

Tentti 17.12.2012, kello 13 ... 16, sali S3

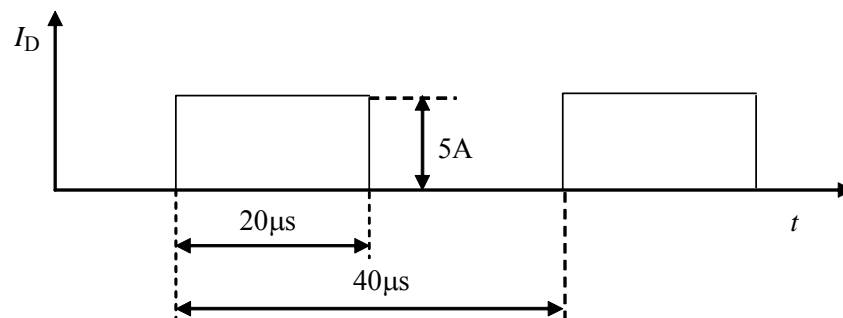
Papereihin

- sukunimi ja etunimet
- opiskelijanumero
- koulutusohjelma.

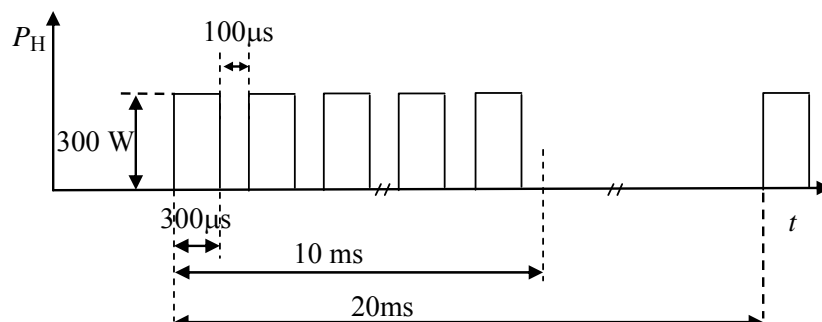
Tentissä sallitut apuvälineet

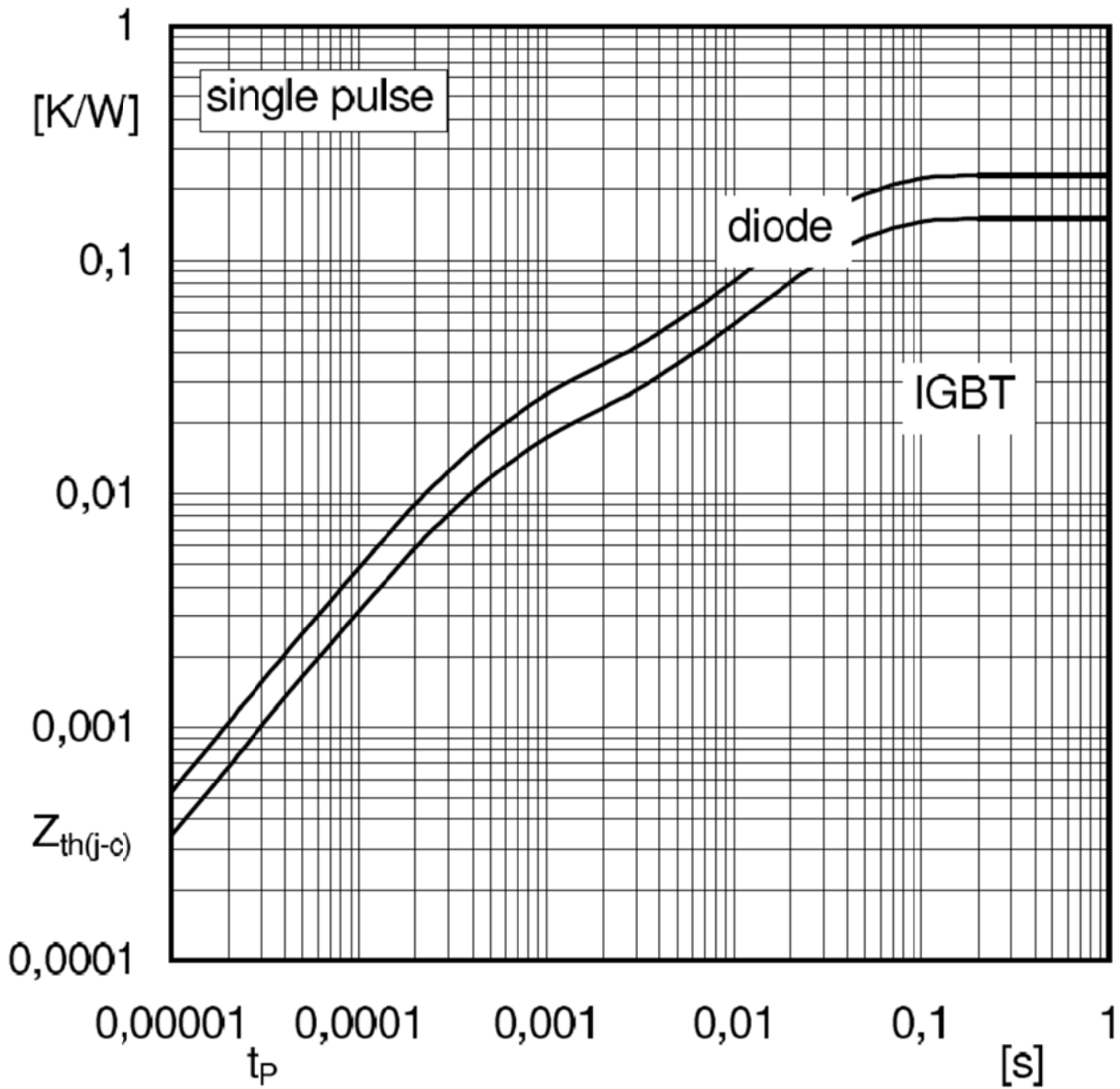
- kynät, kumit jne.
- taskulaskin
- lukion kaavakokoelma tms. + Laplace taulut

1. Selvitä lyhyesti (max. 2...4 lausetta + mahdollinen kuva), mitä seuraavilla termeillä tarkoitetaan
 - neutronisäteilytys
 - SiC
 - SOA
 - heat-pipe
 - lähivaikutus.
2. Esittele IGBT:n rakenne, toimintaperiaate ja ominaisuudet.
3. Esittele kirjassa esitetyt puolijohdetehokomponenttien jäähdytysmenetelmät ja -laitteet sekä niiden keskinäiset edut ja haitat.
4. Määrä IRG4BC20UPbF -IGBT:n vaatiman jäähdytyslementin lämpövastus, kun IGBT:n virta on oheisen kuvan mukainen. Jäähdytysilman lämpötila on $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{GE} = 15\text{ V}$ ja $R_G = 50\ \Omega$. IGBT:n yli oleva jännite on päällekytkennän aikana 360 V ja katkaisun aikana 500 V .



5. SEMiX223GB12Vs moduulin IGBT:n häviöteho on oheisen kuvan mukainen 20 ms jaksolla toistuva 10 ms jono häviötehopulsseja (25 identtistä pulssia tasavälein). Määrä kiihdytettyä superpositiomenetelmää käyttäen lämpötilaero IGBT:n liitoksen ja kotelon välillä pulssijonon viimeisen pulssin lopussa. Tarvittava käyrästä ja sen sarjakehitelmä on seuraavalla sivulla.





$R_{th(j-c)}$	per IGBT	0.14	KW
---------------	----------	------	----

$$Z_{th}(t) = R_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) + R_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right) \quad (4-2)$$

For SEMiX modules, the coefficients R_1 , τ_1 , and R_2 , τ_2 can be determined using the data sheet values as given in Tab. 1-1.

		IGBT, CAL diode	Thyristor, rectifier diode
R_1	[K/W]	$0.9 \times R_{th(j-c)}$	$0.85 \times R_{th(j-c)}$
R_2	[K/W]	$0.1 \times R_{th(j-c)}$	$0.15 \times R_{th(j-c)}$
τ_1	[sec]	0.03	0.055
τ_2	[sec]	0.0005	0.0035

Tab. 1-1 Parameters for $Z_{th(j-c)}$ calculation using equation (4-2)

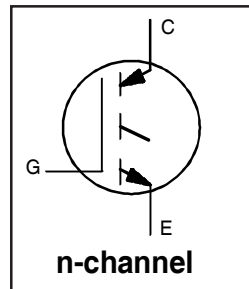
IRG4BC20UPbF

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

UltraFast Speed IGBT

Features

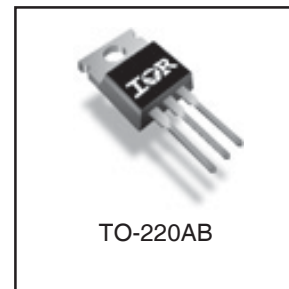
- UltraFast: optimized for high operating frequencies 8-40 kHz in hard switching, >200 kHz in resonant mode
- Generation 4 IGBT design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than Generation 3
- Industry standard TO-220AB package
- Lead-Free



$V_{CES} = 600V$
$V_{CE(on) typ.} = 1.85V$
@ $V_{GE} = 15V, I_C = 6.5A$

Benefits

- Generation 4 IGBTs offer highest efficiency available
- IGBTs optimized for specified application conditions
- Designed to be a "drop-in" replacement for equivalent industry-standard Generation 3 IR IGBTs



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
V_{CES}	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	600	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	13	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	6.5	
I_{CM}	Pulsed Collector Current ①	52	
I_{LM}	Clamped Inductive Load Current ②	52	
V_{GE}	Gate-to-Emitter Voltage	± 20	V
E_{ARV}	Reverse Voltage Avalanche Energy ③	5.0	mJ
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Maximum Power Dissipation	60	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	Maximum Power Dissipation	24	
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 150	°C
T_{STG}			
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf·in (1.1N·m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	---	2.1	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	---	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	---	80	
Wt	Weight	2.0 (0.07)	---	g (oz)

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)CES}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	600	—	—	V	$V_{GE} = 0V, I_C = 250\mu A$
$V_{(BR)ECS}$	Emitter-to-Collector Breakdown Voltage ④	18	—	—	V	$V_{GE} = 0V, I_C = 1.0A$
$\Delta V_{(BR)CES}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Breakdown Voltage	—	0.69	—	V/°C	$V_{GE} = 0V, I_C = 1.0mA$
$V_{CE(ON)}$	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	—	1.85	2.1	V	$I_C = 6.5A$ $I_C = 13A$ $I_C = 6.5A, T_J = 150^\circ\text{C}$ $V_{GE} = 15V$ See Fig.2, 5
		—	2.27	—		
		—	1.87	—		
$V_{GE(th)}$	Gate Threshold Voltage	3.0	—	6.0		$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\mu A$
$\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Threshold Voltage	—	-11	—	mV/°C	$V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\mu A$
g_{fe}	Forward Transconductance ⑤	1.4	4.3	—	S	$V_{CE} = 100V, I_C = 6.5A$
I_{CES}	Zero Gate Voltage Collector Current	—	—	250	μA	$V_{GE} = 0V, V_{CE} = 600V$
		—	—	2.0		$V_{GE} = 0V, V_{CE} = 10V, T_J = 25^\circ\text{C}$
		—	—	1000		$V_{GE} = 0V, V_{CE} = 600V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GES}	Gate-to-Emitter Leakage Current	—	—	± 100	nA	$V_{GE} = \pm 20V$

Switching Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Q_g	Total Gate Charge (turn-on)	—	27	41	nC	$I_C = 6.5A$ $V_{CC} = 400V$ $V_{GE} = 15V$ See Fig. 8
Q_{ge}	Gate - Emitter Charge (turn-on)	—	4.5	6.8		
Q_{gc}	Gate - Collector Charge (turn-on)	—	10	16		
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	21	—	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $I_C = 6.5A, V_{CC} = 480V$ $V_{GE} = 15V, R_G = 50\Omega$ Energy losses include "tail" See Fig. 10, 11, 13, 14
t_r	Rise Time	—	13	—		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	86	130		
t_f	Fall Time	—	120	180		
E_{on}	Turn-On Switching Loss	—	0.10	—	mJ	See Fig. 10, 11, 13, 14
E_{off}	Turn-Off Switching Loss	—	0.12	—		
E_{ts}	Total Switching Loss	—	0.22	0.4		
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	20	—	ns	$T_J = 150^\circ\text{C}$, $I_C = 6.5A, V_{CC} = 480V$ $V_{GE} = 15V, R_G = 50\Omega$ Energy losses include "tail" See Fig. 13, 14
t_r	Rise Time	—	14	—		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	190	—		
t_f	Fall Time	—	140	—		
E_{ts}	Total Switching Loss	—	0.42	—	mJ	
L_E	Internal Emitter Inductance	—	7.5	—	nH	Measured 5mm from package
C_{ies}	Input Capacitance	—	530	—	pF	$V_{GE} = 0V$ $V_{CC} = 30V$ $f = 1.0MHz$ See Fig. 7
C_{oes}	Output Capacitance	—	39	—		
C_{res}	Reverse Transfer Capacitance	—	7.4	—		

Notes:

- ① Repetitive rating; $V_{GE} = 20V$, pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 13b)
- ② $V_{CC} = 80\%(V_{CES}), V_{GE} = 20V, L = 10\mu H, R_G = 50\Omega$, (See fig. 13a)
- ③ Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature.
- ④ Pulse width $\leq 80\mu s$; duty factor $\leq 0.1\%$.
- ⑤ Pulse width $5.0\mu s$, single shot.

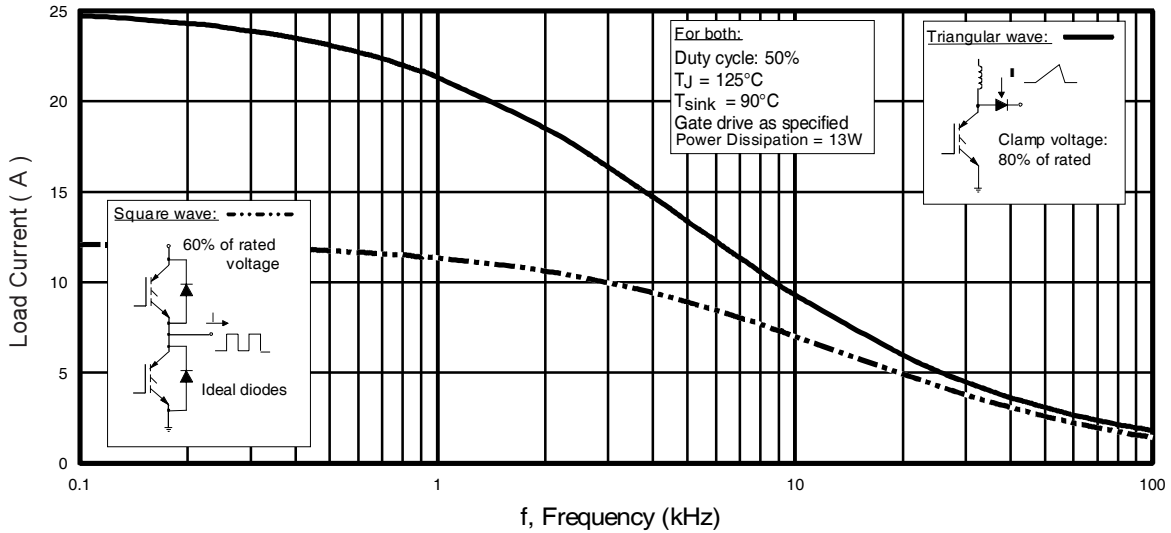


Fig. 1 - Typical Load Current vs. Frequency
(For square wave, $I = I_{RMS}$ of fundamental; for triangular wave, $I = I_{PK}$)

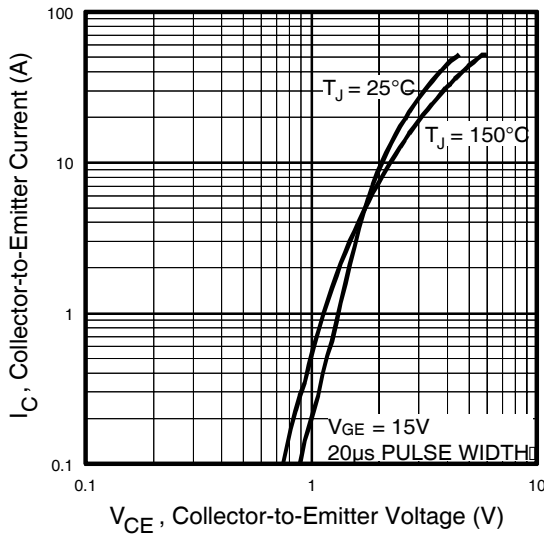


Fig. 2 - Typical Output Characteristics

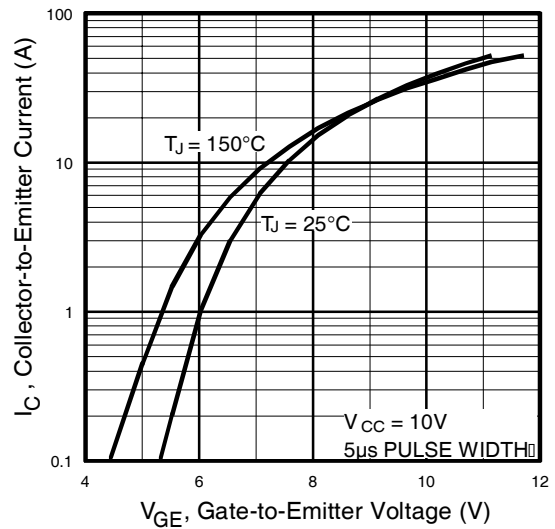


Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

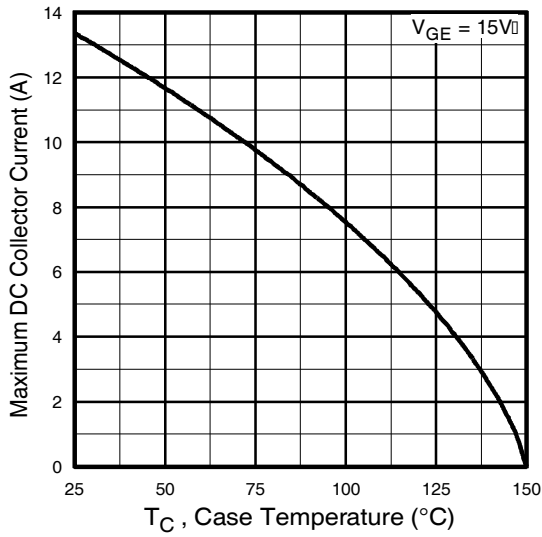


Fig. 4 - Maximum Collector Current vs. Case Temperature

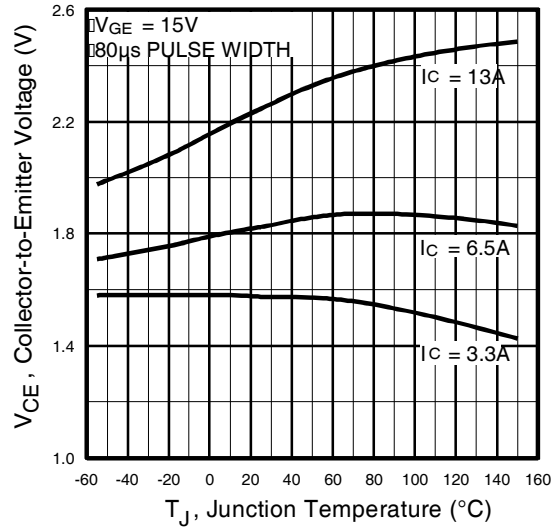


Fig. 5 - Collector-to-Emitter Voltage vs. Junction Temperature

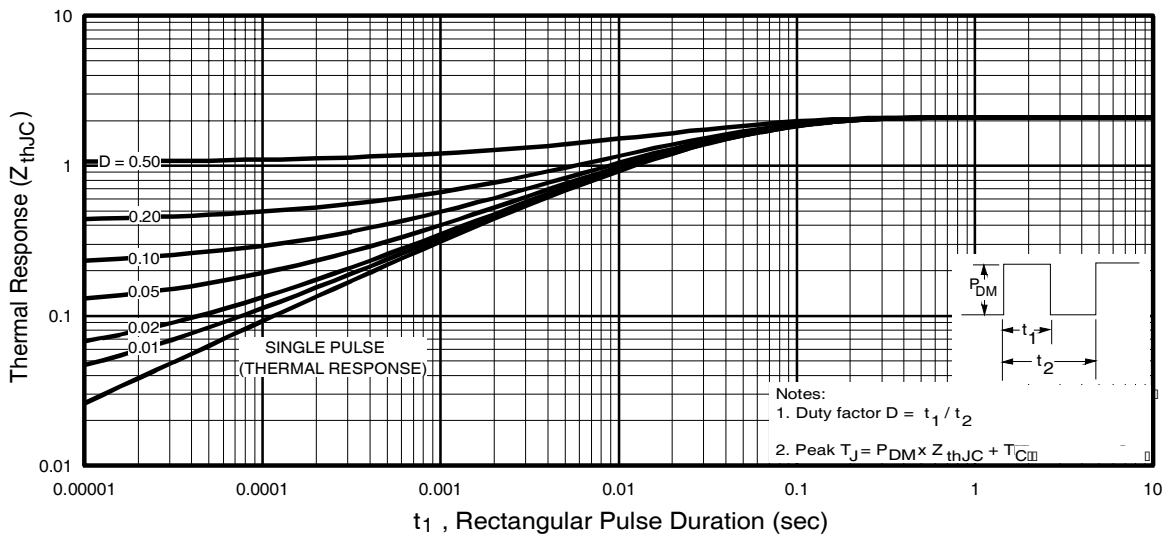


Fig. 6 - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

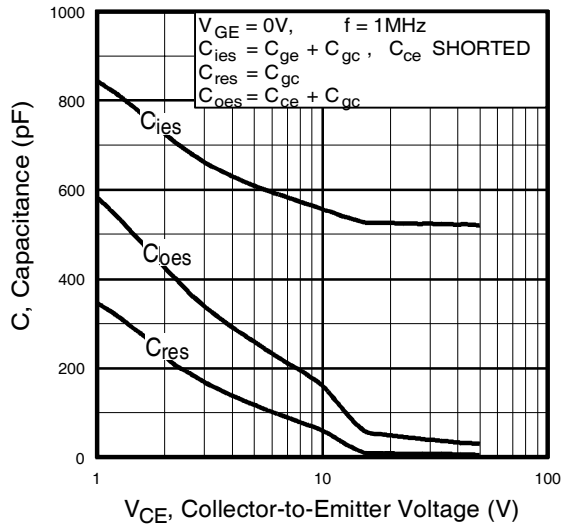


Fig. 7 - Typical Capacitance vs. Collector-to-Emitter Voltage

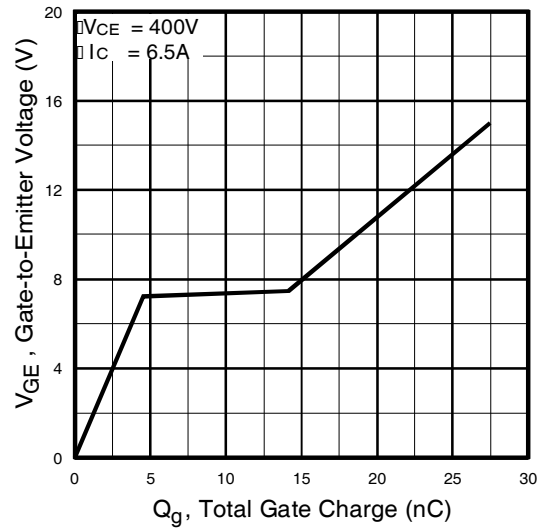


Fig. 8 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Emitter Voltage

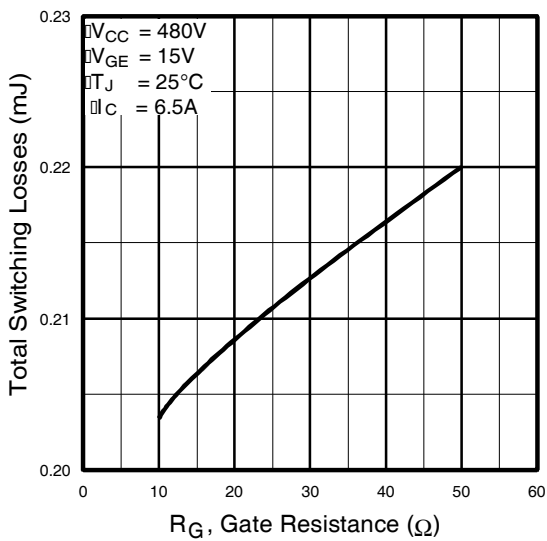


Fig. 9 - Typical Switching Losses vs. Gate Resistance

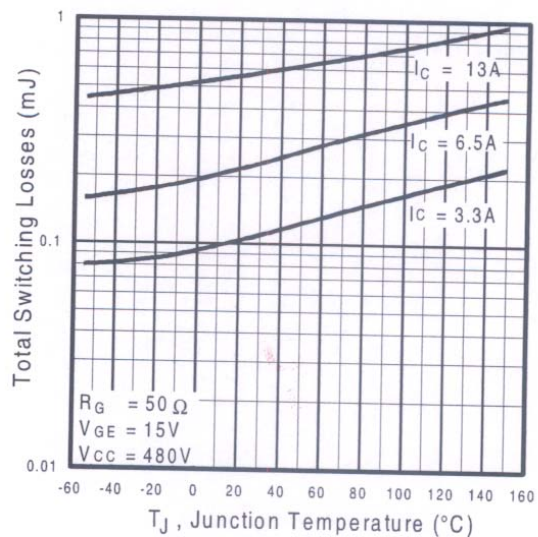


Fig. 10 - Typical Switching Losses vs. Junction Temperature

IRG4BC20UPbF

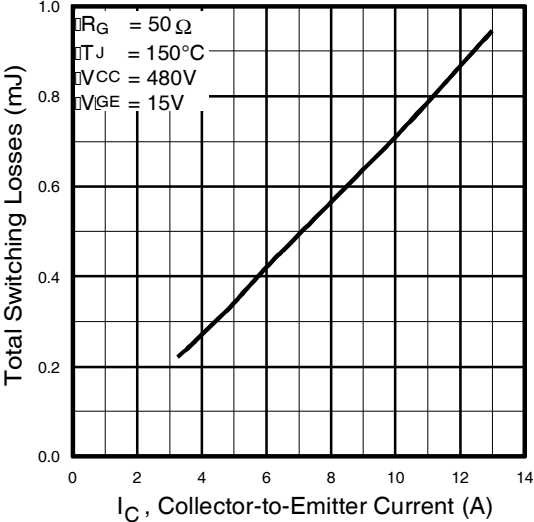


Fig. 11 - Typical Switching Losses vs. Collector-to-Emitter Current

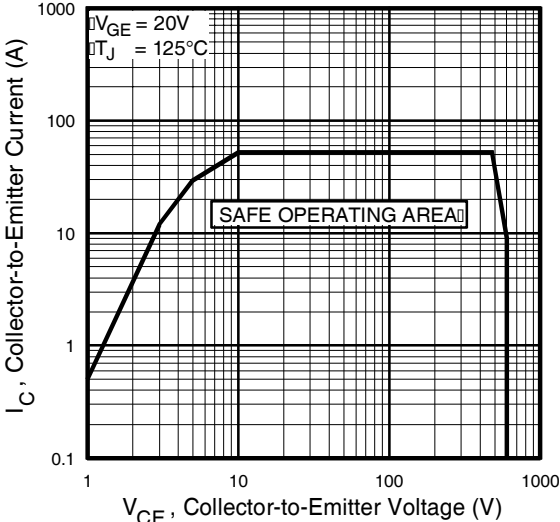


Fig. 12 - Turn-Off SOA

Tentti 17.12.2012 RATKAISUT

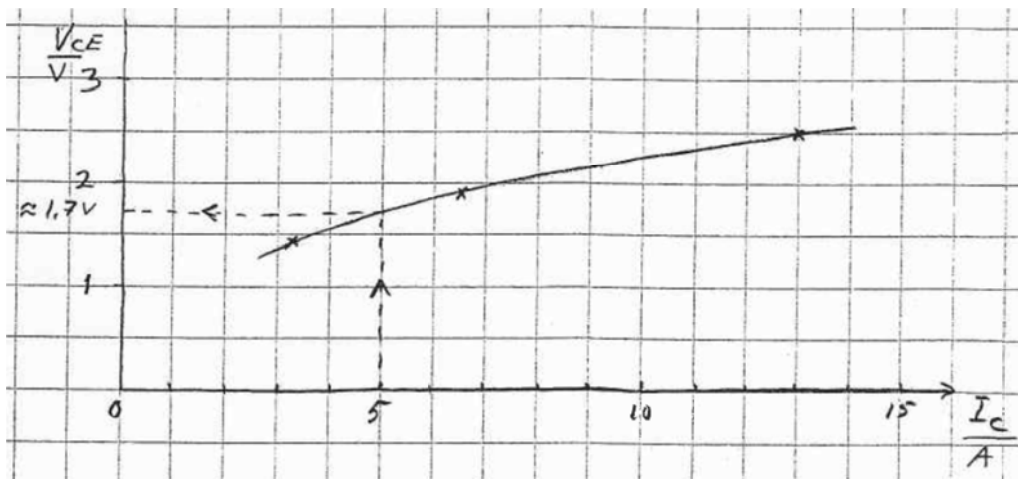
Tehtävät 1-3: Katso kirja

Tehtävä 4

Johtohäviöt:

Suoraan kuvasta 2 saadaan 5 A virralle viivottimella mittaamalla: $V_{CE} = 1 \text{ V} \cdot 10^{\frac{6,5 \text{ mm}}{28 \text{ mm}}} \approx 1.7 \text{ V}$

tai vaihtoehtoisesti kuvasta 5 aukipiirtämällä:



Siis häviöenergia yhden virtapulssin ajalta on

$$E_{H \text{ cond}} = V_{CE} I_C t_{\text{on}} \approx 1.7 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} \cdot 20 \mu\text{s} \approx 170 \mu\text{J}$$

Kytkenhäviöt:

Kuvissa 9, 10 ja 11 on kaikissa päällekytkentä- ja katkaisuhäviöiden summa annettu 480 V jännitteelle. Nyt päällekytkennän aikana jännite on 360 V ja katkaisussa 500 V. Numeroarvoista nähdään (switching characteristics) lisäksi että 25 °C lämpötilassa suhde $E_{t \text{ on}}/E_{t \text{ off}} = 0,1 \text{ mJ}/0,12 \text{ mJ} \approx 0,833$. Oletetaan, että sama suhde pätee myös isommassa lämpötiloissa.

Kuvasta 11 saadaan 5 A virralla ja 480 V jännitteellä $E_{ts} = 340 \mu\text{J}$ joten jaettuna energiat ovat

$$E_{t \text{ on}} = \frac{0,1 \text{ mJ}}{0,22 \text{ mJ}} 340 \mu\text{J} \approx 155 \mu\text{J}$$

$$E_{t \text{ off}} = \frac{0,12 \text{ mJ}}{0,22 \text{ mJ}} 340 \mu\text{J} \approx 185 \mu\text{J}$$

Jos oletetaan häviöiden olevan verrannollisia jännitteeseen, ovat kytkentähäviöt

$$E_{\text{ton}} = \frac{360 \text{ V}}{480 \text{ V}} 155 \mu\text{J} \approx 116 \mu\text{J}$$

$$E_{\text{toff}} = \frac{500 \text{ V}}{480 \text{ V}} 185 \mu\text{J} \approx 193 \mu\text{J}$$

Siten

$$P_{\text{Havé}} = \frac{1}{T} (E_{\text{Hcond}} + E_{\text{ton}} + E_{\text{toff}}) = \frac{1}{40 \mu\text{s}} (170 \mu\text{J} + 116 \mu\text{J} + 193 \mu\text{J}) \approx 12,0 \text{ W}$$

Määritetään kuoren lämpötila kuvan 6 perusteella. Keskimääräinen teho pelkälle johtoajalle laskettuna on

$$P_{\text{DM}} = \frac{T}{t_{\text{on}}} P_{\text{Havé}} = \frac{40 \mu\text{s}}{20 \mu\text{s}} 12,0 \text{ W} \approx 24,0 \text{ W}$$

Kuvasta 6 kun $D = \frac{t_{\text{on}}}{T} = \frac{20 \mu\text{s}}{40 \mu\text{s}} = 0,5$ ja $t_1 = t_{\text{on}} = 20 \mu\text{s}$ saadaan

$$Z_{\text{thJC}} \approx 1,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

Siten

$$T_{\text{C}} = T_{\text{J}} - P_{\text{DM}} Z_{\text{thJC}} = 150 \text{ } ^\circ\text{C} - 24 \text{ W} \cdot 1,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} = 124 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jäähdytyslementin lämpövastuksen on siten oltava

$$R_{\text{thSA}} \leq \frac{T_{\text{C}} - T_{\text{A}}}{P_{\text{Havé}}} - R_{\text{thCS}} = \frac{124 \text{ } ^\circ\text{C} - 45 \text{ } ^\circ\text{C}}{12 \text{ W}} - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \approx 6,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

=====

=====

Tehtävä 5

Keskimääräinen häviöteho koko 20 ms jakson ajalta on

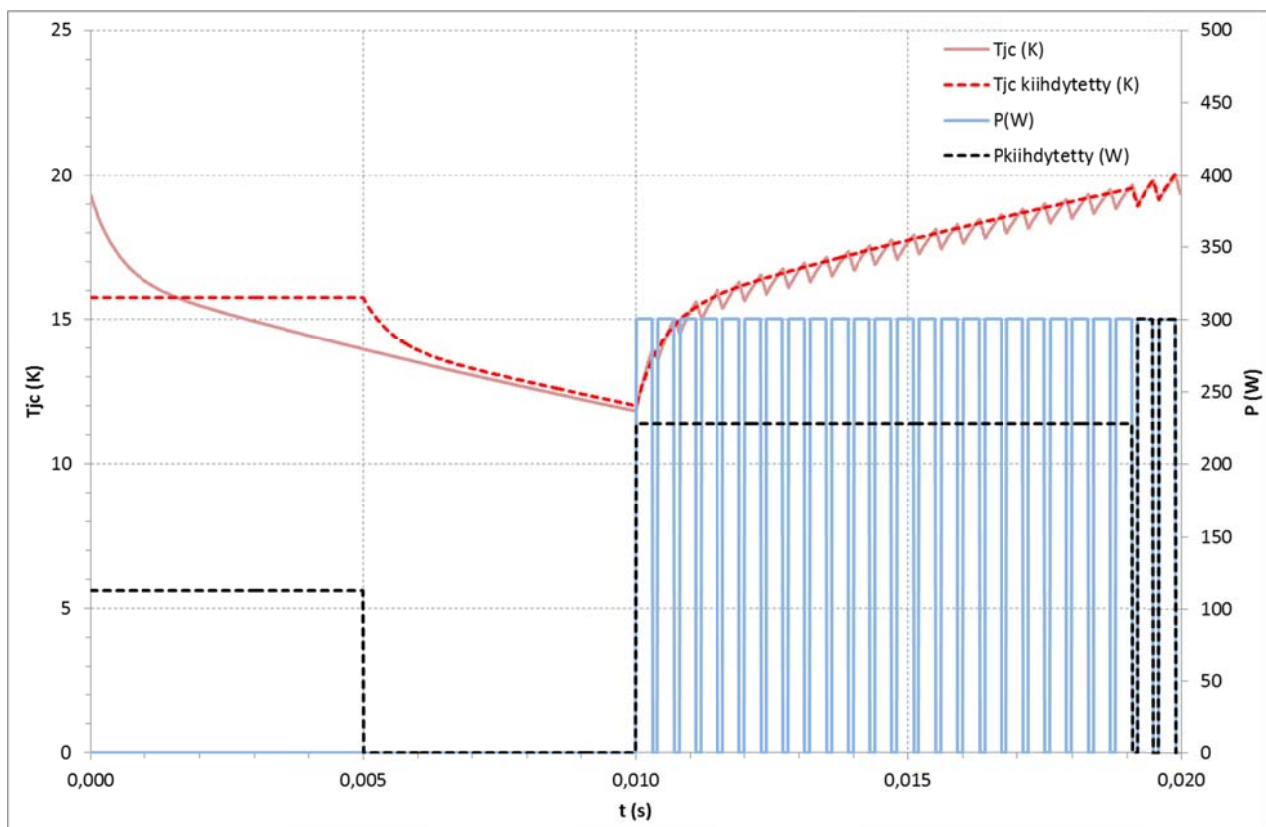
$$\bar{P}_H = \frac{25 \cdot 300 \text{ W} \cdot 300 \mu\text{s}}{20 \text{ ms}} = 112,5 \text{ W}$$

Kiihdytetyn superpositioperiaatteen mukaisesti tämä sijoitetaan loppuvaksi puoleen väliin pulssipaketteja. Väli on 10 ms, joten keskimääräisen tehon loppumisesta seuraavan pulssipaketin alkuun on 5 ms aikaa.

Kirjan ohje pulssipaketeille on laskea vain pari viimeisintä pulssia tarkasti ja korvata pulssipaketin alkuosa yhdellä ekvivalenttisella pulssilla. Paketissa on 25 pulssia, joten ekvivalenttiseen pulssiin jää 23 pulssia, joiden keskimääräinen teho on

$$\bar{P}'_H = \frac{23 \cdot 300 \text{ W} \cdot 300 \mu\text{s}}{22 \cdot 400 \mu\text{s} + 300 \mu\text{s}} \approx 227,5 \text{ W}$$

Pulssien sijoittelu käy ilmi seuraavasta kuvasta



Valmistaja on antanut muutoslämpövastuskäyrän sekä graafisesti että sarjakehitelmänä:

$$Z_{th,jc}(t) = 0,126 \frac{K}{W} \left(1 - e^{-\frac{t}{30 \text{ ms}}} \right) + 0,014 \frac{K}{W} \left(1 - e^{-\frac{t}{0,5 \text{ ms}}} \right)$$

Lämpötila pulssipaketin viimeisen pulssin lopussa saadaan edellisen sivun kuvan aikaskaalalla

$$\begin{aligned}
 T_{jc}(19,9 \text{ ms}) &= \bar{P}_H [Z_{th,jc}(\infty) - Z_{th,jc}(19,9 \text{ ms} - 5 \text{ ms})] \\
 &+ \bar{P}_H [Z_{th,jc}(19,9 \text{ ms} - 10 \text{ ms}) - Z_{th,jc}(19,9 \text{ ms} - 19,1 \text{ ms})] \\
 &+ \hat{P}_H [Z_{th,jc}(19,9 \text{ ms} - 19,2 \text{ ms}) - Z_{th,jc}(19,9 \text{ ms} - 19,5 \text{ ms})] \\
 &+ \hat{P}_H Z_{th,jc}(19,9 \text{ ms} - 19,6 \text{ ms})
 \end{aligned}$$

Ylläolevan kaavan muutoslämpövastuksien arvoiksi saadaan hiukan poikkeavat arvot riippuen siitä käyttääkö kaavaa vaiko käyrää. Käyrästä antaa hiukan isommat arvot mikä voi olla valmistajan taholta tarkoituksellistakin lukutarkkuuden takia.

t	$Z_{th,jc}(t)$ kaavasta	$Z_{th,jc}(t)$ käyrästä
∞ ms	0,14 K/W	0,15 K/W
14,9 ms	0,0633 K/W	0,065 K/W
9,9 ms	0,0494 K/W	0,053 K/W
0,8 ms	0,0145 K/W	0,015 K/W
0,7 ms	0,0135 K/W	0,014 K/W
0,4 ms	0,0094 K/W	0,010 K/W
0,3 ms	0,0076 K/W	0,008 K/W

Jos käyttää käyrästä arvoja saa tulokseksi

$$\begin{aligned}
 T_{jc}(19,9 \text{ ms}) &= 112,5 \text{ W} [0,15 \text{ K/W} - 0,065 \text{ K/W}] \\
 &+ 227,5 \text{ W} [0,053 \text{ K/W} - 0,015 \text{ K/W}] \\
 &+ 300 \text{ W} [0,014 \text{ K/W} - 0,010 \text{ K/W}] \\
 &+ 300 \text{ W} \cdot 0,008 \text{ K/W} \\
 &= 21,8 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Kaavasta saatavilla arvoilla lämpenemä on

$$\begin{aligned}
 T_{jc}(19,9 \text{ ms}) &= 112,5 \text{ W} [0,14 \text{ K/W} - 0,0633 \text{ K/W}] \\
 &+ 227,5 \text{ W} [0,0494 \text{ K/W} - 0,0145 \text{ K/W}] \\
 &+ 300 \text{ W} [0,0135 \text{ K/W} - 0,0094 \text{ K/W}] \\
 &+ 300 \text{ W} \cdot 0,0076 \text{ K/W} \\
 &= 20,1 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Edellisen sivun kuvaan on piirretty $Z_{th,jc}$ kaava-arvoihin perustuvan kiihdytetyn superpositiomenetelmän lisäksi myös kirjan kaavoilla (8.14) ja (8.15) laskettu lämpenemän käyttäytyminen. Kuten näkyy, kiihdytetty superpositiomenetelmä antaa ainakin tässä tapauksessa hyvin tarkasti saman tuloksen.