

I vantaggi del nuovo contenitore SOT-93 che sostituisce il "vecchio" TO-3 nei transistori di potenza

- Esempio d'impiego
- Sistemi di montaggio

La nuova serie di transistori di potenza per amplificatori b.f. Hi-Fi, per alimentatori a commutazione (SMPS) e per stadi finali di riga per televisione ha un nuovo contenitore: il SOT-93 che sostituisce l'ormai "vecchio" TO-3. In questa nota se ne sottolineano i vantaggi, e se ne dà un esempio d'impiego in un amplificatore Hi-Fi da 50 W.

1. - INTRODUZIONE

Alcuni transistori b.f. di largo impiego, aventi fino ad oggi il contenitore SOT-3 (meglio noto come TO-3), vengono ora presentati in un contenitore di plastica (silicone), contraddistinto con la sigla SOT-93. Questo nuovo contenitore (fig. 1) deve considerarsi il miglior sistema di chiusura ermetica in plastica fino ad oggi conosciuto. Combina infatti felicemente fattori economici, grande sicurezza di funzionamento e ridotta «fatiga» termica. Queste due ultime caratteristiche sono state ottenute grazie all'impiego di due noti processi tecnologici: la *saldatura eutettica* e la *passivazione del cristallo*.

I fattori economici a cui abbiamo accennato più sopra riguardano la *velocità di assemblaggio* che questo contenitore consente di realizzare in sede di fabbricazione del transistor; in particolare, possono essere rese completamente automatiche, la saldatura eutettica e quella ad ultrasuoni impiegata per unire i terminali alle parti attive del cristallo.

Nella tabella 1 e 2 presentiamo l'attuale gamma di transistori di potenza in contenitore SOT-93 unitamente ai loro dati caratteristici essenziali.

2. - TECNOLOGIA COSTRUTTIVA DEL CONTENITORE SOT-93

In un transistor convenzionale, il cristallo viene saldato sulla base di montaggio mediante una lega stagno/piombo. La piccola quantità di aria che inevitabilmente rimane "intrappolata" in questo tipo di saldatura è la causa di quelle notevoli variazioni dei valori di tolleranza della resistenza termica tra il cristallo e la relativa base di montaggio. All'intrappolamento di queste piccole "bolle" di aria vanno anche attribuite quelle minuscole aree del cristallo che assumono temperature molto elevate.

I suddetti inconvenienti vengono eliminati con il sistema della cosiddetta "saldatura dura" impiegata nella costruzione del contenitore SOT-93; questa par-

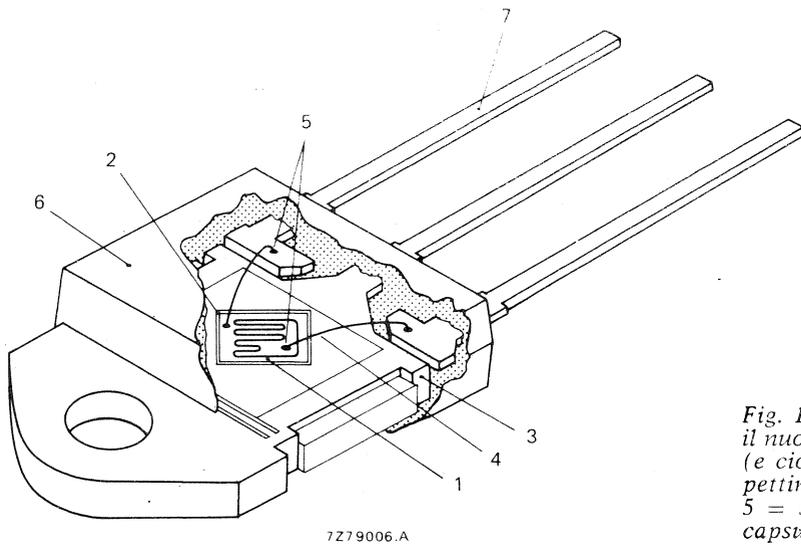


Fig. 1 - Struttura interna di un transistor di potenza con il nuovo contenitore SOT-93. 1 = cristallo ricoperto in vetro (e cioè passivato). 2 = giuntura eutettica oro/silicio. 3 = pettine di rame. 4 = filo di collegamento in alluminio. 5 = saldatura ad ultrasuoni dei fili di collegamento. 6 = capsula in silicone speciale. 7 = terminali di rame stagnato.

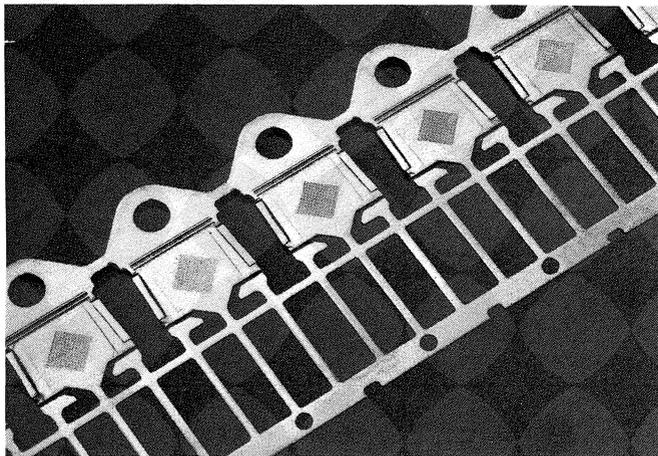


Fig. 2 - Strato di oro depositato sulle basi di montaggio dei transistori ancora sul pettine; su queste aree verranno fatti combaciare i cristalli dei transistori.

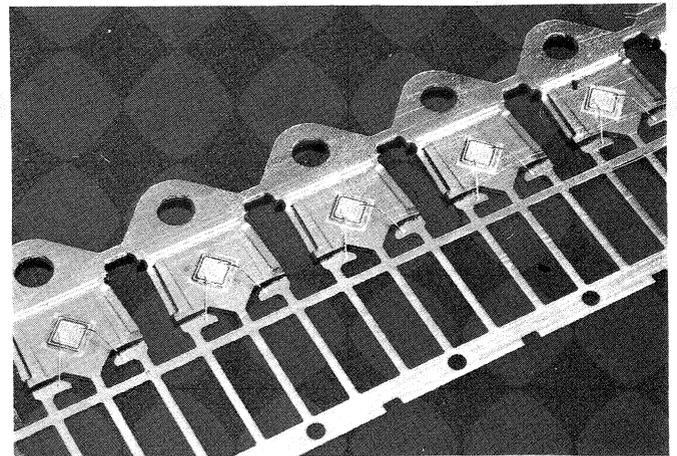


Fig. 4 - I fili di collegamento tra emettitore e base del cristallo e i rispettivi terminali vengono saldati alle corrispondenti aree attive del cristallo mediante saldatura ad ultrasuoni.

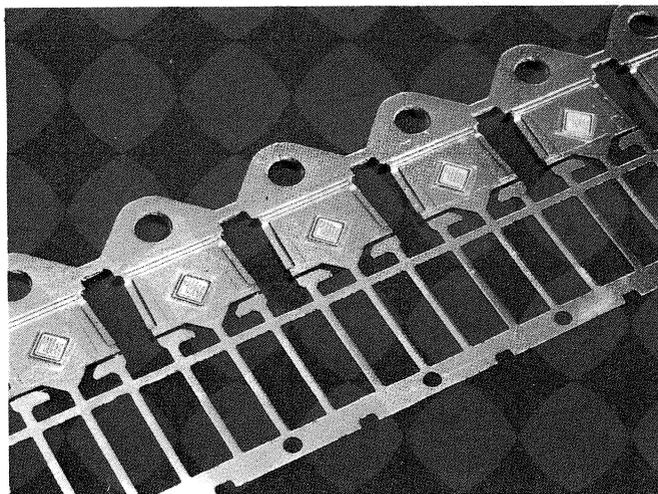


Fig. 3 - Fissaggio del cristallo con saldatura eutettica sullo strato di oro precedentemente depositato sulla base di montaggio del transistor.

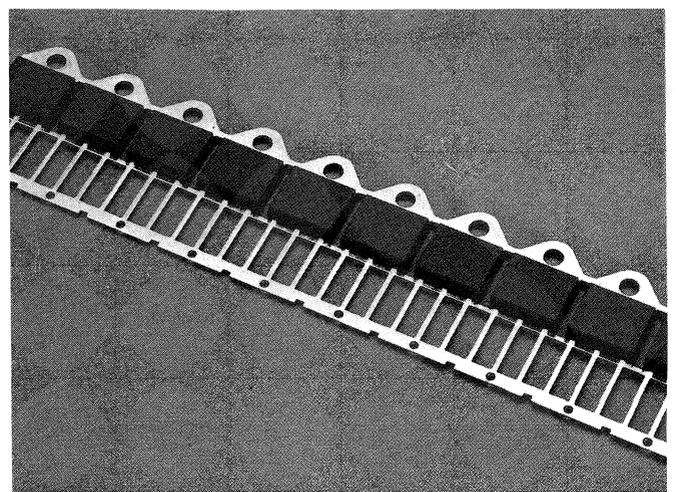


Fig. 5 - Prima di essere separati dal pettine, i transistori vengono incapsulati con una speciale resina al silicone.

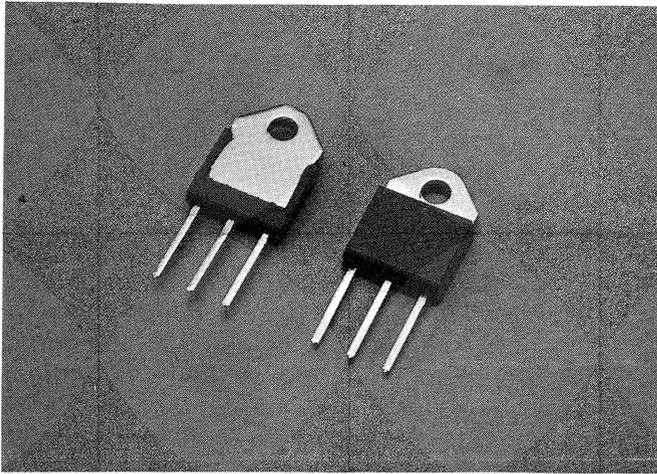


Fig. 6 - Due transistori in SOT-93 separati dal pettine. I terminali vengono immersi in un bagno di stagno. Il collettore (cristallo) risulta ovviamente collegato alla base di montaggio del transistor (terminale centrale).

icolare saldatura permette di ottenere un accoppiamento termico omogeneo e perfetto tra cristallo e base di montaggio. Il processo della "saldatura dura" avviene in questa maniera.

Inizialmente si provvede a depositare sul retro del

cristallo passivato un sottile strato di oro; un equivalente strato di oro verrà depositato anche sulla superficie nichelata della base di montaggio (in rame) sulla quale verrà sistemato il cristallo (fig. 2). In una fase successiva, il cristallo viene pressato sulla base di montaggio; l'insieme base di montaggio/cristallo viene quindi riscaldato e durante questa operazione il cristallo viene come "sfregato" contro lo strato di oro della base di montaggio. E' in questa maniera che tra cristallo e base di montaggio viene formata la "saldatura eutettica" (fig. 3).

Successivamente si provvede a collegare mediante fili di alluminio le aree metallizzate (alluminio) della base e dell'emettitore del cristallo ai corrispondenti terminali del contenitore. Questi fili di collegamento vengono saldati nelle rispettive sedi mediante ultrasuoni (fig. 4). La saldatura ad ultrasuoni assicura, com'è noto, una bassa resistenza termica di questi punti di saldatura.

A questo punto, si provvede a incapsulare il transistor nel contenitore di plastica al silicone (fig. 5). Questo materiale è puro e possiede un coefficiente di dilatazione termica tale per cui tutto l'insieme rimarrà rigido in tutte le condizioni termiche in cui il transistor verrà ad operare.

I transistori incapsulati vengono infine separati dal pettine (fig. 6) e i loro terminali (base, collettore, emettitore) vengono immersi in un bagno di stagno fuso onde assicurare una perfetta saldatura quando verranno montati nel circuito.

Tabella 1 - TRANSISTORI IN CONTENITORE SOT-93 PER STADI FINALI AUDIO

		$V_{CBO \max}$	$V_{CEO \max}$	$I_{CM \max}$	$P_{tot \max}$	$T_j \max$	$h_{FE \text{ tip}}$	$f_T \text{ min}/(f_{hfe})$
		V	V	A	W	°C		MHz/kHz
BDV64	p-n-p	-60	-60	15	125	150	> 1000 con $I_c = 5 \text{ A}$ $V_{CE} = 4 \text{ V}$	100 (p-n-p) 70 (n-p-n)
BDV65	n-p-n	60	60					
BDV64A	p-n-p	-80	-80					
BDV65A	n-p-n	80	80					
BDV64B	p-n-p	-100	-100	20	90	150	≥ 20 con $I_c = 4 \text{ A}$ $V_{CE} = 4 \text{ V}$	4
BDV65B	n-p-n	100	100					
BDV91	n-p-n	60	60					
BDV92	p-n-p	-60	-60					
BDV93	n-p-n	80	80	8	70	1,5	0,3	30
BDV94	p-n-p	-80	-80					
BDV95	n-p-n	100	100					
BDV96	p-n-p	-100	-100					

Tabella 2 - TRANSISTORI IN CONTENITORE SOT-93 PER STADI FINALI DI RIGA E PER ALIMENTATORI A COMMUTAZIONE

		$V_{CESM \max}$	$V_{CEO \max}$	$I_{CM \max}$	$P_{tot \max}$	$V_{CEsat \max}$	$t_f \text{ tip}$	$h_{FE \text{ tip}}$
		V	V	A	W	V	μs	(0,6 A)
BU426	n-p-n	800	375	8	70	1,5	0,3	30
BU426A	n-p-n	900	400					
BU433	n-p-n	800	375	8	70	1,5	0,45	40

3.1 - ESAME PIU' DETTAGLIATO DEL CIRCUITO DELL'AMPLIFICATORE

Esaminiamo più da vicino il circuito di fig. 7. Il circuito aggiuntivo riportato in fig. 8 è il classico *circuito di protezione*, inseribile nel circuito dell'amplificatore nei punti corrispondenti alle lettere riportate; i morsetti di uscita potranno anche accidentalmente trovarsi in corto, ma i transistori finali non rimarranno danneggiati.

Il segnale fornito dalla coppia complementare finale è accoppiato *direttamente* (in c.c.) all'altoparlante. Vantaggi: economia (l'elettrolitico costa) e migliore risposta alle basse frequenze. Ciò richiede però due tensioni di alimentazione uguali e contrarie (alimentazione con presa centrale); inoltre, la "tensione" sulla presa centrale (e cioè tensione zero o massa) dovrà essere rigorosamente stabilizzata in modo che, in nessun caso, come accennato precedentemente, si abbia circolazione di corrente nella bobina mobile dell'altoparlante. Ciò si ottiene applicando l'eventuale variazione in più o in meno rispetto massa (tensione off-set), presente sulla presa centrale, ad una delle basi di uno stadio differenziale presente all'ingresso. Questa stabilizzazione si rende necessaria quando lo amplificatore deve funzionare con un altoparlante statico collegato tramite un trasformatore con primario a resistenza ohmica molto bassa ma reale.

Esiste in ogni modo la possibilità che nella bobina mobile dell'altoparlante circoli corrente continua nel caso in cui una delle due linee di alimentazione venga interrotta. E' questo il motivo per cui occorrerà inserire nelle due suddette linee (positiva e negativa rispettivamente) un fusibile da 2 A.

Lo stadio d'ingresso differenziale è formato da TR1 e TR2; i due emettitori sono collegati al collettore di TR3 che funziona da "sorgente di corrente" da 1 mA.

Le inevitabili differenze di guadagno esistenti tra i due transistori della coppia differenziale (cioè TR1 e TR2), potranno produrre differenti cadute di tensioni ai capi dei resistori R2 e R17. Impiegando però per la coppia differenziale il tipo BC 547C e facendolo lavorare con una corrente di collettore di 0,5 mA; inoltre, assegnando ai resistori R2/917 il valore di 22 k Ω , le suddette differenze di tensioni potranno essere ridotte a valori del tutto trascurabili.

Il guadagno in alternata dell'amplificatore è determinato dal rapporto tra i resistori $(R1 + R2)/R2$ e $(R17 + R18)/R18$. La stabilità complessiva del medesimo è determinata invece dai gruppi R-C R3/C4, R16/C7, R19/C9 ed infine da R1 e C5.

Il segnale d'uscita dallo stadio differenziale è collegato alla base di TR4; quest'ultimo lavora come pilota in "classe A" con TR6 che funziona da sorgente di corrente di collettore con valore di 7 mA.

Lo stadio finale a simmetria complementare lavora in "classe AB" e ha una corrente di riposo di 50 mA. Questo valore di corrente viene fissato dal trimmer R11 ed è termicamente stabilizzato dalla V_{ce} di TR5 che, dipendendo dalla temperatura, è in grado di contrastare le variazioni della tensione base-emettitore dei transistori finali. La stabilità della corrente di collettore dei transistori finali contro le variazioni

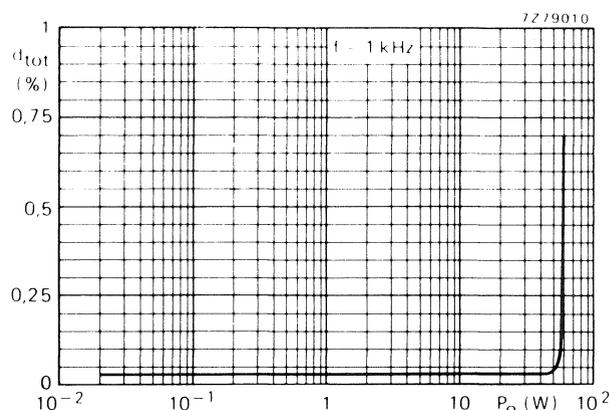


Fig. 9 - Distorsione in funzione della potenza nell'amplificatore di fig. 7.

della temperatura è inoltre assicurata dal fatto che TR5 viene posto in contatto termico con il radiatore dove sono montati i transistori finali medesimi e che inoltre vengono inseriti negli emettitori di quest'ultimi resistori da 0,5 Ω .

L'induttore da 4 μ H, con in parallelo R20, entrambi posti in serie alla bobina mobile dell'altoparlante impediscono l'insorgere di eventuali fenomeni di instabilità che potrebbero verificarsi nel caso di carichi capacitivi, quali per esempio, quelli forniti da altoparlanti elettrostatici.

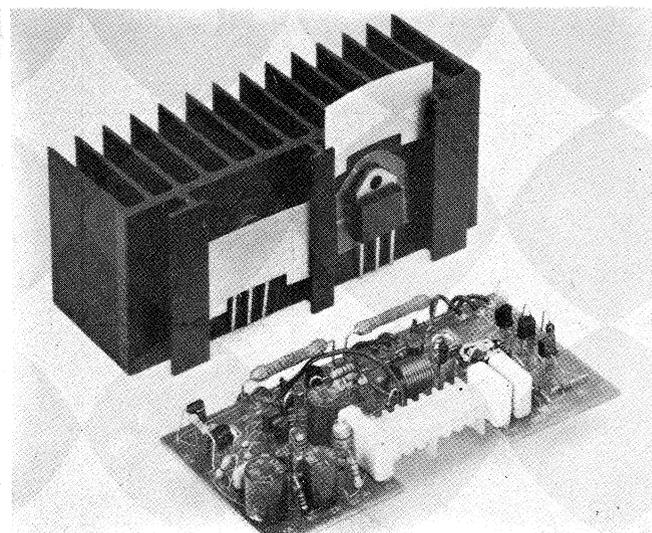


Fig. 10 - Esempio d'impiego dei transistori BDV 64A e BDV 65A in uno stadio finale di un amplificatore Hi-Fi. (Per cortesia della ditta Bang e Olufsen A/S/ Danimarca).

3.2 - ESEMPIO DI CALCOLO DEI PARAMETRI PIU' SIGNIFICATIVI DI QUESTO AMPLIFICATORE

Il valore di picco della corrente di collettore dei transistori TR7 e TR8 alla potenza $P_o = 50 \text{ W}$ è, con un carico $R_L = 4 \Omega$,

$$I_c = \sqrt{\left(\frac{2 \times 50}{4}\right)} = 5 \text{ A}$$

In corrispondenza di questo valore di picco della corrente di collettore, il minimo h_{FE} dei transistori finali ammonterà a 1000; pertanto, la corrente di pilotaggio di base che dovrà essere fornita da TR4 avrà il valore di 5 mA (infatti $5 \times 10^{-3} \times 10^3 = 5 \text{ A}$).

Il valore minimo della tensione di alimentazione in condizioni di massimo carico è:

$$\pm V_{CC \text{ min}} = V_{\text{perdite}} + V_0 = V_{\text{perdite}} + \sqrt{(2 P_o \times R_L)}$$

La tensione perduta massima è circa 7 V. Il valore minimo della tensione di alimentazione, in condizioni di massimo carico, sarà:

$$\pm V_{CC \text{ min}} = 7 + \sqrt{(100 \times 4)} = \pm 27 \text{ V}$$

Supponendo di impiegare una tensione di alimentazione non stabilizzata con una fluttuazione del 15% (questa percentuale viene definita nella seguente maniera: $100 (V_{CC0} - V_{CC})/V_{CC0}$), il valore reale della tensione di alimentazione, a pieno carico sarà:

$$\pm V_{CC0} = \frac{27}{0,85} = \pm 32 \text{ V}$$

La massima dissipazione di collettore (valore medio) si ha quando la potenza dissipata in entrambi i transistori è uguale alla potenza trasferita nel carico. Impiegando come segnale di prova, un segnale sinusoidale, ciò si verifica in corrispondenza del 40% e cioè $(2/\pi)^2$ della massima potenza nel carico.

Il livello della tensione di alimentazione per questo valore del carico è:

$$V_{CC} (2/\pi) = 0,9 V_{CC0} = 28,8 \text{ V}$$

Tenendo in considerazione un 10% di tolleranza nella tensione di rete, e un 20% di tolleranza nel carico, la massima dissipazione nel transistor finale TR8 potrà avere il seguente valore:

$$P_d = \frac{(1,1 \times 28,8)^2}{\pi^2 (0,8 R_L + R_{15})} = 27,5 \text{ W}$$

La dissipazione nell'altro transistor finale, e cioè in TR7, avrà un valore leggermente inferiore a quello di TR8; in pratica però potrà essere considerata uguale a quella di TR8.

Nel caso la temperatura alla giunzione assumesse il valore di 150 °C e la temperatura dell'aria dell'ambiente avesse il valore di 45 °C, la resistenza termica complessiva tra giunzione del transistor e aria circostante non dovrà superare il valore di

$$R_{th \text{ j-a max}} = \frac{T_{j \text{ max}} - T_{\text{amb}}}{P_{d \text{ max}}} = \frac{150 - 45}{27,5} = 3,8 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Il valore della resistenza termica tra radiatore e ambiente ($R_{th \text{ h-a}}$) è data da:

$$R_{th \text{ h-a}} = R_{th \text{ j-a}} - R_{th \text{ j-mb}} - R_{th \text{ mb-h}}$$

nella quale

$R_{th \text{ h-a}}$ = resistenza termica tra radiatore e ambiente

$R_{th \text{ j-a}}$ = resistenza termica tra giunzione e ambiente

$R_{th \text{ j-mb}}$ = resistenza termica tra giunzione e base di montaggio

$R_{th \text{ mb-h}}$ = resistenza termica tra base di montaggio e radiatore di calore.

Per i transistori BDV 64A e BDV 65A, $R_{th \text{ mb-h}}$ è 1 °C/W e la $R_{th \text{ mb-h}}$ è 0,8 °C/W nel caso in cui vengano impiegate rondelle di mica e pasta al silicone (vedi appendice). Pertanto, la resistenza termica del radiatore di ciascun transistor finale dovrà avere il valore di

$$R_{th \text{ h-a}} = 3,8 - 1 - 0,8 = 2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Gli altri transistori dell'amplificatore non richiedono radiatori di calore.

Tabella 3 - TRANSISTORI IN CONTENITORE SOT-93 RIUNITI SECONDO IL LORO TIPICO IMPIEGO

TIPO	IMPIEGO
BDV64 BDV64A BDV64B BDV65 BDV65A BDV65B	Coppie darlington per stadi finali complementari di potenza, a guadagno elevato, per amplificatori Hi-Fi con potenze d'uscita fino a 50 W.
BDV91 BDV93 BDV95 BDV92 BDV94 BDV96	Coppie per stadi finali complementari di potenza per amplificatori Hi-Fi con potenza d'uscita fino a 35 W.
BU426 BU426A	Transistori per alte tensioni per alimentatori a commutazione per TV (convertitore tipo "fly-back")
BU433	Transistore per alte tensioni per stadi finali di riga per TV o per stadi finali di alimentatori a commutazione (convertitore tipo "forward")

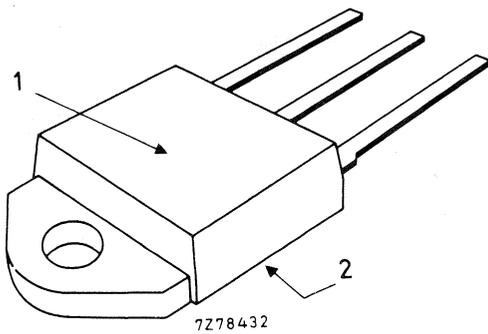


Fig. 11 - I terminali del SOT-93 si trovano sullo stesso piano di montaggio del transistor. 1 = punto sul quale si può esercitare una pressione per consentire il miglior contatto tra base di montaggio del transistor (collettore) e dissipatore di calore. 2 = superficie in diretto contatto con il radiatore.

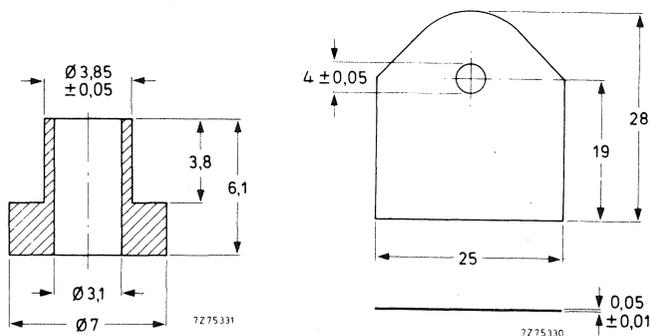


Fig. 12 - Accessori per montaggio isolato del contenitore SOT-93; a destra c'è la rondella isolante; a sinistra la boccia per la vite di fissaggio.

4. - PRESTAZIONI DELL'AMPLIFICATORE

Si riferiscono all'amplificatore di fig. 7 con altoparlante da 4 Ω.

— alimentazione senza carico	± 32 V
— alimentazione con carico	± 27 V
— errore di tensione sul punto intermedio	50 mV max
— corrente di lavoro (c.c.) per TR3	1 mA
— corrente di lavoro (c.c.) per TR1/TR2	0,5 mA
— corrente di riposo (c.c.) di TR7/TR8	50 mA
— impedenza d'ingresso	25 kΩ
— impedenza d'uscita	0,04 Ω
— guadagno (anello aperto)	77 dB
— guadagno (anello chiuso)	27 dB
— sensibilità d'ingresso per $P_0 = 50W$	600 mV
— potenza d'uscita (distorsione IIIa armonica 0,5%)	50 W min
— larghezza di banda della potenza (distorsione IIIa armonica 0,7% a -1 dB)	<20 Hz... >20 kHz
— risposta in frequenza (a -1 dB) livello riferimento $P_0 = 5W$ a 1 kHz)	20 Hz... 30 kHz
— distorsione armonica complessiva fino a $P_0 = 50W$ ($f = 1 kHz$)	0,1% max (fig. 9)
— distorsione per intermodulazione a $P_0 = 50W$	0,5% max
— rapporto segnale disturbo	800 dB min
— assorbimento di corrente alla massima potenza	± 1,6 A

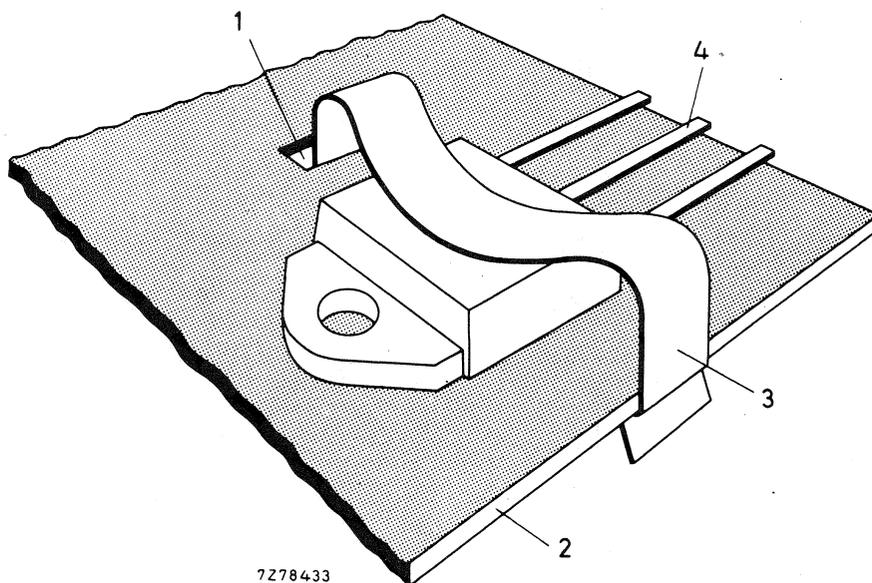


Fig. 13 - Esempio di fissaggio di un contenitore SOT-93 mediante clip (56379). 1 = apertura rettangolare sul radiatore, 2 = bordo del radiatore, 3 = clip, 4 = i terminali possono essere collegati direttamente al circuito stampato

APPENDICE

Regole generali per il montaggio dei transistori con contenitore SOT-93

Innanzitutto non si dovranno esercitare forti sollecitazioni meccaniche sui terminali e sul contenitore del transistor. Anche la caduta del transistor su una superficie dura (cemento, ferro) può danneggiare il transistor.

Come già accennato, è possibile abbassare considerevolmente la resistenza termica tra base di montaggio del transistor e radiatore di calore spalmando le due superfici di contatto con paste al silicone. Nel caso di montaggio con isolamento converrà spalmare con la suddetta pasta, la parte della mica che "guarda" il contenitore e la faccia del contenitore a contatto con la mica. Per ciò che riguarda la saldatura del transistor al circuito si dovrà distinguere:

a) saldatura con bagno di stagno

La massima temperatura dello stagno fuso non potrà superare i 260 °C; il contenitore dovrà distare almeno 5 mm dal bagno. I terminali non dovranno rimanere nel bagno di stagno più di 7 secondi.

b) saldatura con normale saldatore

La massima temperatura del saldatore non dovrà superare i 275 °C. Il saldatore non dovrà essere portato più vicino di 3 mm dal contenitore e la saldatura dei terminali non dovrà durare più di 5 secondi.

Il contenitore del transistor non dovrà essere portato a contatto con un corpo con temperatura superiore a 200 °C. Il contenitore non dovrà essere saldato al radiatore di calore dato che in questo la giunzione verrebbe sottoposta ad una temperatura superiore a quella prescritta. Non si deve correggere la posizione del contenitore dopo che i suoi terminali sono stati saldati al circuito.

Se ci si atterrà alle regole sopradette, la resistenza termica tra base di montaggio e radiatore di calore ($R_{th\ sub-b}$) avrà i seguenti valori:

	montaggio diretto	montaggio con isolamento
senza pasta al silicone sul radiatore	0,8 °C/W	2,2 °C/W
con pasta al silicone sul radiatore	0,3 °C/W	0,8 °C/W

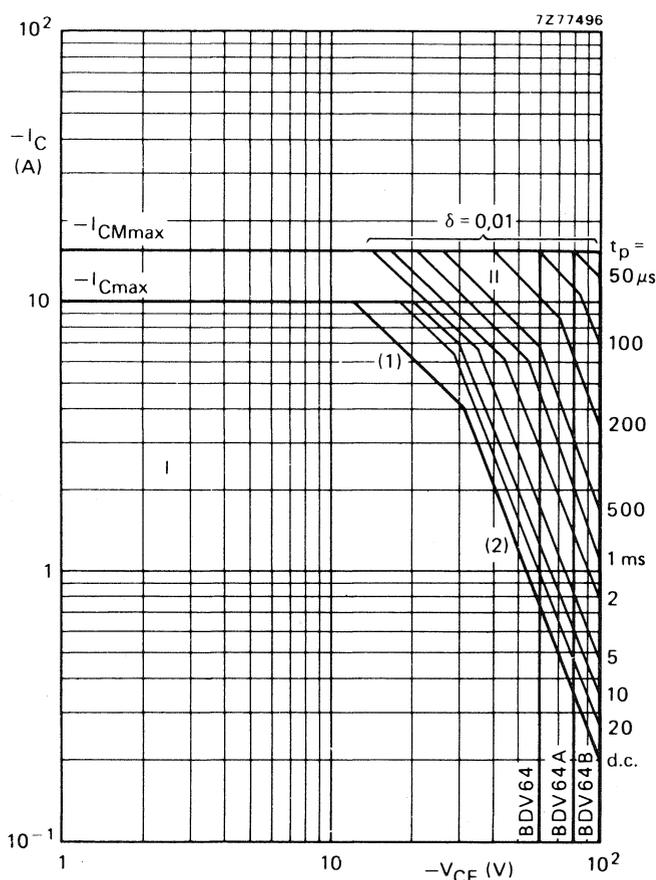
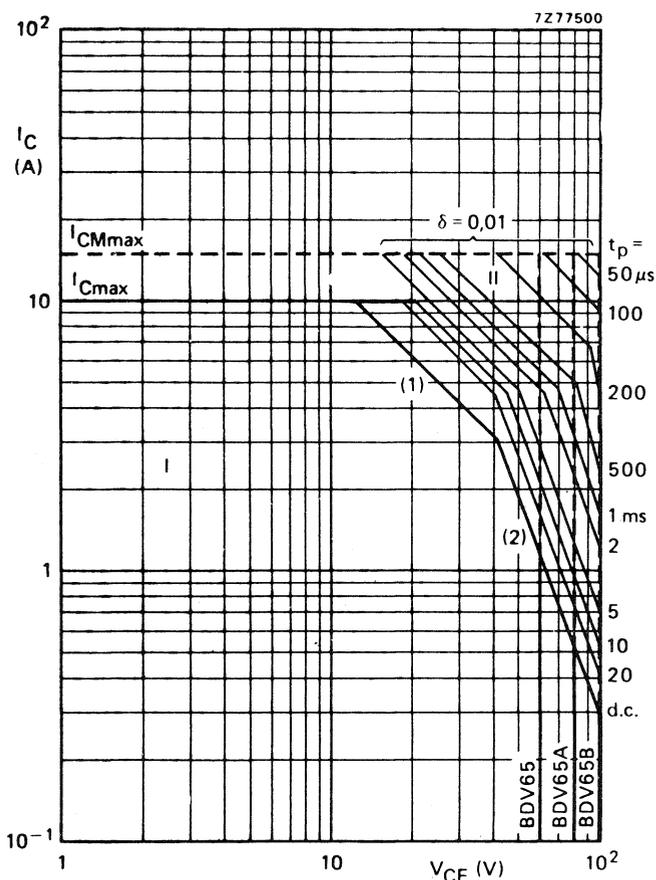


Fig. 14 - Curve SOAR (Safe Operating Area) a ≤ 25 °C. I = zona di funzionamento in c.c. II = zona ammissibile per funzionamento ad impulsi (1) = linea di $P_{tot\ max}$ e di P_{max} di picco (2) = zona limite secondo "breakdown". a destra per il BDV 64/64A/64B; a sinistra per il BDV 65/65A/65B.

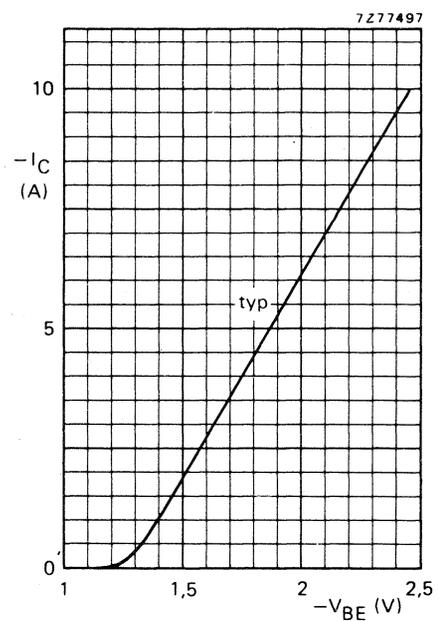
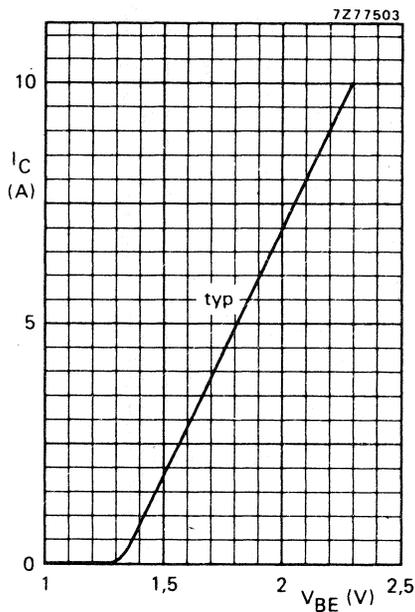


Fig. 15 - Corrente di collettore in funzione della tensione emettitore-base. A destra per il BDV 64/64A/64B; a sinistra per il BDV 65/65A/65B.

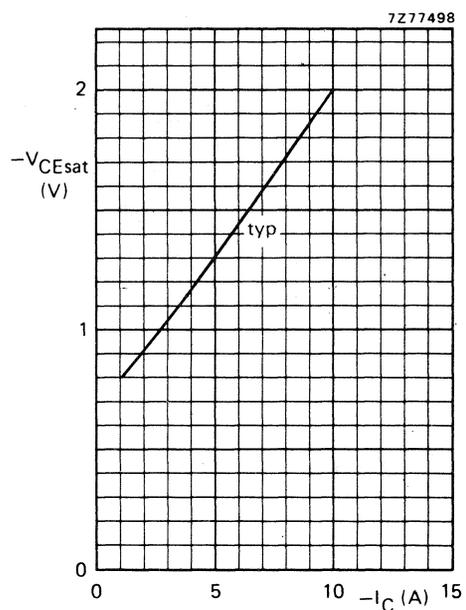
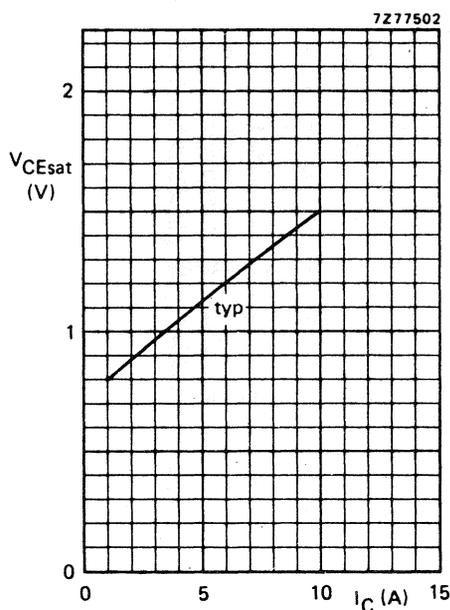


Fig. 16 - Tensione di saturazione in funzione della corrente di collettore. A destra per il BDV 64/64A/64B; a sinistra per il BDV 65/65A/65B.

Montaggio mediante clip

In sede di produzione di una data apparecchiatura il montaggio dei transistori di potenza richiede in generale un tempo considerevole se lo si raffronta alle altre fasi di montaggio. Ciò vale in particolare per il "vecchio" TO-3.

Il nuovo TO-93 abbrevia senza dubbio i tempi di montaggio del transistor al radiatore. Innanzitutto perchè, a differenza del TO-3, i suoi terminali si trovano

sullo stesso piano del radiatore; in secondo luogo, poichè potendosi esercitare una notevole pressione sulla parte centrale del radiatore (fig. 10), questo contenitore può essere posto in stretto contatto con la superficie del radiatore mediante clip. (fig. 11).

Ovviamente, il TO-93 può essere fissato sul radiatore anche mediante vite di fissaggio e, nel caso il collettore debba essere isolato dal radiatore, è prevista una rondella di mica e la relativa boccola isolante per la vite (fig. 12).

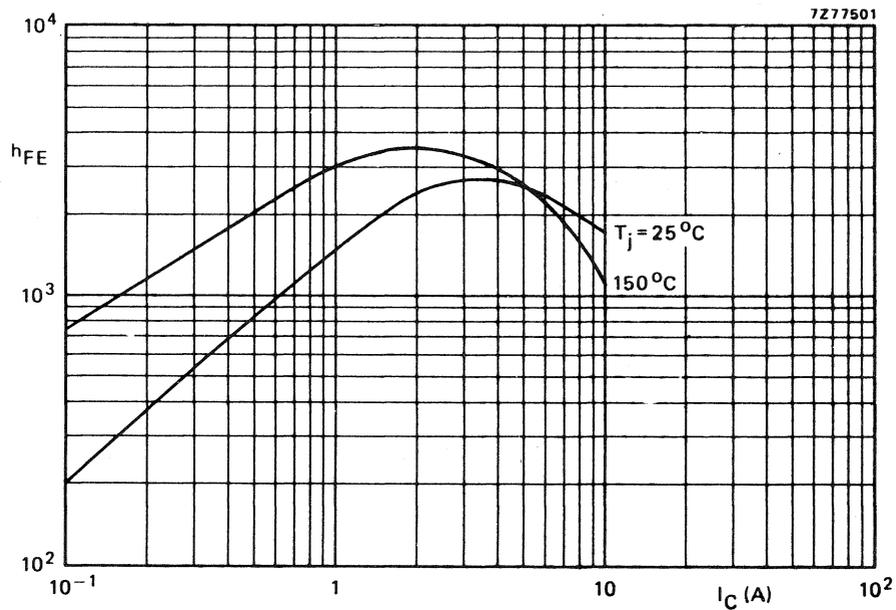
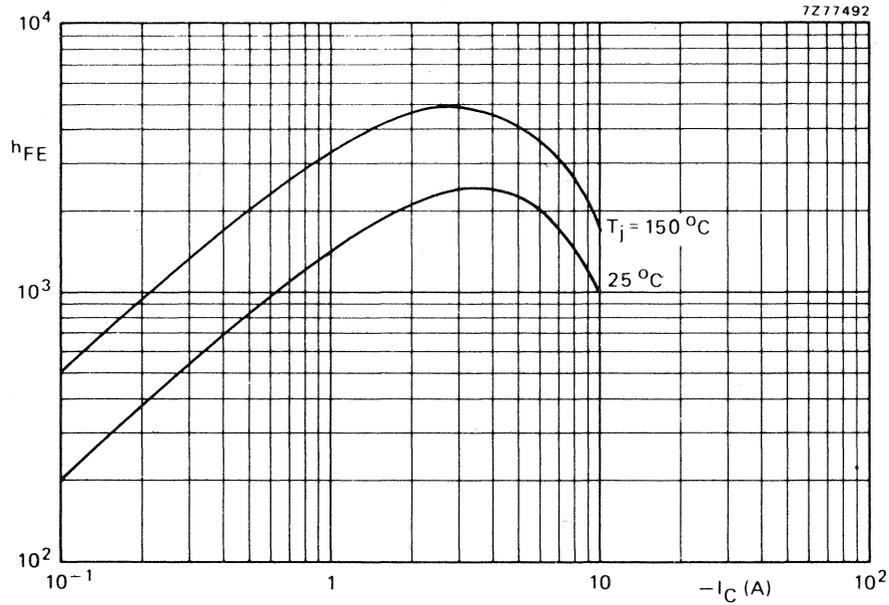


Fig. 17 - Fattore di amplificazione in funzione della corrente di collettore. In alto per il BDV 64/64A/64B; in basso per il BDV 65/65A/65B.

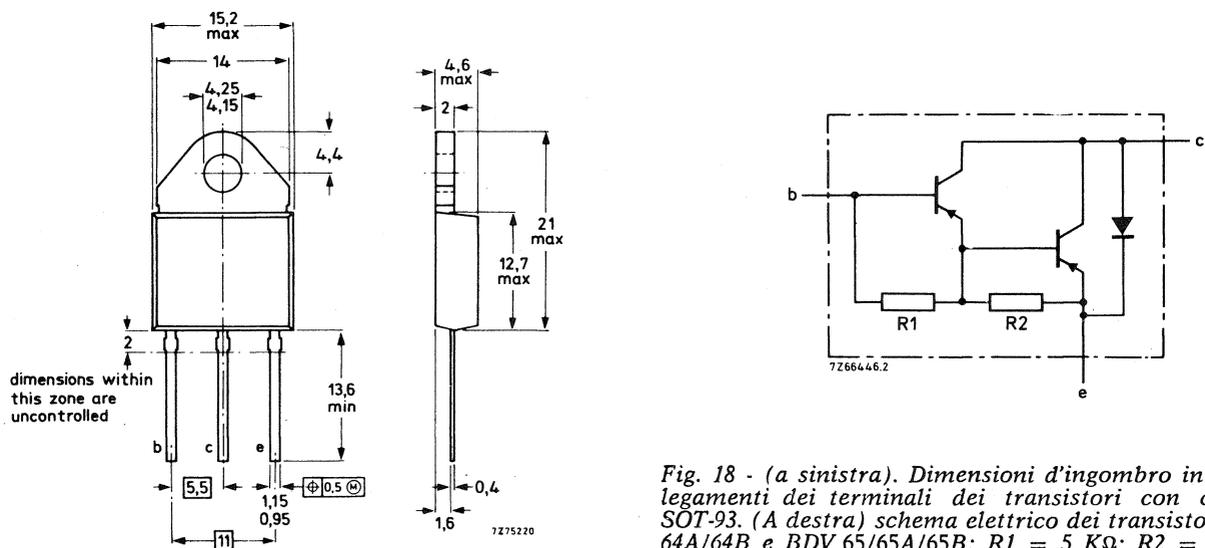


Fig. 18 - (a sinistra). Dimensioni d'ingombro in mm e collegamenti dei terminali dei transistori con contenitore SOT-93. (A destra) schema elettrico dei transistori BDV 64/64A/64B e BDV 65/65A/65B; R1 = 5 K Ω ; R2 = 80 Ω .

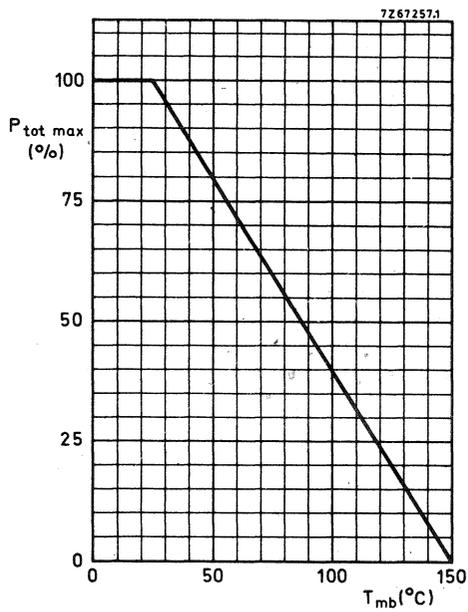


Fig. 19 - $P_{tot\ max}$ in funzione della temperatura della base di montaggio (BDV 64/65, BDV 64A/65A, BDV 64B/65B).

Tabella 4 - POTENZE «TRATTATE» DAI NUOVI TRANSISTORI IN SOT-93 E DAI CORRISPONDENTI IN CONTENITORE TO-3

$V_{CE} (V)$	massima potenza dissipata (in W) a $T_{mb} = 25^{\circ}C$			
	BDX64A (TO-3)	BDV64A (SOT-93)	BDX65A (TO-3)	BDV65A (SOT-93)
10	117	125	117	125
30	70	125	70	125
60	15	44	15	65
80	8	28	8	42