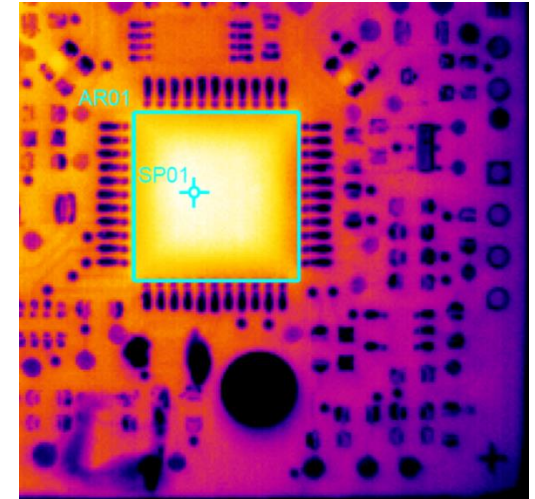


Università degli Studi di Pavia
Facoltà di Ingegneria, aula 8
28 maggio 2014 ore 14.00



SEMINARIO SULLA CARATTERIZZAZIONE TERMICA DI CIRCUITI ELETTRONICI

FERDINANDO SEVERI

INGEGNERE ELETTRONICO LIBERO PROFESSIONISTA

NELL'AMBITO DEL CORSO LABORATORIO DI ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI
ORGANIZZATO DAL DOCENTE PROF. CARLA VACCHI

LinkedIn  Ferdinando Severi

severiferdinando@gmail.com

CONTENUTO

- calore e sua propagazione
- modellizzazione termica
- misurazione della temperatura
- caratterizzazione $R_{\theta,jc}$
- fondamenti su MOSFET di potenza
- analisi regolatore switching
- il problema termico: cause e conseguenze
- analisi di qualche package di esempio
- caso pratico: analisi di un DC/DC converter:
 - datasheet
 - caratterizzazione dell'efficienza
 - analisi termica e computo $R_{\theta,jc}$, T_j

DEFINIZIONE DI CALORE

- Calore è una forma di energia che viene scambiata in presenza di un gradiente di temperatura.
- Il primo principio della termodinamica descrive gli effetti del passaggio di calore:

$$\Delta U = Q - W$$

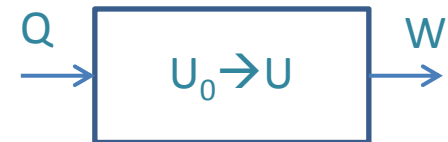
principio di conservazione dell'energia

ΔU = variazione di energia interna del sistema

Q = il calore assorbito dal sistema

W = il lavoro compiuto dal sistema

- Le conseguenze del passaggio di calore possono quindi essere:
variazione di energia interna o azione di lavoro



DEFINIZIONE DI CALORE

- Una trasformazione è adiabatica quando non avviene scambio di calore:

$$\Delta U = -W \quad \text{trasformazione adiabatica}$$

- In assenza di lavoro compiuto dal sistema:

$$\Delta U = Q \quad \text{trasformazione isocora}$$

- In conseguenza al secondo principio della termodinamica: il calore fluisce dai punti a temperatura maggiore a quelli a temperatura minore, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico, e tale processo è irreversibile.
- Un sistema è in equilibrio termico quando tutti i suoi punti sono alla stessa temperatura, per cui non avvengono scambi di calore (principio zero della termodinamica).

DEFINIZIONE DI TEMPERATURA

- All'equilibrio termico, la temperatura di un gas è una grandezza proporzionale a pressione p e volume V di esso:

$$pV = kNT \quad \text{eq. del gas perfetto}$$

$$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \quad \text{costante di Boltzmann}$$

N = numero di molecole

- Dallo studio della fisica dei gas deriva la concezione della temperatura di un corpo (gas, liquido, solido, plasma), intesa come grandezza correlata all'energia cinetica media del moto disordinato delle sue particelle.

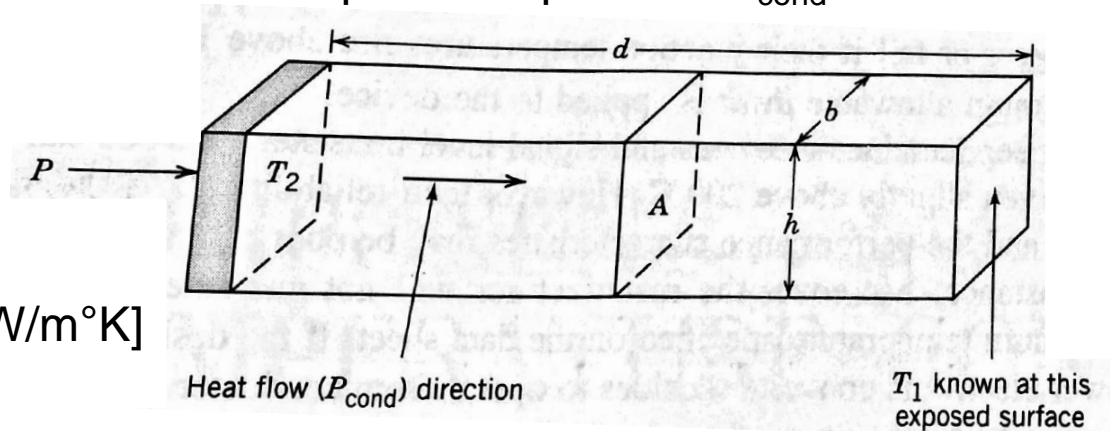
PROPAGAZIONE DEL CALORE: CONDUZIONE

- Avviene tra corpi a contatto, o all'interno di uno stesso materiale, in presenza di una differenza di temperatura.
- Consiste nella trasmissione, per urti, di energia cinetica tra le particelle appartenenti a zone limitrofe del materiale: viene trasferita energia attraverso la materia, ma senza movimento macroscopico di particelle.
- Il flusso di energia termica nell'unità di tempo è una potenza P_{cond} :

$$P_{cond} = \lambda \frac{A}{d} \Delta T$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

λ = conducibilità termica [W/m°K]



PROPAGAZIONE DEL CALORE: CONDUZIONE

Table 13.5 Thermal conductivity of materials commonly used in packaging

Material	Thermal conductivity ($\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Copper	390.00
Silicon	150.00
Glass (Silicon Oxide, SiO_2)	0.60
Silicon Carbide (SiC)	85.00
Aluminium	210.00
Aluminium Nitride (AlN)	150.00
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	30.00
Resin (Standard packages)	0.71
Resin (Isolated packages)	2.51
Mica	0.50
Air	0.03

FR-4 (Flame Retardant woven glass fabric epoxy resin) used for PCBs:

Thermal conductivity (through plane) $0.29 \div 0.34 \text{ W/m}^\circ\text{K}$

Thermal conductivity (in plane) $0.8 \div 1 \text{ W/m}^\circ\text{K}$

PROPAGAZIONE DEL CALORE: CONDUZIONE

- In analogia con il dominio elettrico, si definisce la resistenza termica $R_{\theta,cond}$:

$$R_{\theta,cond} = \frac{d}{\lambda A} \quad \text{in } [^{\circ}\text{C}/\text{W}]$$

ottenendo così:

$$\Delta T = R_{\theta,cond} P_{cond}$$

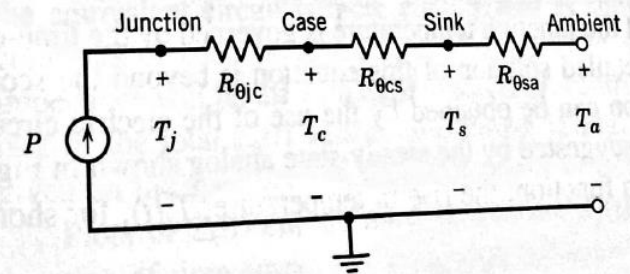
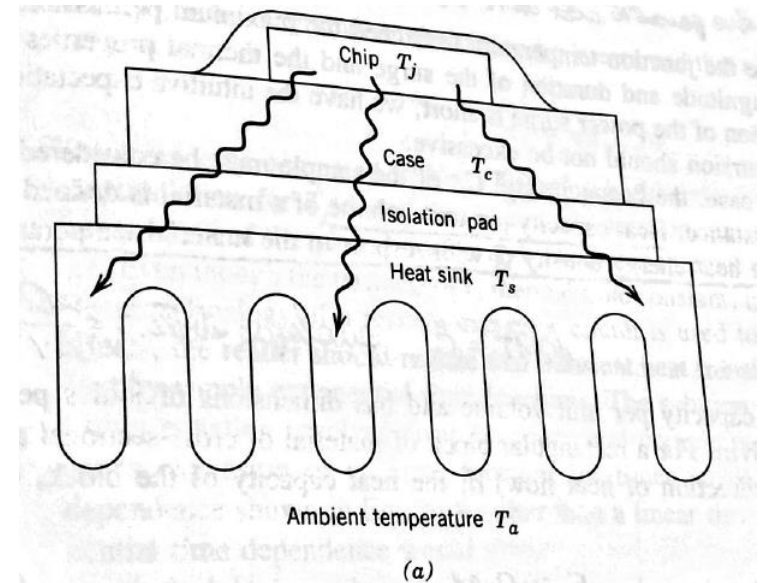
- Per il modello in figura quindi:

$$T_j = T_a + (R_{\theta,jc} + R_{\theta,cs} + R_{\theta,sa}) P_{diss}$$

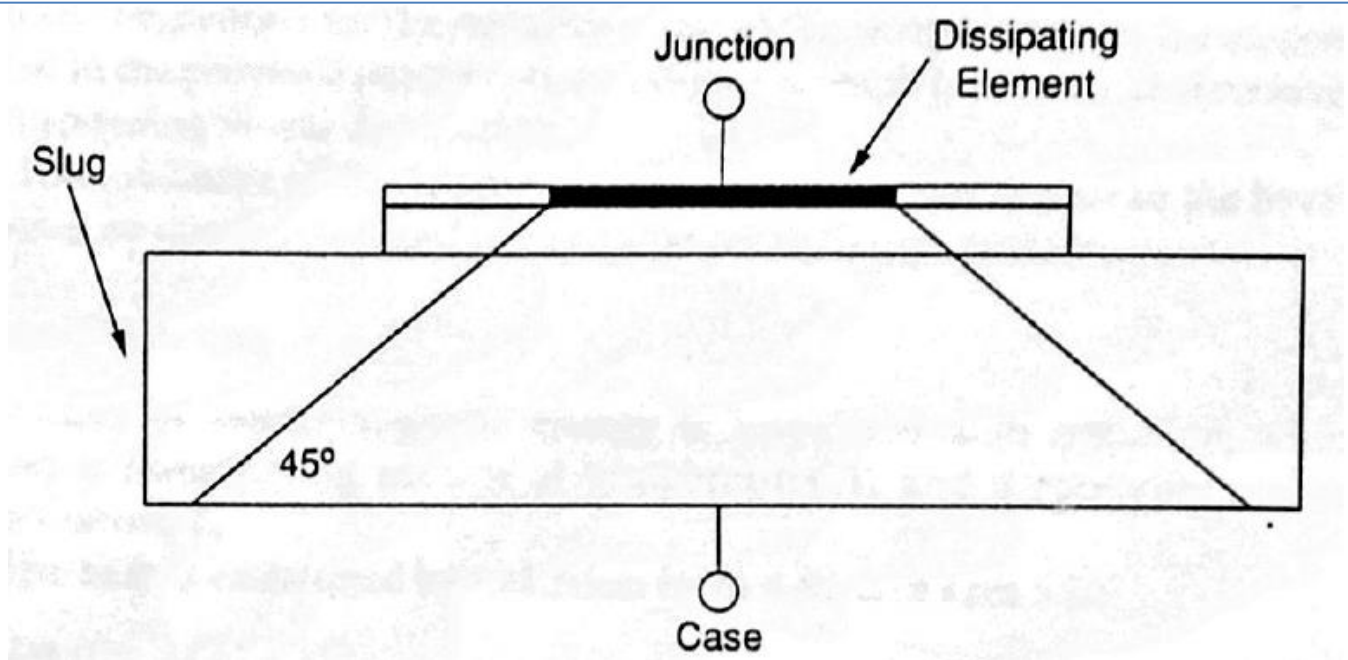
Maggiore R_{θ} , maggiore la ΔT ai suoi capi.

- Misurando $P_{diss}=2,5\text{W}$, nota $R_{\theta,tot}=30^{\circ}\text{C}/\text{W}$:

$$T_j = 40^{\circ}\text{C} + (2,5 \cdot 30)^{\circ}\text{C} = 115^{\circ}\text{C}$$



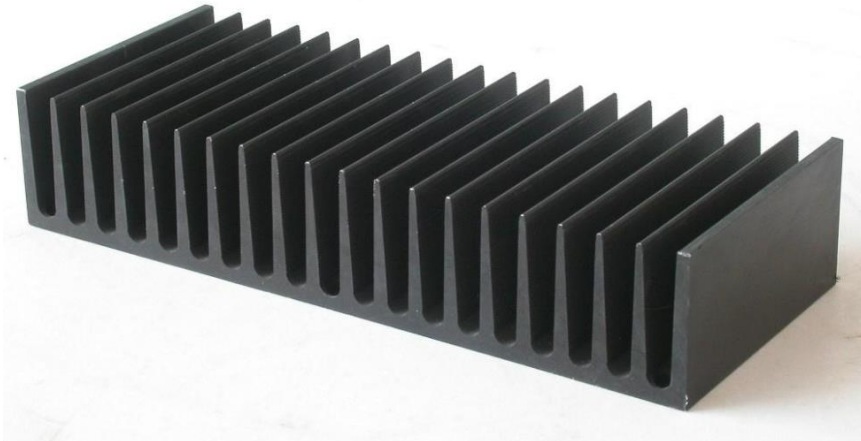
PROPAGAZIONE DEL CALORE: CONDUZIONE



- Ai fini del computo della R_{θ} , si può considerare il modello semplificato di dissipazione del calore per conduzione in figura, secondo cui la propagazione attraverso gli elementi dissipativi è circoscritta in un cono di 45° (molto conservativo).

PROPAGAZIONE DEL CALORE: CONVEZIONE

- Legata al movimento di fluidi, si verifica soprattutto per differenza tra le densità dei fluidi stessi al variare della temperatura.
- In un fluido in movimento, porzioni del fluido possono scaldarsi o raffreddarsi per conduzione venendo a contatto con superfici esterne e poi, nel corso del loro moto, trasferire per conduzione l'energia acquistata ad altre superfici, dando così luogo ad un trasferimento di calore.
- Si parla di convezione naturale e convezione forzata, quest'ultima in presenza di ventilazione.



PROPAGAZIONE DEL CALORE: CONVEZIONE

- La resistenza termica $R_{\theta,sa}$ è fornita dai produttori di dissipatori.
- Può essere calcolata approssimativamente:

$$R_{\theta,conv} = \frac{1}{1,34A} \left(\frac{h}{T_s - T_a} \right)^{0,25} \quad \text{in } [^{\circ}\text{C}/\text{W}]$$

A = superficie di scambio [m^2]

h = altezza [m]

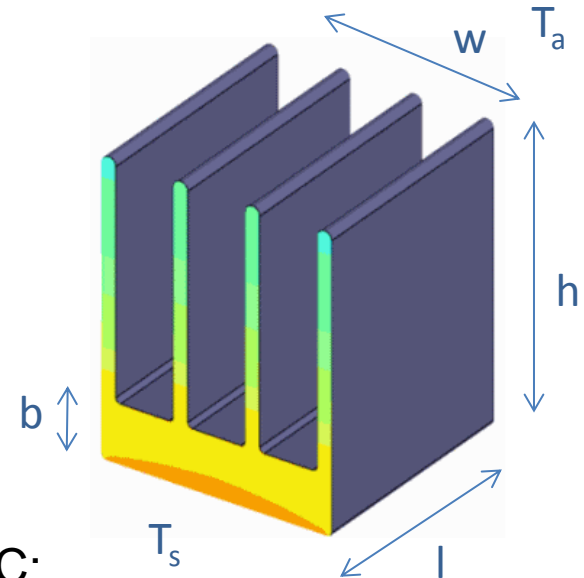
Mohan, Underland, Robbins: Power Electronics, 1989

- Per il modello in figura quindi, assumendo $h=3\text{cm}$, $l=3\text{cm}$, $w=3\text{cm}$, $b=0,5\text{cm}$, $T_a=40^{\circ}\text{C}$, $T_s=65^{\circ}\text{C}$:

$$A = lw + 2 \cdot bl + 2 \cdot bw + 4 \cdot 2l(h - b) = 0,0105 \text{ m}^2$$

$$\left(\frac{h}{T_s - T_a} \right)^{0,25} = 0,1861$$

$$R_{\theta,conv,sa} = 13,2 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{W}$$



PROPAGAZIONE DEL CALORE: IRRAGGIAMENTO

- Avviene a distanza, anche in assenza di materia.
- Fisicamente consiste nell'emissione di onde elettromagnetiche generate dagli atomi e molecole eccitati dall'agitazione termica, che si diseccitano emettendo fotoni di frequenza proporzionale alla loro temperatura.
- A basse temperature l'irraggiamento è responsabile di una frazione trascurabile del flusso di calore rispetto convezione e conduzione, ma al crescere della temperatura la sua importanza aumenta rapidamente fino a diventare il principale artefice della trasmissione del calore.
- E' governato dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$P_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon A (T_s^4 - T_a^4)$$

ε = emissività del materiale

- Emissività esprime la capacità di una superficie di emettere radiazione. Viene espressa relativamente come rapporto di energia irradiata dal materiale, rispetto all'energia irradiata da un corpo nero ($\varepsilon = 1$) alla stessa temperatura.
- Dipende da temperatura, angolo di emissione, lunghezza d'onda.

PROPAGAZIONE DEL CALORE: IRRAGGIAMENTO

- Esistono tabelle delle emissività di varie superfici:
alluminio pitturato di nero: $\varepsilon \approx 0,95$
alluminio anodizzato: $\varepsilon \approx 0,55$
PCB pitturata di nero: $\varepsilon \approx 0,92$
- Per il dissipatore considerato prima, assumendolo non pitturato:

$$A = lw + 2 \cdot hl + 2 \cdot bw = 0,0030 \text{ m}^2$$

$$P_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,55 \cdot 0,0030 \cdot (338^4 - 313^4) = 0,323W$$

$$R_{\theta rad} = \Delta T / P_{rad} = 77,4^\circ C/W$$

- Posso ora calcolare la resistenza termica del dissipatore:

$$R_{\theta,sa} = \frac{R_{\theta,conv,sa} R_{\theta,rad,sa}}{R_{\theta,conv,sa} + R_{\theta,rad,sa}} = 11,3^\circ C/W$$

MODELLIZZAZIONE TERMICA

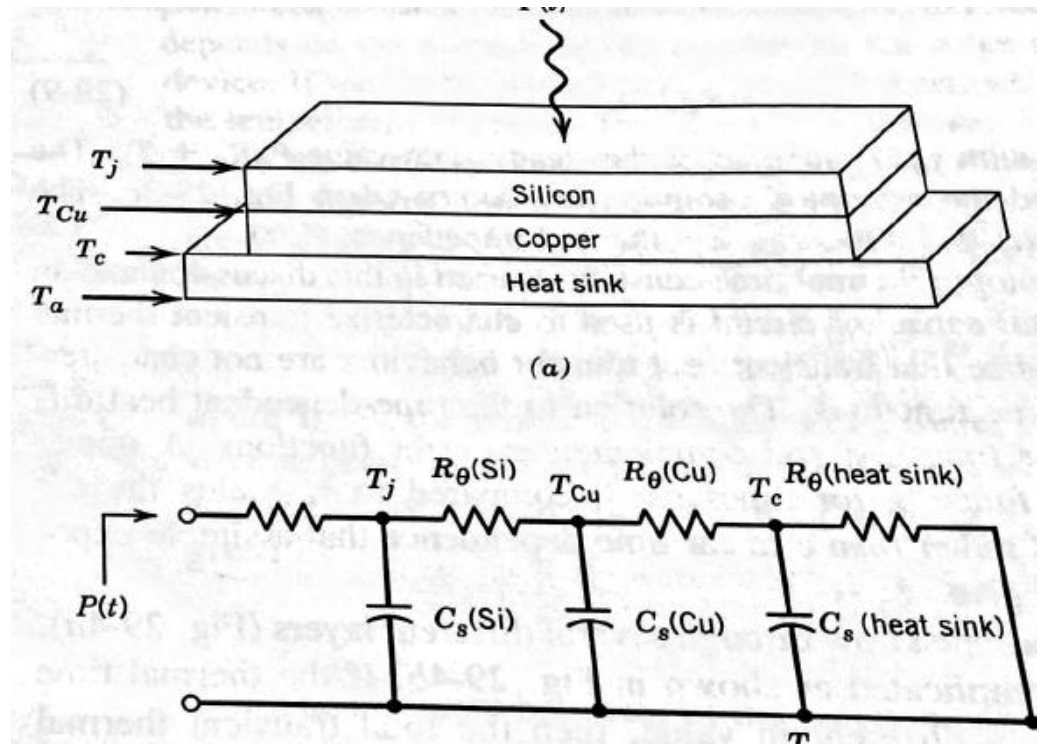
- Analogamente alla resistenza termica R_θ si definisce la capacità termica C_s :

$$C_s = C_v Ah \quad \text{in } [J / ^\circ C]$$

$$C_v = \frac{dQ}{dT} \quad \text{in } [J / m^3 ^\circ C]$$

C_v è la capacità termica per unità di volume, definita come tasso di variazione della densità di energia termica Q rispetto la temperatura T .

Resistenza termica R_θ e capacità termica C_s danno origine a una costante di tempo termica.



MODELLIZZAZIONE TERMICA

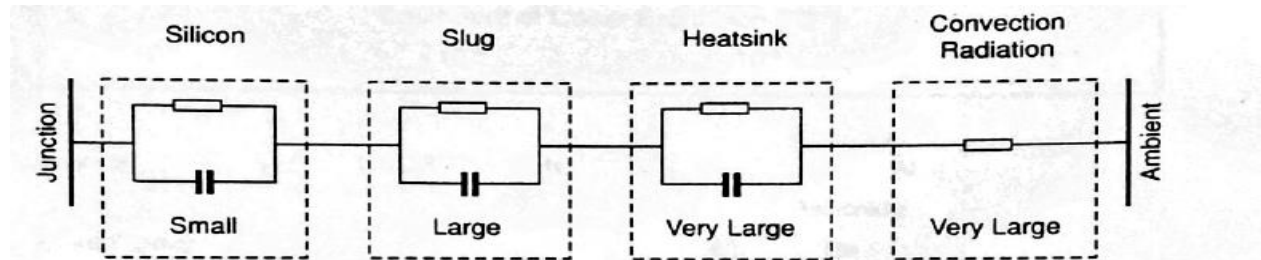
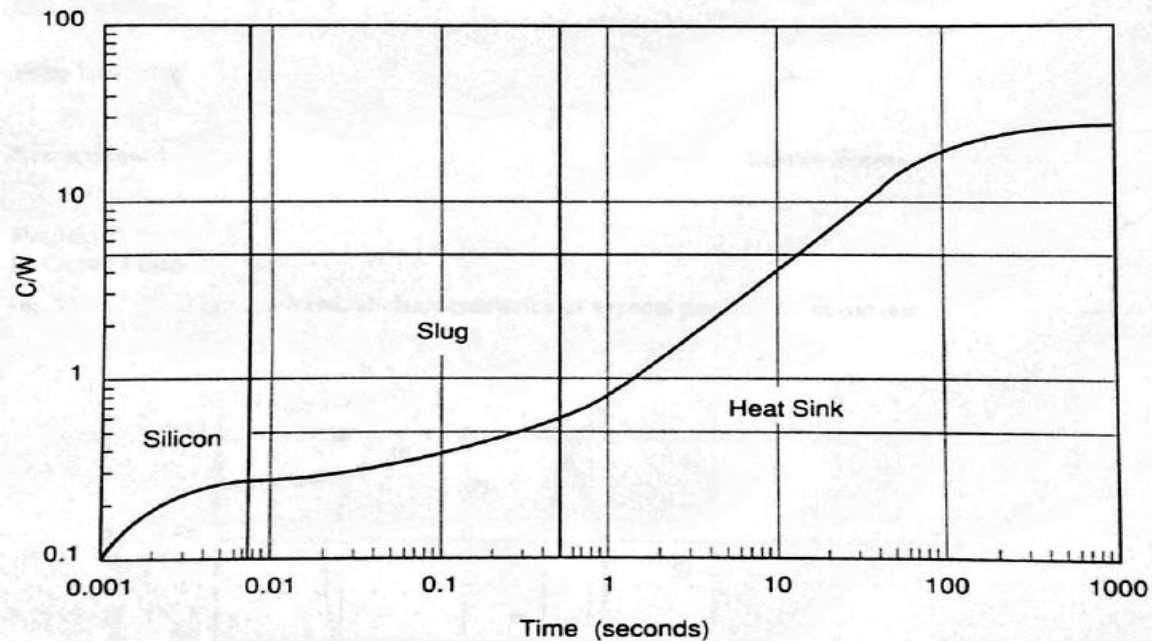


Fig. 13.13 RC equivalent of the thermal chain from junction to ambient

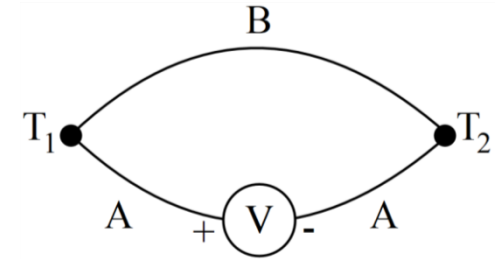


MISURAZIONE DELLA TEMPERATURA

- La misura della temperatura avviene indirettamente, con strumenti che misurano una delle proprietà fisiche del materiale che varia con la temperatura: dilatazione termica, resistenza elettrica, emissione elettromagnetica...
- I termometri sfruttano la dilatazione termica:
 - di un fluido (alcol, mercurio o altro), se ne misura il volume: economico, su un range di temperatura limitato, poco lineare
 - di un gas, se ne misura volume o pressione: molto preciso
 - di metalli, nei termometri a lamina bimetallica impiegante 2 diversi metalli: economico, su un range di temperatura limitato, poco lineare
- I termistori sfruttano la variazione di resistenza con la temperatura di un elemento semiconduttore:
 - NTC, usato come sensore di temperatura, limitazione corrente di spunto
 - PTC, usato come limitatore di corrente per protezione circuiti, come fusibile autoripristinante, bypassabile da relè
- Le termoresistenze sfruttano la variazione di resistenza con la temperatura di un elemento metallico (es. PT100 ha una resistenza in platino di 100Ω a 0°C e 138.4Ω a 100°C): molto precise

MISURAZIONE DELLA TEMPERATURA: TERMOCOPPIA

- La termocoppia sfrutta l'effetto Seebeck: in un circuito formato da conduttori diversi, sottoposto a un gradiente di temperatura, si origina una forza elettromotrice.



- Una giunzione, convenzionalmente chiamata calda, è il punto al quale viene applicata la temperatura da misurare.
- L'altra estremità, costituita dalle estremità libere dei due conduttori, è convenzionalmente chiamata fredda: in presenza di una differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo, si può rilevare una differenza di potenziale elettrico tra le estremità libere del giunto freddo.
- Tipo K (Ni-Cr / Ni-Al): di uso generale, economiche, da -200°C a 1260°C. La sensibilità è di circa 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
- Tipo J (Fe / Cu-Ni): economiche, da -40°C a 750°C, con notevole sensibilità 51,7 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
- Tipo T, E, N, R, S, B...
- Le termocoppie sono largamente diffuse e abbastanza economiche. Sono poco accurate, non lineari, sensibili a disturbi elettromagnetici.

MISURAZIONE DELLA TEMPERATURA: TERMOCAMERA

- I pirometri sono la classe di strumenti che misurano la temperatura basandosi sull'emissione di radiazione elettromagnetica.
- Le termocamere osservano la radiazione nell'infrarosso: consentono misurazione senza contatto, non intrusiva, alta risoluzione spaziale, ampio range di temperatura, costoso, impreciso in maniera assoluta.
- FLIR IR camera A40M:
 - 320x240 pixel
 - Field Of View 64x48 mm min.
 - autofocus
 - ThermaCAM Researcher software



DETERMINAZIONE T_j

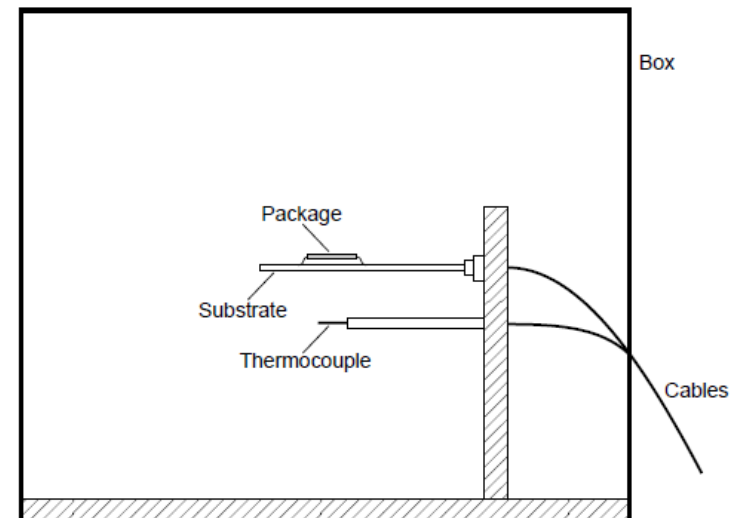
- E' possibile osservare con una termocamera la temperatura di giunzione T_j dell'IC, scavando un foro nel package con acido o con laser, nel punto più caldo. La presenza del foro non deve alterare la $R_{\theta,jc}$.



CARATTERIZZAZIONE $R_{\theta,JC}$

- La caratterizzazione della resistenza termica $R_{\theta,JC}$ di un package avviene secondo gli standard EIA/JEDEC, che identificano 2 tipologie di PCB:
 - Low effective thermal conductivity test board (single layer with fine signal traces)
 - High effective thermal conductivity test board (2 signal layers + 2 power layers)
- La caratterizzazione risulta dipendere fortemente dalle dimensioni della die considerata, dalla lead frame, dalla configurazione e dalle dimensioni del PCB, dalla temperatura ambiente e lievemente dalla potenza in ingresso.
- The forward voltage drop of a calibrated diode incorporated into the package is used to correlate a junction temperature change in the IC package to be tested. As the power dissipation is known, the thermal resistance can then be calculated:

$$\Delta V = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$



CARATTERIZZAZIONE $R_{\theta,JC}$

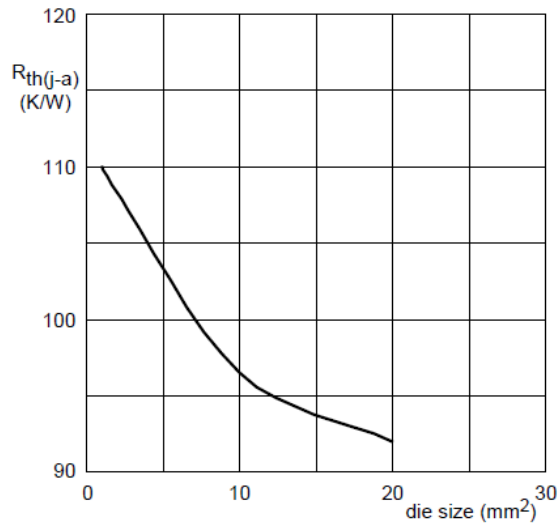


Fig.6 DIP8 (300 mil).

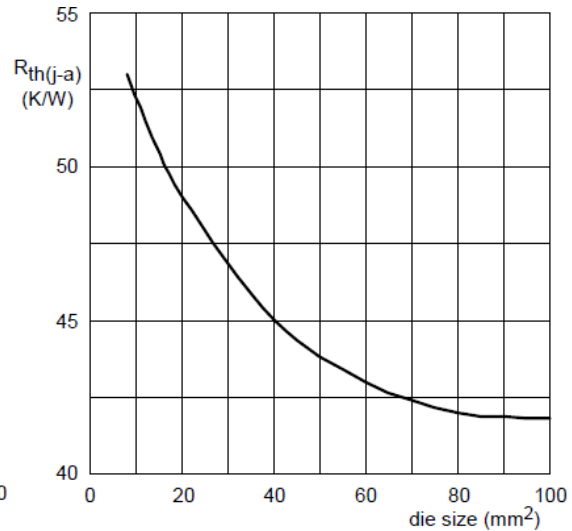


Fig.29 PLCC44 (610 mil).

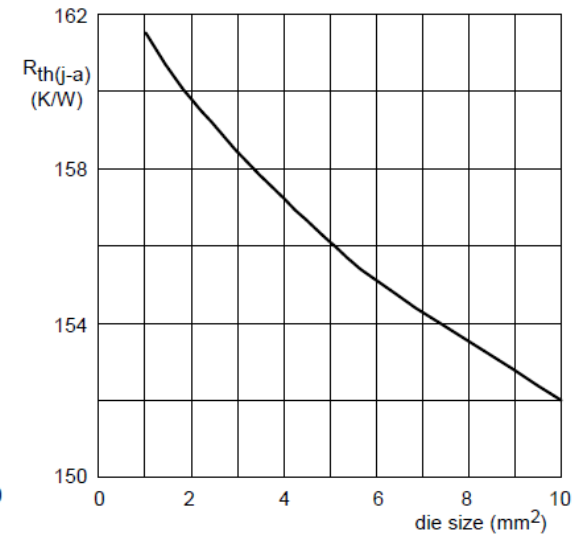
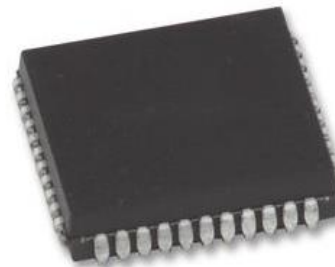


Fig.48 SO8 (150 mil).



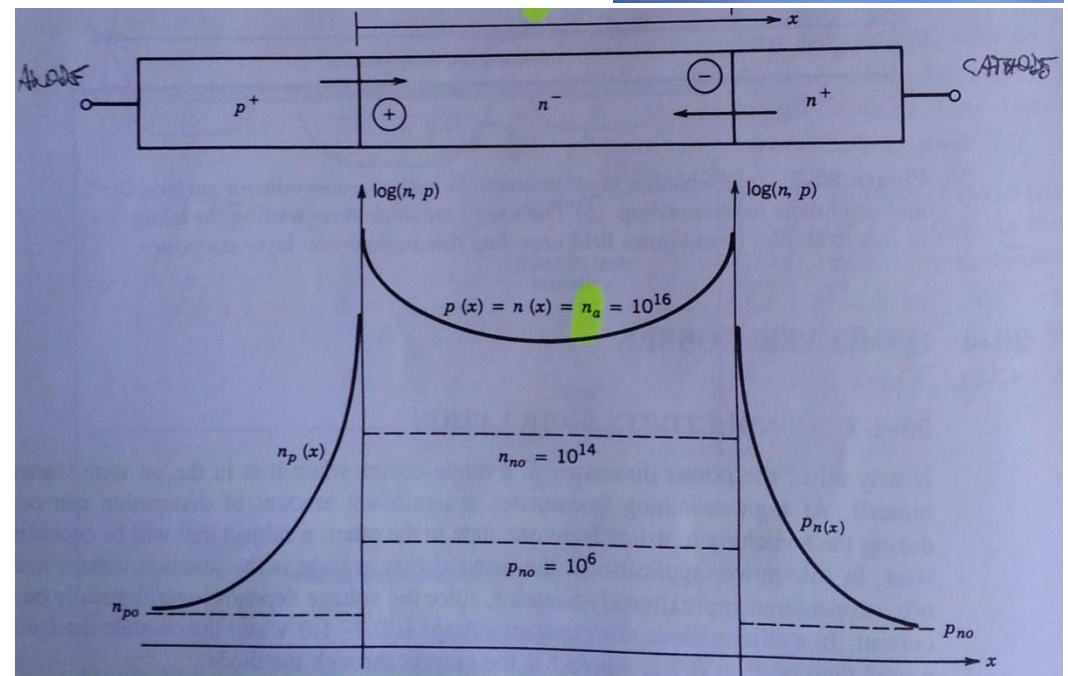
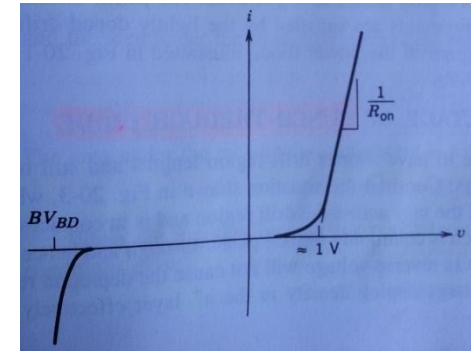
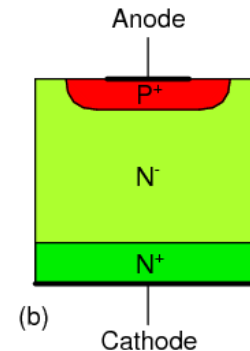
- http://www.nxp.com/documents/thermal_design/IC26_CHAPTER_6.pdf

DIODO DI POTENZA: DESCRIZIONE

- Per consentire al dispositivo di potenza di tenere tensione si introduce la drift region, che in reverse assorbe il depletion layer:

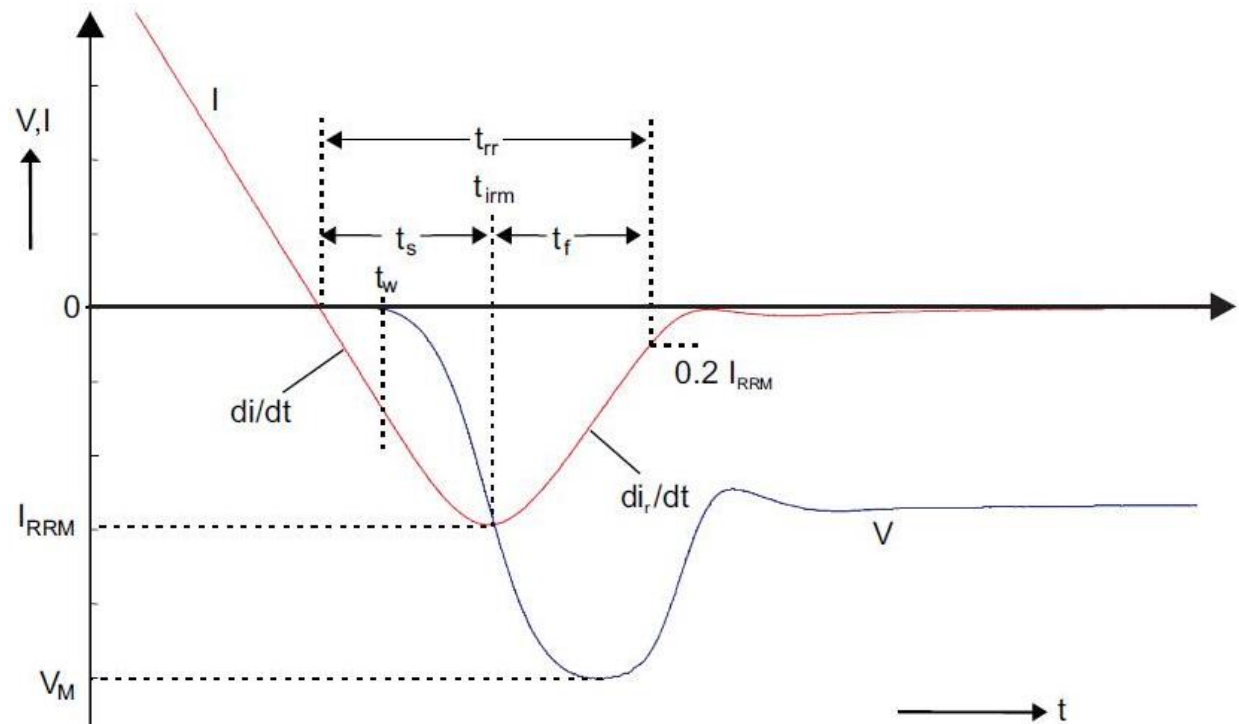
$$BV_{BD} \propto \frac{1}{N_d}$$

- In forward, l'apparente alto valore ohmico della drift region, calcolato sulla base della densità di carica posseduta, è compensato dall'excess carrier injection in drift region, che origina la cosiddetta conductivity modulation.

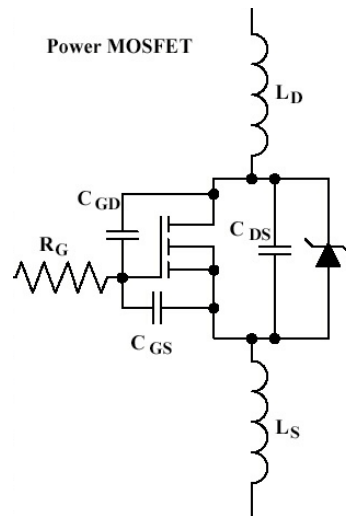
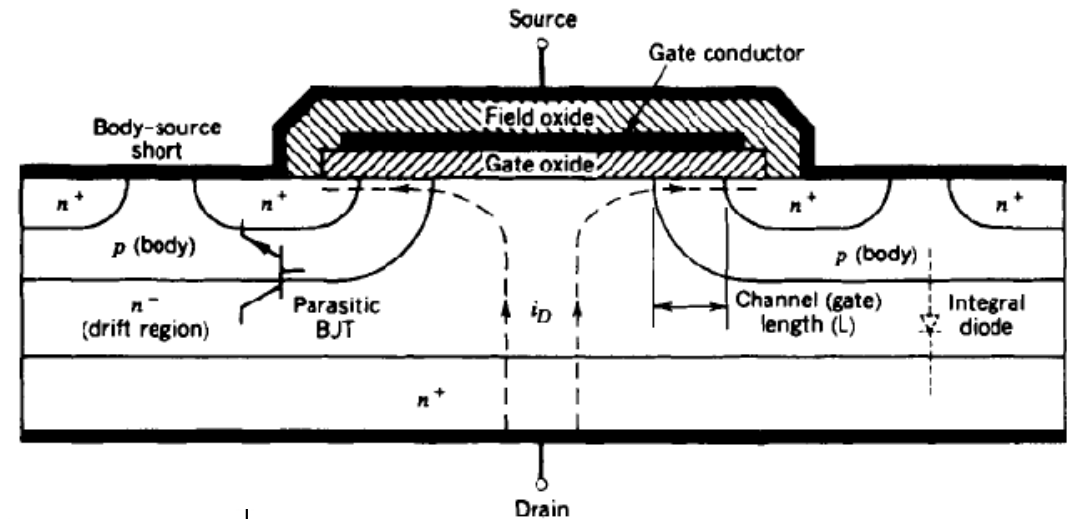
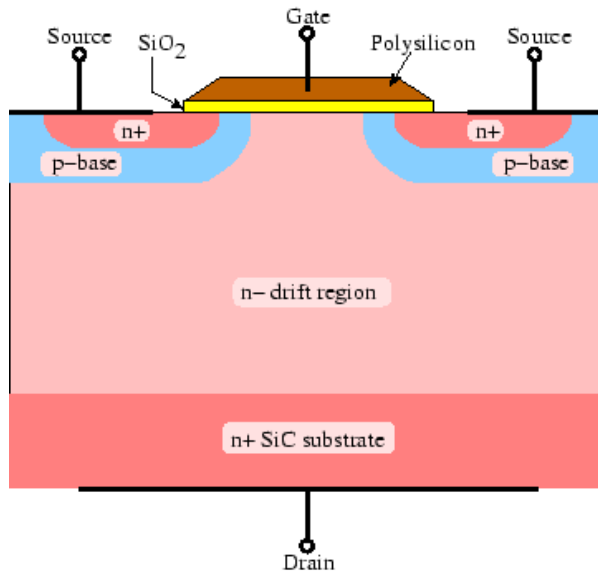


DIODO DI POTENZA: RECOVERY

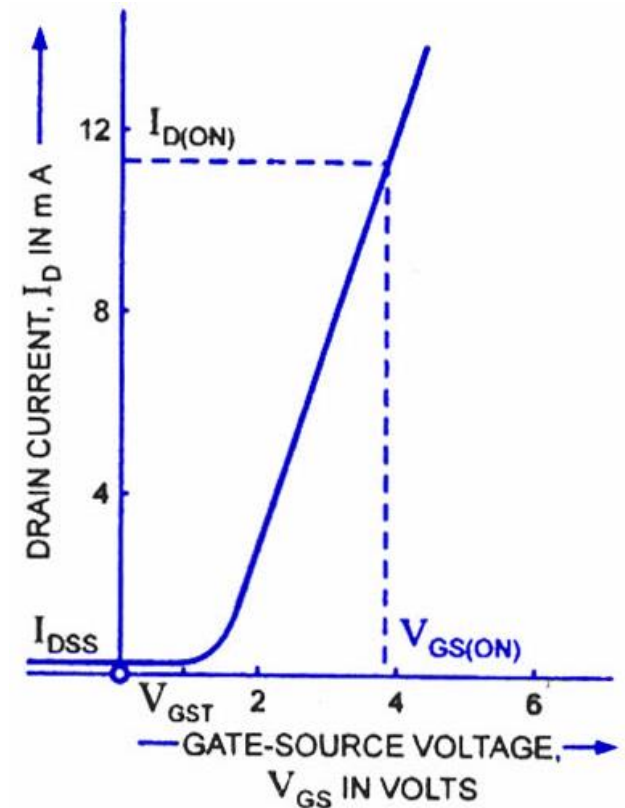
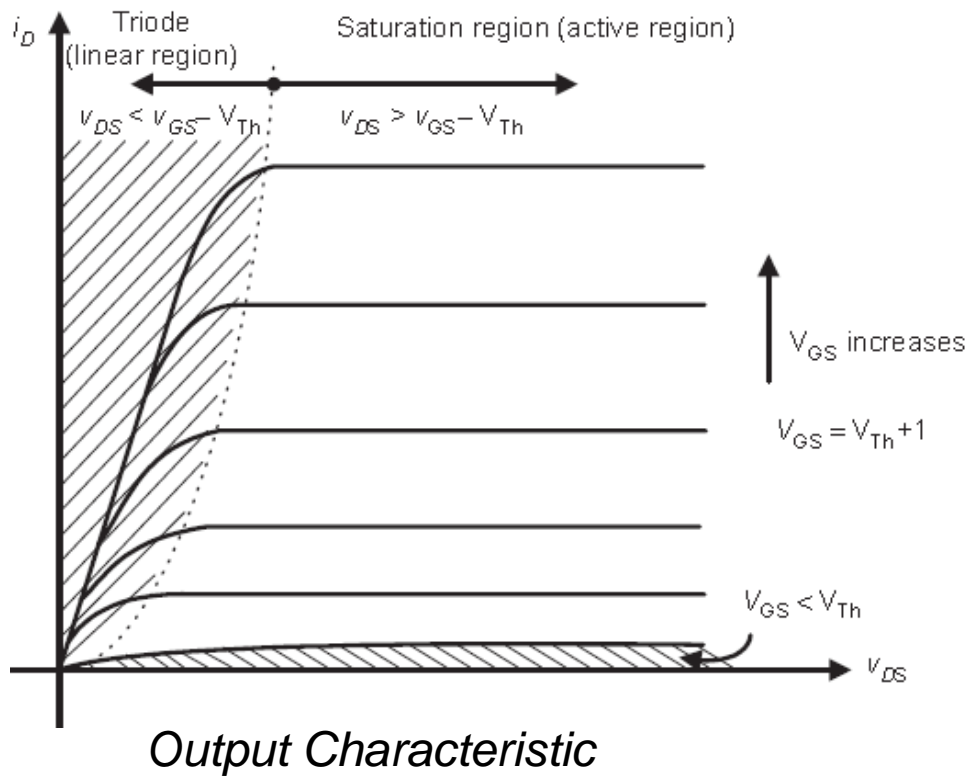
- La carica residua che rimane intrappolata in drift region allo spegnimento del dispositivo, origina il fenomeno di recovery, caratteristico dei dispositivi di potenza: allo spegnimento la corrente diventa negativa, fin tanto che le cariche in eccesso non vengono rimosse, per drift o per ricombinazione.
- Avvenuto ciò, le giunzioni possono contropolarizzarsi, le depletion regions iniziano a espandersi e il diodo inizia a tenere tensione.



MOSFET DI POTENZA: DESCRIZIONE



MOSFET DI POTENZA: CARATTERISTICHE

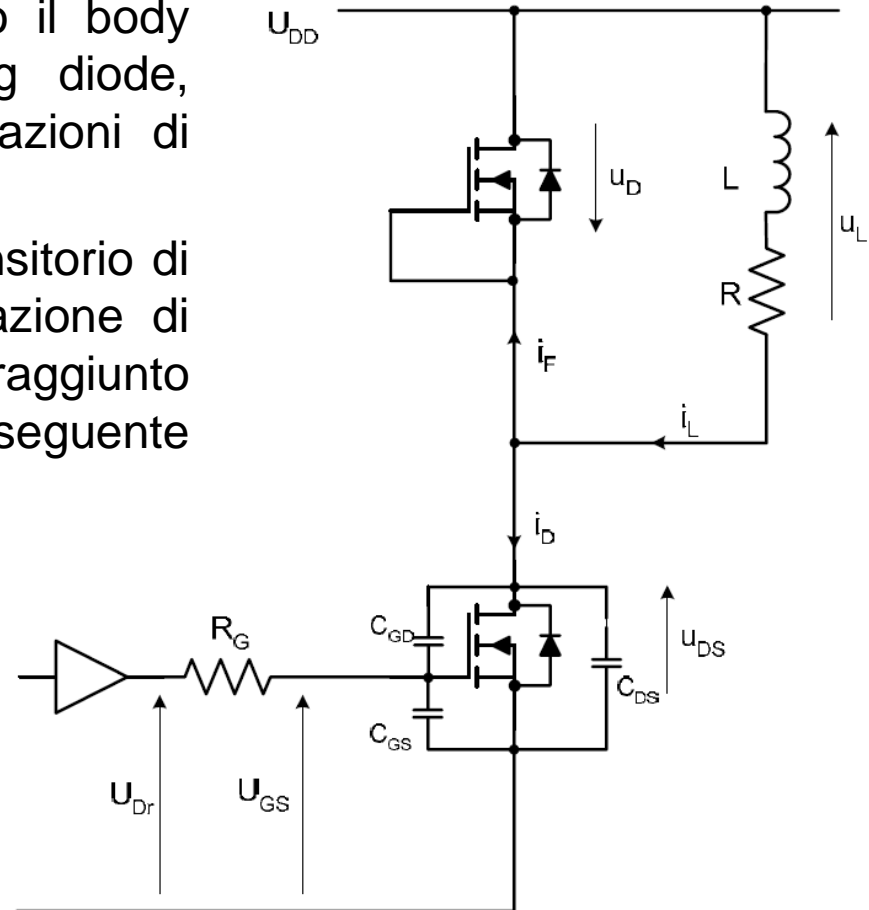


MOSFET DI POTENZA: ANALISI CIRCUITALE

- Analisi della potenza dissipata del MOSFET in chopper con carico induttivo.
- Del MOSFET in alto sfruttiamo solo il body diode intrinseco come freewheeling diode, come la maggior parte delle applicazioni di elettronica di potenza richiedono.
- In assenza di diodo di ricircolo, il transitorio di spegnimento comporterebbe la variazione di corrente dell'induttanza, dal valore I_L raggiunto a 0, in brevissimo tempo, con conseguente generazione di sovratensione:

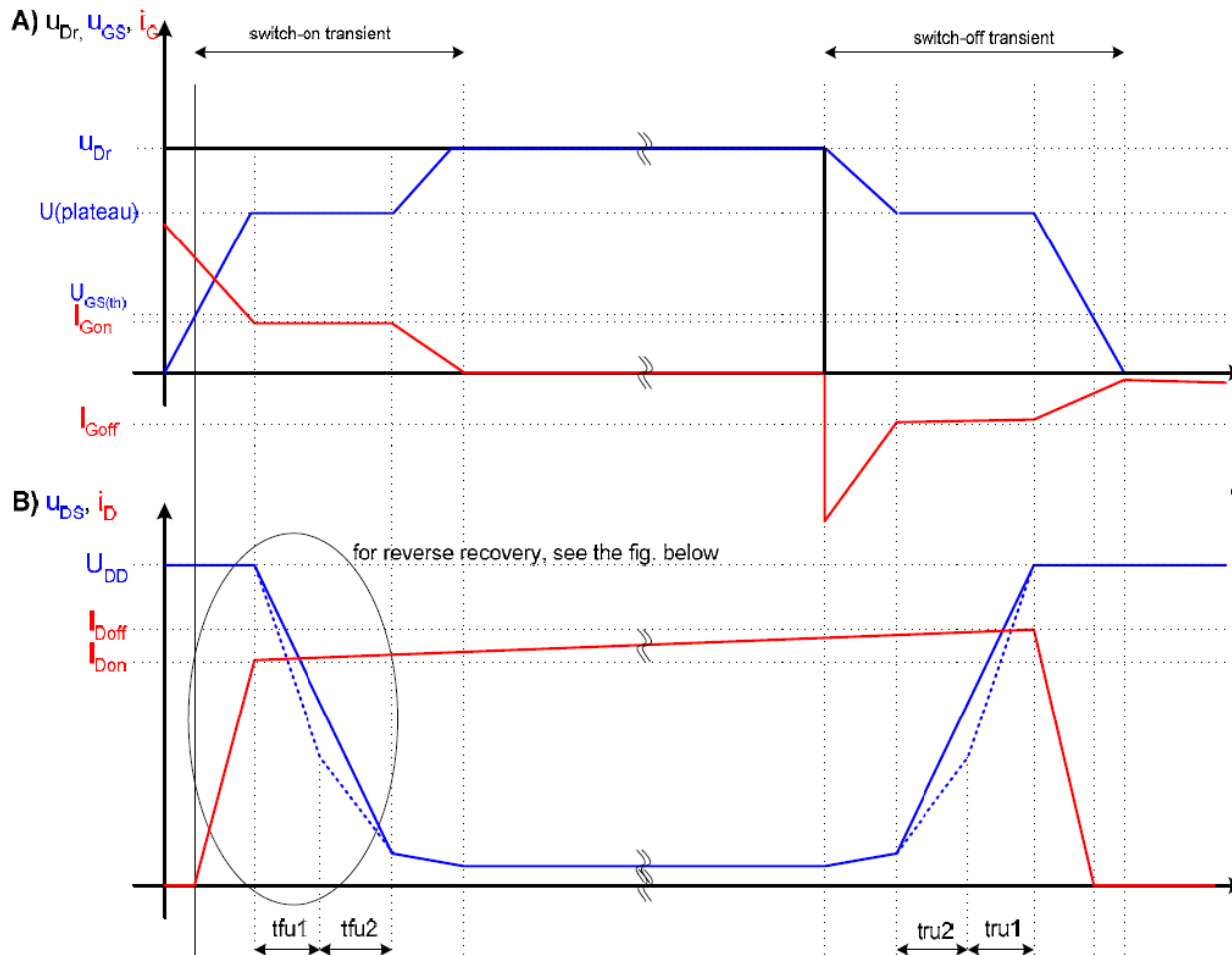
$$\Delta V = L \frac{dI}{dt}$$

Tale sovratensione danneggerebbe il MOSFET in basso.



MOSFET DI POTENZA: FORME D'ONDA

- MOSFET turn on/off waveforms



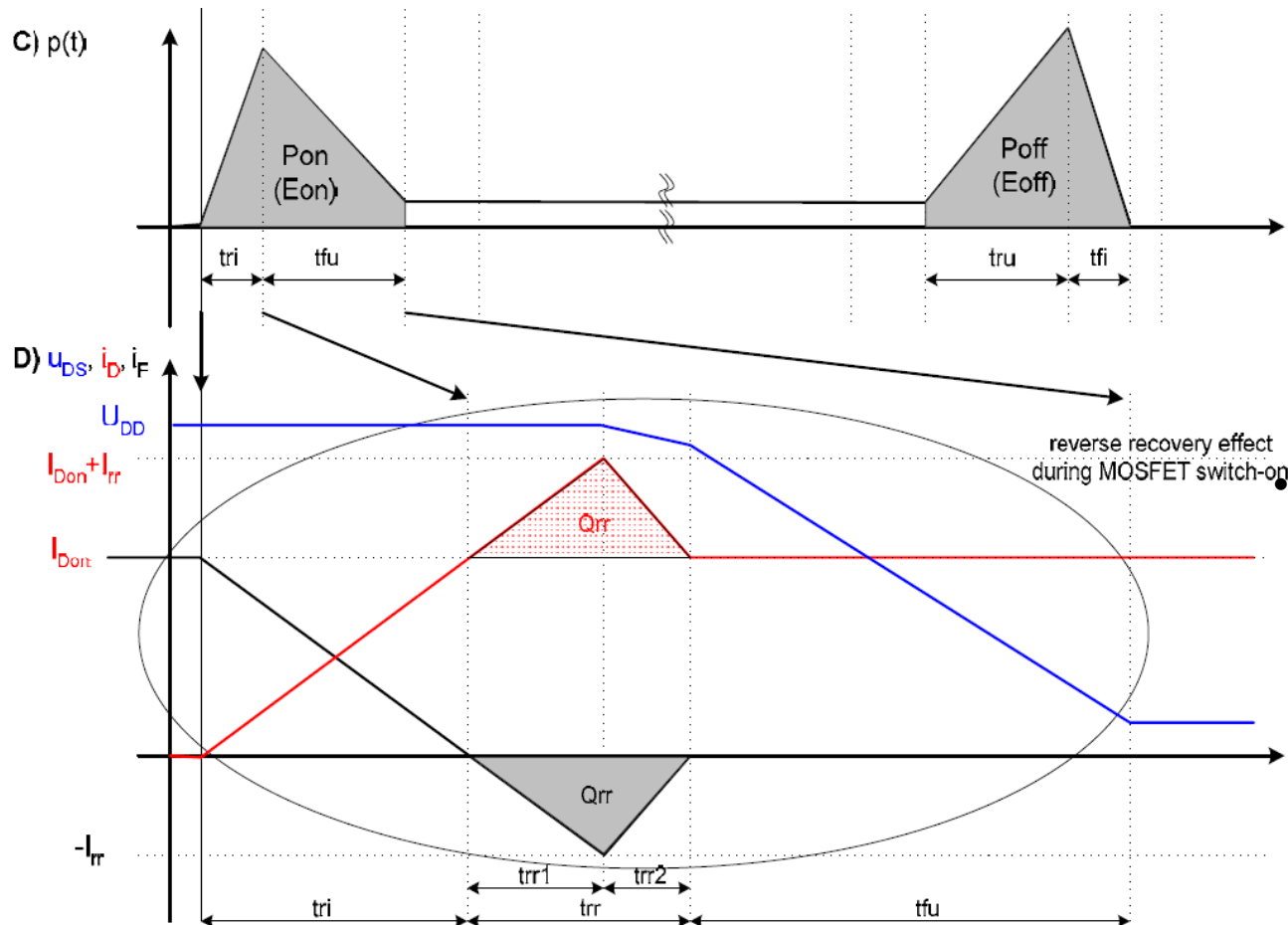
- All'accensione, quando in active region il MOSFET inizia a condurre tutta la corrente I_D , la V_{GS} si stabilizza a un valore costante (vedi caratteristica di trasferimento).
- La corrente di gate passa tutta attraverso C_{GD} e la V_{DS} diminuisce:

$$\frac{dv_{DG}}{dt} = \frac{dv_{DS}}{dt} = \frac{I_G}{C_{GD}}$$

MOSFET DI POTENZA: FORME D'ONDA

- MOSFET reverse recovery and turn on/off energies

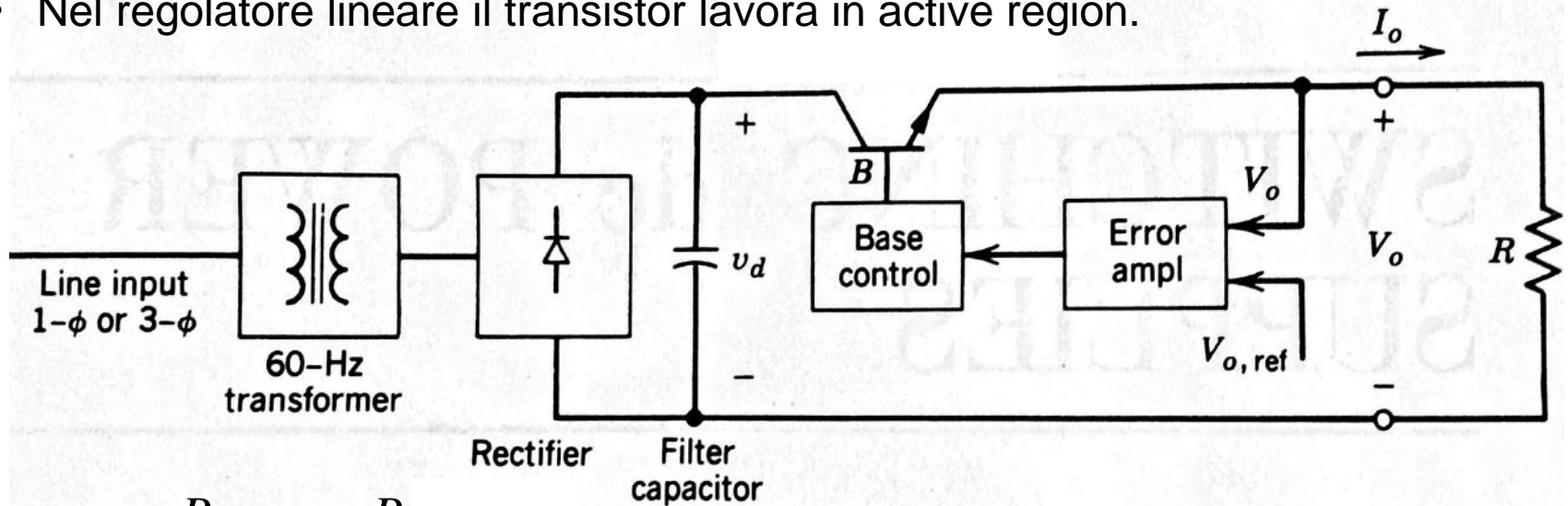
- In commutazione, la conduzione di corrente in zona lineare (quindi con tensione ai capi del MOSFET) determina una dissipazione di potenza.



- Il reverse recovery del diodo causa dissipazione di potenza e degrada il comportamento EMI condotto.

IL REGOLATORE LINEARE

- Nel regolatore lineare il transistor lavora in active region.



$$\mu = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{diss}}{P_{in}}$$

$$P_{diss} = I_o (V_d - V_o)$$

- Considerando $V_d=300V$, $V_o=15V$, $I_o=1A$, otterrei $P_{diss}=285W$, $\mu=5\%$

IL REGOLATORE SWITCHING

- Nel regolatore switching invece il transistor lavora on/off.
- In steady state la tensione media ai capi di un induttore è nulla.
- Nel Buck converter:

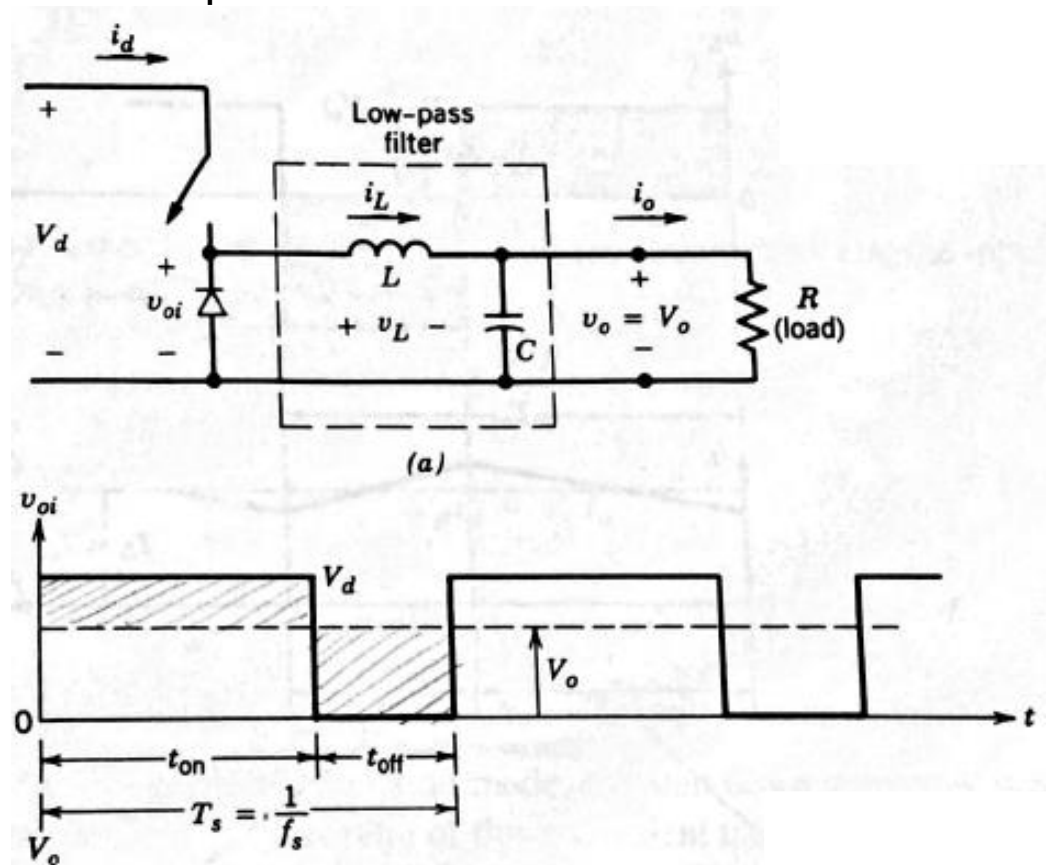
$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} (v_{oi}(t) - V_o) dt = 0$$

$$\rightarrow V_o = DV_d$$

$$\text{con } D = \frac{t_{on}}{T_s}$$

- Potevo anche vederlo come

$$V_d : T_s = V_o : t_{on}$$



IL REGOLATORE SWITCHING: POTENZA DISSIPATA

- Current e voltage ripple:

$$U_{in} - U_o = L \frac{\Delta I_o}{t_{on}} \rightarrow \Delta I_o = \frac{(1-D)U_o}{L f_{sw}}$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_o}{2} \frac{1}{2 f_{sw}}$$

- $P_{diss} = P_{diss,conduction} + P_{diss,switching}$

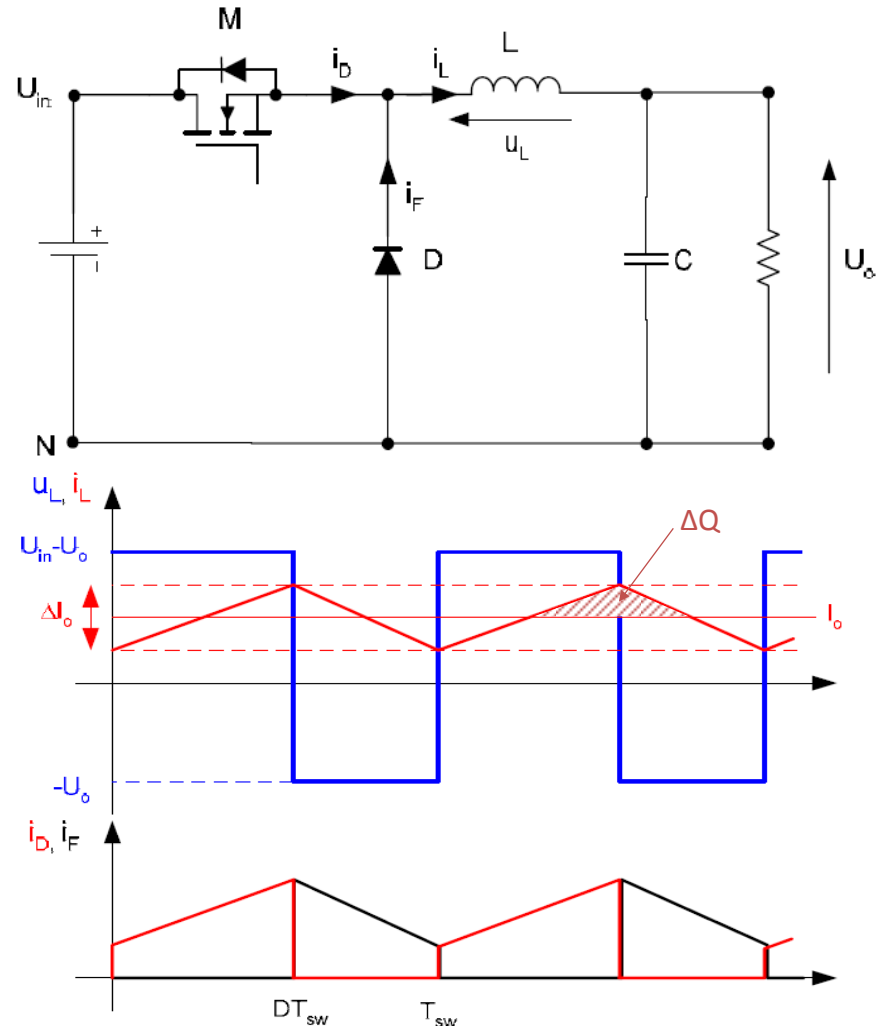
$$P_M = R_{DSon} \cdot I_{Drms}^2 + (E_{onM} + E_{offM}) \cdot f_{sw}$$

$$P_D = u_{D0} \cdot I_{Fav} + R_D \cdot I_{Frms}^2 + E_{onD} \cdot f_{sw}$$

$$I_{Drms}^2 = D \cdot I_o^2 = (\sqrt{D} \cdot I_o)^2$$

$$I_{Fav} = (1-D) \cdot I_o$$

$$I_{Frms}^2 = (1-D) \cdot I_o^2 = (\sqrt{1-D} \cdot I_o)^2$$



IL REGOLATORE SWITCHING: POTENZA DISSIPATA

- La potenza dissipata dal synchronous FET di un buck converter può essere analizzata analiticamente:

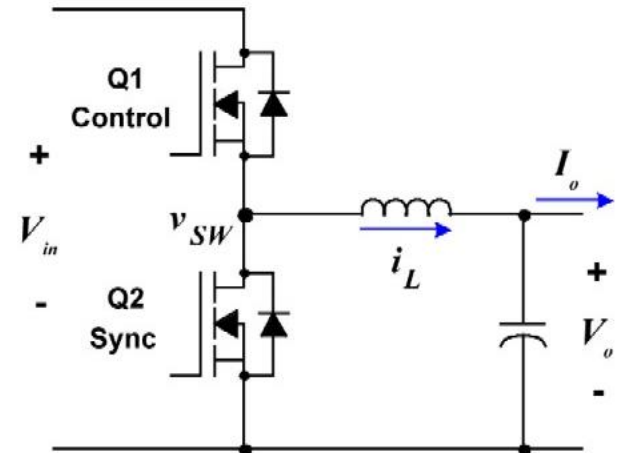
$$P_{\text{total}} = P_{\text{on}} + P_{\text{sw}} + P_{\text{gateCharge}} + P_{\text{bodyDiode}}$$

$$P_{\text{on}} = I_{\text{rms}}^2 R_{\text{dson}}$$

$$P_{\text{sw}} = \frac{V_{\text{dsoff}} I_{\text{load}}}{2} \frac{t_{\text{rise}} + t_{\text{fall}}}{T_{\text{sw}}}$$

$$P_{\text{gateCharge}} = Q_g V_{\text{gate}} f_{\text{sw}}$$

$$P_{\text{bodyDiode}} = Q_{\text{rr}} V_{\text{rb}} f_{\text{sw}}$$



conduction power loss [5]

switching power loss [6]

gate charge power loss [6]

body diode power loss [5]

IL PROBLEMA TERMICO: ANDAMENTO DELLA POTENZA DISSIPATA CON LA TEMPERATURA

- La potenza dissipata in conduzione aumenta all'aumentare della temperatura, a causa dell'aumentare della $R_{ds(on)}$:

$$P_{on} = I_{rms}^2 R_{ds(on)}$$

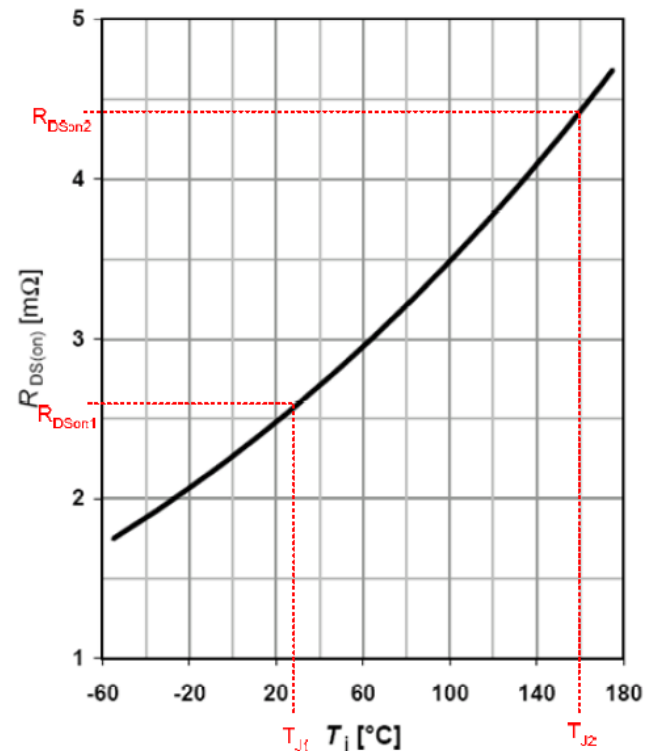
$$R_{DS(on)}(T_J) = R_{DS(on)MAX}(25^\circ C) \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)^{T_J - 25^\circ C}$$

- La potenza dissipata in commutazione invece non subisce grosse variazioni al variare della temperatura, poichè le capacità non variano.

$$P_{sw} = \frac{V_{dsoff} I_{load} t_{rise} + t_{fall}}{2 T_{sw}}$$

- La potenza dissipata in recovery aumenta, a causa del coefficiente di temperatura negativo della $R_{gs(th)}$.

$$P_{bodyDiode} = Q_{rr} V_{rb} f_{sw}$$



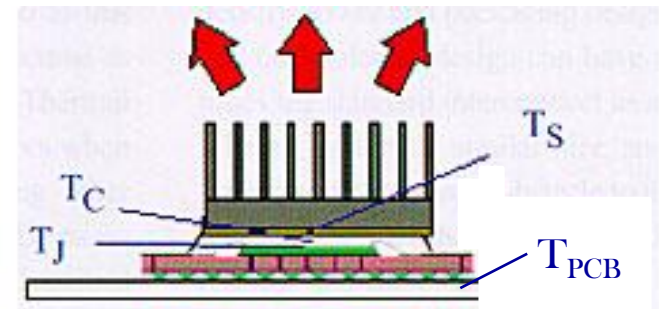
<http://www.btipnow.com/library/whitepapers/MOSFET%20Power%20Losses%20Calculation%20Using%20the%20Data-Sheet%20Parameters.pdf>

IL PROBLEMA TERMICO: LIMITI TERMICI

- La potenza dissipata genera calore che determina un incremento di temperatura:

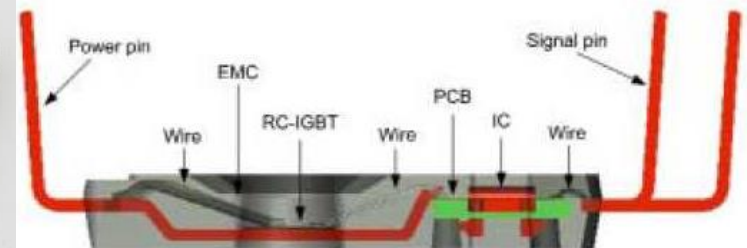
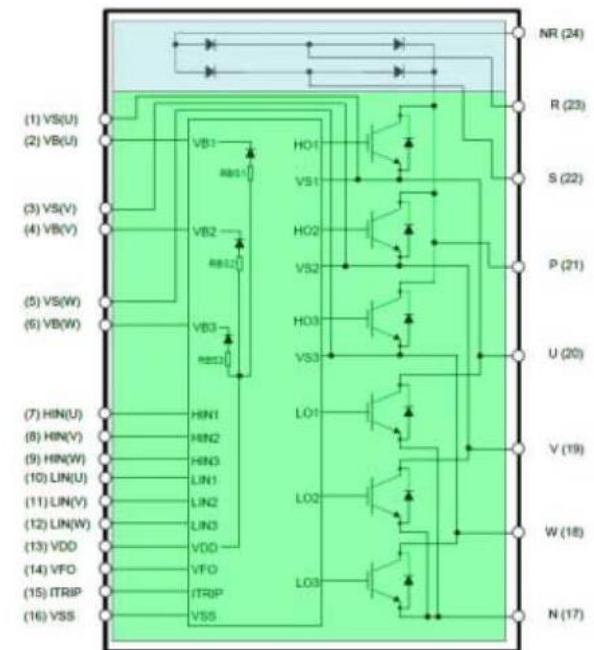
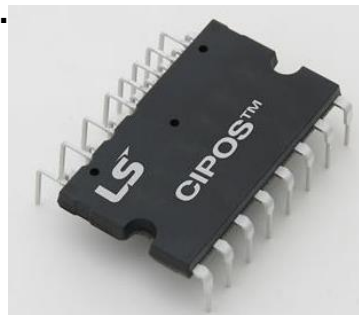
$$\Delta T = R_{\theta} P_{diss}$$

- La riduzione della resistenza termica R_{θ} attraverso l'impiego di dissipatori o di package più performanti termicamente, è costosa.
- Come rule of thumb, il tasso di fallimento di dispositivi a semiconduttore raddoppia per ogni 10°C di incremento di temperatura.
- Solitamente T_{jmax} dei circuiti integrati è specificata a 150°C, ma per ottenere una expected operating lifetime adeguata è preferibile mantenere $T_j < 125^{\circ}\text{C}$.
- Anche il PCB sottostante non deve superare la temperatura T_g di vetrificazione (per FR4 standard $T_g = 130^{\circ}\text{C}$, per cui $T_{PCB} < 125^{\circ}\text{C}$).
- il PCB sottostante può essere più o meno dissipativo a seconda del layout, dello spessore del rame, della presenza di via...



ANALISI DI QUALCHE PACKAGE: CIPOS-MINI IGCM06B60HA DI INFINEON TECHNOLOGIES

- *fully-molded intelligent power module for small power 3 phase drives in a dual-in-line package*
- Most intelligent power modules (IPM) use a highly thermally conductive interface material to contact the power transistors to the heat sink. This is usually quite expensive. The proposed IPM uses a lead frame construction only, which is supported by a PCB substrate. The module is then overall molded. The low power components such as the gate drive IC and thermistor are assembled on an internal printed circuit board (PCB).
- $R_{\theta,jc} = 6,5^{\circ}\text{C/W}$
- <http://www.powerguru.org/rectifier-integration-opens-door-for-high-power-density-intelligent-power-modules/>

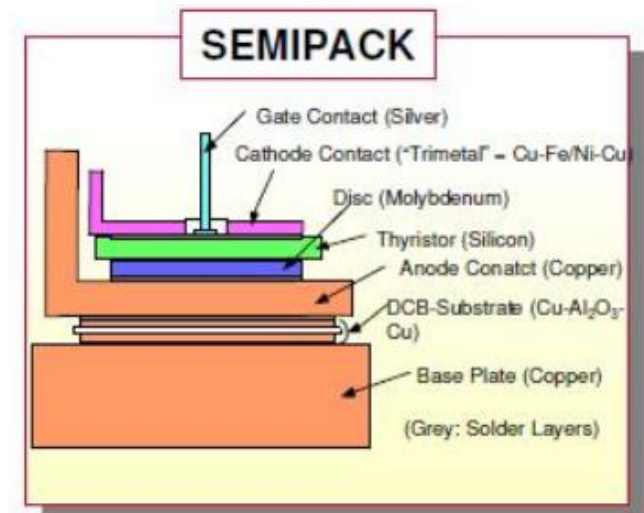


ANALISI DI QUALCHE PACKAGE: SEMIPACK SKKH92 DI SEMIKRON

- 1600V, 90A module with 2 antiparallel thyristors
- A power semiconductor module may be defined as a device which contains more than one semiconductor chip. The first power semiconductor module was established in the mid seventies: two chips (thyristor and rectifier) were combined by soldering them together with electrical contacts on metallised ceramic substrates and by putting them in a common plastic housing.

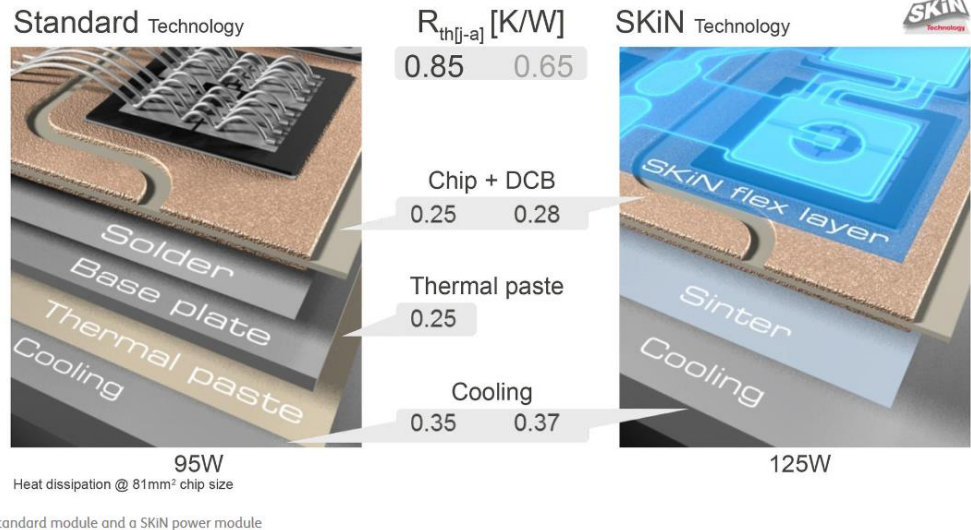
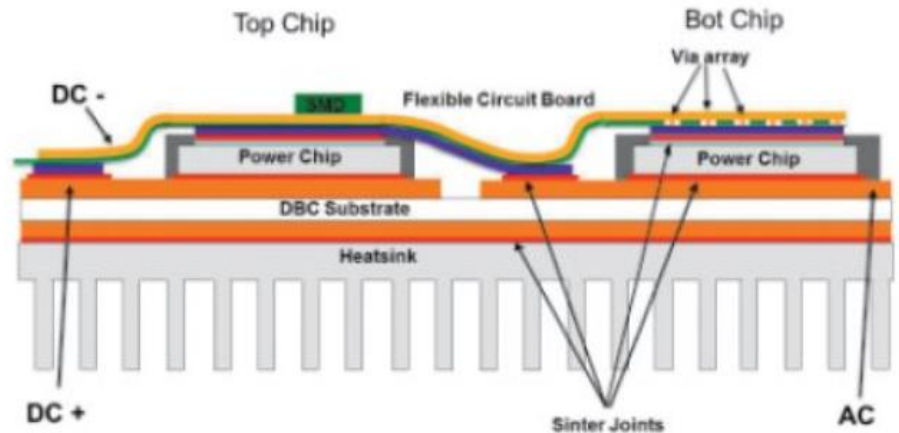


- $R_{\theta, jc} = 0,28^{\circ}\text{C/W}$
- 41,60€@15samples
- <http://www.powerguru.org/from-packaging-to-unpackaging-trends-in-power-semiconductor-modules/>



ANALISI DI QUALCHE PACKAGE: 3D SKIN TECHNOLOGY DI SEMIKRON

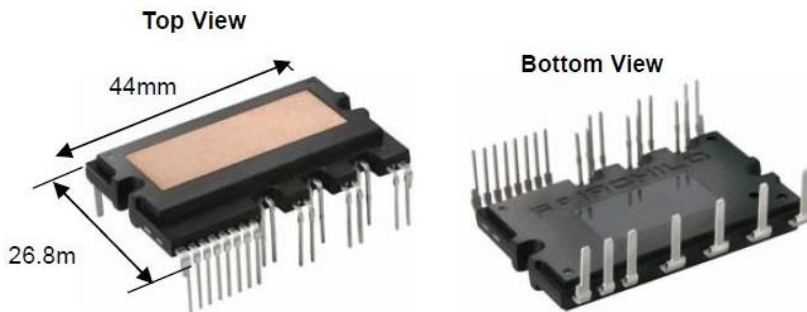
- The final system performance is heavily dictated by the power module package. The stray inductances in the commutation path require lowering of the switching times to reduce the overvoltage. Limited thermal durability of bond wires and solder joints makes it impossible to reach the operation temperature limits of new gen silicon without significantly reducing life time.
- the next gen 3D SKiN® technology of Semikron uses a multilayer flex foil instead of bond wires and apply silver diffusion sintering to the whole stack.
- The upper layer of the flex foil (yellow) is for DC-minus. The lower layer (purple) bridges chip top sides to the appropriate DBC traces.
- The density of the module is superior. Together with the high durable sinter joints, junction temperatures of up to 200°C become feasible.
- <http://www.powerguru.org/new-packaging-technology-enabling-high-density-low-inductance-power-modules/>



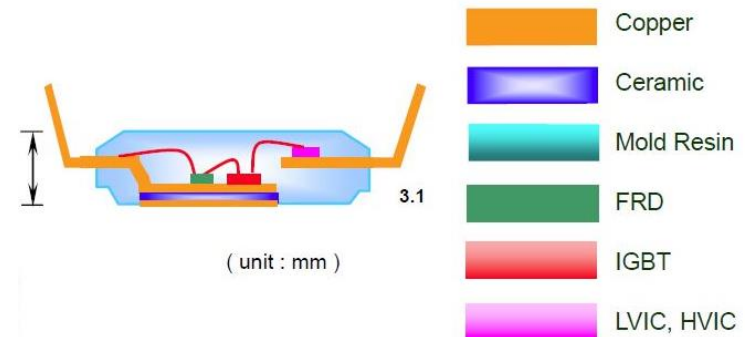
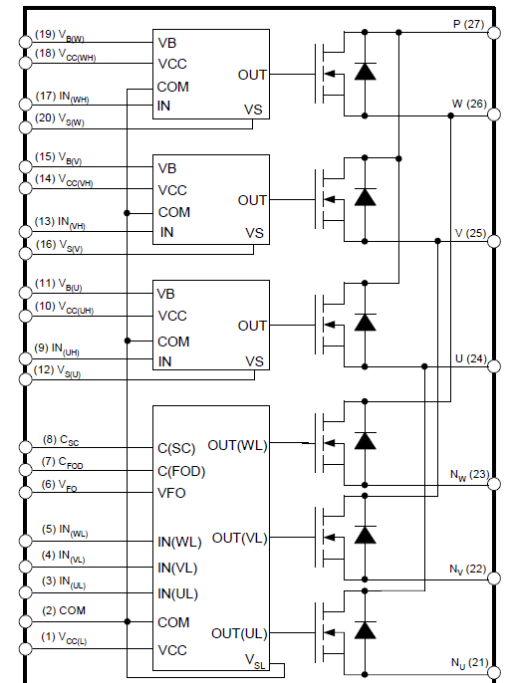
ANALISI DI QUALCHE PACKAGE: MINI DIL

SPM27-JA DI FAIRCHILD

- Advanced smart power module (SPM) with the copper face designed specifically for heatsinking.
- 500V-5A 3-phase MOSFET inverter bridge with gate drivers, isolation rating of 2500Vrms/min.



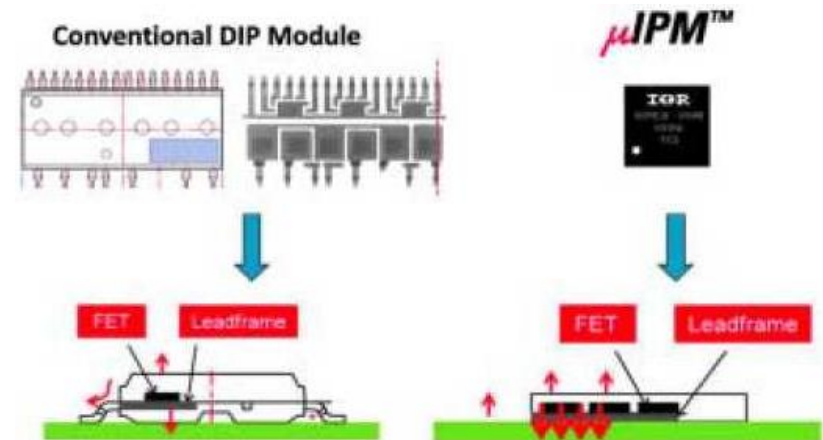
- $R_{\theta, jc} = 4^{\circ}\text{C/W}$
- 12,78\$@1ksamples
- <http://cladlab.com/electronics/circuit-design/component-packages#gallery>



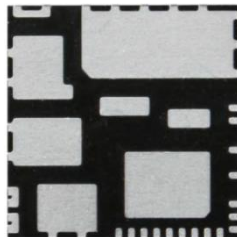
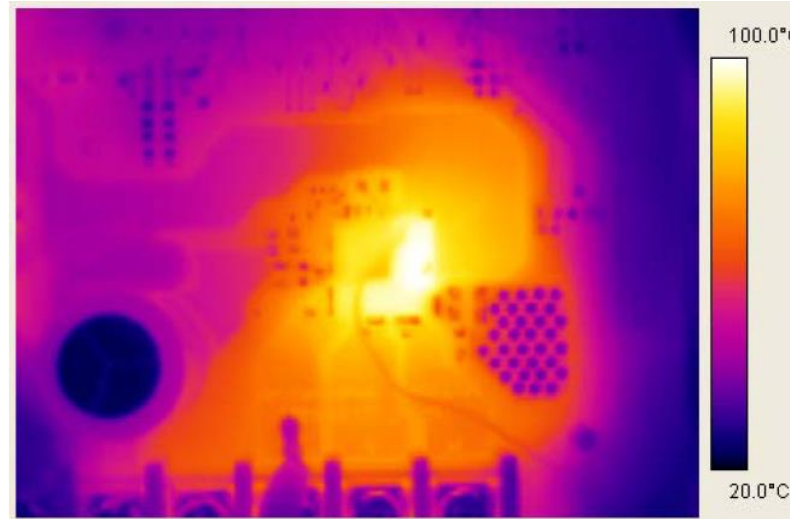
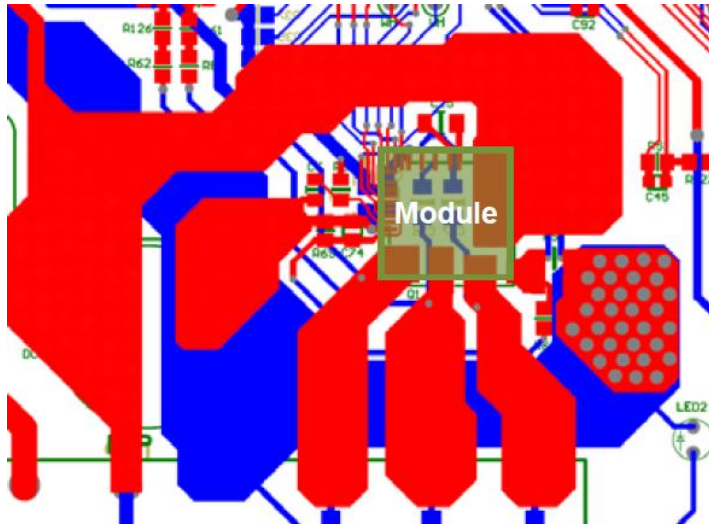
ANALISI DI QUALCHE PACKAGE: QFN μ IPM

IRSM836-035MA DI INTERNATIONAL RECTIFIER

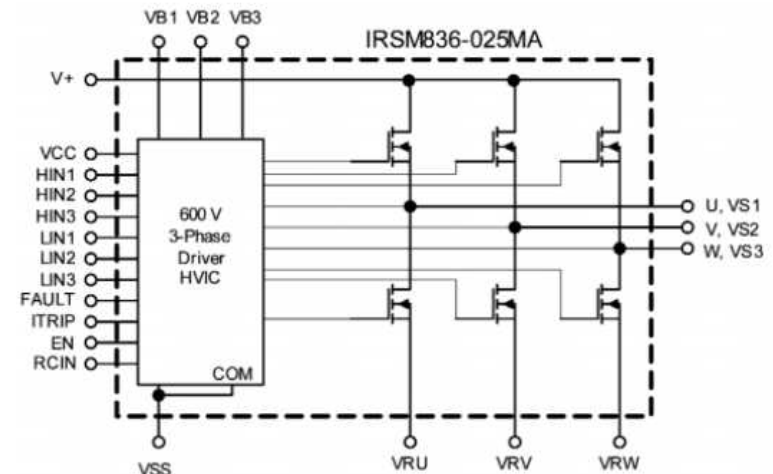
- The μ IPM family comprises a series of fully integrated three-phase or single-phase half-bridge motor control circuits with DC current ratings from 2A to 4A and voltage ratings of 250V or 500V.
- With dimensions of just 12mm x 12mm x 0.9mm the new devices are the smallest IPMs currently on the market and can help designers to achieve space savings of up to 60% compared to alternative devices.
- Unlike gull-wing lead and DIP packages, the μ IPMs achieve high die-to-PCB heat dissipation, allowing them to actively use the PCB as a heatsink. This is a similar approach that point-of-load (PoL) QFN-based packages use. The power semiconductors and the HVIC die are bonded to the lead-frame, which is exposed and then soldered to the PCB.
- This solution to effective heat dissipation means that the approach taken to PCB design and layout (PCB copper thickness or the deployment of copper wires/jumpers on thermally conductive traces) can be used to 'tune' thermal performance.
- <http://www.powerguru.org/silicon-holds-key-to-erp-legislation-for-fans-and-pumps/>



ANALISI DI QUALCHE PACKAGE: QFN μ IPM IRSM836-035MA DI INTERNATIONAL RECTIFIER



- $R_{\theta, jctop} = 27,4^{\circ}\text{C/W}$, $R_{\theta, jcbot} = 2,2^{\circ}\text{C/W}$
- 2,82€@1ksamples
- <http://www.mouser.com/ds/2/200/irsm836-035ma-246832.pdf>



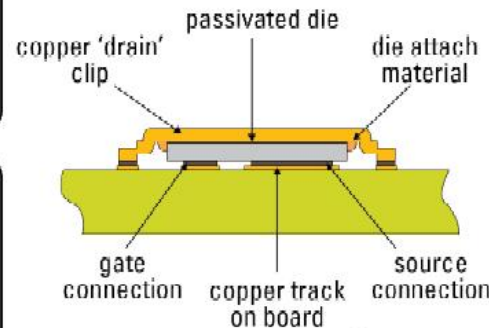
ANALISI DI QUALCHE PACKAGE: DIRECTFET IRF6648 DI INTERNATIONAL RECTIFIER

Maximizes Power density

- Provides Lowest Thermal Resistance
- Enable Dual Side Cooling - Efficiently removes heat away from PCB

Reduces Parasitic Ringing

- Lowest Package Inductance
- Reduces EMI
- Improves Switching Speed



Minimizes Conduction Losses

- Lowest Package Resistance
- Major loss reduction in MOSFET with sub-1m Ω $R_{DS(on)}$
- Minimizes PCB conduction Losses

Compatible with volume manufacturing processes

- Easy to design, easy to parallel

Lowest profile, small footprint



Automotive Level Reliability

- No wirebond, no leadframe, no mold
- All DirectFET2 are specifically optimized for automotive applications and pass AEC-Q101

- 60V power MOSFET
- $R_{dsON}=5.5m\Omega$
- Dual side cooling
- Footprint of SO-8, 0,7mm profile
- $I_D=86A$ continuous @25°C
- $R_{\theta,jctop} = 1,4^{\circ}C/W$, $R_{\theta,jpcb} = 1^{\circ}C/W$
- 1,46€@1ksamples
- <http://www.mouser.com/ds/2/200/irf6648pbf-222868.pdf>