

Εισαγωγή

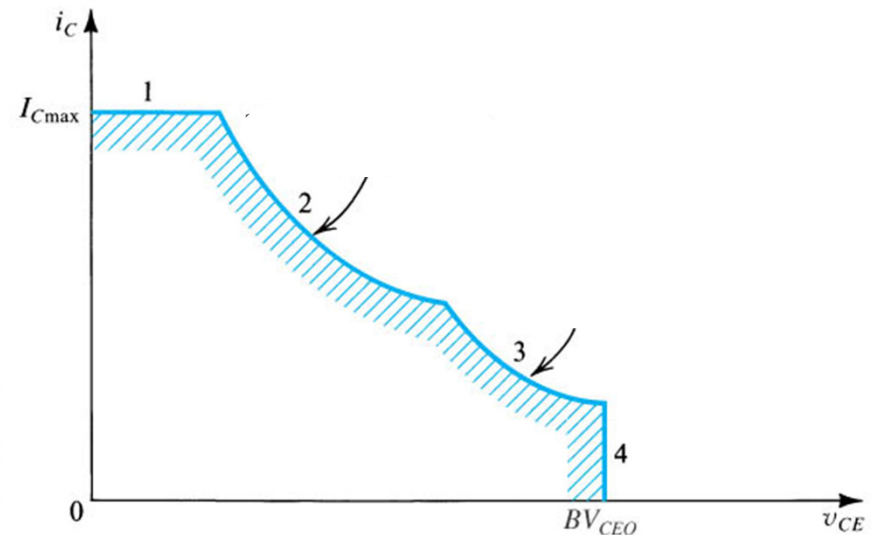
- ✓ Περιοριστικοί παράγοντες χρήσης ενός BJT σε ενισχυτές ισχύος
 - ☞ Μέγιστο ονομαστικό ρεύμα (απαιτούμενη τάξη μεγέθους \rightarrow A).
 - ☞ Μέγιστη ονομαστική τάση (απαιτούμενη τάξη μεγέθους \rightarrow V). Η τάση
 - ☞ Μέγιστη ονομαστική ισχύς (απαιτούμενη τάξη μεγέθους \rightarrow W)
- ✓ Τα ανωτέρω μεγέθη έχουν σαφώς μεγαλύτερες τιμές από τα BJT που χρησιμοποιούνταν σε εφαρμογές ενίσχυσης ασθενών. Π.χ

	BJT ασθενών σημάτων	BJT ισχυος	
	2N2222A	2N3055	2N6078
$V_{CE(max)}$ (V)	40	60	250
$I_{C(max)}$ (A)	0.8	15	7
$P_{D(max)}$ (W) @25°C	1.2	115	45
β	35-100	5-20	12-70

Ασφαλής περιοχή λειτουργίας τρανζίστορ (SOA)

✓ Δίδεται υπό τη μορφή καμπύλης i_C-v_{CE} και παρέχει τις εξής πληροφορίες

1. **Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα συλλέκτη.** Υπέρβαση του ορίου αυτό οδηγεί σε λιώσιμο των οδών σύνδεσης
2. **Όριο θερμικής κατανάλωσης.** Γ.Τ των σημείων για τα οποία $i_C * v_{CE} = P_{Dmax}$. Επιτρέπεται η μετακίνηση του σημείου λειτουργίας για ελάχιστο χρονικό διάστημα άνωθεν του ορίου αλλά **ποτέ** δεν πρέπει να το υπερβεί η μέση κατανάλωση ισχύος
3. **Όριο δεύτερης διάσπασης.** Η δεύτερη διάσπαση είναι φαινόμενο που προκύπτει από το γεγονός ότι η ροή του ρεύματος διαμέσου της επαφής E-B δεν είναι ομοιόμορφη (η πυκνότητα του ρεύματος είναι μεγαλύτερη στην περιφέρεια της επαφής). Το φαινόμενο προκαλεί τοπική αύξηση κατανάλωσης ισχύος (άρα και αύξηση θερμοκρασίας). Επειδή αύξηση $T \rightarrow$ αύξηση I , μπορεί να συμβεί θερμική φυγή που καταστρέφει την επαφή
4. **Τάση διάσπασης συλλέκτη-εκπομπού (BV_{CEO}).** Είναι το άνω όριο της τιμής που μπορεί να πάρει στιγμιαία η v_{CE} . Υπέρβαση οδηγεί σε διάσπαση χιονοστιβάδας στην επαφή C-B



Διπολικά Τρανζίστορ Ισχύος

- Τα τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται στα στάδια εξόδου των ενισχυτών απαιτείται να αντέχουν κατανάλωση ισχύος της τάξης των W και ενίοτε δεκάδων W
- Η κατάσταση αυτή η οποία δεν είχε εξεταστεί στους ενισχυτές χαμηλών σημάτων, διαφοροποιεί τόσο τη φυσική τους δομή και τη συσκευασία τους όσο και τις προδιαγραφές τους.
- Ο σχεδιαστής πρέπει επιπλέον να λάβει πρόνοια για την διαχείριση της κατανάλωσης των τρανζίστορ ισχύος καθώς και στην απαγωγή της θερμότητας που παράγεται.

Θερμοκρασία ένωσης (T_J) Η θερμοκρασία στην επαφή συλλέκτη – βάσης. Η καταναλισκόμενη ισχύς αυξάνει τη θερμοκρασία αυτή. Υπάρχει άνω όριο (T_{Jmax}) που κυμαίνεται από 150°C (π.χ. 2N3904) έως 200°C (π.χ. 2N3719)

Θερμική αντίσταση

- Η θερμότητα που αναπτύσσεται στην ένωση απάγεται διαμέσου της συσκευασίας προς τον περιβάλλοντα χώρο.
- Σε μόνιμη κατάσταση, η άνοδος της θερμοκρασίας σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_A) συνδέονται από τη σχέση

$$T_J - T_A = P_D \theta_{JA}$$

- θ_{JA} : Θερμική αντίσταση μεταξύ ένωσης και περιβάλλοντος ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$). Μας δίνει την αύξηση της θερμοκρασίας ένωσης για κάθε W κατανάλωσης
- P_D : επιτρεπόμενη απώλεια (κατανάλωση) ισχύος (W)

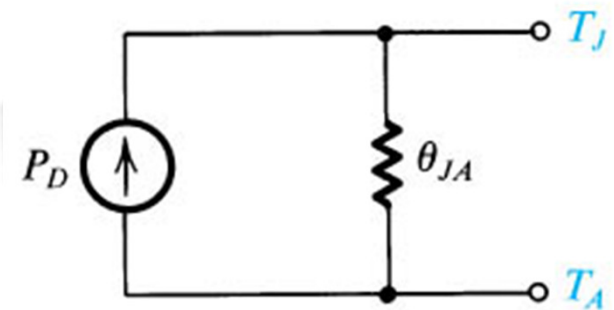
Για υψηλή κατανάλωση ισχύος χωρίς αύξηση της $T_{J,\max}$ \rightarrow επιθυμητή μικρή θ_{JA}

Η διαδικασία απαγωγής θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη του νόμου του Ohm.

$$P_D \sim \text{ρεύμα}$$

$$\Delta T = (T_J - T_A) \sim \text{διαφορά δυναμικού}$$

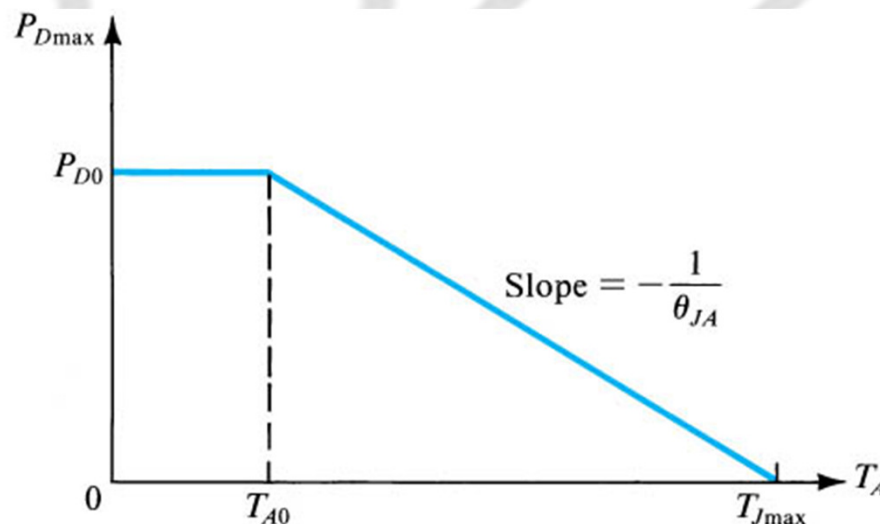
$$\theta_{JA} \sim \text{ηλεκτρική αντίσταση}$$



Κατανάλωση ισχύος προς θερμοκρασία

- ✓ Οι κατασκευαστές συνήθως δίνουν την ($T_{J,max}$), τη μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος P_{D0} για συγκεκριμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{A0} (συνήθως 25°C).

$$\theta_{JA} = \frac{T_{J,max} - T_{A0}}{P_{D0}}$$



- ✓ Αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος \rightarrow μειώνεται η μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος
- ✓ Παράγοντας ελάττωσης D: δίδει την ελάττωση της κατανάλωσης ισχύος με αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

$$D = \frac{\Delta P_{D0}}{T_A - T_{A0}} (mW / ^{\circ}\text{C})$$

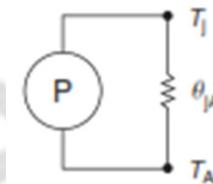
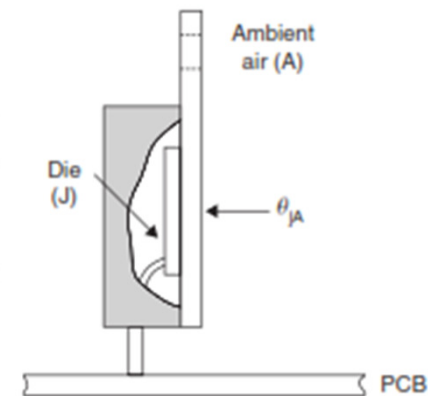
Παράδειγμα I

BJT έχει μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος 2W σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C και μέγιστη θερμοκρασία ένωσης 150 °C. Να βρεθούν : α) Η θερμική αντίσταση, β) η μέγιστη ισχύ που μπορεί να καταναλώνεται με ασφάλεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 50 °C και γ) η θερμοκρασία ένωσης αν το BJT λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C και καταναλώνει 1W

$$\alpha) \quad \theta_{JA} = \frac{T_{J_{\max}} - T_{A0}}{P_{D0}} = \frac{150 - 25}{2} = 62.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

$$\beta) \quad P_{D_{\max}} = \frac{T_{J_{\max}} - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{150 - 50}{62.5} = 1.6\text{W}$$

$$\gamma) \quad T_J = T_A + (\theta_{JA} \cdot P_D) = 25 + 62.5 \cdot 1 = 87.5^{\circ}\text{C}$$

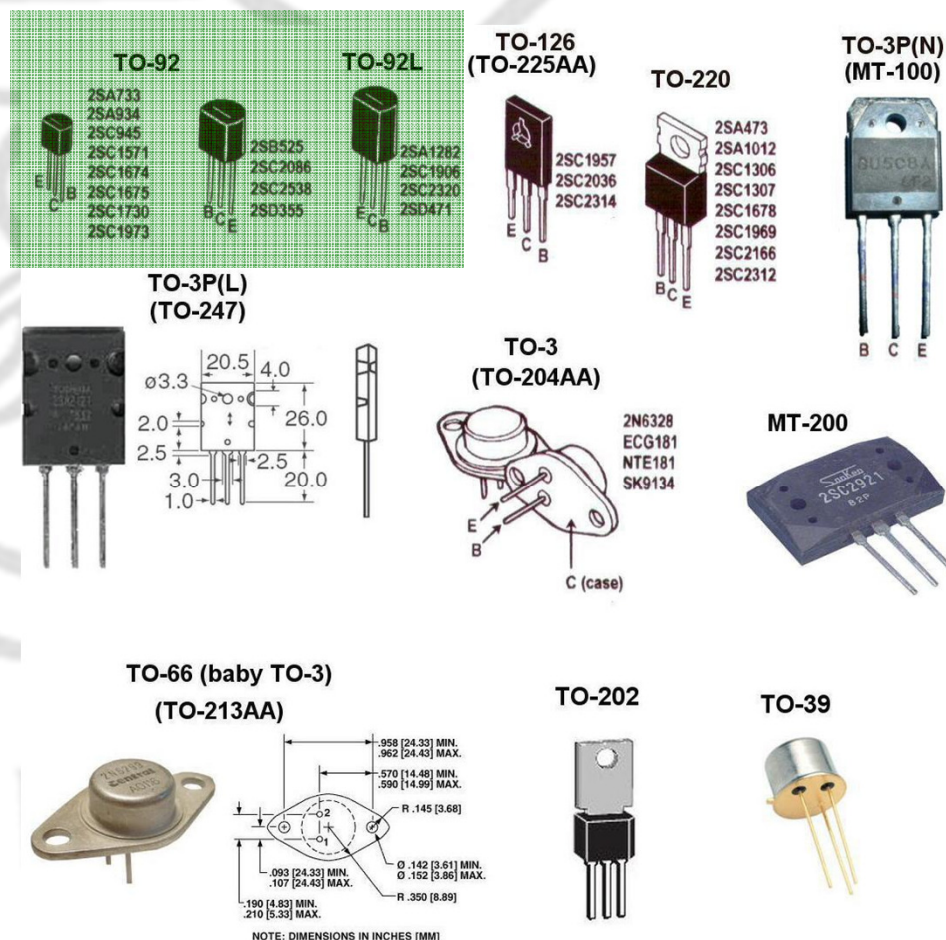


Κέλυφος τρανζίστορ

✓ Η θερμική αντίσταση θ_{JA} μπορεί να εκφραστεί ως: $\theta_{JA} = \theta_{CA} + \theta_{JC}$ όπου θ_{JC} είναι η θερμική αντίσταση μεταξύ ένωσης-κελύφους τρανζίστορ και θ_{CA} η θερμική αντίσταση μεταξύ κελύφους-περιβάλλοντος

✓ Για αύξηση της κατανάλωσης ισχύος \rightarrow μείωση θ_{JA} . Με δεδομένη όμως την $\theta_{JA} \rightarrow$ Μονη διέξοδος η μείωση της θ_{CA}

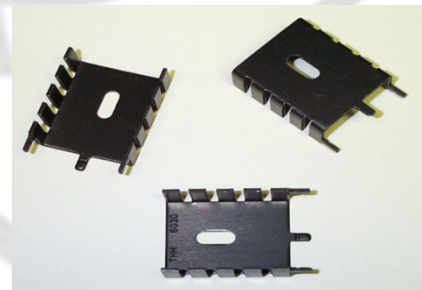
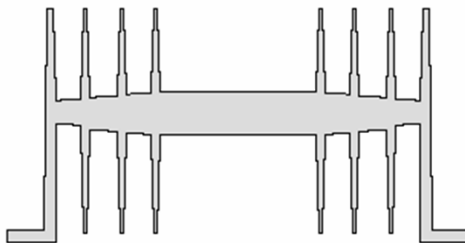
✓ Επιτυγχάνεται με αύξηση της επιφάνειας συσκευασίας προκειμένου να διαχέεται ταχύτερα προς το περιβάλλον, η θερμότητα. Ταυτόχρονα υπάρχει ηλεκτρική σύνδεση συλλέκτη - κελύφους



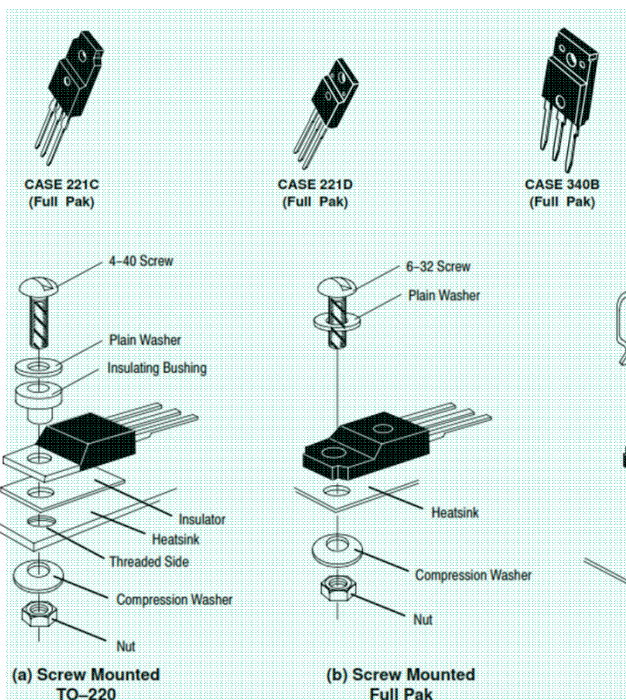
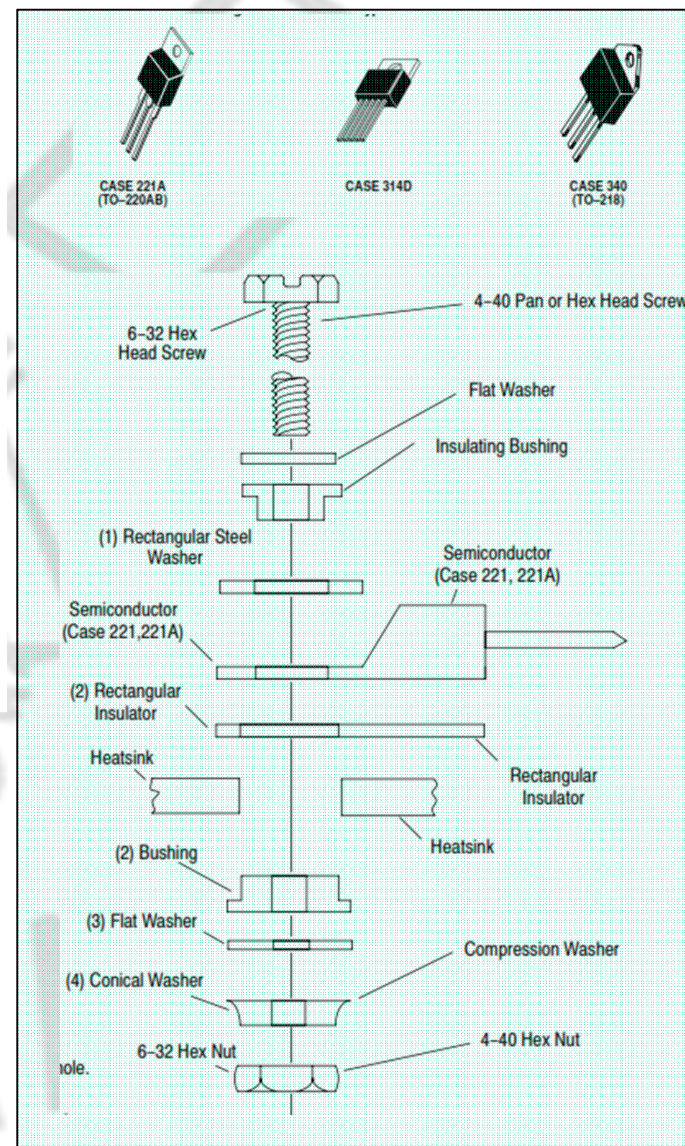
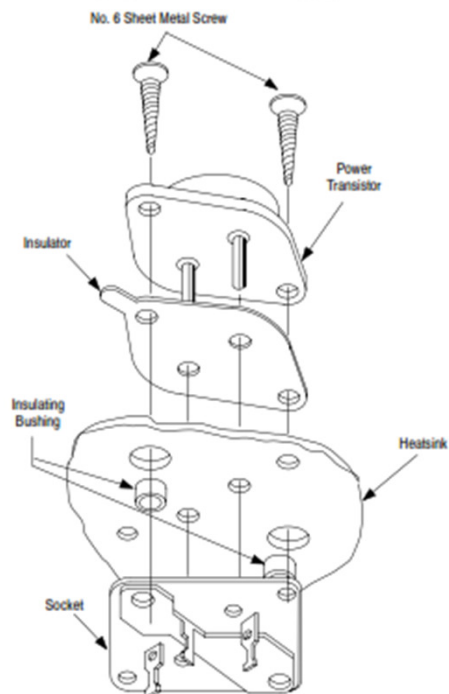
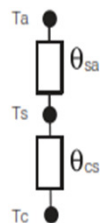
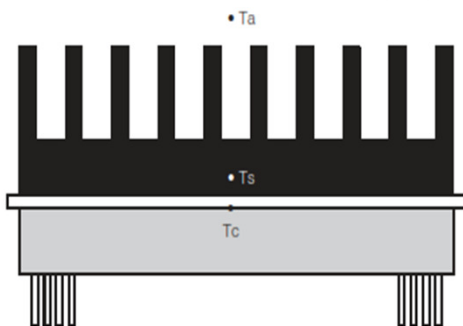
Αποδέκτες θερμότητας

- ✓ Η μόνη επιλογή του σχεδιαστή (για δεδομένο τρανζίστορ) είναι η μείωση της θ_{CA} σε τιμές χαμηλότερες από αυτές που έχει όταν το κέλυφος βρίσκεται σε απ' ευθείας επαφή με το αέρα.
- ✓ Επιτυγχάνεται με τεχνικές υποβοηθούμενης απαγωγής θερμότητας. Κλασική διάταξη: αποδέκτης θερμότητας (ψύκτρα)
- ✓ Θερμική αντίσταση αποδέκτη θερμότητας θ_{CS} \rightarrow πρέπει να είναι πολύ μικρή
- ✓ Θερμική αντίσταση από κέλυφος τρανζίστορ προς περιβάλλοντα χώρο με χρήση αποδέκτη θερμότητας $\theta_{CA} = \theta_{CS} + \theta_{SA}$ όπου θ_{SA} : θερμική αντίσταση μεταξύ αποδέκτη θερμότητας – αέρα
- ✓ Η θ_{SA} είναι αντιστρόφως ανάλογη της ενεργού επιφάνειας της ψύκτρας \rightarrow

©

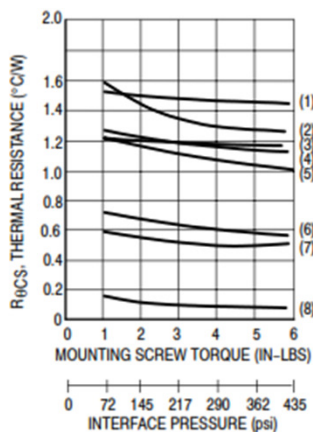


Αποδέκτες θερμότητας (συν.)



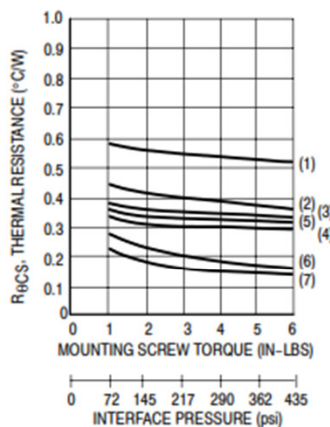
Αποδέκτες θερμότητας (συν.)

Figure 5-7. Interface Thermal Resistance Using Different Insulating Materials as a Function of Mounting Screw Torque

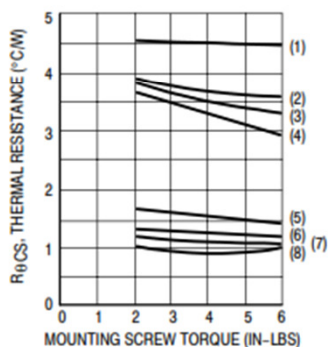


(a) TO-204AA (TO-3) Without Thermal Grease

- (1) Thermalfilm, .002 (.05) thick
 - (2) Mica, .003 (.08) thick
 - (3) Mica, .002 (.05) thick
 - (4) Hard anodized, .020 (.51) thick
 - (5) Aluminum oxide, .062 (1.57) thick
 - (6) Beryllium oxide, .062 (1.57) thick
 - (7) Bare joint — no finish
 - (8) Grafoil, .005 (.13) thick*
- *Grafoil is not an insulating material

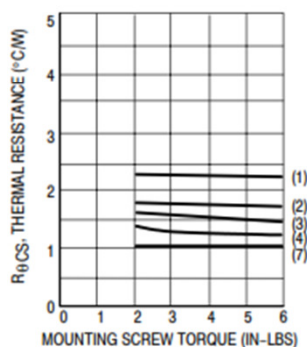


(b) TO-204AA (TO-3) With Thermal Grease



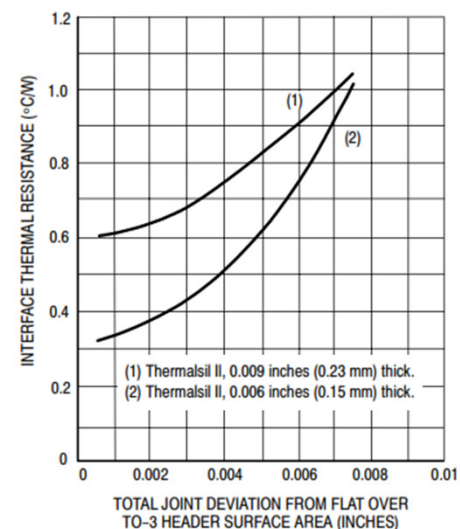
(c) TO-220 Without Thermal Grease

- (1) Thermalfilm, .022 (.05) thick
 - (2) Mica, .003 (.08) thick
 - (3) Mica, .002 (.05) thick
 - (4) Hard anodized, .020 (.51) thick
 - (5) Thermalsil II, .009 (.23) thick
 - (6) Thermalsil II, .006 (.15) thick
 - (7) Bare joint — no finish
 - (8) Grafoil, .005 (.13) thick*
- *Grafoil is not an insulating material



(d) TO-220 With Thermal Grease

Figure 5-8. Effect of Total Surface Flatness on Interf. Resistance Using Silicon Rubber Insulators



- (1) Thermalsil II, 0.009 inches (0.23 mm) thick.
- (2) Thermalsil II, 0.006 inches (0.15 mm) thick.

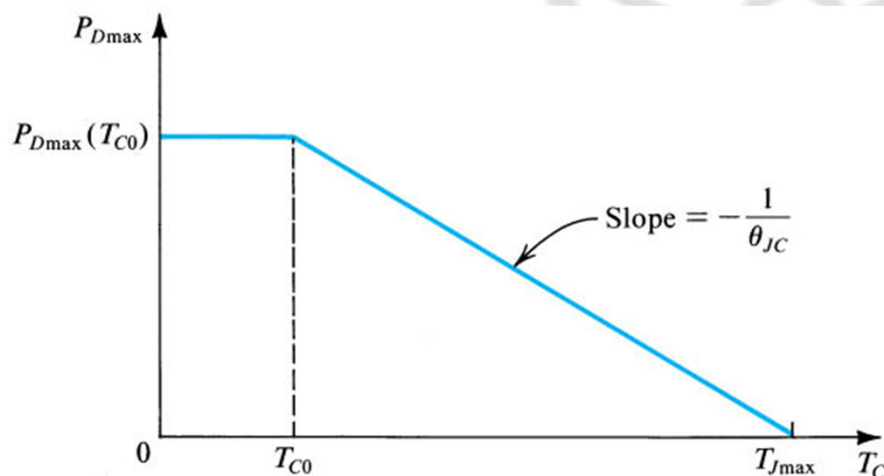
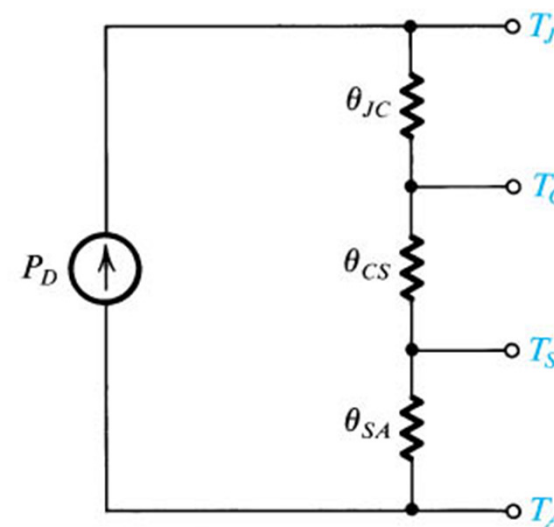
Data Courtesy of Thermalloy

Αποδέκτες θερμότητας (συν.)

- ✓ Το ηλεκτρικό ανάλογο της διαδικασίας θερμικής απαγωγής με χρήση αποδέκτη θερμότητας δίνεται από:

$$T_J - T_A = P_D (\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA})$$

- ✓ Καμπύλη μέγιστης επιτρεπόμενης κατανάλωσης ισχύος με ψύκτρα προς θερμοκρασία κελύφους



Δίδεται για $T_{C0}=25^\circ\text{C}$

Για δεδομένο τρανζίστορ, η P_{Dmax} σε T_{C0} είναι πολύ μεγαλύτερη από την P_{Dmax} σε T_{A0}

Αν το τρανζίστορ πρέπει να λειτουργεί σε συγκεκριμένη θερμοκρασία κελύφους T_C

$$T_{C0} \leq T_C \leq T_{Jmax}$$

η μέγιστη επιτρεπόμενη καταναλούμενη ισχύς είναι

$$P_{Dmax} = \frac{T_{J,max} - T_C}{\theta_{JC}}$$

Εξαναγκασμένη ψύξη με ροή αέρα

- ✓ Όταν δεσμευόμαστε σχεδιαστικά για μέγιστες διαστάσεις ψύκτρας
- ✓ Καταλήγουμε σε μικρότερες ψύκτρες αλλά επιβαρυνόμαστε με: θόρυβο, μεταφορά σκόνης σωματιδίων (αναγκαία ύπαρξη φίλτρων)

Απαιτούμενη ροή αέρα:

$$\text{Air flow (m}^3\text{/hr)} = \frac{2.6 \times \text{Power (W)}}{T_c}$$

Οι κατασκευαστές ανεμιστήρων δίδουν συνήθως καμπύλες ογκομετρικού ρυθμού ροής ενώ εμείς χρειαζόμαστε τη ροή του αέρα σε m³/hr. Για τη μετατροπή έχουμε:

- ✓ Διαιρούμε με 3600 (για να μετατρέψουμε τα m³/hr σε m³/s.)
- ✓ Το αποτέλεσμα το διαιρούμε με την ενεργό επιφάνεια του ανεμιστήρα. Η ενεργός επιφάνεια ορίζεται από την περιφέρεια των πτερυγίων μείον την επιφάνεια του άξονα περιστροφής.

$$\text{Linear flow rate (m/s)} = \frac{\text{Volumetric flow rate (m}^3\text{/s)}}{\text{Active fan area (m}^2\text{)}}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Αν η καταναλισκόμενη ισχύς είναι 325W και δεν θέλουμε η αύξηση της θερμοκρασίας να ξεπεράσει του 10C η απαιτούμενη ροή θα είναι

$$\text{Air flow (m}^3\text{/hr)} = \frac{2.6 \times \text{total power dissipated (W)}}{\text{Allowable temp rise (}^\circ\text{C)}} = \frac{2.6 \times 325 \text{ W}}{10 \text{ }^\circ\text{C}} = 84.5 \text{ m}^3\text{/hr (49.77 CFM)}$$

Για να μετατρέψω τα CFM (cubic feet per minute) σε m³/hr διαιρώ με 0.589

Παράδειγμα ΙΙ

Σε δεδομένο BJT (με $T_{J\max}=150^{\circ}\text{C}$) γνωρίζουμε ότι είναι σε θέση να καταναλώνει μέγιστη ισχύ ως εξής: 40W για $T_C=25^{\circ}\text{C}$ και 2W για $T_A=25^{\circ}\text{C}$. Πάνω από τους 25°C η κατανάλωση μειώνεται γραμμικά με $\theta_{JC}=3.12^{\circ}\text{C/W}$ και $\theta_{JA}=62.5^{\circ}\text{C/W}$. Ν.βρ. α) Η μέγιστη ισχύ την οποία μπορεί να καταναλώσει το τρανζίστορ με ασφάλεια όταν δεν χρησιμοποιείται ψύκτρα και για $T_A=50^{\circ}\text{C}$, β) η μέγιστη ισχύς που μπορεί να καταναλώσει το τρανζίστορ με ασφάλεια όταν λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 50°C και γίνεται χρήση αποδέκτη θερμότητας με $\theta_{CS}=0.5^{\circ}\text{C/W}$ και $\theta_{SA}=4^{\circ}\text{C/W}$ & γ) τη μέγιστη ισχύ την οποία θα μπορούσε να καταναλώσει το τρανζίστορ αν χρησιμοποιούνταν ψύκτρα με **άπειρη** δυνατότητα απαγωγής θερμότητας για $T_A=50^{\circ}\text{C}$. Για την β) περίπτωση ν.βρ. επίσης η θερμοκρασία του κελύφους και της ψύκτρας

α) χωρίς ψύκτρα

$$P_{D\max} = \frac{T_{J\max} - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{150 - 50}{62.5} = 1.6\text{W}$$

β) με ψύκτρα, η θ_{JA} γίνεται : $\theta_{JA} = \theta_{CA} + \theta_{JC} = (\theta_{CS} + \theta_{SA}) + \theta_{JC} = 7.62^{\circ}\text{C/W}$.

Συνεπώς

$$P_{D\max} = \frac{T_{J\max} - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{150 - 50}{7.62} = 13.1\text{W}$$

Παράδειγμα ΙΙ (συν.)

Για να υπολογίσουμε τις θερμοκρασίες χρησιμοποιούμε το ηλεκτρικό ισοδύναμο λύνουμε ως προς τη ζητούμενη T

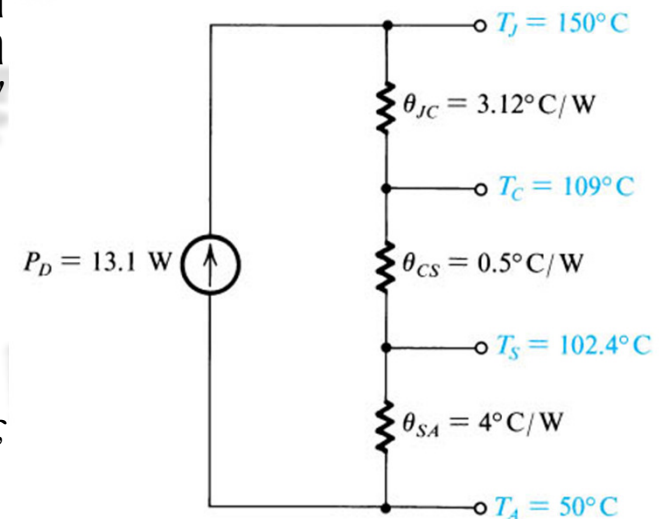
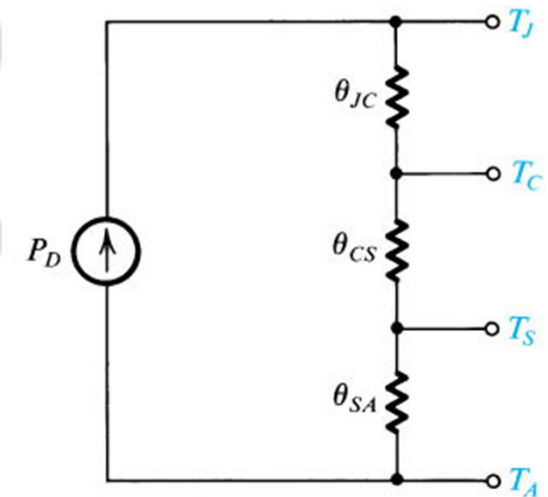
$$T_J - T_C = P_D \theta_{JC} \rightarrow T_C = T_J - P_D \theta_{JC} = [150 - (13.1 * 3.12)] \text{ } ^\circ\text{C} = 109^\circ\text{C}$$

$$T_C - T_S = P_D \theta_{CS} \rightarrow T_S = T_C - P_D \theta_{CS} = [109 - (13.1 * 0.5)] \text{ } ^\circ\text{C} = 102.4^\circ\text{C}$$

γ) Αν υπήρχε ψύκτρα με άπειρη δυνατότητα απαγωγής τότε $T_C = T_A$ που σημαίνει ότι $\theta_{CA} = 0$ (αδύνατον). Ο όρος όμως χρησιμοποιείται και δημιουργεί την καμπύλη κατανάλωσης ισχύος ως προς θερμοκρασία περιβάλλοντος με άπειρο αποδέκτη ισχύος. Στην πράξη μας δείχνει ποια είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος για θερμοκρασίες μικρότερες από 25°C και με χρήση άπειρου (πρακτικά πάρα πολύ καλού) αποδέκτη θερμότητας. Στην περίπτωση μας

$$P_{D\max} = \frac{T_{J\max} - T_A}{\theta_{JC}} = \frac{150 - 50}{3.12} = 32\text{W}$$

Σημειώστε ότι το τρανζίστορ αυτό στην αγορά πωλείται ως **τρανζίστορ 40W**



Ασκήσεις

29) Ένα τρανζίστορ ισχύος ορίζεται να έχει μέγιστη θερμοκρασία ένωσης 130°C . Όταν λειτουργεί σ' αυτή τη θερμοκρασία με αποδέκτη θερμότητας, η θερμοκρασία κελύφους είναι 90°C . Ο αποδέκτης θερμότητας προσαρτάται στο κέλυφος με υλικό του οποίου η θερμική αντίσταση είναι $\theta_{CS} = 0.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ενώ η θερμική αντίσταση του αποδέκτη θερμότητας είναι $\theta_{SA} = 0.1^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Εάν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 30°C , πόση ισχύς καταναλώνεται στο στοιχείο; Ποια η θερμική αντίσταση του στοιχείου θ_{JC} από την ένωση στο κέλυφος;

$$\textcircled{29} \quad \text{Γνωρίζω ότι } T_c - T_A = \theta_{CA} \cdot P_D \text{ έτσι έχω}$$

$$T_c - T_A = (\theta_{CS} + \theta_{SA}) \cdot P_D \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_D = \frac{T_c - T_A}{\theta_{CS} + \theta_{SA}} = \frac{90^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}}{(0.5 + 0.1)^{\circ}\text{C}/\text{W}} = \boxed{100\text{W}}$$

Για τη θερμική αντίσταση από ένωση σε κέλυφος
έχω:

$$T_j - T_c = \theta_{JC} \cdot P_D \Rightarrow \theta_{JC} = \frac{T_j - T_c}{P_D} = \frac{(130 - 90)^{\circ}\text{C}}{100\text{W}}$$

$$\boxed{\theta_{JC} = 0.4^{\circ}\text{C}/\text{W}}$$

Ασκήσεις

30 Ένα τρανζίστορ ισχύος για το οποίο $T_{Jmax} = 180^\circ\text{C}$ μπορεί να καταναλώσει 50 W σε θερμοκρασία κελύφους 50°C . Εάν συνδεθεί με αποδέκτη θερμότητας μέσω υλικού του οποίου η θερμική αντίσταση είναι $0.6^\circ\text{C}/\text{W}$, ποια θερμοκρασία του αποδέκτη θερμότητας εξασφαλίζει ασφαλή λειτουργία στα 30 W; Για θερμοκρασία περιβάλλοντος 39°C , τι θερμική αντίσταση του αποδέκτη θερμότητας απαιτείται; Εάν για συγκεκριμένο τύπο θερμικού αποδέκτη από αλουμίνιο η θερμική αντίσταση είναι $4.5^\circ\text{C}/\text{W}$ ανά cm μήκους, τι μήκος απαιτείται εδώ;

$$\textcircled{30} \quad \text{Έχω } T_s - T_c = \theta_{sc} \cdot P_D \Rightarrow$$

$$\theta_{sc} = \frac{T_s - T_c}{P_D} = \frac{180^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}{30\text{W}} = \boxed{2,6^\circ\text{C}/\text{W}}$$

$$\text{Επίσης } T_s - T_s = \theta_{js} \cdot P_D = (\theta_{sc} + \theta_{cs}) \cdot P_D \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_s = T_s - (\theta_{sc} + \theta_{cs}) \cdot P_D \Rightarrow$$

$$T_s = 180^\circ\text{C} - (2,6 + 0,6) \cdot 30 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{W}}{\text{W}} = \boxed{84^\circ\text{C}}$$

$$\text{Για τους } 39^\circ\text{C} \text{ με αποδέκτη θερμότητας έχω}$$

$$T_s - T_A = \theta_{SA} \cdot P_D \Rightarrow \theta_{SA} = \frac{T_s - T_A}{P_D} = \frac{(84 - 39)^\circ\text{C}}{30\text{W}} \Rightarrow$$

$$\boxed{\theta_{SA} = 1,5^\circ\text{C}/\text{W}}$$

$$\text{Το απαιτούμενο μήκος φύκτρας είναι:}$$

$$\frac{4,5^\circ\text{C}/\text{W}/\text{cm}}{\theta_{SA}} = \frac{4,5^\circ\text{C}/\text{W}/\text{cm}}{1,5^\circ\text{C}/\text{W}} = \boxed{3\text{cm}}$$