

РАЗВИТИЕ НА СИЛОВИТЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ЕЛЕМЕНТИ В СХЕМИТЕ ЗА ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА ФЛУИДИ

гл.ас.Даниела Марева; Емил Марев - Бургаски Свободен Университет

DEVELOPMENT OF POWER SEMICONDUCTORS IN THE PATTERN OF INDUCTION HEATING OF FLUIDS

Daniela Mareva , Emil Marev

Abstract - Induction heating is very effective way of heat treatment with effects alternating current on metal with a with high frequency is widely distributed in different turns of the industry. Using powerful semiconductor switches in the frequency inverters used in inverters suggest appropriate choice of power semiconductor devices in the technology of the principal scheme.

Keywords – power semiconductor device, resonant inverter.

В предходящата статия са разгледани някои видове мощни MOSFET транзистори, използвани широко в практиката и доказали своите предимства.

1. Развитие, състояние и бъдеще на СПЕ – характерни за индукционното нагряване на флуиди.

Мощни MOSFET транзистори с датчик на ток

Наличието на вграден датчик на ток в ключовите MOSFET транзистори позволява ефективно да се защитават изходните вериги на устройствата от претоварвания по ток и късо съединение. Повишава се надеждността на прибора и пада цената му, защото отпада необходимостта от използването на мощни токови шунтове. Произведени са по Trench-технология и представляват матрица от няколко стотин полеви транзистора с изолиран гейт, разположени на един кристал и каналите им са съединени паралелно, което намалява значително съпротивлението на открития канал. Всички елементи са с идентични параметри и топлината се разпределя равномерно по целия кристал. Такъв прибор може да се представи като два MOSFET транзистора с общи дрейн и гейтове, а отделни сорсове. Така токът на товара ще се разпределя пропорционално на съпротивлението на каналите. Токът на сорса с токов датчик е значително по-малък от тока на сорса на основния транзистор. Големината на този ток е пропорционален на броя на транзисторите в кристала и обикновено е $n=500:1$ /1 - токът на сорса с токов датчик/. Има въведена виртуална земя /изход на Келвин/, които значително повишават точността на токът през датчика и много силно подтискат шума в целия диапазон на работната температура на силовия ключ.

Изходното напрежение на схемата измерваща тока е:

$$V_{SENSE} = \frac{-I_D \cdot R_{SENSE}}{n}$$

Формата на напрежението напълно повтаря формата на тока на дрейна на ключа през целия времеви интервал.

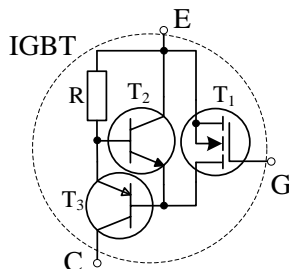
Съпротивлението на открития канал на токовия датчик се определя от отношението:

$$n' = n \left(1 + \frac{R_{SENSE}}{R_{sf(on)}} \right)$$

Недостатък на схемата е температурната зависимост на изходното напрежение от токовия датчик.

2. Мощни IGBT

Показаните по-горе недостатъци за силови полупроводникови прибори са решени при обединяването на достоинства на MOSFET и биполярните транзистори в схема „Дарлингтон“. Това са т.нар. IGBT транзистори с изолиран гейт, като първото поколение е създадено през 80-те години, а второ и трето поколение 90-те години. Тези прибори обединяват в себе си простотата на управление на гейта на полевия транзистор и големите комутиращи токове на биполярния транзистор. Опростената схема на IGBT транзистора може да се представи като комбинация на биполярния PNP транзистор и MOSFET, като освен основния PNP транзистор, съществува и паразитна NPN структура.



Фиг.1. Заместваща схема на IGBT транзистор

Тези два транзистора образуват четирислойна рпnp структура (паразитен тиристор). Когато температурата на полупроводника нараства паразитният тиристор се отпушва и не реагира на изменение на напрежението на гейта, което може да доведе до дефектиране на IGBT. Този ефект се нарича статистически. Много високите стойности на dV/dt и dI/dt при изключване също може да доведат до отпушване на рпnp транзистора. Този ефект е динамически, който довежда до намаляване на областта на безопасна работа на IGBT транзистора и я прави зависима от скоростта на изключване dV/dt . При IGBT транзистора отсъства вграден паразитен обратен диод, който позволява при необходимост да се използва включване на антипаралелен диод ULTAFast или SiC. Структурно IGBT транзисторите се делят на:

- *PT (punch-through)* – тези прибори имат допълнително вграден буферен слой, притежават ниска устойчивост на късо съединение и поглъщат голяма лавинна енергия. По скоростта на изключване могат да се сравняват с мощните MOSFET. Съвременните PT IGBT се произвеждат като модулни линии Power MOST 7 и имат намалени загуби в права посока на проводимостта и увеличена устойчивост dV/dt ;

- *NPT (non-punch-through)* – буферния слой липсва и това води до намаляне на правия спад на напрежение колектор-емитер. Като недостатък се появяват загубите при включване на високи честоти. Този вид са по-бавни от PT.

Двата вида се произвеждат за напрежение 600 и 1200V и постоянен ток $I_c = 50A$ и антипаралелен диод /обратно свързан паралелно на транзистора/ (FRD).

2.1. IGBT-транзистори шесто поколение

През последните години секторът за производство на силови електронни компоненти бързо се развива. Основните елементи на силовите управляеми устройства са мощните ключове. Основните им параметри са пределните напрежения и ток, както и бързина и ефективност на предаване на енергия. Като мощни ключови елементи, се използват MOSFET транзистори, IGBT транзистори и тиристори. В онези области, където се налага комбинацията от високи работни напрежения и токове, доминират IGBT. Те могат да бъдат използвани под формата на дискретни устройства, безкорпусни кристали в състава на хибридни силови модули и интелигентни силови модули на различни устройства.

Известно е, че биполярни транзистори с изолиран гейт (IGBT - Изолирани Gate Биполярни Transistor) са с предимствата на лесен контрол MOSFET транзистори и ниска загуба на проводимост, характерни за биполярните транзистори. Фиг.1. показва еквивалентна схема на IGBT-транзистор. Традиционно, IGBT се използва в случаите, когато е необходимо да се работи с високи токове и напрежения. IGBT-транзистори в момента производството на десетки производители. Сред тях - Infineon Technologies, SEMIKRON, International Rectifier, Fairchild Semiconductor, Toshiba, Hitachi, Mitsubishi, Fuji, IXYS, Power интеграция, Dynex Semiconductor, и др.

В края на 1980-те години създадоха първото поколение на IGBT-транзистори, и в началото на 1990 г., имаше втора и трета. Напредъкът в технологията IGBT преминава през увеличаване на работните напрежения и токове, както и подобряване на ефективността преобразуване чрез намаляване на загубите на мощност в кристала, както в статични и динамични режими. В днешно време и за серийна производствена технология вече се използва от четвърто, пето и шесто поколение IGBT-транзистори.

Технологично развитие на IGBT транзистори: Продуктовата гама е достатъчно широка и комбинира различни посоки. Това са дискретни устройства (биполярни транзистори с изолиран гейт (IGBT), мощни полеви транзистори (MOSFET), и модули въз основа на кристали на дискретни елементи, както и мощни ИС за контрол на преобразуватели, мощни драйверни ИС за IGBT и MOSFET, високо волтови схеми HVIC, продукти на основата на интегрирана IMotion платформа и цифрови контролери за управление, продукти, платформи микроелектронни твърдотелни релета. В момента компанията произвежда широка гама от IGBT, производствени технологии се използват 4-ти (4 PT IGBT), 5 (5 Non-PT IGBT) и шесто поколение (DS Trench IGBT). За първите две технологии в полевия транзистор се използва планарен гейт, и последната (DS Trench) - вертикален.

Новите транзистори са оптимизирани за превключване на честоти до 20 kHz. За да се намалят енергийните загуби от проводимост и превключване е използвана Trench-технология. Тези IGBT с антипаралелни свръхбързи диоди имат енергията да превключване E_{TS} и по-ниско напрежение на насищане колектор-емитер $V_{CE(on)}$, отколкото IGBT PT и NPT тип. В допълнение, ултрабърз диод с меко възстановяване допълнително увеличава ефективността на преобразуване и намалява нивото на генерираните загуби.

IGBT транзистор- технология - вертикален гейт (G)

За този тип технология на гейт (G) полеви транзистор - чрез намаляване на загубите на енергия в единица площ, значително увеличава тока през транзистора (до 60%). Във вертикалния гейт, за разлика от планарния се намаляват загубите от проводимостта. Trench IGBT е с най-ниски статични и динамични загуби след другите IGBT, произведени от компаниите. Енергията при изключване е от 10-20% по-ниска от NPT IGBT.

2.2. Линия-модул- 600-IGBT транзистори Trench 6 поколение

Семейството на 600-волтов Trench IGBT е съсредоточена основно върху използването на UPS-източници и преобразуватели с капацитет до 3 kW. Силовите прибори от това семейство могат да служат, като ефективен заместител за подобни IGBT-транзистори и в системи за индукционно нагряване, както и на други видове преобразуватели. Устройствата позволяват до 30% по-нисък разход на разсейвана мощност /енергия/ в сравнение с другите типове IGBT. Компаниите разработиха линия-модул от 8 прибори в TO-220 и TO-247 корпуси, работно напрежение 600V и токове 4÷48 A. Гарантираното време в режим на късо съединение - не по-малко от 5 микросекунди за всички видове от линията.

Всички силови прибори са направени по схема Co-Pack (имат вградени антипаралелни ултра-бързи диоди).

Предимствата на транзисторите - Trench технология

Напрежението в отворено състояние U_{ce} на 30% по-ниско в сравнение с аналогичните параметри за IGBT транзистори от 4 и 5 поколения и осигурява по-малко загуби от разсейване на енергия от кристала и нагряване, повишаване на енергийната ефективност на преобразуването. По-малкия капацитет на G гейта осигурява по-голямо бързодействие, опростява управлението на транзистора и намалява нивото на динамичните загуби. Осигурява се по-голяма надеждност при работа с критични токове и напрежения. Незначителния остатъчен ток на изключване и малките загуби на изключване (E_{OFF}) позволяват на транзисторите да работят при по-високи честоти.

2.3. Trench и IGBT-транзистори с планарен гейт.

По-високата допустима температура на кристала (175 °C) обезпечава разширен диапазон на работна температура и повишава надеждността на прибора. Температурата на радиатора при аналогичните режими на работа на Trench транзистора ще е по-ниска. По-малките размери на корпуса на Trench транзистора в съчетание с по-малки размери на радиатора позволяват прилагането на по-малки печатни платки. Параметрите на транзисторите от 6-то поколение обезпечават по-ефективно преобразуване на енергията.

Достигната е задачата за високи параметри в съчетание с ниска цена. Сравнение на параметрите на IGBT-транзистори 6-то поколение с аналогични Trench IGBT-напрежението U_{ce} в отворено състояние за отделните типове транзистори Trench IGBT е с 30% по-ниско, от аналогичните по мощност транзистори. Бързодействието на транзисторите е по-добро - около 5 μ s. Имат голяма плътност на мощността

В началото на 2009 г. линейните модули IGBT-транзистори са с работно напрежение 1200 V. Прилагане на Trench IGBT-транзистори на 600 и 1200 IGBT може да се увеличи ефективността на модули в различни приложения.

Поколенията Trench IGBT транзистори позволява балансирането на загубите при превключванията и проводимостта и използването на биполярни транзистори с изолиран гейт в областта на високите честоти вместо полевите MOS -транзистори, едновременно обезпечават високо КПД и по-голяма плътност на мощността в импулсните захранващи източници.

2.4. IGBT модул с SiC с Шотки диоди

Наред с развитието на полупроводникови компоненти за силовата електроника и усъвършенстването на схемотехниката на подобрени честотни преобразуватели за индукционно нагряване [8]. Според феномена на електромагнитната индукция, ефектът на индукционно нагряване се увеличава с нарастване на честотата на променливия ток. Разработката на транзисторни преобразуватели в обхват на мощността (стотици киловати) и висока честота (десетки килохерца) е сложен технически проблем. За решаване на този проблем се изисква по-високо бързодействие от досегашното на

мощните електронни компоненти, които могат да работят ефективно при високи честоти.

Основните елементи на мощните високочестотни преобразуватели са напълно управляемите ключове - биполарни транзистори с изолиран гейт (IGBT). Произведените днес мощни IGBT модули са предназначени предимно за традиционната употреба в преобразувателите и са относително нискочестотни. Разработена и пусната е в производство серия от IGBT модули за ток на 25-4800 А, напрежение 600-6500 V, като схеми на отделните ключове, полумостови и трифазни инвертори. В модулите са предвидени защитни диоди по обратен ток с меки характеристики на обратно възстановяване.

Значително подобряване на честотните свойства на IGBT с технологични методи се провалят поради конструкцията на кристали. Следователно, за да се създадат високочестотни преобразуватели за висока мощност в системите за индукционно нагряване с високи технически и икономически характеристики при използването на високоенергийни модули на IGBT става за сметка на използването на нови схемни решения и методи за контрол. Повечето схемотехнически решения на инвертори използват обратни SFRD -диоди. Енергийните загуби на IGBT-транзистор при неговото включване зависят от характеристиките на обратното възстановяване на обратно включения паралелен SFRD диод.

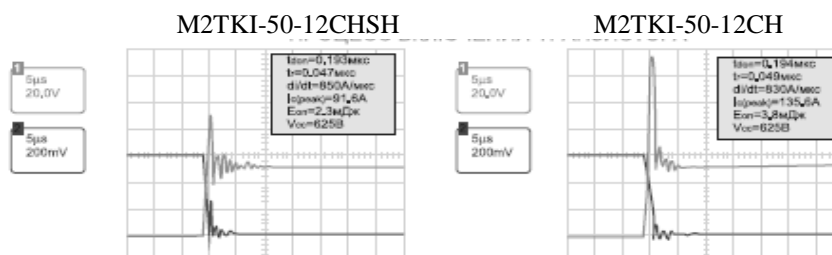
Използването на SiC диоди в съчетание на нова схемотехника позволява ефективно използване на IGBT модули в мощните преобразуватели за индукционно технологии за честоти от 20-100 KHz. Един от най-новите разработки в тази насока е честотата, с Шотки диоди IGBTmodul M2TKI-50-12CHSH



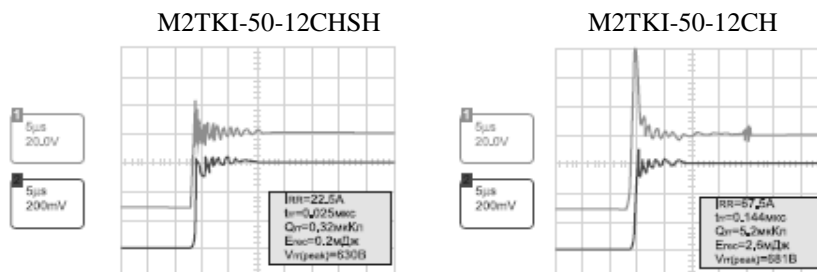
Фиг.2. Външен вид и схема на IGBT модул M2TKI-50-12CHSH

На фиг. 2. IGBTmodul за честотни преобразуватели в системи за индукционно нагряване с честота на комутация до 50 kHz. Модулът се състои от полумост с честотен IGBT и вграден бърз-SiC-Шотки диоди с ток 50 А и напрежение 1200 V.

Процес на включване на транзистора



Процес на обратно възстановяване на диода



Фиг.3. Времедиаграми на процесите на превключване на модул M2TKI-50-12CH и SH

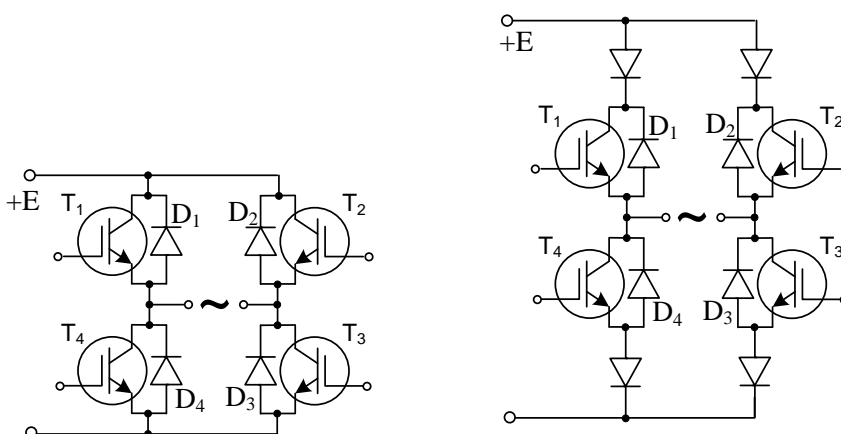
Предимствата на новите модули M2TKI-50-12CHSH с SiC-Шотки диоди:

- намаляване на енергийните загуби в транзистора при преминаването, когато е включен за време E_{on} 65%;
- намаляване на енергийните загуби при превключване 13 пъти, се възстановява обратния диод - E_{REC} .

2.5. Нови силнотоккови press-pack IGBT

Тези транзистори са първо поколение press-pack IGBT за напрежение 2500, 4500 и 5200V в серийно производство. Press-pack IGBT-модули таблетно изпълнение се разработват за отказоустойчиви приложения, където не могат да се използват обичайните модули. Технологията на производство на прибора за 400A/1800V показва добри електромеханични характеристики. Press-pack IGBT-модулите могат да обезпечат пълния спектър от мощности, които се използват в системите за индукционно нагряване и за други високомощни приложения. Необходимо е специализирана система за охлаждане / въздух или течност/.

Схемите използващи *Press-pack* IGBT-модули са с много висока надежност и работят в много тежки температурни условия, при честоти 20kHz.



Фиг.4. Схема на H мостов инвертор без и с обратни диоди

Схемите на инвертори за индукционно нагряване – пълна мостова и пълна мостова схема с обратни диоди, могат много компактно да се изпълнят изцяло с един press-pack IGBT-модул - таблетно изпълнение заедно с обратно паралелните и обратни диоди. Така се постига минимална дължина на изводите, лесно се свързва с AC или DC шините. Това е голямо предимство и става по-лесно компенсирането на малката вътрешна индуктивност /може значително да се вдигне честотата на управление над 20kHz/. Малките габаритни размери също са от значително значение и допълнително намаляват цената на апаратите.

Изводи и предложения:

1. Бурното развитие на различни модификации на IGBT транзистори разширява възможностите за тяхното приложение.

2 Модулното изпълнение на транзистори и диоди като рамена и цели мостове позволява реализирането на инверторни схеми в индукционното нагряване в единичен и многозвено вариант. Това е начинът за постигане на по-големи мощности при добра надеждност.

Литература:

1. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
2. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силовая электроника. 2007. № 4. 2008 № 1.
3. Машурян Э. Современная ситуация в силовой электронике // Электронные компоненты. 2005. № 6.
4. Шурыгина М. Дискретные силовые приборы. Расширение применения и специализация // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 3.
5. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств: реалии, проблемы и пути решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2009. № 1.