

Tentti 9.1.2012, kello 9 ... 12, sali S1

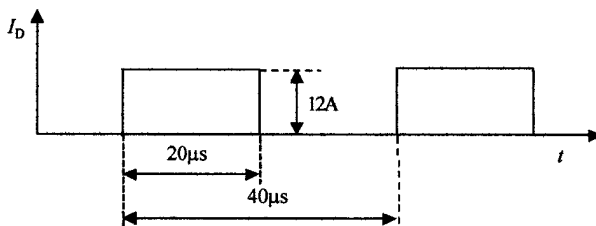
Papereihin

- sukunimi ja etunimet
- opiskelijanumero
- koulutusohjelma.

Tentissä sallitut apuvälineet

- kynät, kumit jne.
- taskulaskin
- lukion kaavakokoelma tms. + Laplace taulut

1. Selvitä lyhyesti (max. 2...4 lausetta + mahdollinen kuva), mitä seuraavilla termeillä tarkoitetaan
 - ioni-istutus
 - tyristorin toipumisaika
 - SOA
 - varistori
 - ESR.
2. Esittele IGBT:n rakenne, toimintaperiaate ja ominaisuudet.
3. Esittele kiihdytetty superpositiomenetelmä. Mitä muita menetelmiä on komponentin lämpenemän laskuun yleisessä tapauksessa? Mitkä ovat niiden edut ja haitat?
4. Määrä IPP60R199CP -fetin vaatiman jäähdytysalueen lämpövastus, kun fetin virta on oheisen kuvan mukainen. Jäähdytysilman lämpötila on 45 °C ja $V_{GS} = 10\text{ V}$. Fetin yli oleva jännite on päällekytkennän aikana 360 V ja katkaisun aikana 500 V .



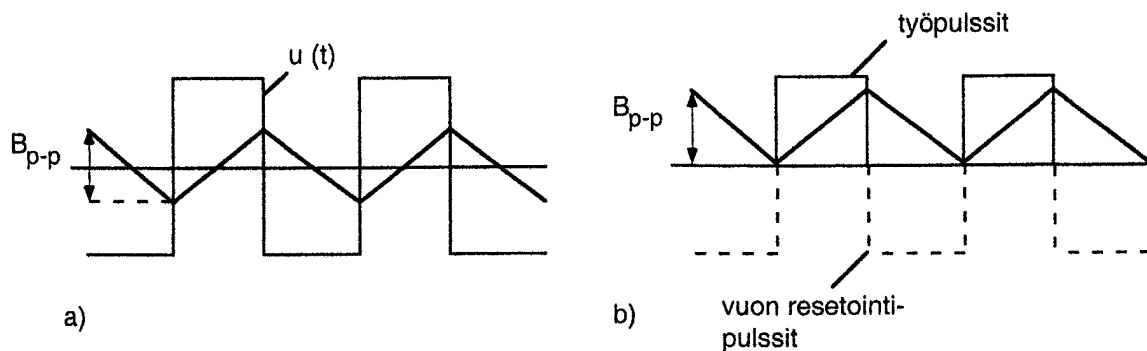
5. Erään jännitettä laskevan tasasähkökatkojan lähtövirtapulsseja on tarkoitus muodostaa ferriittirenkaasta TN26/15/10-3C90 tehdyn kuristimen avulla. Kuristimen yli on 19 V jännite $10\text{ }\mu\text{s}$ ajan, jona aikana kuristimen virran halutaan kasvavan nolasta noin $0,5\text{ A}$ maksimiarvoon.
 - a) Kuinka monta johdinkierrosta pitää olla tarvittavan induktanssin aikaansaamiseksi?
 - b) Mikä on renkaan vuontiheys B maksimivirralla kyseisellä kierrosmäärällä?
 - c) Onko kyseinen ferriittirenkas sopiva tähän sovellukseen? Perustele päätelmäsi.

Kaavoja seuraavalla sivulla, datalehti viimeisellä sivulla. Huom! ferriittirenkaassa ei ole ilma-
väliä!

Hakkuriteholähteissä tavallisille kantimuotoisille jännitteille pätee, kuva 11.4:

$$B_{p-p} = \frac{\int U(t) dt}{A N} \approx \frac{U t_d}{A N} \quad (11.16)$$

jossa U on t_d -mittaisen pulssin jännite, A on ferriitin poikkileikkauspinta-ala ja N on ko. käänin kierrosluku.



Kuva 11.4. Jännite ja vuontiheys eräissä tyypillisissä hakkuriteholähdemuuntajissa /8/;
(a) balansoitu vuorovaihe; (b) forward-hakkuri, vertaa kuva 11.6.

$$L = \frac{N \phi}{I} \quad (11.18)$$

$$\phi = \frac{\mu_0 N I}{\frac{l_g}{A_g} + \sum \frac{l_m}{\mu A_m}} \approx \frac{\mu_0 N I}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{l_e - l_g}{\mu A_e}} \approx \frac{\mu_0 N I}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{C_1}{\mu}} \quad (11.19)$$

$$L \approx \frac{\mu_0 N^2}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{C_1}{\mu}} = \frac{\mu_0 \mu_e N^2 A_e}{l_e} = A_L N^2 \quad (11.20)$$

jossa l_g ja A_g ovat ilmvälin pituus ja pinta-ala sekä l_e ja A_e ovat efektiivinen magneettipiirin pituus ja pinta-ala. μ_0 on tyhjän ($= 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) ja μ_e ilmvälin sisältävän sydämen efektiivinen permeabiliteetti ja C_1 on sydänvakio. A_L on induktanssikerroin sydämelle tällä ilmvälillä.



IPP60R199CP

CoolMOS® Power Transistor

Features

- Lowest figure-of-merit $R_{ON} \times Q_g$
- Ultra low gate charge
- Extreme dv/dt rated
- High peak current capability
- Qualified according to JEDEC¹⁾ for target applications
- Pb-free lead plating; RoHS compliant

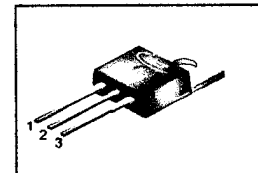
Product Summary

$V_{DS} @ T_{j,max}$	650	V
$R_{DS(on),max}$	0.199	Ω
$Q_{g,typ}$	32	nC

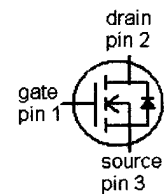
CoolMOS CP is specially designed for:

- Hard switching topologies, for Server and Telecom

PG-TO220



Type	Package	Ordering Code	Marking
IPP60R199CP	PG-TO220	SP000084278	6R199P



Maximum ratings, at $T_j=25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value	Unit
Continuous drain current	I_D	$T_C=25\text{ °C}$	16	A
		$T_C=100\text{ °C}$	10	
Pulsed drain current ²⁾	$I_{D,pulse}$	$T_C=25\text{ °C}$	51	
Avalanche energy, single pulse	E_{AS}	$I_D=6.6\text{ A}, V_{DD}=50\text{ V}$	436	mJ
Avalanche energy, repetitive t_{AR} ^{2),3)}	E_{AR}	$I_D=6.6\text{ A}, V_{DD}=50\text{ V}$	0.66	
Avalanche current, repetitive t_{AR} ^{2),3)}	I_{AR}		6.6	A
MOSFET dv/dt ruggedness	dv/dt	$V_{DS}=0\dots480\text{ V}$	50	V/ns
Gate source voltage	V_{GS}	static	± 20	V
		AC ($f > 1\text{ Hz}$)	± 30	
Power dissipation	P_{tot}	$T_C=25\text{ °C}$	139	W
Operating and storage temperature	T_j, T_{stg}		-55 ... 150	$^{\circ}\text{C}$
Mounting torque		M3 and M3.5 screws	60	Ncm



Maximum ratings, at $T_j=25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value	Unit
Continuous diode forward current	I_S	$T_C=25\text{ °C}$	9.9	A
Diode pulse current ²⁾	$I_{S,pulse}$		51	
Reverse diode dv/dt ⁴⁾	dv/dt		15	V/ns

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			min.	typ.	max.	

Thermal characteristics

Thermal resistance, junction - case	R_{thJC}		-	-	0.9	K/W
Thermal resistance, junction - ambient	R_{thJA}	leaded	-	-	62	
Soldering temperature, wavesoldering only allowed at leads	T_{sold}	1.6 mm (0.063 in.) from case for 10 s	-	-	260	°C

Electrical characteristics, at $T_j=25\text{ °C}$, unless otherwise specified

Static characteristics

Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	$V_{GS}=0\text{ V}, I_D=250\text{ }\mu\text{A}$	600	-	-	V
Gate threshold voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=0.66\text{ mA}$	2.5	3	3.5	
Zero gate voltage drain current	I_{DSS}	$V_{DS}=600\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}, T_j=25\text{ °C}$	-	-	1	μA
		$V_{DS}=600\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}, T_j=150\text{ °C}$	-	10	-	
Gate-source leakage current	I_{GSS}	$V_{GS}=20\text{ V}, V_{DS}=0\text{ V}$	-	-	100	nA
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS}=10\text{ V}, I_D=9.9\text{ A}, T_j=25\text{ °C}$	-	0.18	0.199	Ω
		$V_{GS}=10\text{ V}, I_D=9.9\text{ A}, T_j=150\text{ °C}$	-	0.49	-	
Gate resistance	R_G	$f=1\text{ MHz}, \text{open drain}$	-	2	-	Ω



Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			min.	typ.	max.	

Dynamic characteristics

Input capacitance	C_{iss}	$V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=100\text{ V},$ $f=1\text{ MHz}$	-	1520	-	pF
Output capacitance	C_{oss}		-	72	-	
Effective output capacitance, energy related ⁵⁾	$C_{o(er)}$	$V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=0\text{ V}$ to 480 V	-	69	-	
Effective output capacitance, time related ⁵⁾	$C_{o(tr)}$		-	180	-	
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$V_{DD}=400\text{ V},$ $V_{GS}=10\text{ V}, I_D=9.9\text{ A},$ $R_G=3.3\ \Omega$	-	10	-	ns
Rise time	t_r		-	5	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	50	-	
Fall time	t_f		-	5	-	

Gate Charge Characteristics

Gate to source charge	Q_{gs}	$V_{DD}=400\text{ V}, I_D=9.9\text{ A},$ $V_{GS}=0\text{ to }10\text{ V}$	-	8	-	nC
Gate to drain charge	Q_{gd}		-	11	-	
Gate charge total	Q_g		-	32	43	
Gate plateau voltage	$V_{plateau}$		-	5.0	-	V

Reverse Diode

Diode forward voltage	V_{SD}	$V_{GS}=0\text{ V}, I_F=9.9\text{ A},$ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$	-	0.9	1.2	V
Reverse recovery time	t_{rr}	$V_R=400\text{ V}, I_F=I_S,$ $di_F/dt=100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	340	-	ns
Reverse recovery charge	Q_{rr}		-	5.5	-	μC
Peak reverse recovery current	I_{rm}		-	33	-	A

¹⁾ J-STD20 and JESD22

²⁾ Pulse width t_p limited by $T_{j,max}$

³⁾ Repetitive avalanche causes additional power losses that can be calculated as $P_{AV}=E_{AR} \cdot f$.

⁴⁾ $I_{SD} \leq I_D$, $di/dt \leq 200\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_{DCink}=400\text{ V}$, $V_{peak} < V_{(BR)DSS}$, $T_j < T_{j,max}$, identical low side and high side switch.

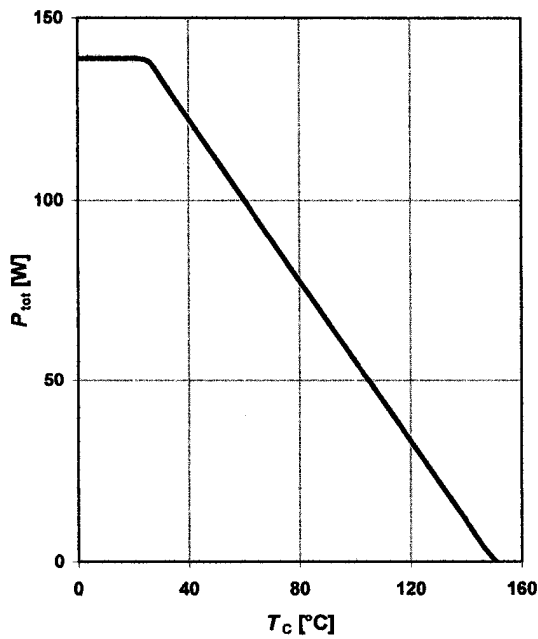
⁵⁾ $C_{o(er)}$ is a fixed capacitance that gives the same stored energy as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS} .

⁶⁾ $C_{o(tr)}$ is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS} .



1 Power dissipation

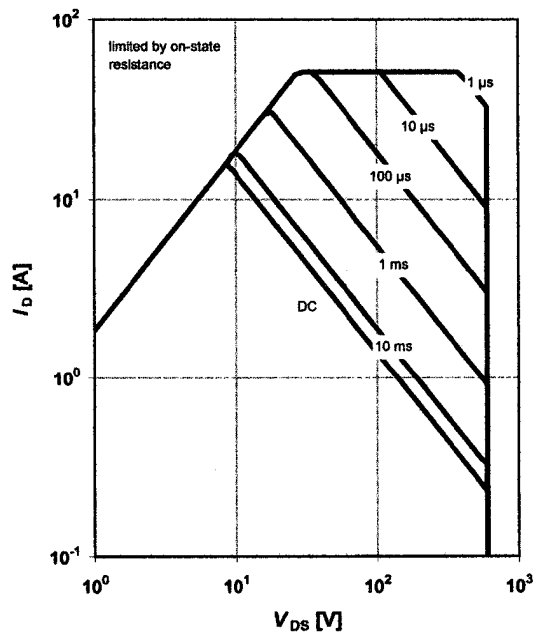
$P_{tot} = f(T_c)$



2 Safe operating area

$I_D = f(V_{DS}); T_c = 25\text{ °C}; D = 0$

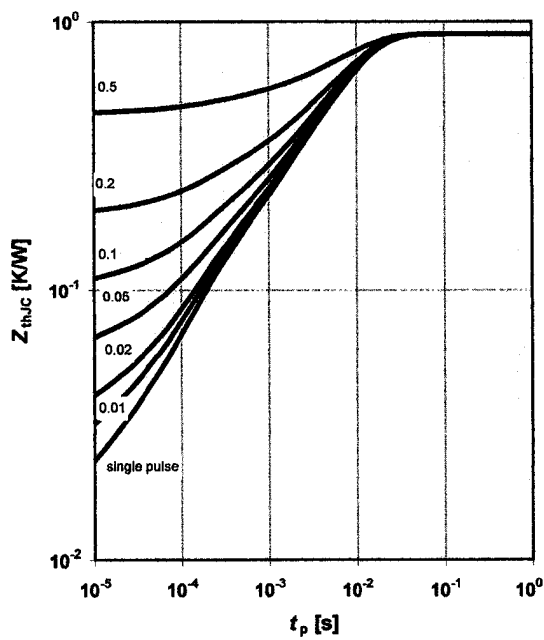
parameter: t_p



3 Max. transient thermal impedance

$Z_{thJC} = f(t_p)$

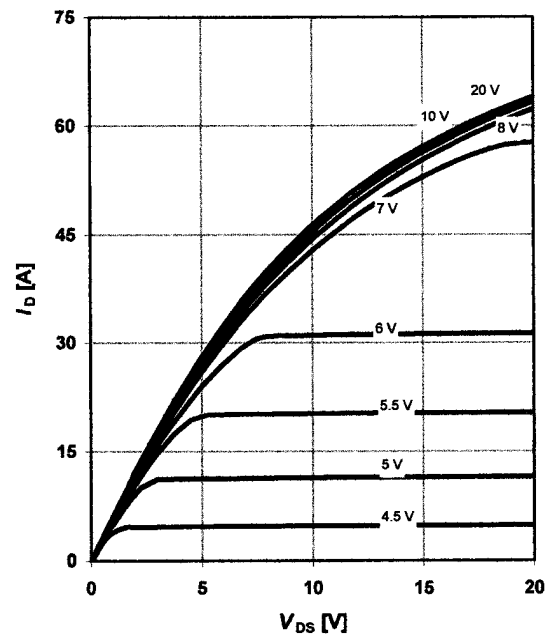
parameter: $D = t_p / T$



4 Typ. output characteristics

$I_D = f(V_{DS}); T_j = 25\text{ °C}$

parameter: V_{GS}

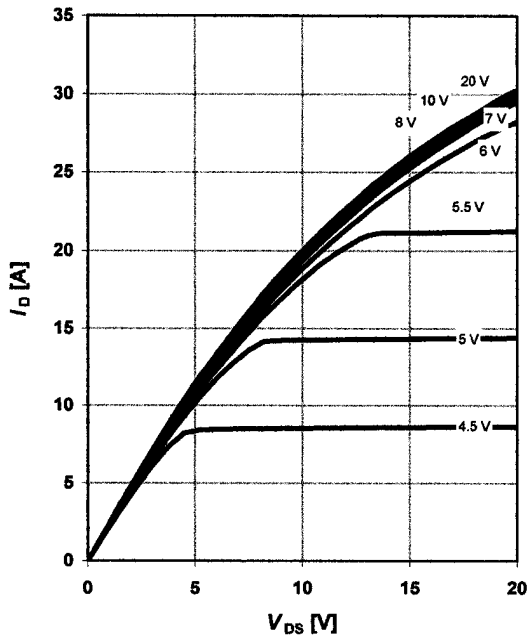




5 Typ. output characteristics

$I_D = f(V_{DS}); T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$

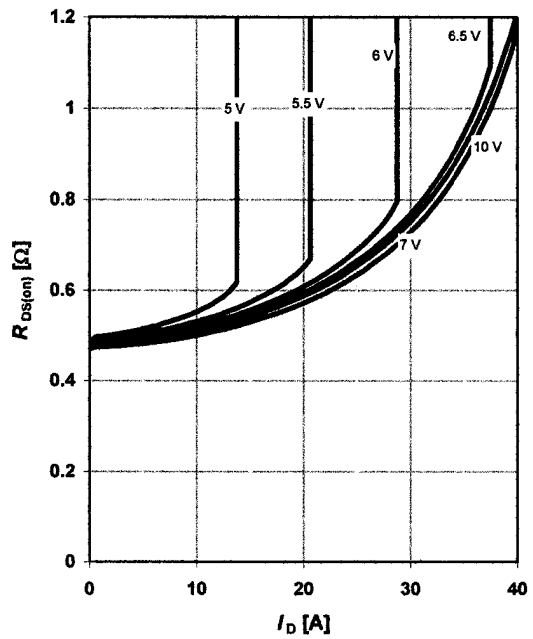
parameter: V_{GS}



6 Typ. drain-source on-state resistance

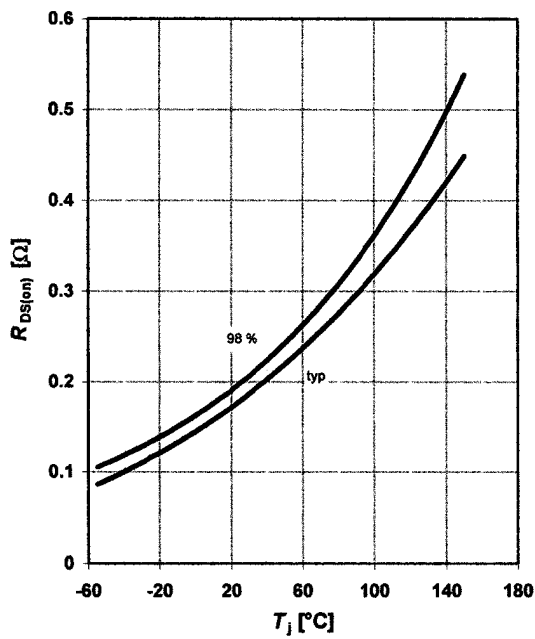
$R_{DS(on)} = f(I_D); T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$

parameter: V_{GS}



7 Drain-source on-state resistance

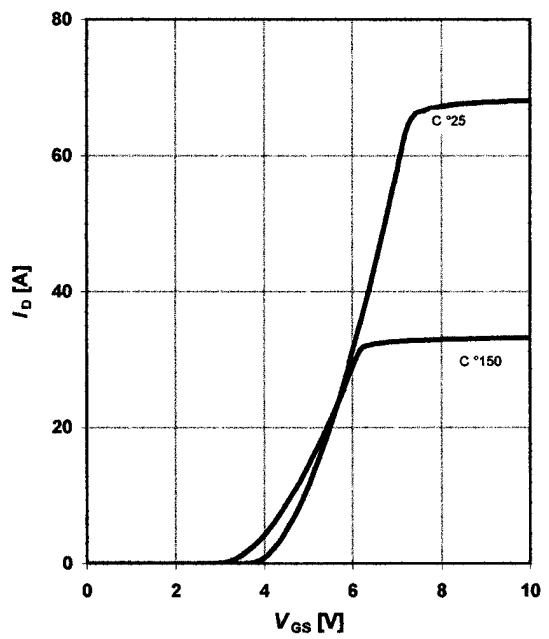
$R_{DS(on)} = f(T_j); I_D = 9.9\text{ A}; V_{GS} = 10\text{ V}$



8 Typ. transfer characteristics

$I_D = f(V_{GS}); |V_{DS}| > 2|I_D|R_{DS(on)max}$

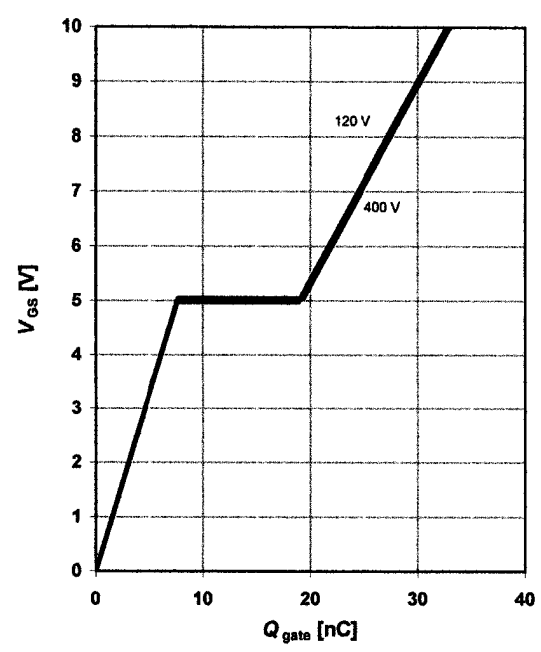
parameter: T_j





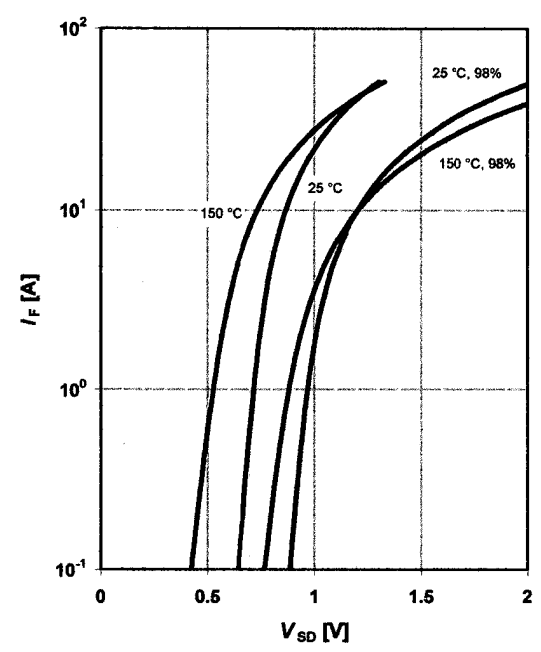
9 Typ. gate charge

$V_{GS}=f(Q_{gate}); I_D=9.9 \text{ A pulsed}$
parameter: V_{DD}



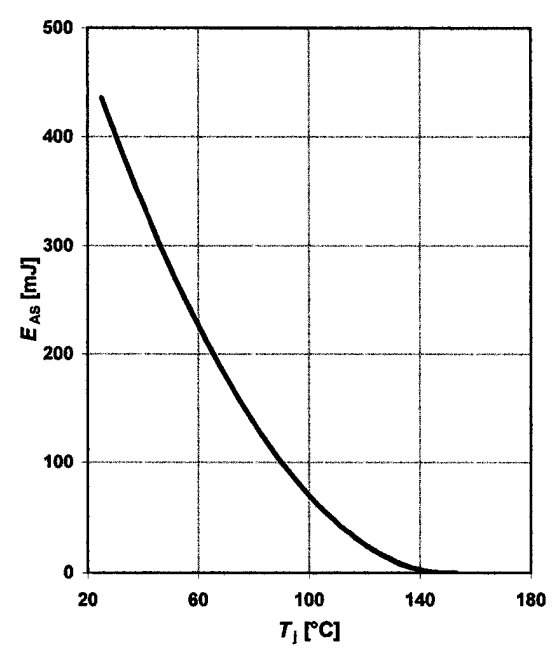
10 Forward characteristics of reverse diode

$I_F=f(V_{SD})$
parameter: T_j



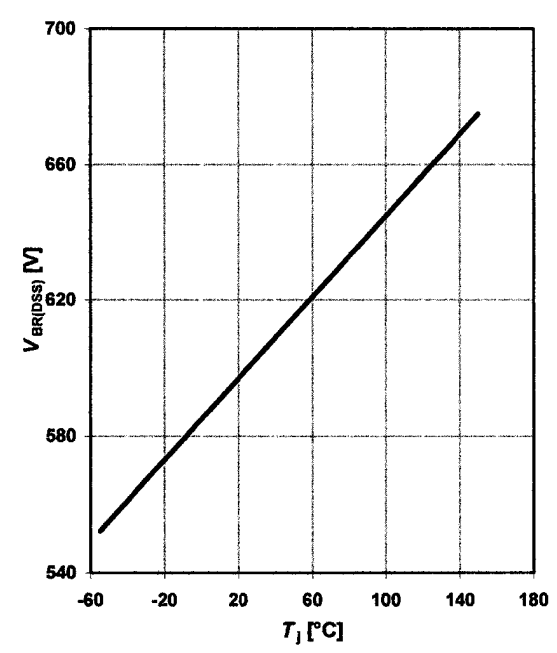
11 Avalanche energy

$E_{AS}=f(T_j); I_D=6.6 \text{ A}; V_{DD}=50 \text{ V}$



12 Drain-source breakdown voltage

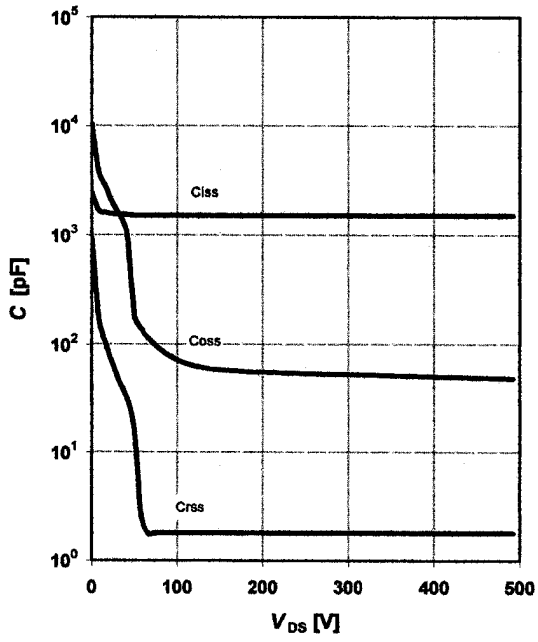
$V_{BR(DSS)}=f(T_j); I_D=0.25 \text{ mA}$





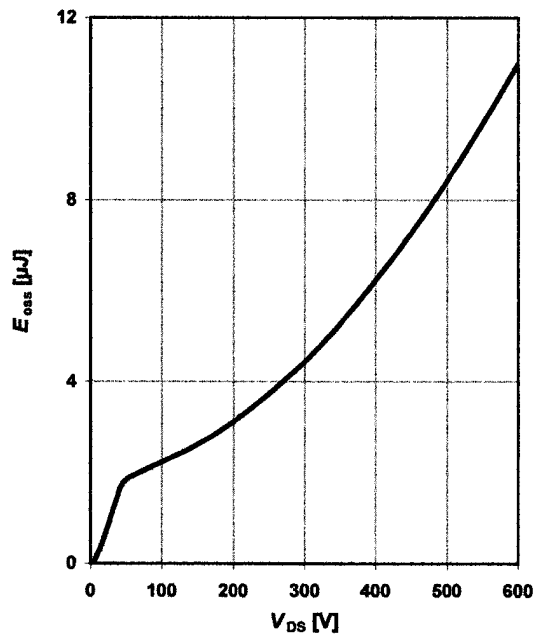
13 Typ. capacitances

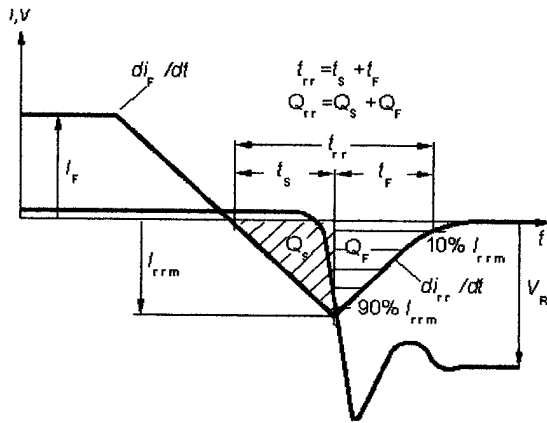
$C=f(V_{DS}); V_{GS}=0\text{ V}; f=1\text{ MHz}$



14 Typ. C_{oss} stored energy

$E_{oss}=f(V_{DS})$



Definition of diode switching characteristics


RING CORES (TOROIDS)

Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(I/A)$	core factor (C1)	1.08	mm ⁻¹
V_e	effective volume	3360	mm ³
l_e	effective length	60.1	mm
A_e	effective area	55.9	mm ²
m	mass of core	≈ 17	g

Coating

The cores are coated with polyamide 11 (PA11), flame retardant in accordance with "UL 94V-2"; UL file number E 45228 (M).

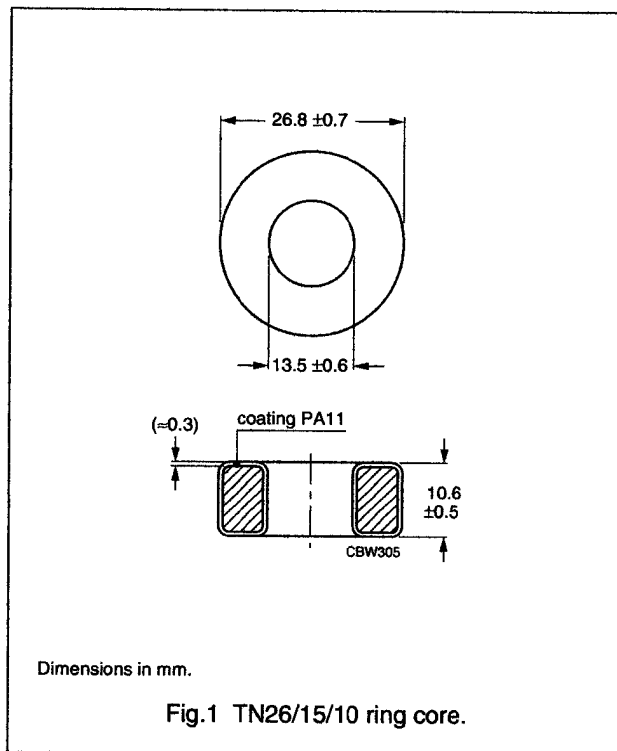
The colour is white.

Maximum operating temperature is 160 °C.

Isolation voltage

DC isolation voltage: 2000 V.

Contacts are applied on the edge of the ring core, which is also the critical point for the winding operation.



Ring core data

GRADE	A_L (nH)	μ_i	TYPE NUMBER
4A11	817 ± 25%	≈ 700 ⁽¹⁾	TN26/15/10-4A11
3C90	2645 ± 25%	≈ 2300	TN26/15/10-3C90
3C11	5000 ± 25%	≈ 4300	TN26/15/10-3C11
3E25	6420 ± 25%	≈ 5500	TN26/15/10-3E25

1. Old permeability specification maintained.

Properties of cores under power conditions

GRADE	B (mT) at	CORE LOSS (W) at	
	H = 250 A/m; f = 25 kHz; T = 100 °C	f = 25 kHz; B = 200 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; B = 100 mT; T = 100 °C
3C90	≥ 320	≤ 0.38	≤ 0.38

Tentti 9.1.2012 RATKAISUT

Teht. 1-3: Katso kirja

Teht. 4Johtohäviö:

Kuvasta 5 saadaan $T_j = 150^\circ\text{C}$ lämpötilassa 12A virralle kun $U_{GS} = 10\text{V}$ tyypillinen arvo:

$$U_{DS} \approx 5.6\text{V} \quad (\text{tosin kuva aika vaikea lukea tarkasti})$$

[Voi myös lukea R_{DS} arvon kuvasta 6 $I = 12\text{A}$ $U_{GS} = 10\text{V}$ tapaukselle: $R_{DS} \approx 0.5\ \Omega$ joten $U_{DS} \approx 0.5 \cdot 12\text{A} = 6\text{V}$
 Lisäksi kuvassa 7 on annettu 98% raja R_{DS} vastukselle 9.9A virralle, eli ei kovin kaukana 12A:sta
 $R_{DS98\%} \approx 0.54\ \Omega$ (tyypillinen arvo $R_{DS} \approx 0.45\ \Omega$)
 joten $U_{DS98\%} = 6.5\text{V}$ (tyypillinen 5.4V)

Jos käytetään arvoa 5.6V, saadaan johtoajan energiahäviöksi

$$E_{HON} = 5.6\text{V} \cdot 12\text{A} \cdot 20\ \mu\text{s} \approx 1.3\text{mJ}$$

Kytkeentähäviöistä valmistaja ei anna tietoja. Arvioidaan ne nousu- ja laskeutumisajan avulla olettaen jännitteen olevan vakio ja virran muuttuvan lineaarisesti. Siten häviöenergiat voidaan laskea kolmion pinta-ala-kaavalla

Päällekytkentähäviöt: $t_r \approx 5\text{ns}$ (tyypillisesti)

$$E_{H\text{TON}} \approx \frac{t_r \cdot U_{DS\text{TON}} \cdot I_D}{2} = \frac{5\text{ns} \cdot 360\text{V} \cdot 12\text{A}}{2} \approx 11\ \mu\text{J}$$

Katkaisu häviöt: $t_f = 5\text{ns}$ (tyypillisesti)

$$E_{H\text{TOFF}} \approx \frac{t_f \cdot U_{DS\text{TOFF}} \cdot I_D}{2} = \frac{5\text{ns} \cdot 500\text{V} \cdot 12\text{A}}{2} \approx 15\ \mu\text{J}$$

Tentti 9.1.2012 Ratkaisut

teht. 4 jatkoa

Kuten edellä olevasta näkyy, virran kytkemiseen ja katkaisuun liittyvät energiat ovat hyvin pieniä johtuen komponentin suuresta nopeudesta.

Tämän johdosta on hyvä tarkistaa myös transistorin kapasitanssien latautumisesta ja purkautumisesta aiheutuvat häviöt. Energia kapasitanssissa $C_{oss} = C_{Ds} + C_{Dg}$ on annettu kuvassa 14.

$$E_{oss_TON} \approx 5.5 \mu\text{J} \quad \text{kun } V_{DS} = 360\text{V} \quad (\text{päällekytkentä})$$

$$E_{oss_TOFF} \approx 8.4 \mu\text{J} \quad \text{kun } V_{DS} = 500\text{V} \quad (\text{katkaisu})$$

Siten kokonaishäviöt ovat 40 μs jakson ajalta

$$\begin{aligned} E_H &= E_{HON} + E_{HTON} + E_{HTOFF} + E_{oss_TON} + E_{oss_TOFF} \\ &\approx 1300 \mu\text{J} + 11 \mu\text{J} + 15 \mu\text{J} + 5.5 \mu\text{J} + 8.4 \mu\text{J} \\ &\approx 1340 \mu\text{J} \end{aligned}$$

Ja edelleen keskimääräinen häviöteho

$$P_H = \frac{E_H}{T} = \frac{1340 \mu\text{J}}{40 \mu\text{s}} \approx 34 \text{ W}$$

Koska toimintataajuus on huomattavasti isompi kuin 1 kHz voidaan mitoitus tehdä keskimääräisen häviötehon perusteella

$$T_J \geq (R_{thJC} + R_{thCA}) \cdot P_H + T_A$$

joten

$$\begin{aligned} R_{thCA} &\leq \frac{T_J - T_A}{P_H} - R_{thJC} \\ &\approx \frac{150^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}}{34 \text{ W}} - 0.9 \frac{\text{K}}{\text{W}} \approx \underline{\underline{2.2 \frac{\text{K}}{\text{W}}}} \end{aligned}$$

Johon siis sisältyy myös kotelon ja jäähdytysalustan välinen lämpövastus, jota valmistaja ei ilmoita datalehdessä.

5)

- a) Halutaan siis että 19V jännite aiheuttaa 0,5A virranmuutoksen 10 μ s aikana.

Induktanssin on siis oltava

$$L = U \cdot \frac{td}{\Delta I} = 19V \cdot \frac{10\mu s}{0,5A} \approx 380\mu H$$

Datalehdessä nähdään, että induktanssi-kerroin $A_L = 2645 \text{ nH}$. Siten kierroksia on oltava:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{380\mu H}{2645 \text{ nH}}} \approx 12$$

- b) Kaavan (11.16) avulla, kun $A_e = 55,9 \text{ mm}^2$

$$B = \frac{U \cdot td}{A_e \cdot N} = \frac{19V \cdot 10\mu s}{55,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 12} \approx 280 \text{ mT}$$

(Saman tuloksen saa tietenkin myös kaavasta $B = \frac{\Phi}{A_e} = \frac{L \cdot I}{A_e N}$)

- c) Saatua vuontihyden arvo 280 mT on aika korkea, joten sydämen häviöt voivat olla liian suuret jos kytkentätaajuus on suuri. Tämä voidaan päättää datalehden alimmasta taulukosta, jossa esidetyt häviöt on annettu oikeellisesta pienemmillä vuontokäytillä. Lisäksi arvo 280 mT on jo lähellä hyllystysvuontokäyttöä, joka on $\approx 320 \text{ mT}$. Voisi olla järkevää valita isompi ferrittirengas tai käyttää ilmavälin omaavaa sydäntä.