet, on-resistansen ($R_{DS(on)}$) orsakar ett spänningsfall. Multipliserat med strömmen ger det en effektförlust.

Vid parallellkoppling av N stycken iden-



Figur 1. Exempel vid tillslag. Kanal 1: Spänning mellan drain och source. Kanal 4: Ström från drain, beräknad avgiven effekt.



Figur 2. Exempel på den energi som switchas, en ensam MOSFET och två parallellkopplade.

diskreta MOSFET:ar i SiC

tiska MOSFET:ar minskar den totala on-resistansen med en faktor N, vilket innebär att ledningsförlusterna också minskar – förutsatt att strömmen fördelas jämnt mellan enheterna.

Switchförluster uppstår när spänning och ström överlappar under på- och frånslag. Trots att detta förlopp är mycket snabbt kan den momentana effekten bli hög, eftersom både spänningen och strömmen är stora vid övergången.

Genom att integrera effekten över tid (arean under kurvan) får man energiförlusten per switchhändelse: turn-on- och turn-off-energi under givna förhållanden.

Genom att multiplicera dessa energier med switchfrekvensen – eller summera alla switchhändelser under en sekund om förhållandena varierar – får man den totala switchförlusten.

De givna förhållandena är viktiga att notera, eftersom dessa energier är starkt beroende av flera faktorer: transientens varaktighet liksom spänning, ström och temperatur.

När det gäller parallellkoppling finns det dessutom en dold fördel i hur dessa energier förhåller sig till strömmen.

Energikurvan är inte linjär, utan lätt exponentiell. Det innebär att dubbelt så hög ström ger mer än dubbelt så hög energi.

Vid parallellkoppling gäller det omvända: om strömmen delas mellan två identiska enheter blir den totala switchenergin lägre än om all ström skulle ha passerat genom en enda enhet.

OM VI JÄMFÖR en MOSFET i en effekmodul med två diskreta och parallellkopplade MOSFET:ar hamnar modulen i underläge:

● **Kylväg:** Även om vägen där värmen leds bort är svår att jämföra direkt på grund av modulens annorlunda konstruktion, kan den större totala ytan hos diskreta komponenter kompensera för nackdelarna – och i vissa fall till och med överträffa modulen.

● **Lednings- och switchförluster:** Halften så stora ledningsförluster och minskad switchenergi är tydliga fördelar för parallellkopplade diskreta MOSFET:ar.

DETTA FÖRKLARAR varför parallellkopplade diskreta komponenter och moduler ofta överlappar i det nämnda effektområdet.

Genom att använda flera likadana komponenter ökar den totala effekthanteringen, och genom att välja MOSFET:ar med högre $R_{DS(on)}$ – som är billigare – i parallellkopplingen, kan man ändå uppnå prestanda som konkurrerar med en modul vid samma effekt.

MOSFET:ens $R_{DS(on)}$ är mer än bara ett statiskt värde – den påverkas av strömmen och, i ännu högre grad, av temperaturen. Inom det aktuella effektområdet har trenden på senare tid nästan uteslutande gått mot

att använda MOSFET:ar av kiselkarbid eftersom de har en mindre variation i $R_{DS(on)}$ med temperaturen jämfört med kiselbaserade varianter.

Ett exempel på detta finns i Figur 3 med SCT011HU75G3AG, som är tredje generationens SiC-MOSFET i kapseln HU3PAK från ST, med kylning på ovansidan. Eftersom den har ett mycket lågt $R_{DS(on)}$ är den ett utmärkt val för parallellkoppling.

Dock ökar $R_{DS(on)}$ med cirka 50 procent från 25°C till det maximala 175°C. Jämfört med vanliga kisel-MOSFET:ar är detta en avsevärt lägre ökning.

Kiselbaserade MOSFET:ar kan uppvisa en ökning på omkring 200 procent, och det vid 150°C – inte 175°C – eftersom 150°C ofta är absolut maxgräns för dessa komponenter.

Att ha en flack kurva för $R_{DS(on)}$ är idealiskt eftersom ledningsförlusterna då förblir stabilare över temperatur.

Men när förlusterna ökar finns en risk för termisk rusning: mer förlust genererar mer värme, vilket i sin tur höjer temperaturen ytterligare. Denna positiva återkoppling var ett välkänt problem hos MOSFET:ar i kisel, men med kiselkarbid är det vanligtvis försumbart – såvida inte MOSFET:arna är parallellkopplade.

Varför är skillnaden så stor? Svaret ligger i spridningen av parametrar, i det här fallet $R_{DS(on)}$. Enligt databladet för SCT011HU75G3AG är det nominella värdet 11,4 mΩ, men det kan vara upp till 15 mΩ.

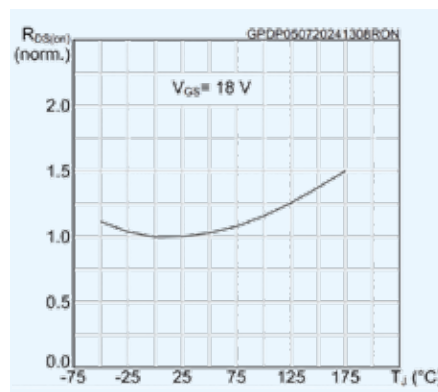
Även om det är osannolikt att så stor variation förekommer inom en och samma tillverkningsbatch, låt oss anta det som exempel. Ett värde på 15 mΩ är 32 procent högre än 11,4 mΩ, vilket innebär att en MOSFET:en med högre resistans kommer att ta emot motsvarande mindre ström vid samma spänning.

Därmed kommer MOSFET:en med 11,4 mΩ att leda mer ström och få ungefär 32 procent högre förluster vilket innebär att den värms upp mer.

Om temperaturberoendet hos $R_{DS(on)}$ vore starkare, skulle den varmare MOSFET:en få ännu högre resistans, vilket automatiskt skulle fördela om strömmen till den svalare enheten – en slags självbalansering. Men eftersom kiselkarbid har en relativt flack temperaturkurva, uteblir denna kompensations-effekt, vilket kan leda till obalans i parallellkopplade MOSFET:ar.

Hur kritiskt är detta i en verklig applikation? MOSFET:arna delar samma kylfläns, så de är termiskt kopplade, men är detta ett hot?

För att besvara frågan undersökte jag det noggrant i en simulering. Jag betraktade två MOSFET:ar, SCT011xx75 i HU3PAK-kapsling (situationen skulle vara bättre för TO247, så detta kan vara värt att överväga för mer utmanande tillämpningar), där den ena har ett motstånd på 11,4 mΩ och den andra 15 mΩ.



Figur 3. Normaliserad resistans när transistoren SCT011HU75G3AG leder plottad mot temperaturen.

Kylflänsens temperatur är 90°C, med termiskt gränssnittsmaterial, främst ett gap-filler, med vald värmeledningsförmåga på 7 W/(m·K) och en tjocklek på 0,4 mm. Med fokus på de resistiva förlusterna är den totala RMS-strömmen 140 A. Kylarean för HU3PAK är 120 mm², vilket ger ett termiskt motstånd från kapsling till kylfläns (R_{th} case-to-heat-sink) på 0,476 K/W med det valda TIM-materialet.

Simulerade resultat:

● MOSFET:en med 15 mΩ leder 63 A av de totalt 140 A, med en temperatur på kapseln på 123,7°C och en temperatur i chippet (junction temperature) på 139,9°C.

● MOSFET:en med 11,4 mΩ leder 77 A, med en temperatur på kapseln på 131,8°C och en temperatur i chippet på 151,8°C.

STRÖMSKILLNADEN är nu 22 procent jämfört med 32 procent initialt, och båda MOSFET:arna har tillräckligt marginal till den absoluta maxtemperaturen. Den avgörande faktorn är temperaturgradienten över TIM-materialet: det sker ett anmärkningsvärt temperaturfall på 33,7°C från kapsling till kylfläns för MOSFET:en med 15 mΩ, och 41,8°C för den andra.

Den verkliga begränsningen i detta fall är alltså TIM-materialet, inte obalansen mellan MOSFET:arna. Den valda värmeledningsförmågan var 7 W/(m·K), vilket är bra men inte det bästa. Lyckligtvis har den ökade efterfrågan på sådana material drivit forskningen framåt, och det finns nu elektriskt isolerande fyllnadsmaterial med över 20 W/(m·K).

Slutsats

Kraftmoduler är utmärkta för högeffektstillämpningar, men diskreta MOSFET:ar har många fördelar som gör dem användbara för samma effekter. Det som avgör valet är bra switchegenskaper och god värmeledning hos komponenten. ■