

Programma di ricerca e sviluppo tecnologico volto alla produzione di strumentazione scientifica, attinente al settore "Strumentazione Scientifica"

Relazione sintetica conclusiva

Il "Programma di ricerca e sviluppo tecnologico volto alla produzione di strumentazione scientifica", attinente al settore "Strumentazione Scientifica" del Fondo 5%, si è articolato secondo le seguenti sei Linee di Ricerca:

- 1) Rivelatori al silicio con microelettrodi;
- 2) Microconnessioni verticali ad alta densità (Bump Bonding);
- 3) Rivelatori di particelle ionizzanti a microelettrodi in gas (MSGC);
- 4) Front-end, lettura e trigger per lo spettrometro μ di ATLAS;
- 5) Alimentatori per alte tensioni continue;
- 6) Sviluppo dell'elettronica di lettura per una camera a proiezione temporale ad argon liquido (ICARUS).

Le attività delle sei Linee di Ricerca si sono concluse con il pieno raggiungimento di tutti gli obiettivi tecnico-scientifici delineati nelle Convenzioni stipulate tra l'INFN e le ditte partecipanti al programma. Questo risultato è stato ottenuto all'interno del finanziamento previsto da parte del Ministero. Lievi aumenti di spesa, dell'ordine di qualche percento del totale del progetto, sono state assorbite dalle parti coinvolte. Per il completo raggiungimento degli obiettivi si è resa necessaria in alcuni casi una limitata estensione della scala dei tempi inizialmente prevista, per far fronte a difficoltà tecniche sorte nel corso dei lavori o per meglio sfruttare l'evoluzione tecnologica dei prodotti del mercato.

Gli effetti positivi indotti dalla collaborazione tra ricercatori dell'INFN e delle aziende, quali l'incremento di conoscenze ed il miglioramento delle tecnologie, mostreranno i loro effetti nel tempo. Cercheremo nel seguito di delineare per ciascuna delle ditte partecipanti per quali aspetti il loro know how tecnologico è stato positivamente influenzato dalla partecipazione al Programma.

Tuttavia, per quanto riguarda settori di mercato più specificatamente legati all'attività svolta, alcuni degli effetti positivi si sono già manifestati. Alcune delle ditte coinvolte sono risultate assegnatarie di importanti commesse, legate a progetti legate alle linee di ricerca sopra elencate, a seguito di gare internazionali, e per altre gare di prossima effettuazione è facile prevedere lo stesso risultato. L'ammontare complessivo è stimabile in circa 30 milioni di euro, a fronte di un investimento totale in questo programma di circa 7 milioni di euro.

Ad una prima considerazione di un esperto del settore, il rivelatore a microstrip potrebbe sembrare un dispositivo relativamente semplice, molto più semplice dei dispositivi utilizzati nell'industria dei computer, quali microprocessori o memorie. In realtà la fabbricazione in serie dei rivelatori presenta notevoli difficoltà: il dover assicurare

l'assenza di difetti in un'area molto grande richiede un controllo della difettosità molto più preciso di quello richiesto dalla fabbricazione di dispositivi complessi. E' stato calcolato che per ottenere un'adeguata percentuale di sensori funzionanti, occorre che la difettosità (cioè il numero di difetti per unità di area) sia dieci volte più bassa di quella richiesta per le tecnologie CMOS evolute.

L'elevatissima qualità dei substrati di silicio utilizzati per la fabbricazione dei rivelatori, fa sì che essi siano particolarmente sensibili ad eventuali contaminanti introdotti dal processo produttivo. I rivelatori a microstrip sono perciò degli ottimi "sensori" della qualità di un reparto di produzione. In questo consiste la principale ricaduta industriale dell'attività di sviluppo dei rivelatori: l'aver spinto al limite le prestazioni delle nostre attrezzature e del nostro controllo di qualità, in direzioni mai prima esplorate. Facciamo un solo esempio: le prestazioni dei rivelatori sono molto dipendenti dalle condizioni della superficie della fetta e dallo stato chimico dell'interfaccia ossido/silicio. E' stato perciò necessario rivedere attentamente le procedure di lavaggio delle fette adottate nel reparto di ricerca della STMicroelectronics. Queste nuove procedure sono state poi adottate anche per altri dispositivi.

Moltissimi dettagli del processo produttivo e le loro conseguenze sulle prestazioni del dispositivo sono stati discussi approfonditamente e frequentemente tra i ricercatori INFN e della STM, con un'apertura che è certo comune in ambito scientifico, ma che non è usuale in ambito industriale. Come frutto della collaborazione, i ricercatori INFN sono diventati più consapevoli delle grandi potenzialità, ed anche dei limiti, di una grande industria Hi-Tec, avendola conosciuta "dal di dentro". Per i ricercatori STM l'esperienza di lavoro con obiettivi tipici della ricerca di base, non direttamente applicativa, è stata un'occasione di crescita, molto stimolante per l'impegno ed il grande rigore che ha richiesto.

Il successo di questa collaborazione, ha incoraggiato STM ad intraprendere analoghe collaborazioni con altre strutture scientifiche, tra le prime il Laboratorio Nazionale del Sud dell'INFN, per la fortunata collocazione geografica rispetto alla sede di Catania della ditta STM. L'obiettivo dei nuovi programmi è lo sviluppo di sensori di particelle che oltre a servire per esperimenti di fisica nucleare, siano utili anche in altri campi applicativi.

Già ora possiamo affermare che la STM è stata portata a collocarsi nei primissimi posti nel mercato mondiale dei rivelatori: per l'elevata qualità, per la capacità produttiva, ed anche per la varietà e l'innovatività dei suoi prodotti.

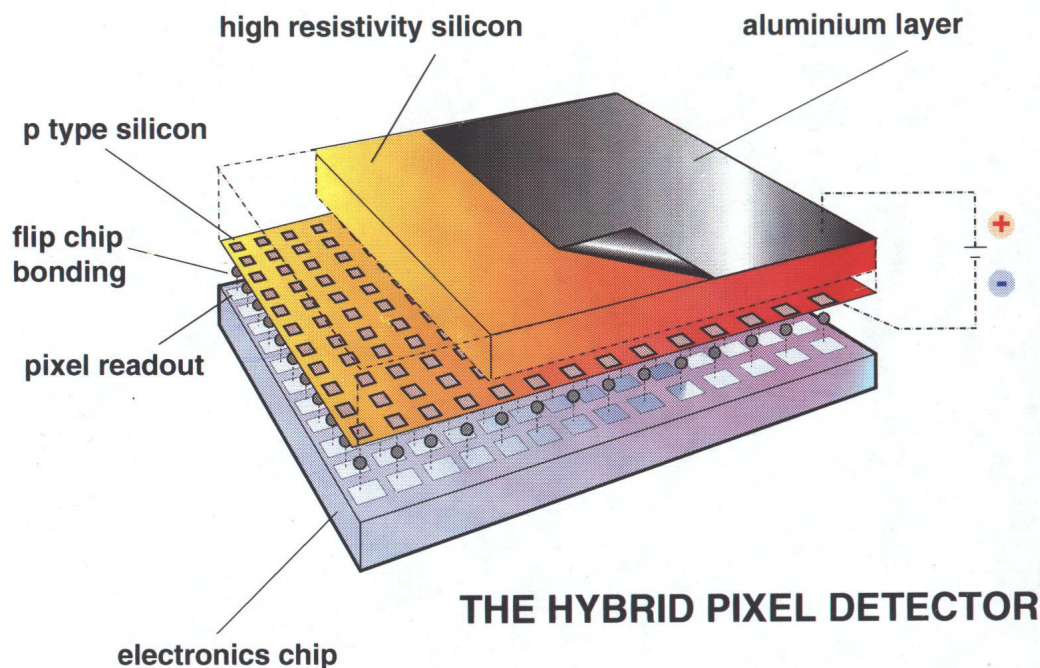
Gli sviluppi futuri dell'attività potrebbero aprire il campo delle applicazioni biomedicali dei rivelatori. Esistono già moltissimi studi che dimostrano i vantaggi dell'uso di rivelatori a semiconduttore per la radiografia digitale. STM è particolarmente interessata alla rivelazione di raggi X per mammografia, per la quale i rivelatori al silicio monocristallino sembrano preferibili ad altri semiconduttori (silicio amorfo, selenio, arseniuro di gallio). L'esperienza acquisita nella fabbricazione dei rivelatori a microstrip per gli esperimenti a LHC sarebbe in questo caso immediatamente fruibile. Forse il mercato non è ancora maturo, ma la ST è tecnicamente pronta.

2) **Microconnessioni verticali ad alta densità' (Bump Bonding)** (Finmeccanica S.p.A. Ramo d'Azienda ALENIA)

Obbiettivo della ricerca è stato lo sviluppo di una tecnologia, denominata bump bonding, per realizzare contatti elettrici tra due dispositivi con alta densità e quindi piccolo passo (~ 5000 contatti/cm², passo 50 μ m), mediante deposizione di piccole isole di un materiale a basso punto di fusione.

La figura illustra in maniera schematica come si presentano i componenti di un assieme connesso attraverso flip-chip bonding.

La maggior parte della superficie del sensore (high resistivity silicon) e dei chip di elettronica (pixel readout) e' coperta di isole di metallo a basso punto di fusione (bump), queste sono realizzate in indio e vengono depositate per evaporazione sotto vuoto attraverso maschere di precisione. La sovrapposizione precisa delle isole depositate sull'elettronica e di quelle depositate sul sensore e l'applicazione di una forza accuratamente controllata su tutta la superficie a temperatura prossima ai 100 °C stabiliscono le connessioni elettriche in maniera permanente (flip-chip).



Le prospettive di utilizzazione industriale dei risultati attesi dalla ricerca sono per ALENIA principalmente indirizzate su due settori di mercato: la microelettronica, ed in particolare l'assiemaggio di MCM (Multi Chip Modules) avanzati, e la sensoristica.

La pressante richiesta di ridurre ingombri e pesi negli apparati ad alto valore aggiunto, come quelli per applicazioni avioniche od aeronautiche, da una parte, e la sempre crescente densità di interconnessioni input/output per e da circuiti integrati in Silicio od Arseniuro di Gallio, dall'altra, stringono in una morsa le tecnologie di assiemaggio di

sistemi microelettronici verso soluzioni che hanno come obiettivo l'interconnessione ad elevatissima densità in assiami MCM. In questo scenario la tecnologia di interconnessione verticale, tipo "Flip Chip", ha un ruolo decisivo e senza alternative. Ordini di grandezza separano la densità di interconnessioni possibili con soluzioni "Flip Chip" rispetto alle soluzioni di interconnessione periferica tradizionali

Nell'area della sensoristica la disponibilità di soluzioni tecnologiche di assiemaggio tipo "Flip Chip" costituisce la chiave di volta per lo sviluppo dei rivelatori IR a matrice di ultima generazione. In questi dispositivi l'interconnessione verticale è inevitabile per l'interfacciamento dell'array di sensori, realizzati nel materiale sensibile alla radiazione IR, con l'array di elettronica di processo realizzata in Silicio. Questa problematica è del tutto simile a quella affrontata nell'ambito di questo progetto, sia in termini di configurazione che di tipologia di interfacce e periodicità della interconnessione, e pertanto la ricaduta industriale dovrebbe essere diretta ed immediata.

Gli obiettivi del programma sono stati pienamente raggiunti. Sono stati prodotti decine di assiami di elettronica e rivelatori sia singoli sia multipli (16 front-end moduli su un unico rivelatore) con elettronica assottigliata.

I rendimenti misurati sono stati i seguenti:

- frazione di bump difettosi pari a 5×10^{-5} (2×10^{-5} per bump mancanti e 3×10^{-5} per bump in corto);
- frazione di canali non funzionanti (misurati su 30 moduli, cioè su circa 1.5×10^6 bump) e' risultato di circa 3×10^{-3} (questo include anche i canali difettosi della elettronica).

Il rendimento complessivo è quindi senz'altro soddisfacente.

La collaborazione con INFN ha permesso ad Alenia di allestire una linea di produzione completa per il bumping e bonding capace di lavorare wafer con diametro fino a 8", il che ha reso Alenia attualmente una azienda leader nel campo del bump bonding ad alta densità per le applicazioni legate ai rivelatori a pixel.

Come primo risultato concreto Alenia si è aggiudicata la commessa per il bonding del rivelatore a pixel dell'esperimento ATLAS, avendo proposto condizioni più competitive rispetto a concorrenti stranieri.

Sono già in corso contatti per utilizzare tale linea di bumping e bonding per studi di applicazioni alla radiografia gamma, utilizzando la tecnologia CMOS6 disponibile solo in wafers da 8" (200mm).

3) Rivelatori di particelle ionizzanti a microelettrodi in gas (MSGC) (ditte LABEN, CETEV)

L'obiettivo del programma 5% MSGC è stato lo sviluppo della tecnologia necessaria alla produzione di rivelatori del tipo MSGC/MGC di grande area (fino a $25 \times 10 \text{ cm}^2$) e la ingegnerizzazione della produzione di questi rivelatori su vasta scala (fino a 10.000 unità), con costi unitari contenuti.

A tale scopo LABEN, industria italiana ad alta tecnologia del gruppo Finmeccanica, ha costituito con CETEV un team industriale avente come capofila LABEN con il compito di curare e coordinare i rapporti fra le singole realtà industriali e l'INFN.

Gli ingredienti tecnologici fondamentali da sviluppare per raggiungere gli obiettivi erano:

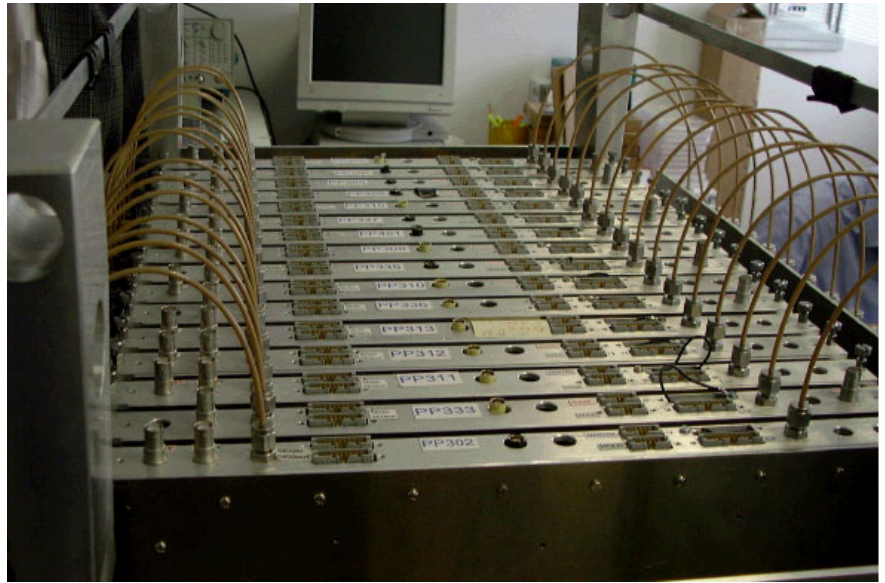
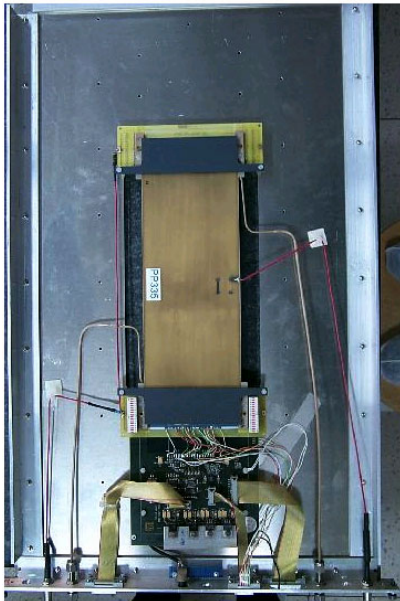
- 1) la definizione di trattamenti della superficie del substrato e degli spigoli catodici per evitare fenomeni di instabilità e garantire un funzionamento affidabile ad alto guadagno
- 2) la capacità di realizzazione di sensori di grande area su substrati sottili e a costi unitari contenuti.

Come primo passo è stato necessario dotare LABEN e CETEV delle infrastrutture e della strumentazione necessaria per riuscire a produrre su grande area, fino a $25 \times 10 \text{ cm}^2$, e a costi unitari contenuti microstrutture normalmente realizzate su piccola area, tipicamente $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Sono stati effettuati investimenti in macchinari (linea automatica di pulizia dei substrati, spinner, maskaligner, impianto RIE, forno per curing del passivante) predisposti per la grande area e di infrastrutture (clean room) compatibili con il livello estremamente basso di difettosità (1%) su aree così grandi.

Sono state poi sviluppate le tecniche di trattamento superficiale necessarie al buon funzionamento del rivelatore. Lo sviluppo tecnologico più importante è stato la messa a punto della tecnica di passivazione degli elettrodi critici. Si tratta di una tecnica multistrato che richiede quindi capacità di allineamento di processi successivi con precisione submicrometrica su grandi aree.

Le fotografie nella pagina seguente mostrano una immagine del modulo di rivelatore assemblato dalla LABEN con substrati prodotti da CETEV e il set-up di una delle due box di 32 moduli della preserie, utilizzati per una estesa ed approfondita campagna di misura su fascio di test al laboratorio PSI di Villigen (Svizzera). I risultati del test sono stati superiori alle aspettative, ed hanno rappresentato la conclusione del programma

Dal punto di vista industriale l'esecuzione di questa linea di ricerca ha sicuramente portato ad un aumento della competitività delle industrie coinvolte. La CETEV è divenuta il riferimento industriale mondiale per la produzione dei sensori MSGC. Se questa la tecnologia fosse stata utilizzata negli esperimenti LHC, sicuramente CETEV sarebbe stato il fornitore esclusivo di substrati per tutte le istituzioni internazionali coinvolte.



Al di fuori delle applicazioni di interesse scientifico nel campo di ricerca tipici dell'INFN, erano state ipotizzate importanti ricadute nel campo delle apparecchiature di imaging per la diagnostica medica (mammografia digitale, densitometria ossea, ecc..).

Lo sviluppo più rapido del previsto di sensori di grande area, fino a 8", e di prezzo contenuto basati sulla tecnologia del silicio ha di molto ridotto le aspettative in questa direzione.

Ciononostante l'interazione tra mondo della ricerca di base ed ambiente industriale ha sicuramente agito da stimolo positivo per entrambe le realtà.

Le attrezzature di cui le ditte sono state dotate possono permettere inoltre applicazioni in altri campi. Diverse richieste di sviluppo di tecnologie analoghe a quelle sviluppate in questo programma, per applicazioni aerospaziali e medicali, sono pervenute sia a LABEN sia a CETEV.

- 4) **Front-end, lettura e trigger per lo spettrometro μ di ATLAS**
- 5) **Alimentatori per alte tensioni continue**
- 6) **Sviluppo dell'elettronica di lettura per una camera a proiezione temporale ad argon liquido (ICARUS)**

(ditta Caen SpA)

Queste tre linee di ricerca sono state affrontate con la stessa ditta come partner dell'INFN. Descriveremo singolarmente gli obiettivi e le ricadute tecnologiche dei singoli progetti. Per quanto riguarda l'impatto del programma sulla ditta Caen, riporteremo uno stralcio di un rapporto redatto dalla ditta stessa alla conclusione dei programmi. Le affermazioni del partner industriale ci sembrano infatti particolarmente significative per evidenziare le ricadute industriali del programma.

Front-end, lettura e trigger per lo spettrometro μ di ATLAS

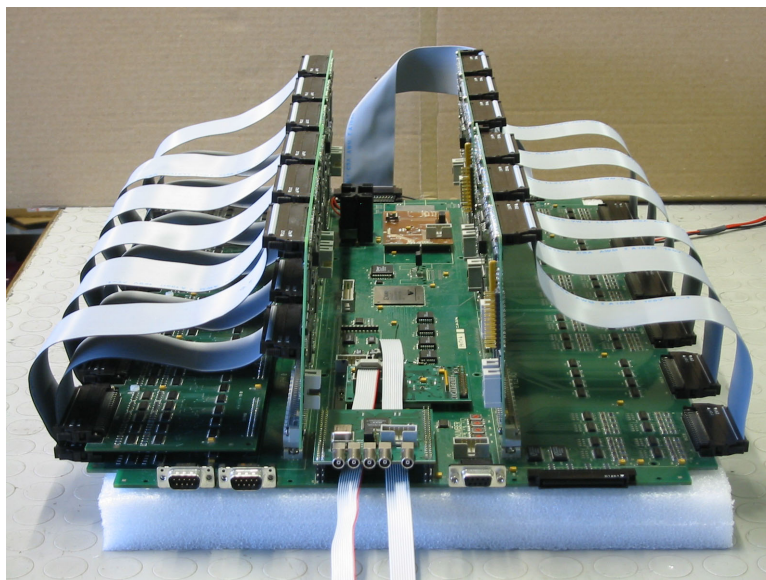
Scopo del progetto era lo sviluppo dell'elettronica per il sistema di trigger di primo livello per muoni ed il read-out del rivelatore RPC della parte centrale ("barrel") dell'esperimento ATLAS

Gli aspetti di rilevanza tecnologica del progetto erano:

- sistema con elevato numero di canali distribuito su grandi volumi
- sincronizzazione temporale inferiore a 25 ns
- latenza di trigger breve e quindi necessità di elaborazioni veloci
- necessità di elevata affidabilità in ambiente ostile

Il progetto è stato portato a termine con la produzione di una preserie di tutti i componenti previsti, che ha consentito alla ditta di mettere a punto le tecniche di produzione.

La fotografia allegata mostra uno dei prototipi sviluppati, completo del sistema di test.



Tutti gli obiettivi tecnico-scientifici del programma sono stati pienamente raggiunti. La ditta CAEN ha sviluppato competenze nel settore dei sistemi elettronici altamente complessi operanti in ambienti di particolare disagio. Le caratteristiche di tali sistemi sono l'alta velocità di risposta data l'elevata frequenza di collisione dell'acceleratore LHC, la compattezza a causa degli spazi limitati a disposizione, il basso consumo per l'elevato numero di canali e la tolleranza alle radiazioni ed ai campi magnetici. Tali competenze sono certamente importanti per gli sviluppi futuri dell'azienda.

Alimentatori per alte tensioni continue

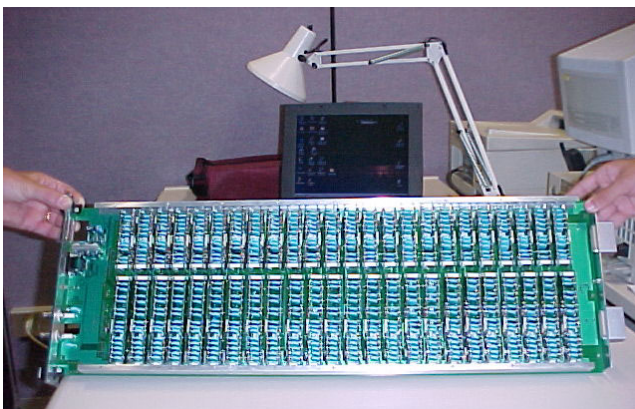
La maggior parte dei rivelatori ad LHC abbisogna di alimentazione ad alta tensione continua, con valori che possono variare da alcune centinaia ad alcune migliaia di volt. Per ragioni di costo e di ingombro è impossibile distribuire la tensione individualmente ai milioni di canali in cui i rivelatori sono segmentati, ma è tuttavia necessario garantire che il malfunzionamento di una parte del rivelatore non renda cieche porzioni estese dell'apparato. La soluzione da adottare per conciliare le due opposte esigenze, di massimizzare la segmentazione contenendo i costi entro limiti accettabili, dipende dalle caratteristiche del rivelatore in gioco, quali il valore di alta tensione a cui opera e la collocazione all'interno dell'apparato.

L'obiettivo del programma era lo sviluppo di un sistema sufficientemente potente e flessibile da permetterne potenzialmente l'utilizzo per tutti i rivelatori di LHC e nel contempo adatto all'utilizzo nelle condizioni operative degli esperimenti stessi, cioè in presenza di elevati flussi neutronici e di elevati campi magnetici.

Per verificare la flessibilità del sistema, cioè la sua capacità di essere utilizzato per un ampio spettro di rivelatori, nel progetto era compreso lo sviluppo delle applicazioni specifiche a due tipi di rivelatore molto diversi tra loro: le camere a deriva per μ ed i rivelatori a microstrip in gas dell'esperimento CMS.

Sia il sistema generale sia le applicazioni specifiche sono state pienamente sviluppate ed hanno superato i test di funzionalità e le prove di resistenza a radiazione.

Le foto allegate mostrano alcuni degli elementi del sistema.

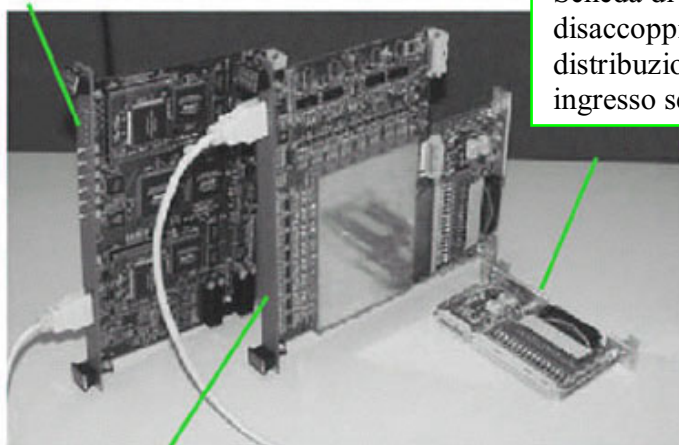


Sviluppo dell'elettronica di lettura per una camera a proiezione temporale ad argon liquido (ICARUS)

Obbiettivo del progetto è stato lo sviluppo del sistema elettronico per la lettura dei dati di un modulo della camera ad argon liquido dell'esperimento ICARUS, sia dei componenti di base VLSI sia dei moduli circuitali completi.

Le due fotografie allegate mostrano tre delle schede sviluppate ed un rack completo per l'alloggiamento dell'elettronica.

Scheda CAEN - V789 :
2 VLSI Daedalus con 16 canali di
input + buffer di memoria + output
dei dati su bus VME



Scheda di
disaccoppiamento:
distribuzione HV e
ingresso segnali

Scheda CAEN - V791:
32 pre-amplificatori + 4 multiplexer (8:1) +
4 FADC (10 bit, 20 MHz)



Lo sviluppo dell'elettronica di lettura di ICARUS ha richiesto, dato l'alto numero di canali, l'uso estensivo di circuiti integrati progettati ad hoc. Lo sviluppo di ASIC (Application Specific Integrated Circuit) è attività che l'INFN ha promosso da tempo al suo interno. Le motivazioni sono state quelle di avere sempre a disposizione strumentazione per il trattamento dei segnali, e anche per il calcolo parallelo, di avanguardia. La presente proposta ha permesso di trasferire competenze dall'INFN all'industria e creare una sinergia nell'affrontare ricerca e sviluppo per elettronica integrata in settori avanzati. In particolare è stato necessario sviluppare ulteriormente le già presenti competenze nell'uso della tecnologia BiCMOS per applicazioni analogiche oltre che quella CMOS per le applicazioni eminentemente digitali. Nella presente

situazione del mercato della strumentazione elettronica la padronanza di queste tecnologie è strategica perché un'industria sia competitiva a livello internazionale. Inoltre alcuni dei componenti che sono stati sviluppati potranno essere di interesse per altre applicazioni industriali.

Impatto dei tre progetti sulla ditta CAEN

Per testimoniare l'impatto dei tre progetti sull'azienda che ha partecipato alla loro attuazione, riteniamo molto interessante riportare uno stralcio di un rapporto redatto dalla ditta a conclusione dei tre progetti. Molte delle considerazioni esposte si possono applicare all'intero programma.

“Il programma nel suo complesso ha rappresentato un'occasione importante per la società. Esso infatti ha consentito di affrontare e risolvere una serie di problematiche legate allo specifico degli esperimenti di nuova generazione. Tali soluzioni ci consentono oggi di presentarci alla comunità internazionale dei fisici con soluzioni uniche, in grado di rispondere alle richieste che ci arrivano un po' da ogni dove.

In particolare alcune delle tecnologie che abbiamo messo a punto per la realizzazione dei sistemi di alimentazione per il Barrel Muon Detector di CMS hanno consentito di sviluppare una linea di prodotti di catalogo. Essi sono stati concepiti per la generazione di bassa e alta tensione, adatti a lavorare in alto campo magnetico e sotto radiazione. Tale linea è al momento unica sul mercato e valida per gli esperimenti a LHC, ma al tempo stesso sta trovando molto interesse anche in altri gruppi, come quelli coinvolti con la proposta BTeV del Fermi National Lab. di Chicago.

Una buona parte delle tecnologie necessarie per arrivare a questo importantissimo risultato sono state sviluppate grazie a questo programma.

In particolare nella parte che fa riferimento allo sviluppo delle alte tensioni riferita del Barrel, sono state sviluppate e messe a punto le tecnologie per la generazione e la distribuzione di alta tensione in area ostile e della comunicazione a lunga distanza tra gli chassis primari e le schede remote. La modifica che l'INFN e CAEN insieme hanno deciso nel momento in cui vi è stata la decisione dell'esperimento CMS di abbandonare il rivelatore a microstrip a gas (MSGC) ha inoltre consentito a CAEN la messa a punto di alcune soluzioni circuitali valide per basse tensioni di potenza per alimentare i rivelatori a strip di silicio e l'elettronica di read-out ad essi associata.

L'insieme delle tecnologie messe a punto ha consentito da un lato la messa a punto di prodotti competitivi per i rivelatori per cui erano stati studiati, e dall'altro la generazione di una linea di prodotti di utilizzazione generale (denominata EASY) che sta fornendo un atout importantissimo nelle sfide internazionali per altre applicazioni.

L'interesse suscitato da questi prodotti ha infatti innescato in altri esperimenti e detector interessi e richieste che si tramuteranno in ordini e commesse per svariati anni di lavoro.

Lo sviluppo dell'elettronica di front-end e trigger per l'esperimento ATLAS ha consentito di aumentare le competenze della società nel campo dei sistemi elettronici altamente complessi operanti in area ostile, nella gestione di elevati flussi di dati ad alta

velocità e la capacità di messa a punto di sistemi automatici di test sia on chip, sia on board.

Lo sviluppo e l'utilizzo di ASIC ad alta complessità dedicati alla gestione del flusso di dati impone infatti di utilizzare dei sistemi di verifica della gestione corretta dei pattern di test, in modo da poter assicurare che la grande massa di schede di cui avrà bisogno l'esperimento sia stata montata correttamente e sia perfettamente funzionante.

Ovviamente questo know how è diventato patrimonio strategico dell'azienda che sarà sempre più coinvolta con esperimenti di grande dimensione e grazie al quale sarà in grado di proporsi per realizzare sia sistemi altamente complessi di acquisizione dati, sia per affrontare la realizzazione di grandi sistemi di trigger.

Lo sviluppo dell'elettronica per l'esperimento ICARUS ha consentito di affrontare un altro segmento importantissimo per la crescita delle conoscenze della società.

In questo caso il progetto è consistito nella messa a punto di un sistema di acquisizione costituito da un lato da una scheda per il trattamento dei segnali analogici e la loro digitalizzazione, dall'altro dal trattamento ed inoltro dei pacchetti dei dati ricevuti per la ricostruzione dell'evento.

La prima parte, a causa della elevatissima sensibilità richiesta, dei livelli di rumore accettabili e dell'altissima modularità richiesta, ha consentito lo sviluppo di tecniche di trattamento di segnali che hanno reso possibile la realizzazione di moduli ad alta densità in grado di trattare e digitalizzare segnali analogici (ADC di carica o di picco). Inoltre tali attività hanno dato luogo a soluzioni innovative in altri settori di interesse industriale: la realizzazione di un'elettronica di acquisizione per una macchina per monitoraggio cardiaco ancora in fase di completamento, o l'elettronica per il trattamento di segnali provenienti da sensori biomedici (ECG, pressione del sangue, ecc.) utilizzata in apparecchi ancora prototipali, ma con grandi possibilità di penetrazione commerciale.

In conclusione l'esperienza della società con un programma ambizioso e complesso come quello del 5% è da ritenersi positiva per molti aspetti. In primo luogo perché ha consentito di affrontare a costi ragionevoli una serie di tematiche e la messa a punto di tecnologie avanzate che con le sole risorse della società difficilmente sarebbero state affrontate. In secondo luogo perché le esperienze accumulate hanno consentito di mettere a punto prodotti e soluzioni valide per applicazioni diverse. Alcune di esse poi sono completamente al di fuori del campo della ricerca di fisica e possono avere delle ricadute economiche di dimensioni maggiori di ordini di grandezza del fatturato prodotto nel campo della ricerca scientifica.”