

**UNIVERSITA' DEGLI  
STUDI DI PADOVA**

Facoltà di Ingegneria

**ISTITUTO NAZIONALE  
DI FISICA NUCLEARE**

Laboratori Nazionali di Legnaro

*Con la Federazione Regionale degli Industriali Veneti*

**Tesi di MASTER in**

**“Trattamenti di Superficie Applicati a Tecnologie  
Meccaniche Innovative per l'Industria”**

**PREPARAZIONE DI UN PROTOCOLLO DI  
DEPOSIZIONE MAGNETRON SPUTTERING  
DI FILMS SOTTILI DI NITRURO DI TITANIO**

Relatore: prof. V. Palmieri

Candidato: **dott. Federico Della Ricca**

N° Matr.: **895488-CM**

Anno Accademico 2002/03

# Indice

Introduzione .....	2
Il sistema da vuoto .....	5
Procedura operativa .....	10
Il programma di gestione .....	13
Il programma passo- passo .....	15
Risultati sperimentali .....	23
Conclusioni .....	26
Appendice A.....	27

# Introduzione



Uno dei materiali più interessanti fra quelli disponibili in film sottile è il nitrato di titanio.

Dall'introduzione dei primi processi industriali per la produzione di film sottili di nitrato di titanio sono passati circa 25 anni, e ormai la sua produzione è considerata una tecnologia matura.

Le principali proprietà del nitrato di titanio sfruttate sono le seguenti:

- elevata durezza (maggiore dei carburi cementati, o metallo duro)
- basso coefficiente d'attrito
- resistente al calore (in aria fino a circa 400 °C)
- resistente a molti agenti chimici
- superficie a bassa adesività
- non tossico (approvato anche per usi biomedici)
- il processo produttivo (PVD) è a basso impatto ambientale
- color giallo-oro

Da queste proprietà derivano gli usi principali del nitrato di titanio:

- aumenta la resistenza all'usura di molti componenti meccanici
- preserva e aumenta la durata dei taglienti negli utensili per

lavorazioni meccaniche

- impedisce il grippaggio e le microsaldature a freddo
- abbassa il coefficiente d'attrito in molti sistemi
- aumenta la resistenza alla corrosione

In molti casi l'applicazione di film sottili di nitruro di titanio può aumentare la vita media degli utensili anche del 500%, permettendo di aumentare la produttività e ridurre i costi.

Date queste sue proprietà il nitruro di titanio è ormai un materiale indispensabile all'industria per la lavorazione dei metalli e non solo.

Attualmente il processo produttivo maggiormente utilizzato per la deposizione di film sottili di TiN è la deposizione per arco catodico.

In questa tecnica un arco elettrico sottovuoto corre fra una punta metallica e un *target* in titanio. L'elevata corrente (centinaia di ampere, con un potenziale di decine di volt) provoca l'emissione di cluster di atomi di metallo che vanno a depositarsi sugli oggetti posti davanti al target stesso.

I sistemi di deposizione industriali hanno più target e caroselli per muovere i pezzi in modo che la deposizione avvenga uniformemente da tutti i lati.

Per far avvenire la reazione fra il titanio e l'azoto è sufficiente far avvenire il processo in una camera con una pressione parziale di azoto. L'energia della scarica è sufficiente per eccitare e dissociare le molecole di azoto, che si trovano quindi in uno stato altamente reattivo, per cui la reazione avviene man mano che procede la deposizione.

La temperatura di deposizione del substrato va in genere dai 200 ai 400 °C.

È possibile ottenere film di nitruro di titanio anche tramite CVD (*chemical vapour deposition*) in cui composti volatili del titanio reagiscono con un substrato caldo, portando alla creazione del film sottile.

Un'altra tecnica utilizzata per la produzione di film sottili è lo *sputtering*, in cui un plasma (ovvero un gas ionizzato) bombarda il target, con la trasmissione di energia cinetica dagli ioni del plasma agli atomi del target, che vengono così espulsi dal target stesso e vanno a depositarsi sul substrato. Per questo motivo lo sputtering è spesso chiamato nei libri "giocare a biliardo con gli atomi".

Per aumentare l'efficienza del plasma in genere si usano dei magneti per confinare gli elettroni. In questo caso si parla di magnetron sputtering.

La principale differenza fra lo sputtering e l'arco catodico è che nell'arco catodico sono espulsi cluster e microgocce di atomi, mentre nello sputtering vengono emessi singoli atomi.

Pertanto la velocità di deposizione nella tecnica di sputtering è decisamente inferiore a quella dell'arco catodico, ma la rugosità della

superficie è spesso inferiore.

Se nel plasma è presente un gas che reagisce con il film sottile, si parla di sputtering reattivo. Ovviamente per produrre nitruro di titanio bisognerà introdurre azoto nella camera da vuoto.

Anche in questo caso l'energia della scarica è sufficiente per eccitare le molecole di azoto, aumentandone la reattività.

Rispetto all'arco catodico, uno dei vantaggi dello sputtering è la possibilità di depositare anche all'interno di fori, purchè si ricorra ad un target di forma opportuna.

# Il sistema da vuoto

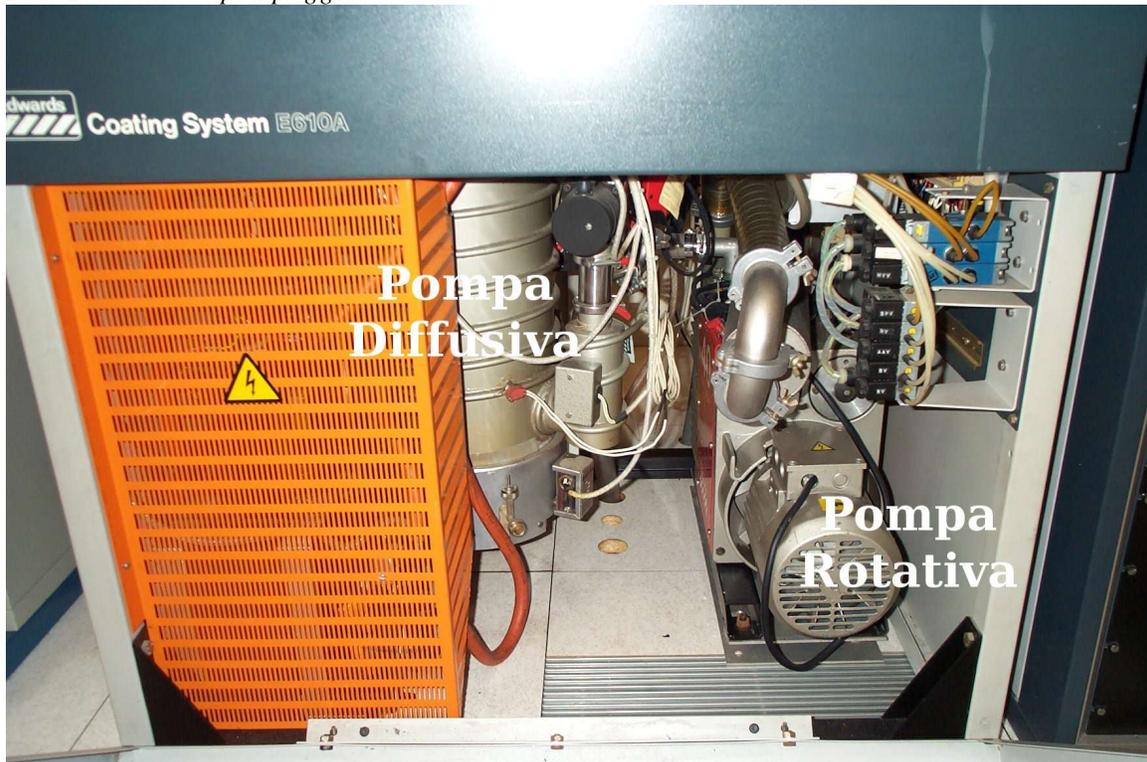


*Foto 1 Macchina utilizzata per le deposizioni*

Il sistema da vuoto Edwards (foto 1) è composto da una campana da vuoto in cui il vuoto viene prodotto e mantenuto tramite una pompa rotativa a pistoncini per il prevuoto e una pompa a diffusione molecolare per l'alto vuoto.

Le due pompe, insieme con parte delle valvole e alcuni componenti ausiliari, sono mostrate in foto 2.

Foto 2 Sistema di pompaggio



Per assicurare la funzionalità del sistema sono ovviamente presenti altri componenti:

- sensori da vuoto
  - valvole
  - sottosistema di *baking*
  - circuiti di raffreddamento (ad acqua)
  - linee di immissione di gas (per *venting* e di processo)
- oltre naturalmente ai dispositivi specifici per le deposizioni in vuoto, ovvero evaporatori e *magnetron*.

### ***I sensori da vuoto***

I sensori da vuoto al momento installati sono tre, due di tipo *Pirani* e un *Penning*.

I sensori di tipo *Pirani* sfruttano la variazione di conducibilità termica di un gas al variare della pressione. Hanno un *range* di funzionamento che va dalla pressione atmosferica a circa  $10^{-3}$  mbar.

L'uscita dei sensori di tipo *Pirani* installati nel sistema da vuoto è in mV, ma viene automaticamente convertita in *mbar* dal *controller* a microprocessore.

Bisogna tenere a mente che la risposta di questo tipo di sensori non

dipende solo dalla pressione, ma anche dal tipo di gas presenti, in quanto gas diversi hanno conducibilità diverse, e in misura minore dalla temperatura ambiente.

I *Pirani* installati sul sistema sono tarati per aria/azoto, pertanto misurano in difetto la pressione dell'argon (che essendo una molecola monoatomica ha una conducibilità minore dell'azoto).

Uno dei sensori è montato a misurare la pressione nella camera, mentre l'altro controlla la pressione fra pompa diffusiva e la pompa rotativa.

L'altro sensore è di tipo *Penning*, ovvero a catodo freddo.

In questo tipo di sensori è misurata la corrente ionica fra un catodo e un anodo. Un magnete permanente è utilizzato per confinare gli elettroni e aumentare la corrente rilevata.

Anche i vacuometri a catodo freddo sono influenzati dal tipo di gas presente, in quanto gas diversi hanno potenziali di ionizzazione diversi.

Questo tipo di vacuometri è in grado di funzionare da circa  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  mbar. Sopra la pressione limite è opportuno spegnere il sensore per evitare scariche che potrebbero danneggiarlo.

### ***Valvole***

Per poter operare correttamente, è necessario poter isolare le varie sezioni per regolare i flussi di gas.

La maggior parte delle valvole presenti nel sistema sono di tipo elettropneumatico, ovvero comandate un attuatore ad aria compressa a sua volta azionato da un'elettrovalvola.

In questo modo nel caso di interruzioni di energia elettrica le valvole si chiudono automaticamente, preservando l'integrità del vuoto.

Le uniche eccezioni sono costituite dalle valvole per l'immissione dei gas di processo (argon o azoto), che sono manuali.

### ***Sistema di baking***

Per diminuire i tempi di degassaggio del sistema e raggiungere un buon grado di vuoto in tempi accettabili è opportuno e spesso necessario aumentare la temperatura del sistema riscaldandolo.

A tale scopo sulla parte superiore della camera è situato un riscaldatore a irraggiamento (*radiant heater*).

Per accendere tale dispositivo bisogna che il vuoto sia sufficientemente alto (circa  $10^{-4}$  mbar) per evitare l'ossidazione dei componenti della camera.

### ***Circuiti di raffreddamento***

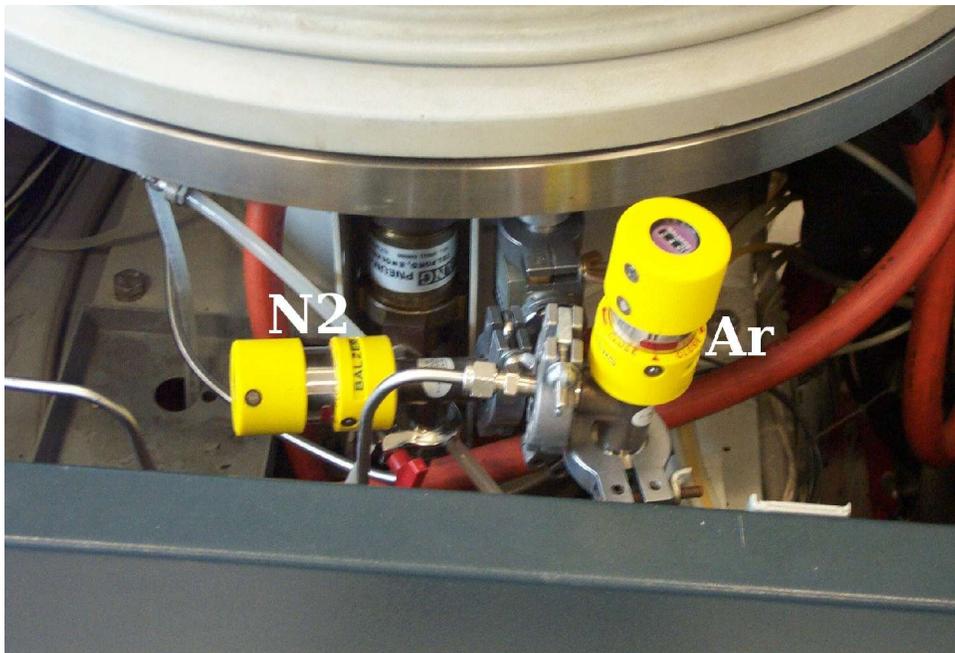
Per il funzionamento della pompa diffusiva è necessario che sia correntemente raffreddata tramite il circuito di raffreddamento.

Per evitare l'eccessivo riscaldamento dei magneti e del *target* nei *magnetron* anch'essi vanno raffreddati.

Un altro circuito di raffreddamento serve a raffreddare la camera subito dopo il *baking* o durante il processo.

### ***Linee di immissione gas***

Vi sono due linee di immissione di gas, una per l'argon e una l'azoto. Alla fine di entrambe vi è una valvola regolabile manuale per la regolazione del flusso di gas in ingresso nella camera da vuoto. Le due valvole sono mostrate e identificate nella foto 3 qui sotto riportata.



*Foto 3 Valvole per l'immissione di gas di processo*

### ***Il magnetron***

Il *magnetron* utilizzato per le deposizioni di nitrato di titanio monta *target* circolari di diametro 50 mm e altezza variabile (qualche millimetro).

È inoltre presente nel sistema un altro *magnetron* di forma rettangolare. Entrambi i *magnetron* sono visibili nella foto 3.

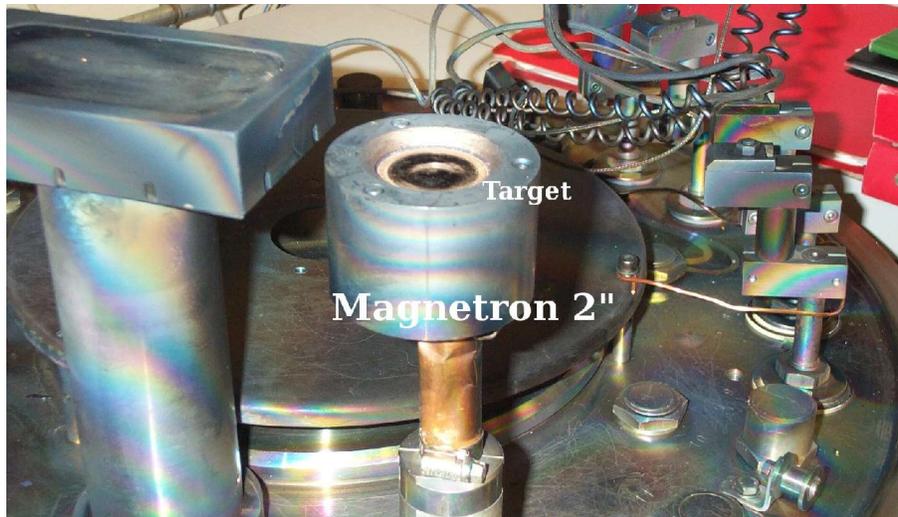


Foto 4 Magnetron utilizzato per le deposizioni

# Procedura operativa

Per prima cosa bisogna accendere il sistema con l'interruttore generale posto sulla parte frontale del rack.

Bisogna quindi controllare che nella memoria del controller sia presente il programma di gestione. Se il controller è rimasto senza alimentazione elettrica per molto tempo sarà probabilmente necessario caricare il programma, ricorrendo alla copia salvata sul pc del laboratorio.

Foto 5 Controller Edwards



Se il programma è correttamente inserito, è possibile procedere con la procedura.

Nel menù del *controller* si sceglie “*sequence mode*” premendo il tasto *escape*, e si parte dallo *stage 10* premendo *enter*.

A questo punto tutti i dispositivi (valvole, pompe, etc.) sono spenti.

Prima di accedere le pompe, bisogna aprire l'acqua di raffreddamento tramite il rubinetto posto dietro il sistema. Non è necessario aprire del tutto il circuito di raffreddamento, anzi è meglio aprirlo circa a un terzo, massimo metà, in quanto essendo lo scarico del laboratorio leggermente sottodimensionato, vi è il rischio di sovraccaricarlo se ci sono altri circuiti di raffreddamento in funzione, e comunque aprirlo di più costituisce solo uno spreco d'acqua.

Se ci si dimentica di aprire l'acqua di raffreddamento, la pompa diffusiva andrà in allarme poco dopo averla accesa, per il surriscaldamento dell'olio in essa contenuto.

È consigliabile chiudere il rubinetto del circuito di raffreddamento della campana, in quanto inutile a questo punto, anzi è controproducente tenerlo aperto se si utilizza il *baking*.

Premendo il tasto **CYCLE**, si inizia la procedura di pompaggio, accendendo la pompa rotativa e aprendo la valvola fra le due pompe.

Premendo, dopo qualche minuto, il tasto **PUMP ON**, si accende la pompa diffusiva.

Dopo trenta minuti (o premendo il tasto **ERROR**, se si è sicuri che la pompa diffusiva sia già calda, perché ad esempio è appena stata spenta) il sistema nello stato **SEALED**, ovvero le due pompe sono accese, e la valvola fra di loro è aperta.

Se si vuole cominciare a pompare in camera bisogna premere il tasto **CYCLE**, la valvola fra le pompe si chiude e la rotativa comincia a pompare in camera.

Se è molto tempo che il sistema non è utilizzato è possibile che il degassaggio della pompa diffusiva faccia salire la pressione sullo scarico della stessa (HD1) oltre il valore di soglia ( $3 \cdot 10^{-1}$  mbar), facendo scattare l'allarme.

Per evitare ciò, conviene tenere sotto controllo la pressione HD1 durante il **ROUGHING**, e se dovesse salire eccessivamente, ritornare allo stadio di **SEALED**, premendo il tasto **SEAL** e attendendo che il pompa rotativa svuoti la diffusiva prima di riprendere il pompaggio in camera.

Da questo punto in poi il programma prosegue automaticamente fino a completare il pompaggio. È possibile effettuare il *baking* in automatico posizionando l'interruttore a levette del *radiant heater* su ON e regolando il termostato con la manopola (evitando di posizionarla su FULL).

Il *baking* verrà attivato solo quando la pressione in camera scenderà sotto i  $5 \cdot 10^{-5}$  mbar (letti dal *penning*) e eventualmente spento se la pressione dovesse salire oltre i  $6 \cdot 10^{-3}$  mbar (letta dal *pirani*).

Quando si vuole interrompere il *baking* bisogna spegnere il *radiant heater* e aprire il circuito di raffreddamento della camera.

Se il processo di pompaggio è andato a buon fine, il sistema si troverà nello stato **STANDBY**, premendo **PROCESS** si potrà iniziare la deposizione vera e propria.

Nello *stage* **PROCESS** la valvola d'alto vuoto è chiuso e il pompaggio avviene tramite il *bypass*, in questo modo si può mantenere una pressione di gas di processo in camera maggiore senza superare il carico di gas massimo pompabile attraverso la pompa a diffusione.

Nello *stage* **PROCESS** la valvola di immissione di gas di processo è aperta, pertanto per introdurre gas in camera è sufficiente aprire le valvole manuali poste sulle linee di gas.

Vi sono due valvole uguali: una per l'argon e una per l'azoto. Entrambe le valvole sono dotate di contatore numerico per la stima di quanto sono aperte.

Conviene aprire prima la valvola dell'argon, e dopo che la pressione si è stabilizzata aprire la valvola dell'azoto.

Bisogna aprire le valvole lentamente e attendere che la pressione si sia stabilizzata prima di procedere a nuove correzioni, in quanto pompando attraverso il *bypass* la velocità di pompaggio è bassa e occorre qualche minuto prima che la pressione si stabilizzi.

Una volta che la pressione è stabile bisogna collegare il *magnetron* all'alimentatore, facendo attenzione a serrare bene la vite di fissaggio, per evitare che il cavo possa staccarsi.

Poichè il *magnetron* una volta alimentato è sotto potenziale piuttosto elevato (centinaia di volt) bisogna prima di tutto controllare che il circuito di raffreddamento non abbia perdite e che il rischio elettrico sia minimizzato, con le parti in tensione opportunamente schermate.

È importante che durante la deposizione il *target* e il *magnetron* non si riscaldino eccessivamente, e quindi spegnere dopo qualche minuto dalla prima accensione per vedere se il *target* diventa incandescente. Nel dubbio, è possibile effettuare le deposizioni a cicli di qualche minuto alternati a cicli in cui il *magnetron* spento si raffredda.

Oltre a corrente e tensione (e quindi potenza), un parametro utile per le deposizioni è il colore della scarica: se essa è fatta in argon dovrebbe essere blu, se fatta in azoto colore rosa.

È possibile osservare il colore della scarica attraverso l'oblò della camera. A tale proposito è va ricordato che non bisogna effettuare deposizioni senza che l'oblò sia *protetto* da una capsula di vetro tipo *petri*, da sostituire quando non più trasparente.

A deposizione effettuata, si ritorna allo stato **SEALED**, da cui è possibile passare allo stage di **VENT**, in cui è si può immettere l'azoto del rientro e aprire la camera.

A volte nel rientro la valvola di alto vuoto può non essere perfettamente chiusa e una piccola parte del gas di rientro può entrare nella pompa diffusiva (si vede che la pressione di HD1, pirani fra le due pompe, sale). Se ciò dovesse avvenire non interrompere il rientro, in quanto tale fuga si chiude quando la pressione in camera (la pressione allo scarico della diffusiva) ridiscende).

Se si vuole fare una nuova deposizione, basta chiudere la camera e reiniziare il pompaggio dallo stage **SEALED**.

# Il programma di gestione

Contrariamente alla maggior parte dei sistemi presenti in laboratorio, il sistema da vuoto Edwards è gestito da un controllore a microprocessore a cui sono collegate quasi tutte le funzioni della macchina.

Questo significa che non ci sono pulsanti che agiscono direttamente sulle valvole o sulle pompe, ma tutte queste funzioni sono accessibili tramite il *display* del *controller*.

Il *controller* ha due modi di lavoro: l'*adjust mode* e il *sequence mode*.

In *adjust mode* l'utente, tramite il display e il tastierino, può navigare fra i menù e accedere sia alle funzioni della camera da vuoto (accendere e spegnere le pompe, aprire e chiudere le valvole o solo controllarne lo stato) sia quelle dedicate al *controller* stesso (modificare il programma, salvarlo o caricarlo dal pc).

Come suggerisce il nome, l'*adjust mode* è concepito per i compiti di manutenzione e modifica del programma della macchina, non per il suo uso diretto.

Per il processo, è consigliabile utilizzare il *sequence mode*, in cui il microcontroller opera come un "automa a stati finiti", ovvero esegue un programma costituito da vari *stage*, ognuno dei quali è eseguito **ciclicamente** finché non si verifica una condizione che lo faccia saltare (*jump*) ad un altro *stage*.

Questo significa che in *sequence mode* è possibile automatizzare gran parte del funzionamento della macchina, riducendo al minimo gli errori dovuti a distrazione o manovre errate. D'altra parte ha lo svantaggio di dover pianificare a priori tutte le azioni da intraprendere, perdendo quindi in flessibilità.

Il programma è memorizzato su una memoria di tipo volatile, conservata da una pila di tipo ricaricabile. Poiché l'autonomia di questa pila non è elevata si consiglia di mantenere alimentato il microcontroller anche se la macchina dovesse rimanere spenta per lunghi periodi, altrimenti il programma va perso. Se dovesse verificarsi tale eventualità una copia del programma in formato "macchina" (che è diverso dal formato con cui è possibile visualizzare sul display il programma) è presente sul pc del laboratorio. Ovviamente tale copia va aggiornata nel caso di modifiche al programma.

Prima di esaminare il programma in maniera dettagliata, bisogna capire come il controller *vede* e gestisce i dispositivi.

Il controller gestisce autonomamente i sensori di vuoto, chiamati HD1,

HD2, HD3, ovvero rispettivamente il *Pirani* posto fra diffusiva e rotativa, il *Pirani* e il *Penning* posti in camera.

Il controller gestisce i dispositivi della camera tramite due unità digitali che controllano ciascuna 8 relè. Ogni relè corrisponde ad un *bit* dell'unità stessa.

La tabella seguente mostra la corrispondenza fra unità digitali e dispositivi:

<i>Unità</i>	<i>Canale</i>	$(2^n)$	<i>Dispositivo</i>
1	1	1	Pompa rotativa
1	2	2	Pompa diffusiva
1	3	4	Valvola fra le due pompe (backing valve)
1	4	8	Valvola vuoto grossolano (roughing v.)
1	5	16	Valvola alto vuoto (high vacuum valve)
1	6	32	Valvola per il rientro (Venting valve)
1	7	64	Prima valvola cilindro idraulico
1	8	128	Seconda valvola cilindro idraulico
2	1	1	Valvola pompaggio fine (by-pass valve)
2	2	2	Valvola gas processo (needle valve)
2	3	4	HT power
2	4	8	Current controller
2	5	16	Riscaldamento (radiant heater)

Accedere un dispositivo significa accendere l'uscita corrispondente.

Si può accendere un singolo dispositivo (SWITCH ON UNIT # CHANNEL #), spegnerlo (SWITCH OFF UNIT # CHANNEL #), oppure porre in uno stato preciso tutta un'unità (OUTPUT TO UNIT # NUMBER #). In questo ultimo caso basta sommare i numeri corrispondenti ai dispositivi che si vogliono accessi, gli altri verranno spenti.

Per conoscere lo stato di un dispositivo, il *controller* utilizza le unità logiche 3 e 4, con la seguente tabella di corrispondenza.

<i>Unità</i>	<i>Canale</i>	$(2^n)$	<i>Dispositivo</i>
3	1	1	Pompa rotativa
3	2	2	Pompa diffusiva e camera chiusa
3	3	4	Valvola fra le due pompe (backing valve)
3	4	8	Valvola vuoto grossolano (roughing v.)
3	5	16	Valvola alto vuoto (high vacuum valve)
3	6	32	Valvola per il rientro (Venting valve)
3	7	64	Valvola pompaggio fine (by-pass valve)
3	8	128	Valvola gas processo (needle valve)
4	1	1	Cilindro idraulico
4	2	2	Termostato

È presente anche un'unità nove, non collegata a nessun dispositivo fisico, ma utilizzato per registrare informazioni fra i vari *stage*.

## Il programma passo- passo

All'accensione della macchina, si va in *sequence mode* e parte dallo *stage* numero 10.

### **Stage 10 (stand- by, inizio del ciclo)**

```

READ STAGE NO 10
SWITCH OFF ALL CHANNELS
SWITCH OFF ALL LAMPS
SWITCH OFF ALL PENNING
SWITCH ON LAMP 1
ASSIGN LABEL NUMBER 28
OUTPUT TO UNIT 9 NUMBER 1
JUMP TO STAGE NUMBER 11 IF SWITCH PRESSED=3
JUMP TO STAGE NUMBER 15 IF SWITCH PRESSED=5
END OF STAGE

```

Ogni *stage* comincia con la riga READ STAGE NO seguito dal numero di *stage*, e termina con la riga END OF STAGE.

Lo *stage* di partenza è il numero 10.

Questo *stage* è etichettato (ASSIGN LABEL) “**READY**” in quanto la macchina è spenta e pronta per cominciare il pompaggio.

Vengono prima spenti tutti i dispositivi, tutte le spie del quadro e tutti i sensori di tipo *Penning* (prime tre righe).

Viene poi acceso la spia numero uno (*PUMP OFF*).

Viene inoltre “acceso” il canale 1 dell'unità fittizia nove.

A questo punto l'utente se preme il tasto 3 (*CYCLE*) va allo *stage 11*, se preme il pulsante 5 (*VENT*) va allo *stage 15*, altrimenti rimane nello stesso stato indefinitivamente.

### ***Stage 11 (diff pump off, inizio pompaggio con rotativa)***

```
READ STAGE NO 11
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 5
ASSIGN LABEL NUMBER 1
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=1
JUMP TO STAGE NUMBER 12 IF SWITCH PRESSED=2 AND HD 1 < 1.0-1 MB
JUMP TO STAGE NUMBER 44 IF DIG UNIT3CH3 OFF AND TIME DELAY 2S
JUMP TO STAGE NUMBER 47 IF DIG UNIT3CH1 OFF AND TIME DELAY 2S
END OF STAGE
```

Questo è lo *stage DIFF PUMP OFF*, in quanto nella seconda riga viene accesa la pompa rotativa e la valvola fra le due pompe (*OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 5*,  $5=1+4$ ) mentre la pompa diffusiva resta spenta, per cui la rotativa sta svuotando la pompa diffusiva spenta.

Premendo il tasto *PUMP OFF* si ritorna allo *stage 10*, premendo il pulsante 2 (*PUMP ON*) si va allo *stage 12*, ma solo se la pressione all'uscita della pompa diffusiva è sufficientemente bassa.

Le ultime due righe sono di controllo: se entro due secondi la rotativa non risulta accesa o la *backing valve* aperta si va allo *stage 44* o *47*, dove l'errore sarà gestito.

### ***Stage 12 (pump warm up, riscaldamento diffusiva)***

```
READ STAGE NO 12
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 2
SWITCH OFF LAMP 1
SWITCH ON LAMP 2
ASSIGN LABEL NUMBER 16
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF TIME DELAY 30M
JUMP TO STAGE NUMBER 13 IF SWITCH PRESSED=1
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=8
JUMP TO STAGE NUMBER 48 IF DIG UNIT3CH3 OFF AND TIME DELAY 2S
CALL STAGE NUMBER 50
END OF STAGE
```

Questo è lo *stage PUMP WARM UP*, proprio perché viene accesa la pompa diffusiva. Si spegne quindi la spia *PUMP OFF* e si accende la spia *PUMP ON*.

Premendo il tasto *PUMP OFF* si ritorna allo *stage 10*, premendo il

pulsante 2 (PUMP ON) si va allo *stage* 12, ma solo se la pressione all'uscita della pompa diffusiva è sufficientemente bassa.

Anche qui vi è una riga di controllo: se la *backing valve* è chiusa viene chiamato la *stage* 48.

Dopo 30 minuti (periodo più che sufficiente per portare alla temperatura di funzionamento la pompa diffusiva) il *controller* va allo *stage* 14. È possibile andare direttamente allo *stage* 14 premendo il tasto 8 (ERROR).

Premendo il tasto PUMP OFF si va allo *stage* 13.

### **Stage 13 (raffreddamento diffusiva)**

```
READ STAGE NO 13
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 2
SWITCH ON LAMP 1
SWITCH OFF LAMP 2
ASSIGN LABEL NUMBER 1
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=1 AND TIME DELAY 1M
JUMP TO STAGE NUMBER 12 IF SWITCH PRESSED=2 AND HD 1 < 1.0-1 MB
END OF STAGE
```

In questo *stage* viene spenta la pompa diffusiva, aggiornando di conseguenza lo stato delle spie.

È possibile andare allo *stage* 10 premendo PUMP OFF (dopo 1 minuto) o al 12 se la pressione fra le pompe è sufficientemente bassa.

L'etichetta assegnata a questo *stage* è **DIFF PUMP OFF** (la stessa etichetta può essere assegnata a più *stage*).

### **Stage 14 (sealed, in attesa di iniziare il processo)**

```
READ STAGE NO 14
SWITCH OFF ALL LAMPS
SWITCH OFF ALL PENNINGS
SWITCH OFF AUDIBLE ALARM
SWITCH ON LAMP 2
SWITCH ON LAMP 5
OUTPUT TO UNIT 9 NUMBER 2
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 3
OUTPUT TO UNIT 2 NUMBER 0
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3 IF TIME DELAY 15S
ASSIGN LABEL NUMBER 28
ASSIGN LABEL NUMBER 10 IF TIME DELAY 2S
JUMP TO STAGE NUMBER 15 IF SWITCH PRESSED=4
JUMP TO STAGE NUMBER 16 IF SWITCH PRESSED=3 AND HD 2 > 6.5-2 MB
JUMP TO STAGE NUMBER 20 IF SWITCH PRESSED=3 AND HD 2 < 6.0-2 MB
JUMP TO STAGE NUMBER 13 IF SWITCH PRESSED=1
JUMP TO STAGE NUMBER 48 IF DIG UNIT3CH2 OFF AND TIME DELAY 2S
JUMP TO STAGE NUMBER 41 IF DIG UNIT3CH3 OFF AND TIME DELAY 17S
JUMP TO STAGE NUMBER 42 IF DIG UNIT3CH4 ON AND TIME DELAY 1S
JUMP TO STAGE NUMBER 43 IF DIG UNIT3CH5 ON AND TIME DELAY 1S
JUMP TO STAGE NUMBER 44 IF DIG UNIT3CH6 ON AND TIME DELAY 3S
JUMP TO STAGE NUMBER 45 IF DIG UNIT3CH7 ON AND TIME DELAY 2S
```

SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 2 IF SWITCH PRESSED=6  
CALL STAGE NUMBER 50  
END OF STAGE

Questo *stage* è particolarmente lungo perché occupa un ruolo centrale, essendo lo *stage* dal quale si può partire per il rientro della camera, per il pompaggio fino in ultra alto vuoto oppure iniziare la sequenza per spegnere la macchina.

Vengono spente tutte le spie e i *penninge* e l'eventuale allarme a cicalina.

Poi vengono accese le spie PUMP ON e SEAL, quindi memorizzato il valore 2 nell'unità nove.

L'unità uno viene configurata con la rotativa e la diffusiva accese (1+2=3) e il resto chiuso. Tutte le valvole e i dispositivi dell'unità due sono chiusi/spenti.

Dopo 15 secondi viene aperta la *backing valve*.

Questa procedura è necessaria perché allo *stage* 14 si può pervenire da diverse strade, pertanto il ritardo di 15 secondi è necessario per avere la sicurezza che tutte le altre valvole eventualmente aperte siano chiuse prima di aprire la valvola fra le due pompe, onde evitare flussi di gas indesiderati.

Dopo 2 secondi viene assegnata l'etichetta **SEALED**.

Premendo il tasto VENT si va allo *stage* 15, mentre premendo CYCLE si va allo *stage* 16 o 20 a seconda della pressione presente in camera.

Premendo PUMP OFF si va allo *stage* 13.

Viene eseguito un controllo sullo stato di tutti i dispositivi.

Eventualmente è possibile aprire la valvola per i gas di processo se si vuole che nel pompaggio successivo sia svuotata la croce con i connettori per l'immissione dei gas.

Lo *stage* 50 è uno stage di controllo e viene semplicemente richiamato (CALL e non JUMP TO). Lo *stage* 50 è richiamato in tutti gli altri *stage* e serve a controllare che la pressione all'uscita della pompa a diffusione non salga oltre un certo limite ( $3 \cdot 10^{-1}$  mbar).

### **Stage 15 (venting, rientro con azoto)**

READ STAGE NO 15  
SWITCH OFF ALL PENNINGGS  
SWITCH OFF LAMP 5  
ASSIGN LABEL NUMBER 9  
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 6 IF SWITCH PRESSED=3  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 6 IF SWITCH PRESSED=4  
JUMP TO STAGE NUMBER 1 IF SWITCH PRESSED=2 AND HD 2 < - 3120 MV  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH NO 5 ON AND DIG UNIT 9 = 1  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH NO 5 ON AND DIG UNIT 9 = 2  
END OF STAGE

In questo *stage* è possibile effettuare il rientro, ovvero introdurre azoto

fino a eguagliare la pressione esterna prima di aprire la camera.

La valvola è aperta con il tasto VENT e chiusa con il tasto CYCLE.

È possibile alzare la campana della camera con il tasto PUMP ON, ma solo se la pressione è sufficientemente alta (HD 2 < - 3120 MV).

Premendo il tasto 5 si ritorna allo *stage* da cui si è arrivati (l'informazione sullo *stage* da cui si è arrivati è ricavata dall'unità 9).

### **Stage 16 (roughing, pompaggio con rotativa)**

```
READ STAGE NO 16
SWITCH ON LAMP 3
SWITCH OFF LAMP 4
SWITCH OFF LAMP 5
ASSIGN LABEL NUMBER 15
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 3
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 4 IF TIME DELAY 3S
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5
JUMP TO STAGE NUMBER 20 IF HD 2 < 6.0-2 MB AND TIME DELAY 10S
JUMP TO STAGE NUMBER 41 IF DIG UNIT3CH3 ON AND TIME DELAY 2S
JUMP TO STAGE NUMBER 42 IF DIG UNIT3CH4 OFF AND TIME DELAY 5S
CALL STAGE NUMBER 50
END OF STAGE
```

In questo *stage* (**ROUGHING**) viene chiusa la *backing valve* e dopo 3 secondi viene aperta la *roughing valve*.

In questo *stage* viene utilizzata la pompa rotativa per pompare direttamente nella camera. Quando il vuoto è sceso a un livello sufficiente si va allo *stage* 20.

### **Stage 17 (pump down, pompaggio in camera con diffusiva)**

```
READ STAGE NO 17
SWITCH ON LAMP 3
SWITCH OFF LAMP 5
ASSIGN LABEL NUMBER 30
SWITCH OFF UNIT 2 CHANNEL 1
SWITCH ON PENNING GAUGE 3 IF TIME DELAY 4S
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 5 IF TIME DELAY 5S
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 5 IF HD 3 < 5.0-5 MB AND TIME DELAY 30S
SWITCH OFF UNIT 2 CHANNEL 5 IF HD 2 > 6.0-3 MB AND TIME DELAY 30S
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5
JUMP TO STAGE NUMBER 18 IF SWITCH PRESSED=6
JUMP TO STAGE NUMBER 18 IF HD 3 < 1.0-5 MB AND TIME DELAY 1M
JUMP TO STAGE NUMBER 43 IF DIG UNIT3CH5 OFF AND TIME DELAY 10S
JUMP TO STAGE NUMBER 49 IF HD 3 < 1.0-7 MB AND TIME DELAY 15S
CALL STAGE NUMBER 51
END OF STAGE
```

In questo *stage* (**PUMP DOWN**) viene effettuato il pompaggio fino all'alto vuoto, aprendo la valvola per alto vuoto. È in questo *stage* che viene acceso il *penning*. Viene anche abilitata l'accensione del *radiant heater* se

la pressione è minore di  $5 \cdot 10^{-5}$  mbar e disabilitata se la pressione risale sopra  $6 \cdot 10^{-3}$  mbar.

Premendo il tasto 5 si torna allo *stage 14*, mentre si va allo *stage 18* premendo il tasto 6 oppure quando la pressione scende sotto i  $10^{-5}$  mbar.

### **Stage 18 (stand- by, pompaggio in camera continua)**

```
READ STAGE NO 18
ASSIGN LABEL NUMBER 18
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5
JUMP TO STAGE NUMBER 19 IF SWITCH PRESSED=6
JUMP TO STAGE NUMBER 48 IF DIG UNIT3CH2 OFF AND TIME DELAY 2S
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 2 IF SWITCH PRESSED=3
SWITCH OFF UNIT 2 CHANNEL 2 IF SWITCH PRESSED=7
CALL STAGE NUMBER 51
END OF STAGE
```

In questo *stage (STAND- BY)* viene mantenuto l'alto vuoto ed è possibile accedere agli *stage 14* e *19*. È possibile aprire la valvola per l'immissione di gas di processo (tasto CYCLE).

### **Stage 19 (gas admit, processo vero e proprio)**

```
READ STAGE NO 19
SWITCH ON LAMP 6
ASSIGN LABEL NUMBER 9
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 5
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 1
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 2 IF TIME DELAY 5S
SWITCH OFF PENNING GAUGE 3 IF HD 2 > 6.5- 3 MB
SWITCH ON PENNING GAUGE 3 IF HD 2 < 6.0- 3 MB
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5
JUMP TO STAGE NUMBER 43 IF DIG UNIT3CH5 ON AND TIME DELAY 3S
JUMP TO STAGE NUMBER 45 IF DIG UNIT3CH7 OFF AND TIME DELAY 8S
JUMP TO STAGE NUMBER 46 IF DIG UNIT3CH8 OFF AND TIME DELAY 13S
CALL STAGE NUMBER 50
END OF STAGE
```

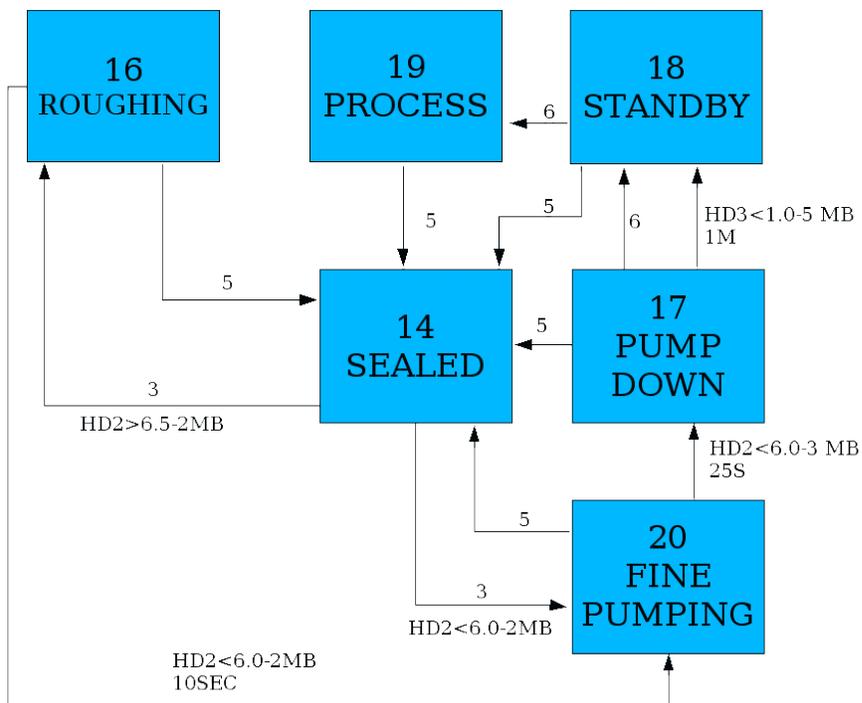
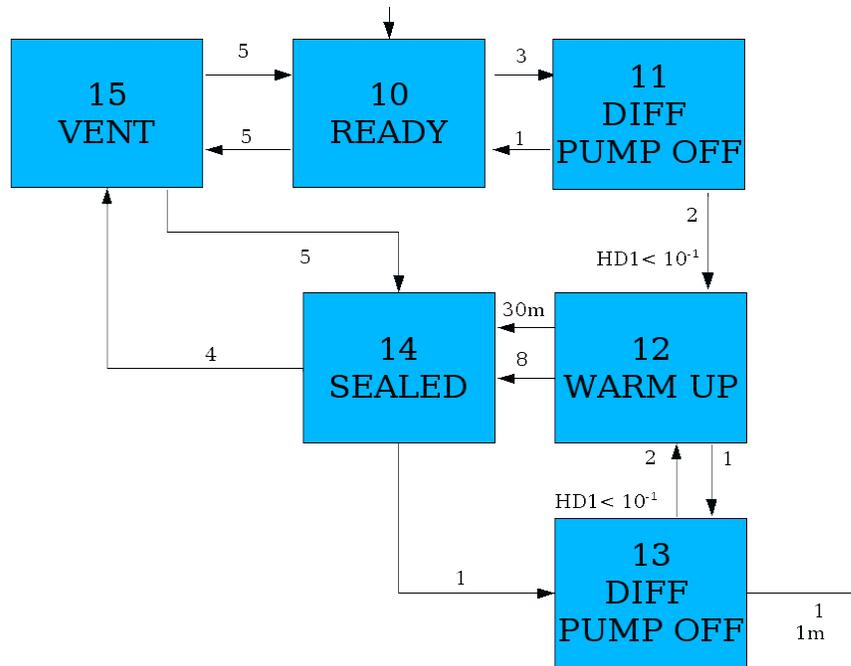
In questo *stage (GAS ADMIT)* è possibile effettuare il processo di deposizione vero e proprio. Vengono aperte la *by-pass valve* e la *needle valve* e chiusa la valvola di alto vuoto. Pertanto è possibile introdurre i gas di processo in camera pompando attraverso il *by-pass* per evitare che la pompa diffusiva sia sovraccaricata dal flusso di gas di processo.

Il vacuometro *penning* è spento e acceso in automatico secondo la pressione in camera. Per evitare che il vacuometro venga continuamente acceso e spento il *set point* in spegnimento è più alto di quello in accensione.

## ***Stage 20 (fine pumping, pompaggio fine)***

READ STAGE NO 20  
ASSIGN LABEL NUMBER 22  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 3  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3 IF TIME DELAY 10S  
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 1IF TIME DELAY 15S  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5  
JUMP TO STAGE NUMBER 17 IF HD 2< 6.0-3 MB AND TIME DELAY 25S  
JUMP TO STAGE NUMBER 42 IF DIG UNIT3CH3 OFF AND TIME DELAY 13S  
JUMP TO STAGE NUMBER 43 IF DIG UNIT3CH4 ON AND TIME DELAY 3S  
JUMP TO STAGE NUMBER 45 IF DIG UNIT3CH7 OFF AND TIME DELAY 18S  
CALL STAGE NUMBER 50  
END OF STAGE

In questo *stage* (**FINE PUMPING**) la pressione in camera è troppo bassa per essere efficacemente pompata tramite la pompa rotativa, ma troppo elevata per essere pompata direttamente attraverso la valvola d'alto vuoto con la pompa a diffusione, per cui è utilizzato il pompaggio attraverso il *by-pass*.



Schema 1 Schema a blocchi del programma di gestione

# Risultati sperimentali

Sono state eseguite alcune deposizioni di prova per mettere a punto il ciclo di *sputtering*.

Ogni deposizione è durata 40 minuti, divisi in intervalli di 10 minuti per evitare di surriscaldare il target.

La pressione di argon è stata mantenuta costante a circa  $8 \cdot 10^{-3}$  mbar, mentre è stata fatta variare la pressione di azoto.

Il substrato è costituito da silice amorfa.

Le deposizioni sono state analizzate mediante diffrazione a raggi X e confrontate con i dati di letteratura.

Wavelength= 1.54184					C
$2\theta$	Int	h	k	l	
36.712	736	1	1	1	
42.648	999*	2	0	0	
61.897	470	2	2	0	
74.175	181	3	1	1	
78.078	119	2	2	2	
93.318	47	4	0	0	
104.847	59	3	3	1	
108.805	125	4	2	0	
125.932	101	4	2	2	
141.737	55	5	1	1	

Schema 2 Dati di letteratura per XRD di TiN

Analizzando il diffrattogramma di seguito riportato si nota che esso è cristallino (infatti il fondo è basso) e fortemente orientato lungo i piani 220, infatti l'intensità di questi piani rapportata agli altri picchi è molto maggiore di quella che ci si aspetterebbe da un campione non orientato di nitrato di titanio, dove i picchi più intensi sono 200 e 111.

Questo fenomeno accade spesso nelle deposizioni per *sputtering*, ciò che avviene è che durante la crescita dei grani cristallini alcune direzioni di crescita siano preferite ad altre, e quindi si trova una maggiore porzione di film rappresentata da grani cristallini orientati secondo una particolare direzione, per cui vi sono piani maggiormente visibili con diffrazione a

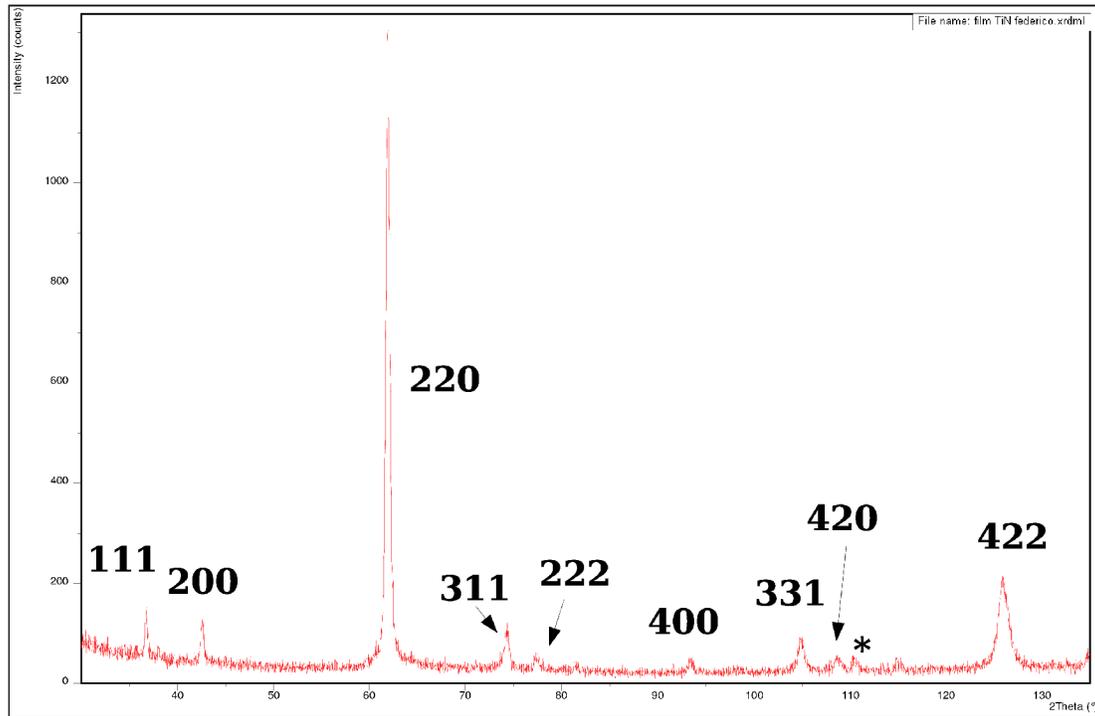
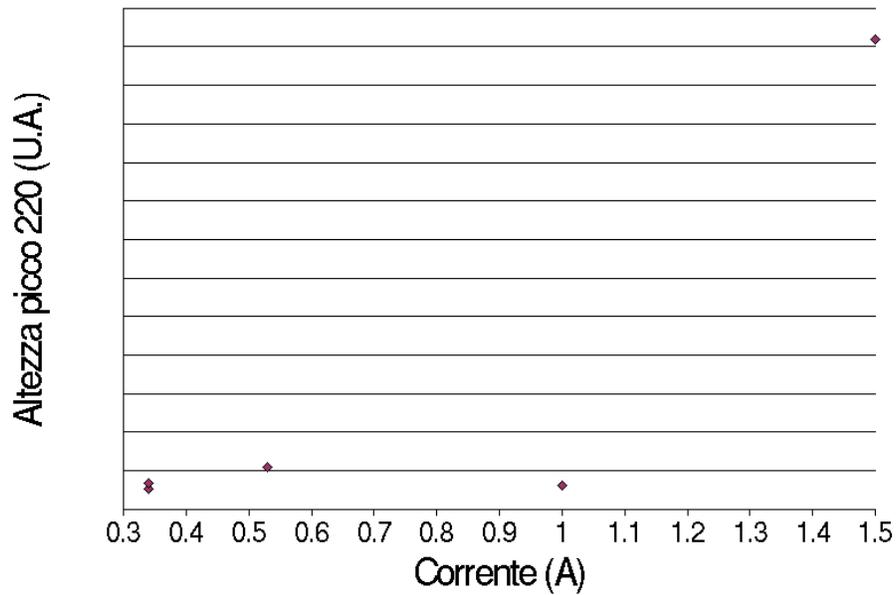


Grafico 1 Film orientato secondo 220 ( $I=1,5$  A,  $P_{totale}=14 \cdot 10^{-2}$  mbar. raggi X.

Esaminando l'influenza della corrente, si nota che logicamente maggiore è la corrente maggiore l'intensità del picco 220, tuttavia la relazione non è lineare, in quanto vi è una grossa differenza fra il campione depositato a 1 A e quello depositato a 1.5A.

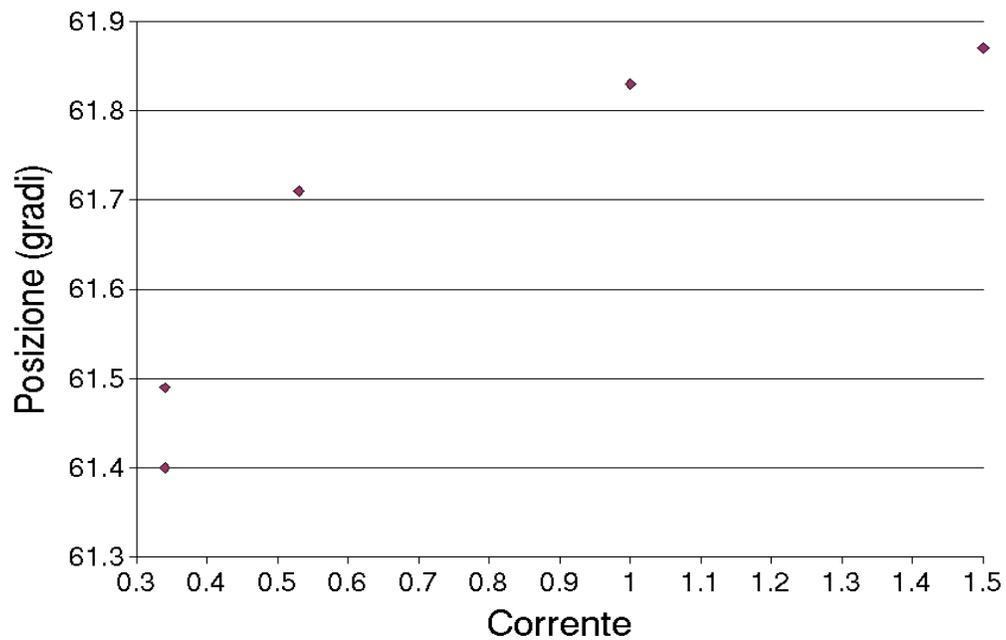
Questo è da attribuirsi al fatto che con una corrente maggiore anche la temperatura del substrato aumenta (il substrato non era riscaldato) e quindi aumenta l'energia termica disponibile per la crescita dei grani cristallini. Inoltre aumentando la corrente di deposizione aumenta la velocità di deposizione e quindi diminuisce la percentuale di impurezze incorporate nel film, che possono dare origine a zone amorphe.

### Altezza 220 vs Corrente



Dal secondo grafico si nota inoltre che aumentando la corrente il parametro reticolare (espresso come posizione in  $2\theta$  del picco 220) aumenta, avvicinandosi a quello della nitrato di titanio massivo ( $61.897^\circ$ )

### Posizione del picco 220 vs corrente



# Conclusioni

Dall'esperienza ottenuta, si è verificato che la produzione di film sottili di nitruro di titanio è una tecnica facilmente implementabile avendo a disposizione un sistema da vuoto opportuno come quello rappresentato dal sistema per deposizioni sotto- vuoto Edwards utilizzato.

Una buona parte del lavoro è consistito nel riportare a piena funzionalità la macchina, adattandola alla deposizione di nitruro di titanio mediante la creazione della linea di azoto, rimettendo in funzione il *magnetron* con un nuovo *target* in titanio e soprattutto riscrivendo il programma in modo da adattarlo all'esigenze del ciclo di deposizione.

Il grado di automazione possibile con questa macchina la rende più simile a sistemi industriali e quindi più adatta allo sviluppo di processi da applicare poi a problematiche industriali.

Verificata quindi la fattibilità della produzione di nitruro di titanio, l'ulteriore evoluzione di questo lavoro consisterà nel applicare il processo a problematiche reali, in particolare alla deposizione di oggetti di forma complessa, comprendenti anche fori o simili, che costituiscono casi nei quali le tecnologie industrialmente disponibili (arco catodico, *sputtering* tradizionale senza l'utilizzo di target opportunamente sagomati) non sono in grado di dare una risposta soddisfacente.

# Appendice A

## Listato del programma del controller Edwards

Di seguito è riportato integralmente il listato del programma presente nella memoria del controller a microprocessore che gestisce il sistema da vuoto alla data di stesura del presente manuale.

Come spiegato nel testo, gli stage da 1 a 20 (non tutti presenti) fanno parte della normale procedura operativa, mentre gli stage da 40 a 53 sono utilizzati per la gestione degli errori e/o eccezioni, ovvero delle situazioni non previste o di malfunzionamento.

```
READ STAGE NO 1
ASSIGN LABEL NUMBER 39
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 7
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 8
JUMP TO STAGE NUMBER 2 IF SWITCH NO 2 OFF
END OF STAGE
```

```
READ STAGE NO 2
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 8
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 7
JUMP TO STAGE NUMBER 1 IF SWITCH PRESSED=2
JUMP TO STAGE NUMBER 3 IF SWITCH PRESSED=1 AND DIG UNIT4CH1 OFF
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF TIME DELAY 5S AND DIG UNIT4CH1 ON AND DIG UNIT9CH1 ON
JUMP TO STAGE NUMBER 15 IF TIME DELAY 5S AND DIG UNIT4CH1 ON AND DIG UNIT9CH2 ON
END OF STAGE
```

```
READ STAGE NO 3
ASSIGN LABEL NUMBER 40
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 7
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 8
JUMP TO STAGE NUMBER 2 IF SWITCH NO 1 OFF
END OF STAGE
```

```
READ STAGE NO 9
ASSIGN LABEL NUMBER 20
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=8
END OF STAGE
```

```
READ STAGE NO 10
SWITCH OFF ALL CHANNELS
SWITCH OFF ALL LAMPS
SWITCH OFF ALL PENNINGES
SWITCH ON LAMP 1
ASSIGN LABEL NUMBER 28
OUTPUT TO UNIT 9 NUMBER 1
JUMP TO STAGE NUMBER 11 IF SWITCH PRESSED=3
JUMP TO STAGE NUMBER 15 IF SWITCH PRESSED=5
END OF STAGE
```

READ STAGE NO 11  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 5  
ASSIGN LABEL NUMBER 1  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=1  
JUMP TO STAGE NUMBER 12 IF SWITCH PRESSED=2 AND HD 1 < 1.0- 1 MB  
JUMP TO STAGE NUMBER 44 IF DIG UNIT3CH3 OFF AND TIME DELAY 2S  
JUMP TO STAGE NUMBER 47 IF DIG UNIT3CH1 OFF AND TIME DELAY 2S  
END OF STAGE

READ STAGE NO 12  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 2  
SWITCH OFF LAMP 1  
SWITCH ON LAMP 2  
ASSIGN LABEL NUMBER 16  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF TIME DELAY 30M  
JUMP TO STAGE NUMBER 13 IF SWITCH PRESSED=1  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=8  
JUMP TO STAGE NUMBER 48 IF DIG UNIT3CH3 OFF AND TIME DELAY 2S  
CALL STAGE NUMBER 50  
END OF STAGE

READ STAGE NO 13  
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 2  
SWITCH ON LAMP 1  
SWITCH OFF LAMP 2  
ASSIGN LABEL NUMBER 1  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=1 AND TIME DELAY 1M  
JUMP TO STAGE NUMBER 12 IF SWITCH PRESSED=2 AND HD 1 < 1.0- 1 MB  
END OF STAGE

READ STAGE NO 14  
SWITCH OFF ALL LAMPS  
SWITCH OFF ALL PENNINGES  
SWITCH OFF AUDIBLE ALARM  
SWITCH ON LAMP 2  
SWITCH ON LAMP 5  
OUTPUT TO UNIT 9 NUMBER 2  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 3  
OUTPUT TO UNIT 2 NUMBER 0  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3 IF TIME DELAY 15S  
ASSIGN LABEL NUMBER 28  
ASSIGN LABEL NUMBER 10 IF TIME DELAY 2S  
JUMP TO STAGE NUMBER 15 IF SWITCH PRESSED=4  
JUMP TO STAGE NUMBER 16 IF SWITCH PRESSED=3 AND HD 2 > 6.5- 2 MB  
JUMP TO STAGE NUMBER 20 IF SWITCH PRESSED=3 AND HD 2 < 6.0- 2 MB  
JUMP TO STAGE NUMBER 13 IF SWITCH PRESSED=1  
JUMP TO STAGE NUMBER 48 IF DIG UNIT3CH2 OFF AND TIME DELAY 2S  
JUMP TO STAGE NUMBER 41 IF DIG UNIT3CH3 OFF AND TIME DELAY 17S  
JUMP TO STAGE NUMBER 42 IF DIG UNIT3CH4 ON AND TIME DELAY 1S  
JUMP TO STAGE NUMBER 43 IF DIG UNIT3CH5 ON AND TIME DELAY 1S  
JUMP TO STAGE NUMBER 44 IF DIG UNIT3CH6 ON AND TIME DELAY 3S  
JUMP TO STAGE NUMBER 45 IF DIG UNIT3CH7 ON AND TIME DELAY 2S  
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 2 IF SWITCH PRESSED=6  
CALL STAGE NUMBER 50  
END OF STAGE

READ STAGE NO 15  
SWITCH OFF ALL PENNINGS  
SWITCH OFF LAMP 5  
ASSIGN LABEL NUMBER 9  
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 6 IF SWITCH PRESSED=3  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 6 IF SWITCH PRESSED=4  
JUMP TO STAGE NUMBER 1 IF SWITCH PRESSED=2 AND HD 2< - 3120 MV  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH NO 5 ON AND DIG UNIT 9 = 1  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH NO 5 ON AND DIG UNIT 9 = 2  
END OF STAGE

READ STAGE NO 16  
SWITCH ON LAMP 3  
SWITCH OFF LAMP 4  
SWITCH OFF LAMP 5  
ASSIGN LABEL NUMBER 15  
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 3  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 4 IF TIME DELAY 3S  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5  
JUMP TO STAGE NUMBER 20 IF HD 2< 6.0- 2 MB AND TIME DELAY 10S  
JUMP TO STAGE NUMBER 41 IF DIG UNIT3CH3 ON AND TIME DELAY 2S  
JUMP TO STAGE NUMBER 42 IF DIG UNIT3CH4 OFF AND TIME DELAY 5S  
CALL STAGE NUMBER 50  
END OF STAGE

READ STAGE NO 17  
SWITCH ON LAMP 3  
SWITCH OFF LAMP 5  
ASSIGN LABEL NUMBER 30  
SWITCH OFF UNIT 2 CHANNEL 1  
SWITCH ON PENNING GAUGE 3 IF TIME DELAY 4S  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 5 IF TIME DELAY 5S  
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 5 IF HD 3< 5.0- 5 MB AND TIME DELAY 30S  
SWITCH OFF UNIT 2 CHANNEL 5IF HD 2> 6.0- 3 MB AND TIME DELAY 30S  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5  
JUMP TO STAGE NUMBER 18 IF SWITCH PRESSED=6  
JUMP TO STAGE NUMBER 18 IF HD 3< 1.0- 5 MB AND TIME DELAY 1M  
JUMP TO STAGE NUMBER 43 IF DIG UNIT3CH5 OFF AND TIME DELAY 10S  
JUMP TO STAGE NUMBER 49 IF HD 3< 1.0- 7 MB AND TIME DELAY 15S  
CALL STAGE NUMBER 51  
END OF STAGE

READ STAGE NO 18  
ASSIGN LABEL NUMBER 18  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5  
JUMP TO STAGE NUMBER 19 IF SWITCH PRESSED=6  
JUMP TO STAGE NUMBER 48 IF DIG UNIT3CH2 OFFAND TIME DELAY 2S  
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 2IF SWITCH PRESSED=3  
SWITCH OFF UNIT 2 CHANNEL 2IF SWITCH PRESSED=7  
CALL STAGE NUMBER 51  
END OF STAGE

READ STAGE NO 19  
SWITCH ON LAMP 6  
ASSIGN LABEL NUMBER 9  
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 5  
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 1  
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 2 IF TIME DELAY 5S  
SWITCH OFF PENNING GAUGE 3 IF HD 2> 6.5- 3 MB  
SWITCH ON PENNING GAUGE 3 IF HD 2< 6.0- 3 MB  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5  
JUMP TO STAGE NUMBER 43 IF DIG UNIT3CH5 ON AND TIME DELAY 3S  
JUMP TO STAGE NUMBER 45 IF DIG UNIT3CH7 OFF AND TIME DELAY 8S  
JUMP TO STAGE NUMBER 46 IF DIG UNIT3CH8 OFF AND TIME DELAY 13S  
CALL STAGE NUMBER 50  
END OF STAGE

READ STAGE NO 20  
ASSIGN LABEL NUMBER 22  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 3  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3 IF TIME DELAY 10S  
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 1IF TIME DELAY 15S  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=5  
JUMP TO STAGE NUMBER 17 IF HD 2< 6.0-3 MB AND TIME DELAY 25S  
JUMP TO STAGE NUMBER 42 IF DIG UNIT3CH3 OFF AND TIME DELAY 13S  
JUMP TO STAGE NUMBER 43 IF DIG UNIT3CH4 ON AND TIME DELAY 3S  
JUMP TO STAGE NUMBER 45 IF DIG UNIT3CH7 OFF AND TIME DELAY 18S  
CALL STAGE NUMBER 50  
END OF STAGE

READ STAGE NO 40  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 5  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=8  
END OF STAGE

READ STAGE NO 41  
ASSIGN LABEL NUMBER 2  
SWITCH OFF ALL PENNINGGS  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3  
JUMP TO STAGE NUMBER 40  
END OF STAGE

READ STAGE NO 42  
ASSIGN LABEL NUMBER 0  
SWITCH OFF ALL PENNINGGS  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3  
JUMP TO STAGE NUMBER 13 IF SWITCH PRESSED=7  
END OF STAGE

READ STAGE NO 43  
SWITCH OFF ALL PENNINGGS  
ASSIGN LABEL NUMBER 5  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3  
JUMP TO STAGE NUMBER 40  
END OF STAGE

READ STAGE NO 44  
ASSIGN LABEL NUMBER 9  
SWITCH OFF ALL PENNINGGS  
SWITCH OFF UNIT 1 CHANNEL 6  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH NO 8 ON AND DIG UNIT 9 = 1  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH NO 8 ON AND DIG UNIT 9 = 2  
END OF STAGE

READ STAGE NO 45  
ASSIGN LABEL NUMBER 23  
SWITCH OFF ALL PENNING  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 3  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3 IF TIME DELAY 10S  
OUTPUT TO UNIT 2 NUMBER 0  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=8  
END OF STAGE

READ STAGE NO 46  
ASSIGN LABEL NUMBER 23  
SWITCH OFF ALL PENNING  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 3  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3 IF TIME DELAY 10S  
OUTPUT TO UNIT 2 NUMBER 0  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=8  
END OF STAGE

READ STAGE NO 47  
ASSIGN LABEL NUMBER 13  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 0  
OUTPUT TO UNIT 2 NUMBER 0  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=8  
END OF STAGE

READ STAGE NO 48  
ASSIGN LABEL NUMBER 13  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 5  
OUTPUT TO UNIT 2 NUMBER 0  
JUMP TO STAGE NUMBER 10 IF SWITCH PRESSED=8  
END OF STAGE

READ STAGE NO 49  
SWITCH OFF ALL LAMPS  
SWITCH OFF ALL PENNING  
SWITCH ON LAMP 8  
ASSIGN LABEL NUMBER 36  
JUMP TO STAGE NUMBER 14 IF SWITCH PRESSED=8  
END OF STAGE

READ STAGE NO 50  
CALL STAGE NUMBER 52 IF HD 1> 3.0- 1 MB  
END OF STAGE

READ STAGE NO 51  
CALL STAGE NUMBER 53 IF HD 2> 4.0- 1 MB  
END OF STAGE

READ STAGE NO 52  
ASSIGN LABEL NUMBER 3  
SWITCH ON AUDIBLE ALARM  
SWITCH OFF AUDIBLE ALARM IF SWITCH PRESSED=8  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 3  
OUTPUT TO UNIT 2 NUMBER 0  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3 IF TIME DELAY 10S  
CALL STAGE NUMBER 50 IF TIME DELAY 1M  
END OF STAGE

READ STAGE NO 53  
SWITCH OFF ALL PENNING  
ASSIGN LABEL NUMBER 3  
SWITCH ON LAMP 8  
OUTPUT TO UNIT 1 NUMBER 3  
OUTPUT TO UNIT 2 NUMBER 0  
SWITCH ON UNIT 1 CHANNEL 3 IF TIME DELAY 10S  
SWITCH ON UNIT 2 CHANNEL 1 IF TIME DELAY 13S  
CALL STAGE NUMBER 52 IF HD 1 > 3.0- 1 MB  
CALL STAGE NUMBER 51 IF TIME DELAY 1M  
END OF STAGE