

SOMMARIO

SOMMARIO	1
INTRODUZIONE	3
<u>CAPITOLO 1</u>	<u>4</u>
IL RIVELATORE CMS.....	4
1.1 L'ACCELERATORE LHC.....	4
1.2 IL SISTEMA DI RIVELATORI DI CMS.....	5
1.3 RIVELAZIONE DELLE PARTICELLE μ CON CAMERE A DERIVA	7
1.4 I TUBI A DERIVA DI CMS	11
<u>CAPITOLO 2</u>	<u>14</u>
L'ELETTRONICA DI <i>FRONTEND</i>: IL <i>CHIP MAD</i>.....	14
2.1 CARATTERISTICHE DELL'ELETTRONICA DI <i>FRONTEND</i>	14
2.2 LA CATENA ELETTRONICA DEL <i>MAD</i>	15
2.2.1 SEZIONE DI AMPLIFICAZIONE	15
2.2.2 SEZIONE DI USCITA	18
2.2.3 ABILITAZIONI	18
2.2.4 SENSORE DI TEMPERATURA E POLARIZZAZIONE.....	19
2.3 TEST DI FUNZIONAMENTO	20
2.3.1 APPARATO SPERIMENTALE:	20
2.3.2 VERIFICHE STATICHE	23
2.3.3 VERIFICHE DINAMICHE	24
2.4 SENSIBILITÀ E RUMORE.....	24
2.5 <i>TIME WALK</i>	29
2.6 <i>CROSSTALK</i>	31
2.7 PROVE IN TEMPERATURA	33
<u>CAPITOLO 3</u>	<u>38</u>
CONTROLLI LENTI NELLE SCHEDE DI <i>FRONTEND</i>	38
3.1 IL <i>CHIP I²C CUSTOM</i>	38
3.2 PROVE DI FUNZIONAMENTO	40
3.2.1 APPARATO SPERIMENTALE	40
3.2.2 INDIRIZZAMENTO.....	43
3.2.3 LETTURA/SCRITTURA NEL REGISTRO	43
3.2.4 LIVELLI DELLE LINEE SDA E SCL	44
3.2.5 LIVELLI DELLE LINEE DI INDIRIZZAMENTO.....	45

3.2.6	LIVELLI STATICI E DINAMICI	45
3.2.7	PILOTAGGIO DELLA LINEA SDA.....	46
3.2.8	CARICO SULLA LINEA I ² C	47
3.3	L'INTEGRATO PCF8577	48
3.4	CONFRONTO DEI DUE INTEGRATI	49
 <u>CAPITOLO 4</u>		<u>50</u>
 IL SISTEMA DI <i>FRONTEND</i>.....		50
4.1	LE SCHEDE HVC E <i>FRONTEND</i>	50
4.2	TEST DI FUNZIONAMENTO	53
4.2.1	APPARATO SPERIMENTALE:	53
4.2.2	MISURA DELLE CORRENTI ASSORBITE.....	54
4.2.3	SENSIBILITÀ E RUMORE	54
4.2.4	<i>CROSSTALK</i>	56
4.2.5	<i>TIME WALK</i>	58
4.2.6	SONDE DI TEMPERATURA	58
CONCLUSIONI.....		60
APPENDICE AL CAPITOLO 2		61
APPENDICE AL CAPITOLO 3		69
APPENDICE AL CAPITOLO 4		72
CARATTERISTICHE DEGLI INTEGRATI		84

Introduzione

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno della cooperazione dell'INFN di Padova per la realizzazione delle camere muoniche che equipaggeranno il barile di CMS in costruzione al CERN di Ginevra. Il gruppo con cui ho collaborato si occupa della progettazione e realizzazione dell'elettronica di lettura dei tubi a deriva che verranno montati nel barile del rivelatore. Il mio compito è stato quello di eseguire una serie di test di funzionamento di due diversi circuiti integrati *custom*: il *chip* di *frontend* denominato MAD, che deve prelevare il segnale dai tubi e renderlo disponibile per il sistema di *trigger* e di acquisizione, e un *chip* con interfaccia I²C sviluppato al CERN per i controlli lenti della catena di lettura.

Il mio lavoro è iniziato con una serie di prove eseguite su questo secondo *chip* I²C. Trattandosi di prototipo di ASIC realizzato da un laboratorio esterno, i test, svolti sulla campionatura di 10 integrati a nostra disposizione, hanno dovuto includere controlli di tipo funzionale e di caratterizzazione elettrica. La mia partecipazione a queste prove si è concretizzata nel montaggio della scheda utilizzata per il test, nella collaborazione per la messa a punto del programma di controllo della stessa e nell'esecuzione di tutte le misure.

Per le verifiche da compiere sul *chip* di *frontend* MAD, la strumentazione usata era molto simile a quella impiegata sulle versioni precedenti dell'ASIC. Anche in questo caso si è trattato di realizzare una scheda di prova, mentre, essendo il *chip* sviluppato "in casa", erano già disponibili i valori limite, ricavati dalle simulazioni entro cui le caratteristiche dovevano rientrare.

Visti i risultati positivi delle prove eseguite sui primi 8 prototipi ASIC, sono state assemblate 2 schede di *frontend* analoghe a quelle che equipaggeranno il rivelatore. Anche queste sono state provate con successo. Infine è stata disponibile una più ampia campionatura di integrati in contenitore plastico finale con i quali sono state montate altre 10 schede, anche in questo caso il mio contributo è stato quello di effettuare alcune misure volte ad accertare le prestazioni del sistema con una maggiore statistica.

Le linee essenziali del progetto in cui si inquadra l'impiego di questi circuiti integrati sono state brevemente esposte nel capitolo 1 del presente elaborato.

Nel capitolo 2 si è innanzitutto cercato di porre in evidenza quali esigenze tecniche avessero portato alla definizione e alla realizzazione del MAD e, dopo aver fornito una sintetica descrizione della struttura di questo ASIC, sono stati riportati i risultati della prima sessione di test compiuta su ogni singolo *chip*. Tutti i dati raccolti nel corso dei test da me effettuati sul *chip* I²C *custom* sono stati riportati nel capitolo 3. Nel capitolo 4 viene descritta la versione prototipale delle schede di *frontend* assieme alle misure eseguite sulle stesse.

Le tabelle di dati, non inserite all'interno dei vari capitoli, sono state riportate per completezza in appendice, come pure la descrizione degli integrati citati durante l'esposizione.

Capitolo 1

Il rivelatore CMS

1.1 L'acceleratore LHC

LHC (acronimo di Large Hadron Collider) è il nuovo acceleratore per lo studio delle interazioni protone-protone in costruzione a Ginevra. Riportiamo di seguito alcuni dei principali parametri che lo caratterizzano:

Circonferenza	26.66 Km
Raggio magnetico	3.13 Km
<i>Bunch</i> per fascio	2835
Protoni per <i>bunch</i>	10^{11}
Energia dei fasci	7 + 7 TeV
Luminosità	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
<i>Crossing rate</i>	40 MHz
Collisioni	$10^7 \div 10^9 \text{ Hz}$
Tempo di vita del fascio	22 h

Per contenere i costi si è pensato di sfruttare il tunnel del LEP e per tali motivi l'LHC ne ripete la struttura generale: si tratta di un acceleratore non perfettamente circolare, formato da otto sezioni diritte raccordate da altrettanti tratti curvi (ciò spiega la discrepanza tra raggio magnetico e circonferenza). Anche per la catena di preacceleratori vengono sfruttate le apparecchiature già esistenti di LinAc, Booster, PS e SPS, grazie alle quali è possibile iniettare i *bunch* negli anelli di LHC con un'energia iniziale piuttosto consistente. Qui i due fasci girano in senso inverso all'interno di due sincrotroni distinti, che si intersecano solamente in corrispondenza dei quattro esperimenti previsti: ALICE (A Large Ion Collider Experiment), ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid) e LHC-B (fisica B in LHC). Questi apparati sperimentali sono dislocati in quattro degli otto tratti rettilinei; negli altri quattro invece si trovano rispettivamente la cavità acceleratrice a radiofrequenza, due sistemi di pulizia del fascio e il dispositivo per svuotare gli anelli una volta che i fasci siano degradati. Focalizzazione e curvatura dei fasci sono ottenuti tramite magneti sia di tipo convenzionale che a superconduttori.

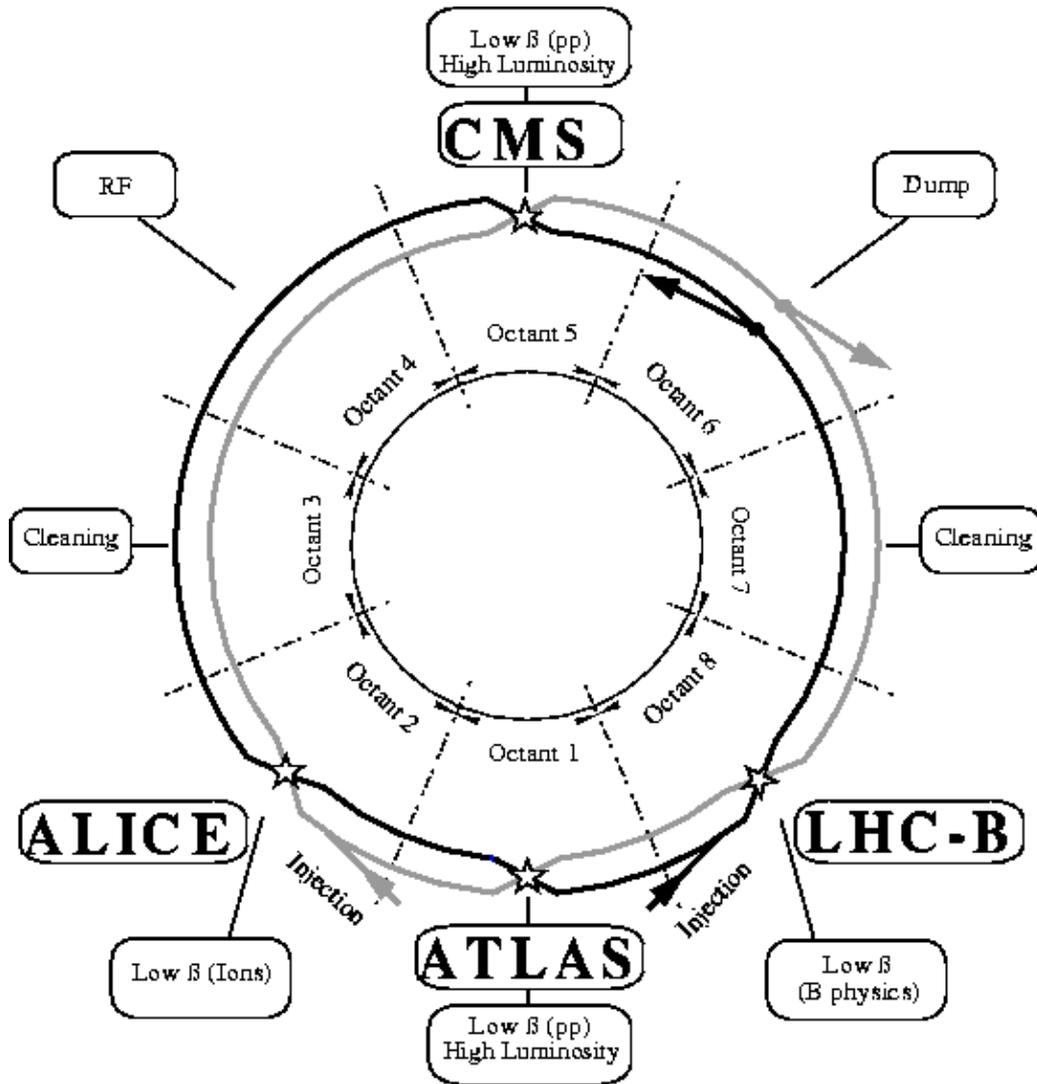


Figura 1: Struttura dell'acceleratore LHC

1.2 Il sistema di rivelatori di CMS

CMS è stato progettato per identificare e misurare con precisione muoni, elettroni e fotoni prodotti nelle collisioni dei fasci ad alta luminosità, ma in grado di adattarsi bene anche alla bassa luminosità che caratterizzerà il primo periodo di funzionamento. Il corpo centrale cilindrico (*barrel*) del rivelatore è costituito da 5 dischi affiancati ed è chiuso alle estremità da due tappi (*endcaps*) onde rendere il sistema il più ermetico possibile. La struttura principale è costituita dal magnete (un solenoide superconduttore) e dai suoi anelli di ritorno; essa funge anche da supporto per i diversi rivelatori, pensati in modo da fornire le migliori prestazioni ottimizzando lo spazio disponibile. Procedendo dall'interno verso l'esterno si incontrano: il rivelatore centrale di traccia, il calorimetro elettromagnetico, il calorimetro adronico e il sistema muonico.

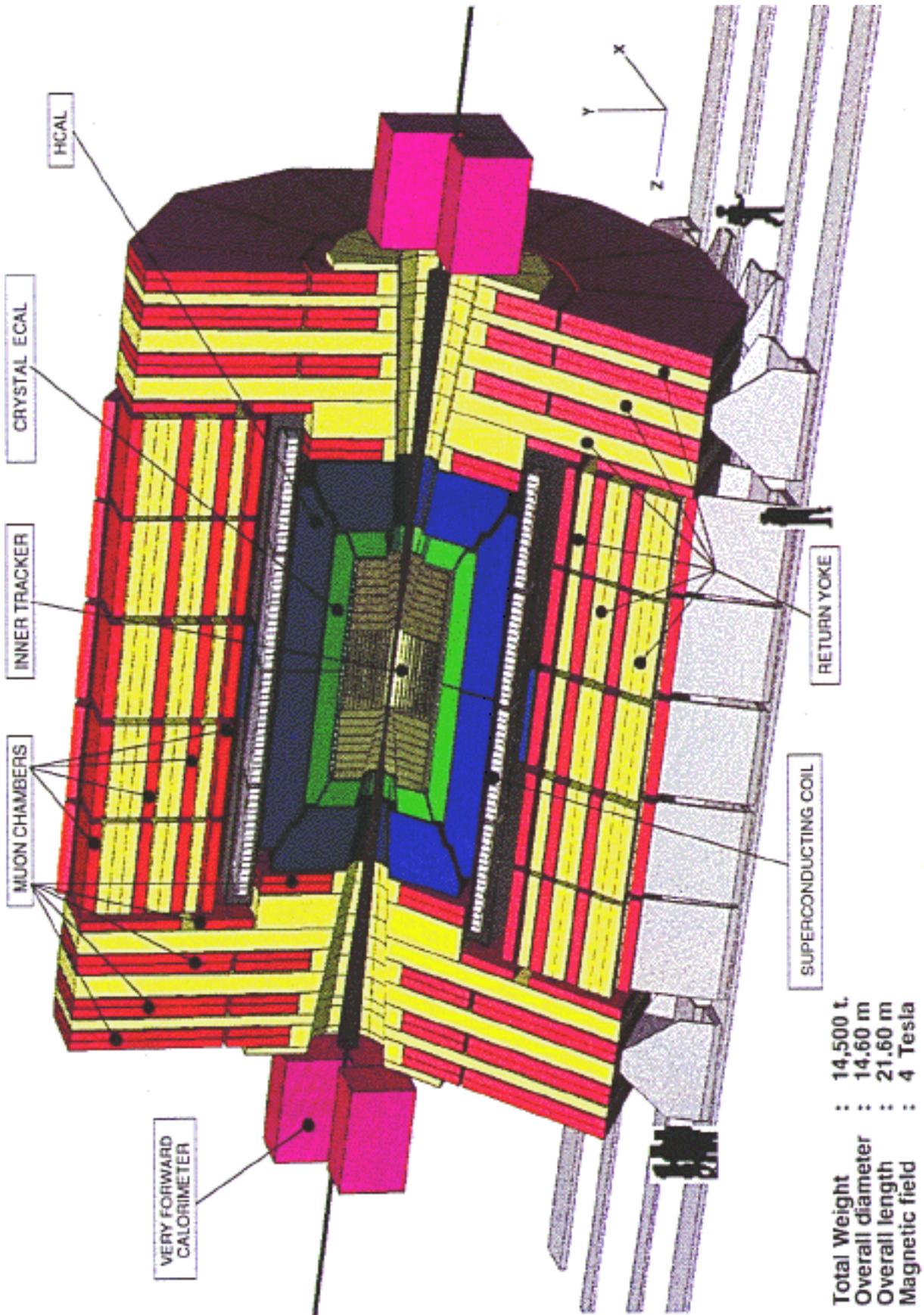


Figura 2: Vista tridimensionale del rivelatore CMS

Il rivelatore centrale (*tracker*) ha il compito di ricostruire con la massima efficienza le singole tracce con grande momento trasverso. E' costituito da due tipi di dispositivi al silicio: *pixel* e *microstrip*. Data la sua posizione molto prossima all'incrocio dei fasci, questa è una delle parti più delicate del sistema; essa deve infatti sopportare la radiazione prodotta dalle collisioni, garantendo contemporaneamente la massima affidabilità nel tempo e la migliore risoluzione spaziale con l'impiego della minor quantità possibile di materiale, in modo da evitare interazioni secondarie che degraderebbero le informazioni successive.

I due sistemi calorimetrici sono posti tra il rivelatore centrale e il magnete; il loro compito è quello di fornire una stima dell'energia elettromagnetica e degli adroni liberati dalla reazione. Il calorimetro elettromagnetico (ECAL) è formato da barre di scintillatore; per ottenere una buona risoluzione energetica sono stati scelti cristalli di PbWO_4 . Il calorimetro adronico (HCAL) è un'alternanza di elementi attivi (piastrelle di scintillatore plastico) e di materiale assorbitore (in questo caso rame, scelto perché è un metallo non ferromagnetico e caratterizzato da una lunghezza di interazione contenuta). Per migliorare la misura dell'energia trasversa e riconoscere i *jets* di particelle prodotte in avanti, due calorimetri adronici sono stati posti anche nella parte avanti-indietro (*endcaps*).

Il rivelatore di particelle μ si trova all'esterno del magnete ed è composto da quattro diverse sezioni, inserite tra gli anelli di ritorno del magnete stesso nel *barrel* e nei due *endcaps*. Oltre che da supporto, gli anelli di ferro fungono anche da "filtri", impedendo possibili correlazioni tra una sezione e l'altra. Il sistema muonico deve svolgere tre compiti: identificare le particelle μ , misurarne il momento e funzionare da *trigger*. Per ogni zona è stato scelto il tipo di sistema più adatto: negli *endcaps*, dove il campo magnetico è intenso e non uniforme e il *rate* di eventi piuttosto alto, vengono usati Cathode Strip Chambers (CSC) e Resistive Plate Chambers (RPC); nel *barrel* invece, dove il campo magnetico è più modesto e il *rate* basso (10 Hz/cm^2), sono previsti due piani di RPC tra i quali sono inserite le camere, composte da tre *SuperLayer* di tubi a deriva (DT) nelle due sezioni più interne e da due in quelle esterne.

1.3 Rivelazione delle particelle μ con camere a deriva

Le particelle μ sono leptoni con massa $m = 0.1057 \text{ GeV}/c^2$ (circa 200 volte quella dell'elettrone) e carica elementare, che decadono debolmente in elettroni/positroni e neutrini con un tempo di vita media $\tau = 2.197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$; vivono dunque abbastanza a lungo per essere rivelati anche a grandi distanze dal luogo di produzione. I muoni, essendo dotati di carica, nell'attraversare uno strato di materiale interagiscono elettromagneticamente con gli atomi che lo compongono e possono dare origine a tre processi diversi: ionizzazione, emissione di radiazione Cherenkov e radiazione di transizione. Se il mezzo attraversato è di tipo gassoso, il fenomeno più probabile è

l'interazione coulombiana, che si manifesta con l'eccitazione o la ionizzazione degli atomi del mezzo a spese dell'energia della particella incidente. Una stima della perdita di energia che questa subisce per unità di materiale attraversato è data dalla legge di Bethe-Bloch:

$$\frac{dE}{dx} = -4\pi N r^2 m c^2 \frac{Z\rho}{A} \left(\frac{z}{\beta}\right)^2 \left[\ln\left(\frac{2m\gamma^2\beta^2 c^2}{I}\right) - \beta^2 \right]$$

dove N è il numero di Avogadro; m ed r sono rispettivamente massa e raggio classico dell'elettrone; Z, A e ρ numero atomico, numero di massa e densità del materiale attraversato; z è il numero di cariche elementari della particella incidente; β e γ dipendono dalla velocità della particella incidente, I è il potenziale di ionizzazione efficace. Nella formula si può riconoscere un primo fattore dato da costanti universali; un secondo termine dipendente dal mezzo attraversato; infine una terza componente che tiene conto sostanzialmente della velocità della particella incidente. L'energia depositata risulta pertanto indipendente dal tipo di particella incidente (un'analisi limitata a questo tipo di fenomeno è insufficiente per identificare il tipo di particella; i dati raccolti possono eventualmente essere integrati con altre informazioni quali, ad esempio, il comportamento in presenza di campi magnetici).

Essendo i muoni particelle molto penetranti, l'energia persa è principalmente dovuta a fenomeni di ionizzazione del mezzo attraversato. Localizzando le cariche libere così prodotte si può ricostruire la traccia lasciata dal passaggio della particella.

Un tipico rivelatore che sfrutta questo tipo di fenomeno è il contatore proporzionale: esso è costituito da un conduttore (catodo), che per ora considereremo di forma cilindrica, nel cui asse è tenuto un filo (anodo); tra i due viene applicata una differenza di potenziale la cui polarità è scelta in modo che il filo risulti positivo.

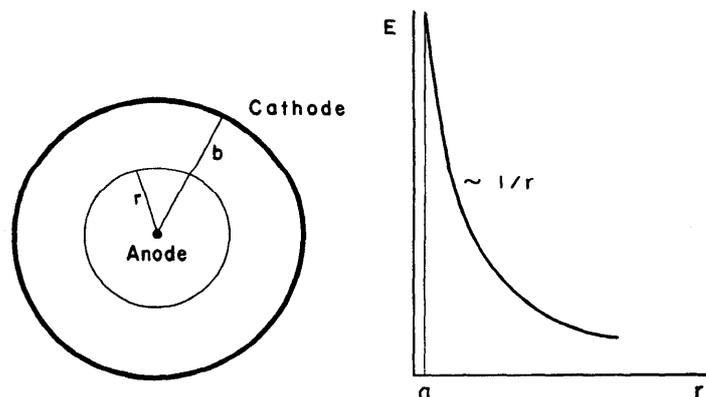


Figura 3: Schematizzazione di un contatore proporzionale e grafico del campo elettrico

Il tutto è paragonabile ad un condensatore cilindrico e lo spazio solitamente riservato al dielettrico è riempito di gas, il cui compito è quello di produrre coppie ione-elettrone al passaggio di una particella. Se a e b sono rispettivamente i raggi del filo e del cilindro e V_0 la tensione applicata, il campo elettrico E all'interno del dispositivo ad una distanza r dall'asse è dato da:

$$E(r) = \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{1}{r}$$

Quando al passaggio di una particella sono generate delle coppie (ionizzazione primaria), il campo elettrico le separa, facendo migrare gli ioni positivi verso il catodo e gli elettroni verso l'anodo. Se si dispone di un campo elettrico sufficientemente elevato, un elettrone primario può acquistare abbastanza energia per produrre a sua volta nuove coppie (ionizzazione secondaria), innescando l'effetto valanga. Il segnale originario viene in tal modo amplificato.

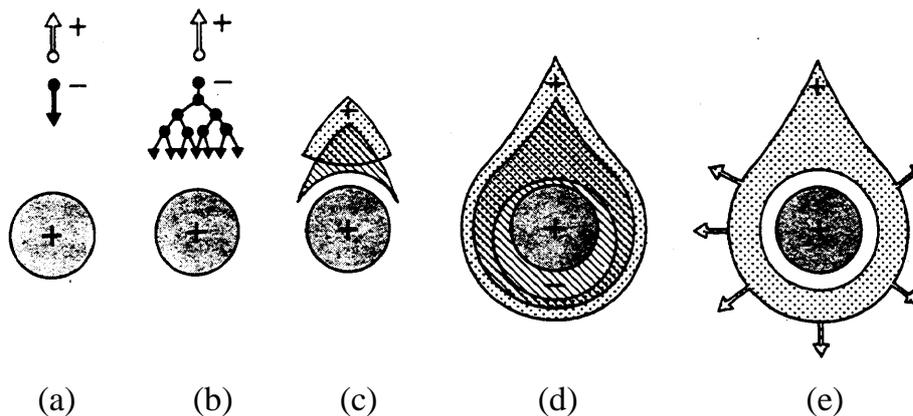


Figura 4: Sviluppo di una valanga

- (a) Un elettrone primario si muove verso l'anodo.
- (b) L'elettrone acquista energia cinetica nel campo elettrico e ionizza ulteriori atomi; inizia la moltiplicazione.
- (c) Ioni ed elettroni migrano separatamente.
- (d) La nuvola di elettroni si sposta verso il filo e lo circonda.
- (e) Gli elettroni vengono raccolti dal filo; la nuvola di ioni si allontana verso il catodo.

Analizzando la risposta del dispositivo al variare della tensione applicata, si possono distinguere diversi comportamenti a seconda dei fenomeni che si verificano: nel caso di tensioni basse il campo elettrico è insufficiente a separare le coppie ione-elettrone e predomina il fenomeno della ricombinazione; aumentando la tensione V_0 arriviamo nelle condizioni delle camere a ionizzazione, in cui la carica raccolta all'anodo è prodotta dalla ionizzazione primaria. Alla tensione di soglia V_T si innescano i fenomeni di moltiplicazione e si possono distinguere diversi regimi di amplificazione: se la tensione non è molto superiore a quella di soglia, ci troviamo nella zona di regime proporzionale, in cui la carica raccolta è appunto proporzionale a quella prodotta per ionizzazione primaria secondo un fattore che dipende dal campo elettrico. Aumentando ulteriormente la tensione si arriva al regime di proporzionalità limitata e poi di *streamer*, dove gli effetti di carica spaziale sono rilevanti e il segnale inizia a saturare. Infine, quando le valanghe si verificano in ogni parte del dispositivo, il segnale è completamente saturato e indipendente dalla ionizzazione primaria: ci troviamo nel regime di Geiger Müller, oltre il quale si verificano scariche.

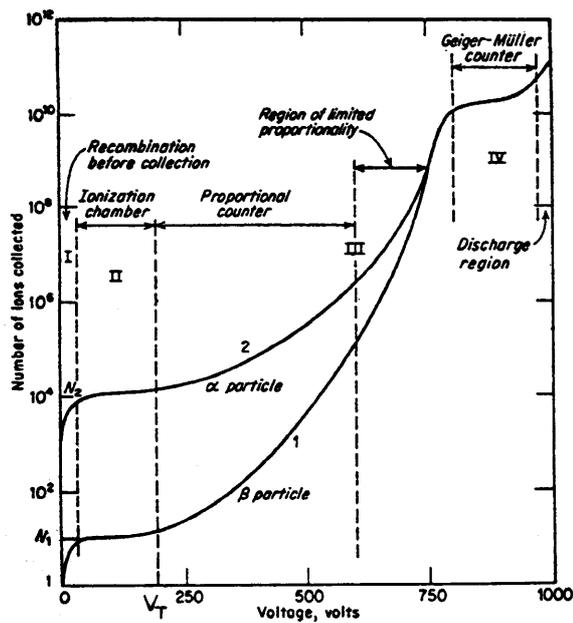


Figura 5: Caratteristica guadagno-tensione a diversi regimi di amplificazione

L'ampiezza V del segnale raccolto all'anodo dipende dalla capacità C del tubo:

$$V = -\frac{Q}{C}$$

ed è sostanzialmente dovuta alla deriva degli ioni secondari prodotti vicino al filo; la sua durata invece dipende dalla resistenza con cui la capacità viene scaricata a massa, in pratica la resistenza d'ingresso del dispositivo di lettura

$$\tau = RC$$

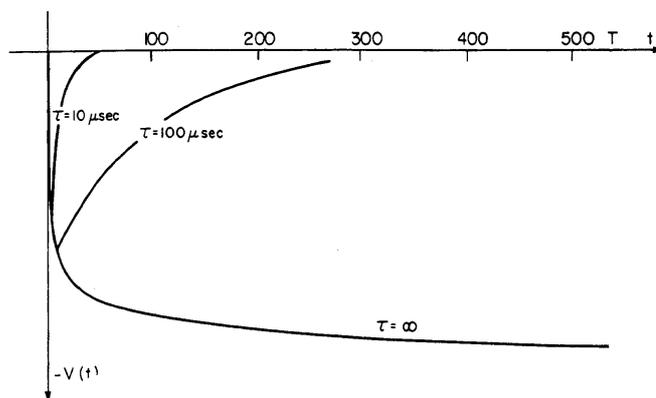


Figura 6: Sviluppo temporale del segnale in tensione in un contatore proporzionale

Di fondamentale importanza, in questo tipo di rivelatore, è la possibilità di stimare la distanza tra l'anodo e la traiettoria della particella, misurando il tempo di deriva delle cariche prendendo come *start* un segnale esterno e come *stop* l'arrivo delle cariche

all'anodo. Un altro modo per ricostruire la traccia lasciata dalla particella ionizzante è quello di usare la tecnica del *mean-timer*: a ciascun tubo a deriva è associato un registro di scorrimento, in cui si muove un bit in base ad un determinato periodo di *clock*; la lunghezza T_{max} di tale registro è pari al tempo massimo di deriva degli elettroni all'interno dei tubi. Quando il segnale arriva al filo dell'anodo, il bit viene attivato e comincia a spostarsi lungo un registro; dopo un tempo T_{max} dal passaggio del muone, i bit risultano allineati e tale configurazione permette di ricavare la traiettoria percorsa.

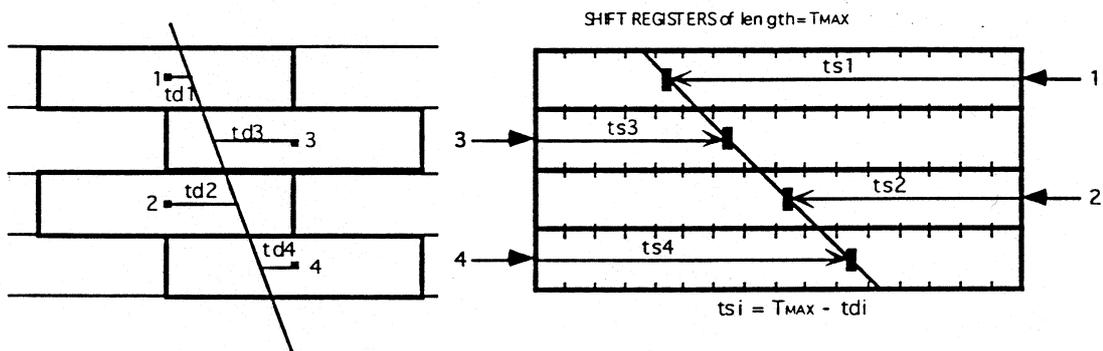


Figura 7: Ricostruzione della traccia con la tecnica del *mean-timer*

1.4 I tubi a deriva di CMS

I *SuperLayer* delle camere a deriva di CMS sono costituiti da 4 piani di celle sovrapposte distanziati da una struttura rigida a nido d'ape (*honeycomb*). Per semplificarne la costruzione vengono usate delle lastre di alluminio sovrapposte, equispaziate da barre dello stesso materiale con sezione ad I; così facendo si suddivide il volume disponibile in una struttura regolare composta da tante celle elementari di forma rettangolare, sfalsate di una semicella tra un piano e l'altro in modo da risolvere l'indeterminazione tra destra e sinistra tipica dei tubi a drift. L'anodo è costituito da un filo in acciaio teso al centro di ogni tubo.

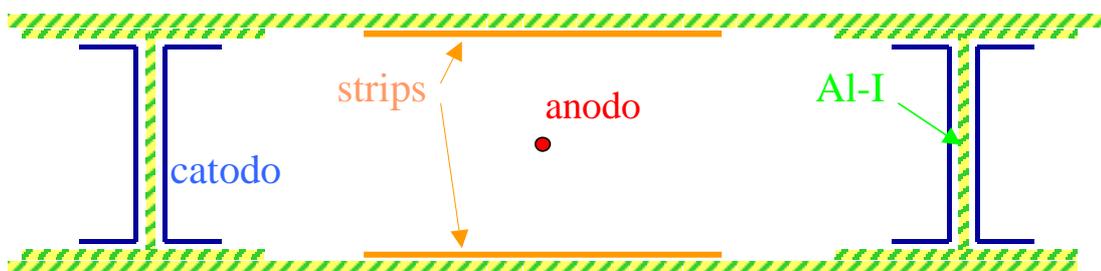


Figura 8: Schema di una cella elementare

La tabella che segue illustra le caratteristiche geometriche di una cella:

larghezza	42 mm
altezza	13.5 mm
lunghezza	2 ÷ 3 m
diametro anodo	50 μm

I catodi sono costituiti da *strip* poste sulle superfici interne delle barre a I; *strip* di alluminio sono incollate anche al centro delle altre due superfici laterali dei tubi. Polarizzando opportunamente *strip* e anodo è possibile modellare il campo elettrico all'interno di ogni cella così costruita: ne risulterà un campo centrale in prossimità dell'anodo, dove il gradiente accentuato favorisce la produzione di valanghe solo molto vicino al filo, e un campo di intensità più o meno costante nel resto del volume, in cui deve dominare il fenomeno della deriva. Le tensioni di polarizzazione previste sono:

<i>strip</i> catodiche	-1200 V
<i>strip</i> centrali	+1800 V
filo	+3600 V
struttura in Al	a massa

L'uniformità del campo elettrico è indispensabile per ottenere una buona risoluzione spaziale; infatti, come già osservato, è possibile ricostruire la posizione della traccia lasciata dal passaggio di una particella a partire dal tempo di deriva degli elettroni e dalla loro velocità di deriva v_D ; il valore di quest'ultima è direttamente proporzionale al valore del campo elettrico stesso, per cui se t_0 è lo *start* esterno e t_1 è determinato dall'arrivo delle cariche all'anodo, la distanza d tra l'anodo e la traccia per E uniforme (e quindi v_D costante) è data da

$$d = \int_{t_0}^{t_1} v_D(E) dt = v_D(t_1 - t_0) = v_D \Delta t$$

La scelta del gas influenza le prestazioni del dispositivo sia per quanto riguarda il numero di ionizzazioni prodotte, e quindi l'ampiezza del segnale ottenibile, sia per la velocità di deriva. Normalmente viene usata una miscela composta da un gas nobile e da uno poliatomico, ciascuno dei quali contribuisce alla ionizzazione totale proporzionalmente alla sua percentuale. Come gas principale è stato scelto l'argon, in grado di generare un buon numero di coppie per unità di spessore (circa 100 cm^{-1} per una *minimum ionizing particle* a pressione atmosferica), cui è stato aggiunto come *quencher* dell'anidride carbonica. Scegliendo questo gas anziché uno di tipo organico (ad esempio il metano) si evitano tutti gli inconvenienti dovuti all'invecchiamento sotto radiazione. Inoltre i due gas che costituiscono la miscela, non essendo infiammabili, non necessitano di particolari precauzioni per la sicurezza del sistema. Il rapporto 85:15 della miscela Ar-CO₂ è stato scelto, dopo varie prove, perché presenta un buon *plateau* nella curva $E-v_D$: al di sopra di un certo valore di soglia del campo

elettrico, infatti, la velocità di deriva rimane praticamente costante raggiungendo un valore di saturazione.

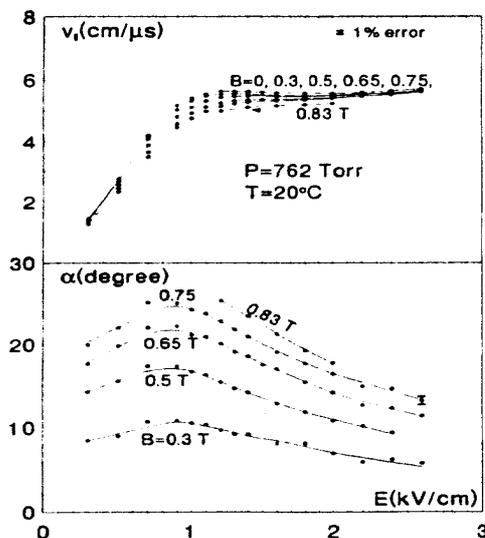


Figura 9: Curva di plateau e angolo di Lorenz per la miscela Ar-CO₂ 85:15

Tale miscela garantisce inoltre una diffusione limitata e un piccolo angolo di Lorenz (ricordiamo che le camere sono soggette a campi magnetici, anche se non molto intensi). La velocità di deriva tipica di questa miscela è di 55 $\mu\text{m}/\text{ns}$ perciò, considerato che la larghezza di mezza cella è di 21mm, il tempo massimo di deriva è di 400 ns. I guadagni che si ottengono in queste condizioni di lavoro (50 K \div 100 K) sono bassi, ma in questo modo si previene il degrado del dispositivo per lunghi periodi di funzionamento. Il segnale che viene indotto all'anodo e che deve essere elaborato dall'elettronica di lettura varia nell'intervallo che va dalla decina di fC fino a circa i pC.

Bibliografia:

F. Gonella, *Studio di una camera a deriva e definizione dell'elettronica di lettura*, tesi di laurea di F. Gonella, a.a. 1995-96

K. Kleinknecht, *Detectors for particle radiation*, 1987

C. Voci, *Metodi sperimentali della fisica subnucleare*, dispensa, a.a. 1997-98

Barrel drift tubes, note f.g. CMSmu 1999

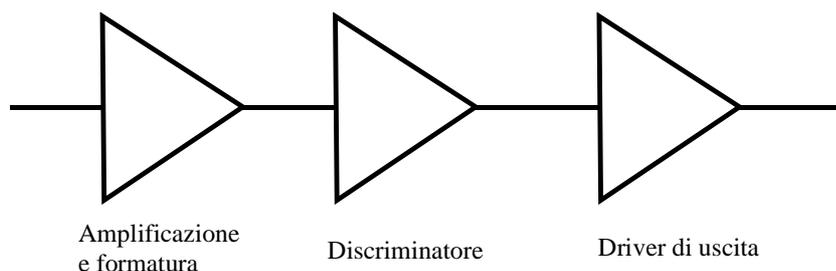
Capitolo 2

L'elettronica di *frontend*: il *chip* MAD

2.1 Caratteristiche dell'elettronica di *frontend*

Il compito di questo apparato è determinare, con grande precisione, l'istante di arrivo di un segnale prodotto dal passaggio di una particella ionizzante e far pervenire tale informazione al successivo sistema di elaborazione.

Un esempio di sistema adatto per i tubi a deriva può essere sintetizzato nel seguente schema di base:



Si tratta di una catena che preleva il segnale di corrente prodotto sul filo del tubo, lo amplifica, lo confronta con un livello di soglia e lo trasmette al sistema di *trigger* e di acquisizione.

Le caratteristiche che tale sistema deve possedere sono determinate dal tipo di segnali provenienti dai tubi a deriva: si tratta di impulsi di ampiezza variabile e con tempi di salita non nulli. Innanzitutto lo stadio amplificatore deve avere il minimo rumore ed un buon guadagno, al fine di massimizzare l'efficienza del rivelatore per piccoli segnali. Per le stesse ragioni e per ridurre la dispersione dei tempi di risposta causata dalle diverse ampiezze e tempi di salita, il discriminatore deve poter operare con valori di soglia molto bassi e quindi possedere un basso *offset* di ingresso e fornire una risposta molto rapida e indipendente dall'ampiezza.

Dato il grande numero di questi oggetti che dovranno essere montati in una camera, occorre ridurre al minimo il numero delle tarature necessarie e quindi i dispositivi utilizzati devono presentare una buona uniformità nel guadagno e nei valori di soglia. Inoltre, al fine di ridurre rumore e *crosstalk*, è necessario che le connessioni con il rivelatore siano le più corte possibili, perciò la catena deve essere posizionata all'interno di ogni *superlayer*, a ridosso dei tubi a deriva e quindi all'interno del volume del gas. Questo comporta che lo spazio occupato dall'elettronica dovrà essere

minimo, in modo da non ridurre il volume attivo del rivelatore; di qui la necessità di massimizzare l'integrazione delle funzioni. A tutte queste caratteristiche occorre aggiungere un basso consumo di potenza, altrimenti il numero elevato di dispositivi che equipaggiano ogni camera potrebbe far aumentare la temperatura interna e richiedere l'impiego di sistemi di raffreddamento complicati.

Sulla base di queste considerazioni è stato intrapreso a Padova lo sviluppo di un circuito integrato *full custom* che riassume in sé tutta la catena elettronica di base e in più prevedesse l'integrazione di ulteriori funzionalità. Di questo ASIC sono state realizzate alcune serie di prototipi per verificare innanzitutto che la tecnologia impiegata consentisse questa realizzazione. Con una versione di questo ASIC, prodotta in un numero sufficiente di esemplari, è stato equipaggiato un *SuperLayer* di dimensioni reali, sottoposto poi con successo a diverse prove sia in laboratorio che su fascio di test. Sulla base di questo prototipo è stato realizzato il disegno di un circuito integrato denominato MAD, che verrà impiegato nel rivelatore.

2.2 La catena elettronica del MAD

Ogni MAD contiene 4 canali indipendenti, progettati e disposti in modo da minimizzare il *crosstalk*. Per ogni canale si possono distinguere due sezioni: una di ingresso e amplificazione, costituita da preamplificatore (PA), formatore (SHAPER) con *baseline restorer* (BLR) e discriminatore (DISCR), e una di uscita, composta da una memoria (LATCH), un monostabile (ONE SHOT) e uno stadio che pilota l'uscita (LVDS DRIV). Queste due sezioni sono alimentate separatamente per evitare interferenze tra loro. La versione finale qui descritta è un ASIC in tecnologia BiCMOS 0.8 μ della AMS (Austria Mikro Systeme) con dimensioni del *die* di 2.5×2.5 mm² e incapsulato in un contenitore di tipo TQFP 44.

2.2.1 Sezione di amplificazione

Il primo stadio della catena di ogni canale è un preamplificatore di carica con un singolo stadio di guadagno, le cui principali caratteristiche sono il basso rumore, un prodotto di GBW (*gain band width*) che, nelle simulazioni, risulta essere di 2 GHz, una costante di tempo di *feedback* di 30 ns e una dissipazione totale di 4 mW.

Successivamente il segnale viene ulteriormente amplificato da un formatore molto semplice costituito da un integratore a basso guadagno con una piccola costante di tempo; il suo ingresso non invertente è connesso al preamplificatore, mentre quello invertente permette di inserire questo stadio all'interno del *loop* di *feedback* di un OTA (*operational transconductor amplifier*) a basso *offset*. Questa combinazione implementa un *time invariant baseline restorer*, che funziona come filtro passa alto per la gamma dei segnali; inoltre stabilizza la tensione di uscita del formatore forzandola, in assenza di segnale, ad un livello pari alla tensione VREF, impostabile dall'esterno e comune a tutti i quattro canali.

PIN	DESCRIZIONE	An/Dig	In/Out
GNA	Massa analogica		
GND	Massa digitale		
VCC	Alimentazione +5 V		
VDD	Alimentazione +2.5 V		
BYP	Tensione di riferimento interna	A	O
VTH	Tensione di soglia	A	I
VREF	Tensione di riferimento di <i>baseline</i>	A	I
W_CTRL	Controllo larghezza del segnale d'uscita	A	I
<T>	Sonda di temperatura	A	O
T_OUT	Sonda di temperatura abilitabile	A	O
T_EN	Abilitazione di T_OUT	D	I
In(1-4)	Ingressi dei 4 canali	A	I
A_EN(1-4)	Abilitazioni degli ingressi	D	I
D_ENR(1-2)	Abilitazioni delle due uscite di destra	Differenz.	I
D_ENL(1-2)	Abilitazioni delle due uscite di sinistra	Differenz.	I
OUTN(1-4)	Uscite differenziali dei 4 canali	Differenz.	O
OUTP(1-4)			

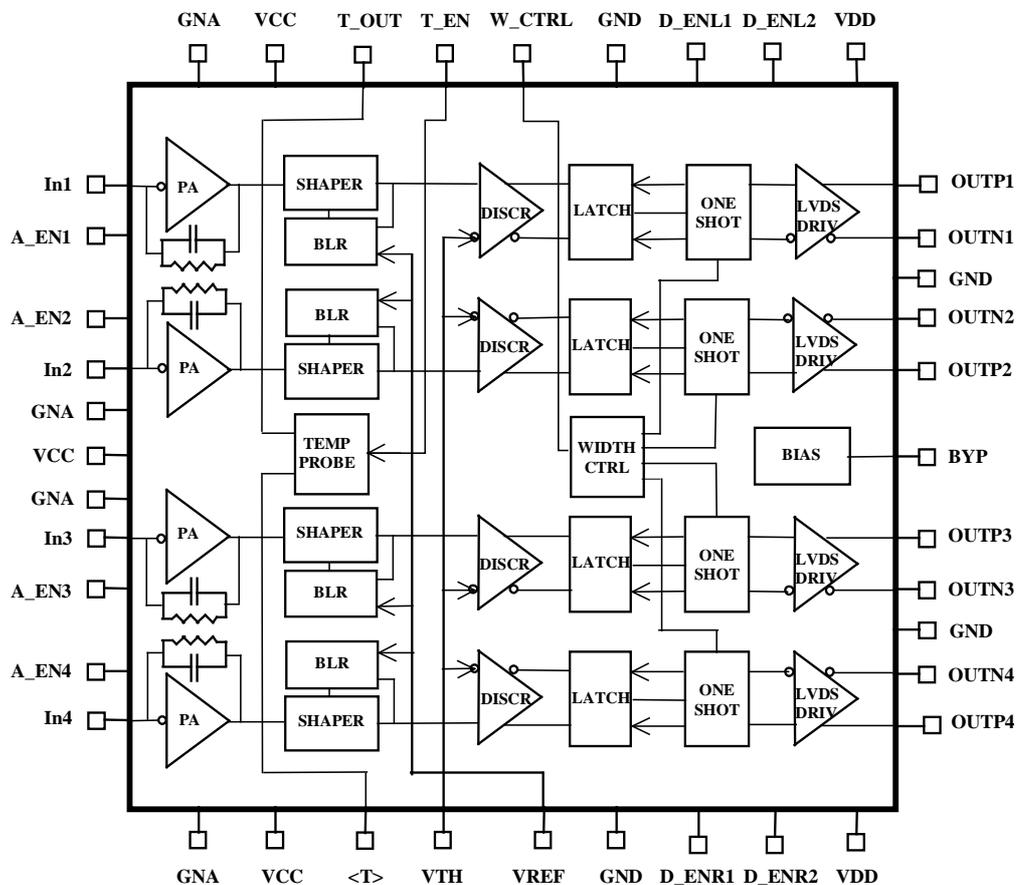


Figura 10: Schema a blocchi del MAD

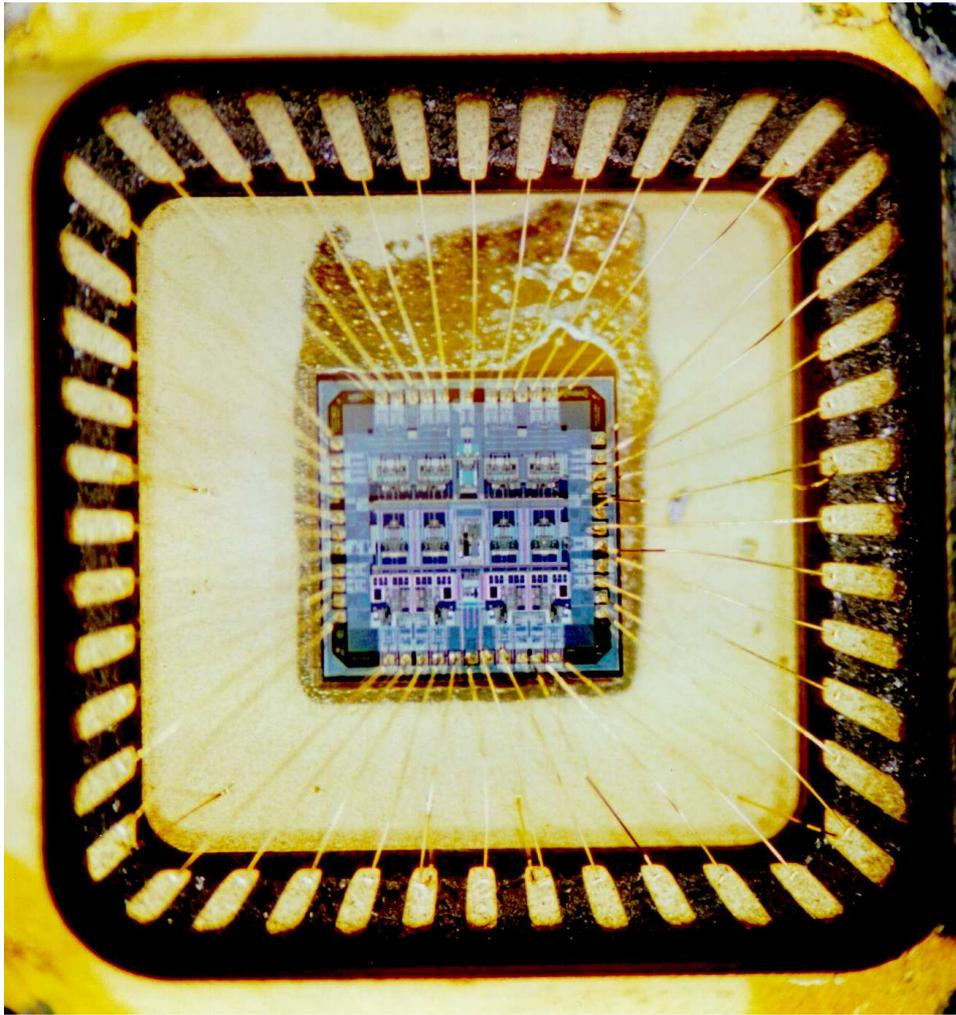


Figura 11: Microfotografia del chip

Analizzando lo sviluppo di un segnale lungo questo primo tratto, si trova che un impulso di corrente negativa applicato all'ingresso del preamplificatore produce, all'uscita del formatore, un segnale positivo sovrapposto al livello di base V_{REF} e caratterizzato da una ampiezza e una durata dipendenti dalla carica. Il progetto prevede che il rapporto segnale/carica sia di 3.3 mV/fC , che consente di amplificare segnali di 800 fC prima di entrare in saturazione.

L'uscita del formatore è connessa direttamente all'ingresso non invertente di un discriminatore differenziale rapido a due stadi di guadagno; l'altro ingresso è collegato ad una tensione di soglia V_{TH} comune anch'essa a tutti i canali e ugualmente fornita dall'esterno. Una isteresi di $\pm 1 \text{ mV}$ consente di evitare autooscillazioni e di rendere più rapida la commutazione in presenza di segnali lenti. L'uscita differenziale ha un'ampiezza di $\pm 0.5 \text{ V}$ ed il guadagno totale (in base alle simulazioni) è dell'ordine di 200.

Il secondo stadio del discriminatore contiene una memoria che consente di fissare l'uscita del discriminatore in un determinato istante.

Tutti questi stadi condividono un'unica alimentazione $VCC = 5\text{ V}$ per circa 12 mW di potenza dissipata.

2.2.2 Sezione di uscita

Il compito di questa parte della catena è quello di prendere il segnale discriminato, renderlo di ampiezza e durata indipendenti dalla carica in ingresso e inviarlo al sistema di *trigger* e di acquisizione.

L'uscita della memoria del discriminatore è ulteriormente amplificata da uno stadio differenziale accoppiato capacitivamente ad un multivibratore monostabile che, quando triggerato, produce un impulso di durata inversamente proporzionale alla corrente che scorre attraverso il *pin* W_CTRL , comune ai quattro canali; l'intensità di tale corrente è programmabile dall'esterno con una resistenza verso massa. L'uscita dell'*one shot*, quando attiva, memorizza lo stato del comparatore nel *latch*, producendo in questo modo un impulso non retriggerabile.

Le stesse linee che controllano la memoria vanno all'ingresso del *driver* d'uscita, formato da uno stadio differenziale in grado di pilotare a livelli di tensione compatibili con lo standard LVDS un cavo a coppie avvolte (adattato per una linea di 100 Ω) con tempi di salita e di discesa dei segnali al di sotto di 2.5 ns. Il *driver* d'uscita contiene già integrate le resistenze per adattare l'impedenza a questo tipo di cavi.

La tensione di alimentazione di questa sezione è la più bassa possibile, $VDD = 2.5\text{ V}$, allo scopo di limitare la potenza dissipata, che risulta essere circa 12 mW, incluso il monostabile e le uscite terminate.

2.2.3 Abilitazioni

Nel MAD è previsto di poter abilitare o disabilitare il funzionamento dei canali dall'esterno del *chip*: a tal fine 4 *pin* sono destinati alla mascheratura degli ingressi, attivabile per ogni singolo canale con un livello logico TTL alto, come riportato nella seguente tabella:

A_EN(1-4)	In(1-4)
1	Disabilitato
0	Abilitato

Questo tipo di funzione è stata prevista per poter eventualmente escludere dal sistema di *trigger* e di acquisizione quei canali che risultassero rumorosi e che perciò potrebbero creare un *rate* di fondo troppo elevato. L'inibizione del segnale è fatta sul formatore per ridurre al minimo gli accoppiamenti con i canali adiacenti. Il ritorno al funzionamento normale dopo la disabilitazione avviene con un ritardo di circa 10 μs dal comando.

Le uscite possono invece essere mascherate a due a due pilotando i due ingressi differenziali $D_EN(R/L)$ con un segnale di $\pm 200 \div 300\text{ mV}$ entro un ampio *range* di

tensione di modo comune (è previsto di utilizzare un livello alto di 1.5-1.6 V e uno basso di 1.2-1.3 V); questo controllo agisce sullo stadio del monostabile in tempi rapidi, le uscite possono infatti essere abilitate/disabilitate in circa 30 ns.

D_EN(R/L)1	D_EN(R/L)2	OUT(1,2/3,4)
0	1	Disabilitate
1	0	Abilitate

Quest'ultimo tipo di abilitazione viene usata in unione al sistema di *test pulse* per simulare una singola traccia perpendicolare al rivelatore a distanza variabile dal filo.

2.2.4 Sensore di temperatura e polarizzazione

In ogni MAD, al centro del *die*, è integrata una sonda di temperatura, il cui funzionamento è basato sulla differenza di tensione base-emettitore di transistori uguali che funzionano con correnti di collettore diverse; il dispositivo è alimentato con una tensione di 5 V per una potenza dissipata di circa 1 mW.

Questo sensore fornisce una tensione proporzionale alla temperatura assoluta, secondo un fattore di conversione di 7.5 mV/°K, che è disponibile su due distinti piedini: il primo è sempre connesso e fornisce, all'uscita <T>, una tensione utilizzata per ottenere la temperatura media all'interno di un *superlayer*; il secondo è pilotato da uno stadio a guadagno unitario la cui uscita è disabilitabile tramite un segnale TTL compatibile (*pin* T_OUT con il relativo T_EN).

T_EN	T_OUT
1	Abilitata
0	Disabilitata

L'uscita T_OUT viene utilizzata per segnalare la temperatura più alta registrata in un *superlayer*: il *buffer* relativo è disegnato in modo da permettere al nodo di uscita di portarsi ad una tensione più alta di quella presente all'ingresso senza assorbire corrente. In questo modo è possibile collegare in parallelo più circuiti integrati e la tensione presente sul *pin* è quella del *chip* a temperatura maggiore. Se la tensione su questo nodo comune risultasse superiore a quella media <T>, disabilitando in successione le varie T_OUT è possibile individuare quale dei *chip* è a temperatura elevata e iniziare ulteriori procedure di controllo sul funzionamento.

Infine un generatore interno provvede alla polarizzazione dei vari stadi; questo circuito di *bias* controlla i generatori di corrente dell'intero *chip* e la tensione di alimentazione per la sezione dell'*one shot*. La tensione di riferimento di questo dispositivo è disponibile al piedino BYP per poter essere disaccoppiata con una capacità esterna verso massa.

2.3 Test di funzionamento

Una prima campionatura di MAD, composta da 8 prototipi in contenitore ceramico (MAD1-8), è arrivata agli inizi di novembre '99 ed è stata subito sottoposta a numerosi controlli, primo fra tutti una verifica visiva per accertare che il *bonding* fosse stato fatto correttamente, soprattutto per quanto riguarda la massa analogica che è collegata anche al *paddle* di supporto del *die*. È stata poi eseguita tutta una serie di verifiche di tipo statico e dinamico ed infine si è passati alla misura di tutte le caratteristiche dettagliate.

2.3.1 Apparato sperimentale:

Ognuno degli otto MAD a nostra disposizione è stato saldato su uno stampato appositamente preparato, inseribile su uno “zoccolo” formato da una serie di *pin* femmina saldati su di una basetta di prova predisposta per i vari tipi di misura. Il motivo per cui si utilizza uno stampato è quello di aggirare i problemi di capacità fra i *pin* adiacenti e di induttanza dei collegamenti di cui risentono gli zoccoli di prova. Questa precauzione è particolarmente indicata date le caratteristiche di rumore e *band width* di questo ASIC.

Sullo stampato, vicino ai piedini delle alimentazioni e della polarizzazione, sono stati saldati dei condensatori di disaccoppiamento da 100 nF, mentre in prossimità dei piedini GNA e GND sono stati praticati dei fori per collegare con un filo le piste di massa della faccia superiore con la massa diffusa sottostante per garantire un buon collegamento a minima induttanza.

Nell'immagine qui sotto è riportato il circuito stampato, progettato a Padova e realizzato al CERN, dove sono stati saldati i *chip* per il test.

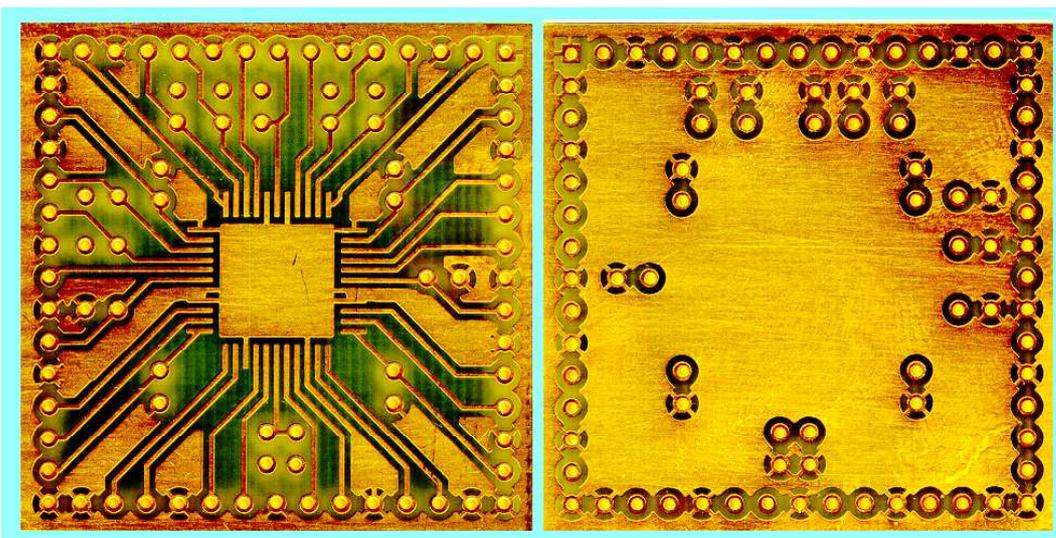


Figura 12: Foto delle due facce dello stampato

Tutte le tensioni di polarizzazione necessarie per il funzionamento e i dispositivi per il controllo delle varie funzioni sono stati montati in una scheda di prova, il cui schema circuitale è riportato di seguito assieme alla disposizione dei componenti

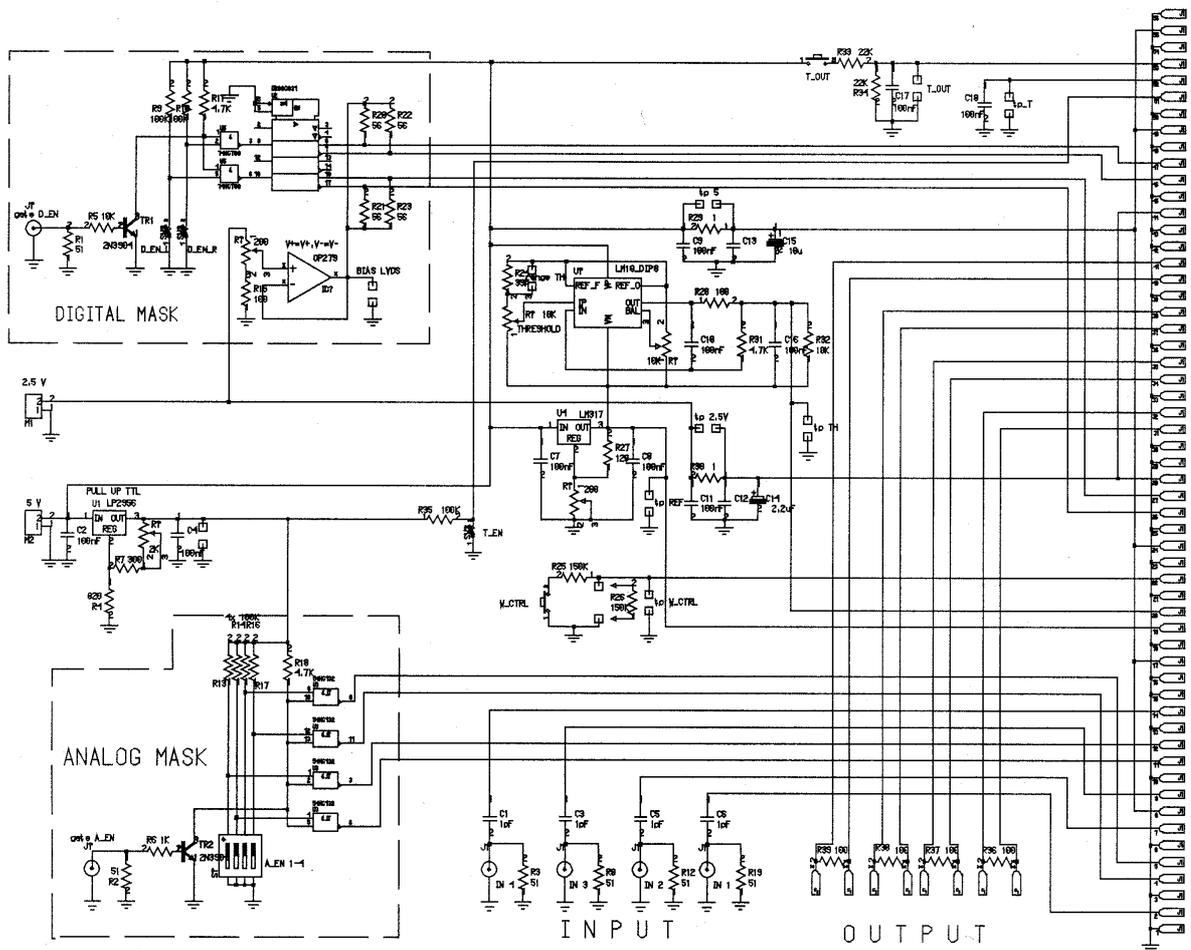
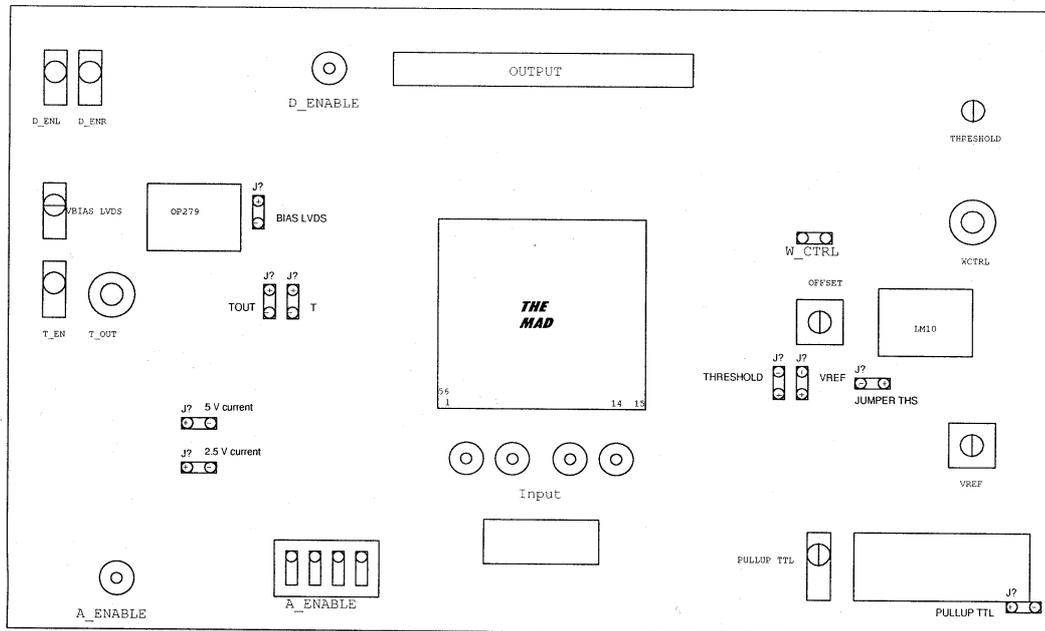


Figura 13: Disposizione dei componenti e schema circuitale della scheda di test

Ogni ingresso dell'integrato MAD è connesso, attraverso un condensatore da 1 pF, ad un connettore coassiale (uno per ogni ingresso) fornito di terminazione a 50 Ω. I *pin* delle uscite dei quattro canali sono collegati ad un connettore su cui può essere innestato un cavo a coppie avvolte oppure un terminatore costituito da semplici resistenze.

Le tensioni di alimentazione VCC = +5 V e VDD = +2.5 V sono fornite da un alimentatore stabilizzato a basso rumore costruito in laboratorio. Due resistenze da 1 Ω interposte tra l'alimentatore e i rispettivi piedini di alimentazione consentono di misurare le correnti ICC e IDD assorbite dal MAD dalle due diverse tensioni.

Le due tensioni VREF e VTH, la cui precisione e stabilità influiscono sulle prestazioni del MAD, sono state curate particolarmente: la VREF è ottenuta usando come regolatore di tensione l'integrato LM317 e, per le misure previste, è regolabile con un *trimmer* fra 1.5 e 3 V; la VTH è costruita a partire dalla VREF tramite un integrato LM10 e può essere variata agendo su un potenziometro multigiri fino a raggiungere il valore desiderato. Entrambe sono misurabili tramite *pin* esterni contigui e la "soglia efficace" Vthr, definita come

$$V_{thr} = V_{TH} - V_{REF},$$

può essere misurata direttamente tra due piedini.

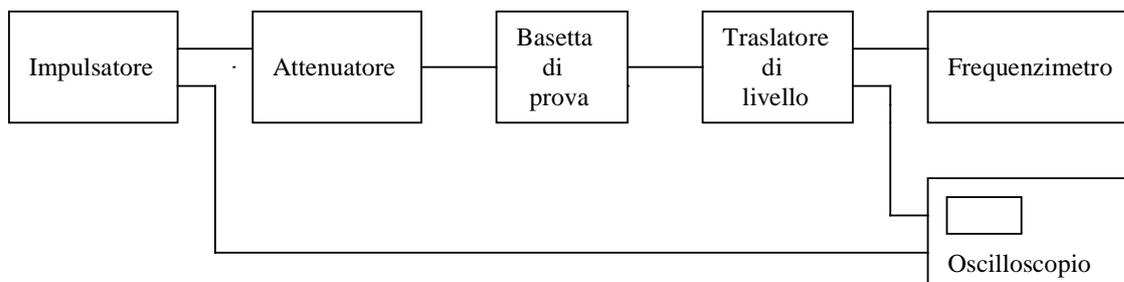
Altre due coppie di *pin* sono state previste per misurare le uscite di temperatura <T> e T_OUT; per quest'ultima è possibile verificare sia il funzionamento dell'abilitazione del *buffer* relativo, sia che quest'ultimo permetta alla tensione in uscita di assumere valori superiori a quello corrispondente alla temperatura del *chip*.

Per le mascherature dei quattro ingressi e delle due coppie di uscite, oltre agli interruttori sono previsti anche dei connettori coassiali, attraverso i quali è possibile agire sulle abilitazioni usando segnali provenienti da un impulsatore.

Infine, per controllare la variazione della larghezza del segnale in uscita, è possibile aumentare la corrente al piedino W_CTRL chiudendo con un pulsante il parallelo tra due resistenze, oppure inserendo una resistenza tra due *pin* collegati rispettivamente a W_CTRL e a massa.

Tutte le misure delle tensioni sono state effettuate utilizzando un tester digitale e un multimetro (hp 3478A multimeter).

Per analizzare il comportamento del MAD in presenza di stimoli in ingresso, oltre alla basetta di prova è stata predisposta la seguente catena di strumenti di misura:



L'impulsatore (hp 8131A 500 MHz *pulse generator*) genera un gradino in tensione che, differenziato dal condensatore da 1 pF, inietta in ingresso del preamplificatore del

MAD un impulso di corrente il cui integrale è una carica pari al prodotto della capacità per l'ampiezza del gradino. La tensione equivalente ad un segnale di 1 fC su una capacità di 1 pF è di 1 mV e non è ottenibile direttamente dal generatore di impulsi, la cui ampiezza può essere regolata tra 0.01 e 5 V; pertanto è stato necessario interporre tra quest'ultimo e gli ingressi della scheda un attenuatore (hp 355D *attenuator* 120 dB), regolabile a scatti di 10 dB.

Il segnale prodotto dall'impulsore è un'onda quadra, che inietta all'ingresso cariche positive o negative a seconda del fronte considerato; in questo caso sono analizzate solo le risposte dell'integrato ai fronti negativi, della stessa polarità di quelli generati dal rivelatore. La frequenza di tale segnale è regolata a 1 MHz mentre i fronti di salita e di discesa hanno durata inferiore al ns.

Le uscite LVDS del MAD sono trasformate in segnale di corrente secondo lo standard NIM da un traslatore di livello costruito in laboratorio. Il segnale così ottenuto è immesso in un frequenzimetro (RACAL-DANA 1990 *series universal systems counter*), che conta il numero di impulsi che gli giungono in un intervallo di tempo regolabile (*gate*) e ne fornisce la frequenza media di arrivo. Le uscite dell'impulsore e del MAD sono controllate anche "visivamente" attraverso un oscilloscopio (hp 54720A *oscilloscope*).

2.3.2 Verifiche statiche

Dopo essersi assicurati che le tensioni di polarizzazione corrispondessero a quelle fornite dalle specifiche di progetto, ciascuno stampato è stato inserito sullo zoccolo della basetta di prova e si è proceduto alla verifica dei vari parametri in condizioni di assenza di segnale in ingresso e a temperatura ambiente.

Sono state misurate le tensioni agli ingressi In(1-4), alle uscite OUP(1-4) e OUTN(1-4) e ai piedini BYP, <T> e T_OUT, verificando che la differenza tra queste ultime due uscite non superasse i 3 mV. Si è controllato inoltre che l'uscita T_OUT non vincolasse il nodo relativo; poi, agendo sull'apposito interruttore, si è anche verificato il funzionamento del relativo segnale di controllo.

Tutti i MAD a nostra disposizione hanno dato risultati compresi entro i valori minimi e massimi previsti dalle simulazioni e riassunti nella tabella seguente:

	MIN	MAX
In(1-4)	740 mV	780 mV
OUP(1-4)	970 mV	1050 mV
OUTN(1-4)	1350 mV	1450 mV
BYP	2.100 V	2.200 V
<T>	2.2 V	2.3 V
T_OUT	2.2 V	2.3 V
I_CC	8.5 mA	14.5 mA
I_DD	16 mA	24 mA

Tabella 1: Valori minimi e massimi previsti dalle simulazioni

2.3.3 Verifiche dinamiche

Innanzitutto si è proceduto con la verifica delle abilitazioni: utilizzando l'insieme di strumenti sopra descritto, si è generato un segnale dell'ordine del pC e, impulsando ogni ingresso di tutti gli otto MAD, si è verificato il funzionamento delle mascherature. Le mascherature A_EN(1-4) degli ingressi sono state provate sia singolarmente, agendo sugli appositi interruttori, sia tutte assieme, mandando un segnale esterno TTL nell'apposito connettore e verificando sull'oscilloscopio che tale azionamento non facesse commutare l'uscita. Lo stesso procedimento è stato eseguito per le mascherature D_EN(R/L) dei *driver* d'uscita.

Applicando un segnale in ingresso si è poi controllato che la larghezza di quello in uscita mutasse al variare della corrente attraverso il *pin* W_CTRL e, viceversa, che fissata la corrente la larghezza non variasse con l'ampiezza del segnale. Nelle stesse condizioni, usando un oscilloscopio con campionatura a 4 Gsample/s, sono stati valutati i tempi di salita (*rise-time*) e di discesa (*fall-time*) del segnale in uscita, misurati direttamente sulle uscite LVDS; entrambi sono risultati sotto i 2.5 ns, come richiesto. Anche in questa serie di verifiche tutti i *chip* a nostra disposizione sono risultati correttamente funzionanti.

2.4 Sensibilità e rumore

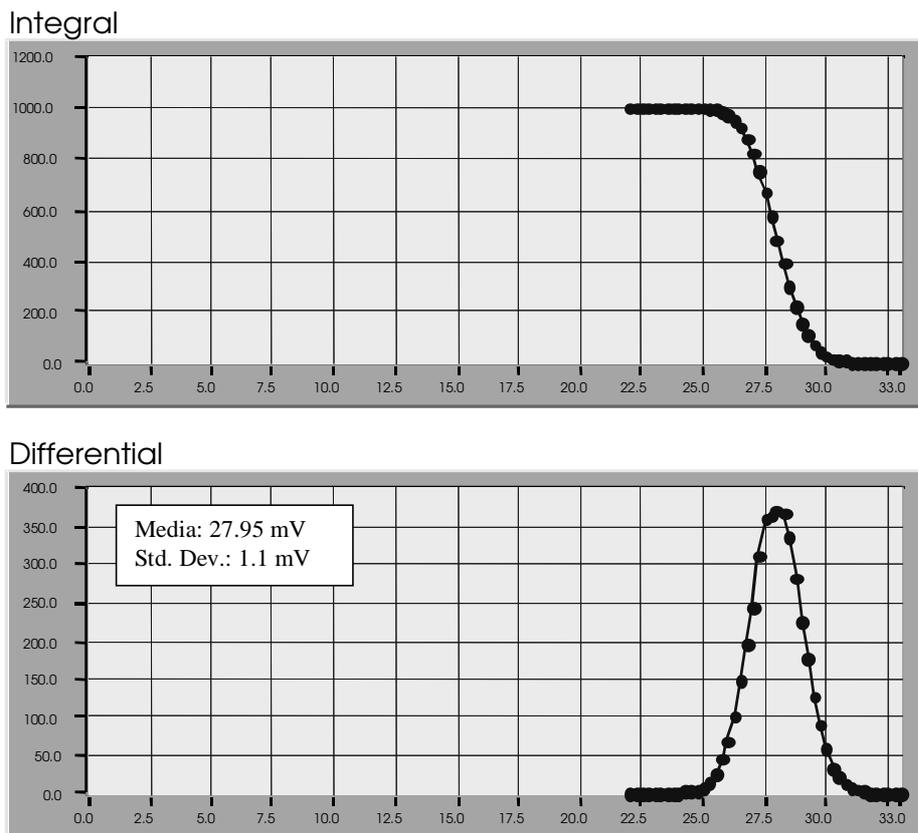
Una delle caratteristiche principali richieste al *chip* di *frontend* è quella di presentare la massima uniformità possibile per la corrispondenza fra la soglia in tensione e la carica in ingresso; tale esigenza deve essere soddisfatta non solo dai canali all'interno di uno stesso *chip*, ma anche da quelli di *chip* diversi perché la tensione di soglia è comune a tutti gli integrati di una camera. Il parametro che entra direttamente a determinare questa corrispondenza è la sensibilità, cioè il guadagno presentato dalla catena analogica. Inoltre poiché lo scopo del progetto è quello di poter rivelare cariche molto piccole, diventa significativo il contributo di indeterminazione dovuto all'*offset* del comparatore ed alla sua isteresi.

Condizioni di misura:

Poiché non è possibile accedere direttamente all'uscita del formatore, tutte le caratteristiche devono essere misurate tramite la statistica dei segnali di uscita. Così, per valutare l'uniformità della soglia, la sensibilità e il rumore di ogni canale, è necessario innanzitutto fissare ampiezza e frequenza dell'impulso in ingresso ed analizzare la frequenza in uscita al variare della tensione di soglia: in teoria si dovrebbe ottenere una curva a gradino con transizione in corrispondenza di una tensione di soglia pari all'ampiezza del segnale dopo il formatore (cioè dopo lo stadio amplificatore); nella realtà lo spigolo non risulta netto a causa delle fluttuazioni di ampiezza del segnale, provocate dal rumore introdotto dalla catena elettronica e dal

generatore di segnali (in piccola parte). Misurando quindi il numero di conteggi in funzione della soglia, si ottiene come risultato il grafico sotto illustrato.

Tracciando la curva della variazione del *rate* al variare della V_{TH} (rappresentata dal secondo grafico), si ottiene circa una gaussiana di larghezza pari al rumore e con l'ascissa del massimo corrispondente all'ampiezza media del segnale dopo lo *shaper*; regolando la soglia ad un tale valore, il *rate* d'uscita è uguale esattamente alla metà di quello in ingresso. Aumentando la tensione di soglia ci si sposta lungo la curva fino a quando in uscita si ottiene un *rate* corrispondente al 1‰ di quello in ingresso: in queste condizioni ci si trova ad una distanza dal valor medio pari a circa 3σ .



Le misure si svolgono dunque con le seguenti modalità: iniettando in ingresso una carica di 3 fC con una frequenza di 1 MHz, si fa variare la tensione di soglia V_{TH} fino ad ottenere in uscita un *rate* di 500 KHz; la tensione di soglia efficace V_{thr} , misurata in queste condizioni, è uguale all'ampiezza media del segnale dopo lo stadio di amplificazione. Ripetendo la stessa procedura per una carica di 9 fC, è possibile calcolare la sensibilità del canale impulsato nel seguente modo:

$$\text{sensibilità} = \frac{V_{thr}(9\text{fC}) - V_{thr}(3\text{fC})}{9 - 3} \left[\frac{\text{mV}}{\text{fC}} \right]$$

Il valore della sensibilità così ottenuto è indipendente dall'*offset* introdotto dall'OTA e dal comparatore, nonché dall'isteresi di quest'ultimo.

I dati raccolti, inoltre, costituiscono due campionature per valutare l'uniformità della soglia.

Come visto, se a parità di segnale in ingresso, si regola la soglia fino ad ottenere in uscita un *rate* di 1 KHz si può ricavare l'entità del rumore dell'apparato:

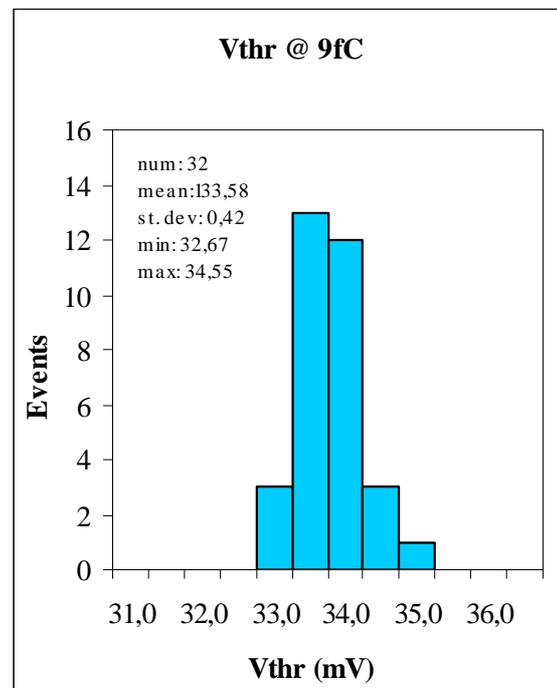
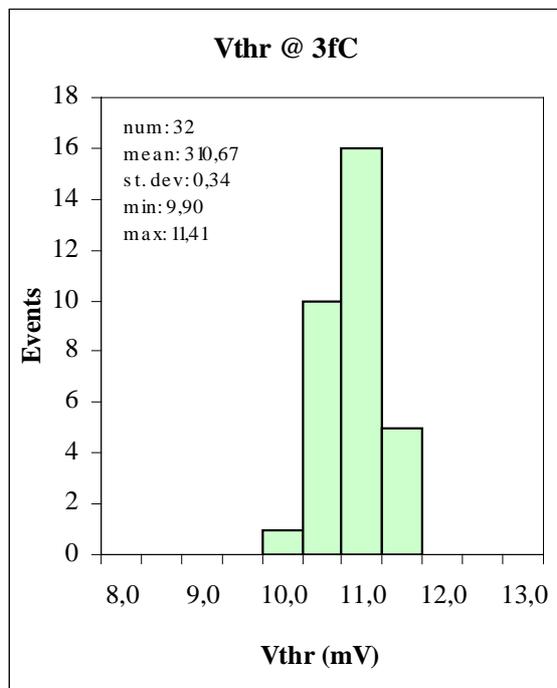
$$\text{rumore} = \frac{V_{thr}(3fC + 3\sigma) - V_{thr}(3fC)}{3} \frac{6250}{\text{sensibilità}} [\text{num.elettroni}]$$

dove il rapporto 6250/sensibilità converte il rumore in uscita in rumore in ingresso espresso come ENC (la costante 6250 rappresenta il numero di elettroni pari ad una carica di 1 fC).

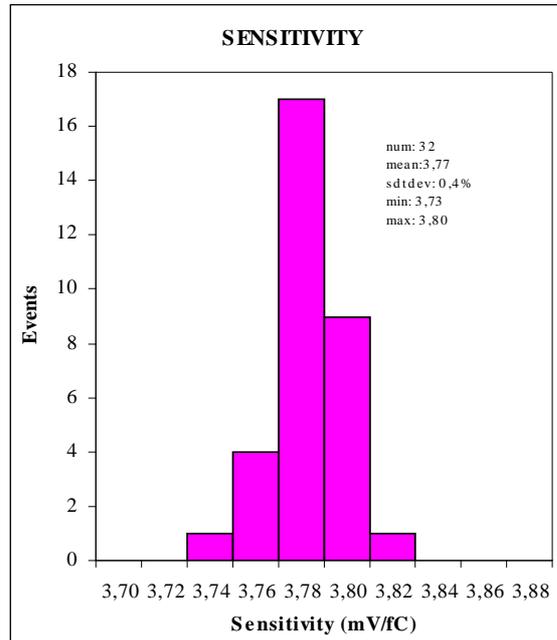
Prima di procedere con le misure, sono state eseguite alcune verifiche preliminari sull'apparato di test, dalle quali è risultato che la presenza di diversi strumenti in prossimità del circuito di prova provocava delle fluttuazioni sul valore del rumore; si è così controllato che tutte le masse fossero ben collegate e, per migliorarne la schermatura, la basetta di prova stessa è stata parzialmente racchiusa in un contenitore metallico (purtroppo la necessità di accedere al regolatore della VTH ha impedito una schermatura completa).

Data la precisione con cui si vuole fare la misura della sensibilità è stato necessario operare una selezione dei condensatori da 1 pF ottenendo una precisione di $\pm 1\%$ (limite del capacimetro impiegato) e prestare una particolare attenzione a non introdurre capacità parassite nel montaggio.

I valori così ottenuti per la soglia a 3 e 9 fC sono riportati nei grafici seguenti, in cui si può notare un'ottima uniformità per i *chip* provati. I due grafici presentano una larghezza alla base rispettivamente di 1.51 e 1.88 mV.

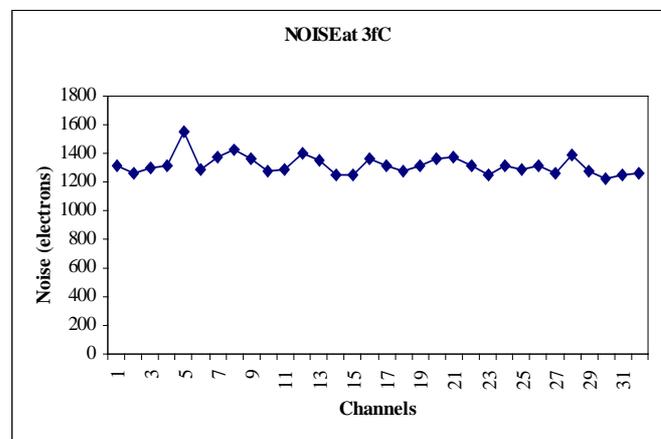
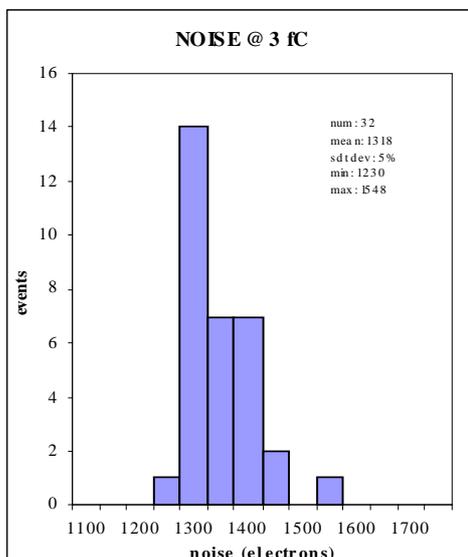


Da questi due campioni di dati si può ricavare la sensibilità per i singoli canali e il risultato è riportato nel grafico che segue: di nuovo si può notare l'ottima uniformità di questa caratteristica



Come si vede, il valor medio della sensibilità (3.77 mV/fC) risulta alquanto diverso da quello di progetto (3.3 mV/fC): il motivo di questa differenza sta nel fatto che, come comunicato dalla ditta costruttrice del *chip*, durante la lavorazione dei *wafer* contenenti questi prototipi è stata riscontrata una variazione al di fuori dei limiti di processo per lo spessore dell'ossido di isolamento delle capacità integrate. Questo ha portato a valori di capacità inferiori di un fattore 10 ÷15% rispetto al valor medio e la sensibilità, che è determinata principalmente dalla capacità di feedback del preamplificatore (guadagno $\propto 1/C_f$), ne è stata aumentata di un fattore circa uguale.

Una volta nota la sensibilità e la misura del valore di soglia corrispondente al *rate* di 1 KHz è stato calcolato il rumore dei *chip* sotto test, ottenendo i seguenti risultati:



Il valore del rumore risulta consistente con quello fornito dalle simulazioni ed anche qui la distribuzione risulta piuttosto stretta, come è più evidente dal grafico di destra; quest'ultimo può anche suggerire che i canali esterni di ciascun *chip* sembrano leggermente più rumorosi di quelli interni, effetto spiegabile con la maggior lunghezza delle piste del circuito stampato di prova

La tabella che segue sintetizza i risultati ottenuti dai test eseguiti sugli 8 prototipi a disposizione.

	media	min	max	std. dev.	std.dev. (%)
Vth@3fC (mV)	10,67	9,90	11,41	0,34	3,2
Vth@9fC (mV)	33,58	32,67	34,55	0,42	1,2
sens. (mV)	3,77	3,73	3,80	0,01	0,4
noise (el)	1318	1230	1548	65	5,0

I valori dei componenti in ingresso sono determinanti per la risposta del MAD che risente fortemente degli effetti capacitivi. Poiché la capacità intrinseca di ogni tubo a deriva è di circa 40 pF, è opportuno valutarne l'influenza sui valori di soglia, sulla sensibilità e sul rumore. Inoltre sulla scheda di *frontend* per proteggere il MAD da scariche elettrostatiche sono previste delle resistenze "melf" da 39 Ω in serie agli ingressi dei canali e dei doppi diodi. Riportiamo dunque nelle seguenti tabelle i dati ottenuti in due diverse condizioni agli ingressi, prima e dopo l'inserimento della capacità.

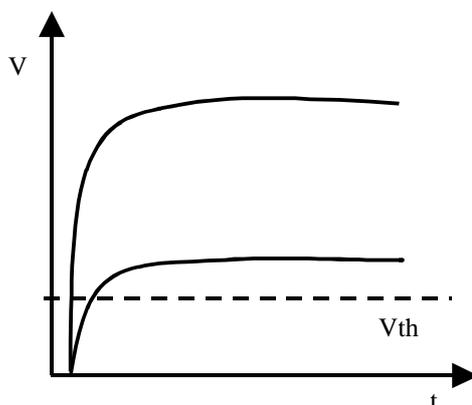
MAD 1: R=39Ohm, diode					
channel	3fC	3fC+3σ	9fC	sens.(mV)	noise(el)
1					
2	10,83	13,48	33,87	3,772	1464
3	10,39	13,21	33,02	3,754	1565
4					

MAD 1: Cd=40pF, R=39Ohm, diode					
channel	3fC	3fC+3σ	9fC	sens.(mV)	noise(el)
1					
2	8,70	14,06	25,69	2,781	4015
3	8,23	13,39	25,02	2,785	3860
4					

Nel primo caso i dati non sono molto diversi da quelli raccolti in assenza di componenti aggiuntivi agli ingressi; il leggero peggioramento potrebbe essere dovuto alla piccola capacità dei diodi. I dati relativi alla seconda serie di misure, invece, si discostano notevolmente da quelli ottenuti nelle condizioni iniziali: la sensibilità è diminuita di circa il 26%, mentre invece il rumore è più che raddoppiato.

2.5 Time walk

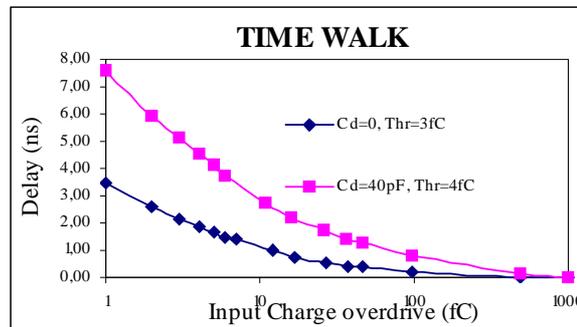
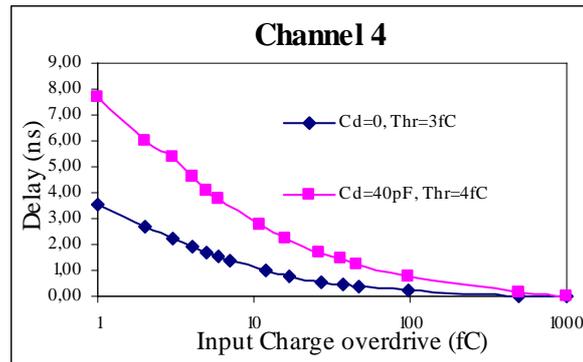
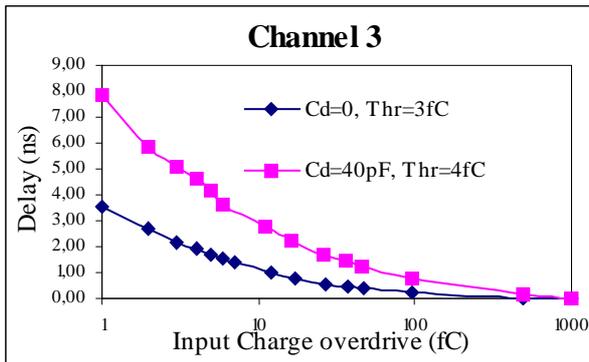
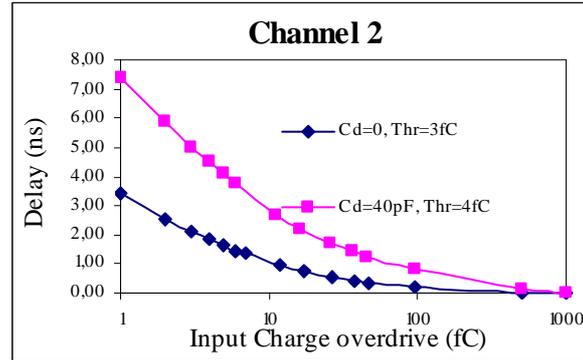
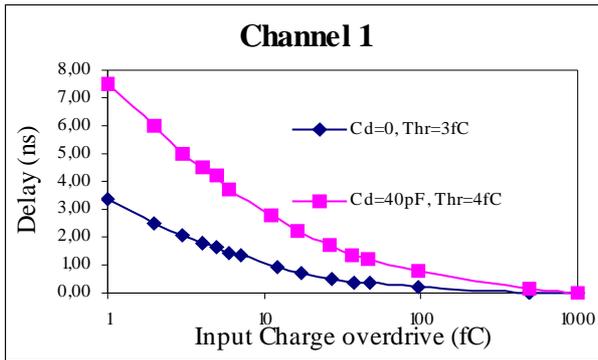
Una volta fissata la soglia, il tempo di risposta del comparatore dipende dall'ampiezza e dal tempo di salita del segnale da discriminare: come si può notare dalla figura, per segnali piuttosto consistenti il fronte di salita risulta ripido e può essere discriminato in tempi brevi; il ritardo introdotto in questi casi è sostanzialmente quello dovuto alla catena elettronica. Per impulsi appena al di sopra della soglia, invece, il livello di riferimento del discriminatore viene raggiunto dopo un tempo pari a quello di salita del segnale; il ritardo totale dipende dunque dall'ampiezza del segnale in ingresso e ciò diminuisce la risoluzione temporale del rivelatore (e di conseguenza anche quella spaziale).



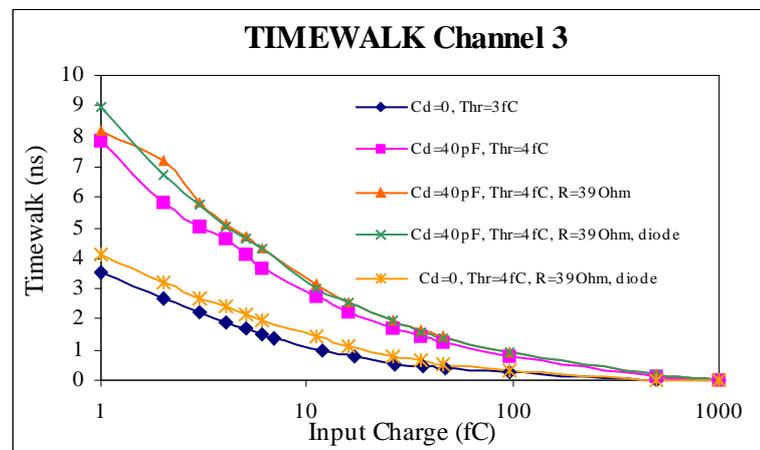
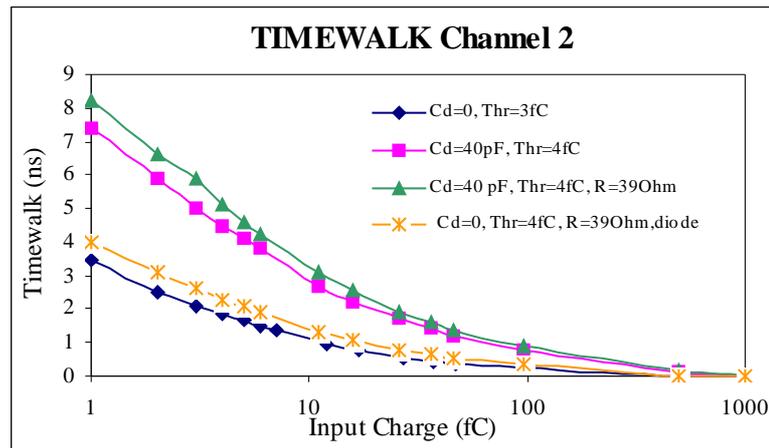
Condizioni di misura:

La misura del *time walk* si svolge con le seguenti modalità: viene regolata la soglia a 3 fC e, mantenendola fissa, si mandano in ingresso segnali di ampiezza via via crescente, misurando di volta in volta il valore medio del ritardo tra il segnale dell'impulsatore, usato come *trigger*, e quello dell'uscita del MAD. Il calcolo del *delay* è stato fatto sottraendo al ritardo misurato in corrispondenza di ogni valore di carica in ingresso quello misurato per una carica di 1 pC, per la quale il ritardo equivale sostanzialmente a quello introdotto dalla catena elettronica del canale, che è pari a circa 4 ns. Queste misure sono state eseguite su tutti i quattro canali del MAD1.

Una seconda serie completa di misure è stata fatta dopo aver inserito un condensatore di 40 pF tra l'ingresso di ogni canale e la massa. In questo caso però, regolando la soglia a 3 fC, non si riusciva a misurare il ritardo del segnale di 4 fC a causa del rumore introdotto con l'inserimento della capacità; è stato necessario dunque regolare la soglia a 4 fC per poter calcolare il *time walk* di un segnale di 1 fC al di sopra del valore di soglia. I risultati ottenuti in queste due serie di misure sono riassunti nei seguenti grafici:



Per proteggere gli ingressi del MAD da eventuali scariche del rivelatore, sulle schede di *frontend* è previsto l'uso di resistenze "melf" da 39 Ω . la prova successiva consiste dunque nel ripetere le misure dopo aver inserito tali resistenze in serie agli ingressi. Per poter far ciò, è stato necessario tagliare la pista dello stampato corrispondente al canale che si desiderava polarizzare in questo modo e, vista la buona uniformità dei risultati ottenuti nelle due prove precedenti, per evitare di modificare permanentemente tutte le piste dello stampato, questa nuova serie di misure è stata eseguita solo sui canali 2 e 3. Su questi poi sono stati inseriti anche due diodi di protezione verso massa, anch'essi previsti nelle schede di *frontend*, e le misure sono state fatte sia con la capacità verso massa che in assenza di questa.



Come si può facilmente notare dai grafici, l'effetto prodotto dall'inserimento della capacità è quello di peggiorare il *time walk*, la resistenza e il doppio diodo invece non introducono grosse variazioni.

2.6 Crosstalk

Il *crosstalk* è il fenomeno di induzione tra due canali: un impulso di intensità elevata immesso in un canale può produrre un segnale su un canale attiguo non impulsato. Vista l'alta densità di integrazione delle funzioni e le dimensioni ridotte del dispositivo, nel *chip* di *frontend* questo fenomeno può verificarsi facilmente nel *die*, soprattutto nella sezione di amplificazione molto sensibile alla carica, ma anche a livello di *bonding* e tra i piedini esterni. Il *layout* del MAD è stato pensato in modo da minimizzare tale effetto indesiderato: sul *die* sono state fatte delle diffusioni profonde per isolare un canale dall'altro e la massa dei *driver* d'uscita è stata separata da quella della catena di formatura; inoltre è stato possibile interporre tra i piedini degli ingressi di canali diversi (così come anche tra le uscite) altri piedini di massa o di segnali di controllo in modo da aumentare le distanze. Le prove seguenti sono state pensate per valutare l'entità di tale fenomeno all'interno del *chip* per conoscere le prestazioni del componente base. Poiché l'induzione non avviene solamente tra i canali all'interno

dell'integrato, ma può verificarsi anche fra le tracce dello stampato su cui è saldato il *chip*, oltre che attraverso le alimentazioni, per queste misure le piste di ingresso dei canali sotto test sono state completamente rimosse.

Condizioni di misura:

Le misure di *crosstalk* sono state fatte impulsando alcuni canali con segnali elevati e misurando il segnale indotto negli altri; data la simmetria sinistra/destra della struttura del MAD rispetto all'asse centrale, si è ritenuto sufficiente valutare il fenomeno su uno dei canali esterni e su uno di quelli interni. Il primo canale su cui sono state condotte le verifiche è il canale 1 del MAD1: innanzitutto, vicino al piedino del *chip*, è stata tagliata la pista dello stampato corrispondente a tale canale, dopo di che, sfruttando le due uscite disponibili nell'impulsatore, sono stati inviati agli ingressi dei canali 2 e 3 dei segnali equivalenti prima a 1 e poi a 5 pC (sempre con frequenza di 1 MHz); a questo punto si è valutata la carica indotta nel canale 1 regolando la soglia fino ad ottenere, in uscita di questo, un *rate* di 500 KHz. Dalle misure della sensibilità precedentemente fatte, è stata calcolata la carica equivalente. La medesima procedura è stata eseguita impulsando i canali 2 e 4 e infine, dopo aver tagliato la relativa pista, le stesse misure sono state ripetute anche sul canale 3. I risultati ottenuti sono riassunti nella seguente tabella:

canale	Q _{in} (pC)	V _{thr} (mV)	
1		4.05	Segnale iniettato: 2 pC Carica indotta: 1.07 fC <i>Crosstalk</i> : 0.5‰
2	1		
3	1		
4			
1		30.00	Segnale iniettato: 10 pC Carica indotta: 7.89 fC <i>Crosstalk</i> : 0.8‰
2	5		
3	5		
4			
1		4.17	Segnale iniettato: 2 pC Carica indotta: 1.10 fC <i>Crosstalk</i> : 0.5‰
2	1		
3			
4	1		
1		24.00	Segnale iniettato: 10 pC Carica indotta: 6.32 fC <i>Crosstalk</i> : 0.6‰
2	5		
3			
4	5		
1			Segnale iniettato: 2 pC Carica indotta: 0.85 fC <i>Crosstalk</i> : 0.4‰
2	1	3.22	
3			
4	1		
1			Segnale iniettato: 10 pC Carica indotta: 5.03 fC <i>Crosstalk</i> : 0.5‰
2	5	19.11	
3			
4	5		

Come si può notare dalla tabella, il *crosstalk* intrinseco del *chip* risulta sempre al di sotto dell'1‰, anche nel caso di segnali ampiamente oltre il limite di saturazione;

questo dato risulta costante per i canali esterni e per quelli centrali che, nelle versioni precedenti del MAD, mostravano un effetto più accentuato.

2.7 Prove in temperatura

Tutte le prove finora eseguite sono state fatte a temperatura ambiente e le caratteristiche misurate si riferiscono a $T_A = 25^\circ\text{C}$. Per avere una caratterizzazione completa del dispositivo, è utile conoscerne anche il comportamento all'interno di un *range* di temperature comprese tra 0 e 125°C . Questo non tanto perché si prevede che il suo ambiente operativo possa esibire una tale escursione di temperatura, quanto perché costituisce un test abbastanza significativo di come l'ampia variazione di parametri circuitali indotta in questo modo si ripercuota sul funzionamento del *chip*. Inoltre si può far compiere un ciclo termico alla sonda di temperatura (in genere consigliato prima di un suo utilizzo) e verificare le caratteristiche del dispositivo.

Condizioni di misura:

Per portare a termine questa nuova serie di test a temperature diverse, è stata usata una camera termostatica: si tratta di un apparato con la possibilità di impostare la temperatura desiderata e dotato di un *display* che ne visualizza il valore raggiunto di volta in volta con la precisione di $\pm 1^\circ\text{C}$. Lateralmente presenta un foro circolare, che permette di portare all'interno i collegamenti; tale foro è richiudibile con un tappo di circa 10 cm di diametro, munito di una guarnizione di gomma per garantire una certa tenuta termica.

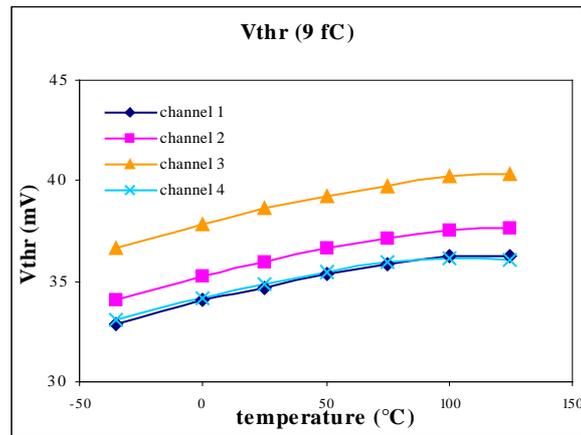
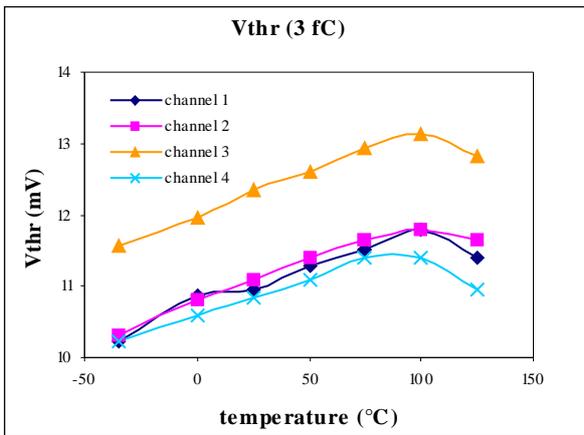
All'interno della camera è stata collocata una scheda appositamente predisposta e collegata tramite un connettore ai vari piedini della basetta di prova già usata; agendo su quest'ultima sarà dunque possibile pilotare dall'esterno il *chip* posto nella camera. Per misurare con precisione la temperatura effettiva del MAD, sulla scheda, al centro dello zoccolo di supporto per il MAD, è posizionata una sonda di temperatura assoluta costituita dall'integrato TMP01 della Analog Devices, che fornisce in uscita una tensione di $5\text{ mV}/^\circ\text{K}$.

I segnali sono portati ai 4 ingressi tramite dei lunghi cavetti schermati che, quando non collegati all'impulsatore, sono chiusi con apposite terminazioni da $50\ \Omega$ e collagati ad una massa esterna in modo da ridurre il rumore causato dall'effetto antenna (piuttosto notevole prima di prendere questa precauzione). Per assicurare un buon collegamento di massa tra la struttura della camera, l'apparato interno e la strumentazione esterna, si è fatto largo uso di trecciola di rame. Nonostante tutto il lavoro di ottimizzazione sull'apparato, non è stato comunque possibile ottenere prestazioni di rumore equivalenti a quelle misurate sul banco a temperatura ambiente.

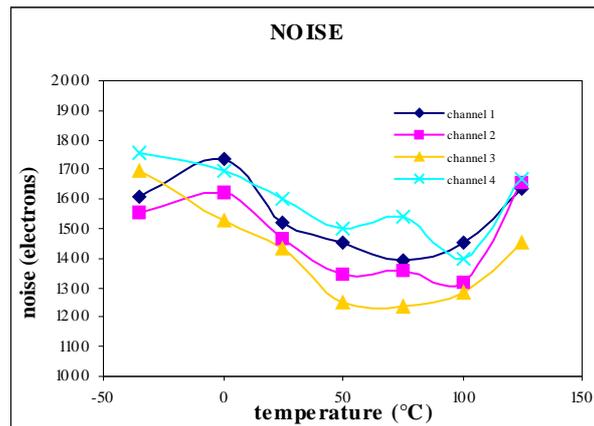
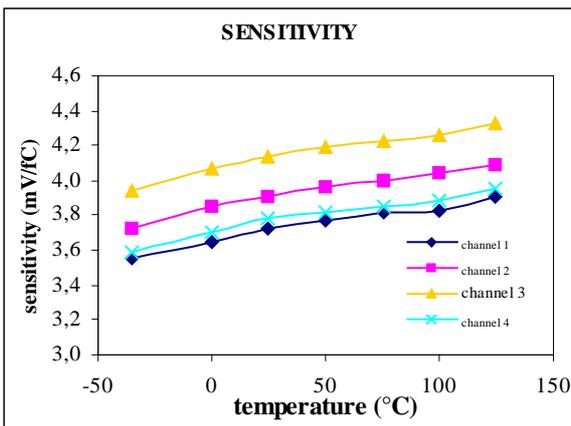
La procedura seguita per ogni ciclo di misure è la seguente: per prima cosa è stata impostata sulla camera la temperatura desiderata; poi, dopo aver controllato attraverso la sonda TMP01 che il sistema avesse raggiunto l'equilibrio termico, si sono compiuti tutti i controlli in assenza di segnale in ingresso, del tutto analoghi a quelli fatti in

precedenza. Quindi, impulsando gli ingressi con segnali opportuni, si è misurata la V_{thr} rispettivamente nelle condizioni di 3 fC, 3 fC + 3σ e 9 fC e si sono calcolati sensibilità e rumore. Utilizzando anche alcune resistenze di valori diversi inserite tra i *pin* W_CTRL e massa, si è anche controllata la variazione della larghezza del segnale d'uscita.

L'ordine delle temperature secondo il quale sono state fatte le prove è il seguente: 0°C, 25°C, 50°C, 75°C e 100°C; dopo aver controllato che, all'interno di questo intervallo, il MAD risultasse funzionante, sono state fatte verifiche anche a -35°C e +125°C. Qui sotto sono riportati i risultati di un primo insieme di misure riguardanti le tensioni di soglia, la sensibilità e il rumore.



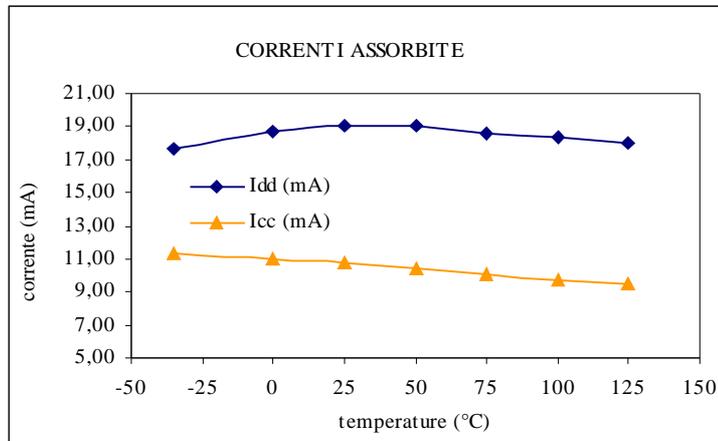
Dai grafici relativi ai valori della soglia a 3 e 9 fC, si può notare che il canale 3 si discosta dagli altri, probabilmente a causa di qualche effetto introdotto da questa nuova struttura sperimentale.



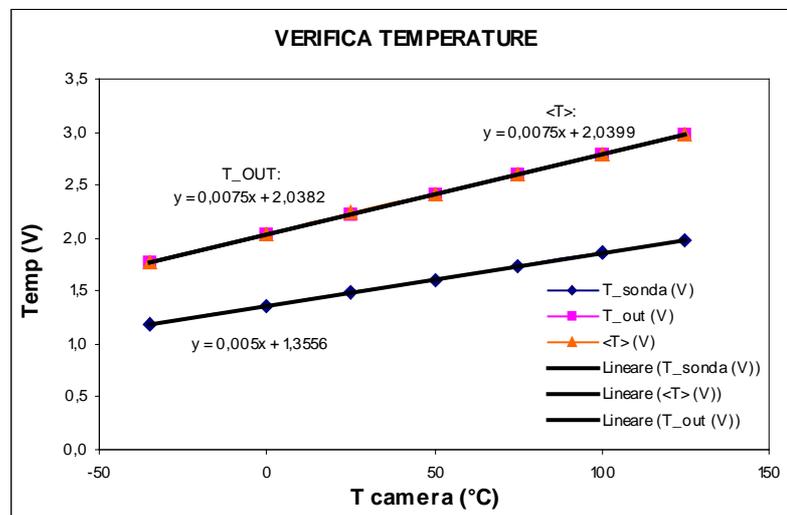
Per quanto riguarda il rumore, l'andamento decrescente con la temperatura (fino a valori intermedi) dovrà essere verificato con simulazioni mirate; lo stesso dovrà essere fatto per la sensibilità, la cui variazione risulta del 2.5% nel range 0 ÷ 50°C.

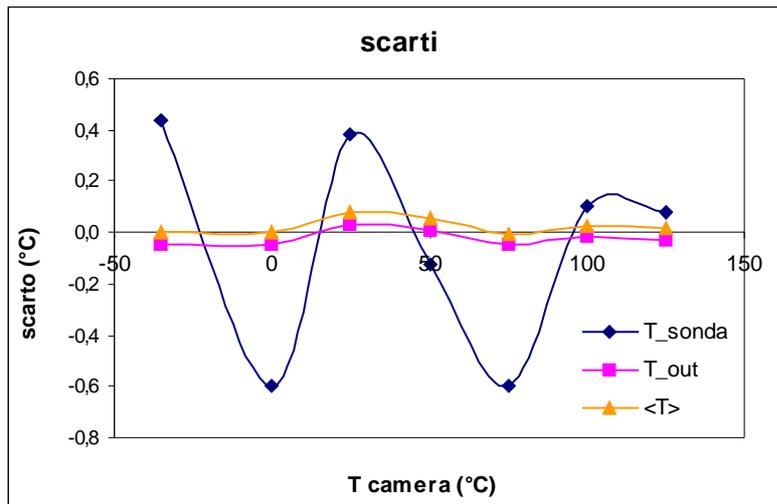
Com'era da prevedere, nonostante i provvedimenti presi, l'utilizzo della camera e di lunghi cavi per le interconnessioni provoca un aumento del rumore misurato in queste nuove condizioni sperimentali.

Un controllo molto importante riguarda la potenza dissipata: le correnti assorbite rimangono quasi costanti per tutto l'intervallo di temperatura, indice che le polarizzazioni sono abbastanza compensate e non esiste fenomeno di fuga termica.



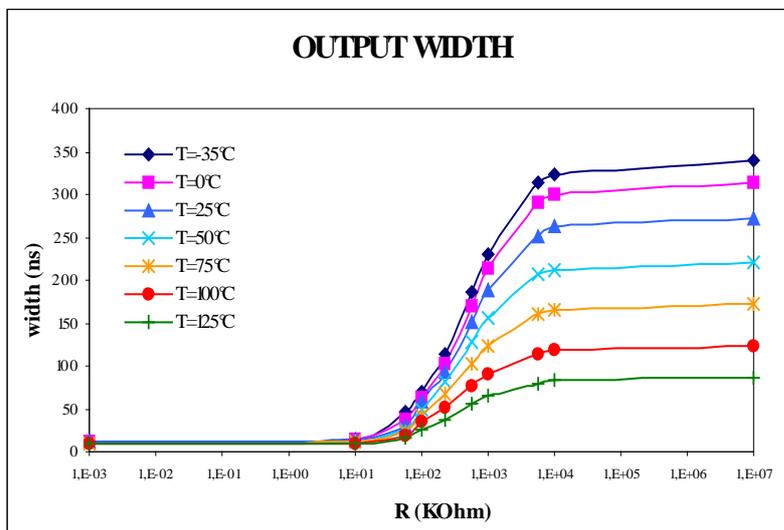
Le due uscite della sonda di temperatura T_OUT e <T> sono state confrontate e sono risultate pressoché identiche; l'interpolazione lineare dei valori raccolti conferma il coefficiente di conversione di 7.5 mV/°K previsto dalle simulazioni di progetto. L'autoriscaldamento del *chip* sembra essere quasi completamente annullato dalla ventilazione interna della camera climatica: infatti la regressione dei dati fornisce lo zero Kelvin con un errore molto piccolo.





Il grafico degli scarti mostra la differenza fra le temperature misurate dalle sonde (sia quella integrata nel MAD, sia la TMP01) e quella registrata dalla camera termostatica. Le forti oscillazioni dei valori registrati dalla sonda TMP01 sono probabilmente dovute alla minore massa termica ed al funzionamento *on/off* del controllo della temperatura della camera. In ogni caso le differenze si mantengono entro il grado.

L'ultimo grafico rappresenta la variazione della larghezza del segnale d'uscita del monostabile in funzione della resistenza inserita tra il *pin* W_CTRL e la massa. L'elevata dipendenza di questo parametro dalla temperatura è dovuta alla variazione della tensione (ricavata da una giunzione base-emettitore) a cui viene caricato il condensatore dell'*one-shot* dalla corrente esterna.



La specifica che il MAD deve soddisfare è che la larghezza del segnale in uscita possa essere variata all'interno dell'intervallo 30÷150 ns, questa condizione risulta soddisfatta per temperature fino a 75°C, temperatura che difficilmente potrà essere raggiunta all'interno del rivelatore.

Bibliografia:

F. Gonella e M. Pegoraro, *BiCMOS frontend ASIC for the readout of the drift tubes of CMS barrel muon detector – MAD Front End Chip Development History*, note

F. Gonella e M. Pegoraro, *A four channels frontend ASIC for the readout of the muon drift tubes of CMS barrel*, note

Capitolo 3

Controlli lenti nelle schede di *frontend*

Come si è visto il MAD permette la disabilitazione selettiva di ciascuno dei 4 canali attraverso la mascheratura degli ingressi; questa caratteristica è utile in presenza di canali particolarmente rumorosi (la disabilitazione avviene nel primo stadio della catena di elaborazione minimizzando così i disturbi che un tale canale potrebbe provocare su quelli adiacenti). Inoltre, sfruttando la possibilità di disabilitare l'uscita T_OUT si è in grado di misurare la temperatura di ciascun integrato del *SuperLayer*.

Le mascherature come l'uscita di temperatura sono controllate da segnali digitali TTL compatibili. Poiché le schede di *frontend* possono alloggiare fino a 5 MAD, sono necessari almeno 20 linee di controllo per la mascheratura e 5 per le temperature per un totale di 25 segnali digitali. Il controllo di queste funzionalità non ha particolari richieste in termini di velocità per cui si è scelto di utilizzare l'interfaccia I²C che è lo standard per i controlli lenti in CMS e che assolve sia l'esigenza di affidabilità che quella di semplicità costruttiva (una sintetica descrizione del bus I²C è riportata in appendice). D'altra parte la bassa velocità del bus diventa vantaggiosa in quanto minimizza possibili interferenze con gli ingressi.

3.1 Il chip I²C custom

Nella prima versione delle schede di *frontend* l'interfaccia tra bus I²C e segnali di controllo è stata realizzata usando l'integrato PCF8577, prodotto dalla Philips. Si tratta di un *driver* di *display* a cristalli liquidi che, nel nostro caso, viene utilizzato come registro a 32 *bit*. Questo integrato presenta due inconvenienti: il primo è che possiede tre soli *bit* di indirizzamento, insufficienti per questa applicazione dove sono previsti fino a 24 dispositivi sullo stesso bus; ciò impone una qualche soluzione esterna per il preindirizzamento. Il secondo inconveniente è che i registri interni prevedono la sola scrittura, senza possibilità di controllare, via bus I²C, che il dato sia stato programmato in modo corretto.

Per tentare di ovviare a questi inconvenienti, è stato realizzato al CERN un ASIC *full custom* in tecnologia CMOS 0.25 μm della IBM. L'utilizzo di questo processo, le cui caratteristiche di velocità non sono richieste in applicazione, deriva dal fatto che la stessa interfaccia è utilizzata all'interno di altri integrati sviluppati per l'utilizzo in rivelatori per LHC in quanto permette di realizzare elettronica integrata *rad hard*. Si tratta di un integrato con 6 *bit* di indirizzo A0-A5 e un registro a 32 *bit* b01-b32 scrivibile e rileggibile tramite interfaccia I²C.

PIN	DESCRIZIONE	In/Out
VCC	Alimentazione $+2.5 \pm 0.1$ V	
VSS	Massa	
GND	Massa	
SDA	Linea seriale dati I ² C	I/O
SCL	Linea seriale <i>clock</i> I ² C	I
$\overline{\text{RES}}$	<i>Reset</i>	I
A0-A5	<i>Bit di indirizzo del chip</i>	I
b01-b32	<i>Bit d'uscita</i>	O

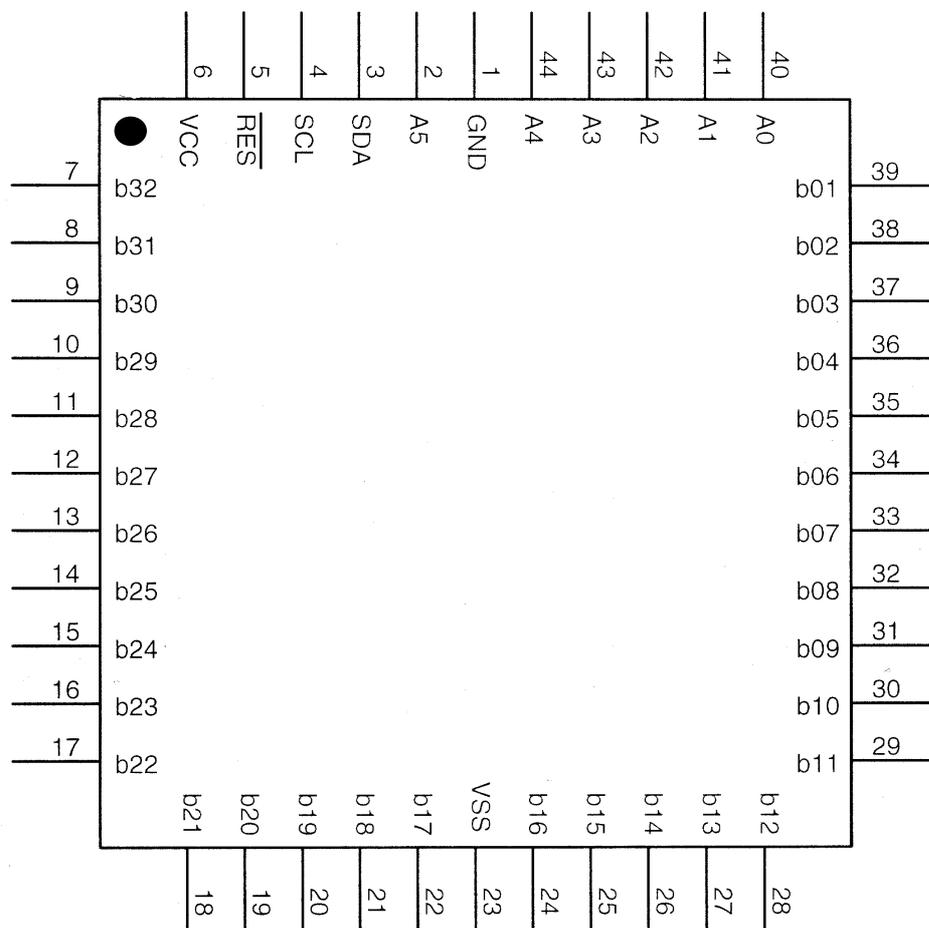


Figura 14: Piedinatura del chip I²C custom

Il *chip* viene alimentato a 2.5V ed è, data la tecnologia usata, molto sensibile a variazioni nell'alimentazione e alle scariche elettrostatiche (ESD), per cui richiede un'attenta manipolazione.

3.2 Prove di funzionamento

A metà ottobre '99 sono arrivati 10 prototipi non testati di questi integrati (in seguito identificati con #0-#9) in contenitore LCC 44 ceramico, che sono stati provati al banco per verificarne il possibile utilizzo nelle schede di frontend in sostituzione dell'integrato della Philips.

Trattandosi di prototipi di circuito *custom* realizzato in un laboratorio esterno, il test deve prevedere il maggior numero di controlli possibili, sia di tipo funzionale che di caratterizzazione elettrica. Per prima cosa quindi, scoperchiando un contenitore, è stata fatta una verifica visiva del corretto collegamento del *die* ai *pin* del contenitore; poi si è controllato che l'alimentazione non fosse in corto circuito con la massa.

Le verifiche successive consistono in una prima fase di test funzionali dell'indirizzamento di questi integrati e della corretta programmazione delle uscite, seguita da una seconda di caratterizzazione elettrica e di rispondenza alle specifiche I²C.

3.2.1 Apparato sperimentale

Per il test dei *chip* I²C *custom*, è stata montato uno zoccolo su una basetta di prova e attorno ad esso sono stati predisposti tutti i dispositivi di protezione e polarizzazione degli integrati.

L'ingresso per l'alimentazione VCC = +2.5 V è protetto da una resistenza in serie da 100 Ω e da uno stabilizzatore zener in parallelo ai 2.5 V costituito dall'integrato TL431. Un circuito di ritardo realizzato con una resistenza da 10 K Ω ed una capacità da 100 nF provvede al *power on reset* esterno.

In serie alle due linee SDA e SCL sono stati inseriti due MOSFET, con un *pull-up* da 1.8 K Ω verso i +2.5 V, in modo da permettere il pilotaggio a livelli fino a 5 V senza rischio di danneggiamento.

I 6 *bit* di indirizzo hanno un *pull-up* di 1 K Ω verso i 2.5 V e sono programmabili tramite le uscite di un integrato PCF8574, identificato con l'indirizzo 0, pilotato tramite un bus I²C, separato da quello del *chip* sotto test, condiviso da altri quattro integrati PCF8574 (con indirizzi diversi) utilizzati per la rilettura dei *pin* di uscita del *chip custom*. I PCF8574 sono dispositivi CMOS alimentabili con una tensione VDD compresa tra +2.5 V e +6 V, utilizzati per espandere i dati seriali del bus I²C rendendoli disponibili su una porta a 8 *bit* o, viceversa, per leggere lo stato degli 8 *bit* e convertirli in forma seriale.

Le due linee di bus I²C provengono da una scheda di controllo sulla quale è montato un microcontrollore che funge da MASTER nelle comunicazioni e programmabile via RS232 da un PC, su cui è stato sviluppato il programma di test. La connessione I²C dedicata al dialogo con il *chip custom* prevedeva inizialmente un *buffer*, necessario per pilotare informazioni su lunghi cavi, che poi è stato tolto per consentire alle linee SCL e SDA di assumere un livello LOW prossimo a 0 V.

Un unico alimentatore stabilizzato in tensione fornisce sia i +2.5 V necessari al *chip custom* e ai PCF8574, sia i 5 V per la scheda di controllo. I segnali del bus I²C e delle altre tensioni in generale sono stati osservati e misurati utilizzando un oscilloscopio digitale a 4 canali (LeCroy 9354 500 MHz *oscilloscope*).

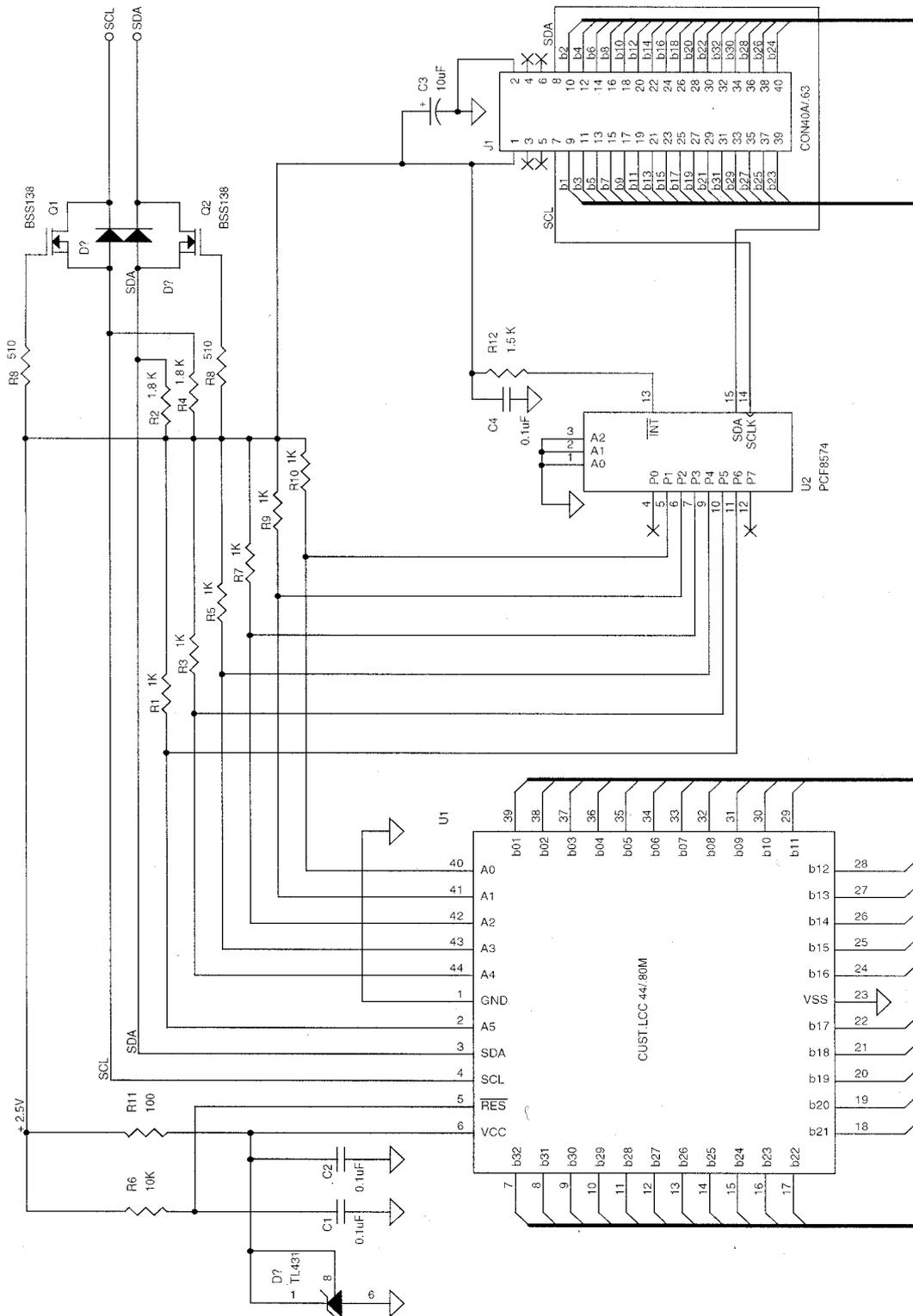


Figura 15: Schema della basetta di prova

La figura seguente illustra lo schema delle connessioni dei 4 integrati PCF8574 utilizzati per la lettura delle 32 uscite del *chip I²C custom*.

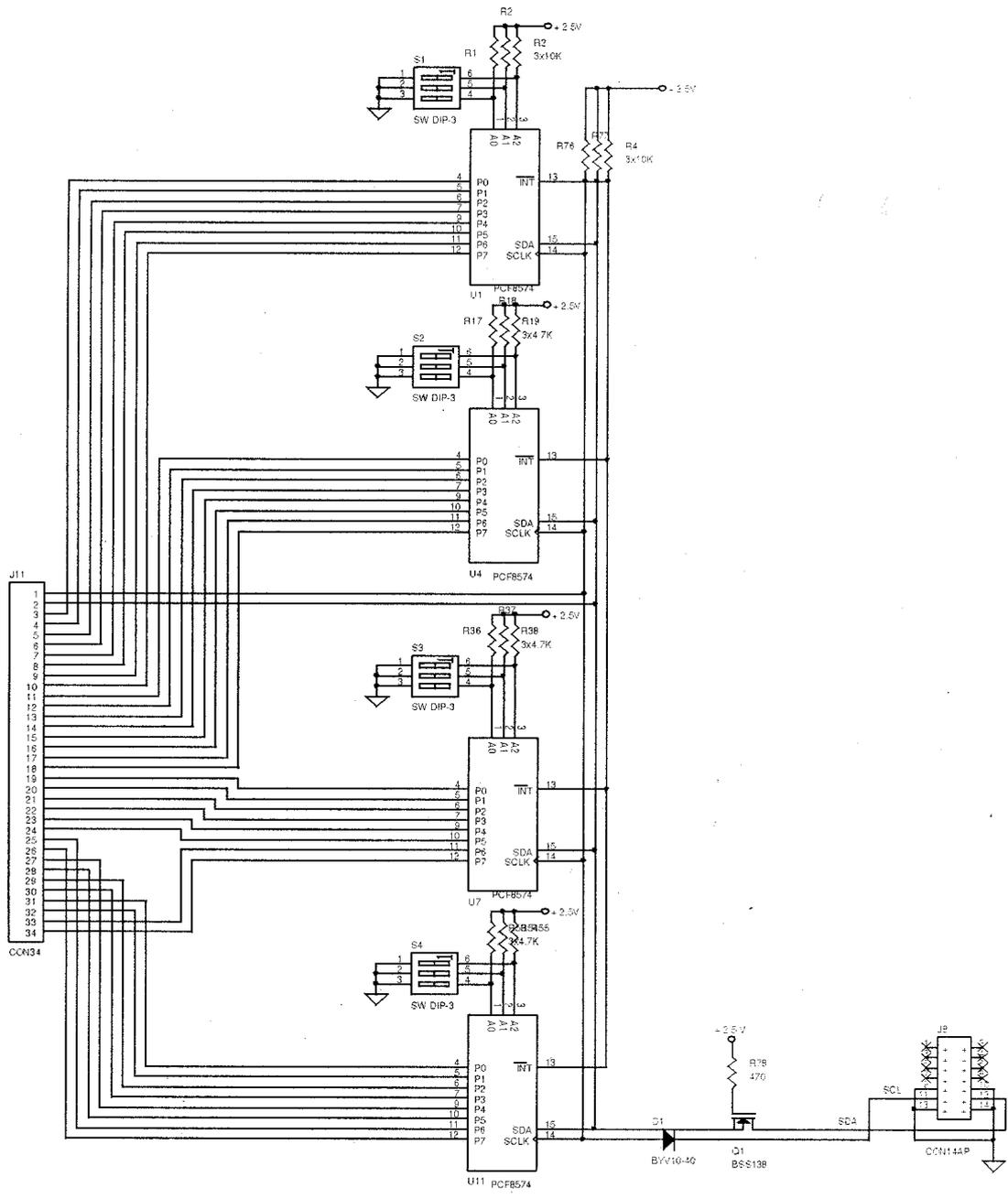


Figura 16: Scheda di lettura del *chip* sotto test

3.2.2 Indirizzamento

La prima prova consiste nel verificare se il *chip custom* riconosce il proprio indirizzo. Per far ciò, si programmano le uscite del PCF8574 N°0 con l'indirizzo che si vuole dare al *chip* sotto test; poi, utilizzando il bus I²C, si esegue una procedura di indirizzamento e si controlla se l'integrato lo riconosce come proprio generando il segnale di ACKNOWLEDGE. Inizialmente nessun *chip* ha dato segni di vita; dato l'elevato valore del livello basso della linea SDA si è pensato che forse il *chip* non riusciva a rilevare la variazione dello stato della linea. In un primo momento, infatti, la connessione al MASTER I²C prevedeva un diodo al posto del MOSFET, ma la tensione diretta di questo componente, sommata al livello di uscita della scheda del microcontrollore, era tale da pilotare l'ingresso SCL a circa 0.8 V nello stato "0".

Sulla basetta di prova finale abbiamo sostituito il diodo e utilizzato dei MOS per entrambe le linee del bus I²C. In queste nuove condizioni sperimentali, la procedura precedentemente descritta è stata ripetuta su tutti i *chip* a nostra disposizione, provando per ciascuno tutta la gamma degli indirizzi selezionabili con 6 *bit*, con i seguenti risultati:

<i>Chip</i>	ACKNOWLEDGE	Note
#0	Sì	
#1	Sì	
#2	Sì	
#3	Sì	
#4	Sì	
#5	Sì	
#6	No	tutti i <i>bit</i> del registro di uscita rimangono alti
#7	Sì	
#8	Sì	
#9	No	tutti i <i>bit</i> del registro di uscita rimangono alti

3.2.3 Lettura/scrittura nel registro

Questa seconda prova, necessaria per la verifica delle uscite, è stata ovviamente eseguita solo sui *chip* che, nel test precedente, sono risultati correttamente funzionanti. Una volta programmato un indirizzo tramite il PCF8574 N°0, si invia la richiesta di comunicazione e, ottenuto l'ACKNOWLEDGE dal *chip custom* sotto test, si scrive un "1" sul primo *bit* del registro; se ne chiede poi la riletture sia tramite il READ BACK del *chip* sia tramite i PCF8574 connessi ai *pin* d'uscita. Alla fine si esegue il confronto tra questi dati: se l'esito del test risulta positivo, il procedimento viene iterato scrivendo un "1" sulla posizione successiva del registro e così via fino ad esaurire tutti i 32 *bit* d'uscita. Dopo di che si modifica l'indirizzo del *chip custom* e si ripetono tutte le verifiche per ogni indirizzo selezionabile.

La tabella seguente illustra i risultati ottenuti: almeno 6 *chip* sui 10 iniziali hanno superato questo test funzionale.

Chip	Esito del test
#0	Funzionante
#1	Funzionante
#2	Funzionante
#3	Non risponde all'indirizzo (probabilmente danneggiato durante alcune modifiche apportate alla basetta)
#4	L'uscita b10 rimane sempre alta
#5	Funzionante
#7	Funzionante
#8	Funzionante

3.2.4 Livelli delle linee SDA e SCL

Il fatto che sia stato necessario modificare il sistema di pilotaggio delle linee I²C per ottenere il funzionamento di questo ASIC ha suggerito di esaminare più in dettaglio i livelli elettrici a cui il *chip* risponde. Per far ciò è stato inserito un *trimmer* da 1 K Ω in serie tra la linea SCL proveniente dal MASTER e il *drain* del MOSFET di protezione. Variando il valore di tale resistenza, si è controllato sul monitor del computer se il *chip* generava o meno il segnale di ACKNOWLEDGE una volta indirizzato; regolando dunque il sistema fino alla condizione limite per il corretto funzionamento, si è fatta una misura del livello massimo V_{low_max} che può assumere la linea di *clock* per essere riconosciuto come basso dal *chip* I²C *custom*.

Le misure sono state eseguite solamente sui dispositivi correttamente funzionanti, ottenendo questi risultati:

Chip	V_{low_max} (mV)
#0	275
#1	275
#2	280
#5	280
#7	280
#8	280

Vista la buona uniformità dei risultati ottenuti, la prova sulla linea dei dati è stata eseguita solamente sul #8, in modo da evitare che successivi maneggiamenti riducessero ulteriormente il numero dei *chip* funzionanti a nostra disposizione.

Dopo aver ripristinato le condizioni iniziali della linea SCL, è stato inserito in serie un *trimmer* da 1 K Ω tra la linea SDA proveniente dal MASTER e il piedino di *drain* del MOSFET usato come protezione. Con le stesse modalità del caso precedente, si è

misurato il livello massimo della linea SDA riconosciuto come basso dal *chip* sotto test. Anche in questo caso ne è risultata una tensione $V_{low_max} = 280 \text{ mV}$.

3.2.5 Livelli delle linee di indirizzamento

Una volta caratterizzate le due linee del bus I²C si è fatta la stessa cosa per le 6 linee dell'indirizzamento. La verifica dei livelli di tensione degli ingressi A0-A5 è stata eseguita con le seguenti modalità:

Livello basso: dopo aver inserito un *trimmer* da 10 k Ω tra i piedini P6 del PCF8574 N°0 e A5 del *chip custom*, si è variata tale resistenza fino a quando il *chip* non generava più il segnale di ACKNOWLEDGE relativo al suo indirizzo. Quindi, dopo aver regolato il sistema nelle condizioni limite per il corretto funzionamento, si è misurato il livello massimo della tensione che il dispositivo riconosce come basso per gli ingressi relativi all'indirizzo. Ne è risultata una tensione pari a $V_{low_max} = 1.08 \text{ V}$.

Livello alto: in questo caso il *trimmer* da 10 k Ω è stato collegato tra il piedino A5 del *chip* sotto test e la massa. Con le stesse modalità precedentemente descritte, si è misurato il livello minimo riconosciuto dal *chip* come alto. Il risultato ottenuto è stata una tensione $V_{high_min} = 1.20 \text{ V}$.

3.2.6 Livelli statici e dinamici

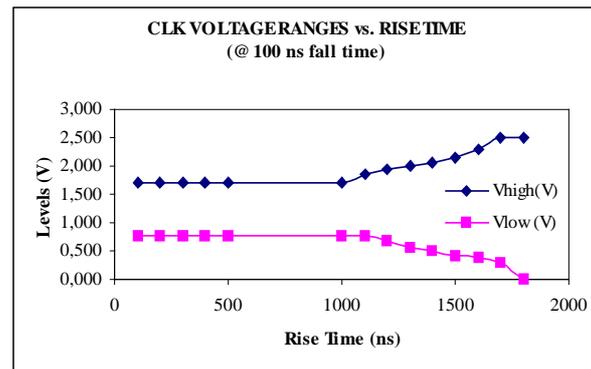
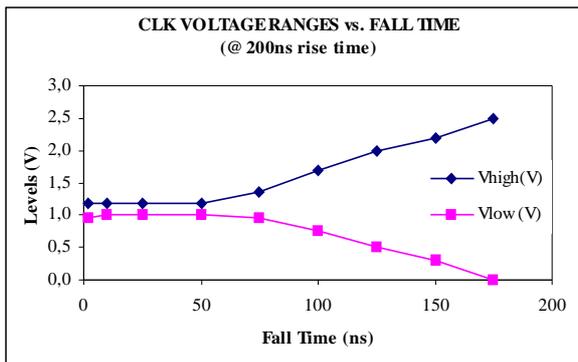
La discrepanza fra i livelli di commutazione presentati dalle linee I²C e dagli ingressi di indirizzo è evidentemente connessa con il fatto che i primi sono dinamici ed i secondi statici: ciò ha suggerito di indagare la dipendenza dei livelli dai tempi di salita e discesa dei segnali.

Per fare tali verifiche, la linea SCL, proveniente dal microcontrollore, è stata collegata all'ingresso *trigger* di un impulsatore hp 8110A (150 MHz pulse generator) funzionante in modalità *gate* allo scopo di variare il livello minimo e massimo da 0 a +2.5 V e regolare il tempo di salita t_r e di discesa t_f del segnale partendo da un valore minimo di 1.8 ns. Fissando uno dei due fronti e modificando l'altro, si sono prese di volta in volta le misure dei livelli minimo e massimo che il *chip* riusciva a riconoscere. In ognuna delle due serie, la V_{low_max} è stata misurata per $V_{high} = +2.5 \text{ V}$ e la V_{high_min} per $V_{low} = 0 \text{ V}$. Nelle tabelle e nei grafici della pagina seguente sono riportati i risultati ottenuti.

Le specifiche del bus I²C prevedono un corretto funzionamento fino ai tempi limite $t_{r,max} = 1000 \text{ ns}$ e $t_{f,max} = 300 \text{ ns}$ con $V_{low_max} = 0.3V_{DD}$ (in questo caso 0.75 V), condizione non soddisfatta da questo *chip* I²C *custom*. Inoltre, questa dipendenza dei livelli di ingresso dai tempi di transizione potrebbe essere funzione dei parametri di processo ed essere piuttosto aleatoria.

t_f (ns)	t_r (ns)	V_low (V)	V_high (V)
1,8	20	0,960	1,180
10	200	1,000	1,180
25	200	1,000	1,180
50	200	1,000	1,180
75	200	0,955	1,350
100	200	0,755	1,700
125	200	0,500	2,000
150	200	0,300	2,200
175	200	0,000	2,500

t_f (ns)	t_r (ns)	V_low (V)	V_high (V)
100	100	0,770	1,700
100	200	0,760	1,700
100	300	0,760	1,700
100	400	0,760	1,700
100	500	0,760	1,700
100	1000	0,760	1,700
100	1100	0,760	1,850
100	1200	0,675	1,950
100	1300	0,560	2,000
100	1400	0,490	2,050
100	1500	0,420	2,150
100	1600	0,375	2,300
100	1700	0,300	2,500
100	1800	0,000	2,500



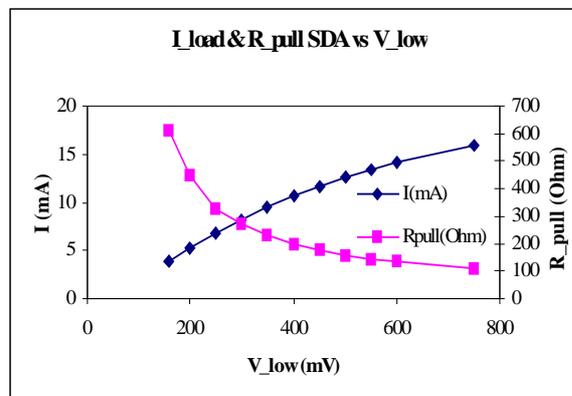
3.2.7 Pilotaggio della linea SDA

Il valore della corrente che il *chip custom* riesce a controllare sulla linea dati del bus I²C è molto importante, perché determina il valore minimo della resistenza di *pull-up* utilizzabile; tale valore a sua volta, assieme alla capacità presentata dalla linea, determina il tempo t_r e quindi la velocità di transizione dei segnali.

Per eseguire questa misura, la resistenza di *pull-up* verso i 2.5 V relativa alla linea SDA che arriva al *chip* è stata sostituita dalla serie composta da un *trimmer* da 500 Ω e una resistenza di protezione da 110 Ω . Agendo sul *trimmer* e prendendo nota di volta in volta del suo valore, si sono misurati i livelli bassi assunti, nei vari casi, dal segnale proveniente dal *chip* durante il READ BACK delle uscite. I dati così ottenuti sono riuniti nella seguente tabella e rappresentati nel grafico.

La corrente massima pilotabile con circa 400 mV di immunità al rumore risulta essere di 10 mA

V_low(mV)	R_pull(Ohm)	I(mA)
157	610	3,84
200	446	5,16
250	329	6,84
300	269	8,18
350	228	9,43
400	198	10,61
450	176	11,65
500	159	12,58
550	146	13,36
600	134	14,18
750	110	15,91



3.2.8 Carico sulla linea I²C

Il bus I²C prevede che le due linee seriali siano condivise da dispositivi *open drain* oppure *open collector*, che lascino libere le linee se non alimentati. Può accadere, infatti, che l'alimentazione non giunga ad un *chip*, ad esempio per un cattivo contatto dei connettori; è necessario dunque conoscere il comportamento del *chip* I²C *custom* in una tale eventualità.

Per fare tali controlli abbiamo misurato i livelli di tensione dei segnali SCL e SDA quando il *chip custom* ha il piedino VCC collegato a massa. I risultati ottenuti sono riassunti nella seguente tabella:

SDA	Vhigh (WRITE & READ BACK)	2.54 V
	Vlow (WRITE)	0.185 V
SCL	Vhigh	1.20 V
	Vlow	0.195 V

Come si può notare, l'ingresso del segnale di *clock* limita la linea SCL ad un livello intermedio, indice che la corrente che scorre attraverso il relativo piedino è non nulla, probabilmente a causa dei diodi di protezione presenti sul *pad*. Se più *chip* risultassero

non alimentati, ciò potrebbe provocare una alterazione del livello alto della linea, facendolo scendere addirittura al di sotto del livello minimo V_{high_min} riconosciuto come alto dagli altri dispositivi, pregiudicando così le comunicazioni di tutti i *chip* di un *superlayer* che condividono lo stesso bus I²C.

3.3 L'integrato PCF8577

Le verifiche fatte sul *chip* I²C *custom* sono state ripetute anche sul PCF8577, l'integrato usato originariamente per il controllo delle funzioni di mascheratura.

Anche in questo caso, le linee SCL e SDA dal MASTER sono state messe in comunicazione con il dispositivo sotto test attraverso due MOSFET e polarizzate con opportune resistenze di *pull-up*.

La serie di verifiche è iniziata con il controllo dei segnali minimo e massimo che l'ingresso della linea SCL riconosce rispettivamente come livelli alto e basso, utilizzando lo stesso apparato sperimentale del *chip custom*. Il PCF8577 richiede un'alimentazione compresa tra +2.5 V e +6.0 V e le prove sono state fatte alimentando il *chip* sia con +5 V che con +2.5 V, cioè con le 2 tensioni disponibili nella scheda di *frontend*.

	VDD = +5 V	VDD = +2.5 V
V _{high_min}	1.32 V	1.23 V
V _{low_max}	1.28 V	1.21 V

Questi valori si sono dimostrati indipendenti dai tempi di salita e di discesa fino ad un valore di questi di oltre 100 μ s, ben al di sopra quindi del range massimo richiesto dallo standard I²C.

E' stato poi controllato il valore della corrente che il PCF8577 riesce ad assorbire sulla linea SDA; per far ciò la resistenza di *pull-up* è stata sostituita con una da 100 Ω in serie con un *trimmer* da 1 K Ω . L'integrato è risultato correttamente funzionante anche regolando il *trimmer* al valore minimo di resistenza.

Si è proceduto quindi con il controllo del carico sul bus in assenza di alimentazione: come previsto e specificato dai *data sheet*, il PCF8577 lascia libere le linee e consente il funzionamento normale dei restanti dispositivi che condividono lo stesso bus.

Come ultima prova tra il MASTER e il PCF8577 è stato inserito un *buffer* integrato (Philips 82B715) per simulare le condizioni reali in cui il dispositivo si troverà a lavorare, verifica che non era stato possibile eseguire con il *chip custom*, ed anche in questo caso il risultato è stato positivo.

Particolare attenzione è stata posta sul livello minimo della tensione di alimentazione necessario per far funzionare correttamente la coppia *buffer* & integrato: riuscendo ad adottare una tensione di alimentazione di +2.5 V per il PCF8577 che risiede sulla stessa scheda dei MAD, si avrebbe infatti il vantaggio di limitare sia le interferenze che le escursioni dei segnali potrebbero provocare sull'elettronica di *frontend*, sia gli assorbimenti e i disturbi alle commutazioni sull'alimentazione a +5 V della parte

analogica. Utilizzando per il *buffer* una $VCC = +5\text{ V}$, il valore minimo per l'integrato è risultato $VDD_{\min} = 1.5\text{ V}$, si ha quindi un buon margine di sicurezza anche utilizzando per l'alimentazione la tensione $+2.5\text{ V}$.

3.4 Confronto dei due integrati

La serie di test eseguiti sull'integrato I^2C *custom* ha evidenziato alcuni problemi per un suo utilizzo nella scheda di *frontend*: innanzitutto occorre notare la criticità dell'alimentazione, visto che già per tensioni di 2.7 V si possono produrre danni permanenti; inoltre, se un *chip* risultasse non alimentato, la corrente assorbita dall'ingresso SCL potrebbe inibire le comunicazioni di tutti i *chip* collegati ad uno stesso bus.

La necessità di utilizzare, per questo *chip*, dei segnali di *clock* con fronti di salita e discesa molto rapidi rende impossibili le comunicazioni su lunghi cavi a causa degli inevitabili effetti capacitivi di questi ultimi.

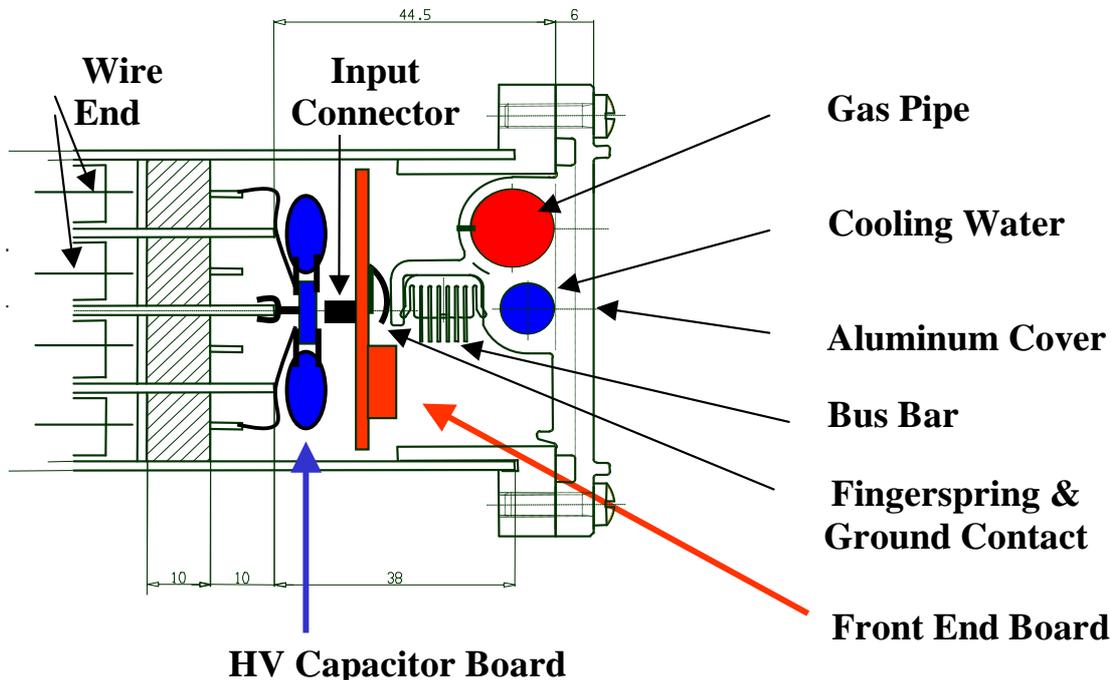
D'altra parte il *chip custom* si è anche rivelato inadatto a essere pilotato tramite il *buffer* 82B715 (l'unico utilizzabile con interfaccia I^2C) a causa dei livelli dei segnali non compatibili tra i due dispositivi; per tale motivo sarebbe necessario dotare la linea SDA di ogni scheda di *frontend* di un *buffer* bidirezionale appositamente costruito con elettronica discreta. Tutte queste complicazioni circuitali, assieme alle ottime prestazioni raggiungibili con il PCF8577 anche in condizioni limite, rendono quest'ultimo più adatto all'impiego in CMS rispetto al delicato e problematico *chip* I^2C *custom*; si preferisce provvedere con un sistema esterno piuttosto semplice (un integrato PCF8574) all'espansione degli indirizzi e rinunciare alla possibilità di ricontrollare lo stato delle uscite in cambio di una maggiore affidabilità delle operazioni.

Capitolo 4

Il sistema di *frontend*

4.1 Le schede HVC e *frontend*

Una volta completati i test di funzionamento sui singoli *chip*, gli stessi sono stati utilizzati per equipaggiare i prototipi di schede di *frontend* per misurare le caratteristiche della catena elettronica completa che sarà installata sul rivelatore. Il sistema è diviso su 2 differenti schede riunite a *sandwich* che verranno collocate ad una estremità dei tubi a deriva, come illustrato nella sezione qui sotto riportata.



A ridosso dei tubi a deriva si trova una piccola scheda con i condensatori ad alta tensione che portano il segnale dal terminale dell'anodo (filo da 50 μm polarizzato a circa 3500 V) all'ingresso degli ASIC che si trova praticamente a potenziale zero. Questa soluzione consente di mantenere un isolamento di sicurezza, in questo caso ancor più necessario dal momento che il gas utilizzato nel rivelatore ha rigidità

dielettrica inferiore all'aria, in uno spazio ridotto semplicemente posizionando le capacità a cavallo del circuito stampato in cui una faccia è riservata all'alta tensione e l'altra ai segnali riferiti a massa.

Su questa piccola scheda, denominata *HVC board*, trovano spazio anche le resistenze che scaricano le deboli correnti di perdita dei condensatori e due connettori che portano i segnali di 16 tubi all'ingresso della scheda di *frontend*. La modularità a 16 canali del *readout* consente di mantenere collegamenti brevi sia nelle tracce dei circuiti stampati, sia nei cavi di interconnessione.

La scheda di *frontend* è agganciata a quella *HVC*, che a sua volta è vincolata alla struttura metallica del rivelatore: il tutto è realizzato in modo da avere un contatto molto solido tra le masse elettriche delle varie parti, completato da un ulteriore collegamento al coperchio metallico del *SuperLayer* tramite "molle a dito".

In appendice è riportato lo schema elettrico della scheda di *frontend*, suddiviso in tre sezioni. La prima comprende gli integrati MAD assieme alle capacità di filtraggio delle alimentazioni, di *bypass* della polarizzazione e alle resistenze necessarie per eseguire la media delle temperature e l'abilitazione dei *buffer* relativi.

Il secondo foglio contiene i circuiti di controllo e monitoraggio: l'interfaccia I²C, con l'integrato PCF8577 che in questo caso viene alimentato a +5V (con la possibilità di connetterlo a +2.5V) tramite una resistenza che serve per il disaccoppiamento delle alimentazioni; per eliminare possibili disturbi tutte le uscite di abilitazione sono portate ai MAD tramite filtri R-C passa basso. L'interfaccia è completata dalla selezione dell'indirizzo, 2 *bit* preselezionabili mediante saldature più una abilitazione di gruppo esterna, e dalle resistenze di *pull-up* per le linee SDA e SCL.

Un'altra parte molto importante dei controlli è costituita dal sistema elettrico di iniezione di carica sugli ingressi della catena (*test pulse*): sono previste 2 linee ad impedenza controllata, circa 10 Ω , che iniettano ciascuna su metà dei canali (canali 1&2 e 3&4 di ogni MAD) tramite circuiti serie C-R per simulare in prima approssimazione la forma dei segnali provenienti dai tubi a deriva. Due partitori per ogni linea adattano l'impedenza ai classici 50 Ω richiesti dai cavi coassiali che portano il segnale di test e permettono di immettere il segnale a scelta dal lato sinistro o destro della scheda.

Sullo stesso foglio infine si trovano i *buffer* previsti per il disaccoppiamento della tensione di riferimento e di soglia, realizzati con un circuito integrato doppio amplificatore operazionale OPA2234 della Burr-Brown. Questo componente è stato scelto per il basso *offset* di ingresso sia in tensione che in corrente, il che permette di inserire una resistenza in serie senza degradare la precisione richiesta; altri vantaggi presentati da questo particolare dispositivo sono la capacità di pilotare alti carichi capacitivi ed il ridotto consumo di potenza nonostante la tecnologia bipolare.

Sul terzo foglio sono riportate le connessioni di ingresso e uscita. Il connettore di uscita è un componente SMD, scelto per il piccolo ingombro in altezza, a 40 *pin* di cui 8 sono usati per le alimentazioni e le tensioni di controllo W_CTRL, VREF e VTH. Un altro connettore denominato *Slow-Control* è previsto per la lettura delle tensioni di alimentazione e delle sonde di temperatura presenti sulla scheda, per le 2 linee I²C e per i 2 segnali di abilitazione delle uscite che sono comuni ai 4 MAD di ogni scheda.

Su queste ultime 2 linee differenziali sono poste in serie due resistenze che permettono il funzionamento in caso di mancanza di alimentazione su una scheda: infatti questo connettore è agganciato ad un bus realizzato con cavo piatto, che controlla in parallelo tutte le schede di un *superlayer* e che proviene da un microcontrollore esterno.

Una parte molto importante e curata della scheda di *frontend* è quella di ingresso: come già detto, per minimizzare la lunghezza dei collegamenti sono previsti 2 connettori SMD a 17 *pin* in cui ognuno degli 8 segnali è affiancato da *pin* collegati a massa allo scopo di ridurre il *crosstalk*. Sulla scheda *frontend* è prevista la rete di protezione contro le eventuali scariche che si dovessero sviluppare nel rivelatore: si tratta di una resistenza di tipo MELF 0207 e di un diodo doppio a bassa capacità ed alta corrente di picco. Questa combinazione di componenti si è dimostrata essere l'unica in grado di limitare in modo affidabile il picco di tensione che si sviluppa quando si verifica una scarica molto intensa fra il filo del rivelatore e la massa.

Per aumentare ulteriormente l'affidabilità del sistema il circuito di protezione comprende un dispositivo limitatore della tensione sul connettore d'ingresso: si tratta di due piazzole dorate ricavate sullo stampato della HVC a distanza di 100 μm l'una dall'altra, connesse fra ciascun segnale e massa, fra le quali si sviluppa una scarica quando la d.d.p. supera alcune centinaia di Volt.

Entrambi i circuiti stampati, quello di *frontend* e quello HVC, sono stati disegnati all'interno del Laboratorio di Elettronica della Sezione INFN di Padova, misurano rispettivamente $156 \times 44 \text{ mm}^2$ e $160 \times 11 \text{ mm}^2$ e sono realizzati in tecnologia multistrato. Qui sotto sono riportate le fotografie delle due schede assemblate con tutti i componenti.

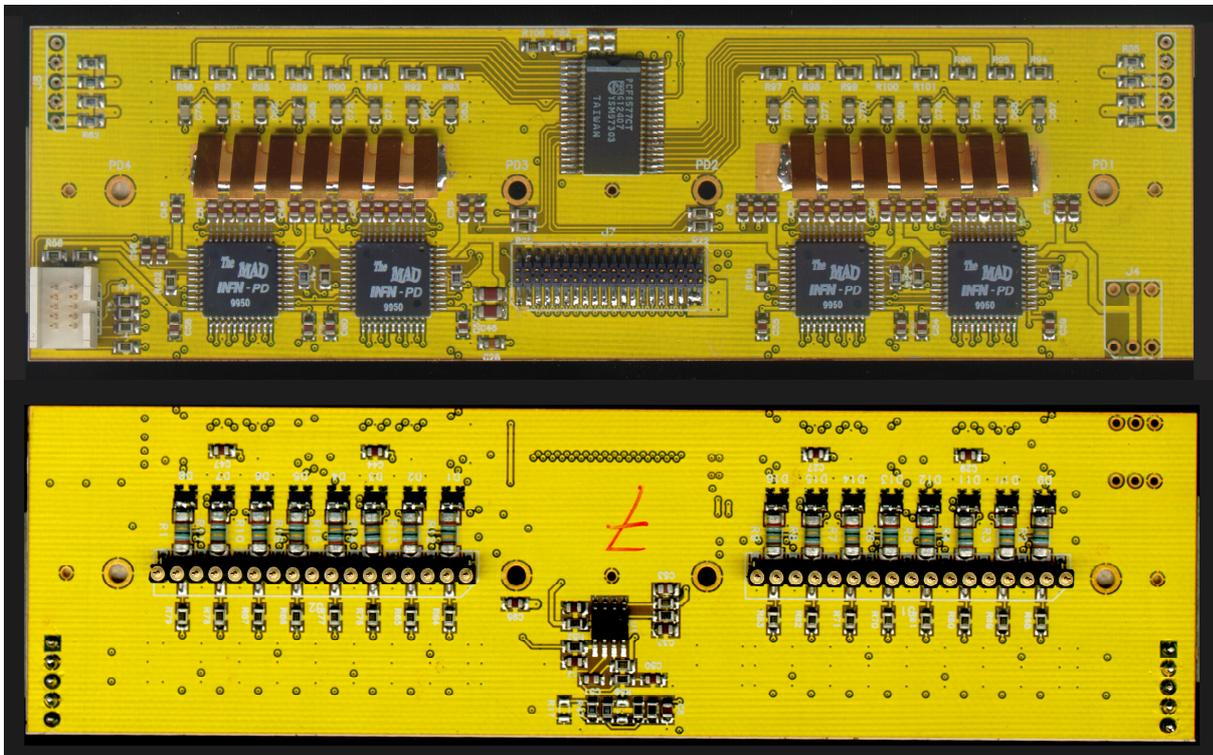


Figura 17:foto delle due facce della scheda di *frontend*

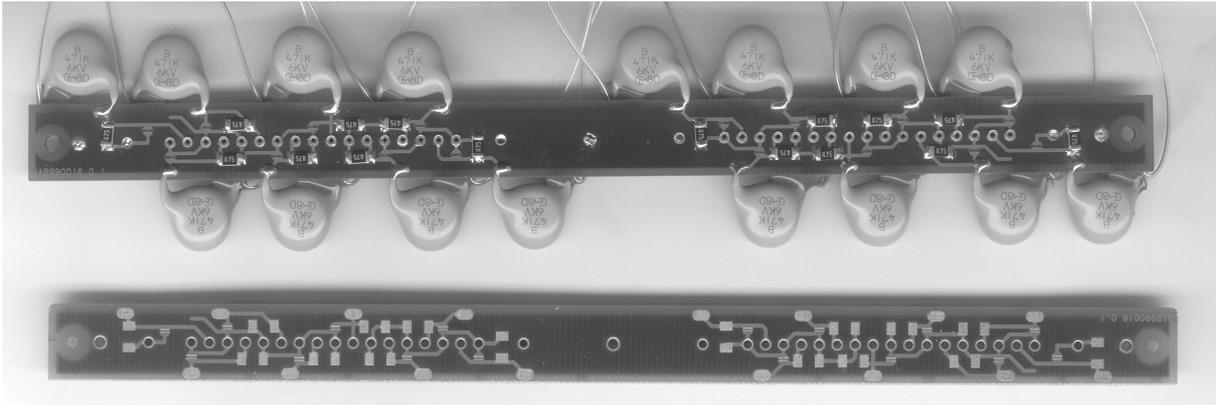


Figura 18: foto della scheda HVC con e senza i condensatori per le alte tensioni

La scheda frontend è stata prodotta in un totale di 12 prototipi, 2 equipaggiati con gli ASIC in contenitore ceramico oggetto delle prove di cui al capitolo 2 e 10 utilizzando una preserie di 40 *chip* in contenitore plastico quali saranno quelli usati nel rivelatore.

4.2 Test di funzionamento

Come già visto nel capitolo 2, le condizioni di polarizzazione degli ingressi del MAD, influiscono notevolmente sulla sua risposta. Le prove effettuate sul singolo *chip* sono state eseguite quindi anche sugli stessi montati sulle schede: si sono ripetute le misure della sensibilità, del rumore, delle correnti assorbite, della temperatura, del *crosstalk* tra i canali e del *time walk* sei segnali.

4.2.1 Apparato sperimentale:

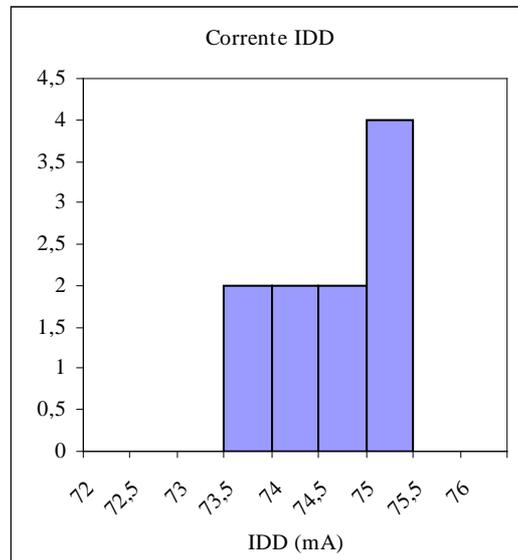
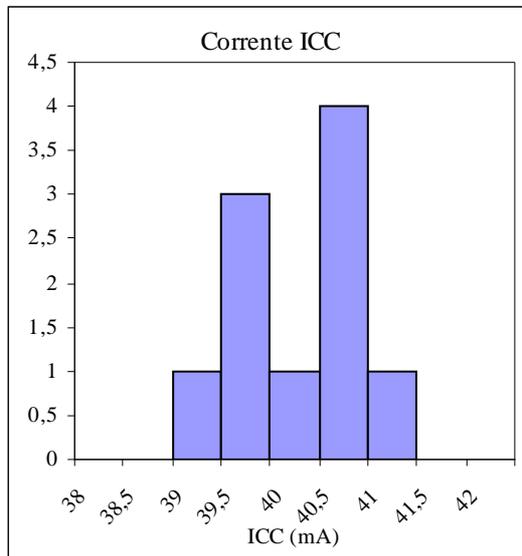
È stato necessario realizzare una nuova scheda di prova fornita di un doppio connettore simile a quello impiegato sulla scheda HVC per sostenere quella sotto test, in modo da replicare i collegamenti finali di massa e per iniettare segnali di carica sui 16 ingressi. Per questa funzione è stato replicato il circuito di distribuzione del *test pulse* implementato sul *frontend* dividendo i canali in due gruppi, pari e dispari, invece che a coppie, serviti da due connettori coassiali; l'iniezione avviene tramite una serie R-C con costante di tempo di circa 1ns e così si dispone di 2 configurazioni diverse per la misura del *crosstalk*.

Il resto della scheda di prova ricalca quanto già usato per il test dei singoli circuiti integrati, con punti di misura per tutte le tensioni significative e la generazione di tutti i livelli di controllo richiesti.

La strumentazione di misura impiegata, essendo il metodo basato sempre sullo studio della statistica dei segnali, è la stessa usata per il singolo *chip*, con l'aggiunta di un controllore esterno del bus I²C per verificare il funzionamento dell'interfaccia residente sulla scheda e la corretta programmazione delle abilitazioni.

4.2.2 Misura delle correnti assorbite

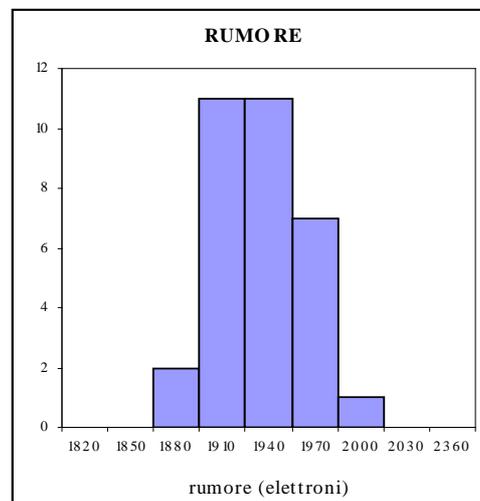
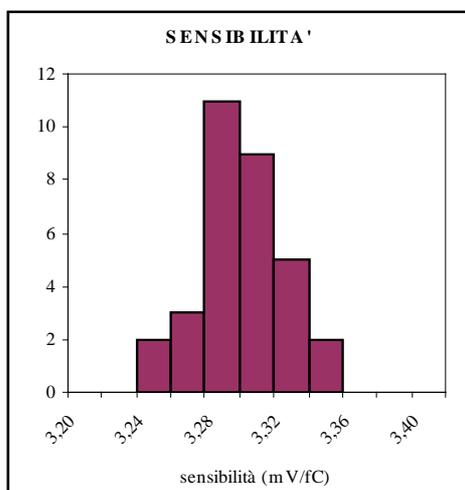
Sulle 10 schede con la versione plastica del MAD, si sono eseguite le misure delle correnti assorbite ICC e IDD relative alle due diverse alimentazioni. I risultati sono riportati nei due grafici sottostanti.



La potenza richiesta dalla singola scheda risulta essere in media di circa 400 mW, ugualmente divisa sulle due alimentazioni e con un minimo aumento rispetto a quella assorbita dai soli MAD.

4.2.3 Sensibilità e rumore

La prima serie di test è stata eseguita sulle due schede montate con i *chip* in contenitore ceramico, la prima con i MAD 1, 5, 3, 4 e la seconda con i MAD 2, 6, 7, 8. Secondo le modalità descritte nel capitolo 2, gli ingressi sono stati impulsati con segnali equivalenti a 3 fC , $3\text{ fC} + 3\sigma$ e 9 fC e sono stati calcolati sensibilità e rumore.

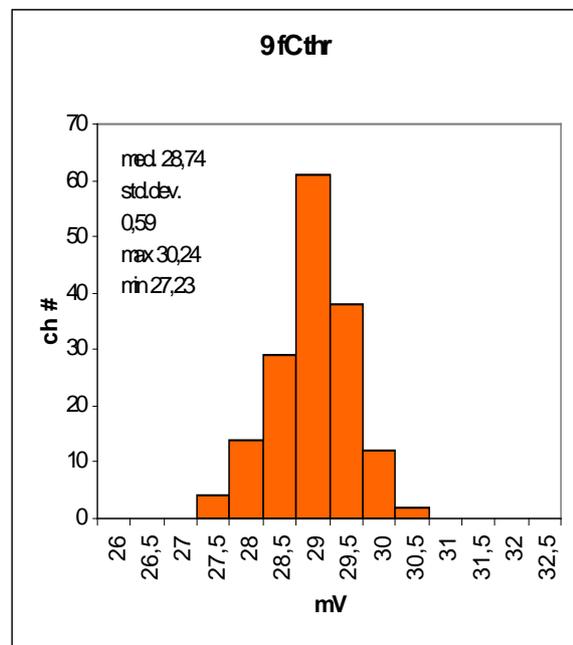
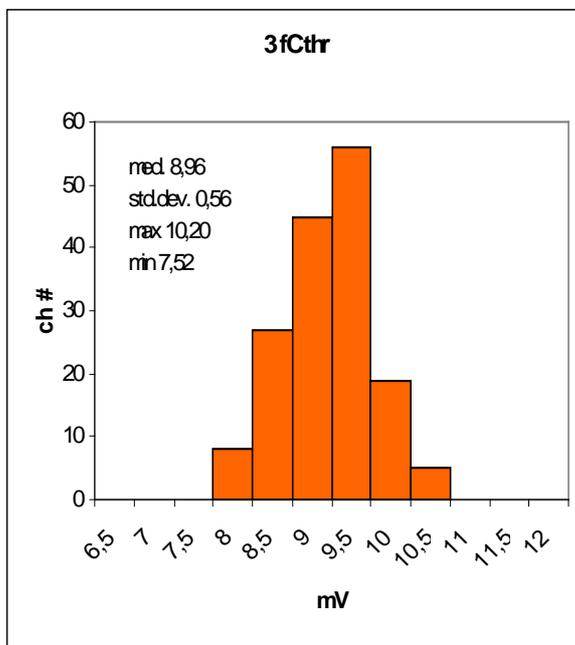


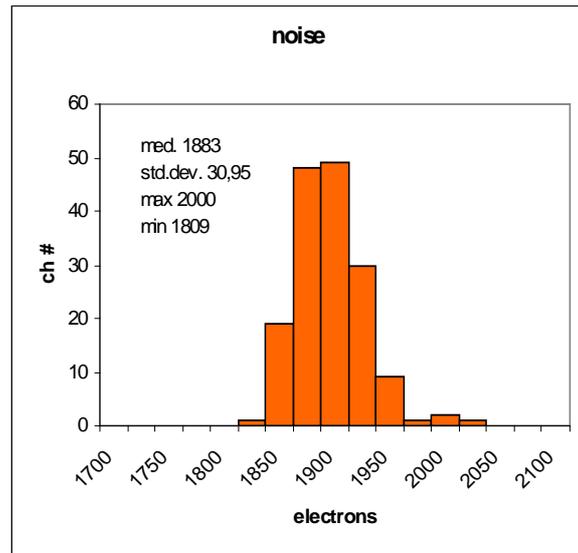
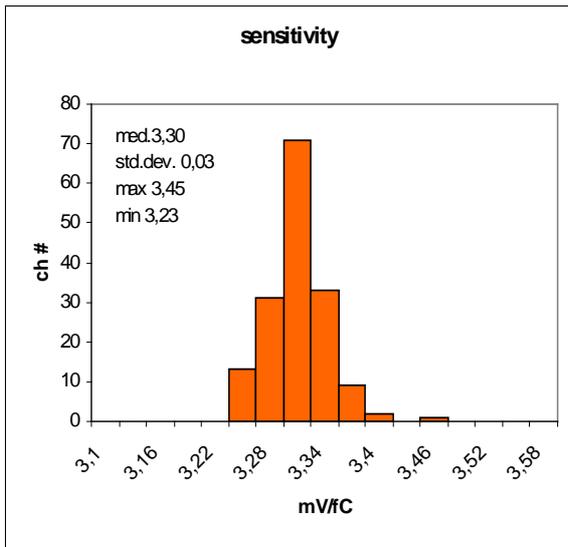
I risultati così ottenuti sono stati confrontati poi con quelli ottenuti per i singoli *chip*.

	<i>Chip singolo</i>					<i>Chip su scheda</i>				
	3 fC	3fC+3σ	9 fC	Sens.(mV/fC)	rumore	3 fC	3fC+3σ	9 fC	Sens.(mV/fC)	rumore
media	10,67	13,06	33,58	3,77	1317	8,62	11,65	28,30	3,28	1928
Std.dev	0,34	0,39	0,42	0,01	65	0,34	0,32	0,32	0,03	26
Max	11,41	13,88	34,55	3,80	1548	9,24	12,27	28,93	3,36	1985
min	9,90	12,24	32,67	3,73	1230	7,91	10,99	27,50	3,22	1882

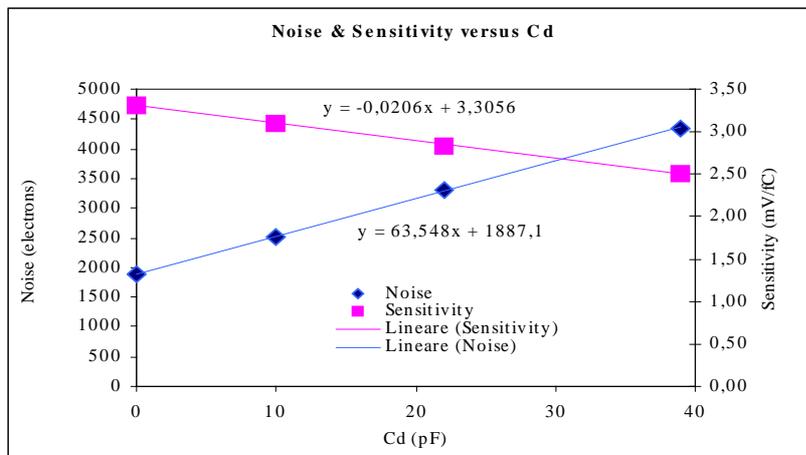
Osservando la tabella riassuntiva dei risultati ottenuti nelle due diverse configurazioni sperimentali, si può notare che gli effetti capacitivi introdotti dalla scheda di *frontend*, assieme alla costante di tempo del circuito di *test pulse*, riducono la sensibilità di circa il 14% e di conseguenza il rumore risulta aumentato di circa il 48%. Questi risultati, ottenuti in condizioni più simili a quelle operative nel rivelatore, rientrano all'interno dell'intervallo di valori richiesti dalle specifiche di progetto. L'uniformità della soglia rimane ottima sia a 3 fC che a 9 fC, con dispersione analoga a quella ottenuta nei test dei singoli *chip*.

Le stesse misure sono state eseguite in seguito sulle 10 schede equipaggiate con i MAD in contenitore plastico; si è fatta dunque una statistica su un campione abbastanza ampio di canali e i risultati ottenuti, riassunti nei seguenti grafici, sono stati molto soddisfacenti.





I risultati sono caratterizzati dalla stessa piccola dispersione ed anche qui si nota la diminuzione di sensibilità, provenendo gli integrati dallo stesso lotto, rispetto alle misure sui singoli integrati. Per valutare l'entità di questo effetto, si sono ripetute le misure di sensibilità e rumore inserendo una serie di capacità di diversi valori agli ingressi della scheda; i risultati ottenuti sono riassunti nel seguente grafico.



4.2.4 Crosstalk

Per misurare il *crosstalk* tra i diversi canali, vista l'ottima uniformità dei livelli di soglia, si è innanzitutto calcolato il valore medio della $V_{thr}(3\text{ fC})$ relativa alla scheda sotto test; impostando la soglia a tale valore si sono dapprima impulsati i canali dispari con una frequenza di segnale pari ad 1 MHz e si è variata l'ampiezza di questo segnale fino ad ottenere, in uscita dei canali pari non impulsati, una frequenza di conteggi di 500 KHz. Confrontando l'ampiezza dei segnali "inducenti" con quella dei segnali indotti, è stata calcolata la percentuale di carica indotta e quindi di *crosstalk*. La stessa procedura è stata seguita impulsando i canali pari e misurando il segnale indotto su quelli dispari. Queste misure di *crosstalk* sono state eseguite sia sulle due schede con

MAD ceramici sia su quelle con i *chip* plastici, ottenendo gli stessi risultati. Qui sotto sono riportati i dati ottenuti sulle prime due schede.

	channel	input (pC)	input (pC)	Crosstalk %		Channe 1	input (pC)	input (pC)	Crosstalk %
CHIP 1	1	pulsed	0.81	0,18	CHIP 2	1	pulsed	0.85	0,18
	2	0.70	pulsed	0,22		2	0.72	pulsed	0,21
	3	pulsed	0.66	0,23		3	pulsed	0.74	0,20
	4	0.74	pulsed	0,20		4	0.80	pulsed	0,19
CHIP 5	5	pulsed	0.77	0,19	CHIP 6	5	pulsed	0.75	0,20
	6	0.72	pulsed	0,21		6	0.73	pulsed	0,21
	7	pulsed	0.77	0,20		7	pulsed	0.74	0,20
	8	0.9	pulsed	0,17		8	0.92	pulsed	0,16
CHIP 3	9	pulsed	0.91	0,16	CHIP 7	9	pulsed	0.98	0,15
	10	0.75	pulsed	0,20		10	0.69	pulsed	0,22
	11	pulsed	0.77	0,22		11	pulsed	0.78	0,19
	12	0.69	pulsed	0,22		12	0.69	pulsed	0,22
CHIP 4	13	pulsed	0.76	0,20	CHIP 8	13	pulsed	0.79	0,19
	14	0.70	pulsed	0,21		14	0.75	pulsed	0,20
	15	pulsed	0.71	0,21		15	pulsed	0.73	0,20
	16	0.86	pulsed	0,18		16	0.98	pulsed	0,15

Sfruttando poi il circuito per gli impulsi di test implementato sulla scheda, in cui i canali di ogni MAD sono attivati secondo le coppie 1&2 e 3&4, la misura è stata ripetuta con le stesse modalità del caso precedente.

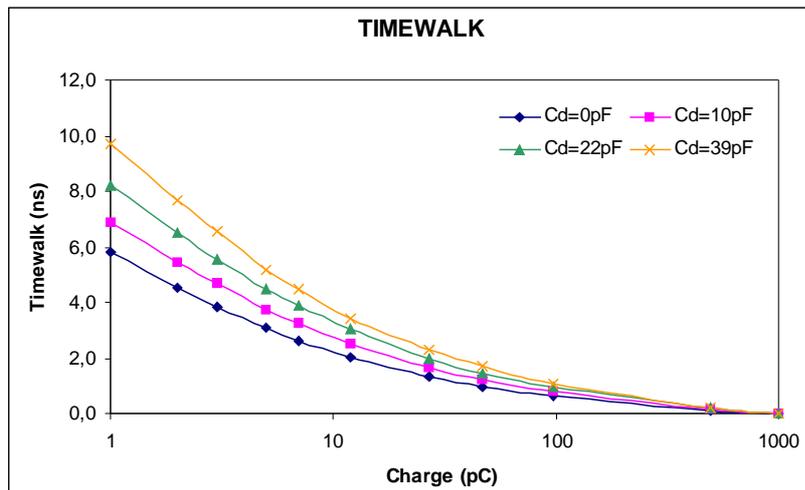
	channel	rate	input (pC)	rate	input (pC)	Crosstalk %
CHIP 1	1	1 KHz	1.32		pulsed	
	2	500 KHz	1.15		pulsed	0,17
	3		pulsed	500 KHz	1.00	0,20
	4		pulsed	500 KHz	1.20	0,16
CHIP 5	5	500 KHz	1.26		pulsed	0,16
	6	500 KHz	1.16		pulsed	0,17
	7		pulsed	500 KHz	1.20	0,16
	8		pulsed	200 Hz	1.32	
CHIP 3	9	600 Hz	1.32		pulsed	
	10	500 KHz	1.19		pulsed	0,17
	11		pulsed	500 KHz	0.98	0,20
	12		pulsed	500 KHz	1.05	0,19
CHIP 4	13	500 KHz	1.18		pulsed	0,17
	14	500 KHz	1.06		pulsed	0,19
	15		pulsed	500 KHz	0.96	0,21
	16		pulsed	130 Hz	1.32	

I dati raccolti nelle due tabelle precedenti sono praticamente coincidenti e testimoniano del fatto che le schede non modificano in maniera sostanziale le ottime prestazioni del MAD e che quindi i circuiti stampati sono stati progettati accuratamente.

Nell'ultima serie di misure si può notare che per i due canali più esterni (1 e 16) e i due centrali (8 e 9) non si riesce a raggiungere la frequenza di 500 KHz: questo probabilmente perché, essendo i canali esterni delle due serie di 8 appartenenti ai due connettori d'ingresso, risentono dell'accoppiamento con un solo canale adiacente .

4.2.5 Time walk

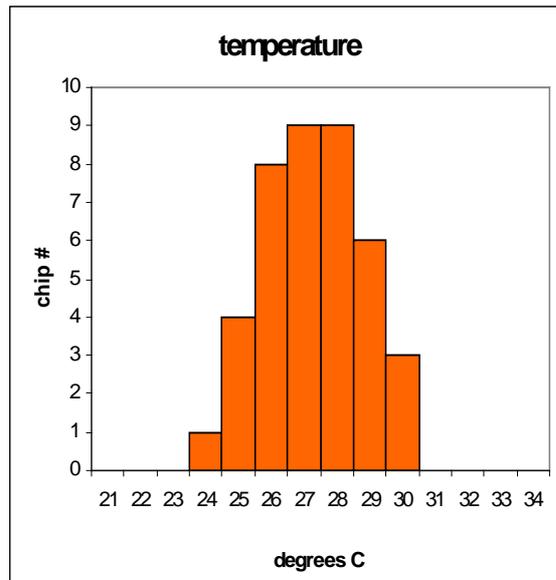
Dalle prove eseguite sul singolo *chip*, era risultato che il ritardo del segnale in uscita, oltre che dall'ampiezza dei segnali, dipendeva anche dalla capacità in ingresso di ogni canale. Si è dunque misurata tale dipendenza, utilizzando la serie di valori di capacità già impiegata per le prove di sensibilità e rumore.



Dal grafico risulta evidente la dipendenza del *time walk* dalla capacità, soprattutto per segnali appena al di sopra del valore della soglia; tali effetti si mantengono comunque abbastanza limitati.

4.2.6 Sonde di temperatura

In una prima serie di prove è stata misurata la tensione presente sul *pin* <T> dei singoli integrati, a monte delle resistenze usate per mediare le uscite dei 4 *chip* montati su ciascuna scheda. Sono stati così controllati i 40 dispositivi in contenitore plastico. Le misure sono state eseguite in momenti diversi dello stesso giorno e la temperatura esterna, pur essendo l'ambiente climatizzato a circa 23°C, poteva variare di circa $\pm 1^\circ\text{C}$ (condizioni simili a quelle della camera climatica). Convertendo le tensioni nelle equivalenti temperature (esprese in gradi centigradi), si ottiene l'istogramma seguente:



L'uniformità, pur tenendo in considerazione le condizioni della misura, appare buona, con un errore di circa $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ fra le varie sonde. Anche l'autoriscaldamento, come già notato, è piuttosto ridotto.

L'ultima verifica riguarda il comportamento del *buffer* di uscita relativo al *pin* T_OUT quando più *chip* sono connessi alla stessa linea: in questo caso infatti è previsto che vi sia un leggero aumento della tensione, e quindi della temperatura) dovuta alle correnti (di "riposo") dei *buffer* a temperatura più bassa. Le misure sono state fatte sulla scheda dei MAD 1, 5, 3 e 4 ed il dato interessante in questo caso sono i 4°C di differenza fra il più alto valore del *chip* singolo (per eseguire questo test è stata usata l'abilitazione via I²C) e quello che si ottiene quando tutti sono abilitati.

CHIP	T_OUT(V)	T_OUT($^{\circ}\text{C}$)
1	2,2501	28,9033
5	2,2365	27,0900
3	2,2514	29,0767
4	2,2475	28,5567
1 5	2,2638	30,7300
1 3	2,2703	31,5967
1 4	2,2500	28,8900
5 3	2,2647	30,8500
5 4	2,2622	30,5167
3 4	2,2691	31,4367
1 5 3	2,2777	32,5833
1 5 4	2,2760	32,3567
1 3 4	2,2803	32,9300
5 3 4	2,2765	32,4233
1 5 3 4	2,2855	33,6233
T_OUT disabil.	0,3008	

Conclusioni

Il test dell'elettronica di *frontend* ha portato alla caratterizzazione e alla definizione di questa parte del rivelatore di muoni dell'esperimento CMS. In particolare il circuito integrato sviluppato all'interno della sezione dell'INFN di Padova ha dimostrato di soddisfare pienamente le esigenze poste dalle caratteristiche del rivelatore.

I test, non ancora completati, hanno dimostrato che gli obiettivi fondamentali di questo sviluppo sono stati pienamente raggiunti: ottima uniformità delle caratteristiche di sensibilità, rumore e *crosstalk* permettono di lavorare a valori molto bassi di soglia, massimizzando così l'efficienza e la risoluzione temporale del rivelatore. Anche la variazione dei tempi di risposta si è dimostrata molto contenuta per un'ampia gamma di segnali in ingresso.

Le funzionalità di mascheratura, previste per gli ingressi e le uscite, e la sonda di temperatura incorporata permettono un ampio controllo del funzionamento della catena di *readout* e di *trigger*. La robustezza del progetto è stata verificata variando in un ampio *range* la temperatura di funzionamento, cosa resa possibile anche dal basso consumo di potenza. Il MAD, in quest'ultima versione, si è dimostrato dunque un ottimo componente per l'uso nei tubi a deriva del rivelatore CMS.

Visto l'alto numero di funzionalità direttamente integrate nel MAD, la scheda di *frontend*, anch'essa sviluppata all'interno della sezione dell'INFN di Padova, risulta alleggerita di numerosi componenti discreti, con un guadagno dello spazio richiesto e dell'affidabilità. Le stringenti richieste riguardanti *crosstalk*, rumore e prevenzione dalle scariche elettrostatiche hanno comportato uno studio accurato della disposizione delle varie parti da montare sulle due facce della scheda, ottimizzando lo spazio a disposizione; è stato messo a punto un robusto sistema di protezione dalle scariche elettrostatiche, necessario a causa dell'alta energia immagazzinata nei condensatori di accoppiamento ai fili del rivelatore.

Per quanto riguarda il prototipo di *chip I²C custom*, non avendo per il momento dimostrato caratteristiche idonee per questa applicazione, ad esso è stato preferito il *chip* commerciale già utilizzato in precedenza.

Il sistema così realizzato equipaggerà al più presto una camera a fili nella sua versione finale, che sarà utilizzata per prove esaustive su fascio di test prima dell'inizio della produzione in grandi numeri richiesti dall'esperimento.

Appendice al capitolo 2

Tabella dei dati relativi a sensibilità e rumore calcolati per i singoli *chip*

	canale	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sens.(mV)	noise(el) 3fC	Rin Ω	Correz.
MAD 1	1	10,10	12,48	32,87	35,43	3,771	1315	50,63	1,006
	2	10,80	13,09	33,87	36,28	3,777	1263	51,84	1,018
	3	10,43	12,77	33,08	35,59	3,757	1297	50,47	1,005
	4	10,83	13,21	33,87	36,41	3,773	1314	51,80	1,018
MAD 2	1	10,63	13,43	33,38	36,38	3,768	1548	50,63	1,006
	2	10,67	13,01	33,71	36,28	3,772	1292	51,84	1,018
	3	10,72	13,20	33,42	35,99	3,766	1372	50,47	1,005
	4	11,20	13,78	34,28	37,08	3,780	1422	51,80	1,018
MAD 3	1	10,58	13,06	33,41	36,06	3,781	1366	50,63	1,006
	2	10,44	12,75	33,53	35,98	3,780	1273	51,84	1,018
	3	9,90	12,24	32,67	35,20	3,777	1291	50,47	1,005
	4	10,74	13,29	33,86	36,61	3,786	1403	51,80	1,018
MAD 4	1	10,79	13,23	33,48	36,12	3,758	1353	50,63	1,006
	2	10,28	12,56	33,38	35,85	3,782	1256	51,84	1,018
	3	10,73	13,00	33,50	35,90	3,777	1252	50,47	1,005
	4	11,41	13,88	34,55	37,16	3,790	1358	51,80	1,018
MAD 5	1	10,50	12,89	33,33	35,91	3,781	1317	50,63	1,006
	2	10,14	12,44	33,20	35,66	3,775	1269	51,84	1,018
	3	10,53	12,90	33,27	35,87	3,772	1309	50,47	1,005
	4	10,28	12,75	33,36	36,05	3,780	1361	51,80	1,018
MAD 6	1	11,14	13,63	33,84	36,46	3,760	1380	50,63	1,006
	2	11,04	13,43	34,26	36,80	3,801	1310	51,84	1,018
	3	10,80	13,07	33,53	36,00	3,771	1254	50,47	1,005
	4	10,50	12,89	33,63	36,22	3,788	1314	51,80	1,018
MAD 7	1	10,79	13,13	33,65	36,26	3,786	1288	50,63	1,006
	2	10,43	12,80	33,50	35,97	3,777	1307	51,84	1,018
	3	10,75	13,05	33,61	36,10	3,792	1264	50,47	1,005
	4	11,25	13,77	34,30	37,00	3,775	1391	51,80	1,018
MAD 8	1	10,44	12,72	32,96	35,39	3,730	1273	50,63	1,006
	2	10,95	13,17	33,92	36,29	3,760	1230	51,84	1,018
	3	10,83	13,09	33,44	35,86	3,751	1255	50,47	1,005
	4	10,80	13,10	33,88	36,31	3,780	1268	51,80	1,018

	media	stand. dev.	min	max	st.dev. (%)
Vth@3fC (mV)	10,67	0,34	9,90	11,41	3,2
Vth@9fC (mV)	33,58	0,42	32,67	34,55	1,2
sens. (mV)	3,77	0,01	3,73	3,80	0,4
noise (el)	1318	65	1230	1548	5,0

Dati relativi a sensibilità e rumore per diverse condizioni agli ingressi

MAD 1: Cd=40pF, R=39Ohm							
channel	3fC	3fC+3 σ	9fC	9fC+3 σ	sens.(mV)	med.noise (el)	noise(el) at 3fC
1							
2	8,46	13,34	25,64	30,82	2,813	3726	3615
3	8,22	13,10	25,22	30,54	2,820	3768	3605
4							

MAD 1: Cd=40pF, R=39Ohm, diode							
channel	3fC	3fC+3 σ	9fC	9fC+3 σ	sens.(mV)	med.noise (el)	noise(el) at 3fC
1							
2							
3	8,20	13,11	25,02	30,32	2,790	3812	3666
4							

MAD 1: R=39Ohm, diode							
channel	3fC	3fC+3 σ	9fC	9fC+3 σ	sens.(mV)	med.noise (el)	noise(el) at 3fC
1							
2	10,83	13,48	33,87	36,59	3,772	1483	1464
3	10,39	13,21	33,02	36,06	3,754	1626	1565
4							

MAD 1: Cd=40pF, R=39Ohm, diode							
channel	3fC	3fC+3 σ	9fC	9fC+3 σ	sens.(mV)	med.noise (el)	noise(el) at 3fC
1							
2	8,70	14,06	25,69	31,43	2,781	4157	4015
3	8,23	13,39	25,02	30,62	2,785	4024	3860
4							

Dati relativi al time walk dei segnali

Charge (fC)		Channel 1 Vth=10,24 mV (3fC)			Channel 2 Vth=10,85 mV (3fC)			Channel 3 Vth=10,48 mV (3fC)			Channel 4 Vth=10,92 mV (3fC)		
Over Thr	Input	tw (ns)	Cd=0, Thr=3fC	sigma (ps)	tw (ns)	Cd=0, Thr=3fC	sigma (ps)	tw (ns)	Cd=0, Thr=3fC	sigma (ps)	tw (nsec)	Cd=0, Thr=3fC	sigma (ps)
1	4	55,40	3,33	500	55,55	3,43	350	55,73	3,51	340	55,97	3,56	380
2	5	54,60	2,53	260	54,65	2,53	180	54,90	2,68	230	55,10	2,69	190
3	6	54,13	2,06	180	54,23	2,11	140	54,41	2,19	140	54,64	2,23	170
4	7	53,85	1,78	145	53,97	1,85	100	54,11	1,89	115	54,34	1,93	130
5	8	53,68	1,61	135	53,76	1,64	100	53,90	1,68	95	54,11	1,70	120
6	9	53,50	1,43	120	53,59	1,47	88	53,74	1,52	80	53,97	1,56	90
7	10	53,40	1,33	110	53,48	1,36	80	53,60	1,38	80	53,82	1,41	80
12	15	53,00	0,93	70	53,09	0,97	50	53,19	0,97	60	53,41	1,00	55
17	20	52,79	0,72	65	52,88	0,76	50	52,99	0,77	48	53,20	0,79	50
27	30	52,59	0,52	50	52,66	0,54	40	52,77	0,55	40	52,97	0,56	42
37	40	52,46	0,39	38	52,54	0,42	35	52,65	0,43	32	52,84	0,43	33
47	50	52,42	0,35	40	52,49	0,37	30	52,60	0,38	30	52,78	0,37	31
97	100	52,29	0,22	30	52,35	0,23	24	52,45	0,23	27	52,64	0,23	30
497	500	52,05	-0,02	20	52,11	-0,01	20	52,21	-0,01	23	52,40	-0,01	25
997	1000	52,07	0,00	26	52,12	0,00	20	52,22	0,00	22	52,41	0,00	20

Charge (fC)		Media (3fC)		
Over Thr.	Input	tw (nsec)	Cd=0, Thr=3fC	sigma (ps)
1	4	55,66	3,46	393
2	5	54,81	2,61	215
3	6	54,35	2,15	158
4	7	54,07	1,86	123
5	8	53,86	1,66	113
6	9	53,70	1,50	95
7	10	53,58	1,37	88
12	15	53,17	0,97	59
17	20	52,97	0,76	53
27	30	52,75	0,54	43
37	40	52,62	0,42	35
47	50	52,57	0,37	33
97	100	52,43	0,23	28
497	500	52,19	-0,01	22
997	1000	52,21	0,00	22

Charge (fC)		Channel 1 40pF Vth=11,75 mV (4fC)			Channel 2 40pF Vth=12,44 mV (4fC)			Channel 3 40pF Vth=12,18 mV (4fC)			Channel 4 40pF Vth=12,57 mV (4fC)		
Over Thr	Input	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC	sigma (ps)									
1	5	60,20	7,49	1100	60,00	7,39	1200	60,50	7,84	1200	60,50	7,68	1200
2	6	58,70	5,99	800	58,50	5,89	700	58,50	5,84	800	58,80	5,98	750
3	7	57,70	4,99	580	57,60	4,99	430	57,70	5,04	540	58,20	5,38	600
4	8	57,20	4,49	450	57,10	4,49	470	57,30	4,64	480	57,40	4,58	470
5	9	56,90	4,19	400	56,70	4,09	320	56,80	4,14	440	56,90	4,08	400
6	10	56,40	3,69	300	56,40	3,79	320	56,30	3,64	300	56,58	3,76	290
11	15	55,50	2,79	230	55,30	2,69	210	55,40	2,74	230	55,56	2,74	250
16	20	54,92	2,21	170	54,80	2,19	160	54,90	2,24	190	55,06	2,24	180
26	30	54,41	1,70	140	54,34	1,73	120	54,38	1,72	150	54,52	1,70	130
36	40	54,10	1,39	115	54,06	1,45	110	54,11	1,45	115	54,25	1,43	110
46	50	53,95	1,24	90	53,81	1,20	90	53,91	1,25	110	54,07	1,25	90
96	100	53,51	0,80	70	53,40	0,79	60	53,46	0,80	80	53,61	0,79	70
496	500	52,87	0,16	45	52,75	0,14	45	52,79	0,13	40	52,97	0,15	40
996	1000	52,71	0,00	36	52,61	0,00	35	52,66	0,00	39	52,82	0,00	40

Charge (fC)		Media 40pF, (4fC)		
Over Thr	Input	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC	sigma (ps)
1	5	60,30	7,60	1175
2	6	58,63	5,93	763
3	7	57,80	5,10	538
4	8	57,25	4,55	468
5	9	56,83	4,13	390
6	10	56,42	3,72	303
11	15	55,44	2,74	230
16	20	54,92	2,22	175
26	30	54,41	1,71	135
36	40	54,13	1,43	113
46	50	53,94	1,24	95
96	100	53,50	0,80	70
496	500	52,85	0,15	43
996	1000	52,70	0,00	38

Charge (fC)		Channel 2 40pF&39Ohm Vth=11,28 mV (5fC)			Channel 3 40pF&39Ohm Vth=11,00 mV (4fC)			Media 40pF&39Ohm (4fC)		
Over Thr	Input	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC, R=39Ohm	sigma (ps)	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC, R=39Ohm	sigma (ps)	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC, R=39Ohm	sigma (ps)
1	5	61,00	8,22	1400	61,00	8,20	1300	61,00	8,21	1350
2	6	59,40	6,62	970	60,00	7,20	1200	59,70	6,91	1085
3	7	58,70	5,92	710	58,60	5,80	780	58,65	5,86	745
4	8	57,90	5,12	570	57,90	5,10	600	57,90	5,11	585
5	9	57,35	4,57	480	57,50	4,70	480	57,43	4,64	480
6	10	57,03	4,25	430	57,13	4,33	400	57,08	4,29	415
11	15	55,87	3,09	260	55,92	3,12	270	55,90	3,11	265
16	20	55,32	2,54	220	55,34	2,54	210	55,33	2,54	215
26	30	54,69	1,91	155	54,74	1,94	160	54,72	1,93	158
36	40	54,39	1,61	133	54,42	1,62	130	54,41	1,62	132
46	50	54,18	1,40	126	54,24	1,44	123	54,21	1,42	125
96	100	53,69	0,91	85	53,72	0,92	80	53,71	0,91	83
496	500	52,96	0,18	48	52,98	0,18	52	52,97	0,18	50
996	1000	52,78	0,00	46	52,80	0,00	44	52,79	0,00	45

Charge (fC)		Channel 3 40 fC 39Ohm diode Vth=10,91 mV (4fC)		
Over Thr	Input	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC, R=39Ohm, diode	sigma (ps)
1	5	61,50	8,93	1600
2	6	59,30	6,73	1200
3	7	58,30	5,73	750
4	8	57,60	5,03	550
5	9	57,20	4,63	510
6	10	56,90	4,33	440
11	15	55,60	3,03	290
16	20	55,09	2,52	220
26	30	54,50	1,93	160
36	40	54,14	1,57	130
46	50	53,95	1,38	126
96	100	53,46	0,89	80
496	500	52,74	0,17	52
996	1000	52,57	0,00	45

Charge (fC)		Channel 2 40pF, 390hm, diode Vth=11,47 mV (4fC)			Channel 3 40pF, 390hm, diode Vth=10,95 mV (4fC)			Media 40pF, 390hm, diode (4 fC)		
Over Thr	Input	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC, R=390hm, diode	sigma (ps)	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC, R=390hm, diode	sigma (ps)	tw (ns)	Thr=4fC, R=390hm, diode, Cd=40pF	sigma (ps)
1	5	61,30	8,58	1800	61,50	8,70	1900	482,85	8,64	1850
2	6	59,50	6,78	11300	60,00	7,20	1400	2856,57	6,99	6350
3	7	58,60	5,88	780	58,70	5,90	800	225,80	5,89	790
4	8	57,90	5,18	650	58,15	5,35	700	192,81	5,27	675
5	9	57,50	4,78	640	57,60	4,80	650	189,97	4,79	645
6	10	57,03	4,31	460	57,10	4,30	500	144,61	4,31	480
11	15	55,92	3,20	285	56,03	3,23	330	100,04	3,22	308
16	20	55,28	2,56	240	55,40	2,60	270	88,31	2,58	255
26	30	54,67	1,95	160	54,79	1,99	200	67,85	1,97	180
36	40	54,37	1,65	140	54,47	1,67	150	62,62	1,66	145
46	50	54,14	1,42	140	54,27	1,47	150	62,46	1,45	145
96	100	53,64	0,92	95	53,76	0,96	85	50,83	0,94	90
496	500	52,91	0,19	57	53,02	0,22	55	40,78	0,21	56
996	1000	52,72	0,00	48	52,80	0,00	50	38,38	0,00	49

Charge (fC)		Channel 2 40pF, 390hm, diode Vth=11,47 mV (4fC)			Channel 3 40pF, 390hm, diode Vth=10,95 mV (4fC)			Media 40pF, 390hm, diode (4 fC)		
Over Thr	Input	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC, R=390hm, diode	sigma (ps)	tw (ns)	Cd=40pF, Thr=4fC, R=390hm, diode	sigma (ps)	tw (ns)	Thr=4fC, R=390hm, diode, Cd=40pF	sigma (ps)
1	5	61,30	8,58	1800	61,50	8,70	1900	482,85	8,64	1850
2	6	59,50	6,78	11300	60,00	7,20	1400	2856,57	6,99	6350
3	7	58,60	5,88	780	58,70	5,90	800	225,80	5,89	790
4	8	57,90	5,18	650	58,15	5,35	700	192,81	5,27	675
5	9	57,50	4,78	640	57,60	4,80	650	189,97	4,79	645
6	10	57,03	4,31	460	57,10	4,30	500	144,61	4,31	480
11	15	55,92	3,20	285	56,03	3,23	330	100,04	3,22	308
16	20	55,28	2,56	240	55,40	2,60	270	88,31	2,58	255
26	30	54,67	1,95	160	54,79	1,99	200	67,85	1,97	180
36	40	54,37	1,65	140	54,47	1,67	150	62,62	1,66	145
46	50	54,14	1,42	140	54,27	1,47	150	62,46	1,45	145
96	100	53,64	0,92	95	53,76	0,96	85	50,83	0,94	90
496	500	52,91	0,19	57	53,02	0,22	55	40,78	0,21	56
996	1000	52,72	0,00	48	52,80	0,00	50	38,38	0,00	49

Tabelle dei dati relativi alle prove in temperatura

	temperature (°C)	3fC	3fC+3σ	9fC	sense	noise	correct sense	correcte noise	parametri di correzione	
channel 1	-35	10,21	12,96	32,90	3,782	1515	3,560	1609	1,021	C=1,04 R=52,18 Ohm
	0	10,86	13,90	34,12	3,877	1634	3,650	1735	1,021	
	25	10,95	13,67	34,71	3,960	1431	3,728	1520	1,021	
	50	11,30	13,93	35,33	4,005	1368	3,771	1453	1,021	
	75	11,51	14,06	35,87	4,060	1308	3,822	1390	1,021	
	100	11,80	14,47	36,23	4,072	1366	3,833	1451	1,021	
	125	11,39	14,46	36,28	4,148	1542	3,905	1638	1,021	
channel 2	-35	10,31	13,09	34,05	3,957	1464	3,730	1553	1,020	C=1,04 R=52,04 Ohm
	0	10,81	13,80	35,31	4,083	1526	3,849	1618	1,020	
	25	11,10	13,85	35,98	4,147	1382	3,909	1466	1,020	
	50	11,41	13,96	36,62	4,202	1264	3,961	1341	1,020	
	75	11,65	14,26	37,13	4,247	1280	4,003	1358	1,020	
	100	11,80	14,35	37,52	4,287	1239	4,041	1315	1,020	
	125	11,65	14,90	37,66	4,335	1562	4,087	1657	1,020	
channel 3	-35	11,57	14,77	36,61	4,173	1597	3,938	1693	1,019	C=1,04 R=51,93 Ohm
	0	11,97	14,96	37,86	4,315	1444	4,072	1530	1,019	
	25	12,36	15,21	38,67	4,385	1354	4,138	1435	1,019	
	50	12,61	15,13	39,28	4,445	1181	4,195	1252	1,019	
	75	12,94	15,45	39,78	4,473	1169	4,221	1239	1,019	
	100	13,13	15,76	40,23	4,517	1213	4,262	1286	1,019	
	125	12,83	15,85	40,37	4,590	1371	4,331	1453	1,019	
channel 4	-35	10,23	13,26	33,09	3,810	1657	3,589	1759	1,021	C=1,04 R=52,13 Ohm
	0	10,59	13,61	34,21	3,937	1598	3,708	1697	1,021	
	25	10,83	13,73	34,90	4,012	1506	3,779	1599	1,021	
	50	11,10	13,85	35,43	4,055	1413	3,819	1500	1,021	
	75	11,40	14,25	35,93	4,088	1452	3,851	1542	1,021	
	100	11,39	14,00	36,17	4,130	1317	3,890	1398	1,021	
	125	10,95	14,11	36,10	4,192	1571	3,948	1667	1,021	

temperature (°C)	BYP (V)	Wctrl (V)	Icc (mA)	Idd (mA)
-35	2,448	3,344	11,34	17,68
0	2,287	3,472	10,97	18,74
25	2,153	3,574	10,71	19,09
50	2,024	3,756	10,44	19,00
75	1,894	3,824	10,10	18,60
100	1,758	3,898	9,76	18,39
125	1,617	4,056	9,53	17,99

temperature (°C)	Vin (V)				
	In 1	In 2	In 3	In 4	media
-35	0,8658	0,8651	0,8650	0,8656	0,8654
0	0,8097	0,8089	0,8090	0,8096	0,8093
25	0,7677	0,7664	0,7660	0,7663	0,7666
50	0,7262	0,7257	0,7256	0,7259	0,7259
75	0,6845	0,6837	0,6835	0,6839	0,6839
100	0,6401	0,6394	0,6392	0,6394	0,6395
125	0,5964	0,5957	0,5950	0,5942	0,5953

temperature (°C)	Out_n 1	Out_n 2	Out_n 3	Out_n 4	Out_n media	Out_p 1	Out_p 2	Out_p 3	Out_p 4	Out_p media	C. M.	D. M.
-35	1,0995	1,0907	1,0920	1,0878	1,0925	1,3802	1,3746	1,3758	1,3747	1,3763	1,2344	0,2838
0	1,0677	1,0687	1,0700	1,0659	1,0681	1,3924	1,3905	1,3901	1,3909	1,3910	1,2295	0,3229
25	1,0460	1,0460	1,0471	1,0441	1,0458	1,3660	1,3635	1,3642	1,3640	1,3644	1,2051	0,3186
50	1,0117	1,0061	1,0073	1,0099	1,0088	1,3240	1,3266	1,3275	1,3225	1,3252	1,1670	0,3164
75	0,9683	0,9684	0,9758	0,9663	0,9697	1,2797	1,2773	1,2738	1,2776	1,2771	1,1234	0,3074
100	0,9272	0,9274	0,9285	0,9253	0,9271	1,2249	1,2223	1,2235	1,2227	1,2234	1,0752	0,2963
125	0,8866	0,8878	0,8841	0,8809	0,8849	1,1698	1,1588	1,1601	1,1591	1,1620	1,0234	0,2771

R (Ω)	signal width						
	T=-35°C	T=0°C	T=25°C	T=50°C	T=75°C	T=100°C	T=125°C
Corto circuito	12	11	11	10	10	9	9
10 K	15	14	13	12	12	10	10
56 K	47	38	31	26	23	18	16
100 K	70	63	57	50	43	34	25
220 K	114	103	93	81	68	51	38
560 K	186	170	152	129	102	77	55
1 M	231	213	189	156	124	90	64
5,6 M	313	290	252	207	160	114	80
10M	324	301	262	211	166	118	84
Circuito abierto	340	315	273	221	171	123	87

T (°C)	T_sonda (V)	T_out (V)	<T> (V)	T_sonda (°C)	T_out (°C)	<T> (°C)
-35	1,1828	1,7741	1,7758	-36,4	-36,5	-36,2
0	1,3526	2,0364	2,0381	-2,5	-1,5	-1,3
25	1,4825	2,2297	2,2316	23,5	24,3	24,5
50	1,6050	2,4155	2,4175	48,0	49,1	49,3
75	1,7276	2,5989	2,6002	72,5	73,5	73,7
100	1,8561	2,7886	2,7900	98,2	98,8	99,0
125	1,9810	2,9754	2,9771	123,2	123,7	123,9

Appendice al capitolo 3

Il bus I²C

Il bus I²C è un bus seriale *multimaster* sviluppato dalla Philips, che utilizza per le comunicazioni due linee bidirezionali: una di dati SDA (*Serial Data line*) e una di *clock* SCL (*Serial Clock line*), mantenute generalmente ad un livello alto (bus libero) da due resistenze di *pull-up* e che possono essere connesse a più integrati distinguibili tramite un indirizzo. Queste linee devono essere pilotate da dispositivi *open drain* oppure *open collector*.

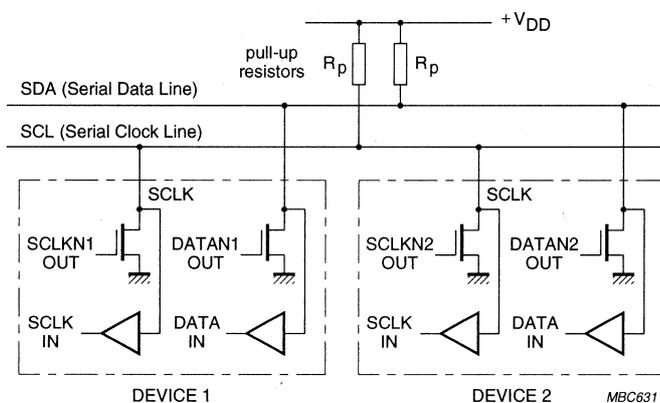


Figura 19: Connessione di due dispositivi alle linee del bus I²C

Per questo uso si può prescindere dalla fase di arbitraggio, che assegna il controllo ad un MASTER, e dell'equalizzazione della durata dell'impulso di *clock* (cfr. Philips semiconductor, *82B715 I2C bus extender*, Preliminary specifications).

La comunicazione inizia quando un dispositivo (MASTER) genera una condizione di START (S), facendo scendere la linea SDA mentre la SCL permane alta; la procedura di STOP (P) si ha quando lo stesso dispositivo genera un fronte di salita nella linea SDA mentre la SCL è alta. Il bus deve essere considerato occupato dopo la procedura di START e libero dopo quella di STOP.

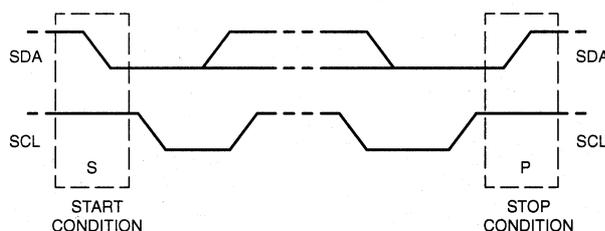


Figura 20: Condizioni di START e STOP

Il MASTER, oltre a iniziare e terminare una comunicazione, deve fornire anche il segnale di *clock* necessario per la sincronizzazione della trasmissione. I dati nella linea

SDA devono essere stabili durante il periodo alto (HIGH) della SCL, quindi il loro stato (HIGH/LOW) può cambiare solo quando il segnale di *clock* è basso (LOW).

I dati vengono trasferiti in gruppi di 8 *bit*: il primo *bit* trasmesso è il più significativo MSB (*Most Significant Bit*) e l'ottavo il meno significativo LSB (*Least Significant Bit*). Ogni *byte* di dati è sempre seguito da un segnale di controllo ACKNOWLEDGE (A/\bar{A}) generato dal ricevente (MASTER-ricevente o SLAVE-ricevente). Questo segnale di controllo serve per verificare se il trasferimento dati ha avuto successo: durante l'ACKNOWLEDGE, il trasmettitore lascia libera la SDA: è il ricevente che deve portarla ad un livello basso e mantenerla in tale stato durante il periodo alto dell'impulso di *clock*.

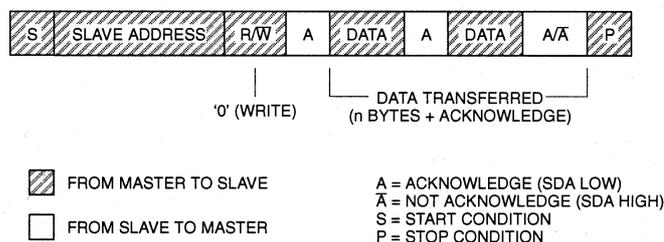
Il primo *byte* trasmesso dopo la procedura di START è l'indirizzo dello SLAVE; questo è formato da 7 *bit* di indirizzo, di cui primi 4 identificano il tipo di dispositivo e gli altri 3 costituiscono l'indirizzo vero e proprio, seguiti da un ottavo che specifica la direzione del successivo trasferimento dati (R/\bar{W}): "0" (LOW) indica una trasmissione (READ), "1" (HIGH) indica invece una richiesta di dati (WRITE).

Se lo SLAVE non riconosce l'indirizzo, deve lasciare alta la SDA così il MASTER può generare la condizione di STOP e bloccare il trasferimento dati. Se lo SLAVE-ricevente riconosce l'indirizzo ma più tardi, nel trasferimento, non può ricevere altri *byte* di dati, blocca il processo generando un NOT ACKNOWLEDGE (linea SDA alta) nel primo *byte* che segue; in questo modo il MASTER può produrre la condizione di STOP. Se è il MASTER a ricevere i dati, deve segnalare la fine della trasmissione allo SLAVE-trasmettitore non generando il segnale di ACKNOWLEDGE dopo l'ultimo *byte* ricevuto. Il trasmettitore lascia la linea SDA alta per consentire la condizione di STOP, obbligatoria alla fine di ogni trasmissione.

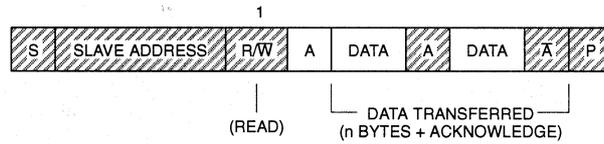
In ogni caso, se un MASTER vuole ancora comunicare sul bus, può generare una condizione di START-ripetuto (*Repeated Start*) e indirizzare un nuovo SLAVE senza prima generare la condizione di STOP.

I formati dei possibili trasferimenti sono:

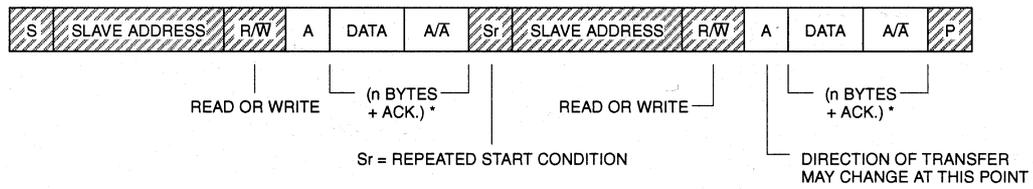
- a) MASTER-trasmettitore trasmette allo SLAVE-ricevente (non viene cambiata la direzione di trasferimento)

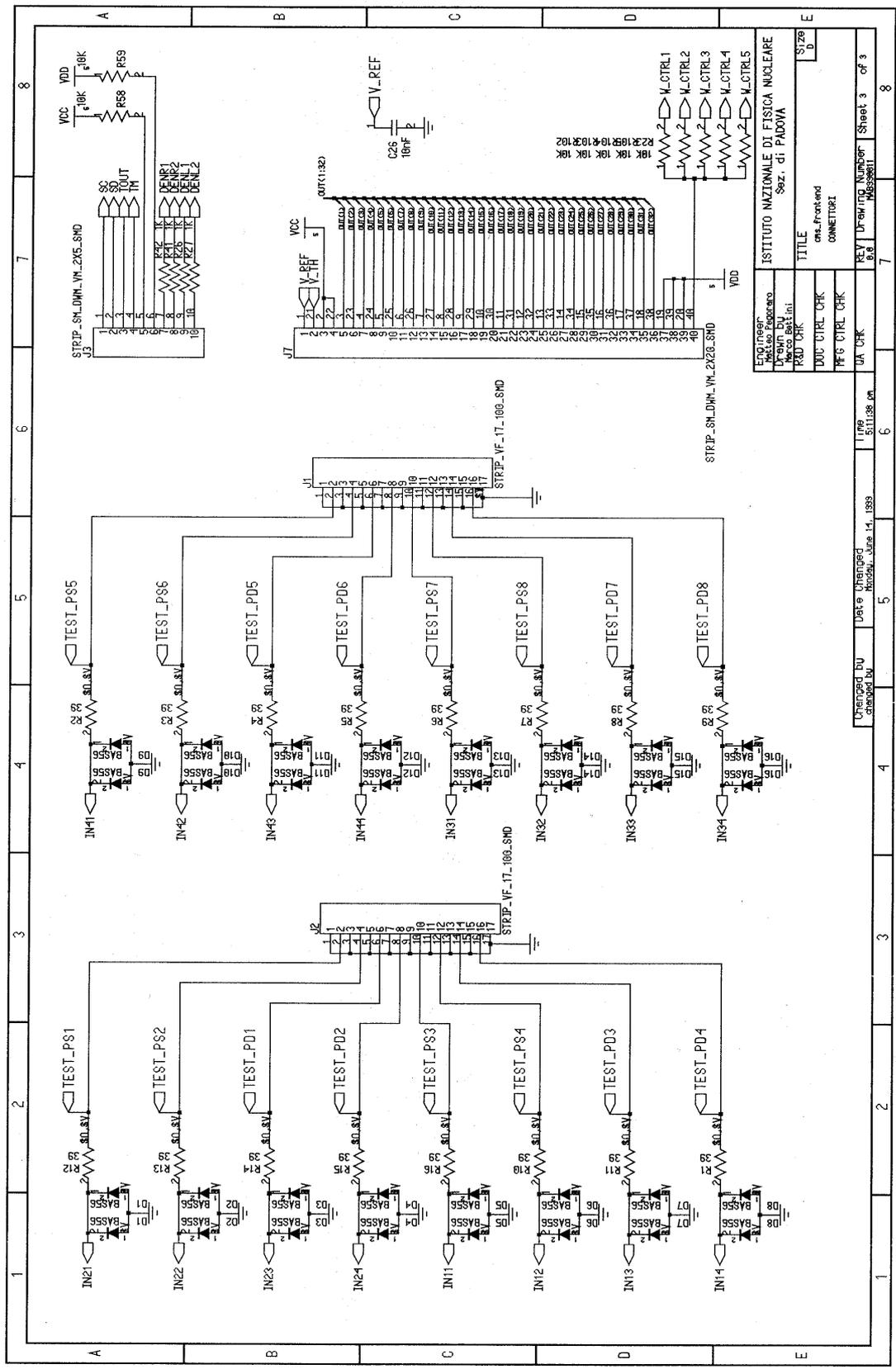


- b) MASTER-ricevente legge dallo SLAVE-trasmettitore (la direzione di trasferimento dati viene cambiata subito dopo il *byte* di indirizzo)



c) Formato *combined* (cambio di direzione dopo uno START-ripetuto: si ripete l'indirizzo dello SLAVE e si può cambiare direzione di trasferimento oppure anche lo SLAVE indirizzato)





UFFE8503	UFFE8504	UFFE8505	UFFE8506	UFFE8507	UFFE8508	UFFE8509	UFFE8510	UFFE8511	UFFE8512	UFFE8513	UFFE8514	UFFE8515	UFFE8516	UFFE8517	UFFE8518	UFFE8519	UFFE8520	UFFE8521	UFFE8522	UFFE8523	UFFE8524	UFFE8525	UFFE8526	UFFE8527	UFFE8528	UFFE8529	UFFE8530	UFFE8531	UFFE8532	UFFE8533	UFFE8534	UFFE8535	UFFE8536	UFFE8537	UFFE8538	UFFE8539	UFFE8540	UFFE8541	UFFE8542	UFFE8543	UFFE8544	UFFE8545	UFFE8546	UFFE8547	UFFE8548	UFFE8549	UFFE8550	UFFE8551	UFFE8552	UFFE8553	UFFE8554	UFFE8555	UFFE8556	UFFE8557	UFFE8558	UFFE8559	UFFE8560	UFFE8561	UFFE8562	UFFE8563	UFFE8564	UFFE8565	UFFE8566	UFFE8567	UFFE8568	UFFE8569	UFFE8570	UFFE8571	UFFE8572	UFFE8573	UFFE8574	UFFE8575	UFFE8576	UFFE8577	UFFE8578	UFFE8579	UFFE8580	UFFE8581	UFFE8582	UFFE8583	UFFE8584	UFFE8585	UFFE8586	UFFE8587	UFFE8588	UFFE8589	UFFE8590	UFFE8591	UFFE8592	UFFE8593	UFFE8594	UFFE8595	UFFE8596	UFFE8597	UFFE8598	UFFE8599	UFFE8600
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE
 Sez. di PADOVA
 TITLE
 ens. Front-end
 CONNETTORI
 REV Drawing Number Sheet 3 of 3
 0.6

UFFE8503
 UFFE8504
 UFFE8505
 UFFE8506
 UFFE8507
 UFFE8508
 UFFE8509
 UFFE8510
 UFFE8511
 UFFE8512
 UFFE8513
 UFFE8514
 UFFE8515
 UFFE8516
 UFFE8517
 UFFE8518
 UFFE8519
 UFFE8520
 UFFE8521
 UFFE8522
 UFFE8523
 UFFE8524
 UFFE8525
 UFFE8526
 UFFE8527
 UFFE8528
 UFFE8529
 UFFE8530
 UFFE8531
 UFFE8532
 UFFE8533
 UFFE8534
 UFFE8535
 UFFE8536
 UFFE8537
 UFFE8538
 UFFE8539
 UFFE8540
 UFFE8541
 UFFE8542
 UFFE8543
 UFFE8544
 UFFE8545
 UFFE8546
 UFFE8547
 UFFE8548
 UFFE8549
 UFFE8550
 UFFE8551
 UFFE8552
 UFFE8553
 UFFE8554
 UFFE8555
 UFFE8556
 UFFE8557
 UFFE8558
 UFFE8559
 UFFE8560
 UFFE8561
 UFFE8562
 UFFE8563
 UFFE8564
 UFFE8565
 UFFE8566
 UFFE8567
 UFFE8568
 UFFE8569
 UFFE8570
 UFFE8571
 UFFE8572
 UFFE8573
 UFFE8574
 UFFE8575
 UFFE8576
 UFFE8577
 UFFE8578
 UFFE8579
 UFFE8580
 UFFE8581
 UFFE8582
 UFFE8583
 UFFE8584
 UFFE8585
 UFFE8586
 UFFE8587
 UFFE8588
 UFFE8589
 UFFE8590
 UFFE8591
 UFFE8592
 UFFE8593
 UFFE8594
 UFFE8595
 UFFE8596
 UFFE8597
 UFFE8598
 UFFE8599
 UFFE8600

Figura 23: Schema elettrico della scheda di frontend – terza sezione

Confronto tra i dati relativi ai singoli MAD in contenitore ceramico e agli stessi montati su scheda

Chip singolo								Chip su scheda							
	canale	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sense (mV/fC)	noise (el)	Canale	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sense (Mv/Fc)	noise (el)	
MAD 1	4	10,83	13,21	33,87	36,41	3,773	1314	1	8,73	11,78	28,51	31,76	3,297	1927	
	3	10,43	12,77	33,08	35,59	3,757	1297	2	8,59	11,64	28,60	31,84	3,335	1905	
	2	10,80	13,09	33,87	36,28	3,777	1263	3	8,82	11,86	28,63	31,88	3,302	1918	
	1	10,10	12,48	32,87	35,43	3,771	1315	4	8,15	11,27	28,00	31,30	3,308	1965	
MAD 5	4	10,28	12,75	33,36	36,05	3,780	1361	5	8,18	11,20	28,00	31,20	3,303	1905	
	3	10,53	12,90	33,27	35,87	3,772	1309	6	8,49	11,57	28,23	31,50	3,290	1950	
	2	10,14	12,44	33,20	35,66	3,775	1269	7	8,02	11,06	27,78	30,99	3,293	1923	
	1	10,50	12,89	33,33	35,91	3,781	1317	8	8,51	11,56	28,29	31,54	3,297	1927	
MAD 3	4	10,74	13,29	33,86	36,61	3,786	1403	9	8,45	11,56	28,03	31,33	3,263	1985	
	3	9,90	12,24	32,67	35,20	3,777	1291	10	7,91	10,99	27,77	30,98	3,310	1939	
	2	10,44	12,75	33,53	35,98	3,780	1273	11	8,25	11,32	27,87	31,12	3,270	1956	
	1	10,58	13,06	33,41	36,06	3,781	1366	12	8,56	11,61	28,32	31,60	3,293	1929	
MAD 4	4	11,41	13,88	34,55	37,16	3,790	1358	13	9,24	12,27	28,93	32,15	3,282	1924	
	3	10,73	13,00	33,50	35,90	3,777	1252	14	8,70	11,77	28,40	31,63	3,283	1948	
	2	10,28	12,56	33,38	35,85	3,782	1256	15	8,18	11,30	28,13	31,38	3,325	1955	
	1	10,79	13,23	33,48	36,12	3,758	1353	16	8,90	11,98	28,61	31,89	3,285	1953	

	Chip singolo						Chip su scheda					
	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sense (mV/fC)	noise (el)	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sense (mV/fC)	noise (el)
media	10,53	12,91	33,45	36,01	3,776	1312	8,48	11,55	28,26	31,51	3,296	1938
dev.std.	0,36	0,40	0,44	0,47	0,009	45	0,35	0,34	0,34	0,34	0,018	22
dev.std.(%)	3,44	3,09	1,32	1,30	0,229	3	4,17	2,99	1,20	1,09	0,558	1
max	11,41	13,88	34,55	37,16	3,790	1403	9,24	12,27	28,93	32,15	3,335	1985
min	9,90	12,24	32,67	35,20	3,757	1252	7,91	10,99	27,77	30,98	3,263	1905

Chip singolo								Chip su scheda							
	canale	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sense (mV/fC)	noise (el)	canale	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sense (mV/fC)	noise (el)	
MAD 2	4	11,20	13,78	34,28	37,08	3,780	1422	1	9,04	12,08	28,59	31,83	3,258	1944	
	3	10,72	13,20	33,42	35,99	3,766	1372	2	8,92	11,93	28,76	31,95	3,307	1896	
	2	10,67	13,01	33,71	36,28	3,772	1292	3	8,60	11,58	28,38	31,51	3,297	1883	
	1	10,63	13,43	33,38	36,38	3,768	1548	4	8,61	11,62	28,27	31,44	3,277	1914	
MAD 6	4	10,50	12,89	33,63	36,22	3,788	1314	5	8,31	11,31	27,90	31,09	3,265	1914	
	3	10,80	13,07	33,53	36,00	3,771	1254	6	8,79	11,76	28,36	31,50	3,262	1897	
	2	11,04	13,43	34,26	36,80	3,801	1310	7	8,81	11,86	28,41	31,67	3,267	1945	
	1	11,14	13,63	33,84	36,46	3,760	1380	8	9,14	12,13	28,66	31,83	3,253	1915	

MAD 7	4	11,25	13,77	34,30	37,00	3,775	1391	9	8,96	11,94	28,32	31,50	3,227	1924
	3	10,75	13,05	33,61	36,10	3,792	1264	10	8,75	11,71	28,41	31,55	3,277	1882
	2	10,43	12,80	33,50	35,97	3,777	1307	11	8,15	11,21	27,50	30,74	3,225	1977
	1	10,79	13,13	33,65	36,26	3,786	1288	12	8,76	11,79	28,33	31,54	3,262	1935
MAD 8	4	10,80	13,10	33,88	36,31	3,780	1268	13	8,67	11,72	28,24	31,44	3,262	1948
	3	10,83	13,09	33,44	35,86	3,751	1255	14	8,93	11,92	28,43	31,63	3,250	1917
	2	10,95	13,17	33,92	36,29	3,760	1230	15	8,97	11,94	28,65	31,81	3,280	1886
	1	10,44	12,72	32,96	35,39	3,730	1273	16	8,69	11,69	28,34	31,54	3,275	1908

	<i>Chip singolo</i>						<i>Chip su scheda</i>					
	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sense (mV/fC)	noise (el)	3fC	3fC+3σ	9fC	9fC+3σ	sense (mV/fC)	noise (el)
media	10,81	13,20	33,71	36,27	3,772	1323	8,76	11,76	28,35	31,54	3,265	1918
dev.std.	0,25	0,32	0,36	0,43	0,017	82	0,26	0,25	0,30	0,29	0,021	27
dev.std.(%)	2,35	2,43	1,08	1,18	0,456	6	2,95	2,12	1,07	0,93	0,654	1
max	11,25	13,78	34,30	37,08	3,801	1548	9,14	12,13	28,76	31,95	3,307	1977
min	10,43	12,72	32,96	35,39	3,730	1230	8,15	11,21	27,50	30,74	3,225	1882

Dati relativi alle schede con MAD in contenitore plastico

Scheda: 1					Icc	39,4	Tout	2,280
					Idd	74,2	Tmedia	2,244
chann. #	thr(3fC) mV	thr(3fC+3σ)mV	thr(9fC) mV	sens. (mV/fC)	Noise (e)	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)
1	8,58	11,58	28,25	3,28	1906	ok	2,252	102,5
2	8,90	11,86	29,14	3,37	1828	ok		103,0
3	8,34	11,30	28,19	3,31	1864	ok		103,5
4	9,50	12,47	29,38	3,31	1867	ok		103,0
5	9,21	12,16	29,06	3,31	1858	ok	2,236	103,2
6	9,19	12,15	28,91	3,29	1876	ok		105,0
7	9,24	12,24	28,86	3,27	1911	ok		104,4
8	9,79	12,72	29,66	3,31	1843	ok		104,0
9	8,89	11,89	28,80	3,32	1883	ok	2,240	103,5
10	9,27	12,23	29,23	3,33	1854	ok		104,4
11	8,67	11,60	28,61	3,32	1837	ok		101,8
12	9,24	12,21	29,34	3,35	1847	ok		102,1
13	8,33	11,27	28,15	3,30	1854	ok	2,244	101,9
14	8,69	11,62	28,53	3,31	1846	ok		102,1
15	8,80	11,84	28,61	3,30	1918	ok		100,6
16	9,11	12,00	29,07	3,33	1810	ok		102,0

Scheda: 2					Icc	40,2	Tout	0,300
					Idd	73,4	Tmedia	2,244
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s)mV	thr(9fC)mV	sens. (mV/fC)	Noise e ⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)
1	9,71	12,73	29,28	3,26	1929	ok	2,256	104,0
2	7,69	10,73	27,53	3,31	1915	ok		104,1
3	10,10	13,02	29,57	3,25	1875	ok		102,7
4	9,24	12,20	28,97	3,29	1875	ok		102,8
5	9,69	12,64	29,53	3,31	1859	ok	2,226	102,2
6	9,16	12,11	28,96	3,30	1862	ok		103,2
7	8,92	11,85	28,73	3,30	1849	ok		103,0
8	8,85	11,82	28,56	3,29	1884	ok		103,6
9	8,66	11,71	28,57	3,32	1915	ok	2,235	100,3
10	8,81	11,79	28,78	3,33	1865	ok		100,2
11	9,26	12,28	29,32	3,34	1882	ok		98,8
12	9,54	12,54	29,68	3,36	1862	ok		99,8
13	9,37	12,34	29,19	3,30	1873	ok	2,245	101,6
14	9,00	12,01	28,72	3,29	1908	ok		101,7
15	10,18	13,14	30,24	3,34	1844	ok		101,8
16	9,78	12,73	29,78	3,33	1844	ok		102,5

Scheda: 3					Icc	40,9	Tout	
					Idd	75,0	Tmedia	2,248
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s) mV	thr(9fC) mV	sens. (mV/fC)	Noise e ⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)
1	8,24	11,22	27,96	3,29	1889	ok	2,241	104,5
2	8,11	11,09	28,14	3,34	1860	ok		102,8
3	8,33	11,31	28,04	3,29	1890	ok		103,7
4	9,29	12,36	28,95	3,28	1952	ok		102,8
5	8,45	11,47	28,14	3,28	1917	ok	2,231	104,6
6	8,66	11,66	28,14	3,25	1925	ok		105,1
7	8,91	11,86	28,66	3,29	1867	ok		102,2
8	9,73	12,68	29,42	3,28	1873	ok		102,8
9	9,94	13,02	29,41	3,25	1977	ok	2,271	102,2
10	8,66	11,65	28,29	3,27	1904	ok		101,4
11	9,37	12,38	28,96	3,27	1921	ok		100,6
12	9,30	12,32	29,10	3,30	1907	ok		101,3
13	9,13	12,11	28,66	3,26	1907	ok	2,263	103,5
14	9,50	12,44	29,06	3,26	1879	ok		104,2
15	8,88	11,84	28,60	3,29	1876	ok		102,6
16	9,11	12,13	28,79	3,28	1918	ok		112,1

Scheda:	4					Icc	39,2	Tout	0,300
						Idd	74,0	Tmedia	2,245
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s) mV	thr(9fC) mV	sens. (MV/fC)	Noise e⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)	
1	8,46	11,43	27,95	3,25	1905	ok	2,232	105,8	
2	9,20	12,10	28,95	3,29	1835	ok		104,8	
3	9,42	12,39	28,93	3,25	1903	ok		105,1	
4	8,51	11,48	28,01	3,25	1904	ok		105,0	
5	9,15	12,17	28,89	3,29	1912	ok	2,244	102,7	
6	9,24	12,26	29,91	3,45	1826	ok		103,2	
7	9,35	12,29	29,04	3,28	1866	ok		101,2	
8	9,32	12,35	29,02	3,28	1923	ok		102,0	
9	9,17	12,15	28,79	3,27	1899	ok	2,259	101,0	
10	9,64	12,60	29,46	3,30	1867	ok		100,6	
11	8,72	11,68	28,37	3,28	1883	ok		100,4	
12	8,47	11,43	28,23	3,29	1872	ok		101,6	
13	7,52	10,63	27,49	3,33	1947	ok	2,243	102,0	
14	9,28	12,31	29,23	3,33	1898	ok		101,1	
15	9,41	12,42	29,61	3,37	1863	ok		102,1	
16	8,54	11,55	28,87	3,39	1851	ok		101,7	

Scheda:	5					Icc	39,0	Tout	0,300
						Idd	73,5	Tmedia	2,249
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s) mV	thr(9fC) mV	sens. (MV/fC)	Noise e⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)	
1	10,20	13,14	29,80	3,27	1875	ok	2,252	102,8	
2	8,88	11,78	28,74	3,31	1825	ok		102,3	
3	8,04	10,95	27,76	3,29	1845	ok		101,5	
4	8,45	11,41	28,14	3,28	1879	ok		101,6	
5	9,56	12,47	29,43	3,31	1831	ok	2,265	102,7	
6	7,75	10,74	27,60	3,31	1883	ok		102,6	
7	8,77	11,80	28,54	3,30	1916	ok		101,8	
8	9,24	12,29	28,95	3,29	1934	ok		102,4	
9	8,20	11,33	27,76	3,26	2000	ok	2,258	101,1	
10	9,07	11,98	28,85	3,30	1839	ok		101,4	
11	9,79	12,73	29,42	3,27	1872	ok		101,1	
12	8,29	11,29	28,08	3,30	1895	ok		100,4	
13	8,67	11,66	28,53	3,31	1882	ok	2,237	103,1	
14	8,54	11,50	28,39	3,31	1864	ok		102,8	
15	8,70	11,68	28,72	3,34	1861	ok		104,4	
16	9,07	12,03	28,98	3,32	1858	ok		103,9	

Scheda:	6					Icc	39,6	Tout	0,300
						Idd	74,5	Tmedia	2,252
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s) mV	thr(9fC) mV	sens. (MV/fC)	Noise e⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)	
1	8,22	11,37	28,02	3,30	1989	ok	2,253	103,7	
2	8,28	11,28	28,31	3,34	1872	ok		102,7	
3	9,86	12,85	29,70	3,31	1884	ok		102,0	
4	9,55	12,56	29,48	3,32	1888	ok		103,4	
5	9,41	12,41	29,34	3,32	1882	ok	2,253	101,3	
6	10,03	12,94	29,74	3,29	1846	ok		102,0	
7	9,14	12,12	29,04	3,32	1872	ok		101,3	
8	8,64	11,65	28,55	3,32	1890	ok		101,7	
9	9,70	12,67	29,36	3,28	1888	ok	2,250	100,5	
10	9,75	12,76	29,47	3,29	1908	ok		100,5	
11	7,75	10,76	27,25	3,25	1929	ok		98,4	
12	9,42	12,44	29,12	3,28	1916	ok		100,4	
13	9,35	12,33	28,93	3,26	1902	ok	2,249	105,0	
14	8,49	11,45	28,13	3,27	1884	ok		104,9	
15	9,64	12,62	29,49	3,31	1877	ok		103,7	
16	8,67	11,72	28,45	3,30	1927	ok		105,3	

Scheda:	7					Icc	40,3	Tout	0,300
						Idd	74,7	Tmedia	2,254
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s) mV	thr(9fC) mV	sens. (MV/fC)	Noise e⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)	
1	8,27	11,24	28,07	3,30	1875	ok	2,256	104,2	
2	9,17	12,15	29,15	3,33	1864	ok		105,6	
3	9,10	12,06	28,98	3,31	1861	ok		103,7	
4	8,93	11,91	28,74	3,30	1880	ok		102,9	
5	8,87	11,82	28,81	3,32	1849	ok	2,266	101,5	
6	8,84	11,78	28,65	3,30	1855	ok		102,6	
7	9,58	12,57	29,31	3,29	1894	ok		101,9	
8	8,52	11,52	28,43	3,32	1883	ok		102,9	
9	8,24	11,22	27,89	3,28	1896	ok	2,269	102,1	
10	9,37	12,26	29,14	3,30	1827	ok		103,3	
11	8,75	11,73	28,44	3,28	1892	ok		101,1	
12	8,51	11,49	28,62	3,35	1852	ok		100,3	
13	9,02	11,96	28,69	3,28	1868	ok	2,242	101,6	
14	8,36	11,36	28,01	3,28	1908	ok		103,5	
15	9,21	12,18	29,07	3,31	1869	ok		102,0	
16	9,29	12,23	29,23	3,32	1843	ok		103,0	

Scheda:	8					Icc	40,2	Tout	0,300
						Idd	74,9	Tmedia	2,254
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s) mV	thr(9fC) mV	sens. (MV/fC)	Noise e⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)	
1	9,33	12,37	28,87	3,26	1945	ok	2,267	104,4	
2	8,03	11,02	27,98	3,33	1873	ok		104,4	
3	7,60	10,56	27,23	3,27	1885	ok		102,6	
4	9,08	12,04	28,87	3,30	1870	ok		103,6	
5	9,76	12,70	29,60	3,31	1852	ok	2,254	101,7	
6	8,93	11,89	28,69	3,29	1872	ok		102,8	
7	9,42	12,42	29,09	3,28	1906	ok		102,8	
8	9,65	12,71	29,38	3,29	1939	ok		102,9	
9	8,41	11,44	28,25	3,31	1909	ok	2,247	99,6	
10	9,03	12,00	28,84	3,30	1874	ok		100,4	
11	8,89	11,85	28,67	3,30	1871	ok		99,4	
12	8,53	11,53	28,56	3,34	1872	ok		100,4	
13	7,98	10,98	27,50	3,25	1921	ok	2,249	103,1	
14	8,44	11,40	28,16	3,29	1876	ok		102,9	
15	9,22	12,23	28,98	3,29	1904	ok		103,7	
16	7,96	10,96	27,78	3,30	1892	ok		104,9	

Scheda:	9					Icc	40,5	Tout	0,300
						Idd	75,0	Tmedia	2,253
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s) mV	thr(9fC) mV	sens. (MV/fC)	Noise e⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)	
1	9,12	12,11	28,60	3,25	1919	ok	2,248	105,6	
2	8,78	11,74	28,60	3,30	1867	ok		104,9	
3	9,05	12,05	28,78	3,29	1901	ok		104,6	
4	8,99	11,97	28,63	3,27	1897	ok		104,6	
5	9,12	12,05	28,92	3,30	1850	ok	2,262	102,7	
6	7,87	10,78	27,53	3,28	1850	ok		103,1	
7	8,13	11,05	27,62	3,25	1873	ok		103,3	
8	8,16	11,10	27,82	3,28	1869	ok		102,4	
9	9,00	11,95	28,50	3,25	1891	ok	2,255	104,5	
10	8,33	11,29	27,97	3,27	1884	ok		105,4	
11	9,27	12,19	28,62	3,23	1886	ok		103,7	
12	9,33	12,36	28,85	3,25	1940	ok		104,2	
13	8,77	11,76	28,68	3,32	1877	ok	2,251	99,2	
14	8,78	11,76	28,60	3,30	1879	ok		101,2	
15	9,20	12,18	29,28	3,35	1855	ok		99,7	
16	9,53	12,57	29,52	3,33	1901	ok		100,0	

Scheda:	10					Icc	39,5	Tout	2,280
						Idd	74,0	Tmedia	2,244
chann. #	thr(3fC)mV	thr(+3s) mV	thr(9fC) mV	sens. (MV/fC)	Noise e⁻	Mask digi	Temp (V)	Width (ns)	
1	9,13	12,15	29,03	3,32	1897	ok	2,243	104,6	
2	9,10	12,08	29,12	3,34	1861	ok		104,7	
3	9,20	12,18	28,97	3,30	1884	ok		105,7	
4	8,37	11,37	28,20	3,31	1891	ok		104,0	
5	8,80	11,73	28,32	3,25	1876	ok	2,241	105,0	
6	8,37	11,29	27,87	3,25	1872	ok		106,0	
7	8,61	11,54	28,04	3,24	1885	ok		105,1	
8	9,34	12,29	28,76	3,24	1899	ok		104,4	
9	8,94	11,93	28,83	3,32	1879	ok	2,260	98,2	
10	8,83	11,81	28,90	3,35	1856	ok		99,3	
11	9,43	12,47	29,23	3,30	1919	ok		97,7	
12	8,46	11,47	28,53	3,35	1875	ok		99,0	
13	9,39	12,37	29,08	3,28	1892	ok	2,238	99,9	
14	8,51	11,49	28,22	3,29	1890	ok		102,0	
15	8,90	11,90	28,75	3,31	1889	ok		100,9	
16	10,12	13,08	30,05	3,32	1856	ok		101,7	

Tabelle dei dati per la misura del *time walk* e soglia con diverse capacità

Scheda 6 C=0 Thr=3fC

Charge fC	4	5	6	8	10	15	30	50	100	500	1000	Thr 3fC	Thr (+3s mV)	Thr 9fC mV
1	82,8	81,7	80,9	80,2	79,7	79,3	78,5	78,1	77,8	77,3	77,2	8,22	11,37	28,02
2	83,0	81,7	81,0	80,3	79,9	79,3	78,5	78,2	77,9	77,4	77,3	8,28	11,28	28,31
3	82,8	81,5	80,8	80,1	79,7	79,1	78,4	78,1	77,8	77,3	77,1	9,86	12,85	29,70
4	83,0	81,9	80,9	80,2	79,8	79,2	78,5	78,2	77,9	77,4	77,2	9,55	12,56	29,48
5	82,7	81,4	80,7	79,9	79,5	79,0	78,2	77,9	77,2	77,1	77,0	9,41	12,41	29,34
6	82,6	81,4	80,7	80,0	79,7	79,0	78,3	77,9	77,6	77,1	77,0	10,03	12,94	29,74
7	82,8	81,2	80,6	80,0	79,5	78,9	78,2	77,9	77,5	77,0	76,8	9,14	12,12	29,04
8	82,7	81,4	80,8	80,0	79,5	79,0	78,3	77,9	77,6	77,0	76,9	8,64	11,65	28,55
9	82,6	81,4	80,8	80,0	79,5	79,0	78,3	77,9	77,6	77,0	76,9	9,70	12,67	29,36
10	83,0	81,6	80,8	80,0	79,6	79,0	78,4	78,0	77,7	77,1	77,0	9,75	12,76	29,47
11	82,9	81,5	81,0	80,2	79,7	79,2	78,4	78,0	77,7	77,2	77,1	7,75	10,76	27,25
12	82,7	81,6	80,9	80,1	79,6	79,1	78,4	78,0	77,8	77,4	77,2	9,42	12,44	29,12
13	83,4	82,2	81,5	80,7	80,2	79,6	78,9	78,5	78,1	77,6	77,5	9,35	12,33	29,93
14	83,6	82,1	81,5	80,7	80,2	79,6	78,9	78,6	78,2	77,6	77,5	8,49	11,45	28,13
15	83,5	82,3	81,6	80,7	80,2	79,6	78,9	78,5	78,1	77,6	77,5	9,64	12,62	29,49
16	83,4	82,1	81,5	80,7	80,2	79,6	78,9	78,5	78,2	77,7	77,5	8,67	11,72	28,45
media	83,0	81,7	81,0	80,2	79,8	79,2	78,5	78,1	77,8	77,3	77,2	9,12	12,12	28,96

Scheda 6 C=10 pF Thr = 3 fC

Charge (fC)	4	5	6	8	10	15	30	50	100	500	1000	Thr 3fC(mV)	Thr (+3s) (mV)	Thr 9fC (mV)
1	84,3	82,8	82,1	81,2	80,8	80,0	79,1	78,7	78,3	77,6	77,5	7,74	11,64	26,41
2	84,2	82,7	82,1	81,1	80,6	80,0	79,0	78,6	78,2	77,6	77,4	7,81	11,58	26,72
3	84,2	82,9	82,0	81,1	80,6	79,9	79,0	78,6	78,2	77,6	77,4	9,41	13,13	28,06
4	83,8	82,5	81,7	80,6	80,2	79,5	78,6	78,2	77,8	77,2	77,0	9,11	12,84	27,88
5	84,0	82,4	81,8	80,8	80,4	79,7	78,9	78,4	78,0	77,4	77,2	8,98	12,69	27,74
6	83,7	82,2	81,5	80,5	80,0	79,4	78,5	78,0	77,7	77,0	76,9	9,59	13,24	28,20
7	84,0	82,4	81,8	80,8	80,4	79,5	78,7	78,3	77,9	77,3	77,1	8,71	12,40	27,40
8	83,8	82,5	81,6	80,6	80,1	79,4	78,6	78,1	77,7	77,0	76,9	8,23	11,98	27,04
9	84,0	82,6	81,8	81,0	80,3	79,7	78,8	78,4	78,0	77,3	77,2	9,25	12,95	27,74
10	83,7	82,5	81,7	80,8	80,2	79,5	78,6	78,3	77,8	77,2	77,0	9,29	13,04	27,90
11	84,0	82,8	82,1	81,1	80,6	80,0	79,0	78,6	78,1	77,5	77,3	7,34	11,05	25,69
12	83,8	82,4	81,6	80,8	80,3	79,6	78,8	78,3	77,9	77,3	77,1	8,96	12,73	27,56
13	84,8	83,4	82,4	81,5	81,0	80,3	79,4	78,9	78,4	77,8	77,7	8,88	12,58	27,30
14	84,8	83,1	82,4	81,5	81,0	80,2	79,3	78,9	78,5	77,8	77,7	8,02	11,70	26,51
15	84,9	83,3	82,5	81,5	81,0	80,2	79,3	78,9	78,4	77,8	77,6	9,14	12,85	27,79
16	84,9	83,5	82,4	81,5	81,0	80,3	79,3	78,9	78,5	77,8	77,7	8,21	12,00	26,84
media	84,2	82,8	82,0	81,0	80,5	79,8	78,9	78,5	78,1	77,5	77,3	8,67	12,40	27,30

Scheda 6 C = 22 pF Thr = 3 fC

Charge (fC)	4	5	6	8	10	15	30	50	100	500	1000	Thr 3fC mV	Thr (+3s)mV	Thr 9fC mV
1	85,6	84,2	83,0	82,0	81,6	80,7	79,6	79,1	78,6	77,9	77,7	7,10	11,76	24,20
2	85,5	83,9	82,8	81,9	81,4	80,5	79,4	78,9	78,4	77,6	77,5	7,23	11,70	24,50
3	86,0	84,1	83,1	81,9	81,5	80,6	79,6	79,0	78,6	77,8	77,6	8,84	13,25	25,89
4	85,8	83,8	83,0	81,9	81,3	80,5	79,5	78,9	78,4	77,7	77,5	8,53	12,96	25,70
5	85,6	83,8	82,8	81,8	81,2	80,4	79,4	78,9	78,4	77,6	77,5	8,41	12,85	25,55
6	85,3	83,5	82,8	81,7	81,1	80,3	79,3	78,8	78,2	77,5	77,2	9,04	13,40	26,06
7	85,2	83,8	82,9	81,8	81,2	80,4	79,4	78,8	78,3	77,5	77,3	8,17	12,56	25,26
8	85,7	83,9	82,8	81,7	81,1	80,3	79,2	78,7	78,2	77,4	77,2	7,73	12,15	24,84
9	85,8	83,7	83,0	81,9	81,3	80,4	79,3	78,8	78,4	77,6	77,4	8,68	13,10	25,61
10	85,7	84,0	82,9	81,8	81,2	80,3	79,3	78,8	78,3	77,5	77,3	8,74	13,19	25,73
11	85,9	84,1	83,0	82,0	81,4	80,5	79,5	78,9	78,4	77,7	77,5	6,80	12,21	23,73
12	85,8	83,8	83,0	81,8	81,1	80,4	79,4	78,8	78,4	77,7	77,5	8,39	12,89	25,40
13	86,0	84,4	83,6	82,7	82,0	81,0	79,9	79,4	78,9	78,1	77,9	8,26	12,67	25,10
14	86,0	84,6	83,8	82,4	81,9	81,0	79,9	79,3	78,9	78,1	77,9	7,39	11,81	24,30
15	86,3	84,5	83,7	82,4	81,7	81,0	79,9	79,4	78,8	78,1	77,9	8,51	12,92	25,52
16	86,0	84,5	83,7	82,5	81,9	81,1	79,9	79,4	78,8	78,1	77,9	7,55	12,08	24,63
media	85,8	84,0	83,1	82,0	81,4	80,6	79,5	79,0	78,5	77,7	77,6	8,09	12,59	25,13

Scheda 6 C = 39 pF Thr = 3 fC

Charge (fC)	4	5	6	8	10	15	30	50	100	500	1000	Thr 3fC mV	Thr (+3s)mV	Thr 9fC mV
1	87,1	85,8	84,1	83,0	82,1	81,2	80,0	79,4	78,8	78,0	77,8	6,41	11,81	21,52
2	87,3	85,0	84,2	83,0	82,2	81,2	80,0	79,4	78,7	77,9	77,7	6,55	11,73	21,80
3	87,3	85,0	84,1	83,0	82,2	79,9	80,0	79,4	78,8	77,9	77,7	8,17	13,29	23,15
4	87,4	85,3	84,1	82,7	82,2	81,1	80,0	79,4	78,7	77,9	77,7	7,89	13,03	23,04
5	87,1	84,6	84,0	82,6	81,9	81,0	79,8	79,2	78,6	77,7	77,6	7,75	12,88	22,88
6	87,3	85,2	84,0	82,3	82,0	80,8	79,8	79,2	78,5	77,7	77,5	8,40	13,46	23,38
7	87,2	85,1	83,6	82,3	81,8	80,8	79,5	79,0	78,4	77,5	77,3	7,51	12,62	22,61
8	87,4	85,0	84,0	82,7	82,0	80,9	79,7	79,2	78,5	77,6	77,5	7,14	12,18	22,24
9	87,2	85,2	84,0	82,7	82,0	81,0	79,7	79,1	78,6	77,7	77,4	7,98	13,15	22,94
10	87,0	85,3	84,0	82,5	82,0	81,0	79,8	79,2	78,6	77,8	77,5	8,07	13,23	23,10
11	87,0	85,0	84,3	83,0	82,0	81,1	79,8	79,1	78,6	77,7	77,4	6,02	12,27	20,94
12	87,4	85,1	84,3	82,6	82,0	81,1	79,9	79,3	78,7	77,8	77,6	7,69	12,94	22,73
13	87,7	85,9	84,4	83,2	82,5	81,6	80,3	79,6	79,1	78,1	77,9	7,50	12,71	22,39
14	87,9	85,9	84,9	83,4	82,7	81,6	80,5	79,8	79,2	78,2	78,0	6,65	11,86	21,59
15	88,0	85,8	84,6	83,2	82,5	81,4	80,3	79,7	79,0	78,2	77,9	7,76	12,96	22,86
16	87,7	85,8	84,6	83,0	82,4	81,5	80,4	79,8	79,1	78,2	78,0	6,79	12,12	21,94
media	87,4	85,3	84,2	82,8	82,2	81,1	80,0	79,4	78,7	77,9	77,7	7,39	12,64	22,44

Caratteristiche degli integrati