

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

RELAZIONE DI TIROCINIO

**Attività di laboratorio per la caratterizzazione di  
circuiti integrati: utilizzo di apparecchiature e  
valutazione dei dati raccolti**

*Laureando:*

Emanuele Baldisseri

*Relatore:*

prof. Giada Giorgi

*Correlatore:*

ing. Daniele Dario

Padova, 22 luglio 2011

Anno accademico 2010/2011



## INDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>PREFAZIONE</b> .....  | 3  |
| <b>1 - CENNI TEORICI SUL BANDGAP</b> .....   | 4  |
| - 1.1 - Principio di funzionamento .....   | 7  |
| - 1.2 - Descrizione del bandgap da caratterizzare .....                                  | 11 |
| - 1.3 - Introduzione del testchip .....  | 14 |
| <b>3 - MISURA A TEMPERATURA AMBIENTE</b> .....   | 16 |
| - 3.1 - Scopo della misura .....   | 16 |
| - 3.2 - Schema di misura e ambiente di test .....  | 16 |
| - 3.3 - Risultati .....  | 17 |
| <b>4 - MISURA IN TEMPERATURA</b> .....   | 20 |
| - 4.1 - Scopo della misura .....   | 20 |
| - 4.2 - Schema di misura e ambiente di test .....  | 20 |
| - 4.3 - Risultati .....  | 21 |
| <b>5 - LINE REGULATION</b> .....   | 25 |
| - 5.1 - Scopo della misura .....   | 25 |
| - 5.2 - Schema di misura e ambiente di test .....  | 25 |
| - 5.3 - Risultati .....  | 26 |
| <b>6 - VBG IN FUNZIONE DELLA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE E DELLA<br/>TEMPERATURA</b> ..... | 27 |
| - 6.1 - Scopo della misura .....   | 27 |
| - 6.2 - Schema di misura e ambiente di test .....  | 27 |
| - 6.3 - Risultati .....  | 28 |
| <b>7 - LOAD REGULATION</b> .....   | 29 |
| - 7.1 - Scopo della misura .....   | 29 |
| - 7.2 - Schema di misura e ambiente di test .....  | 29 |
| - 7.3 - Risultati .....  | 30 |
| <b>8 - MISURA DEL CONSUMO DI CORRENTE DEL BANDGAP</b> .....                              | 31 |
| - 8.1 - Scopo della misura .....   | 31 |
| - 8.2 - Schema di misura e ambiente di test .....  | 31 |
| - 8.3 - Risultati .....  | 31 |
| <b>9 - LINE REGULATION DEL SUPPLY DEL BANDGAP</b> .....                                  | 32 |
| - 9.1 - Scopo della misura .....   | 32 |
| - 9.2 - Schema di misura e ambiente di test .....  | 32 |
| - 9.3 - Risultati .....  | 33 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>10- LOAD REGULATION DEL SUPPLY DEL BANDGAP .....</b>     | <b>34</b> |
| - 10.1 - Scopo della misura .....                           | 34        |
| - 10.2 - Schema di misura e ambiente di test .....          | 34        |
| - 10.3 - Risultati .....                                    | 35        |
| <b>11- MISURA DEL CONSUMO DI CORRENTE COMPLESSIVO .....</b> | <b>36</b> |
| - 11.1 - Scopo della misura .....                           | 36        |
| - 11.2 - Schema di misura e ambiente di test .....          | 36        |
| - 11.1 - Risultati .....                                    | 37        |
| <b>11- CONCLUSIONI.....</b>                                 | <b>38</b> |
| <b>12- STRUMENTAZIONE.....</b>                              | <b>40</b> |
| - 12.1 - Camera termica .....                               | 40        |
| - 12.2 - Power supply .....                                 | 41        |
| - 12.3 - Source meter .....                                 | 42        |
| - 12.4 - Multimetro .....                                   | 47        |
| - 12.5 - Generatore di funzioni .....                       | 48        |
| - 12.6 - Oscilloscopio .....                                | 49        |
| <b>APPENDICE .....</b>                                      | <b>50</b> |
| - Cenni teorici sui tracker.....                            | 50        |
| - Schema di misura e ambiente di test.....                  | 52        |
| - Risultati.....  | 53        |
| <b>RIFERIMENTI.....</b>                                     | <b>58</b> |

## **PREFAZIONE**

Il lavoro descritto nei paragrafi successivi è inerente a quanto fatto nel mio tirocinio svolto presso Infineon Technologies Italia s.r.l, azienda leader nel mercato dei semiconduttori con casa madre a Monaco di Baviera. I componenti elettronici di Infineon trovano applicazione nel mercato Automotive (elettronica per automobili), in quello Industriale, della Sicurezza e delle Comunicazioni Wireless.

Il tirocinio è stato centrato sulla caratterizzazione di un circuito, cioè sulla determinazione e la descrizione, tramite misure elettriche, delle caratteristiche principali dello stesso. In particolare il circuito in esame è un testchip, ossia un circuito integrato non in produzione, progettato appositamente per testare il funzionamento di blocchi circuitali sensibili. Tali circuiti possono avere infatti comportamenti reali molto diversi da quelli ideali, ed è quindi necessario uno studio funzionale prima di includerli in progetti ed applicazioni complesse.

Il testchip è relativo ad un bandgap di nuova concezione destinato al settore automotive e progettato internamente ad Infineon, del quale si vuole analizzare il comportamento reale.

L'attività di caratterizzazione ha richiesto in primo luogo la comprensione del funzionamento del circuito e quindi la predisposizione di una scheda stampata che facilitasse l'interfacciamento del circuito integrato con gli strumenti di misura. Una volta verificato il corretto funzionamento della scheda stampata si è proceduto con l'effettiva caratterizzazione del testchip e alla interpretazione delle misure al fine di ricavare le figure di merito significative.

La tesi descrive le varie fasi della caratterizzazione e ne riporta i risultati, che saranno soprattutto inerenti alla verifica funzionale del circuito e alla quantificazione del suo consumo energetico.

In aggiunta è presente una sezione di descrizione delle specifiche principali degli strumenti utilizzati, di alcuni modi di utilizzo e di alcune funzionalità che si è avuto modo di apprendere.

A margine della trattazione relativa alla caratterizzazione del bandgap è riportata una misura di natura diversa, totalmente indipendente dalle precedenti, che descrive lo studio del comportamento di un componente Infineon in particolari condizioni di funzionamento.

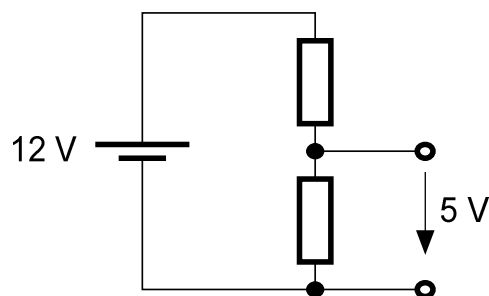
## 1 - CENNI TEORICI SUL BANDGAP

In generale il *bandgap* è un circuito che ha il compito di generare, all'interno di un integrato, un riferimento di tensione che sia il più possibile indipendente dal processo di produzione, dall'alimentazione e soprattutto dalla temperatura. Un circuito integrato, infatti, è spesso sottoposto a stress dovuti a variazioni di temperatura notevoli, causate sia dall'ambiente esterno sia da correnti che, nel normale funzionamento, scaldano il silicio dell'integrato causando variazioni termiche.

Alcuni blocchi circuitali sono molto sensibili e per funzionare correttamente richiedono una tensione (o corrente) di riferimento molto precisa e indipendente dalle variazioni sopra citate. Il bandgap rappresenta quindi un blocco base per ottenere buone prestazioni nelle applicazioni in cui è necessario avere un alto livello di precisione.

Oltre che un riferimento preciso, quasi sempre in un integrato sono richieste varie tensioni di alimentazione, in quanto sono presenti vari blocchi circuitali che possono richiedere alimentazioni indipendenti tra loro e di valore diverso da quella di batteria; in questi casi si ricorre ai *regolatori di tensione dc-dc*.

Un semplice regolatore di tensione è riportato in *figura1*:

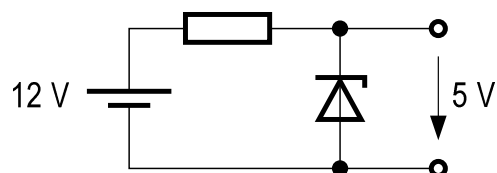


**Figura 1:** semplice partitore di tensione

Questo schema realizzativo, pur raggiungendo lo scopo, è di fatto inutilizzabile, in quanto presenta pesanti inconvenienti:

- la tensione di uscita dipende da quella di batteria
- effetto carico: la tensione di uscita dipende dalla resistenza interna del carico
- c'è dissipazione di potenza anche in stand-by

Un primo miglioramento circuitale è mostrato in *figura2* :



**Figura 2:** regolatore di tensione con diodo zener

con questo schema si risolve il problema dell'effetto carico, ma se ne introducono altri:

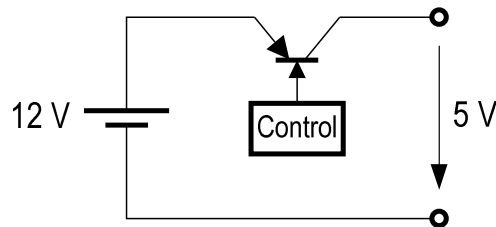
- Impossibilità di ottenere tensioni diverse dai valori delle tensioni di zener in produzione
- Il diodo zener deve essere in grado di dissipare una potenza a volte notevole

Questo schema è utilizzabile per applicazioni di bassa potenza e che non richiedono precisione.

Riassumendo, la tensione d'uscita di un convertitore dc-dc deve essere:

- indipendente dalla tensione di batteria
- indipendente dalla temperatura
- indipendente dal carico
- precisa

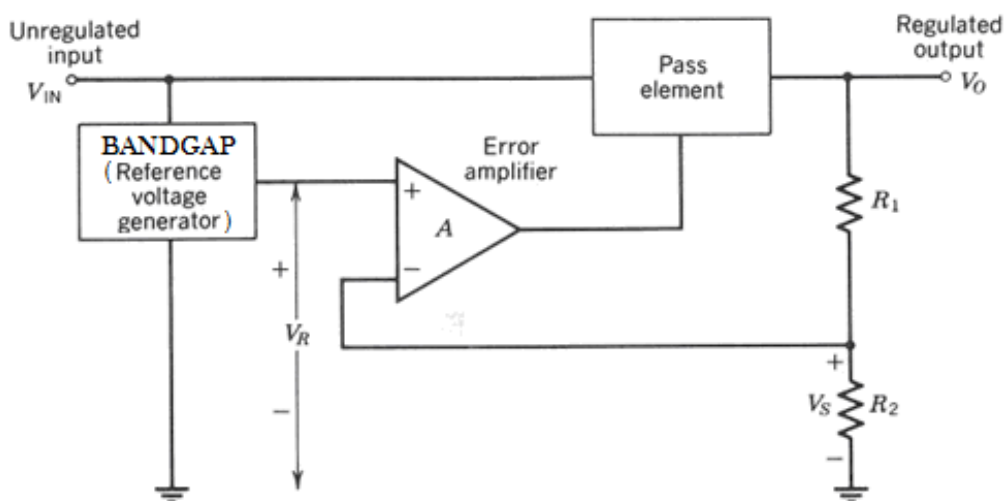
Lo schema di principio che viene usato per ottenere queste caratteristiche è riportato in *figura3*:



**Figura 3:** *schema di principio ottimale di un regolatore dc-dc*

Il transistor tra alimentazione ed uscita prende il nome di PASS ELEMENT, ed è pilotato da una rete di controllo che mantiene la tensione d'uscita al valore voluto e indipendente dal carico e dalle variazioni della tensione di batteria.

La rete di controllo, schematizzata in *figura4*, è basata su un loop di retroazione che permette di pilotare il pass-element in modo da ottenere la tensione voluta in uscita e stabile.



**Figura 4:** *schema del loop di retroazione che controlla il pass element*

Tramite il partitore composto da R1 e R2 la tensione d'uscita viene scalata e riportata al piedino negativo dell'error amplifier come  $V_s = V_o * R2 / (R1 + R2)$ . Al piedino positivo è invece presente la tensione Vr imposta dal **bandgap**.

Notiamo che se  $V_s < V_r$  l'uscita dell'error amplifier si porta a livello alto, causando l'accensione del pass element il quale diventa assimilabile ad un corto. A causa di questo la tensione Vo cresce finché Vs non eguaglia Vr. Quando  $V_s = V_r$ , l'error amplifier porta la sua uscita a livello basso spegnendo il pass element e rendendolo assimilabile ad un aperto; a questo punto Vo tenderebbe a diminuire (e con essa anche Vs), ma il procedimento viene ripetuto mantenendola stabile.

La tensione d'uscita Vo, è data dalla relazione:

$$V_o = V_r * \frac{R1 + R2}{R2}$$

**È importante quindi che la tensione Vr sia una tensione che soddisfi tutte le proprietà di un regolatore dc-dc, poiché da essa dipende proporzionalmente la tensione d'uscita.**



## 1.1 - Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento del bandgap si basa sulla somma di due tensioni : una tensione con una variazione positiva in temperatura (PTAT) e una con una variazione negativa (CTAT), in modo tale che la somma delle due sia una tensione costante in temperatura.

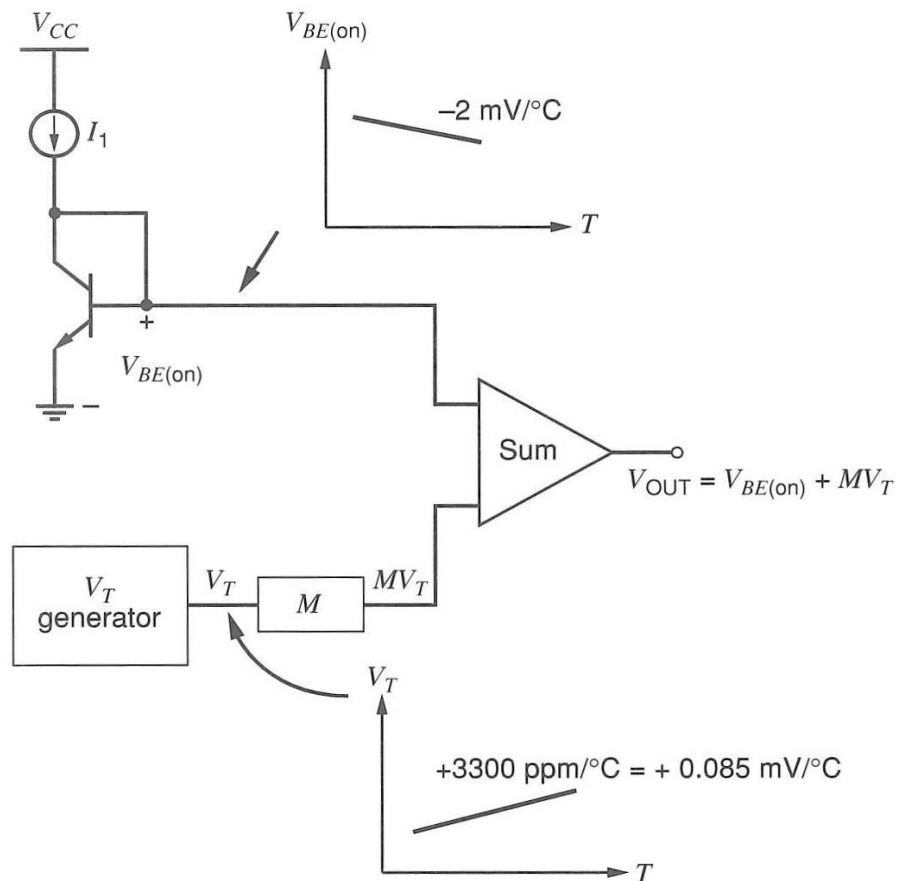


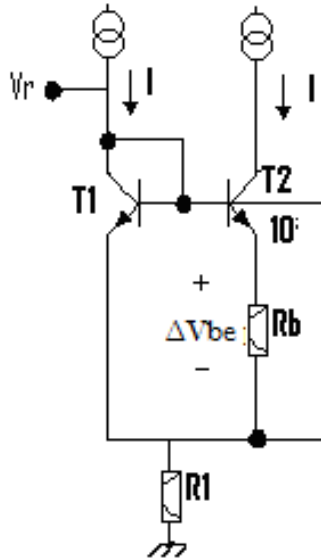
Figura 5: principio di funzionamento del bandgap

Le due tensioni in questione sono:

- la **Vbe di un BJT** che ha una variazione in temperatura negativa di circa  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$
- la **tensione termica**  $V_t = \frac{kT}{q}$  che ha una variazione in temperatura positiva di circa  $+0.085\text{mV}/^\circ\text{C}$

Gli andamenti delle due tensioni sono opposti in temperatura ma non hanno la stessa pendenza in valore assoluto e quindi la loro somma non darebbe una tensione costante. Per questo la tensione  $V_t$  viene moltiplicata per un fattore  $M$  che rende le due pendenze uguali in valore assoluto.

Il blocco circuitale usato per ottenere questo funzionamento è riportato in *figura 6*.  
Chiamiamo  $\Delta V_{be}$  la tensione su  $R_b$ :



**Figura 6:** *schema base del bandgap*

Assumiamo che il rapporto tra le aree dei due bjt sia pari a 10.

$$\Delta V_{be} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\text{area}T2}{\text{area}T1}\right) = V_t * \ln\left(\frac{\text{area}T2}{\text{area}T1}\right)$$

$$V_r = V_{beT2} + \Delta V_{be} + 2I * R_1 \quad \text{dove} \quad I = \frac{\Delta V_{be}}{R_b}$$

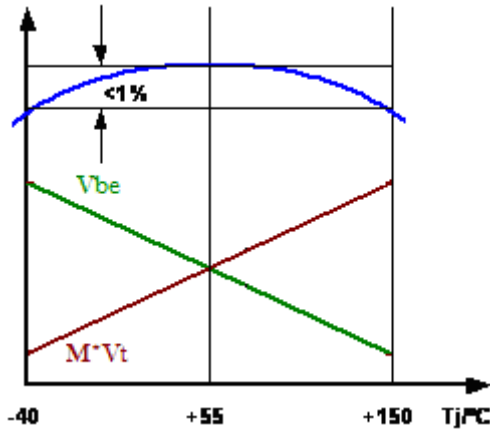
Da queste si deduce:

$$V_r = V_{beT2} + \Delta V_{be} \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_b}\right) = V_{beT2} + V_t * \ln\left(\frac{\text{area}T2}{\text{area}T1}\right) \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_b}\right)$$

Notiamo che il parametro M è il termine:

$$\ln\left(\frac{\text{area}T2}{\text{area}T1}\right) \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_b}\right) = \ln(10) \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_b}\right)$$

Come già detto, la tensione di uscita del bandgap dovrebbe essere costante in temperatura, ma in pratica essa ha un andamento parabolico come in *figura7*.



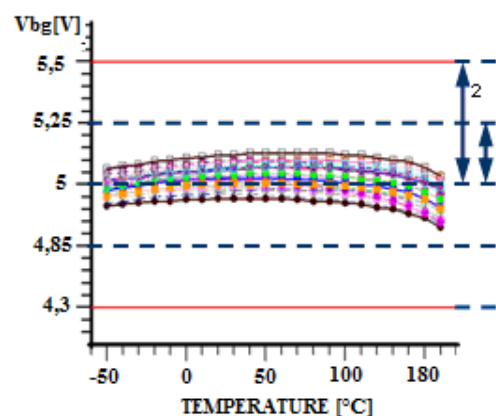
**Figura 7:** andamento parabolico della tensione di bandgap

Questo è dovuto ad effetti del secondo ordine che la temperatura ha sulla tensione di bandgap. In particolare **si ha una variazione CTAT di Vbe proporzionale al quadrato della temperatura.**

Inoltre questo è dovuto al **comportamento in temperatura del coefficiente M** che dipende dal rapporto di due resistenze e che quindi risente in maniera non trascurabile della variazione di temperatura.

La dipendenza dalla temperatura di M e gli effetti del secondo ordine su Vbe sono responsabili di uno scostamento rispetto all'andamento ideale di circa 1%.

Un altro comportamento non ideale della tensione di bandgap è la sua traslazione, verso l'alto o verso il basso, rispetto al valore ideale (come mostrato in *figura8*).



**Figura 8:** traslazione della tensione di bandgap

Questo è causato dai fattori produttivi che causano una diversità tra i transistor da chip a chip e quindi non tutti i circuiti forniscono la stessa tensione di riferimento.

**Oltre alla traslazione della  $V_{bg}$ , la diversità tra transistor può introdurre una variazione della stessa in temperatura, con un andamento CTAT o PTAT.** Per fare fronte a queste variazioni ogni circuito viene fornito di una rete di resistenze che modificano il valore della tensione di riferimento e la compensano adeguatamente per ottenere un andamento in temperatura il più costante possibile.

Riassumendo ogni circuito bandgap di ogni integrato ha un proprio grado di inaccuratezza rispetto all'andamento ideale dovuto a

- comportamento in temperatura di  $M$  ed effetti del secondo ordine: introduce 1% di incertezza
- fattori produttivi che introducono diversità tra i transistor di un chip rispetto ad un altro chip : può introdurre il 3% di incertezza ma con il trimming di resistenze l'incertezza può scendere fino all'1%

Concludendo si ha che il range di incertezza di un bandgap varia dal 2% al 4%

## 1.2 - Descrizione del bandgap da caratterizzare

Il bandgap che andremo a caratterizzare presenta dei miglioramenti notevoli a livello di design che dovrebbero permettere di raggiungere una curva quasi piatta della tensione di riferimento al variare della temperatura.

Abbiamo già detto che la curva della tensione di riferimento di un bandgap non è costante in temperatura, ma presenta una concavità CTAT a causa degli effetti del secondo ordine legati alla dipendenza dalla temperatura della tensione di bandgap e del coefficiente M.

Per avere un andamento più preciso in temperatura, si compensano anche le variazioni del secondo ordine, sommando alla compensazione di primo ordine un termine proporzionale al quadrato della temperatura secondo lo schema di figura :

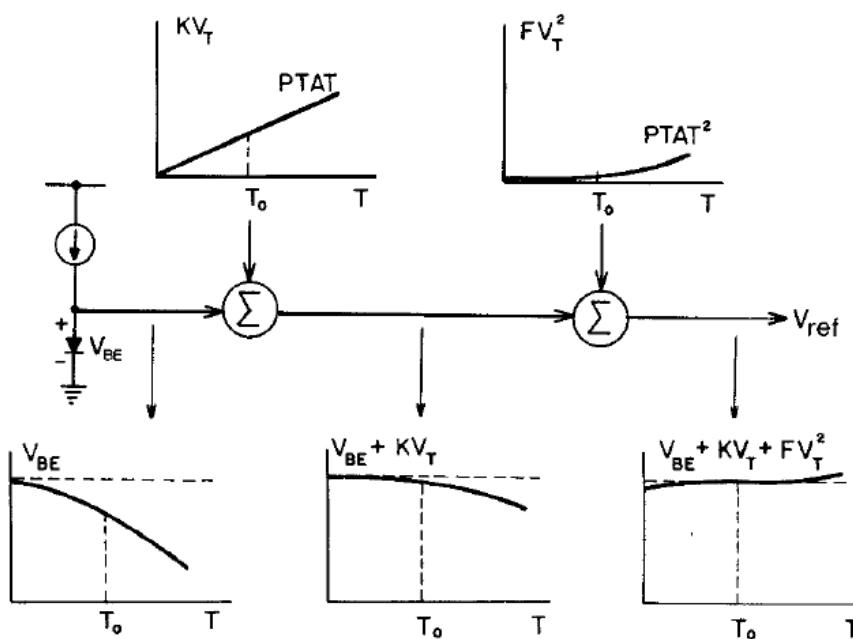
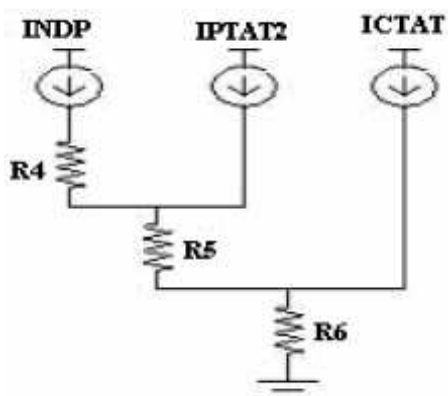


Figura 9: principio di funzionamento del bandgap da caratterizzare

Questo viene ottenuto concettualmente secondo lo schema sottostante



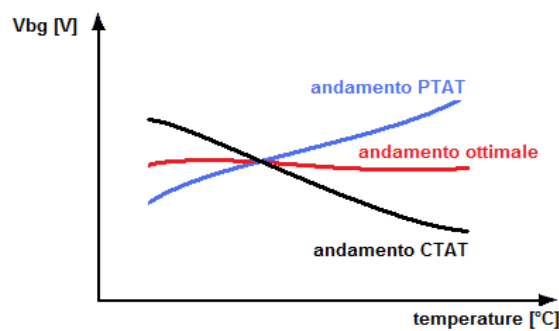
- $INDIP = IPTAT + ICTAT$ : corrente di compensazione del primo ordine
- $IPTAT2$ : corrente proporzionale al quadrato della temperatura
- $ICTAT$ : corrente complementare alla temperatura assoluta

Figura 10 : modellizzazione del bandgap

Definiamo quindi  $V_{ref}=V_1+V_2+V_3$  , dove:

- $V_1= INDIP*(R_4+R_5+R_6)$  , modella la compensazione del primo ordine
- $V_2=IPTAT^2*(R_5+R_6)$  , modella la compensazione del secondo ordine
- $V_3=ICTAT*R_6$  , modella la  $V_{be}$  di una giunzione pn

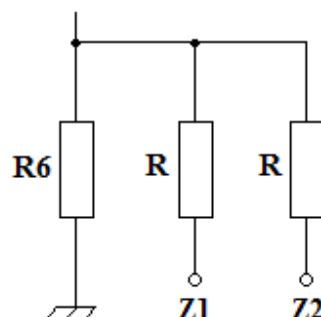
Come già accennato, diversità dei transistor da chip a chip dovute a fattori produttivi sono causa di andamenti diversi di tensione di bandgap in funzione della temperatura rispetto all'andamento ottimale. In particolare la  $V_{bg}$  può assumere un andamento PTAT o CTAT ed è necessario un sistema di regolazione che permetta di compensare l'andamento portandolo ad essere vicino a quello ottimale.



**Figura 11** : possibili andamenti della  $V_{bg}$  in temperatura

Nel nostro caso, si ottiene una compensazione CTAT o PTAT andando a variare il valore delle resistenze che causano le cadute di tensione  $V_2$  e  $V_3$ .

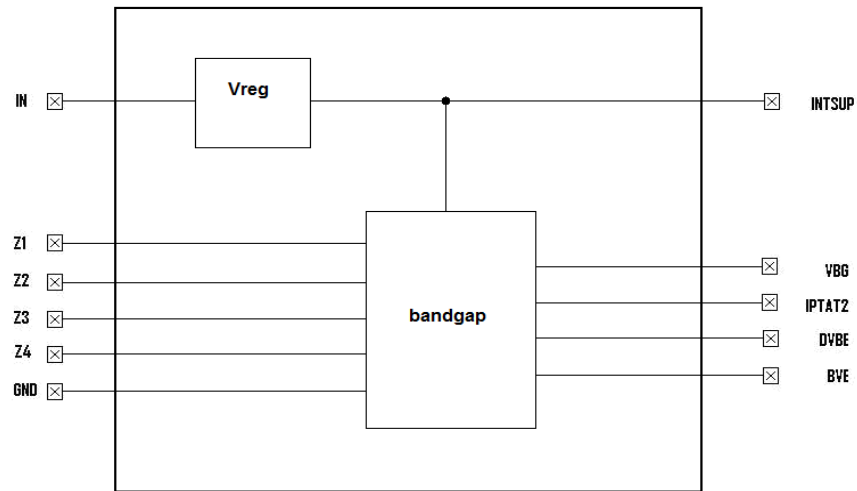
Il valore delle resistenze viene variato dall'esterno, ponendo a massa i pin  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  i quali sono connessi a delle resistenze normalmente flottanti, ma che però possono essere messe in parallelo alle resistenze da modificare se i pin vengono messi a massa. Ad esempio in figura 12 è considerato il caso della resistenza  $R_6$ : il suo valore viene modificato se i pin  $Z_1$  o  $Z_2$  vengono posti a massa, in quanto le resistenze ad essi connessi risultano in parallelo ad  $R_6$ .



**Figura 12**: schema per la modifica del valore di  $R_6$  mediante i pin esterni

Secondo le specifiche ponendo a massa i vari pin si hanno le seguenti compensazioni :  
 $Z1 = +2\% \text{ PTAT}$  ,  $Z2 = +1\% \text{ PTAT}$  ,  $Z3 = +0.5\% \text{ CTAT}$  ,  $Z4 = +2.5\% \text{ CTAT}$ .

In realtà il circuito di bandgap non è alimentato direttamente dalla tensione di alimentazione dell'integrato, ma è presente un regolatore di tensione che lo alimenta con una tensione più stabile.



**Figura 13:** *alimentazione del bandgap*

### 1.3 – Introduzione del testchip

Il circuito integrato che andremo a caratterizzare è un testchip, cioè un circuito integrato progettato appositamente per testare il funzionamento di blocchi circuitali particolarmente delicati e sensibili, che poi andranno a fare parte di un circuito più complesso, dove non bastano gli strumenti di simulazione poiché il comportamento reale può discostarsi sensibilmente da quello teorico.

Avremo a disposizione il testchip sia nel package ceramico che nel package plastico.

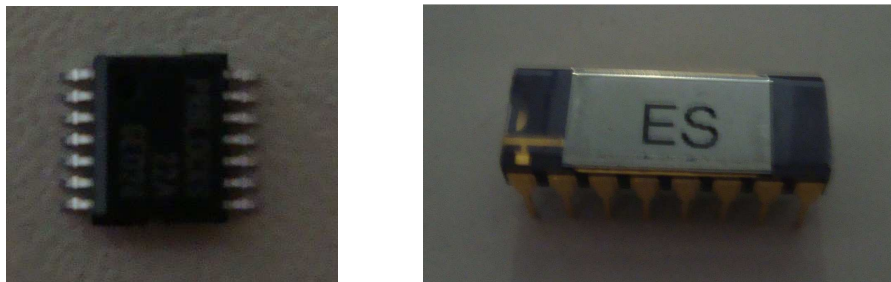


Figura 14: il testchip nel package plastico (a sinistra) e ceramico (a destra)

Quando un circuito integrato viene prodotto, il wire bonding dello stesso non avviene solo in un package plastico (anche se molto spesso è il package plastico usato per la produzione e vendita del chip) ma avviene anche in un package ceramico, che presenta un'apertura scopercchiabile attraverso la quale si può accedere, se necessario, al silicio facilitando le operazioni di test.

Il wire bonding in un package ceramico richiede dei fili di lunghezza maggiore rispetto al plastico, e questo può provocare, in applicazioni ad alta frequenza, crosstalking e disturbi elettromagnetici che possono falsare il testing del prodotto. Nel nostro caso comunque questo non rappresenta un problema, in quanto il circuito non utilizza segnali in frequenza, ed il test non è influenzato dal tipo di package.

Riportiamo in figura i bonding diagram del testchip:

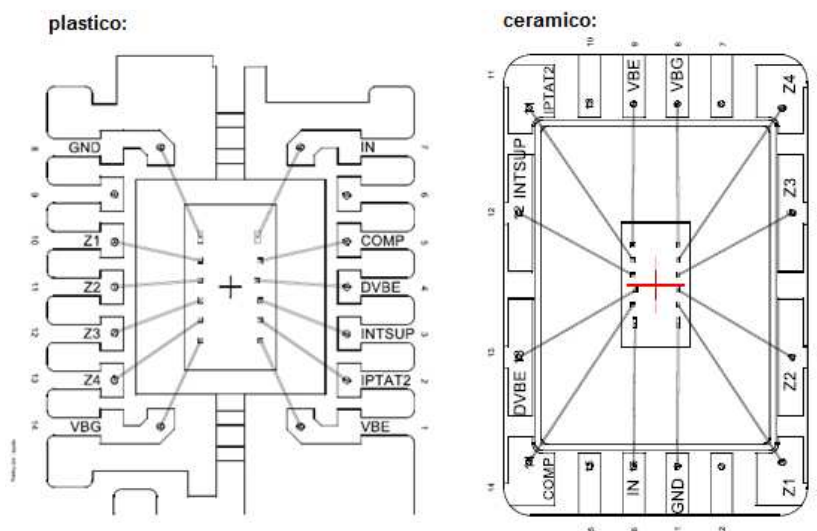


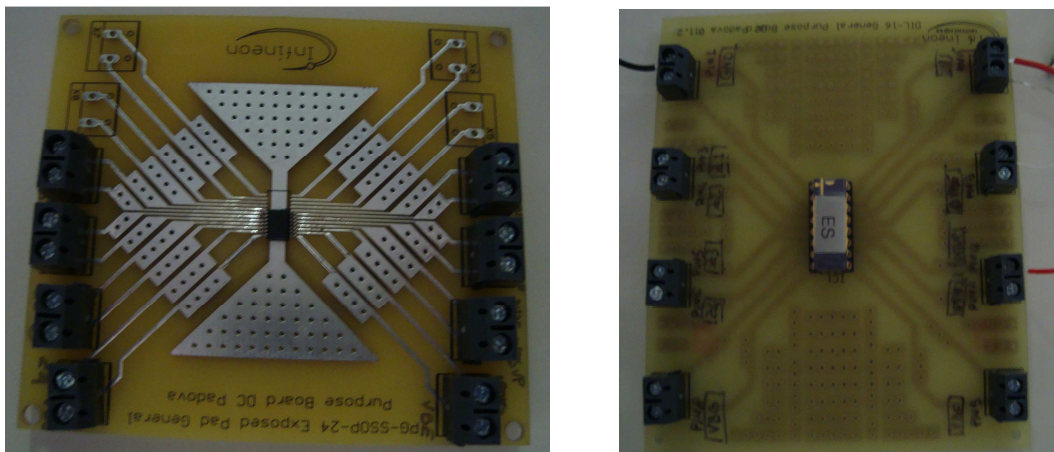
Figura 15: bonding diagram del testchip



I pin di interesse sono:

- IN: alimentazione dell'integrato
- INTSUP: alimentazione del circuito di bandgap
- GND: massa dell'integrato
- Z1, Z2, Z3, Z4: pin di trimming
- IPTAT2: tensione proporzionale alla corrente iptat2
- VBE: tensione della giunzione be
- DVBE: tensione
- VBG: tensione di bandgap

Per permettere le misure gli integrati vengono saldati su delle basette prestampate e le piste relative ai pin vengono saldate a dei morsetti.



**Figura 16:** I testchip in package plastico (a sinistra) e ceramico (a destra) saldati sulle basette per le misure

Dopo aver verificato la continuità dei collegamenti pin – morsetti e l'assenza di corti, è possibile iniziare il lavoro di misura.

### 3 - MISURA A TEMPERATURA AMBIENTE

La prima misura effettuata è la misura a temperatura ambiente delle tensioni su tutti i pin d'uscita dell'integrato. Vengono analizzati 5 testchip con package ceramico.

#### - 3.1 - Scopo della misura

Lo scopo di questa misura è quello di verificare che le uscite del testchip forniscano i valori di tensione desiderati in modo da trovare, se presenti, malfunzionamenti evidenti del circuito. La tensione  $V_{bg}$  deve variare a seconda della combinazione dello zapping secondo le specifiche ( $Z1 = +2\% PTAT$ ,  $Z2 = +1\% PTAT$ ,  $Z3 = +0.5\% CTAT$ ,  $Z4 = +2.5\% CTAT$ ).

Si tratta quindi di 16 misure di tensione sui pin  $V_{bg}$ ,  $I_{ptat2}$ ,  $\Delta V_{be}$ ,  $V_{be}$  a temperatura ambiente. I pin  $Z1$ ,  $Z2$ ,  $Z3$ ,  $Z4$  nella prima misura sono flottanti, mentre ad ogni successiva misura sono posti a massa tramite dei jumper seguendo le combinazioni binarie possibili.

#### - 3.2 - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura :

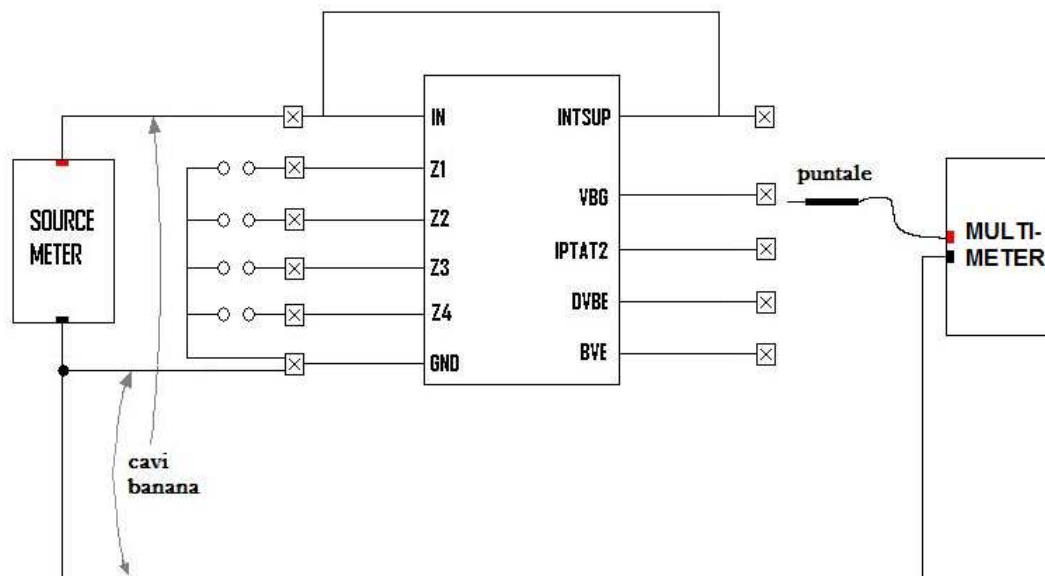


Figura17 : schema di misura

Il circuito integrato viene alimentato a 2.5V da source meter keithley 2400 con il metodo dei 4 fili tramite dei cavi banana che escono dall'alimentatore e vengono fissati nelle bocche della basetta. Le misure sono effettuate con un multimetro digitale keithley 2000, appoggiando, ad ogni misura, il puntale sul piedino in questione. Il pin Intsup viene cortocircuitato con l'alimentazione per evitare che gli eventuali malfunzionamento del blocco di alimentazione del bandgap influiscano sul comportamento dello stesso. Il blocco di alimentazione verrà analizzato in seguito.

Si misurano le tensioni dei 4 i pin e successivamente viene cambiata la configurazione di zapping e la misura viene ripetuta. Per ogni integrato si avranno quindi 16 misure per ogni pin d'uscita.

### - 3.3 - Risultati

In seguito vengono riportate le tabelle excel contenenti le misure sui 5 testchip considerati.

Testchip n°1:

| 1  | Z4 | Z3 | Z2 | Z1 | Vout(Y) @ 25°C |        |       |       | VAR Vbg% |
|----|----|----|----|----|----------------|--------|-------|-------|----------|
|    |    |    |    |    | VBG            | IPTAT2 | ΔVBE  | VBE   |          |
| 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0,788          | 0,143  | 0,057 | 0,645 | 0,000    |
| 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0,804          | 0,147  | 0,057 | 0,661 | 2,030    |
| 3  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0,797          | 0,145  | 0,057 | 0,650 | 1,142    |
| 4  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0,810          | 0,148  | 0,057 | 0,660 | 2,792    |
| 5  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0,793          | 0,144  | 0,057 | 0,657 | 0,635    |
| 6  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0,809          | 0,148  | 0,057 | 0,657 | 2,665    |
| 7  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0,801          | 0,146  | 0,057 | 0,656 | 1,650    |
| 8  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0,814          | 0,149  | 0,057 | 0,657 | 3,299    |
| 9  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0,807          | 0,146  | 0,057 | 0,656 | 2,411    |
| 10 | 1  | 0  | 0  | 1  | 0,823          | 0,150  | 0,057 | 0,656 | 4,442    |
| 11 | 1  | 0  | 1  | 0  | 0,816          | 0,148  | 0,057 | 0,656 | 3,553    |
| 12 | 1  | 0  | 1  | 1  | 0,829          | 0,151  | 0,057 | 0,655 | 5,203    |
| 13 | 1  | 1  | 0  | 0  | 0,809          | 0,146  | 0,057 | 0,657 | 2,665    |
| 14 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0,825          | 0,150  | 0,057 | 0,656 | 4,695    |
| 15 | 1  | 1  | 1  | 0  | 0,817          | 0,148  | 0,057 | 0,658 | 3,680    |
| 16 | 1  | 1  | 1  | 1  | 0,830          | 0,151  | 0,057 | 0,659 | 5,330    |

0 = FLOATING  
 1 = CONNECTED TO GND

Testchip n°2:

| 2  | Z4 | Z3 | Z2 | Z1 | Vout(Y) @ 25°C |        |       |       | VAR Vbg% |
|----|----|----|----|----|----------------|--------|-------|-------|----------|
|    |    |    |    |    | VBG            | IPTAT2 | ΔVBE  | VBE   |          |
| 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0,771          | 0,138  | 0,056 | 0,657 | 0,000    |
| 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0,786          | 0,142  | 0,056 | 0,657 | 1,946    |
| 3  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0,779          | 0,140  | 0,056 | 0,655 | 1,038    |
| 4  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0,791          | 0,143  | 0,056 | 0,658 | 2,594    |
| 5  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0,775          | 0,139  | 0,056 | 0,656 | 0,519    |
| 6  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0,790          | 0,142  | 0,056 | 0,656 | 2,464    |
| 7  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0,783          | 0,141  | 0,056 | 0,660 | 1,556    |
| 8  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0,795          | 0,143  | 0,056 | 0,660 | 3,113    |
| 9  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0,788          | 0,141  | 0,056 | 0,654 | 2,205    |
| 10 | 1  | 0  | 0  | 1  | 0,804          | 0,144  | 0,056 | 0,664 | 4,280    |
| 11 | 1  | 0  | 1  | 0  | 0,797          | 0,143  | 0,056 | 0,661 | 3,372    |
| 12 | 1  | 0  | 1  | 1  | 0,788          | 0,141  | 0,056 | 0,659 | 2,205    |
| 13 | 1  | 1  | 0  | 0  | 0,790          | 0,141  | 0,056 | 0,660 | 2,464    |
| 14 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0,805          | 0,144  | 0,056 | 0,661 | 4,410    |
| 15 | 1  | 1  | 1  | 0  | 0,798          | 0,143  | 0,056 | 0,658 | 3,502    |
| 16 | 1  | 1  | 1  | 1  | 0,811          | 0,146  | 0,056 | 0,662 | 5,188    |

0 = FLOATING  
 1 = CONNECTED TO GND

Testchip n°3:

| 3  |    |    |    |    |                |        |       |       |          |
|----|----|----|----|----|----------------|--------|-------|-------|----------|
|    | Z4 | Z3 | Z2 | Z1 | Yout(Y) @ 25°C |        |       |       | VAR Vbg% |
|    |    |    |    |    | VBG            | IPTAT2 | ΔVBE  | VBE   |          |
| 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0,783          | 0,141  | 0,057 | 0,648 | 0,000    |
| 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0,799          | 0,144  | 0,057 | 0,648 | 2,043    |
| 3  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0,792          | 0,142  | 0,057 | 0,655 | 1,149    |
| 4  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0,804          | 0,145  | 0,057 | 0,649 | 2,682    |
| 5  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0,787          | 0,141  | 0,057 | 0,648 | 0,511    |
| 6  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0,803          | 0,145  | 0,057 | 0,650 | 2,554    |
| 7  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0,796          | 0,143  | 0,057 | 0,655 | 1,660    |
| 8  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0,808          | 0,146  | 0,057 | 0,649 | 3,193    |
| 9  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0,802          | 0,144  | 0,057 | 0,650 | 2,427    |
| 10 | 1  | 0  | 0  | 1  | 0,817          | 0,147  | 0,057 | 0,653 | 4,342    |
| 11 | 1  | 0  | 1  | 0  | 0,810          | 0,145  | 0,057 | 0,654 | 3,448    |
| 12 | 1  | 0  | 1  | 1  | 0,823          | 0,148  | 0,057 | 0,654 | 5,109    |
| 13 | 1  | 1  | 0  | 0  | 0,803          | 0,144  | 0,057 | 0,654 | 2,554    |
| 14 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0,820          | 0,147  | 0,057 | 0,654 | 4,725    |
| 15 | 1  | 1  | 1  | 0  | 0,812          | 0,146  | 0,057 | 0,650 | 3,704    |
| 16 | 1  | 1  | 1  | 1  | 0,824          | 0,148  | 0,057 | 0,653 | 5,236    |

0 = FLOATING  
 1 = CONNECTED TO GND

Testchip n°4:

| 4  |    |    |    |    |                |        |       |       |          |
|----|----|----|----|----|----------------|--------|-------|-------|----------|
|    | Z4 | Z3 | Z2 | Z1 | Yout(Y) @ 25°C |        |       |       | VAR Vbg% |
|    |    |    |    |    | VBG            | IPTAT2 | ΔVBE  | VBE   |          |
| 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0,797          | 0,143  | 0,057 | 0,650 | 0,000    |
| 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0,812          | 0,147  | 0,057 | 0,654 | 1,882    |
| 3  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0,805          | 0,145  | 0,057 | 0,651 | 1,004    |
| 4  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0,818          | 0,148  | 0,057 | 0,650 | 2,635    |
| 5  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0,801          | 0,144  | 0,057 | 0,651 | 0,502    |
| 6  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0,817          | 0,147  | 0,057 | 0,652 | 2,509    |
| 7  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0,810          | 0,145  | 0,057 | 0,651 | 1,631    |
| 8  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0,822          | 0,148  | 0,057 | 0,656 | 3,137    |
| 9  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0,817          | 0,146  | 0,057 | 0,657 | 2,509    |
| 10 | 1  | 0  | 0  | 1  | 0,831          | 0,149  | 0,057 | 0,655 | 4,266    |
| 11 | 1  | 0  | 1  | 0  | 0,824          | 0,148  | 0,057 | 0,653 | 3,388    |
| 12 | 1  | 0  | 1  | 1  | 0,837          | 0,150  | 0,057 | 0,653 | 5,019    |
| 13 | 1  | 1  | 0  | 0  | 0,817          | 0,146  | 0,057 | 0,657 | 2,509    |
| 14 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0,833          | 0,149  | 0,057 | 0,657 | 4,517    |
| 15 | 1  | 1  | 1  | 0  | 0,826          | 0,148  | 0,057 | 0,658 | 3,639    |
| 16 | 1  | 1  | 1  | 1  | 0,838          | 0,150  | 0,057 | 0,656 | 5,144    |

0 = FLOATING  
 1 = CONNECTED TO GND

Testchip n°5:

| 5  |    |    |    |    | Yout(V) @ 25 °C |        |       |       | VAR Vbg% |
|----|----|----|----|----|-----------------|--------|-------|-------|----------|
|    | Z4 | Z3 | Z2 | Z1 | VBG             | IPTAT2 | ΔVBE  | VBE   |          |
| 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0,774           | 0,139  | 0,056 | 0,648 | 0,000    |
| 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0,788           | 0,142  | 0,056 | 0,648 | 1,809    |
| 3  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0,782           | 0,140  | 0,056 | 0,648 | 1,034    |
| 4  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0,794           | 0,143  | 0,056 | 0,649 | 2,584    |
| 5  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0,778           | 0,139  | 0,056 | 0,648 | 0,517    |
| 6  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0,793           | 0,143  | 0,056 | 0,648 | 2,455    |
| 7  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0,786           | 0,141  | 0,056 | 0,648 | 1,550    |
| 8  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0,798           | 0,144  | 0,056 | 0,648 | 3,101    |
| 9  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0,792           | 0,141  | 0,056 | 0,648 | 2,326    |
| 10 | 1  | 0  | 0  | 1  | 0,807           | 0,145  | 0,056 | 0,648 | 4,264    |
| 11 | 1  | 0  | 1  | 0  | 0,800           | 0,143  | 0,056 | 0,655 | 3,359    |
| 12 | 1  | 0  | 1  | 1  | 0,812           | 0,146  | 0,056 | 0,653 | 4,910    |
| 13 | 1  | 1  | 0  | 0  | 0,794           | 0,142  | 0,056 | 0,647 | 2,584    |
| 14 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0,808           | 0,145  | 0,056 | 0,652 | 4,393    |
| 15 | 1  | 1  | 1  | 0  | 0,802           | 0,144  | 0,056 | 0,650 | 3,618    |
| 16 | 1  | 1  | 1  | 1  | 0,814           | 0,146  | 0,056 | 0,655 | 5,168    |

0 = FLOATING  
1 = CONNECTED TO GND

Come si nota dalle tabelle, ogni integrato presenta una tensione di riferimento diversa a causa delle diversità dei transistor introdotte dal processo produttivo, come accennato in precedenza.

Notiamo anche che la tensione  $\Delta V_{be}$  non subisce variazioni, rimanendo costante di misura in misura e non risente delle variazioni delle configurazioni di zapping.

L'ultima colonna delle tabelle riporta la variazione percentuale delle variazioni della tensione Vbg ad ogni combinazione di zapping. Si considera la tensione Vbg relativa alla configurazione Z1=0, Z2=0, Z3=0, Z4=0 come tensione di riferimento e si vede che rispetto a questa le variazioni introdotte dalle altre configurazioni sono:

- Z1=1, Z2=0, Z3=0, Z4=0 circa 2%
- Z1=0, Z2=1, Z3=0, Z4=0 circa 1%
- Z1=0, Z2=0, Z3=1, Z4=0 circa 0.5%
- Z1=0, Z2=0, Z3=0, Z4=1 circa 2.5%

Le variazioni introdotte sono compatibili con le specifiche. Le altre combinazioni derivano da queste, ad esempio la configurazione Z1=1, Z2=1, Z3=0, Z4=0 introduce una variazione pari alla somma delle variazioni introdotte dalle configurazioni Z1=1, Z2=0, Z3=0, Z4=0 e Z1=0, Z2=1, Z3=0, Z4=0, e così via.

In conclusione le misure a temperatura ambiente non evidenziano problemi di funzionamento del circuito integrato e le specifiche sono rispettate.

## 4 - MISURA IN TEMPERATURA

Questa misura consiste nel ripetere le misure precedenti in un ambiente controllato in temperatura.

### - 4.1 - Scopo della misura

Questa misura è il fulcro della caratterizzazione del bandgap, in quanto permette di vedere l'andamento delle tensioni più significative del circuito di bandgap in funzione della temperatura, che verrà fatta variare lentamente da  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  dalla camera termica.

### -4.2 - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura:

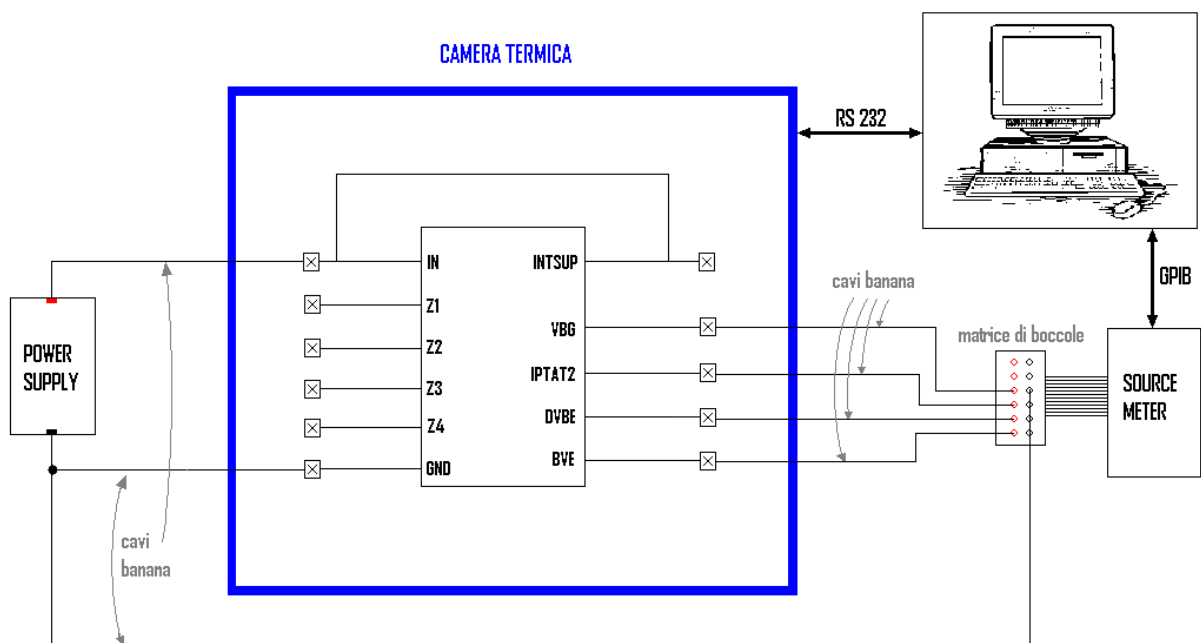


Figura18 : schema di misura

La camera termica è in grado di far variare lentamente la temperatura al suo interno da  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La basetta sulla quale è saldato il testchip è posizionata all'interno della camera ed è accessibile dall'esterno tramite un'apposita apertura che permette il passaggio dei cavi per l'alimentazione e per le misure.

Il testchip è alimentato a  $2.5\text{V}$  da un power supply TOE8852 e le misure delle tensioni dei quattro piedini vengono effettuate attraverso un source meter Keithley 2400.

La camera termica, tramite una porta RS232, ed il source meter, tramite GPIB, si interfacciano ad un pc che, con una libreria labview, acquisisce e tabula automaticamente in un foglio excel i valori delle tensioni ad ogni variazione di  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a partire da  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

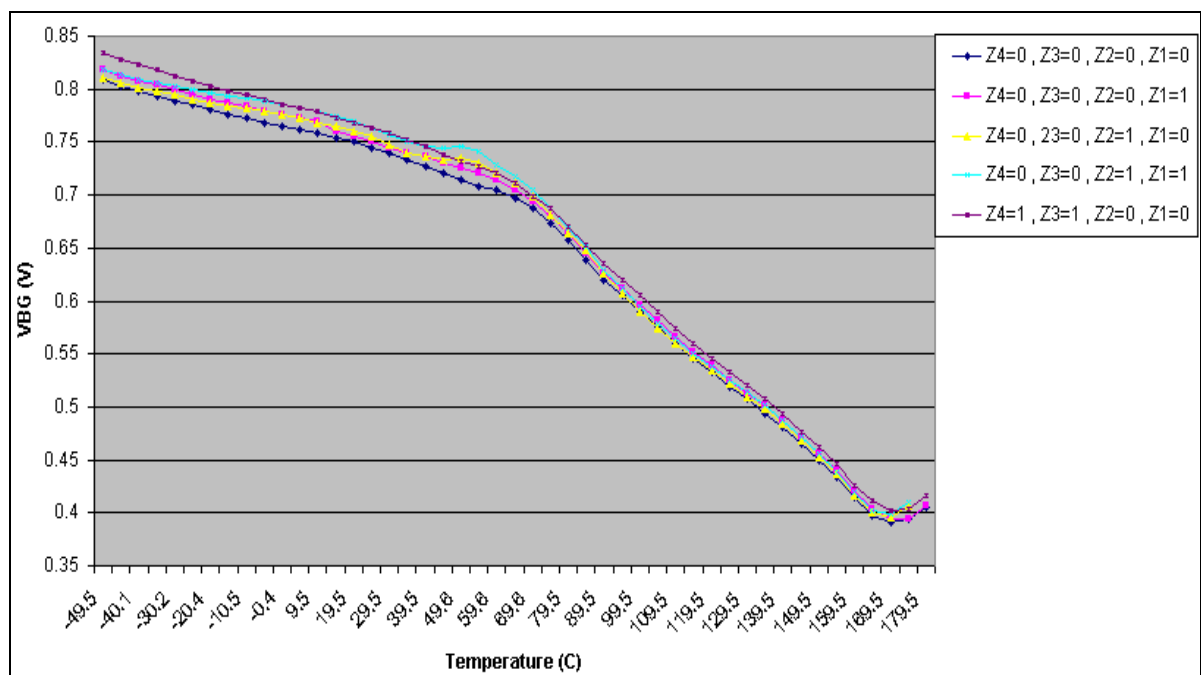
Le quattro misure vengono acquisite simultaneamente in quanto il source meter dispone di un pannello posteriore di 16 ingressi, i quali vengono resi accessibili da una matrice di boccole collegate agli ingressi stessi.

Ogni ciclo di misura richiede all'incirca tre ore, e viene ripetuto per tutte le combinazioni di zapping possibili.

Tale misura viene effettuata su due testchip con package ceramico e su un testchip con package plastico.

### - 4.3 - Risultati

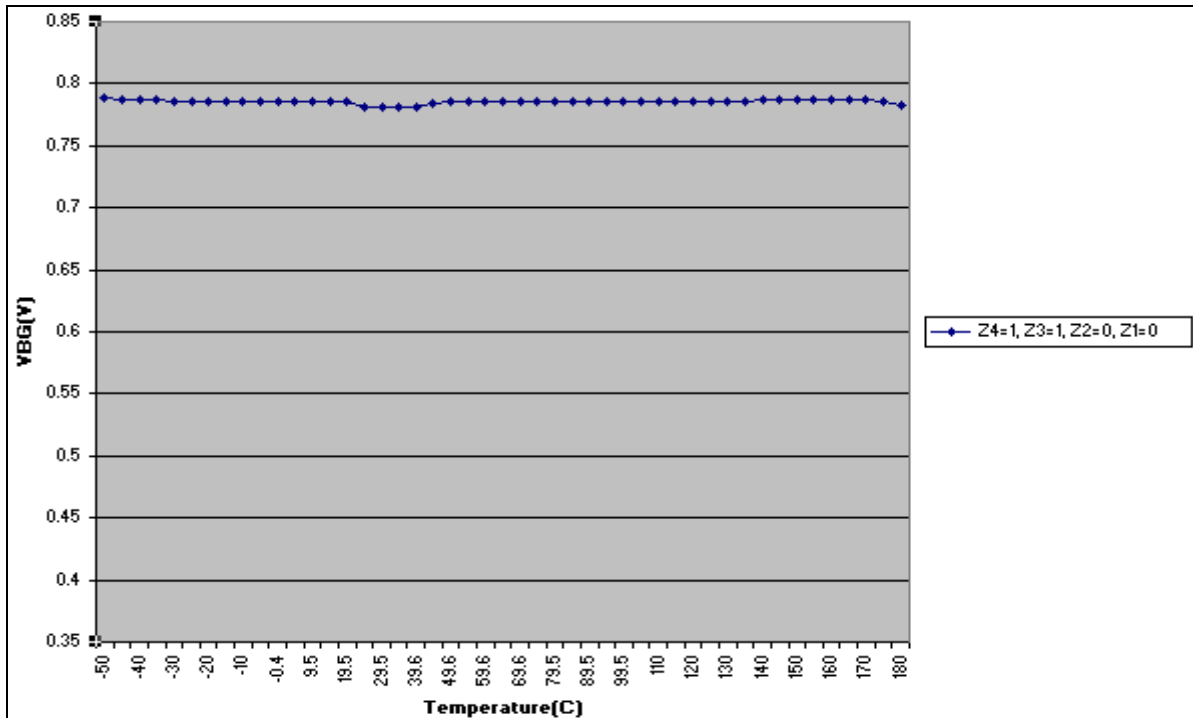
Dopo alcuni cicli di misura si è notato un andamento della tensione di bandgap assolutamente improponibile per un circuito che dovrebbe fornire una tensione costante in funzione della temperatura. Tali curve sono riportate nel grafico sottostante:



Secondo i primi dati raccolti, il bandgap risente in maniera molto decisa alle variazioni di temperatura portando a pensare che il circuito non funzioni affatto.

In realtà questo è smentito dalle successive misure, dove invece di misurare le tensioni sui quattro piedini, si misura solo la tensione del piedino Vbg.

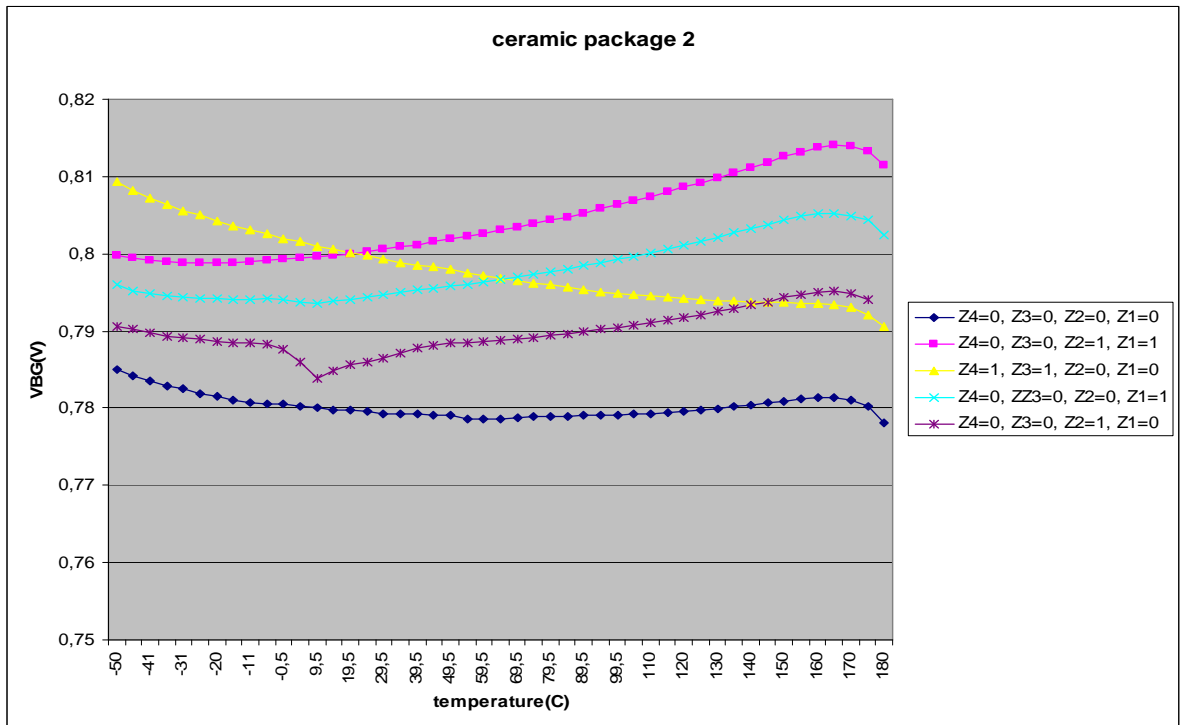
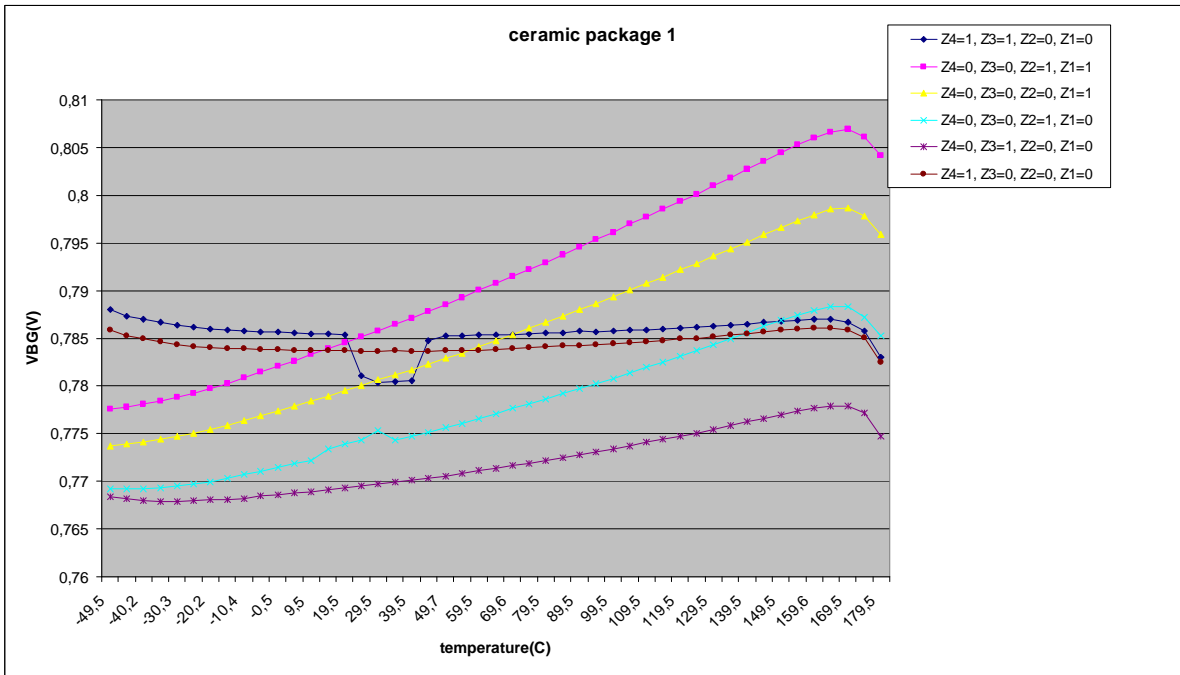
Mantenendo la stessa scala del grafico precedente è notevole la differenza nell'andamento di Vbg:

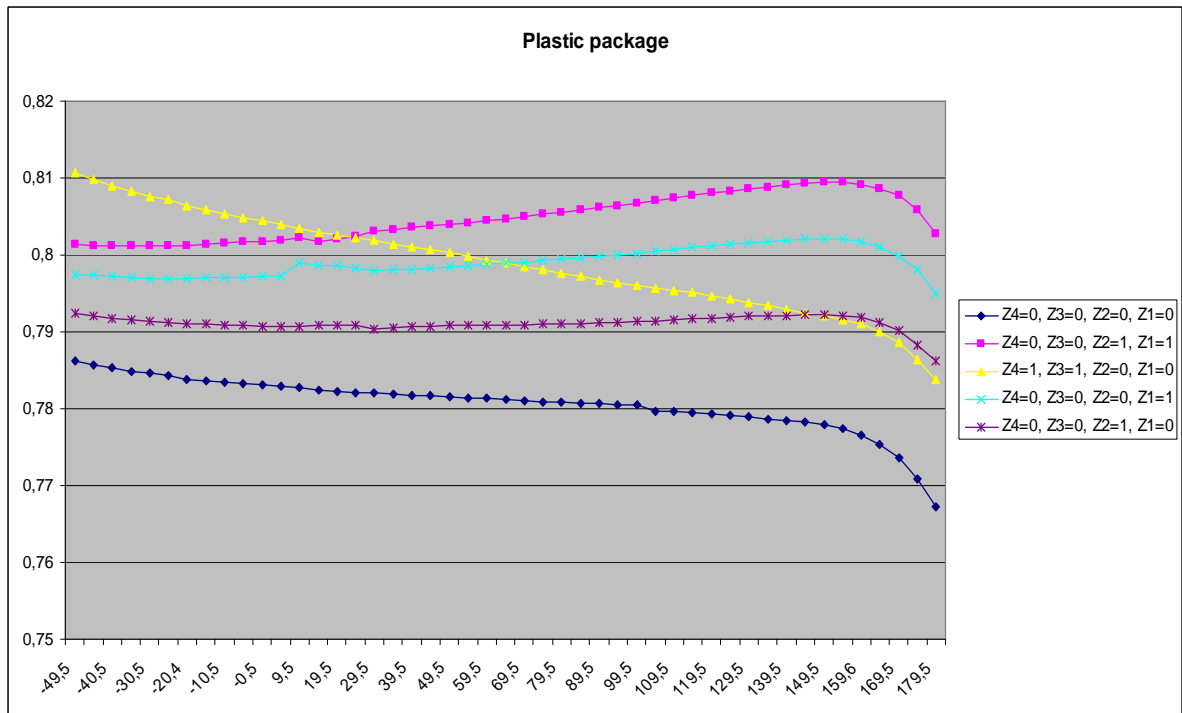


Questa drastica differenza mette in luce un aspetto importante: il circuito di bandgap è influenzato dal setup di misura. Infatti in precedenza l'impedenza d'ingresso dello strumento (circa 10 GΩ) influenzava le piccole correnti di polarizzazione del circuito di bandgap, in quanto una parte di esse andava a scorrere verso lo strumento falsando il comportamento del circuito stesso.

Nella pagina seguente riportiamo quindi le misure sul solo piedino Vbg con le configurazioni di zapping principali:







Nelle curve si notano dei picchi che non rappresentano il reale andamento della Vbg, ma sono piuttosto attribuibili ad errori causali dovuti alla camera termica ed al sistema di misura.

Ogni integrato ha i suoi andamenti in temperatura e non sempre la stessa configurazione di zapping fornisce la curva più piatta.

Nel primo integrato (ceramic package 1) la curva ottimale è quella che si riferisce alla configurazione  $Z1=0, Z2=0, Z3=1, Z4=1$  e presenta una variazione di tensione di circa 0.3%.

Nel secondo integrato (ceramic package 1) la curva più piatta si ottiene con la configurazione  $Z1=0, Z2=0, Z3=0, Z4=0$  e presenta una variazione di tensione di circa 0.5%.

Nel terzo integrato (plastic package) la curva più piatta si ottiene con la configurazione  $Z1=0, Z2=0, Z3=1, Z4=0$  e presenta una variazione di tensione di circa 0.2%.

### Riassumendo:

- 1) il circuito è sensibile al setup di misura
- 2) la tensione Vbg ha un andamento molto stabile in temperatura, in quanto la variazione di tensione è al massimo dell'ordine dello 0.5% da -40 °C a 150 °C.

## 5 - LINE REGULATION

Questa misura consiste nel misurare la tensione V<sub>bg</sub> d'uscita in funzione della tensione di alimentazione del bandgap, che decrescerà linearmente a partire da 10V a step di 0.2V

### - 5.1 - Scopo della misura

In generale la line regulation è una misura della capacità di circuito di mantenere la sua tensione d'uscita costante a fronte dei cambiamenti della tensione di alimentazione. Essa è espressa come variazione percentuale della tensione d'uscita sulla variazione della tensione di alimentazione.

Lo scopo principale di questa misura è quindi quella di valutare l'incidenza della variazione della tensione di alimentazione sulla variazione della V<sub>bg</sub>. Inoltre si vuole trovare la tensione minima alla quale il bandgap può essere alimentato per avere una tensione d'uscita.

### - 5.2 - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura:

La misura si svolge a temperatura ambiente.

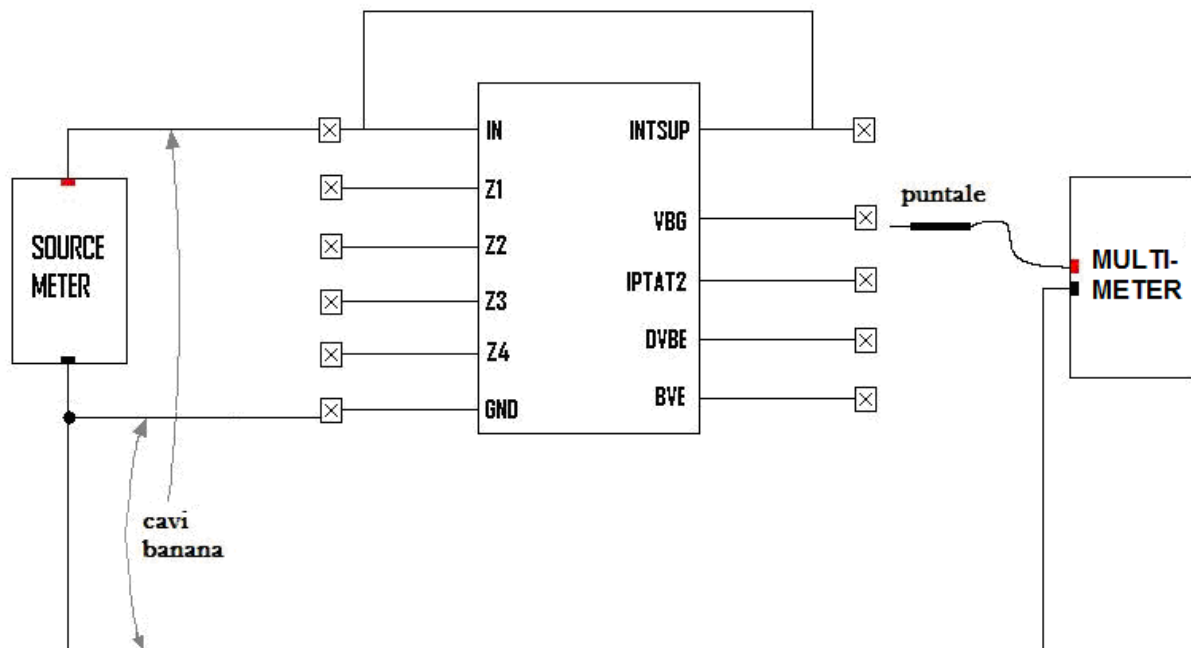
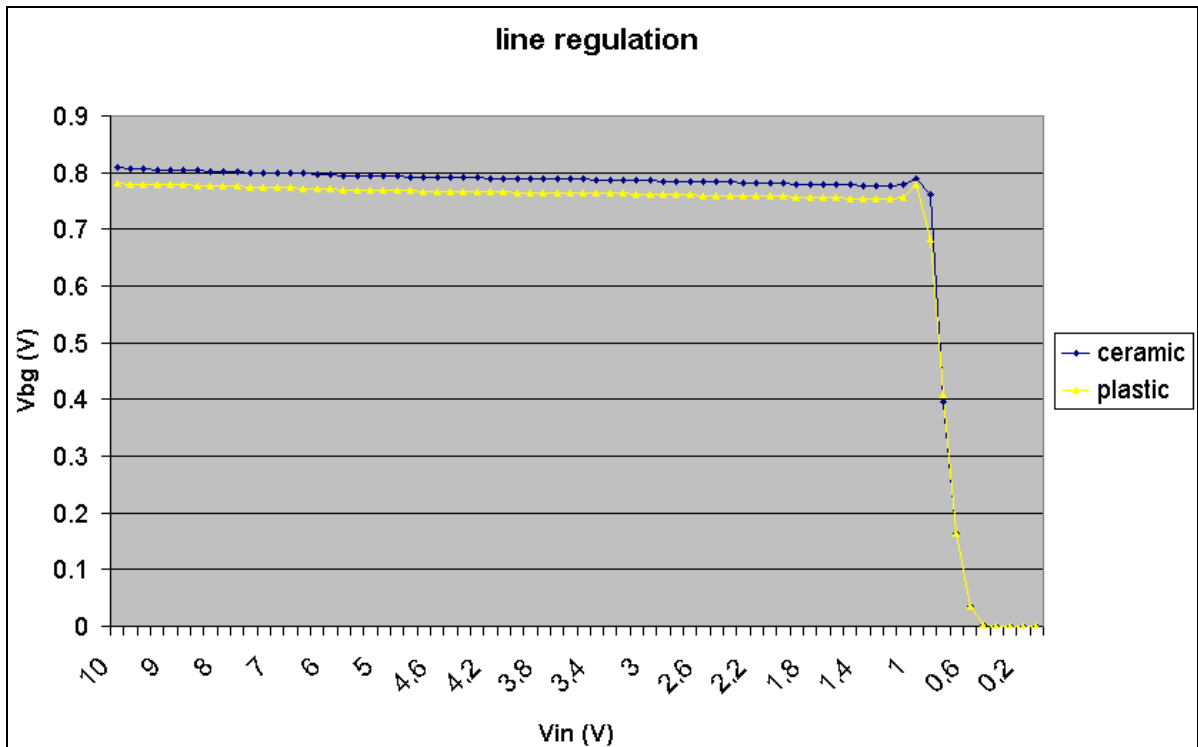


Figura 19: schema di misura

L'integrato viene alimentato da un source meter K2400 con il metodo dei quattro fili, la cui tensione d'uscita verrà inizialmente posta a 10V e ad ogni misura verrà decrementata di 0.2V. La tensione V<sub>bg</sub> viene misurata con un multimetro K2000.

### - 5.3 - Risultati

Le misure raccolte formano il grafico di figura:



Si nota che si ha tensione d'uscita  $V_{bg}$  fino ad una tensione di alimentazione di circa 1V, dopo di che si ha lo spegnimento del bandgap.

La pendenza della caratteristica nella zona lineare è:

$$\frac{\Delta V_{bg}}{\Delta V_{in}} = 0.003$$

Questo significa che  $V_{bg}$  diminuisce di 3mV ad ogni decremento di 1V della tensione di alimentazione.

#### Riassumendo:

- per avere una tensione d'uscita il bandgap deve essere alimentato con almeno 1V.
- a temperatura ambiente la variazione dell'alimentazione influisce poco sulla tensione d'uscita.

## 6 – VBG IN FUNZIONE DELLA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE E DELLA TEMPERATURA

Questa misura consiste nel misurare, al variare della temperatura esterna, la tensione Vbg con valori di alimentazioni diversi.

### - 6.1 - Scopo della misura

Lo scopo di questa misura è quello di analizzare il comportamento in temperatura del bandgap in caso di variazione della tensione di alimentazione. Il bandgap è progettato per lavorare con una alimentazione di 2.5V e si vuole verificare il comportamento nel caso di una alimentazione inferiore.

### - 6.2 - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è identico a quello della misura in temperatura, ed è riportato in figura:

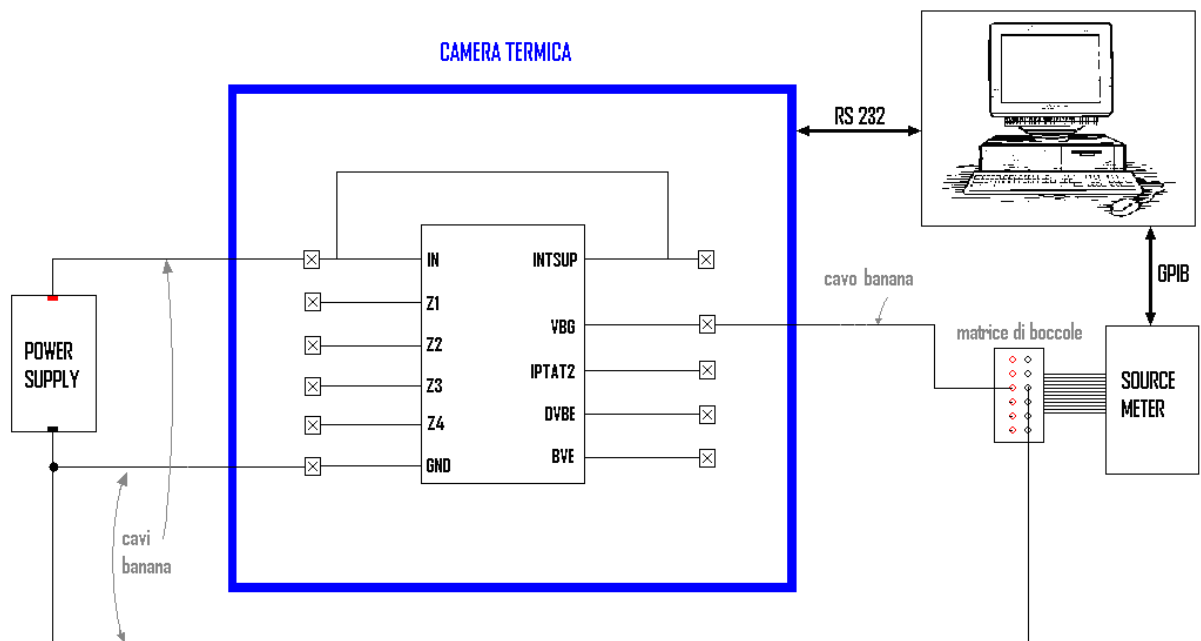


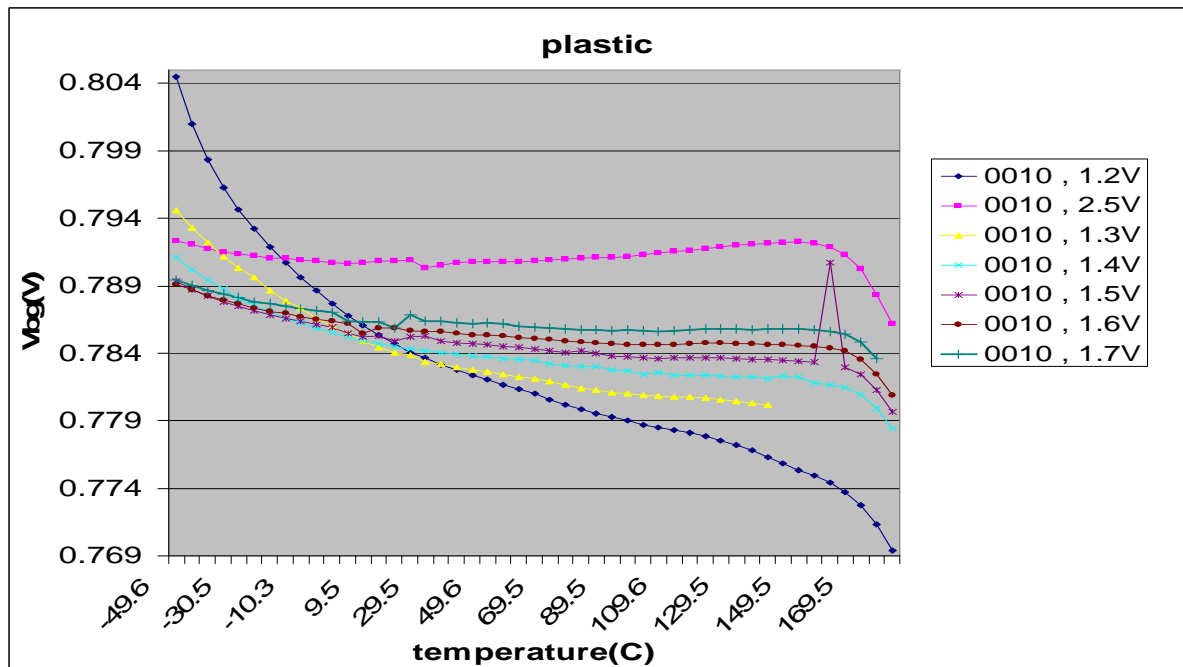
Figura 20 : schema di misura

A differenza della precedente misura in camera termica, ad ogni ciclo di misura viene incrementata la tensione di alimentazione, a partire da 1.7V.

La configurazione di zapping utilizzata in questa misura è quella che introduce la minor variazione di Vbg in funzione della temperatura e viene mantenuta invariata per tutta la prova. Tale combinazione è nota in quanto il chip utilizzato è già stato oggetto di test nella prova “misura in temperatura”. In particolare esso è il “plastic package” e la sua configurazione ottimale è Z1=0, Z2=1, Z3=0, Z4=0.

### - 6.3 – Risultati

i risultati delle misure sono riportate nel grafico:



Si nota che in caso di sottoalimentazione del bandgap, la  $V_{bg}$  peggiora notevolmente il suo andamento in temperatura ed il bandgap perde la sua capacità di fornire una tensione d'uscita costante al variare della temperatura.

#### Riassumendo:

- il bandgap deve sempre essere alimentato con una tensione di 2.5V, altrimenti con tensioni di alimentazione inferiori si ha un peggioramento sensibile dell'andamento della  $V_{bg}$  in temperatura.

## 7 - LOAD REGULATION

Questa misura consiste nel misurare la tensione  $V_{bg}$  in funzione della corrente di carico erogata dal bandgap.

### - 7.1 - Scopo della misura

In generale la load regulation è una misura della capacità di circuito di mantenere la sua tensione d'uscita costante a fronte dei cambiamenti della corrente di carico. Essa è espressa come variazione percentuale della tensione d'uscita sulla variazione della corrente di carico.

Questa misura quindi dà un'indicazione della capacità del bandgap di pilotare altri circuiti

### - 7.2 - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura:

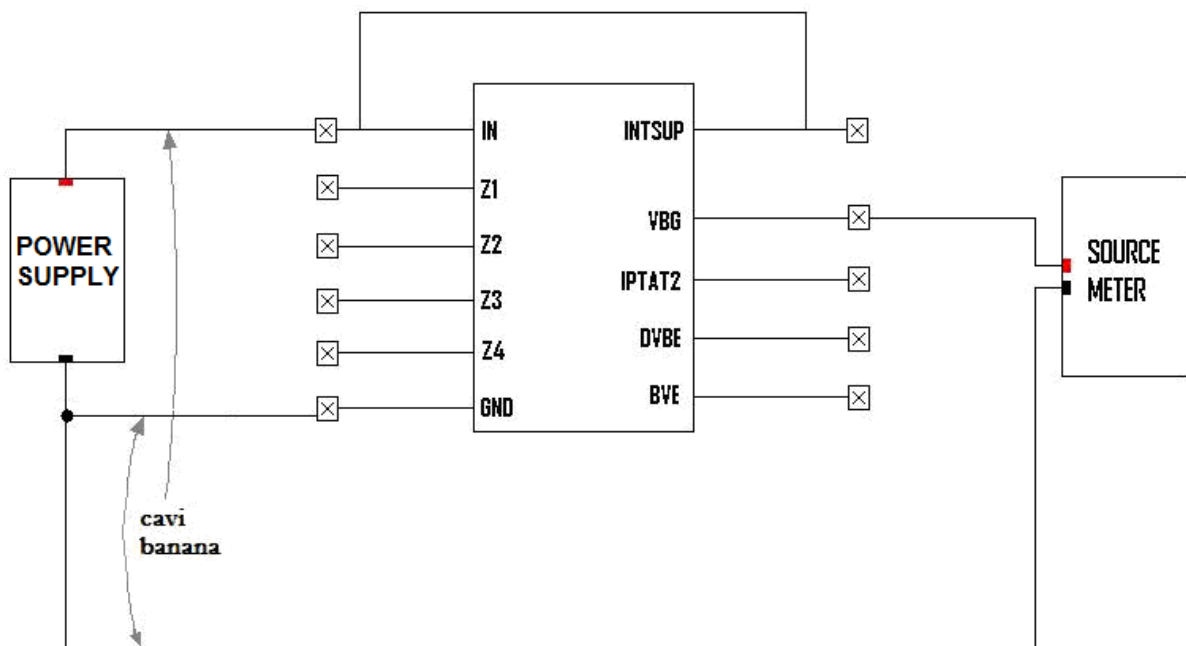
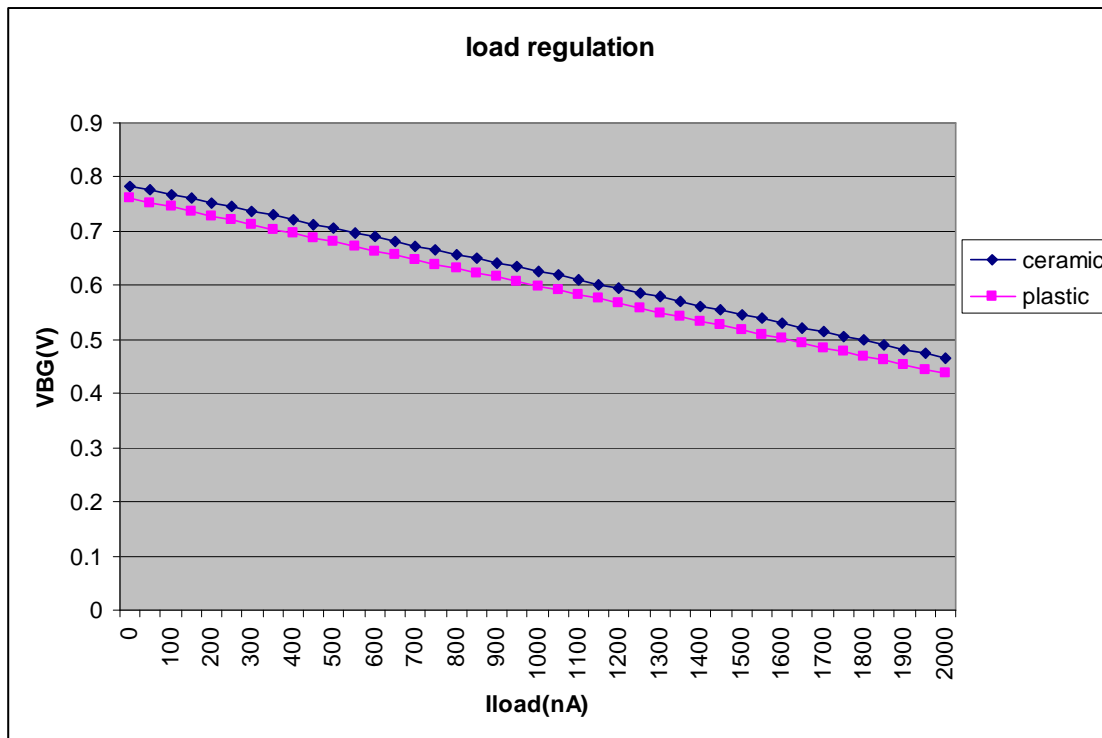


Figura 21: schema di misura

Il circuito è alimentato da un power supply TOE8952 a 2.5V. Il source meter si comporta come un carico attivo, assorbendo una corrente che viene fatta variare da 0 a 2000 nA a step di 50nA. Il source meter è in grado di rilevare la tensione  $V_{bg}$  anche in funzionamento di carico attivo, e viene usato anche per la misura in tensione.

### - 7.3 - Risultati

Le misure raccolte formano il grafico di figura:



La pendenza della caratteristica è:

$$\frac{\Delta V_{bg}}{\Delta I_{load}} = 0.159V / \mu A$$

Questo significa che ad ogni uA di corrente erogata la tensione Vbg cala di circa 0.159V e mette in evidenza che il bandgap non è in grado di erogare corrente e non è adatto ad alimentare un carico direttamente, ma può funzionare solo come riferimento. Per fornire una tensione di alimentazione precisa per altri blocchi circuitali è necessario quindi ricorrere a dei regolatori dc-dc.



## 8 - MISURA DEL CONSUMO DI CORRENTE DEL BANDGAP

### - 8.1 - Scopo della misura

Lo scopo di questa misura è di valutare il consumo a temperatura ambiente del bandgap. Come noto, il bandgap andrà a fare parte di un circuito più complesso e spesso molte applicazioni richiedono un basso consumo. È quindi necessario rendere noto il consumo del circuito per permettere una valutazione a priori del consumo totale del circuito completo. Questa sarà quindi una specifica importante.

### - 8.2 - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura:

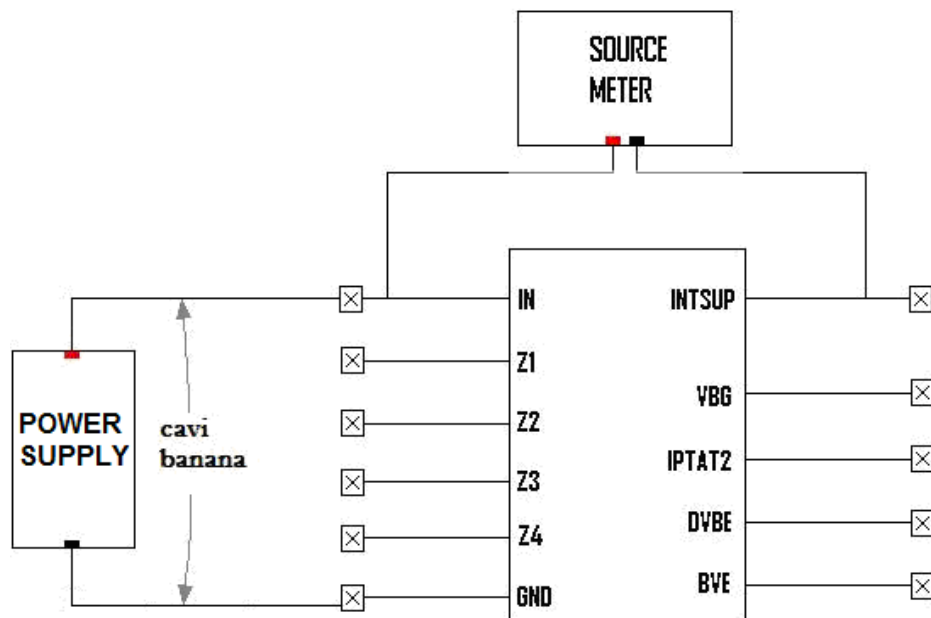


Figura 22: schema di misura

L'integrato è alimentato a 2.5V dal power supply ed il source meter, in modalità amperometro, misura la corrente che scorre verso il bandgap, in quanto cortocircuita l'alimentazione del bandgap con il power supply (che quindi alimenta direttamente il bandgap bypassando il blocco di alimentazione interno).

### - 8.3 - Risultati

A temperatura ambiente il consumo di corrente del bandgap è:

Ceramico: 37uA

Plastico: 36uA

## 9 – LINE REGULATION DEL SUPPLY DEL BANDGAP

### - 9.1 - Scopo della misura

Lo scopo di questa misura è quello di verificare il funzionamento del supply del bandgap, e valutarne il comportamento in funzione della tensione di alimentazione.

### - 9.2 - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura:

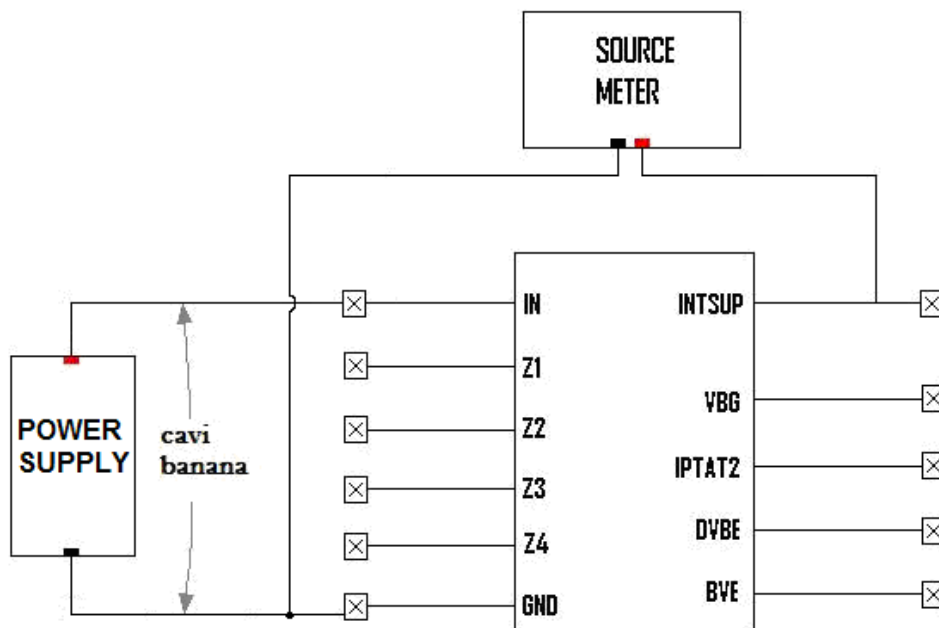


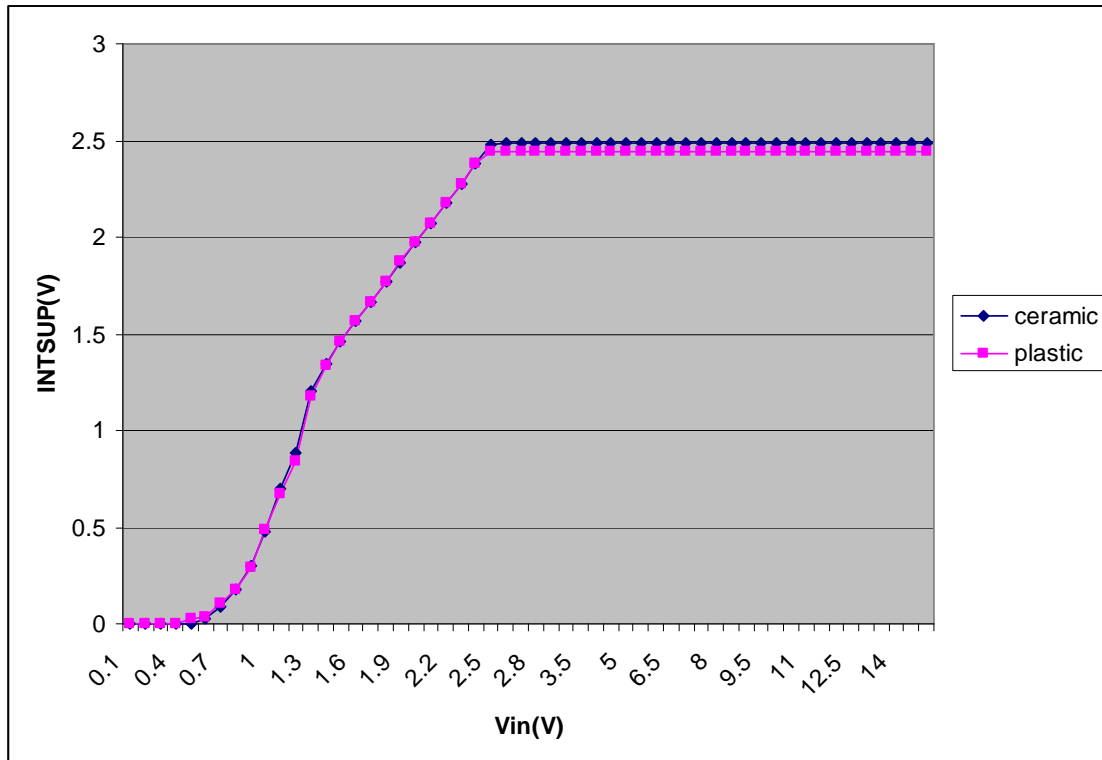
Figura 23: schema di misura

La misura viene effettuata a temperatura ambiente.

L'integrato viene alimentato da un Power supply TOE8852 con il metodo dei quattro fili, la cui tensione d'uscita viene inizialmente posta a 15V e ad ogni misura decrementata di 0.5V fino a raggiungere 3V, e di 0.1V da 3V fino a 0V. La tensione Vbg viene misurata con un source meter Keithley 2400.

### - 9.3 - Risultati

Le misure compongono il grafico in figura:



Si nota che con un'alimentazione superiore ai 2.6V la tensione d'uscita del supply è ben stabile a 2.5V e non soffre di effetti dovuti alla line regulation. Con alimentazioni inferiori a 2.6V invece la tensione d'uscita del supply decresce linearmente con pendenza 1 fino a circa 1.2V, dove la pendenza aumenta. Dalla line regulation del bandgap sappiamo che esso è alimentabile con una tensione minima di 1V e quindi l'andamento della tensione d'uscita del supply inferiore a tale valore non è di interesse.

## 10- LOAD REGULATION DEL SUPPLY DEL BANDGAP

### - 10.1 - Scopo della misura

Lo scopo di questa misura è quello di caratterizzare il supply del bandgap effettuando la load regulation sullo stesso.

### - 10.2 - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura:

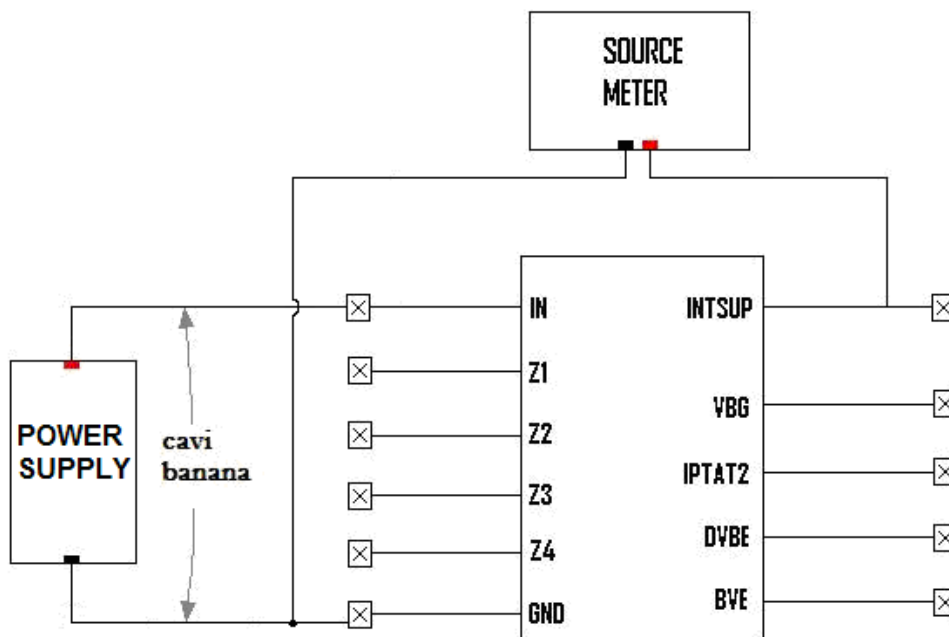
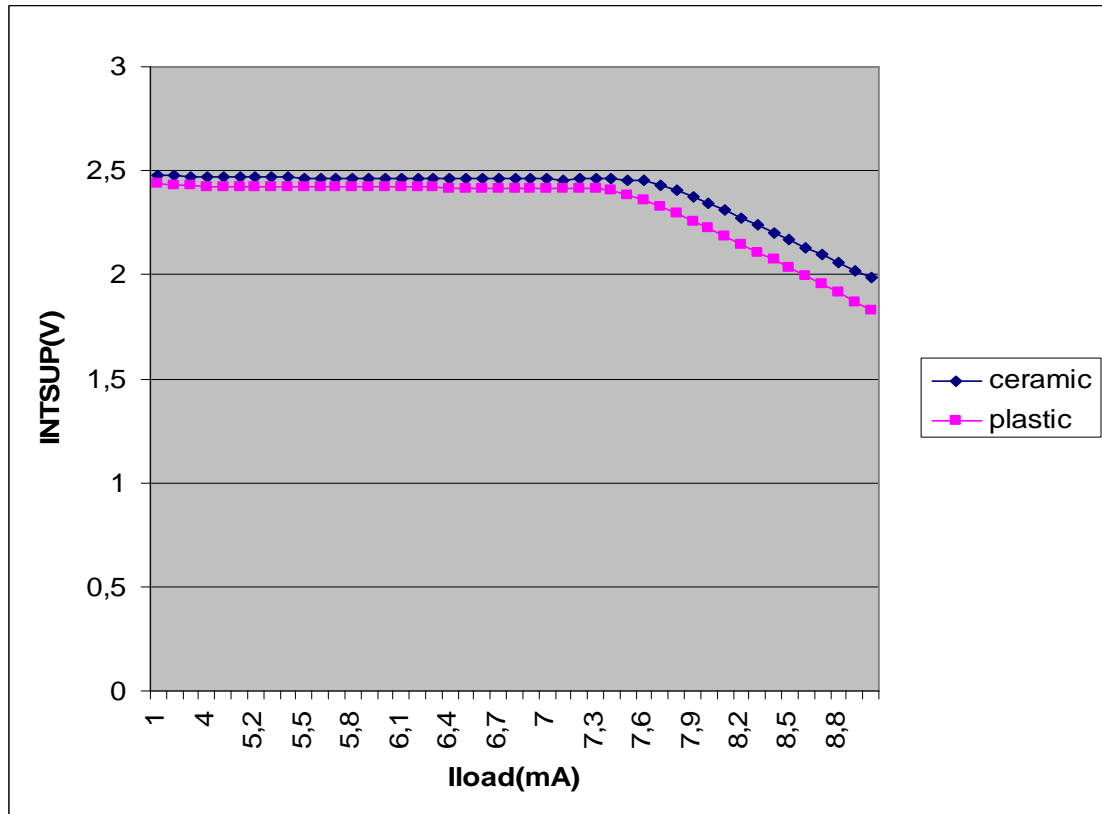


Figura 24 : schema di misura

L'integrato è alimentato da un power supply TOE 8852 a 12V, ed un source meter Keithley 2400 in funzionamento di carico attivo è collegato all'uscita del supply (piedino intsup) ; inizialmente esso assorbe una corrente di 1mA, che incrementandosi ad ogni misura di 0.1mA, raggiunge i 9mA . Il source meter è in grado di rilevare la tensione Vbg anche in funzionamento di carico attivo, e viene usato anche per la misura in tensione

### - 10.3 - Risultati

Le misure compongono il grafico in figura:



Notiamo che la tensione d'uscita del supply rimane costante fino ad una corrente di carico di circa 7.5mA, per poi decrescere linearmente. Sappiamo che il consumo del bandgap è dell'ordine dei 40uA, quindi sicuramente tale corrente non influirà sulla tensione fornita dal supply, che rimarrà costante a 2.5V.

## 11 - MISURA DEL CONSUMO DI CORRENTE COMPLESSIVO

### - 11.1 - Scopo della misura

Lo scopo di questa misura è quello di stimare il consumo di corrente complessivo (supply e bandgap) del testchip, in funzione della tensione di alimentazione.

### - 11.2 – Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura:

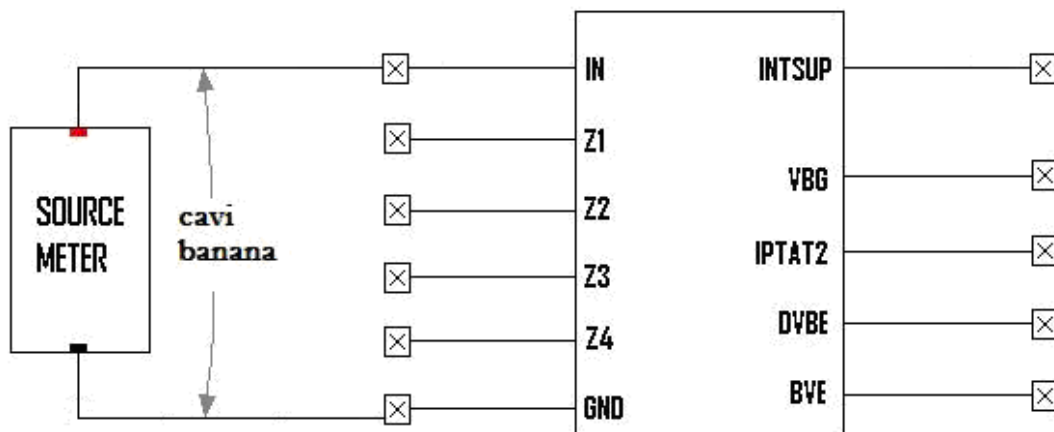


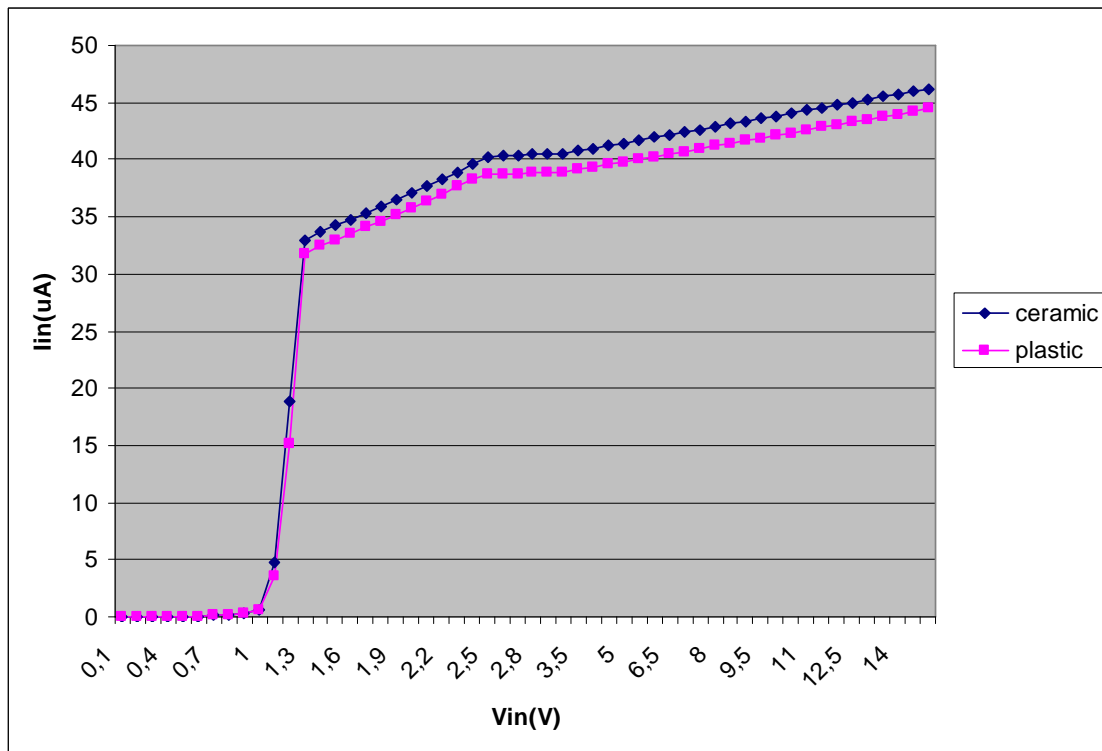
Figura 25: *schema di misura*

La misura viene effettuata a temperatura ambiente.

Il circuito integrato è alimentato da un source meter keithley 2400, il quale è in grado di fornire tensione e contemporaneamente di visualizzare la corrente erogata verso il carico. La tensione di alimentazione viene inizialmente posta a 15V e ad ogni misura verrà decrementata di 0.5V fino a raggiungere 3V , e di 0.1V da 3V fino a 0V.

## - 11.1 - Risultati

Le misure compongono il grafico in figura:



Al diminuire della tensione di alimentazione diminuisce anche la corrente assorbita dall'integrato, secondo il grafico in figura.

Notiamo che a 12V, che è la tensione di batteria di un'automobile, la corrente assorbita è di circa 45  $\mu A$ .

## 11- CONCLUSIONI

Riassumiamo in questa sezione i risultati significativi ottenuti attraverso le misure effettuate, che costituiscono la caratterizzazione completa del circuito.

La caratterizzazione del bandgap mette in luce i seguenti risultati:

- Le misure in temperatura mettono in evidenza che la tolleranza del bandgap è all'incirca dello 0.3% ( per escursioni da -40°C a 150°C ), il che è un risultato ottimo considerando che il range di tolleranza di un bandgap di primo ordine varia dal 2% al 4%. Inoltre mostrano che la compensazione tramite lo zapping di resistenze è efficace.
- La tensione minima di alimentazione del bandgap è 1V.
- La line regulation a temperatura ambiente mette in evidenza che la variazione della tensione di alimentazione del bandgap non influisce pesantemente sulla tensione d'uscita del bandgap (  $\frac{\Delta V_{bg}}{\Delta V_{in}} = 0.003$  ).
- La variazione della tensione di alimentazione, per valori inferiori di 2.5V, causa un peggioramento notevole della curva che lega la tensione d'uscita alla temperatura, facendo perdere al bandgap la capacità di mantenere la tensione Vbg costante e precisa.
- La load regulation a temperatura ambiente mette in evidenza che il bandgap non può pilotare un carico direttamente, in quanto a fronte di una corrente erogata modesta si ha una diminuzione significativa della Vbg (  $\frac{\Delta V_{bg}}{\Delta I_{load}} = 0.159V / \mu A$  ).
- Il consumo di corrente del bandgap a temperatura ambiente è dell'ordine di 36uA.

La caratterizzazione del supply del bandgap fornisce i seguenti risultati:

- Dalla line regulation si vede che il supply fornisce una tensione costante di 2.5V per valori di alimentazione superiori a 2.6V, mentre per valori inferiori la tensione d'uscita decresce linearmente.
- La load regulation mette in evidenza che il supply può erogare fino a 7.5mA senza che la sua tensione d'uscita diminuisca.

La caratterizzazione del funzionamento congiunto del supply e del bandgap mette in evidenza:

- Il consumo di corrente ad una alimentazione di 12V è di circa 45mA.
- La line regulation del bandgap è migliorata dal supply, in quanto esso fornisce una tensione di alimentazione di 2.5V anche per valori di tensione di batteria superiori, e quindi il bandgap è alimentato a 2.5V anche se la tensione di alimentazione del supply è superiore.



Complessivamente la caratterizzazione mette in luce la qualità del prodotto di nuova concezione, ed evidenzia che il comportamento teorico è rispecchiato anche nella pratica. I risultati ottenuti sono da considerarsi ottimi.

## 12 – STRUMENTAZIONE

### - 12.1 – Camera termica

#### Votsch vt 7400



**Figura 26:** la camera termica votsch vt 7400

È una camera termica di dimensione medio piccole, per test in temperatura su componenti elettronici. È particolarmente adatta per prove di laboratorio grazie alle dimensioni contenute.

Tutte le fasi di prova possono essere programmate e registrate o dal pannello di controllo a bordo macchina oppure da un pc che si interfaccia alla camera termica tramite una porta RS232.

#### **Caratteristiche tecniche:**

Campo di temperatura  $-70^{\circ}\text{C} + 180^{\circ}\text{C}$

Volumi di prova 16 lt

Gradiente di temperatura medio  $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Fluttuazione di temperatura  $1.0^{\circ}\text{C}$

## - 12.2 – Power supply

### TOE 8852



TOE 8852

**Figura 27:** *il power supply TOE8852*

È un alimentatore stabilizzato che dispone di due canali, ognuno dei quali può fornire fino a 64V e 2.5A.

Dispone dei connettori di sense per l'alimentazione a 4 fili: i due fili di sense servono a verificare che nel punto da alimentare (es. piedino di alimentazione del chip) ci sia la tensione voluta, cioè quella impostata. Infatti possono esserci delle perdite dovute alla resistenza dei cavi o delle piste che connettono il pin del chip al morsetto dove poi andrà ad attaccarsi il cavo di alimentazione del power supply (e quindi sul piedino una tensione inferiore a quella impostata). Se questo si verifica l'alimentatore reagisce aumentando la tensione di output.

È comandabile via GPIB e via RS232.

## - 12.3 – Source meter

### KEITHLEY 2400

#### SourceMeter front panel



#### SourceMeter rear panel

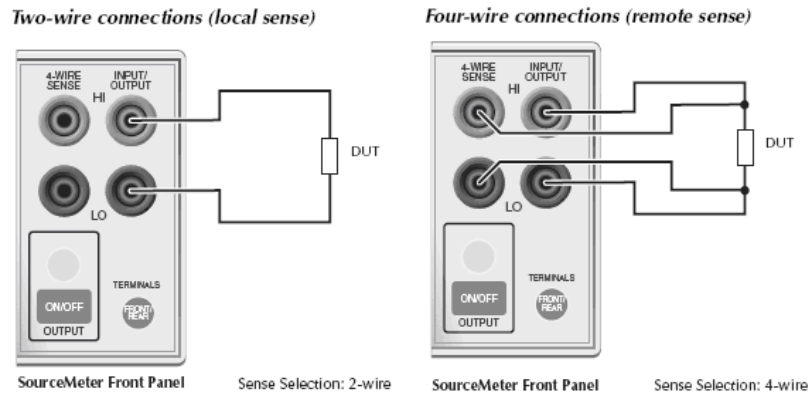


Figura 28: il source meter Keithley 2400

È uno Strumento che integra un DC power source con un multimetro con risoluzione a 5 ½ digit. Può fornire una potenza di 20W con tensioni da  $\pm 5\mu\text{V}$  (sourcing) e da  $\pm 1\mu\text{V}$  (measuring) fino a  $\pm 200\text{V}$  e correnti da  $\pm 10\text{pA}$  a  $\pm 1\text{A}$ . Permette misure di resistenza a 2, 4 e 6 terminali fino a 1700 letture al secondo via interfaccia GPIB.

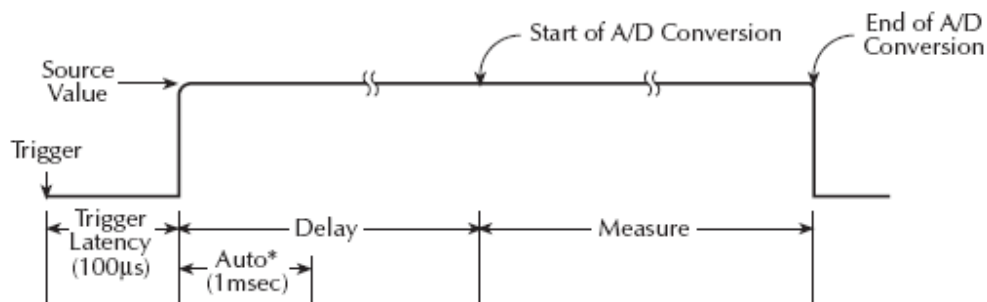
Può comportarsi sia come un generatore di tensione sia come generatore di corrente, quindi può funzionare da carico attivo. Effettua misure di resistenza e calcola la potenza erogata matematicamente (non istantaneamente).

Connessione a 2 o 4 fili:



Ciclo Source-Delay-Measure (SDM) : Quando viene impostata una tensione lo strumento ciclicamente esegue la misura della tensione impostata per garantirne il valore corretto.

#### Source-delay-measure (SDM) cycle



A seconda nel numero di campioni letti dall' A/D converter varia la precisione e il tempo di conversione:

- FAST ACCURACY : 4ms , garantisce una precisione di 4 digit
- MEDIUM ACCURACY : 20 ms
- NORMAL ACCURACY : (la più usata) 63ms , precisione 6 digit
- HIGH ACCURACY : 100ms

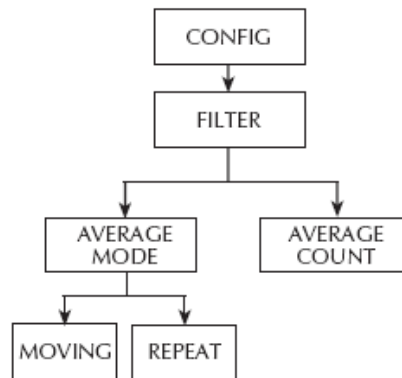
La velocità di acquisizione si può anche regolare settando il parametro NPLC ricavato da:  
tempo di acquisizione = NPLC / frequenza di rete

utile nella modalità pulse (k2430).

#### FILTRO

Lo strumento permette di impostare la risposta di un filtro per stabilizzare il rumore di misura. La lettura visualizzata su display e' una media di valori convertiti.

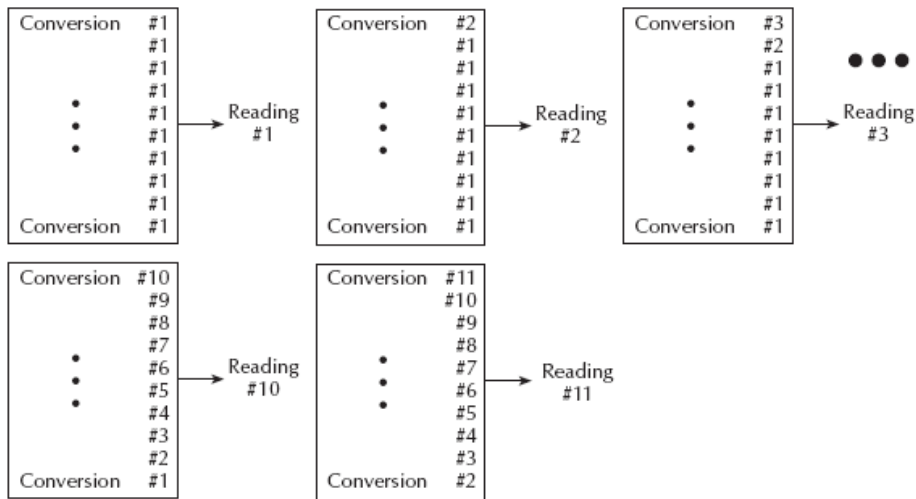
**Filter configuration menu tree**



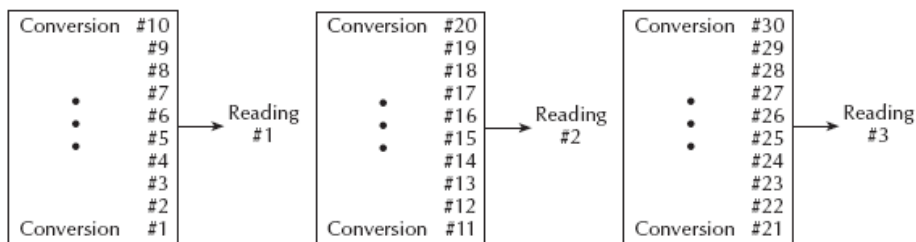
Average mode – Moving : ogni nuova lettura modifica la media

Average mode – Repeated : dieci letture al colpo , sovrascrittura delle precedenti 10 .  
Media sulle 10 misure presenti

**Moving average and repeating filters**



**A. Type - Moving Average, Readings = 10**



**B. Type - Repeating, Readings = 10**

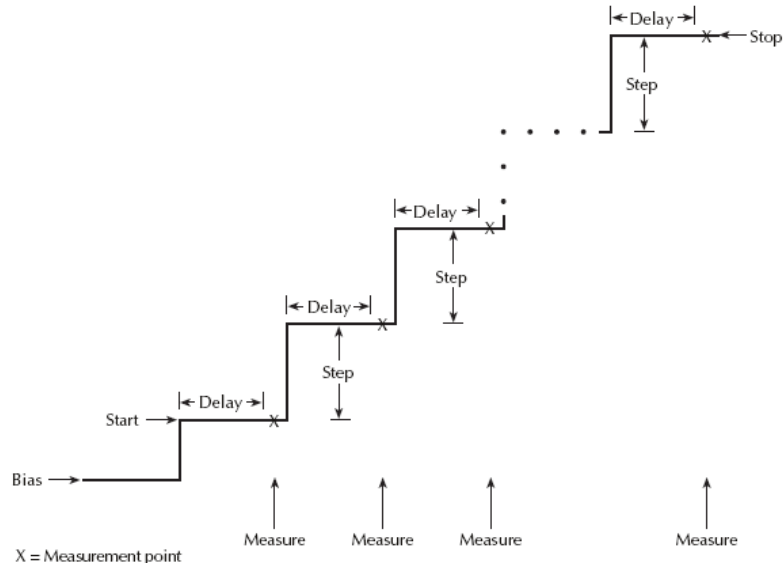
Average count : media su un numero di campioni preimpostato.

## SWEEP

Permette di dare in uscita tensioni del tipo :

-stair: (simile ad una rampa)

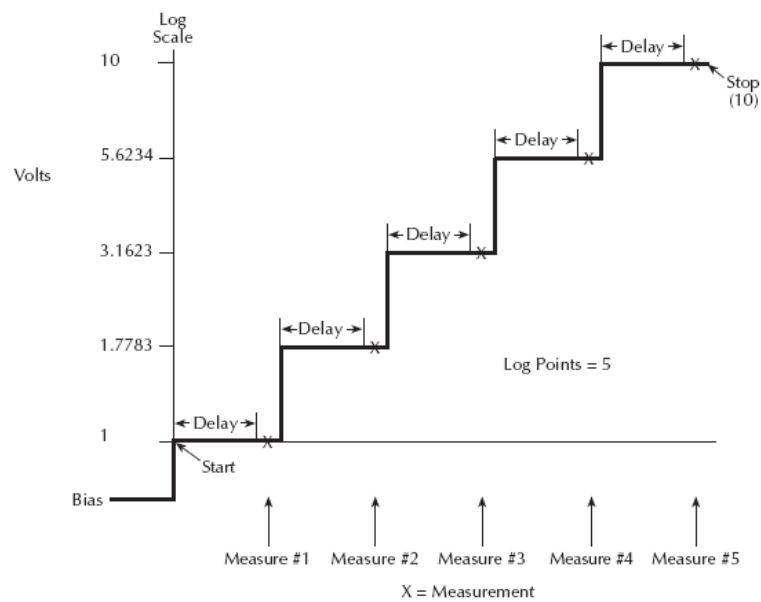
*Linear staircase sweep*



(Ogni singolo gradino dura il tempo necessario per fare una misura)

- logaritmico:

*Logarithmic staircase sweep (example 5-point sweep from 1 to 10 volts)*

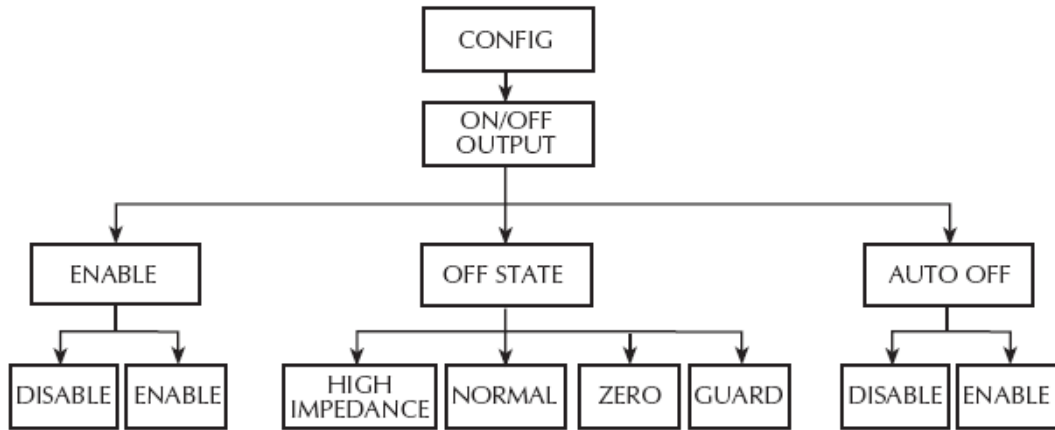


-custom : permette di realizzare una scala con valori a propria discrezione

Si può configurare l'impedenza del canale quando esso e' spento in tre modalità :

- High impedance
- Normal impedance
- Zero impedance

*Output configuration menu tree*



**Figura 8**

Auto off: spegne il canale dopo la misura.



## - 12.4 – Multimetro

### KEITHLEY 2000



Figura 29: il multimetro Keithley 2000

È un multimetro digitale a 6 ½ digit.

Può effettuare:

- misure di resistenza da 100μΩ a 100 MΩ (a 2 o 4 fili)
- misura di tensioni DC da 0.1μV a 1kV
- misure di tensioni AC da 0.1 μV a 750 V
- misure di corrente da 10nA a 3A
- misure di frequenza
- misure di temperatura se vengono connesse delle termocoppie
- Verifica di continuità

È possibile modificare il numero di digit significativi. È presente un filtro che permette di stabilizzare il rumore di misura, mediando fino a 999 letture. Consente di salvare un massimo di 1034 misure delle quali si può visualizzare la media, la deviazione standard, il minimo ed il massimo.

Può essere triggerato con un trigger esterno oppure manualmente tramite il tasto 'trigg' (strumento solo trigger-in).

**L'impedenza d'ingresso varia a seconda del range di misura impostato, come si vede dalla tabella:**

| Range       | Risoluzione | Impedenza d'ingresso |
|-------------|-------------|----------------------|
| 100.0000 mV | 0.1 μV      | > 10 GΩ              |
| 1.000000 V  | 1.0 μV      | > 10 GΩ              |
| 10.00000 V  | 10 μV       | > 10 GΩ              |
| 100.0000 V  | 100 μV      | 10 MΩ ±1%            |
| 1000.000 V  | 1 mV        | 10 MΩ ±1%            |

## - 12.5 – Generatore di funzioni

### AGILENT 33250A



Figura 30: il generatore di funzioni Agilent 33250A

È un generatore di funzioni in grado di generare :

- sinusoidi
- onde quadre
- onde triangolari
- rumore bianco forme
- modulazione AM FM
- sweep in frequenza
- forme d'onda arbitrarie

Frequenze raggiungibili: 500uHz - 80MHz

Può fornire in uscita al massimo 10mA. E' bene usarlo attorno ai 2mA altrimenti lo strumento reagisce arrotondando i fronti del segnale. Per applicazioni che richiedono più corrente e' indispensabile ricorrere ad un buffer.

E' possibile impostare l'impedenza d'uscita, per evitare l'effetto partitore.

Funzione Bust: esegue un numero di cicli prefissato della forma d'onda e poi si spegne.

Trigger Setup: imposta come trigger una sorgente interna od esterna.

Può visualizzare la forma d'onda sul display.

- 12.6 – Oscilloscopio

**LECROY 6050A**



**Figura 31:** *l'oscilloscopio digitale LeCroy 6050A*

È un oscilloscopio digitale a 4 canali con sistema operativo Microsoft windows xp pro. Nella tabella riportiamo le caratteristiche significative:

|                            |                  |
|----------------------------|------------------|
| Larghezza di banda         | 500MHz           |
| Frequenza di campionamento | 4x 5Gs/s         |
| Memoria standard           | 4x 1M, 2x 2Mbyte |
| display                    | 8,4" SVGA TFT    |

## APPENDICE

Questa sezione presenta una misura che è stata effettuata durante il tirocinio a margine del lavoro di caratterizzazione del bandgap.

La richiesta è quella di valutare il comportamento del tracker TLE4250-2G, prodotto da infineon, in una particolare condizione di lavoro.

### - Cenni teorici sui tracker

Il Tracker è un circuito che prende come riferimento una tensione e la riporta in uscita.

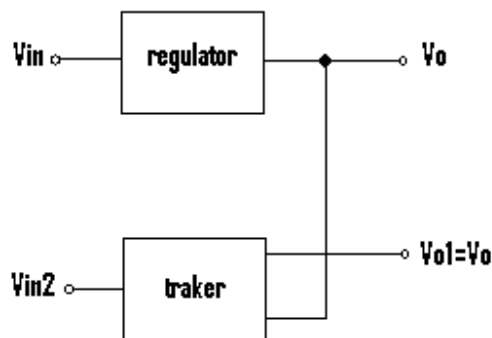


Figura 32: principio di funzionamento di un tracker

La sua applicazione principale è quella di disaccoppiare. Ad esempio nel caso di un sistema a microprocessore è utile disaccoppiare le alimentazioni del microprocessore stesso ed altri dispositivi (sensori):

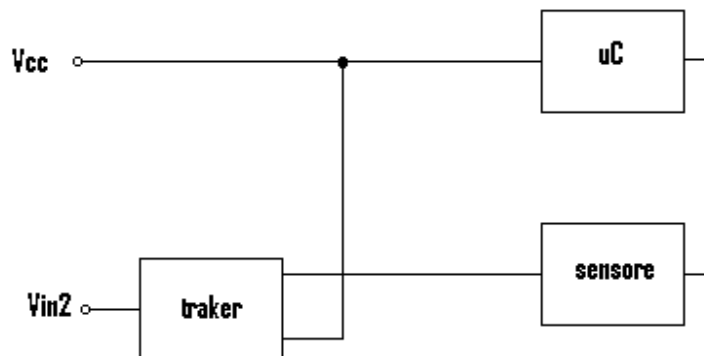


Figura 33: esempio di utilizzo di un tracker

In questo modo se un guasto causa un cortocircuito del sensore il microprocessore non viene anch'esso cortocircuitato in quanto le due alimentazioni sono separate.

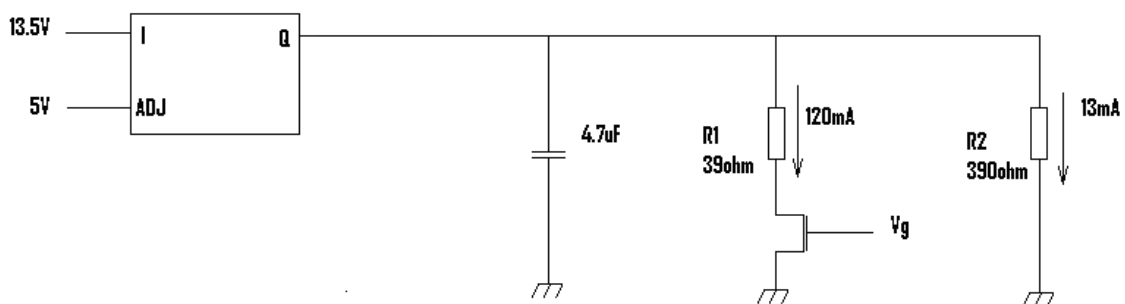
Il tracker TLE4250-2G è progettato per fornire alimentazioni a sensori nel campo automobilistico, ed ha delle protezioni nel caso di cortocircuito o sovraccarico. In particolare è dotato di un sistema di current limitation che permette all'integrato di erogare al massimo 80mA.

## - Scopo della misura

La condizione di lavoro del traker deve essere la seguente:

- tensione di alimentazione: 13.5V
- tensione da seguire: 5V
- corrente di carico di 13mA
- picchi di 120mA di durata 3us
- capacità d'uscita di 4.7uF

Per riprodurre tali condizioni ricorriamo al circuito di figura:

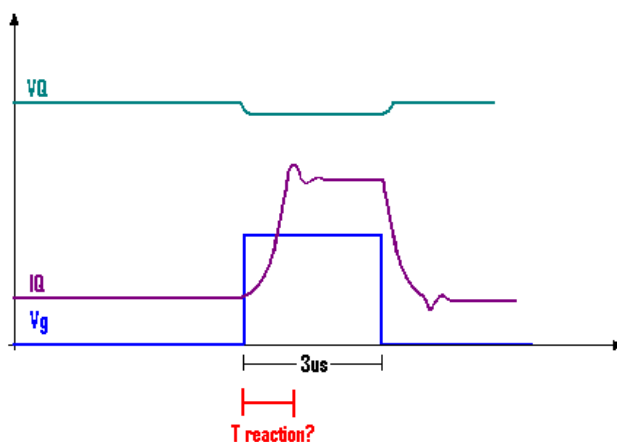


**Figura 34:** circuito che riproduce le condizioni di lavoro richieste

La tensione d'uscita  $V_q$  sarà 5V, quindi per garantire una corrente di carico costante di 13mA è necessaria una resistenza  $R_2 = \frac{5V}{13mA} = 384.6\Omega$ , approssimata dal valore commerciale di 390 $\Omega$ .

Per garantire la corrente di 120mA per un tempo di 3us, si applica una tensione  $V_g$  di durata 3us (con un generatore di funzioni) che accende l'interruttore, in modo che attraverso  $R_1$  possa scorrere corrente solo nell'intervallo di tempo voluto.

$R_1 = \frac{5V}{120mA} = 41.6\Omega$ , approssimato dal valore commerciale di 39 $\Omega$ .

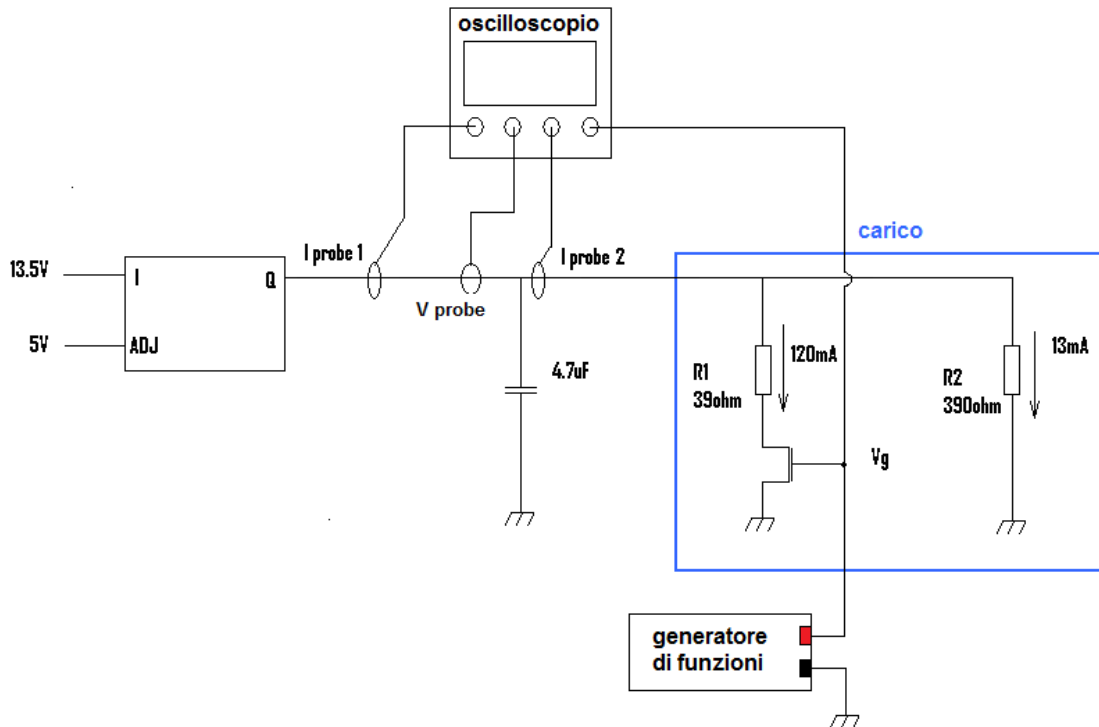


In queste condizioni si vuole misurare il tempo di reazione della corrente d'uscita  $I_q$  rispetto all'impulso di corrente di 3us, cioè il tempo che impiega la corrente d'uscita a portarsi al valore massimo 13mA+120mA=133mA.

**Figura 35:** rappresentazione del ritardo da misurare

### - Schema di misura e ambiente di test

Lo schema di misura è riportato in figura:



**Figura 36:** *schema di misura*

Si andranno a visualizzare con l'oscilloscopio l'andamento della tensione d'uscita  $V_q$  per mezzo di una sonda di tensione e gli andamenti della corrente a monte e a valle del condensatore, per mezzo di due sonde di corrente ad effetto hall.

Il trigger dell'oscilloscopio è attivo sul fronte di salita del canale 4 che è connesso all'uscita del generatore di funzione utilizzato per generare l'impulso  $V_g$ .

La corrente che il carico sarà composta da una componente dc di 13mA e una componente ac di 120mA di durata 3us.

La sonda a monte del condensatore andrà a rilevare la corrente fornita dal solo circuito integrato, mentre la sonda a valle del condensatore andrà a rilevare la corrente effettivamente assorbita dal carico, che comprenderà anche la corrente fornita dal condensatore.

## - Risultati

Consideriamo solo la corrente uscente dall'integrato :

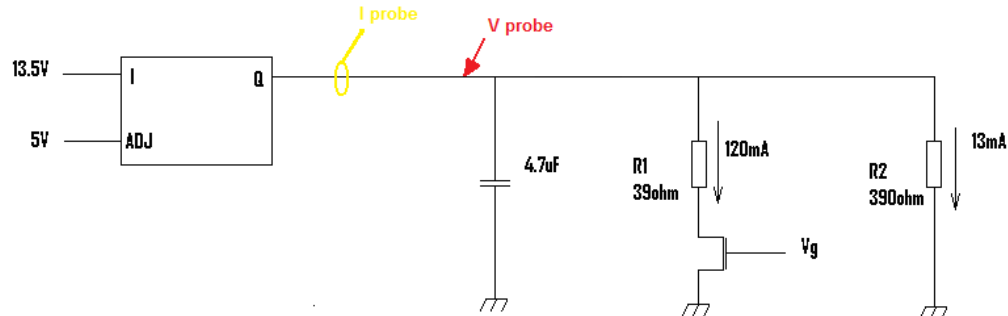
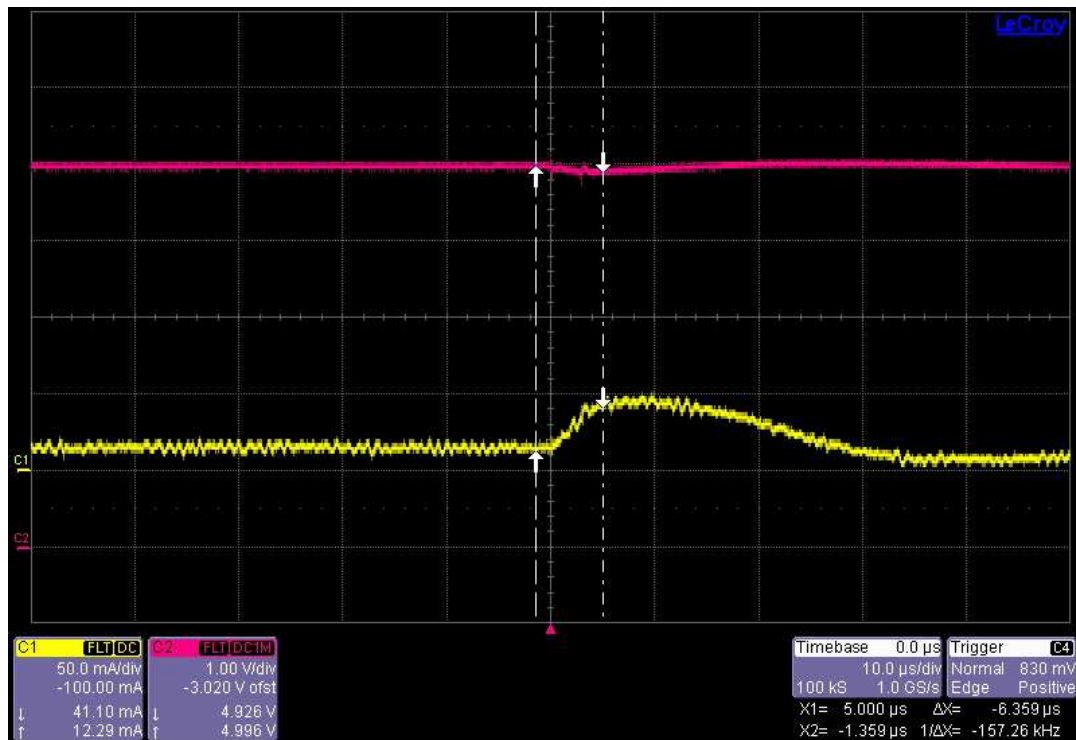


Figura 37: posizionamento delle sonde di corrente e tensione

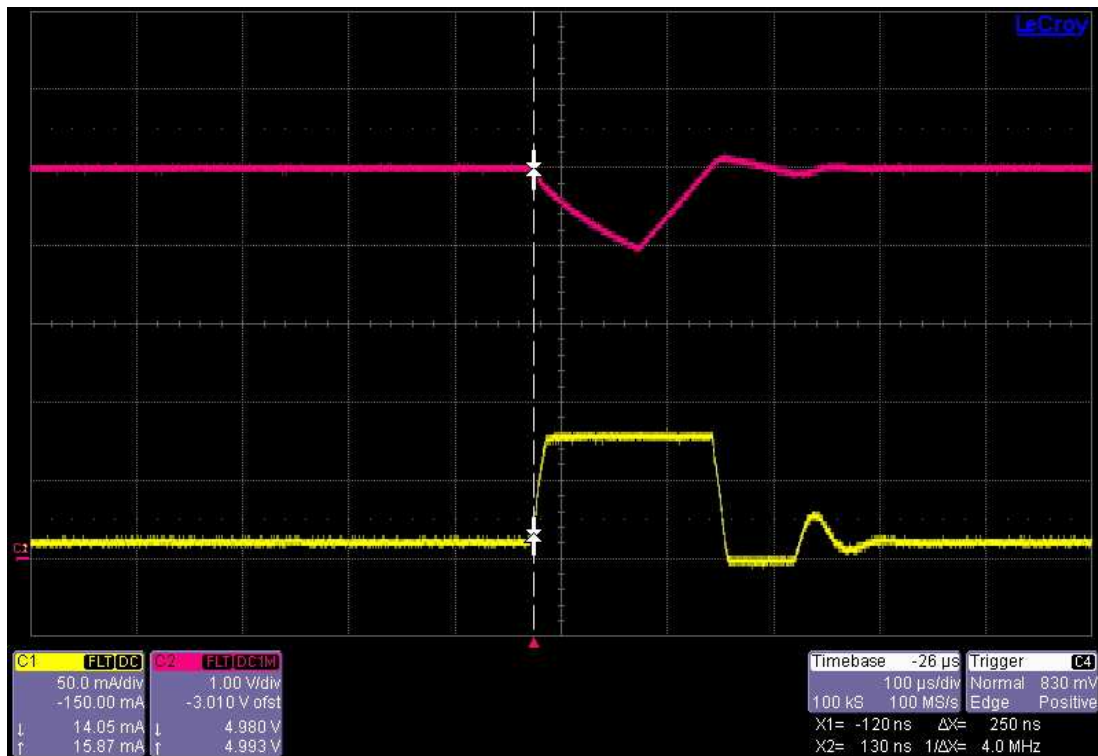
Si nota che durante l'impulso di 3µs essa non raggiunge un valore di circa 130mA, ma si ferma a circa 50mA per poi decrescere:



Rosso: VQ    Giallo: IQ

Il dispositivo quindi non fornisce tutta la corrente richiesta dal carico nei 3µs.

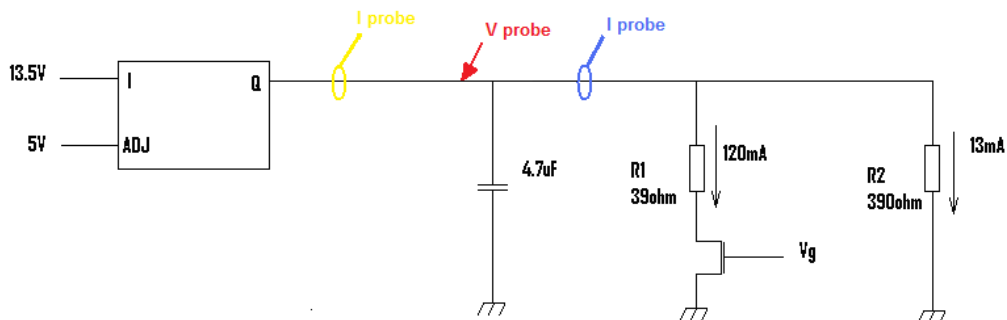
Provando ad aumentare la durata dell'impulso (100µs) si vede che il dispositivo entra in current limitation in quanto la corrente IQ si stabilizza a circa 80mA : inoltre si nota che la tensione d'uscita cala sensibilmente per poi ricominciare a salire alla fine dell'impulso e riportarsi a 5V. Durante la fase di risalita di VQ il dispositivo rimane in current limitation, sebbene l'impulso sia terminato:



**VQ IQ**

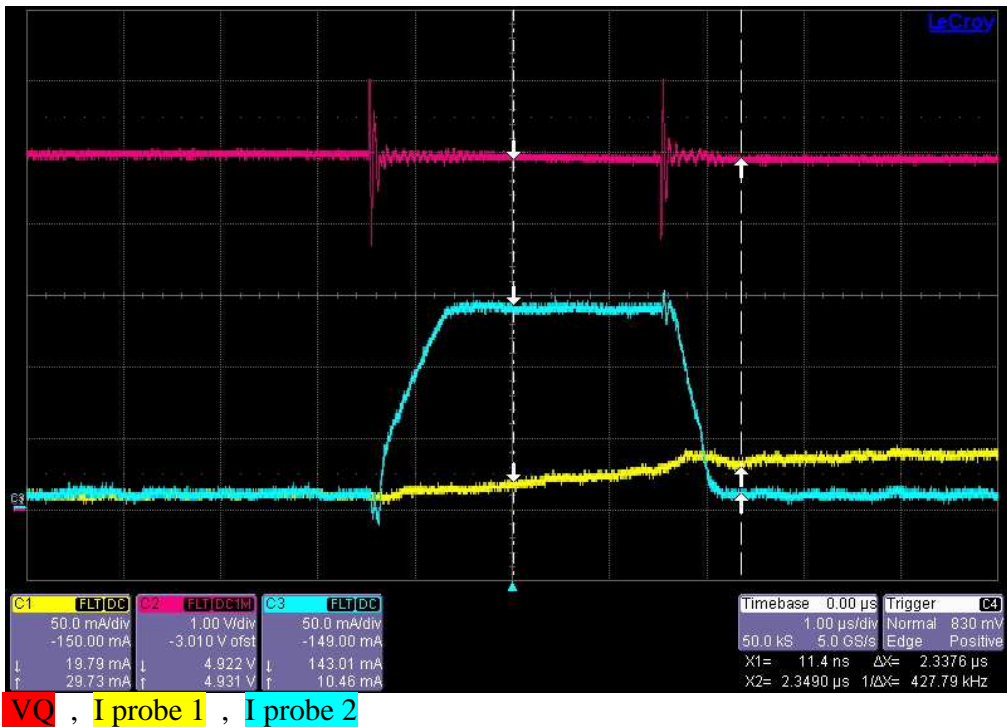
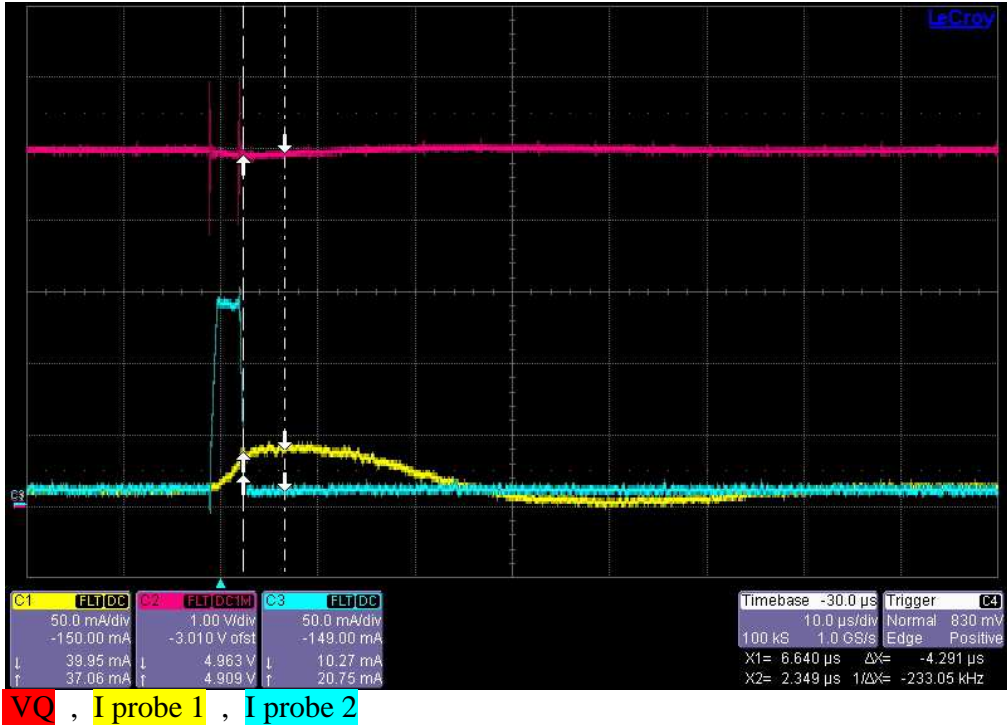
Questo succede perché parte della corrente richiesta dal circuito a valle della capacità è fornita dalla capacità stessa: infatti inizialmente la capacità contiene una quantità di carica tale da avere ai suoi capi 5V ed il traker fornisce i 13mA richiesti, ma quando si attiva l'impulso che abilita la richiesta di 133mA da parte del carico, il traker aumenta lentamente la corrente erogata fino a 80 mA per poi entrare in current limitation e l'ulteriore corrente richiesta dal carico viene fornita dalla capacità che scaricandosi fa conseguentemente calare la tensione d'uscita. Una volta terminato l'impulso, il traker deve fornire la corrente necessaria per alimentare il carico (13mA) e la corrente necessaria per ricaricare la capacità e rimane quindi in current limitation.

Per visualizzare la corrente che effettivamente assorbe il carico visualizziamo anche la corrente a valle del condensatore:

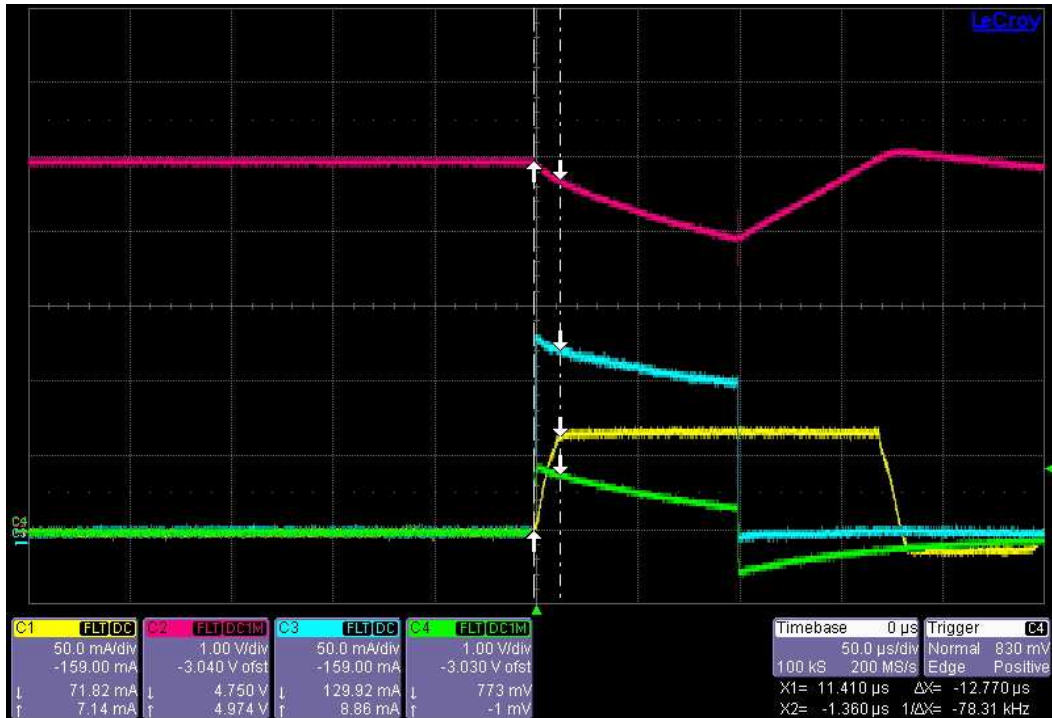


**Figura 38:** posizionamento della sonda di tensione e delle due sonde di corrente



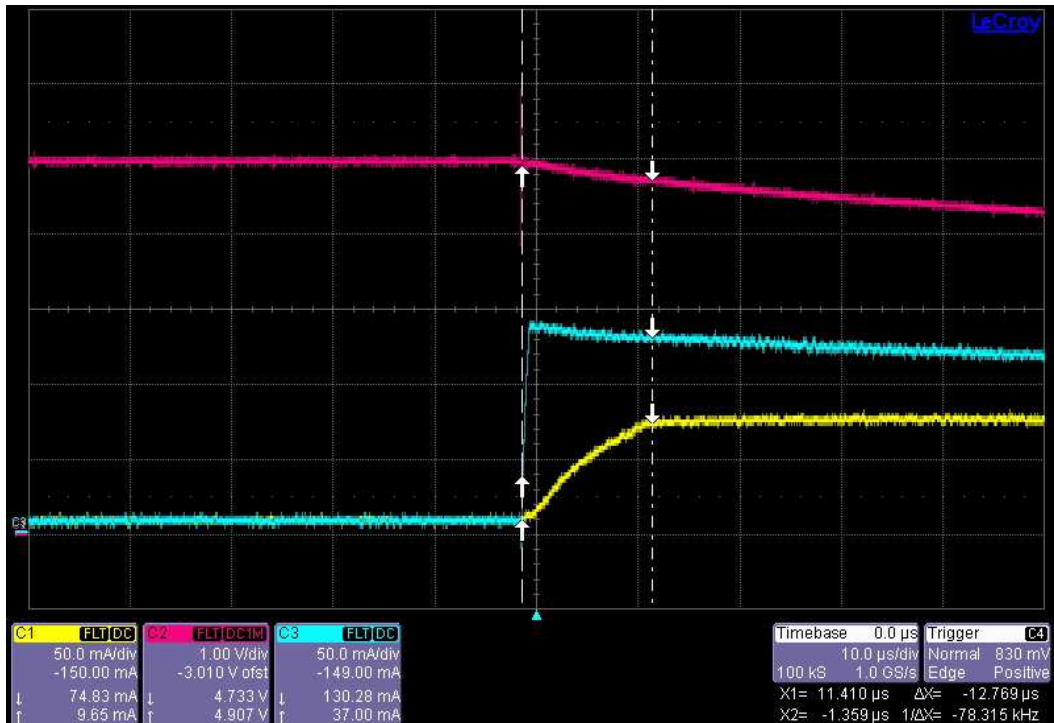


Con un impulso di durata 3μs si vede che la corrente e' fornita al carico quasi esclusivamente dalla capacita' e che il dispositivo non fa in tempo a portarsi in current limitation. Pertanto per valutare il tempo di reazione del current limitation bisogna applicare un impulso di durata sufficientemente elevata:



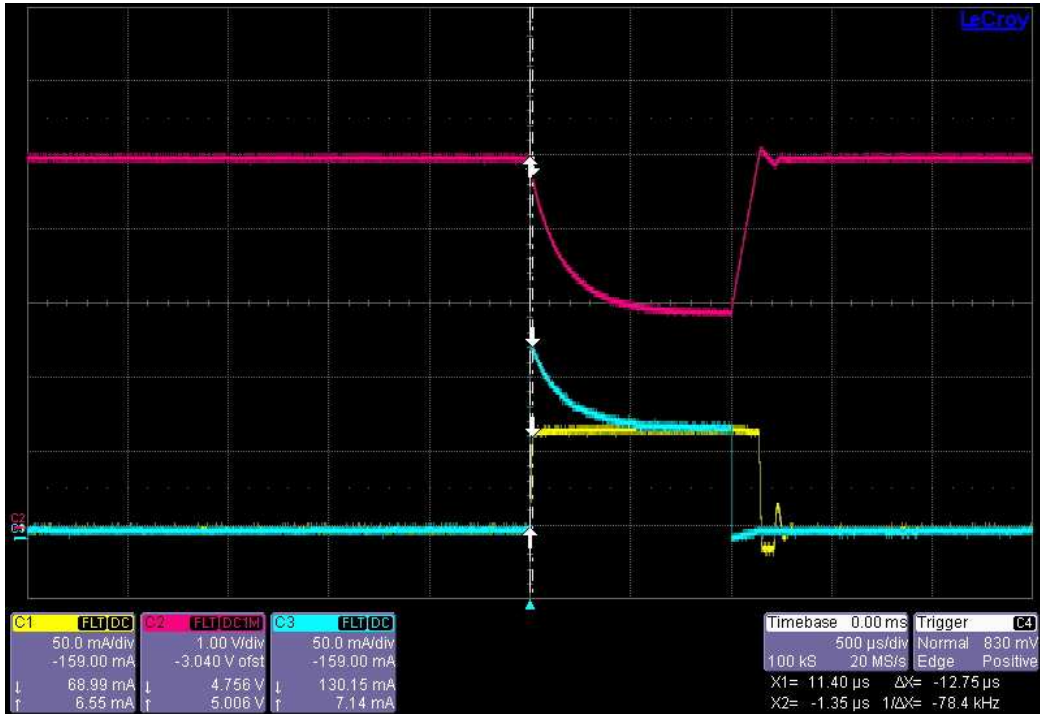
VQ , I probe 1 , I probe 2

Il tempo di reazione e' circa 12us:



VQ , I probe 1 , I probe 2

Da notare come applicando un impulso di durata tale da scaricare la capacita' la corrente al carico una volta scaricata la capacita e' fornita dal dispositivo e quindi limitata a 80mA



VQ , I probe 1 , I probe 2

La tensione d'uscita si porta alla tensione  $80\text{mA} \cdot R1/R2 = 80\text{mA} \cdot 35\text{ohm} = 2.8\text{V}$

## **RIFERIMENTI**

- Rajarshi Paul, Amit Patra, Shailendra Baranwal, Kaushik Dash : “Design of second-order sub-bandgap mixed-mode voltage reference circuit for low voltage application”
- Paul R. Gray : “A precision curvature-Compensated CMOS bandgap reference”
- <http://www.lecroy.com/it/press/Articles/WaveRunner6000.asp>
- [http://www.toellner.de/pdf\\_gb/8840.pdf](http://www.toellner.de/pdf_gb/8840.pdf)
- [http://www.metrictest.com/catalog/brands/keithley/kei\\_2400.jsp](http://www.metrictest.com/catalog/brands/keithley/kei_2400.jsp)
- <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/33250-90002.pdf>