

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Energetica



Valutazione tecnico economica del potenziale di efficientamento
energetico nei processi di lavorazione del silicio:
il caso MEMC Electronic Materials SpA

Relatore: Prof. Davide CHIARONI

Tesi di Laurea di:

Stefano ZAMBONIN
Matr. 779911

Anno Accademico 2012 - 2013

RINGRAZIAMENTI

*Ama e fa' ciò che vuoi; sia che tu taccia,
taci per amore; sia che tu parli, parla per
amore; sia che tu corregga, correggi per
amore; sia che perdoni, perdona per
amore; sia in te la radice dell'amore,
poiché da questa radice non può
procedere se non il bene.*

Sant'Agostino

Desidero ringraziare il professor Davide Chiaroni, relatore della tesi, per i consigli e l'aiuto fornitomi durante la stesura del lavoro. Ringrazio poi i professori Luigi Colombo, Andrea Galliani ed Elisabetta Gariboldi per la disponibilità e i consigli che sono stati in grado di darmi durante la mia ricerca di materiale necessario per la tesi.

Un enorme grazie è rivolto a tutte le persone che ho incontrato in MEMC, che mi hanno permesso di vivere quest'esperienza sempre col sorriso. Voglio ringraziare il dott. Marco Sciamanna e l'ing. Alessandra Zoppis per avermi dato questa fantastica opportunità, fondamentale per la mia crescita. Infine ringrazio Paola Ferro per la disponibilità mostratemi.

Mi scuso in anticipo per la poca formalità e per il lessico milanese usato, non vogliatemene male.

Sono molto grato a Gianni che è sempre riuscito ad indicarmi il giusto percorso e a dedicarmi un po' del suo tempo; a Gigi che per quattro mesi mi ha dovuto sopportare andando in giro per lo stabilimento ad aprire quadri elettrici; allo Zonca e al Porzio che mi hanno sempre dato corda quando bramavo dalla voglia di conoscere dati, dati e ancor più dati sui processi; al Bovio e al Lodi sempre pronti a far la battuta per rallegrare la giornata; al Ghisio, Pernici e Quaglieri compagni fissi del pranzo e di discussioni alla macchinetta del caffè; al Morganti, compagno di lunghe chiacchierate del tardissimo pomeriggio e sempre pronto a dare una mano; al Bonda e Zavattari che mi hanno dato ottime indicazioni e si son fidati del mio lavoro; al Ticozzi con cui abbiam condiviso delle pause.

Un caloroso ringraziamento è per i miei genitori, che mi hanno sempre sostenuto durante questa strada lunga e ardua. Grazie per esser stati per me fonte di ispirazione, continuo impegno e di avermi insegnato che si può arrivare in alto grazie al duro lavoro.

Ringrazio poi il resto della mia famiglia che mi è stata accanto e si è preoccupata del mio impegno in questi anni.

Grazie ai miei amici di sempre. Grazie per esserci sempre stati e aver assecondato sempre le mie stramberie. Abbiamo percorso insieme tanto tempo, chi dai tempi del liceo, chi da un po' dopo. Grazie per aver sempre capito i miei impegni e anche se ironicamente avermi sempre appoggiato. Grazie per aver percorso questa strada assieme.

Un Grazie ingegnoso ai miei compagni di studio, compagni di università e compagni di fatiche. È stata lunga, è stata dura, ma alla fine ce l'ho fatta. Vi ringrazio, senza di voi tutto ciò sarebbe accaduto, ma chissà quanti secoli ci avrei impiegato. Grazie per aver percorso questa strada fianco a fianco.

Grazie a tutti i gocciofili, con cui tanti momenti sono stati condivisi. Grazie perché questi anni passati con voi mi han sempre dato grande forza per continuare e tanti ricordi felici a cui mi aspetto ne seguiranno molti altri. Grazie per aver percorso questa strada insieme.

Grazie alla mia Comunità Capi in cui tanti momenti di crescita son stati condivisi e che mi ha dato sempre pieno appoggio e sostegno nel mio percorso. Buona Strada.

Ringrazio poi la Raffi, perché so che la nostra amicizia va ben oltre le distanze e la Bea per aver sempre un sorriso pronto che da gioia.

Grazie a Gabri, per il tuo aiuto e la tua guida, sei per me come una sorella.

Grazie a Marco, per i tuoi fidati consigli e grande disponibilità, ti ritengo il mio mentore.

Grazie Isabella, grazie perché in questi anni mi sei stata accanto. Grazie per essere parte della mia vita. Grazie per l'energia che mi hai dato. Grazie perché quando ti guardo capisco quanto è bello il mondo.

Estratto

Il processo industriale che dà la possibilità di realizzare wafers di silicio per la fabbricazione di dispositivi a semiconduttore è fortemente energivoro. Il problema del rifornimento delle risorse energetiche e l'interesse verso il tema del cambiamento climatico hanno portato alla luce il concetto di efficienza energetica. L'attenzione da parte di un'industria a questa particolare tematica si può tradurre in un sostanziale risparmio economico e mostra una particolare cura verso la salvaguardia ambientale. Il seguente elaborato si pone come obiettivo lo studio del processo produttivo per la fabbricazione di wafers di silicio con lo scopo di individuare possibili fonti spreco.

Parole Chiave: efficienza energetica; produzione di wafers di silicio; misura consumi elettrici; deposizione chimica da vapore; epitassia.

Abstract

The silicon wafers, used by semiconductors manufacturing companies, are produced with a highly energy intensive process. The problem of the energy resources supply together with the interest in climate change have brought to light the concept of energy efficiency. The industry pays great attention on this particular topic; this can be translated into a substantial cost reduction and it also shows the extra efforts towards the environment protection. The following report aims at describing the study of the underlying processes of the silicon wafers production, in order to identify some possible waste sources.

Keywords: energy efficiency; silicon wafers production; power consumption measure; Chemical Vapor Deposition; epitaxy.

INDICE

Prefazione.....	1
1 Silicio	3
1.1 Le proprietà elettriche dei materiali.....	3
1.2 Legge di Ohm	4
1.3 Resistività elettrica.....	5
1.4 Semiconduttori intrinseci.....	5
1.5 Semiconduttori estrinseci	7
1.6 Dispositivi a semiconduttore	9
2 Efficienza Energetica	11
2.1 Dal Protocollo di Kyoto al Pacchetto Clima ed Energia.....	11
2.2 Incentivazione italiana	13
2.2.1 Detrazioni fiscali.....	13
2.2.2 Certificati Bianchi	13
2.3 Importanza dell'Efficienza Energetica in campo industriale.....	15
3 Dalla quarzite al wafer epitassiato	17
3.1 Crescita del Monocrystallo	17
3.1.1 Processo Siemens.....	17
3.1.2 Crescita del crystallo	20
3.1.2.1 Metodo Czochralski (CZ)	20
3.1.2.2 Float Zone (FZ)	23
3.1.3 Ultime operazioni.....	25
3.2 Wafering.....	26
3.2.1 ID Sawing.....	26
3.2.2 Wire Saw	27
3.2.2.1 Abrasive Slurry Wire Saw	28
3.2.2.2 Diamond Wire Saw.....	30
3.3 Misura Parametri Meccanici	31

3.3.1	Aspetto Visivo.....	31
3.3.2	Bow.....	31
3.3.3	Contaminazione da Metalli	32
3.3.4	Gloss (o Brillantezza o Lucentezza)	32
3.3.5	Rugosità.....	33
3.3.6	Thickness (Spessore) e Flatness (Planarità).....	36
3.3.7	Warp.....	37
3.4	Lappatura	38
3.5	Attacco Chimico	42
3.6	Clean Room	43
3.7	CVD: Chemical Vapor Deposition	45
3.7.1	Principali Reazioni	46
3.7.2	Principali Caratteristiche	47
3.7.3	Principali Tipologie di Deposizione.....	48
3.7.3.1	Deposizione di Polisilicio	48
3.7.3.2	Deposizione Ossido di Silicio (SiO ₂)	49
3.8	Magic Denuded Zone® (MDZ®) e Annealing	51
3.9	Lucidatura.....	53
3.10	Cleaning.....	57
3.10.1	Contaminanti.....	58
3.10.1.1	Particolato	58
3.10.1.2	Residui Organici e Residui Inorganici	59
3.10.1.3	Strati di Ossido Indesiderati	60
3.10.2	Miglioramento delle Tecniche di Lavaggio: Onde Sonore	60
3.11	Epitassia (Epi)	61
3.11.1	Processo	62
3.11.2	Problemi	63
4	Mappa del processo	65
4.1	Reparto Taglio (Slicing).....	66
4.2	Reparto Lappatura	67

4.2.1	Lappatura e Attacco Chimico	67
4.2.2	Trattamento Termico	68
4.2.2.1	Specifica con Attacco Acido	68
4.2.2.2	Specifica con Attacco Caustico.....	70
4.3	Reparto Lucidatura	71
4.4	Reparto Cleaning.....	72
4.5	Reparto Epatassia	73
5	Obiettivi e metodologia del lavoro.....	74
5.1	Ambiente lavorativo	74
5.2	Metodologia di raccolta dati e strumentazione	75
5.3	Raccolta dati.....	80
5.4	Analisi dati.....	80
5.5	Ritorno all'azienda	81
5.6	Project Management	81
6	Analisi dei dati.....	82
6.1	Costruzione del diagramma di Pareto	82
6.2	Analisi dopo l'individuazione delle aree di intervento	89
6.2.1	Reparto Taglio	90
6.2.2	Reparto Lappatura	94
6.2.3	Reparto Lucidatura e Reparto Cleaning	102
6.2.4	Reparto Epatassia	104
7	Conclusioni e Lavoro Futuro	110
7.1	Conclusioni.....	110
7.2	Lavoro Futuro.....	116
7.2.1	Nuove analisi.....	116
7.2.2	Certificati Bianchi	117
	Bibliografia.....	119
	Appendice A.....	123

INDICE FIGURE

Figura 1.1. Schema delle bande di energia ad una temperatura pari a 0 K e in assenza di altre forme di energia.6

Figura 1.2. Schema delle bande di energia a temperatura maggiore dello zero assoluto o in assenza di altre forme di energia.6

Figura 1.3. Schema delle bande di energia in un semiconduttore di tipo P.8

Figura 1.4. Schema delle bande di energia in un semiconduttore di tipo N.9

Figura 1.5. Intel 4004.10

Figura 2.1. Consumo di energia primaria mondiale.12

Figura 3.1. Barra di silicio policristallino ottenuta tramite processo Siemens.18

Figura 3.2. Schema di un forno per la produzione di silicio policristallino.19

Figura 3.3. Piani cristallini.20

Figura 3.4. a) Polisilicio b) Melt c) Seme d) Crescita del cristallo21

Figura 3.5. Metodo CZ.22

Figura 3.6. Monocristallo.22

Figura 3.7. Schema di produzione di un monocristallo con metodo CZ.22

Figura 3.8. Fase iniziale metodo FZ.23

Figura 3.9. Metodo FZ.23

Figura 3.10. Schema di produzione di un monocristallo con metodo FZ.24

Figura 3.11. Lingotto pronto per essere tagliato.25

Figura 3.12. Raffigurazione della tecnologia ID Sawing.26

Figura 3.13. Raffigurazione del Taglio a filo.27

Figura 3.14. Taglierina a filo.28

Figura 3.15. Wafers in una taglierina a filo con abrasivo.29

Figura 3.16. Schema del principio di funzionamento del taglio.30

Figura 3.17. Schema di misura del Bow.31

Figura 3.18. Principio di misura di Gloss.32

Figura 3.19. Angoli d'incidenza della misura di Gloss.33

Figura 3.20. Principio di funzionamento del rugosimetro.34

Figura 3.21. Definizione della Linea Media del Profilo.35

Figura 3.22. Schema di un wafer posto tra due probes e distanze per la misurazione. ...36

Figura 3.23. Schema di misura della planarità.37

Figura 3.24. Schema di misura del Warp.38

Figura 3.25. Rappresentazione di una Lappatrice.39

Figura 3.26. Rappresentazione di una lappatrice single-sided.40

Figura 3.27. Errori di parallelismo e planarità, correggibili da lappatrice double-sided. 41

Figura 3.28. Lappatrice.41

Figura 3.29. Serie dei processi che avvengono durante l'attacco chimico.42

Figura 3.30. Clean Room del gruppo.44

Figura 3.31. Forno per la deposizione di polisilicio.	49
Figura 3.32. Prima della deposizione LTO.....	50
Figura 3.33. Dopo la deposizione LTO.....	50
Figura 3.34. Reattore per il processo MDZ.	52
Figura 3.35. Forno per il processo di Annealing.....	53
Figura 3.36. Schema della tecnica di lucidatura (vista dall'alto e di fronte).....	54
Figura 3.37. Rappresentazione di una lucidatrice single-sided.....	55
Figura 3.38. Rappresentazione di una lucidatrice double-sided.	56
Figura 3.39. Stazione per la lucidatura.	57
Figura 3.40. Esempio di una macchina per il lavaggio.	61
Figura 3.41. Principio dell'autodoping epitassiale.....	63
Figura 3.42. Principio di out-diffusion epitassiale.....	64
Figura 3.43. Rappresentazione schematica dello spike.....	64
Figura 4.1. Wafers di silicio da 200mm.....	65
Figura 4.2. Schema Reparto Taglio.	67
Figura 4.3. Schema Reparto Lappatura con specifica A.....	70
Figura 4.4. Schema Reparto Lappatura con specifica C.....	71
Figura 4.5. Schema Reparto Lucidatura.....	72
Figura 4.6. Schema Reparto Cleaning.	73
Figura 4.7. Schema Reparto Epitassia.	73
Figura 5.1. Diagramma di Gantt delle attività svolte.....	81
Figura 6.1. Diagramma di Pareto: Reparto Taglio specifica A.	83
Figura 6.2. Diagramma di Pareto: Reparto Taglio specifica C.....	83
Figura 6.3. Diagramma di Pareto: Reparto Lappatura specifica A.....	84
Figura 6.4. Diagramma di Pareto: Reparto Lappatura specifica C.....	85
Figura 6.5. Diagramma di Pareto: Reparto Cleaning specifica A.....	86
Figura 6.6. Diagramma di Pareto: Reparto Cleaning specifica C.....	86
Figura 6.7. Diagramma di Pareto: Reparto Epitassia specifica A.....	87
Figura 6.8. Diagramma di Pareto: Reparto Epitassia specifica C.....	87
Figura 6.9. Legenda delle mappe energetiche.....	89
Figura 6.10. Mappa Energetica: Reparto Taglio specifica A.....	90
Figura 6.11. Mappa Energetica: Reparto Taglio specifica C.....	91
Figura 6.12. Value Stream Map Energetica del Reparto Taglio specifica A.....	92
Figura 6.13. Value Stream Map Energetica del Reparto Taglio specifica C.....	93
Figura 6.14. Mappa Energetica: Lappatura e Attacco Acido.....	94
Figura 6.15. Mappa Energetica: Lappatura e Attacco Caustico.....	94
Figura 6.16. Mappa Energetica: Trattamento Termico specifica A.....	96
Figura 6.17. Mappa Energetica: Trattamento Termico specifica C.....	97
Figura 6.18. Assorbimento corrente del forno n.7.....	99
Figura 6.19. Value Stream Map Energetica del Reparto Lappatura specifica A.....	101
Figura 6.20. Value Stream Map Energetica del Reparto Lappatura specifica C.....	101

Figura 6.21. Mappa Energetica: Reparto Lucidatura e Reparto Cleaning.	102
Figura 6.22. Value Stream Map Energetica del Reparto Lucidatura e Cleaning.	104
Figura 6.23. Mappa Energetica: Reparto Epitassia specifica A.	105
Figura 6.24. Mappa Energetica: Reparto Epitassia specifica C.	105
Figura 6.25. Confronto tra i casi base dei processi energy intensive.	106
Figura 6.26. Value Stream Map Energetica del Reparto Epitassia specifica A.	109
Figura 6.27. Value Stream Map Energetica del Reparto Epitassia specifica C.	109
Figura 7.1. Confronto tra i casi base dei processi energy intensive, senza epitassia....	111
Figura 7.2. Grafico priorità di investimento.....	112
Figura A.1. Consumi Reparto Taglio specifica A.....	123
Figura A.2. Consumi Reparto Taglio specifica C.	123
Figura A.3. Consumi Reparto Lappatura specifica A.	124
Figura A.4. Consumi Reparto Lappatura specifica C.	124
Figura A.5. Consumi Reparto Lucidatura entrambe le specifiche.	125
Figura A.6. Consumi Reparto Cleaning entrambe le specifiche.	125
Figura A.7. Consumi Reparto Epitassia specifica A.	126
Figura A.8. Consumi Reparto Epitassia specifica C.	126

INDICE TABELLE

Tabella 5.1. Esempio di foglio Excel utilizzato.....	78
Tabella 6.1. Legenda Reparto Taglio.....	83
Tabella 6.2. Legenda Reparto Lappatura specifica A.....	84
Tabella 6.3. Legenda Reparto Lappatura specifica C.....	85
Tabella 6.4. Legenda Reparto Cleaning.....	86
Tabella 6.5. Legenda Reparto Epitassia.....	87
Tabella 6.6. Definizione dei consumi.....	89
Tabella 6.7. Confronto tra le due tecnologie di taglio.....	91
Tabella 6.8. Confronto tra le due lappatrici.....	95
Tabella 6.9. Confronto tra due forni per la deposizione del poly.....	98
Tabella 6.10. Confronto tra due forni per la deposizione del LTO.....	100
Tabella 6.11. Legenda operazioni di Lavaggio, Reparto Lappatura specifica C.....	100
Tabella 6.12. Confronto tra due lucidatrici.....	103
Tabella 6.13. Legenda Reparto Lucidatura.....	104
Tabella 6.14. Confronto tra caso 1 e caso 2 della specifica A.....	107
Tabella 6.15. Confronto tra caso 1 e caso 2 della specifica C.....	108
Tabella 6.16. Legenda Reparto Epitassia.....	109
Tabella 7.1. Riassunto delle soluzioni individuate.....	111
Tabella 7.2. Consumi annui e percentuali di risparmio.....	113
Tabella 7.3. Stima dell'investimento sul parco macchine.....	114

Prefazione

*Una volta eliminato l'impossibile, ciò
che resta, per quanto improbabile,
deve essere la verità.*

Sherlock Holmes

La seguente relazione è il risultato del lavoro di sei mesi presso l'azienda MEMC Electronic Materials di Novara. Il lavoro si propone di mappare energeticamente il processo produttivo di due particolari specifiche richieste dai clienti e individuare, se presenti, le principali cause di spreco energetico.

Lo stabilimento di Novara è il sito per la produzione di wafers di silicio e la deposizione epitassiale in Europa, per la sezione dei semiconduttori del gruppo. Il report è divisibile in due sezioni principali: la prima di carattere generale, mentre la seconda raccoglie il lavoro e le conoscenze acquisite durante il periodo di tirocinio.

La prima parte comprende i Capitoli 1 e 2. Nel primo è stata svolta una breve ricerca bibliografica sul silicio e sui suoi benefici. Il secondo tratta sinteticamente l'efficienza energetica, dalla nascita all'attuale situazione italiana.

I restanti quattro capitoli sono frutto del lavoro compiuto. Il Capitolo 3 fornisce una base teorica riguardo ai principali processi necessari per ottenere un wafer di silicio. È stato difficile reperire del materiale bibliografico, in quanto si tratta di tecniche di lavorazione in continua evoluzione. A volte si è dunque fatto affidamento alle competenze del personale aziendale. Nel quarto capitolo è mostrato il percorso seguito dal flusso di materiale, dalla prima all'ultima operazione. Il Capitolo 5 illustra le attività compiute durante il tirocinio. Il sesto capitolo racchiude il lavoro di analisi, mentre quello conclusivo mette in risalto le conclusioni e le possibili soluzioni adottabili.

Questo stage mi ha molto colpito. Da un punto di vista professionale è stata un primo passo nel mondo del lavoro. Ho potuto sperimentare il lavoro di gruppo, dovendo spesso confrontarmi con altri operatori, e ho avuto la possibilità di applicare alcune delle conoscenze apprese durante gli anni di università. Mi sono avvicinato poi a un mondo sconosciuto, rendendo così quest'esperienza

PREFAZIONE

molto stimolante, perché mi ha permesso di apprendere conoscenze del tutto nuove. Infine, nonostante le difficoltà di tutti i giorni che il lavoro ti può dare, il clima molto disteso, l'atmosfera familiare di quest'ambiente e i colleghi incontrati mi hanno permesso di vivere quest'esperienza in maniera molto positiva.

1 Silicio

*La scienza non è nient'altro che una
perversione se non ha come suo fine
ultimo il miglioramento delle condizioni
dell'umanità.*

Nikola Tesla

L'evoluzione della civiltà umana è andata di pari passo con lo sfruttamento di nuovi materiali per utilizzi quotidiani. Si è passati dall'Età del Rame all'Età del Bronzo. Dal Bronzo all'Età del Ferro, fino a quella che oggi molti definiscono Età del Silicio. Infatti nel XX Secolo il silicio è stato il fulcro per lo sviluppo dell'elettronica e microelettronica dello stato solido. Nonostante il germanio sia un semiconduttore con prestazioni migliori rispetto al silicio, questo è stato scelto principalmente perché è maggiormente presente sulla Terra (dopo l'ossigeno è l'elemento più abbondante trovandosi sotto forma di SiO_2), i costi di produzione sono inferiori, possiede una maggior resistenza alle alte temperature e c'è la possibilità di alternare strati conduttivi a strati isolanti (SiO_2 è un isolante).

1.1 Le proprietà elettriche dei materiali

Nel modello dell'atomo di Bohr gli elettroni risiedono nella banda più esterna, la quale è detta banda di valenza. Sopra di questa si trova la banda di conduzione in cui gli elettroni presenti sono liberi di muoversi. Si possono identificare così tre tipologie di materiale:

1. Conduttori: la banda di valenza e la banda di conduzione sono sovrapposte e quindi gli elettroni si trovano spesso tra le due bande. Anche se sottoposti a campi elettrici di piccola entità il materiale conduce corrente.
2. Isolanti: le bande risultano essere distinte. Tra di esse si identifica un Energy Gap, cioè l'energia necessaria per far passare un elettrone dalla

banda di valenza alla banda di conduzione. Bisogna imporre grandi differenze di potenziale per ottenere un transito di elettroni.

3. Semiconduttori: si comportano come isolanti, ma l'Energy Gap che è necessario fornire affinché si abbia movimento di carica non è elevato, solitamente nell'intorno di 1 eV. Superando questa barriera si comportano come conduttori. Il silicio possiede un E_g di 1,1 eV.

1.2 Legge di Ohm

La legge di Ohm esprime la proporzionalità che intercorre tra la differenza di potenziale V ai capi di un materiale campione e l'intensità di corrente I che circola al suo interno, moltiplicata per una costante di proporzionalità che risulta essere la resistenza elettrica R .

$$V = R * I \quad (1.1)$$

La resistenza R dipende dalle dimensioni del materiale. In particolare dipende dalla lunghezza l e dall'area trasversale A . Una costante detta resistività elettrica lega queste due grandezze.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1.2)$$

Si definisce conducibilità elettrica l'inverso della resistività, in altre parole la capacità di far passare corrente.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.3)$$

1.3 Resistività elettrica

Per un metallo puro, la resistività elettrica può essere definita come la somma di una componente termica ρ_t , che dipende dalle vibrazioni dei nuclei, e da una componente residua ρ_r , che è causata da imperfezioni nella struttura del cristallo.

$$\rho_{\text{totale}} = \rho_t + \rho_r \quad (1.4)$$

Con l'aumentare della temperatura, cresce la vibrazione dei nuclei e dunque più elettroni di conduzione sono dispersi. La componente termica aumenta e questo causa un innalzamento della resistività dei metalli puri. La componente residua è piccola e indipendente dalla temperatura. Diventa significativa solo a basse temperature.

1.4 Semiconduttori intrinseci

I semiconduttori puri sono detti intrinseci e la loro conducibilità elettrica è data dalle proprietà conduttive intrinseche del materiale. Questa è compresa tra quella dei conduttori e degli isolanti. Silicio e germanio puri sono semiconduttori intrinseci. A temperature prossime allo zero assoluto ci si avvicina alla struttura ideale del reticolo cristallino e dunque le bande di valenza sono completamente riempite, mentre quelle di conduzione sono vuote [1] [2].



Figura 1.1. Schema delle bande di energia ad una temperatura pari a 0 K e in assenza di altre forme di energia.

Gli elettroni di valenza non sono liberi di muoversi nel reticolo cristallino e dunque non sono in grado di condurre elettricità, a meno che gli venga fornita una sufficiente energia per eccitare l'elettrone e farlo passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Con il crescere della temperatura gli elettroni presenti nella banda di valenza si eccitano e possono passare nella banda di conduzione. Avendo abbandonato la sua posizione di valenza, l'elettrone lascia una "lacuna" con carica positiva nel reticolo cristallino.

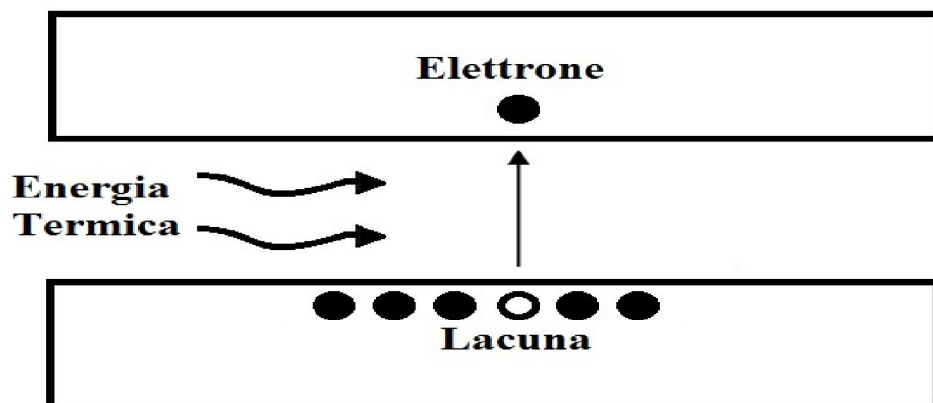


Figura 1.2. Schema delle bande di energia a temperatura maggiore dello zero assoluto o in assenza di altre forme di energia.

Vengono così creati due portatori di carica, che sono l'elettrone di carica negativa e la lacuna con carica positiva e uguale in modulo a quella dell'elettrone. Con la presenza di un campo elettrico esterno l'elettrone di conduzione si sposterà verso il polo positivo, mentre la lacuna si comporterà come una carica positiva e dunque si sposterà verso il polo negativo.

In termini di conducibilità (o resistività), i semiconduttori si comportano in maniera differente rispetto ai metalli. Infatti formandosi dei portatori di carica all'aumentare della temperatura, la conducibilità aumenta.

1.5 Semiconduttori estrinseci

Se ad un semiconduttore puro sono aggiunte impurezze, cioè sono aggiunti altri atomi che possiedono caratteristiche di valenza differenti dal reticolo cristallino originale, allora si parla di semiconduttori estrinseci. Quest'operazione di aggiunta di quantità molto piccole di atomi è definita drogaggio, mentre le impurezze sono dette elementi droganti. Il processo permette di aumentare le proprietà conduttive del semiconduttore. Le concentrazioni delle impurezze aggiunte si attestano tra i 100 e i 1000 ppm. Essendo il silicio e il germanio elementi del quarto gruppo, il drogaggio si effettua utilizzando elementi del terzo e del quinto gruppo.

Tipicamente come elemento del terzo gruppo è utilizzato il boro ed è così chiamato drogaggio di tipo P (tipo positivo), in quanto viene a mancare uno degli elettroni di legame e dunque si forma una lacuna nel reticolo cristallino. È sufficiente un'energia termica anche contenuta affinché uno degli elettroni degli atomi vicini all'atomo di boro possa avere un'energia sufficiente per staccarsi dal suo legame e migrare verso la lacuna. Nel caso del silicio quest'energia corrisponde a 0,045 eV, di gran lunga inferiore all'energia necessaria per far passare un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione corrispondente a 1,1 eV. Viene così creata una lacuna elettronica nell'atomo di silicio che agisce come portatore di carica. L'atomo di boro che è stato ionizzato, fornisce un livello energetico leggermente maggiore rispetto a quello della banda di valenza del silicio. Questo livello è detto livello accettore perché è in grado di accettare elettroni e perciò i droganti del terzo gruppo sono definiti atomi accettori.

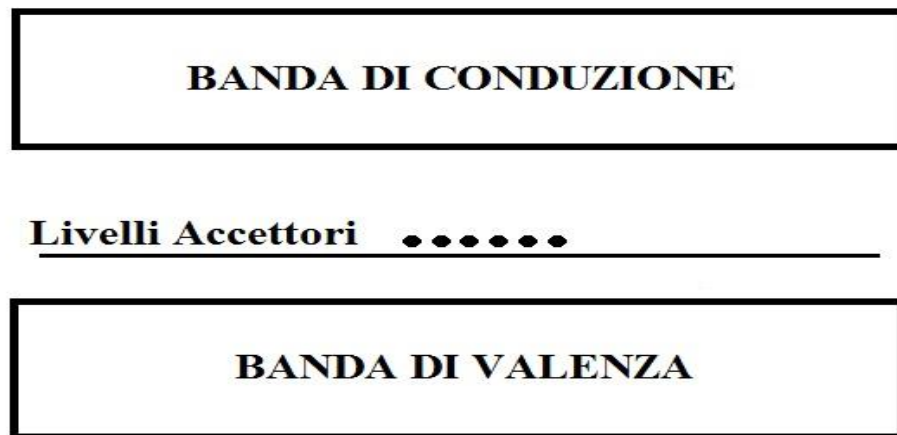


Figura 1.3. Schema delle bande di energia in un semiconduttore di tipo P.

Come elemento del quinto gruppo invece uno tra i più utilizzati è il fosforo, il quale sostituisce un atomo di silicio, dando origine ad un drogaggio di tipo N (tipo negativo). Ci sarà infatti un elettrone in più rispetto a quelli necessari per completare la banda di valenza. L'elettrone eccedente possiede un legame molto debole con il nucleo di fosforo, tanto che anche in questo caso è sufficiente una bassa energia termica per staccarlo e lasciarlo libero di muoversi, rendendolo disponibile per la conduzione. L'atomo di fosforo si ionizza acquistando così carica positiva. L'atomo di fosforo ionizzato occupa un livello energetico leggermente inferiore della banda di conduzione che è definito livello donatore. Gli atomi del quinto gruppo, sono detti atomi donatori grazie alla loro capacità di cedere elettroni per la conduzione.



Figura 1.4. Schema delle bande di energia in un semiconduttore di tipo N.

Si è evidenziato la conducibilità di un semiconduttore può essere modificata facilmente tramite alcune azioni tra cui il drogaggio, il cambio di temperatura, l'esposizione alla luce o l'applicazione di un campo elettrico. Queste capacità rendono i semiconduttori adatti alla fabbricazione di dispositivi elettronici.

1.6 Dispositivi a semiconduttore

L'invenzione del diodo a vuoto nel 1904 per opera di J.A. Fleming ha dato il via all'era dell'elettronica. Il 1906 fu molto proficuo, perché grazie all'invenzione del triodo da parte di L. de Forest, tubo a vuoto a tre terminali, si riuscirono a realizzare le prime radio e radar nel campo delle telecomunicazioni e nel campo dell'informatica il primo computer digitale tra il '43 e il '45. Bisogna però aspettare il 1947 la realizzazione da parte di tre ricercatori W.Shockley, W.Brattain e J.Bardeen nei laboratori Bell del primo transistor a semiconduttore. Questa invenzione portò alla sostituzione dei tubi a vuoto, poiché il nuovo componente possedeva ridotte dimensioni e bassi consumi, dando il via alla microelettronica. Negli stessi laboratori nel 1955 fu costruito il primo computer a soli transistor a semiconduttore, ponendo così definitivamente fine ai tubi a vuoto. Tra il 1958 e il 1959 furono inventati i primi circuiti integrati (chip), in

altre parole un componente elettronico che sullo stesso substrato di semiconduttore conteneva più componenti elettronici elementari, come diodi e transistor. Intel realizzò nel 1971 il primo microprocessore, componente elettronico costituito da uno o più chip, chiamato Intel 4004, perché conteneva 4004 transistor.



Figura 1.5. Intel 4004.

L'evoluzione dei microprocessori è stata estremamente rapida, portando a microchip con un sempre maggior numero di dispositivi. Tutto questo segue la nota legge di Moore che afferma che le prestazioni dei processori e il numero di transistor per chip raddoppia ogni 18 mesi.

Ogni anno è redatto un documento dagli esperti delle maggiori industrie d'Europa, Stati Uniti, Giappone, Corea e Taiwan nel quale si tratta il tema dei dispositivi a semiconduttore chiamato ITRS, International Technology Roadmap for Semiconductors. L'obiettivo dell'ITRS è di assicurare innovazioni economicamente convenienti per migliorare le prestazioni dei circuiti integrati e degli apparecchi che utilizzano tali dispositivi, contribuendo al successo di questa industria. Ad oggi la maggior parte dei componenti è realizzata tramite una tecnologia denominata CMOS e il trend dovrebbe rimanere tale nei prossimi anni. L'evoluzione della tecnologia ha portato i dispositivi dalle dimensioni dell'ordine del centinaio di micron al decimo. Tuttavia è previsto che nel 2016 si riesca a raggiungere la dimensione minima dei dispositivi ($22 \cdot 10^{-9}$ m), barriera sotto la quale non sarà possibile scendere. Si dovrà dunque parlare di nanoelettronica e in particolare due nuove tecnologie si fanno strada: i dispositivi quantistici e i dispositivi molecolari. Nonostante la dimensione minima dei componenti sarà presto raggiunta, ad oggi le nuove tecnologie non sono ancora in grado di sostituire il transistor, che resterà ancora per degli anni la tecnologia di punta [3].

2 Efficienza Energetica

*Quello che noi facciamo è solo una
goccia nell'oceano, ma se non lo
facessimo l'oceano avrebbe una
goccia in meno.*

Madre Teresa di Calcutta

La crisi del petrolio del 1973, a causa di un embargo posto dai paesi facenti parte dell'OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries), portò alla luce il concetto di efficienza energetica. I paesi più sviluppati, infatti, avevano sperimentato per anni forniture abbondanti di combustibile e bassi costi dell'energia, tanto da non far preoccupare i governi per il crescente ed elevato consumo di energia pro capite. Una nuova crisi energetica ci fu nel 1979, quando a causa della rivoluzione iraniana fu rovesciato il regime dello scià Reza Pahlavi, portando ad un'interruzione della produzione petrolifera del paese e ad un aumento dei prezzi. Questa serie di eventi portò ad una rivalutazione delle politiche esistenti, in modo da ottenere una maggior indipendenza dai paesi dell'OPEC. Nella maggior parte dei Paesi sviluppati risparmio ed efficienza sono diventati un elemento importante della politica energetica. Ciò è dovuto alla consapevolezza che sono possibili interferenze nelle forniture energetiche e ad un nuovo sguardo da parte dei governi e della popolazione alla salvaguardia ambientale, sapendo che l'uso eccessivo di combustibili fossili causa danni all'ecosistema mondiale [4].

2.1 Dal Protocollo di Kyoto al Pacchetto Clima ed Energia

Come si nota dalla Figura 2.1, il consumo di energia primaria mondiale è in aumento, ma gli sprechi che ne seguono, dovuti a stili di vita non sostenibili, a tecnologie vecchie e non efficienti, si traducono in costi per le imprese che potrebbero essere evitati e in degrado ambientale per la collettività. Come si può notare c'è stata una diminuzione nel periodo 2008-2009, ma questa è stata causata dalla crisi economica, mentre il trend continua a restare globalmente crescente.

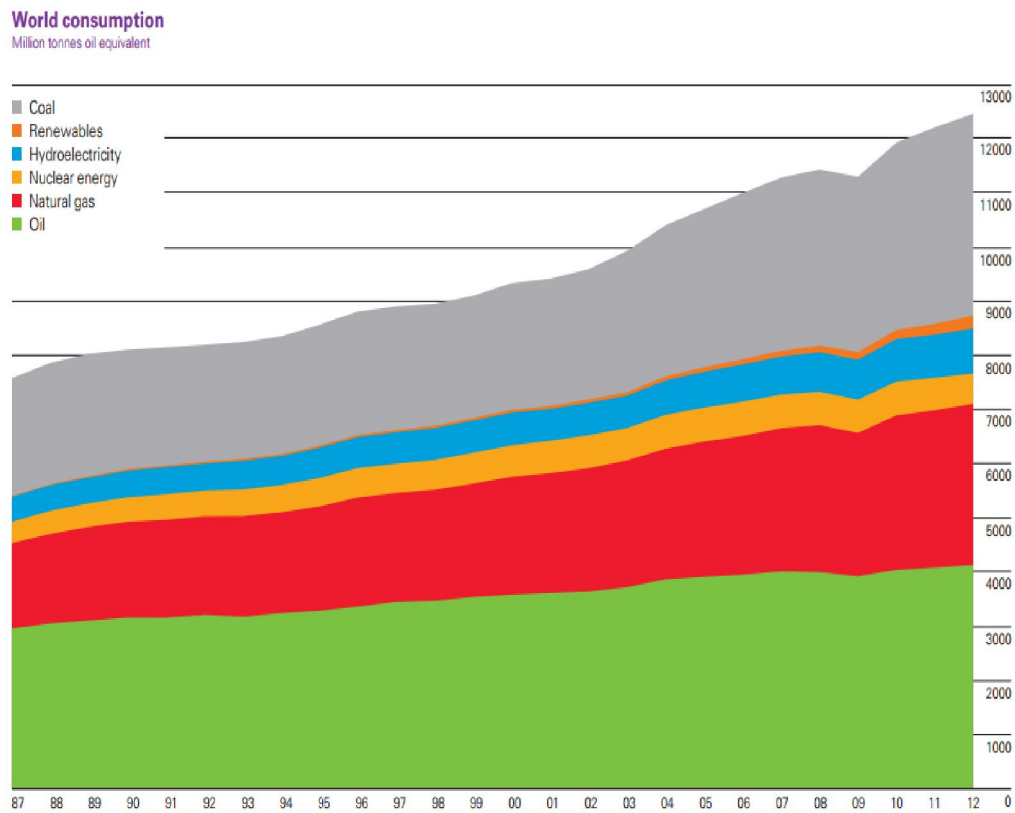


Figura 2.1. Consumo di energia primaria mondiale.

Il consenso della maggior parte della comunità scientifica riguardo al tema del riscaldamento globale provocato da fonte antropica ha portato individui e Stati a seguire linee di condotta atte a diminuire il fenomeno. Il più grande accordo volto a combattere il cambiamento climatico è il Protocollo di Kyoto, firmato nel 1997. Il protocollo si proponeva di ridurre del 5% le emissioni di CO₂ dei Paesi industrializzati nel periodo tra il 2008 e 2012, ma con l'accordo di Doha c'è stato un prolungamento del periodo, portando l'anno di scadenza al 2020 [5]. Intanto nel marzo 2007 è stata presentata una strategia europea comune su emissioni di gas serra, fonti rinnovabili ed efficienza energetica. La strategia del "20-20-20" si pone l'intento di ridurre i gas ad effetto serra del 20%, soddisfare il 20% del fabbisogno energetico europeo tramite fonti rinnovabili e ridurre del 20% i consumi energetici grazie ad opere di efficienza energetica, entro il 2020. Nel dicembre del 2008 viene approvato il Pacchetto Clima ed Energia, fornendo gli strumenti atti a raggiungere l'obiettivo della strategia. Seppure applicato solo a livello di Unione Europea, è un ulteriore passo verso la tutela del pianeta [6].

2.2 Incentivazione italiana

Sono principalmente due i sistemi d'incentivazione per l'efficienza energetica in Italia: il sistema di detrazioni fiscali e i certificati bianchi.

2.2.1 Detrazioni fiscali

Per agevolare l'efficienza energetica e lo sviluppo economico sostenibile nel campo dell'edilizia è stato creato un sistema di detrazioni fiscali. Il sistema è noto anche come "Detrazione fiscale 55%", in quanto è stato per lungo periodo caratterizzato da una detrazione pari al 55%. Il governo con il decreto legge n.63 del 4 giugno 2013 ha prorogato al 31 dicembre 2013 le detrazioni fiscali per interventi di riqualifica energetica, innalzando la detraibilità al 65%. Dall'1 gennaio 2014 si sostituirà l'agevolazione con una detrazione fiscale del 36%, prevista per le spese di ristrutturazione edilizia. Solo per interventi su parti comuni di condomini o per interventi su tutti gli immobili di un condominio la detrazione del 65% è prorogata fino a fine giugno 2014 [7].

2.2.2 Certificati Bianchi

I D.M. 20/7/04 elettricità e D.M. 20/7/04 gas introducono nella legislazione italiana il sistema d'incentivazione dei certificati bianchi, detti anche Titoli di Efficienza Energetica (TEE). Questo sistema prevede che i distributori di energia elettrica e gas raggiungano ogni anno degli obiettivi di risparmio di energia primaria. Il risparmio agli usi finali viene premiato con il riconoscimento di certificati bianchi. Un TEE equivale ad un risparmio ottenuto di una tonnellata equivalente di petrolio (TEP). Le aziende sottoposte agli obblighi possono raggiungere gli obiettivi annuali realizzando progetti di efficienza energetica, avendo così diritto ad ottenere certificati bianchi che possono essere commercializzati, o acquistando i TEE da altre società con una contrattazione tra le parti interessate (contratti bilaterali) o partecipando al mercato dei Titoli di Efficienza Energetica organizzato e gestito dal GME. I distributori hanno dunque la possibilità di adempiere l'obbligo imposto al minor costo, grazie allo scambio dei TEE. Anche le unità di Cogenerazione ad Alto

Rendimento hanno la possibilità di accedere ai certificati bianchi secondo il Decreto del 5 settembre 2011 [8] [9].

Il Decreto del 28 dicembre 2012 ha modificato le precedenti disposizioni, introducendo alcune novità. La normativa stabilisce gli obiettivi quantitativi nazionali di risparmio energetico, crescenti nel tempo, per i soggetti obbligati nel periodo 2013-2016 ed introduce nuovi soggetti volontari alla possibilità di presentare progetti per il rilascio di certificati bianchi [10].

I soggetti obbligati (o vincolati) sono quei soggetti che devono conseguire gli obblighi quantitativi nazionali d'incremento dell'efficienza energetica:

- I distributori di energia elettrica che, alla data del 31 dicembre di due anni antecedenti a ciascun anno d'obbligo, abbiano connessi alla propria rete di distribuzione più di 50.000 clienti finali;
- I distributori di gas naturale che, alla data del 31 dicembre di due anni antecedenti a ciascun anno d'obbligo, abbiano connessi alla propria rete di distribuzione più di 50mila utenti finali.

I soggetti volontari sono quei soggetti che possono accedere al sistema dei Titoli di Efficienza Energetica su richiesta, non avendo obblighi nazionali.

- Società controllate dai distributori obbligati.
- Distributori di energia elettrica o gas non soggetti all'obbligo.
- Società di servizi energetici (SEE), dette anche Energy Service Company (ESCO), sono società che intervengono in progetti per efficienza energetica e liberano il cliente da oneri finanziari e organizzativi. Cliente finale e la SEE poi condividono i risparmi economici ottenuti secondo diverse tipologie di contratto.
- Società con obbligo di nomina dell'*energy manager*, figura professionale che ha il compito di ottimizzare il bilancio energetico delle aziende pubbliche e private. Per le aziende particolarmente energivore è dato a termini di legge l'obbligo di nominare un energy manager nell'azienda.
- Imprese operanti nei settori industriale, civile, terziario, agricolo, trasporti e servizi pubblici, compresi gli Enti pubblici, con precisi requisiti (nomina dell'*energy manager*, oppure certificazione ISO 50001).

Nel campo dell'incentivazione dell'efficienza energetica, l'Italia è stata la prima nazione al mondo ad applicare il meccanismo dei certificati bianchi. La Francia ha poi utilizzato una strategia simile, ma cambiando l'ambito di applicazione e la regolazione degli scambi, i quali sono solo bilaterali. La Commissione Europea, l'Agenzia Internazionale per l'Energia e diversi Paesi europei ed extra-europei hanno analizzato e svolto studi sul sistema d'incentivazione italiano e la relativa regolazione. Tramite la Direttiva 32/2006 della Commissione Europea ha indicato i certificati bianchi come strumento per ridurre i consumi energetici [11].

2.3 Importanza dell'Efficienza Energetica in campo industriale

Tramite l'efficienza energetica si può raggiungere a livello mondiale l'obiettivo di ridurre l'utilizzo di fonti fossili e di difesa ambientale, mentre a livello di singola impresa il maggior beneficio portato dall'efficientamento risiede nella diminuzione dei costi dell'energia e dunque di produzione. A causa della competizione con le altre aziende, le imprese sono alla continua ricerca di modi per ottimizzare la produzione, tendendo a migliorarne la produttività. Questa via però spesso è limitata da ritmi produttivi già elevati e quindi da margini di miglioramento ridotti.

Il tema dell'efficienza energetica è avvertito e affrontato in maniera differente in base alla tipologia d'impresa. Si riscontra, infatti, una grande sensibilità al tema nelle grandi industrie di processo, dove il costo energetico grava in maniera sostanziale sul costo finale, mentre nelle imprese medio – piccole, dove il costo non ricopre la voce più importante e a volte addirittura la minore, il problema è meno sentito o trascurato. Nonostante ciò, un'indagine molto attenta può portare alla luce notevoli vantaggi ambientali ed economici anche in aziende non energivore.

La riduzione dei costi di esercizio e di produzione sono il frutto di un programma *energy saving* di successo. Questi mancati costi sono risorse che possono essere nuovamente investite da parte dell'impresa. Il consumo di energia è collegato poi al controllo delle emissioni. Una diminuzione dei consumi quindi porta a benefici ambientali ed evita all'azienda in qualche caso di incorrere in sanzioni per il superamento della soglia limite di emissione.

Ogni realtà ha diversi e svariati interventi possibili che possono portare ad opere di miglioramento, ma possiamo principalmente distinguere due categorie di azione: una tecnologica ed una gestionale. Un intervento tecnologico consiste nella sostituzione di macchinari o di una loro parte. Quest'azione comporta a volte un grande investimento iniziale e problemi di fattibilità tecnica, dunque va attentamente stimato. L'azione di carattere gestionale invece prevede l'analisi degli impianti già esistenti e la loro ottimizzazione, facendo al più modifiche marginali.

Tutto il personale dell'azienda deve essere attivato nel programma di efficientamento, perché anche le operazioni della quotidianità possono portare a importanti risparmi. Perciò il coinvolgimento e la sensibilizzazione dei lavoratori da parte della dirigenza deve essere mirato e per nessun motivo trascurato.

Oltre alla pressione della politica, anche Confindustria si impegna nell'approfondire il tema dell'efficienza e in particolar modo ha istituito una task force per affrontare le opportunità offerte sia a livello industriale, sia a livello nazionale. Il vicepresidente per lo Sviluppo Economico di Confindustria, Aurelio Regina, in un'intervista per la rivista Eco-news, sostiene che l'efficienza energetica vale 15,4 miliardi di euro per il sistema Paese ed afferma che:

“Il complesso delle misure di efficienza energetica nei vari settori industriali porterebbe a un risparmio potenziale tra il 2010 e il 2020 pari a circa 72 Mtep di energia, per raggiungere il quale si attiverebbe un impatto socio-economico di circa 130 miliardi di euro di investimenti, un aumento della produzione industriale di 238 miliardi di euro ed una crescita occupazionale di oltre 1,6 milioni di unità di lavoro”.

Si può concludere citando nuovamente lo stesso Regina, che nella medesima intervista afferma che:

“L'efficienza energetica, infatti, è uno strumento essenziale non solo per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità ambientale ma anche come un'opportunità di crescita per il sistema Paese e le sue industrie” [12].

3 Dalla quarzite al wafer epitassiato

*Strano come la scienza che ai vecchi
tempi sembrava inoffensiva si sia
trasformata in un incubo che fa
tremare tutti.*

Albert Einstein

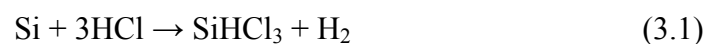
Il silicio si trova in natura sotto forma di ossidi, costituendo più del 25% della crosta terrestre. La quarzite è il materiale di partenza con cui SiO_2 sarà trasformato in silicio di grado elettronico, quindi con un tasso d'impurità di 10^{-9} (1 ppb). Infatti, il silicio dovrà essere trattato fino ad avere gradi di purezza maggiori del 99%, in quanto le impurità del reticolo cristallino causano una bassa mobilità dei portatori di carica.

3.1 Crescita del Monocristallo

Facendo reagire la quarzite in forni ad arco elettrico si ottiene silicio metallurgico che possiede solitamente una purezza non maggiore del 98%, ben lontana da quella necessaria per ottenere silicio di grado elettronico.

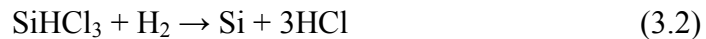
3.1.1 Processo Siemens

Nel 1960 fu creato un processo per purificare il silicio metallurgico. Questo processo è formato da due step. La prima lavorazione comprende la reazione del silicio con l'acido cloridrico in un apposito reattore a circa 300°C così da avere:



Per ottenere un'estrema purificazione del tricloruro silano (SiHCl_3 o TCS), tale da renderlo di grado elettronico, si esegue una distillazione.

Ora per ottenere il silicio di grado elettronico bisognerà far decomporre il TCS, in presenza di idrogeno, tramite la reazione:



La (3.2) avviene in un forno su barrette di silicio policristallino, mantenute ad una temperatura maggiore di 1000°C tramite delle resistenze riscaldate con effetto Joule. Queste barrette costituiscono l'anima (o substrato) su cui il silicio si deposita. Le pareti del forno sono raffreddate per evitare che il silicio si depositi sopra. Inoltre avendo il silicio una grande affinità chimica con la maggior parte delle sostanze presenti in natura, bisogna mantenere sotto controllo l'atmosfera del crogiolo e la sua pulizia, per evitare di contaminare il silicio policristallino che si va formando [13].

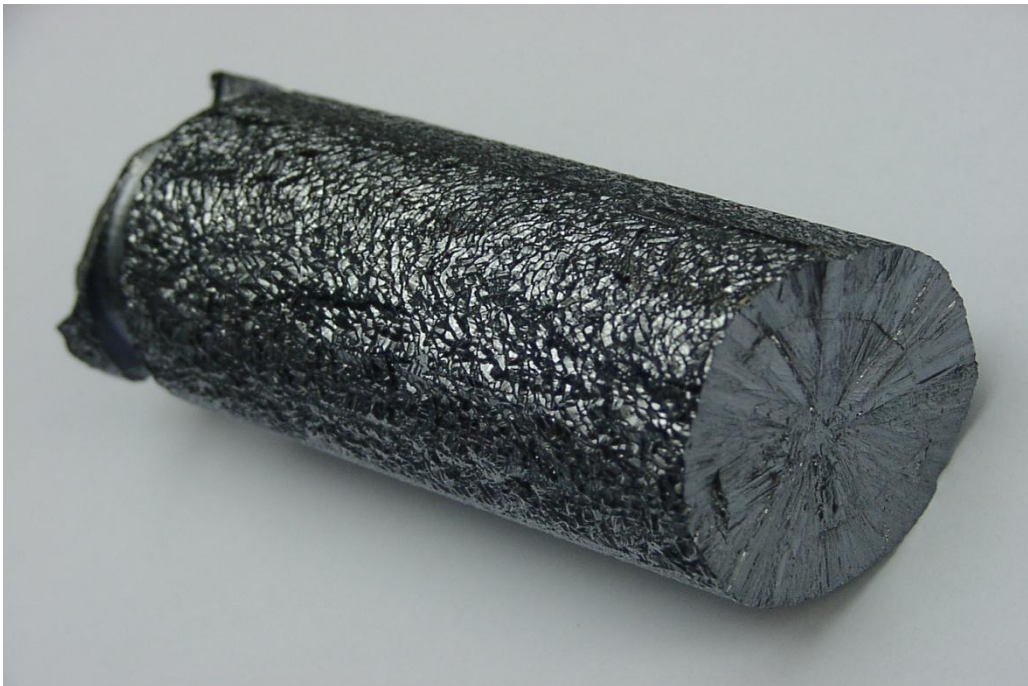


Figura 3.1. Barra di silicio policristallino ottenuta tramite processo Siemens.

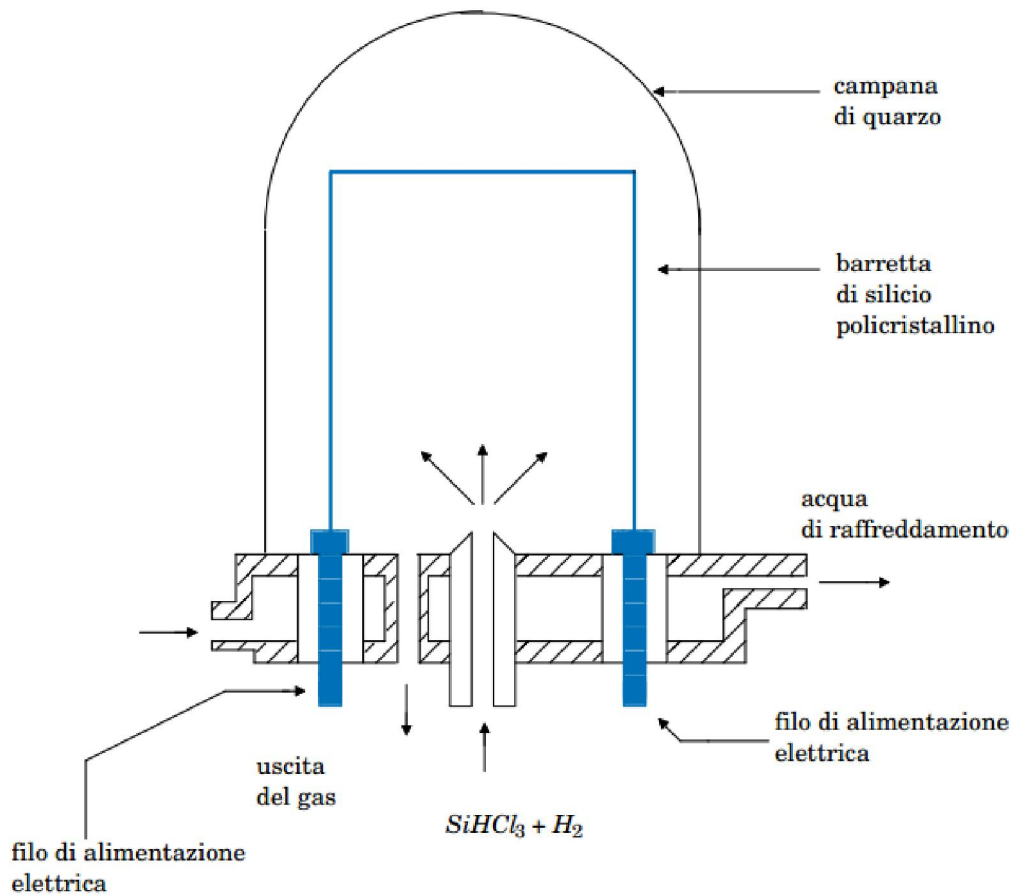


Figura 3.2. Schema di un forno per la produzione di silicio policristallino.

Ora il policristallo, che ha un grado di purezza sufficiente per essere adottato come base dei dispositivi elettronici, dovrà essere nuovamente processato per ottenere silicio monocristallino. Infatti i monocristalli hanno proprietà più uniformi e prevedibili dei policristalli, come la resistività. Inoltre la struttura monocristallina in un semiconduttore permette un flusso uniforme e prevedibile di elettroni. Un altro concetto importante nella crescita del monocristallo a cui bisognerà prestare attenzione sarà l'orientamento del cristallo stesso. Infatti ogni piano è unico e possiede proprietà chimiche, elettriche e fisiche differenti che saranno così trasmesse ai wafer quando saranno tagliati. Tre numeri identificano i piani cristallini e sono conosciuti come Indici di Miller. Quelli utilizzati più comunemente nel campo dei dispositivi sono i piani $\langle 100 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$ [14].

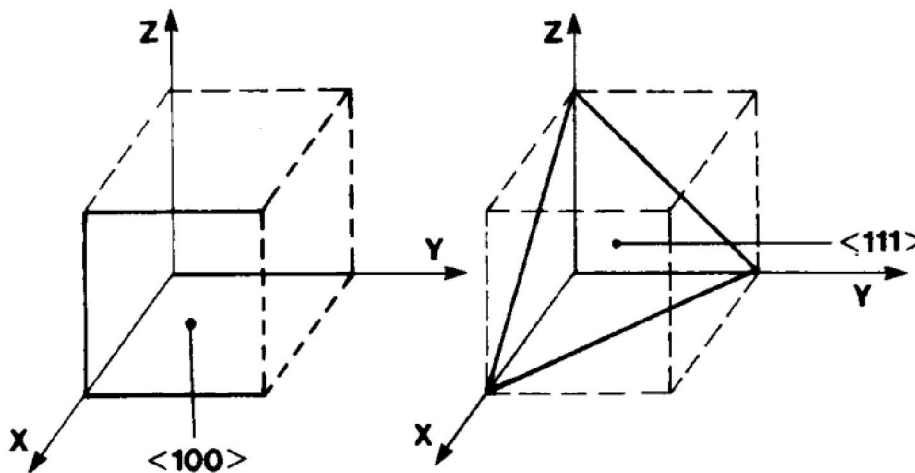


Figura 3.3. Piani cristallini.

3.1.2 Crescita del cristallo

Il processo che porta alla conversione di una barra di silicio policristallino in un monocristallo che possiede il giusto orientamento e drogato di tipo P o di tipo N viene detto *crystal growing*. Sono principalmente due le tecniche che sono adoperate per effettuare la crescita: il processo Czochralski e il float zone.

3.1.2.1 Metodo Czochralski (CZ)

Il processo CZ è il metodo più utilizzato per la crescita di monocristalli. Nel forno, in un ambiente inerte, è posto un crogiolo in quarzo che viene riscaldato da resistenze elettriche o tramite induzione a radiofrequenza. L'atmosfera è mantenuta inerte tramite l'utilizzo di un gas, tipicamente argon, poiché bisogna evitare che il silicio sia contaminato o si ossidi, essendo molto reattivo per natura. Il crogiolo è caricato con pezzi di materiale policristallino e piccole quantità di drogante, il quale è scelto in maniera tale da creare un monocristallo di tipo P o tipo N. Gli atomi del drogante vengono incorporati nella struttura del monocristallo. Riscaldando il crogiolo, si porta il materiale a fusione, raggiungendo temperature superiori ai 1400°C. La massa fusa, chiamata *melt* (fuso), entra a contatto con un seme di monocristallo, il quale viene posto in

maniera tale da lambire la superficie del materiale liquido. Il seme è un piccolo cristallo che possiede l'orientamento desiderato. Questo è posto appena sopra al melt. La tensione superficiale tra seme e fuso provoca un sottile film tra i due, che permette alla massa di silicio di aderire al seme e raffreddarsi. Nel corso del raffreddamento gli atomi del fuso si orientano secondo la direzione del seme.

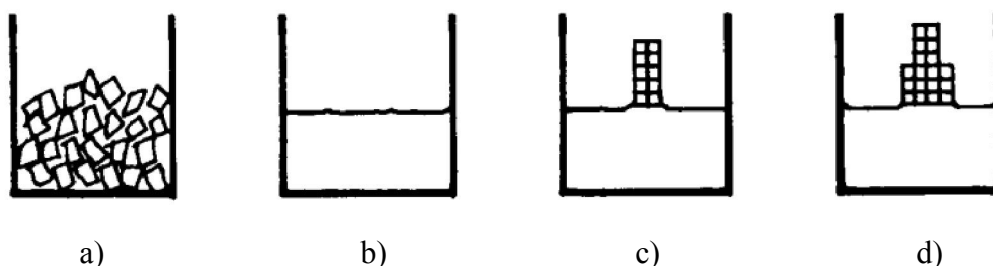


Figura 3.4. a) Polisilicio b) Melt c) Seme d) Crescita del cristallo

Gli atomi del materiale si dispongono nella direzione voluta grazie all'orientamento posseduto dal seme. Durante l'intero processo di crescita per ottenere uniformità del drogaggio, perfezione del cristallo e un diametro controllato, il seme e il crogiolo ruotano in direzioni opposte. Il seme, oltre a ruotare tramite un mandrino con velocità di circa 10 giri al minuto, viene sollevato con una velocità di pochi millimetri al minuto. Quest'operazione è detta tiraggio. Durante tutto il processo bisogna mantenere attentamente monitorate la velocità di rotazione, di tiraggio e la temperatura di fusione, la quale dovrà essere mantenuta in un range di $0,1^{\circ}\text{C}$, in quanto una sua variazione comporta cambiamenti nel diametro e nel valore di resistività del cristallo. Ad oggi si riescono ad ottenere monocristalli con diametri di 200 mm e 300 mm, ma l'evoluzione della tecnologia porterà alla produzione di barre di 450 mm.



Figura 3.5. Metodo CZ.



Figura 3.6. Monocristallo.

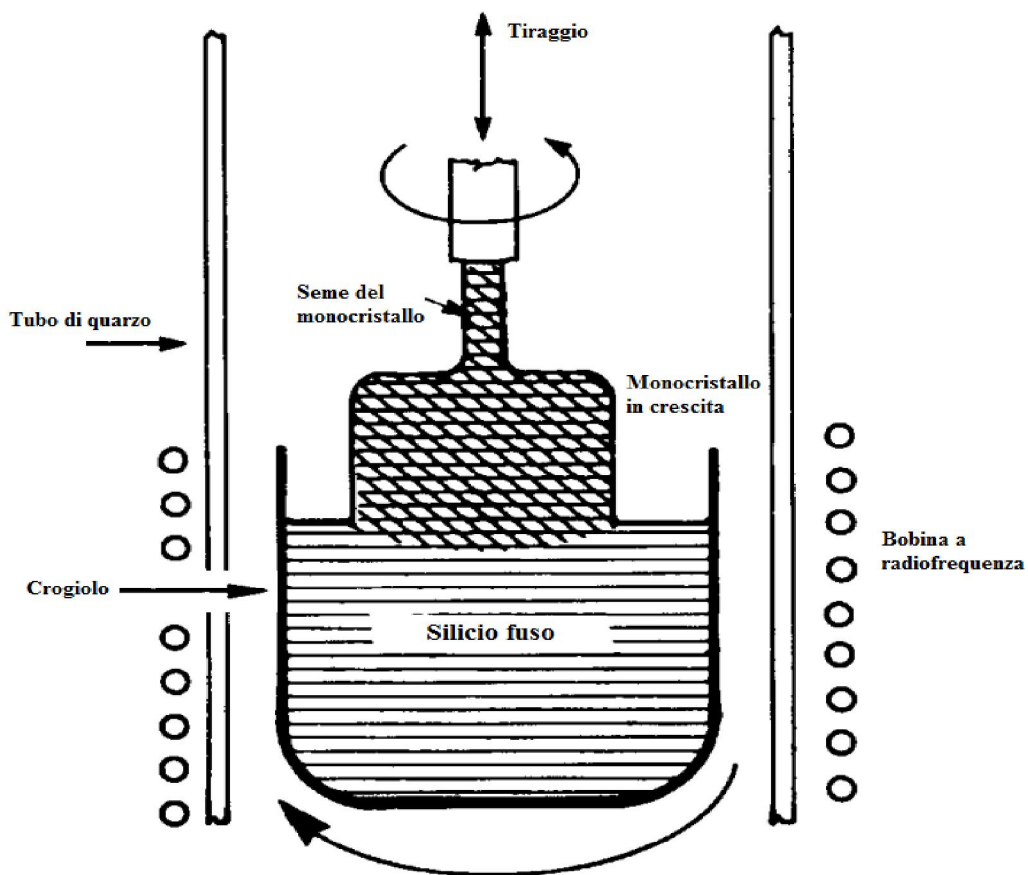


Figura 3.7. Schema di produzione di un monocristallo con metodo CZ.

3.1.2.2 Float Zone (FZ)

Il metodo CZ consente di controllare un vasto campo di conducibilità elettrica, però è difficile ottenere un wafer ad alta resistività perché durante la crescita le impurità (principalmente l'ossigeno) si accumulano nel monocristallo. Nel CZ la principale fonte d'impurità di ossigeno è il crogiolo. Infatti l'ossigeno presente nel crogiolo di quarzo, dissolve nel silicio fuso e dunque entra a far parte del monocristallo [15]. Per alcuni dispositivi, gli elevati livelli di ossigeno sono intollerabili. In questi particolari casi si utilizza un'altra tecnica di crescita chiamata Float Zone, la quale consente di avere quantità di ossigeno inferiori. Il metodo FZ prevede che la barra di polisilicio sia mantenuta in posizione verticale e che il mandrino rotante mantenga nell'estremità superiore la barra, mentre nella parte inferiore del mandrino sia inserito un seme di monocristallo posto a contatto con l'altra estremità della barra. Tutta l'apparecchiatura è mantenuta dentro un tubo di quarzo, in un'atmosfera inerte per ridurre la contaminazione possibile. Per ottenere il monocristallo, una bobina a radiofrequenza fonde l'interfaccia tra seme monocristallino e silicio policristallino. Lentamente la bobina trasla verso l'alto, così da far raffreddare e cristallizzare nuovamente la barra. La parte fusa, essendo a contatto con il seme, quando solidifica segue l'orientamento del seme stesso, permettendo una crescita ordinata del monocristallo. Il fuso, che lentamente si sposta verso l'alto, contiene le impureità presenti nel policristallo. Queste restano intrappolate in questa zona e vengono trascinate fino l'estremo superiore. A processo finito verrà tagliata l'ultima porzione della barra, la quale non sarà stata lavorata perché mantenuta dal mandrino e inoltre conterrà le impurità trasportate dal fuso. Questo materiale potrà essere riciclato per lavorazioni successive. Durante tutto il processo, come nel caso del CZ, sarà possibile drogare il materiale.

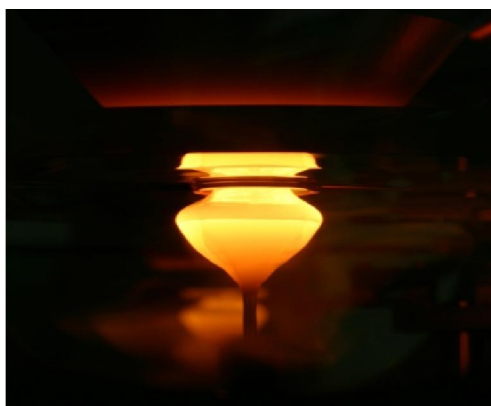


Figura 3.8. Fase iniziale metodo FZ.



Figura 3.9. Metodo FZ.

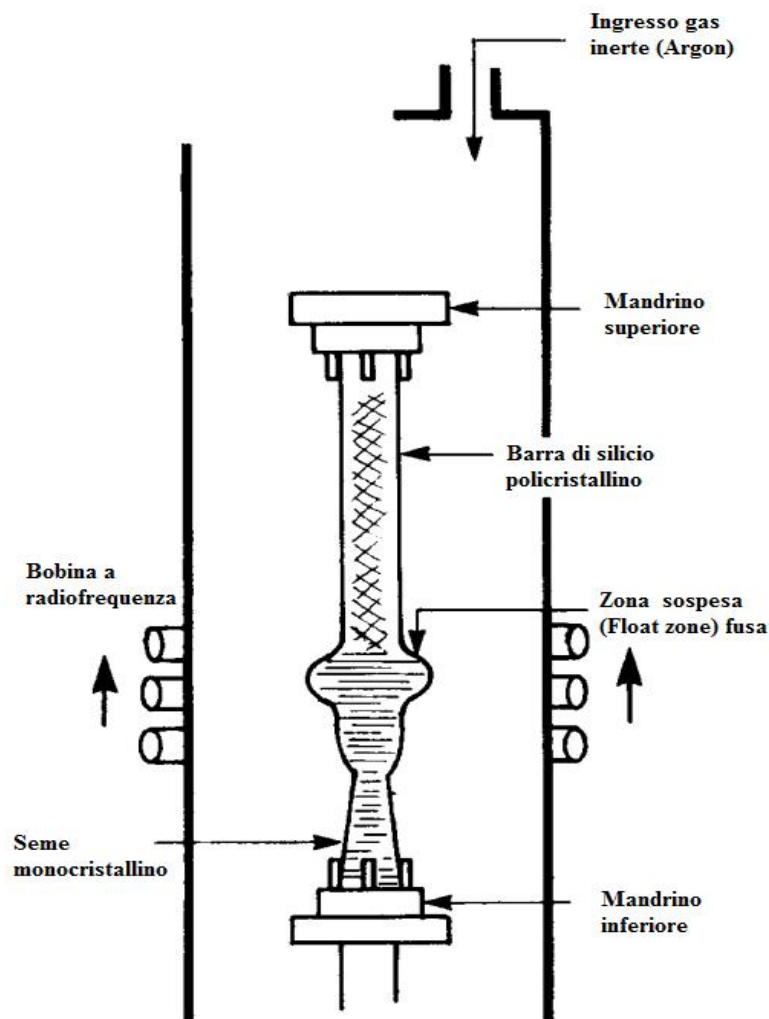


Figura 3.10. Schema di produzione di un monocristallo con metodo FZ.

Mettendo a confronto il metodo CZ con il metodo FZ, si può notare che in quest'ultimo non si possono produrre cristalli con grandi diametri e questi presentano una densità superiore di dislocazioni. L'assenza di un crogiolo di quarzo però permette di produrre monocristalli con maggiore purezza. Infatti nel CZ la crescita del monocristallo comincia con una massa fusa contenuta in un crogiolo, nella quale diffonde l'ossigeno contenuto nel quarzo, mentre nel FZ la zona fusa trasla verso l'alto, provocando un'ulteriore raffinazione.

3.1.3 Ultime operazioni

Rimuovendo le parti agli estremi del monocristallo, secondo distanze predeterminate, la barra “diventa” un lingotto. Il lingotto così ottenuto subisce una nuova divisione, così da avere pezzi più piccoli che possono ottimizzare le operazioni successive. Per ottenere un diametro specifico, i lingotti sono lavorati su un tornio meccanico. Su ogni pezzo viene eseguito un controllo qualità e le misurazioni di resistività, di ossigeno, di carbonio e dei difetti di vacanza, per certificare che il monocristallo rispetti le specifiche. Per confermare la struttura atomica del cristallo, i lingotti vengono analizzati ai raggi X.



Figura 3.11. Lingotto pronto per essere tagliato.

3.2 Wafering

La fase atta a trasformare una barra di monocristallo nelle fette che poi saranno lavorate è detta Wafering. Per poter tagliare i lingotti esistono diverse tecniche.

3.2.1 ID Sawing

Per decine di anni la tecnologia usata per il taglio delle fette di silicio è stata quella dell'Inner Diameter (ID) Sawing. La macchina di taglio è composta da una lama circolare al cui interno è ricavato un foro nel quale viene alimentata la barra monocristallina. In base al costruttore la macchina sposta il lingotto in direzione della lama o viceversa. L'interno della lama d'acciaio è ricoperto da una pasta diamantata. La lama ruotando ad alta velocità riesce a tagliare una fetta per volta [16].

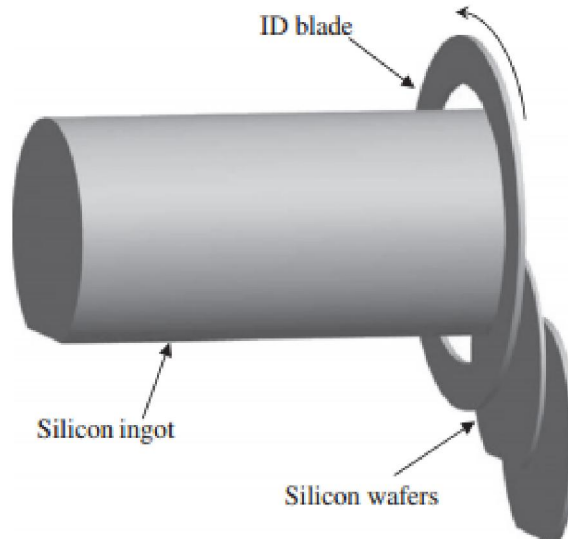


Figura 3.12. Raffigurazione della tecnologia ID Sawing.

3.2.2 Wire Saw

La tecnologia delle taglierine a filo (Wire Saw) ha avuto uno sviluppo significativo intorno agli anni '90 ed ha sostituito sostanzialmente l'ID Sawing. Infatti la possibilità di tagliare contemporaneamente un intero lingotto in wafers più sottili, con minor curvatura, quindi con maggior planarità, e minor scarti di silicio, detto kerf ovvero sfrido, ha portato l'interesse verso questa tecnologia, originariamente pensata per la lavorazione del legno in falegnameria [17].

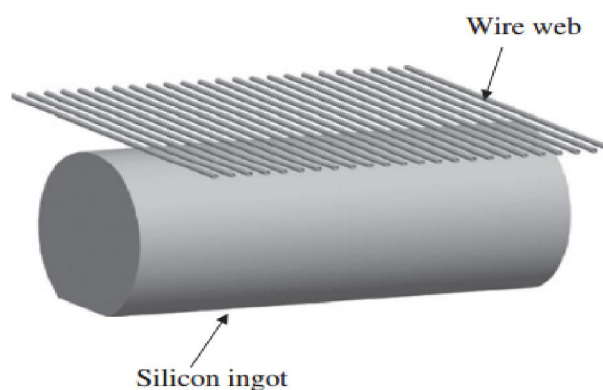


Figura 3.13. Raffigurazione del Taglio a filo.

La macchina responsabile del taglio è composta da un unico filo metallico alimentato da una bobina. Il filo è avvolto attorno a delle guide che presentano scanalature con un passo costante, in modo tale da formare una maglia orizzontale composta da numerosi fili paralleli. Questa rete è movimentata grazie a un motore che mette in rotazione le guide, permettendo così la traslazione orizzontale dei fili, i quali si avvolgono e poi si svolgono ad una velocità compresa tra i 5 e i 20 m/s [18] [19]. Dopo il posizionamento del blocco di silicio nella macchina sopra degli appositi tavoli, questo comincia a muoversi in direzione verticale andando ad incontrare i fili anch'essi in movimento, riuscendo così a tagliare i lingotti in wafers. Le problematiche principali riguardano lo spessore del filo, in quanto un filo più sottile permette di fare un maggior numero di fette, wafers più sottili e con minor spreco di materiale, ma allo stesso tempo il filo diventa meno resistente e più facilmente soggetto a rottura. Un'altra problematica si presenta con la velocità di attraversamento verticale della barra, la quale deve bilanciare una maggior produttività e allo stesso tempo salvaguardare il filo dalla rottura.

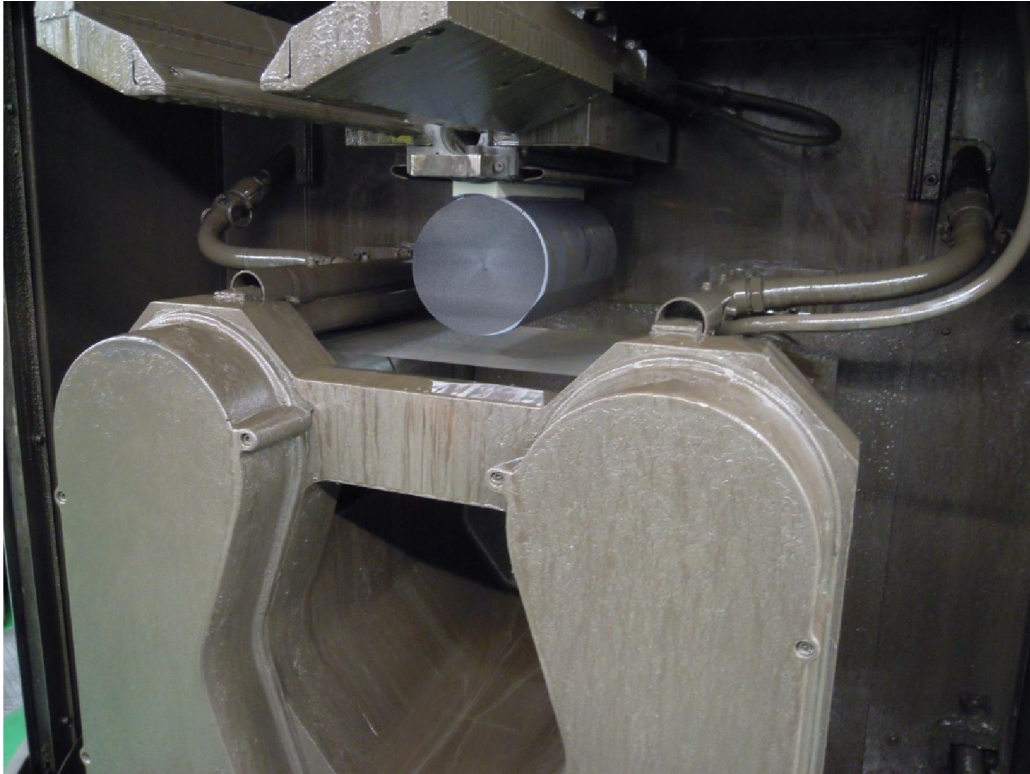


Figura 3.14. Taglierina a filo.

3.2.2.1 Abrasive Slurry Wire Saw

Questa tipologia di taglio viene effettuata tramite una pasta abrasiva composta principalmente da Carburo di Silicio (SiC) e glicole polietilenico (PEG), la quale è immessa con degli ugelli nella taglierina lungo i fili. Lo slurry trasportato dai fili in movimento, in contatto con il lingotto, lo erode riuscendo così a tagliare le fette. La capacità dell'abrasivo di asportare materiale dipende da diversi fattori tra cui la velocità del filo, la forza agente tra cristallo e filo, la frazione solida presente nella soluzione, la viscosità dello slurry, le dimensioni e la forma delle particelle di Carburo di Silicio.



Figura 3.15. Wafers in una taglierina a filo con abrasivo.

L'abrasivo poi è molto costoso e incide per il 25-35% del costo totale dell'operazione di taglio. Lo slurry inoltre ha il compito di refrigerare il filo e la barra a causa dell'aumento di temperatura dovuto allo sfregamento. Il diametro del filo, la distribuzione e la grandezza delle particelle di SiC e le possibili vibrazioni trasversali del filo influiscono sulla qualità superficiale dei wafers e sulla produzione di scarti di Silicio dal lingotto. Una minor perdita di silicio e di slurry è l'obiettivo auspicabile per migliorare questo tipo di processo. I costruttori si sono prodigati a ridurre le dimensioni del filo per avere minori residui di Silicio, aumentare la tensione del filo per diminuire le vibrazioni e implementare sistemi di ricircolo dell'abrasivo per ridurre l'utilizzo, così da avere sistemi sempre più efficienti.

La figura 3.16 mostra il principio di funzionamento della taglierina ad abrasivo. Il cristallo è spinto a velocità costante contro la rete di fili. L'abrasivo viene iniettato sopra i fili che lo trasportano, riuscendo così ad asportare materiale.

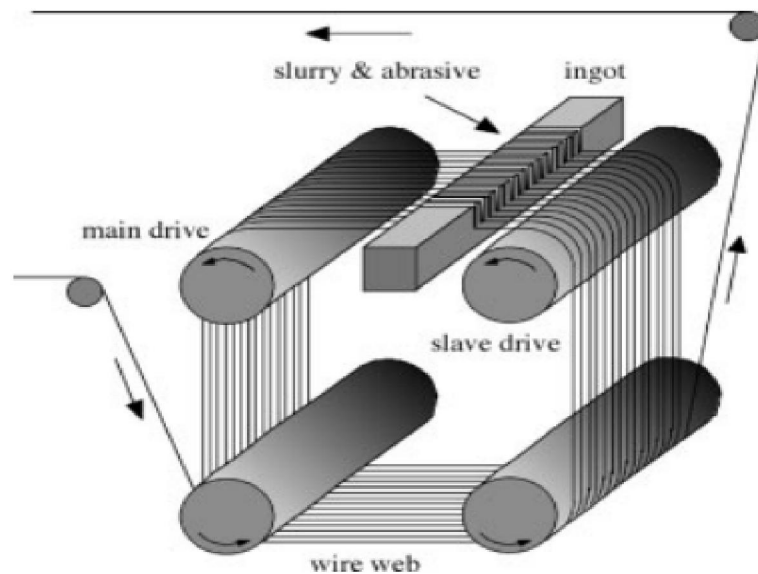


Figura 3.16. Schema del principio di funzionamento del taglio.

3.2.2.2 Diamond Wire Saw

Il filo diamantato è una tecnologia potenzialmente promettente per aumentare la capacità produttiva dei wafer di silicio, perché è possibile aumentare la velocità di avanzamento della tavola [20]. Si è pensato di modificare il filo responsabile del taglio, applicandovi sopra il diamante, che è così utilizzato come materiale abrasivo. Rispetto alla taglierina a slurry infatti non c'è più bisogno di iniettare un liquido abrasivo, poiché già il filo è responsabile dell'erosione. In questo caso per raffreddare viene utilizzata dell'acqua. Il filo diamantato è decisamente più delicato perché nonostante l'anima sia la stessa, sopra la superficie sono incorporate particelle di diamante tramite un materiale legante, rendendo così il filo più rigido e dunque soggetto maggiormente a torsioni e vibrazioni. Nonostante questo il filo diamantato è in grado di tagliare ad una velocità maggiore tale da garantire una produttività più elevata (circa doppia) e permette di avere un kerf inferiore rispetto al caso ad abrasivo. Tutto ciò rende il filo diamantato una tecnologia particolarmente interessante anche se di difficile utilizzo [21].

3.3 Misura Parametri Meccanici

3.3.1 Aspetto Visivo

Una valutazione importante risulta essere quella dell'occhio umano. Infatti i parametri fisici e meccanici, misurati tramite appositi strumenti, riescono a fornire una caratterizzazione globale della fetta, ma non sono in grado di poterla descrivere completamente. Nessun parametro misurabile è in grado di descrivere alcuni difetti come rigature, graffi, macchie, difetti sul bordo, piccole forature, variazioni locali di riflettività. Ragion per cui l'intera produzione dovrà essere sottoposta ad un'ispezione visiva accurata. Tale ispezione è svolta da operatori specializzati in camere oscure, che tramite particolari attrezzature, principalmente con luci apposite, svolgono il compito di ricerca di tali difetti.

3.3.2 Bow

Il Bow indica la concavità/convessità del wafer rispetto alla superficie mediana. La superficie mediana è il luogo dei punti equidistanti tra il fronte e il retro della fetta. Il Bow è calcolato dalle misurazioni della distanza del punto centrale della superficie mediana relativa al piano di riferimento, identificato da tre punti equidistanti su un cerchio con un diametro inferiore al diametro nominale del wafer. Durante la misurazione la fetta non è vincolata (unclamped), per evitare che vi siano delle inflessioni tipiche dovute al blocco con un sistema a vuoto. Il Bow può assumere valore positivo se il punto centrale della superficie mediana si trova sopra il piano di riferimento, mentre negativo se si trova al di sotto.

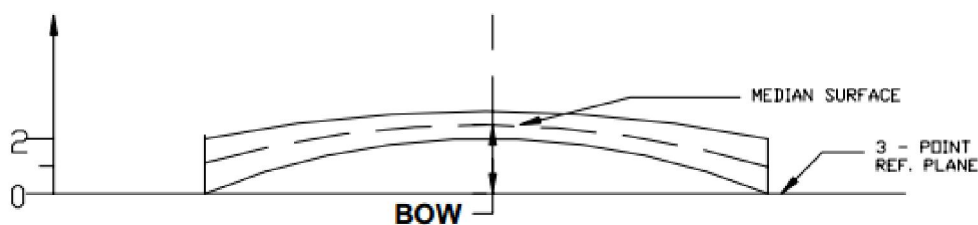


Figura 3.17. Schema di misura del Bow.

3.3.3 Contaminazione da Metalli

Dopo la lucidatura e nuovamente dopo l'epitassia viene effettuata un'analisi per evidenziare se vi è stata contaminazione da metalli durante il processo produttivo. L'analisi svolta su dei campioni per ogni lotto, verte ad identificare contaminazioni tali da pregiudicare il funzionamento del prodotto. Le contaminazioni metalliche, infatti, alterano le proprietà del silicio in maniera tale da non essere più utilizzabile dal cliente. Queste contaminazioni possono avvenire in una qualsiasi fase del processo produttivo, sottoforma di soluzione allo stato solido di atomi metallici all'interno del monocristallo.

3.3.4 Gloss (o Brillantezza o Lucentezza)

La brillantezza è quella proprietà che indica se la superficie dell'oggetto è lucida oppure opaca. L'intensità dipende dalle caratteristiche superficiali dell'oggetto e la misura è compiuta tramite l'illuminazione della superficie attraverso un fascio luminoso con uno specifico angolo d'incidenza determinato dalla norma [22]. Il glossometro è lo strumento per la misurazione della brillantezza, cioè l'intensità della luce riflessa su una superficie. Il materiale impiegato, il tipo di luce, l'angolo d'incidenza del fascio luminoso e la finitura superficiale influiscono sull'intensità della lucentezza.

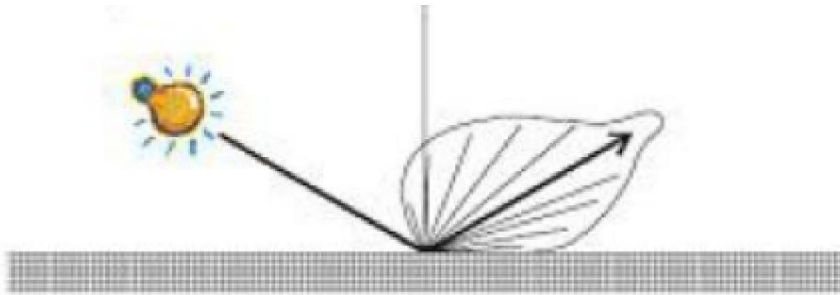


Figura 3.18. Principio di misura di Gloss.

La riflettività non è un parametro assoluto ma comparativo. È riferito infatti ad un vetro campione standard, di colore nero, lucidato a specchio, caratterizzato da un valore definito di riflettività. Il valore imposto al campione è di 100 Gloss

Unit (o GU o Gloss), mentre zero è associato ad una superficie ideale senza riflettività. Non c'è correlazione tra la quantità di luce irraggiata e il valore di lucentezza, perché è espressa come percentuale della quantità di luce irraggiata rispetto l'angolo d'incidenza. Ciò vuol dire che si possono avere valori superiori a 100 GU se la superficie considerata ha riflettività maggiore del vetro campione. Il range varia da 0 GU, tipico di superfici particolarmente opache, fino a 1999 GU, valore caratteristico di particolari metalli con superfici extralucide. Le normative definiscono i valori degli angoli d'incidenza per la misura della gloss.

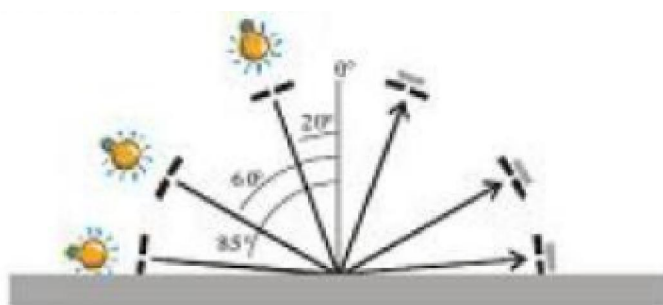


Figura 3.19. Angoli d'incidenza della misura di Gloss.

Questo parametro è utile per valutare la micro struttura di una superficie, essendo la riflettività tipica della morfologia della superficie di un determinato materiale. Si può quindi utilizzare come parametro di confronto per la valutazione. Infatti, le superfici che presentano un numero elevato di micro irregolarità, avranno la tendenza a deviare in direzioni diverse il fascio luminoso, in maniera tale da abbassare il valore di gloss. Invece una superficie che presenta minori imperfezioni tenderà ad avere una brillantezza maggiore. Dato quindi il valore di lucentezza è possibile sapere se la superficie contiene un numero elevato di micro irregolarità o meno.

3.3.5 Rugosità

La rugosità è una proprietà tipica delle superfici reali e ne identifica le imperfezioni di carattere geometrico e le irregolarità. La rugosità, infatti, è l'insieme delle irregolarità superficiali che si ripetono con passo relativamente piccolo [23]. Le irregolarità possono essere intrinseche al materiale o derivare

da lavorazioni su di esso. La misura delle imperfezioni è eseguita sezionando ipoteticamente la superficie da misurare con un piano normale alla stessa. L'intersezione tra questo piano fittizio, detto di rilievo, e la superficie reale restituisce il profilo effettivo della superficie. Il rugosimetro è lo strumento che permette tale misura. Il componente del rugosimetro atto alla rilevazione delle irregolarità è il tastatore, il quale si sposta lungo la superficie.

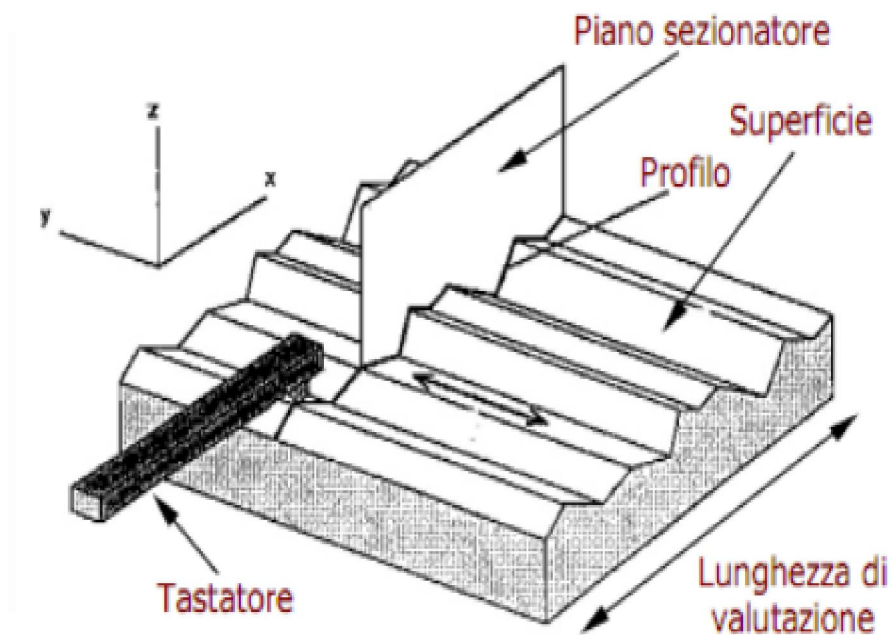


Figura 3.20. Principio di funzionamento del rugosimetro.

Dopo la registrazione del profilo bisogna estrapolare i parametri che lo caratterizzano. Si definisce linea media del profilo quella linea per cui la somma delle distanze quadratiche dei punti del profilo della linea è minima.

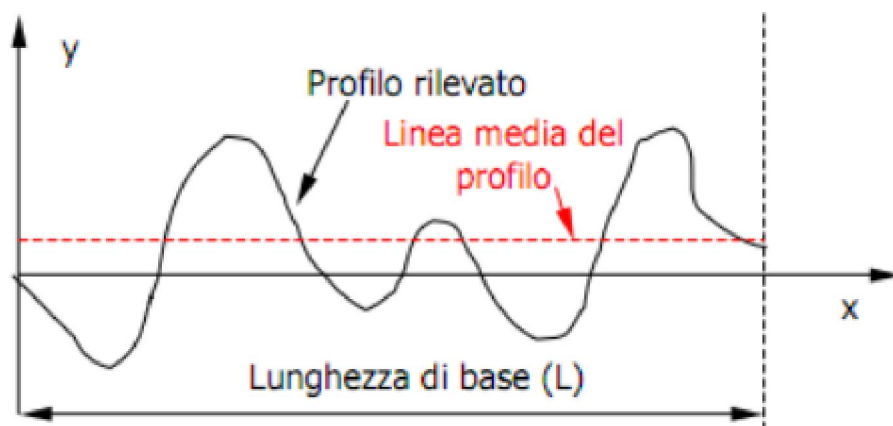


Figura 3.21. Definizione della Linea Media del Profilo.

La rugosità R_a è il valore della media aritmetica tra il profilo reale e la linea media del profilo, espressa in micron. Ci si riferisce alla lunghezza di base L della superficie considerata per rendere indipendente la misura da altre irregolarità. Definendo y_i gli scostamenti dalla linea media del profilo, la rugosità R_a considerata in termini discreti vale:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.1)$$

Altri parametri descrittivi sono presenti. Due modi differenti per calcolare la rugosità massima della superficie sono R_z ed R_{\max} . R_{\max} consiste nella misura della distanza tra due linee parallele alla linea media, tangenti al picco più alto e alla valle più profonda del profilo rilevato. R_z invece è definita come la media aritmetica dei valori assoluti dei cinque picchi più elevati e delle cinque valli più profonde della lunghezza considerata.

Oltre a questi parametri, ne viene definito un ulteriore, poiché R_a non è sensibile a forti cambiamenti. Infatti due superfici che presentano lo stesso valore R_a , possono avere regolarità superficiale sensibilmente diverse. Questa caratteristica invece è colta da R_q , che è la media quadratica degli scostamenti dalla linea media del profilo. Essendo infatti una media quadratica, risente maggiormente delle brusche variazioni rispetto alla media aritmetica.

Si definisce in valori discreti R_q come:

$$R_q = \sqrt{\sum_{i=1}^n |y_n|^2} \quad (3.2)$$

In base allo scopo, si utilizza una tra le due misure. Solitamente dipende dalle necessità del cliente.

3.3.6 Thickness (Spessore) e Flatness (Planarità)

Due trasduttori capacitivi, detti probes, misurano lo spessore delle fette senza toccarle. Nota la distanza tra i due probes (G_{total}), data in fase di calibrazione, i trasduttori misurano la distanza tra loro e la superficie della fetta (A e B). Essendo montati lungo lo stesso asse, misurano lo spessore t_w come differenza tra la distanza totale e le distanze tra un trasduttore e la fetta. Si riesce così a valutare lo spessore di ogni punto del wafer.

$$t_w = G_{total} - A - B \quad (3.3)$$

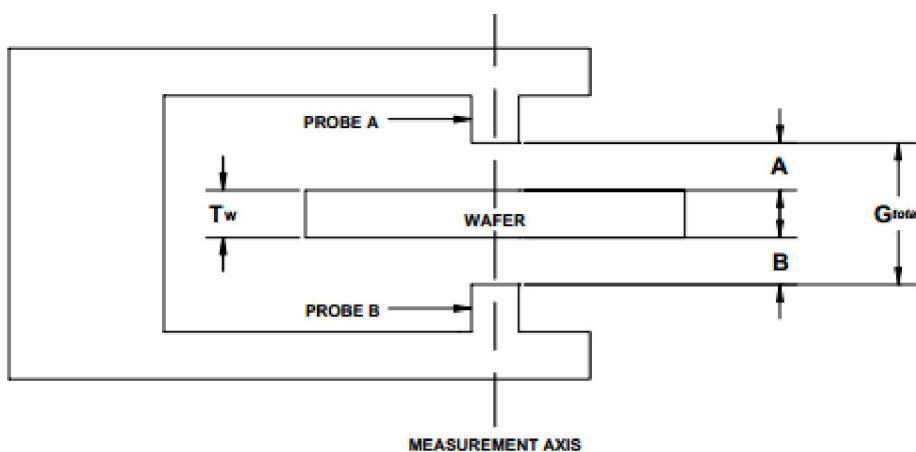


Figura 3.22. Schema di un wafer posto tra due probes e distanze per la misurazione.

Da questa valutazione puntuale si può ricavare il Total Thickness Variation (TTV) ovvero la distanza tra il massimo e il minimo spessore misurati

$$TTV = t_{max} - t_{min} \quad (3.4)$$

La planarità del wafer si può esprimere come Focal Plane Deviation (FDP). Questo valore esprime la distanza tra la superficie della fetta e un piano di riferimento. Se i punti si trovano al di sopra del piano di riferimento FDP, avrà un valore positivo, altrimenti sarà negativo. Per questo tipo di misurazione si assume che il retro della fetta sia idealmente piano.

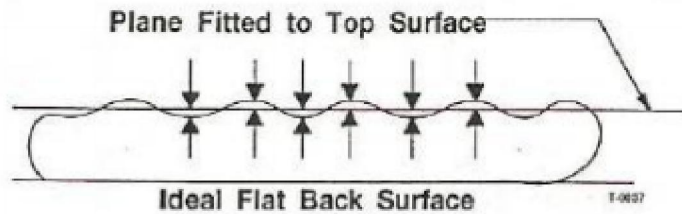


Figura 3.23. Schema di misura della planarità.

Un indice importante e molto spesso utilizzato per valutare la planarità è il Total Indicator Reading (TIR), che consiste nella differenza tra il massimo e il minimo FDP.

$$TIR = FDP_{max} - FDP_{min} \quad (3.5)$$

3.3.7 Warp

Il Warp indica la differenza tra la massima e la minima distanza della superficie media, rispetto al piano di riferimento, come nel caso della misura del Bow. In questo caso si sfrutta tutta la superficie mediana, invece del solo punto centrale. Vengono dunque misurati RDP_{max} , cioè la massima distanza dal piano di

riferimento, e RDP_{min} , che identifica la minima distanza dal piano di riferimento. Il piano di riferimento può essere espresso con il piano a tre punti attorno al bordo del wafer oppure eseguendo un calcolo dei minimi quadrati dei dati acquisiti della superficie mediana. Anche in questo caso la fetta non è vincolata per evitare inflessioni ulteriori [24].

$$Warp = RDP_{max} - RDP_{min} \quad (3.6)$$

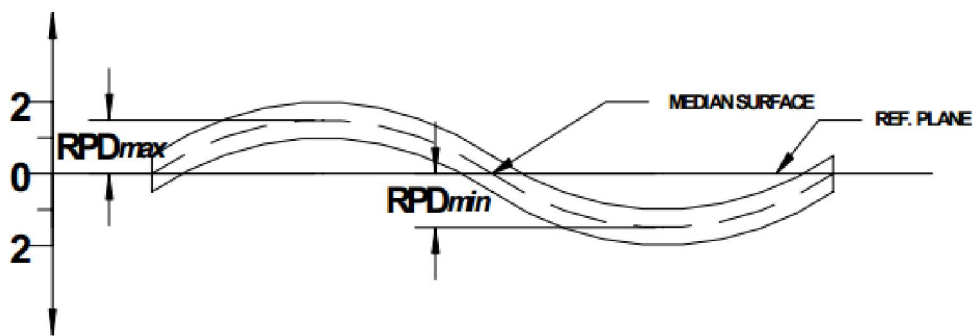


Figura 3.24. Schema di misura del Warp.

3.4 Lappatura

La sostituzione del metodo di taglio da ID Sawing a Wire Saw portò alla luce una nuova problematica. Il taglio a filo, infatti, induce sulla superficie delle fette delle ondulazioni che dovranno esser rimosse. Il meccanismo con cui si generano queste ondulazioni non è stato pienamente compreso [25]. Per questo motivo è difficile eliminarlo dal processo di taglio a filo. Se non ci fosse un processo successivo al taglio, per rimuovere l'ondulazione, la planarità della fetta ne sarebbe gravemente compromessa, dunque ogni wafer dopo il taglio deve essere spianato. Tale operazione, detta in gergo tecnico lappatura, si esegue con un complicato movimento delle fette che ruotano entro apposite sagome, chiamate satelliti.

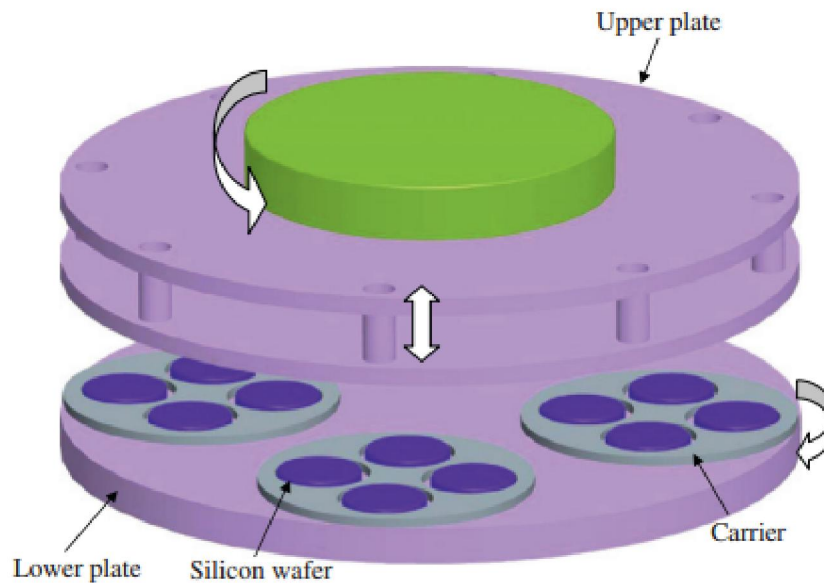


Figura 3.25. Rappresentazione di una Lappatrice.

I wafers sono caricati manualmente dentro i satelliti, i quali sono posti fra due piatti contrapposti. I piatti messi in rotazione da due motori, ruotano in senso opposto e con velocità differenti, in modo da assicurare planarità e parallelismo alle superfici. Durante la lavorazione le fette poste tra le due tavole, costantemente bagnate da abrasivo a base di allumina (Al_2O_3), si assottigliano e diventano perfettamente piane ed esenti dalle microcreste create dal taglio. Il processo di lappatura viene eseguito anche per ridurre il danneggiamento della fetta e per uniformare i parametri meccanici delle fette quali spessore e TTV. Ciascun ciclo dura alcuni minuti, a seconda del diametro e della specifica. Anche la lappatura è un'azione meccanica di abrasione tale da lasciare la superficie della fetta ancora danneggiata e ruvida, seppur in misura minore rispetto all'operazione di taglio.

Quando la lappatura avviene solo su un lato del wafer, questa è detta single-sided.

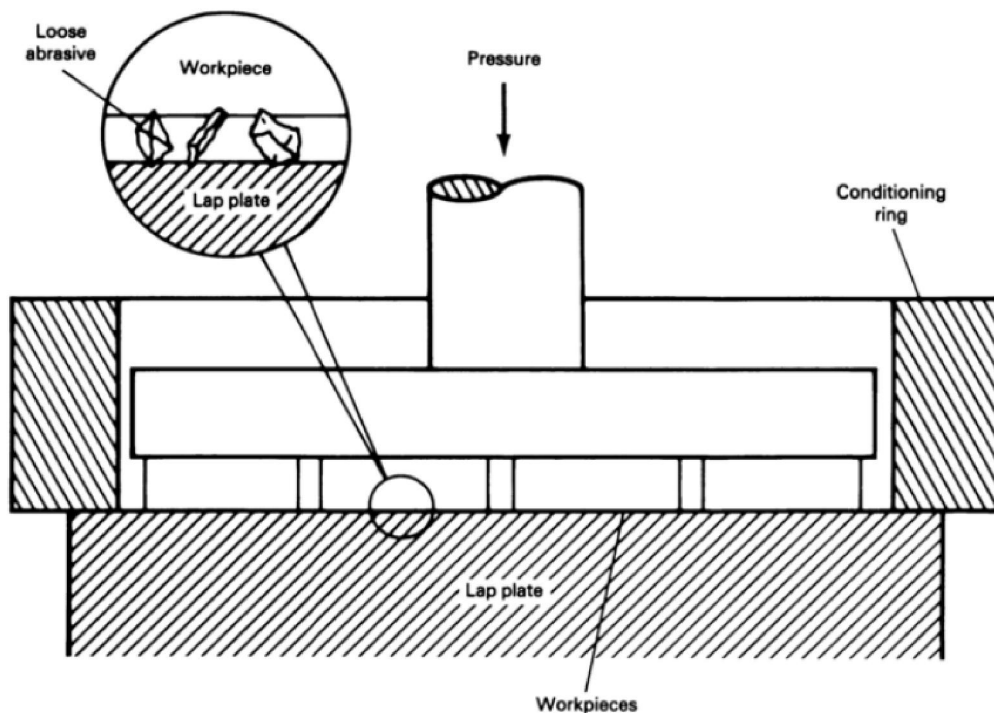


Figura 3.26. Rappresentazione di una lappatrice single-sided.

Se la fetta è mantenuta tra due piastre parallele rotanti e lo slurry lambisce entrambe le facce, il processo è chiamato lappatura double-sided. Questo secondo metodo offre diversi vantaggi rispetto al primo, tra cui [26]:

- Si possono lavorare le due facce nello stesso tempo che la macchina impiegherebbe per fare un solo lato.
- È possibile produrre contemporaneamente un grande numero di pezzi.
- È la migliore tecnologia disponibile per ottenere strette tolleranze di planarità, parallelismo e dimensione.
- La rimozione di materiale da entrambi i lati del wafer aiuta a diminuire le tensioni interne del pezzo, facilitando così il raggiungimento della planarità.
- Non essendoci la necessità di bloccare o tenere rigidamente ferma la fetta, perché essa è mantenuta tra le due piastre rotanti, vengono eliminate le tensioni nel pezzo e quindi si migliorano le tolleranze di planarità, parallelismo e dimensione.
- Il pezzo è esposto a minimo stress e danni superficiali, perché la lappatura non genera calore.

- Il tasso di taglio è uniforme. Non c'è diminuzione dell'abrasivo, perché nuovo slurry è costantemente immesso nella zona di lappatura durante il ciclo di lavorazione.
- I costi operativi sono spesso inferiori a causa della minore gestione e della maggiore efficienza della macchina.

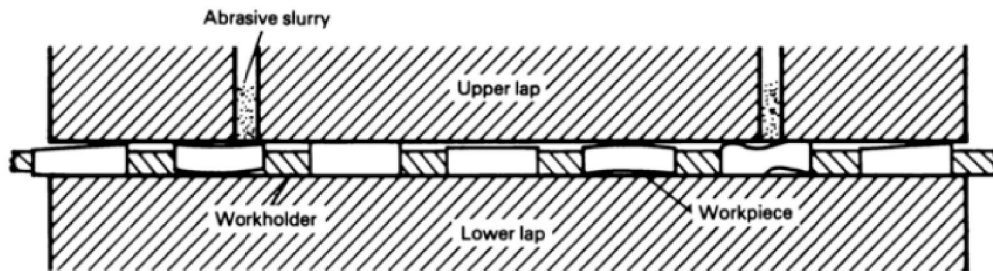


Figura 3.27. Errori di parallelismo e planarità, correggibili da lappatrice double-sided.

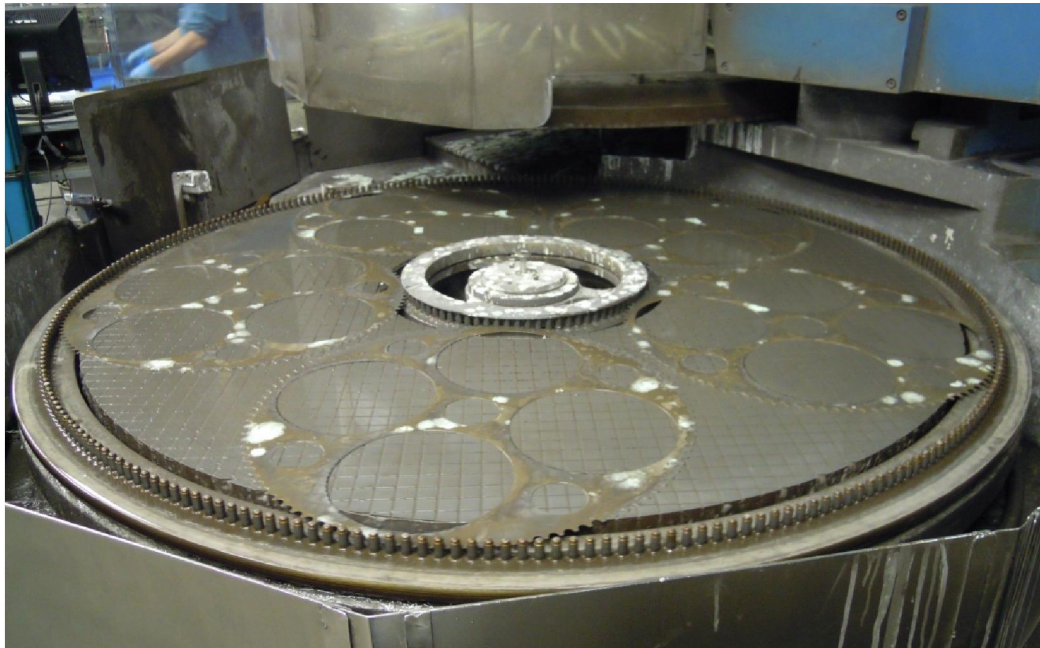


Figura 3.28. Lappatrice.

3.5 Attacco Chimico

Per rimuovere i danni meccanici presenti sulla superficie di una fetta di silicio, si può effettuare la rimozione di uno strato di materiale, mediante l'uso di opportune soluzioni chimiche. Le soluzioni possono essere classificate in due gruppi: sistemi anisotropi e isotropi. Un sistema è anisotropo quando l'attacco al materiale non avanza in tutte le direzioni, ma la quantità di materiale rimosso dipende dall'orientamento del substrato. Si può facilmente intuire che un processo anisotropo in generale è di più difficile controllo.

Volendo sintetizzare il processo di rimozione del materiale, si può suddividere l'attacco chimico in cinque passaggi [27].

- 1) La specie chimica diffonde in una soluzione, nei pressi della superficie sopra la quale avverrà l'attacco chimico.
- 2) La superficie assorbe la specie chimica.
- 3) Avviene la reazione tra gli atomi della superficie attaccata e la specie attaccante.
- 4) Il prodotto della reazione di attacco viene rilasciato dalla superficie.
- 5) Il prodotto della reazione di attacco diffonde all'interno della soluzione.

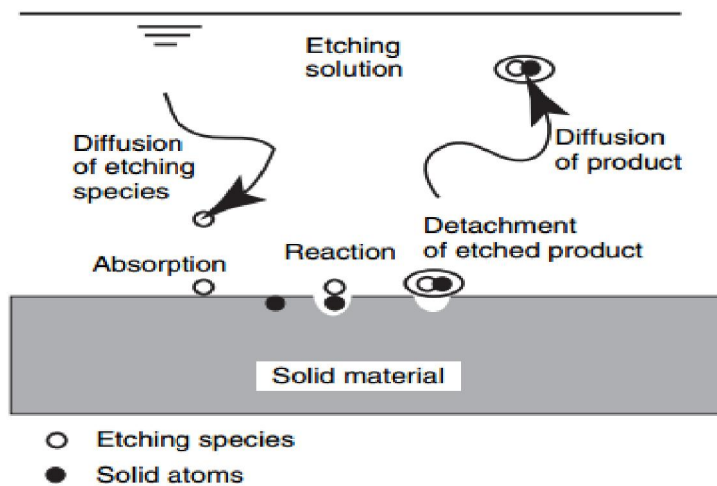


Figura 3.29. Serie dei processi che avvengono durante l'attacco chimico.

La rimozione tramite attacco chimico può essere compiuta grazie all'utilizzo di una soluzione acida o tramite una basica. Il sistema con attacco acido si basa soprattutto su un sistema di acido nitrico (HNO_3) e acido fluoridrico (HF) in soluzione acquosa o acido acetico (CH_3COOH). In una prima fase il silicio viene ossidato a SiO_2 , tramite HNO_3 , per poi essere rimosso da HF mentre l'acido acetico serve a regolare le reazioni. Questa successione di reazioni restituisce una superficie liscia e lucida. Per mantenere la sottrazione di materiale uniforme, un punto fondamentale è il controllo della temperatura. Infatti, essendo una reazione esotermica, il calore che si genera provoca un aumento della velocità di reazione, causando così una reazione che si auto alimenta e dunque incontrollabile. L'acido acetico serve a controllare la reazione esotermica [28].

L'attacco caustico utilizza soluzioni alcaline, come l'idrossido di potassio (KOH). La soluzione caustica offre una rimozione di materiale uniforme, ma produce una superficie maggiormente ruvida rispetto all'attacco acido, perché la reazione dipende dall'orientamento cristallografico [29].

3.6 Clean Room

Uno dei primi problemi che hanno afflitto la produzione di wafers, è stata la contaminazione. Per cercare di risolvere questo problema l'industria ha iniziato ad utilizzare la tecnologia delle camere bianche, nate per essere adoperate nell'industria spaziale. Tuttavia, queste tecniche si sono dimostrate inadeguate per produzione su larga scala di chip. La tecnologia delle camere bianche ha dovuto tenere il passo con la progettazione di chip. La capacità di crescita del settore infatti deve tenere il passo con i nuovi problemi di contaminazione che si presentano ogni volta che compare una nuova generazione di chip. I problemi che possono essere ritenuti piccoli per una generazione, possono essere gravi difetti per una nuova.

I contaminanti possono affliggere il processo di produzione e i dispositivi, principalmente in tre modi differenti [30].

- 1) Resa del processo di fabbricazione di dispositivi. La contaminazione può cambiare le dimensioni di alcune parti del dispositivo, modificare la pulizia delle superfici o causare strati della superficie che presentano fori. Nell'ambito del processo di fabbricazione sono svolti controlli di qualità e verifiche, che sono state progettate specificatamente per trovare wafers contaminati. I difetti causati dalla contaminazione contribuiscono

al rifiuto dei wafers nel processo di fabbricazione, riducendone così la resa complessiva.

- 2) Prestazioni del dispositivo. Un problema più grave è legato a contaminanti di piccole dimensioni che possono sfuggire ai controlli di qualità o a prodotti chimici indesiderati che durante le fasi del processo possono alterare le dimensioni dei dispositivi o la qualità del materiale. Tutto ciò può modificare in modo significativo le prestazioni elettriche dei dispositivi.
- 3) Affidabilità del dispositivo. Questo è il problema più grave che si possa presentare. Piccole quantità di contaminanti metallici possono diffondere nel wafer durante la lavorazione e non essere rilevate durante i normali test svolti sul materiale. Tuttavia questi contaminanti possono spostarsi all'interno del dispositivo e finire in zone elettricamente sensibili, causandone il guasto.



Figura 3.30. Clean Room del gruppo.

Una Clean Room è un ambiente caratterizzato da una contaminazione ambientale controllata. Quest'ultima è una condizione indispensabile per la produzione di wafers con caratteristiche qualitative che soddisfino i requisiti richiesti dal mercato e dipende dai ricambi d'aria al minuto, dall'efficienza di filtrazione, dalla tipologia di vestiario utilizzato, dalle caratteristiche delle macchine installate e dal comportamento del personale. Gli ambienti a contaminazione controllata sono definiti con il nome "CLASSE" seguito da un numero che è correlato al quantitativo massimo di particelle di dimensioni maggiori di 0.1 μm ammesso in un metro cubo di aria.

3.7 CVD: Chemical Vapor Deposition

La deposizione chimica da vapore è un processo di formazione di un film sottile sopra un substrato solido tramite una reazione di prodotti chimici in fase vapore, che contengono gli elementi necessari. Varie forme di energie, tra cui quella chimica e quella termica, possono concorrere all'attivazione della reazione per la formazione dello strato. Le proprietà del film sono determinate principalmente dalla specie reattiva, dalla temperatura del substrato e dal substrato stesso. C'è la possibilità di un'ampia gamma di possibili strati, tra cui il silicio policristallino e l'ossido di silicio. La scelta della composizione, nell'industria dei dispositivi semiconduttori, è basata solitamente su criteri che portano a soddisfare esigenze di integrazione e di costi. Riducendo sempre più le dimensioni e costruendo dispositivi con maggiori funzionalità, i requisiti di partenza sono sempre più stringenti, in particolar modo se ci si riferisce a requisiti di purezza da parte dei wafers [31]. L'ambiente all'interno dei reattori in cui avvengono le reazioni di CVD è controllato, in modo tale da avere una corretta distribuzione del vapore da depositare. Inoltre per migliorarne le prestazioni spesso sono incorporate funzioni di pulizia con specifici gas così da minimizzare il rischio d'introduzione di inquinanti.

3.7.1 Principali Reazioni

Le principali reazioni che possono avvenire durante una deposizione sono principalmente cinque.

Pirolisi o decomposizione termica.

Questa è di gran lunga la reazione più comune. Consiste in una decomposizione termica delle specie gassose sopra un substrato ad alta temperatura. Una tra le più comuni reazioni è la pirolisi del silano:



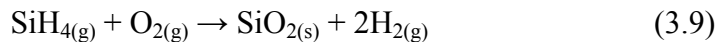
Riduzione.

Le reazioni di riduzione che più spesso avvengono, coinvolgono alogenuri che reagiscono con l'idrogeno presente in camera. Una frequente reazione è la riduzione del tetracloruro silano:



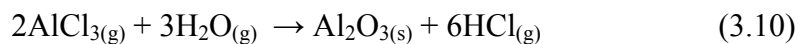
Ossidazione.

L'ossidazione comporta la formazione di ossidi tra i quali uno dei più comuni è il biossido di silicio:



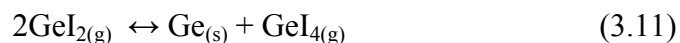
Idrolisi.

Queste reazioni sono impiegate tipicamente con i composti del cloro e di un metallo, per rimuovere il cloro. Nei prodotti di reazione sarà presente l'acido cloridrico.



Disproporzionamento.

Questa reazione si presenta quando un composto non volatile può formarne uno volatile con diversi livelli di stabilità al variare della temperatura.



3.7.2 Principali Caratteristiche

L'energia tipicamente usata nel CVD tradizionale, per far avvenire le reazioni chimiche, è quella termica. Si può distinguere ulteriormente questa tipologia di deposizione, in base alle pressioni che vi sono nel reattore. Se la pressione è atmosferica, allora avremo un APCVD (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition), mentre se la pressione è subatmosferica, allora il processo sarà denominato LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition). La bassa pressione del processo LPCVD favorisce la diffusione e ne aumenta il trasferimento di massa rispetto alla velocità di reazione superficiale. La deposizione a bassa pressione garantisce una maggior copertura e uniformità del film e minor difetti.

Un'altra classificazione possibile può essere effettuata basandosi sulle pareti dei reattori. In un reattore con le pareti fredde, il materiale sopra il quale viene fatta la deposizione è collocato sopra un suscettore. Il suscettore è un materiale utilizzato per la sua capacità di assorbire onde elettromagnetiche e trasformarle in calore. Questo è l'unica parte che è riscaldata e le pareti sono solitamente raffreddate con acqua. Si avranno quindi deposizioni ridotte sulle pareti, comportando così una quantità di lavaggi modesta, ridotti carichi termici, grande prontezza nel riscaldamento e raffreddamento del forno. Per contro si avrà una distribuzione di temperatura non omogenea che comporta una variazione dello spessore del film depositato, il forno sarà in grado di elaborare minori quantità di materiale per ciclo, possibili stress termici causati dalla non uniformità dello strato depositato e dai rapidi riscaldamenti e raffreddamenti del reattore. Questi forni sono solitamente scelti quando le reazioni di deposizioni sono endotermiche, perché favorite da superfici più calde. Nei reattori a pareti calde, gli elementi riscaldanti sono all'interno delle pareti stesse. Solitamente questi forni hanno una forma tubolare con le resistenze elettriche che circondano il tubo. Si possono avere temperature diverse nelle varie sezioni del tubo, ottenendo così il gradiente di temperatura voluto. Il maggior vantaggio è la capacità di elaborare grandi superfici o molti campioni contemporaneamente, riuscendo ad avere una buona produttività. Il principale svantaggio risiede nel fatto che la deposizione avviene ovunque, anche sulle pareti del tubo, dando

luogo a problemi di formazione di particolato e perciò necessitando di lavaggi frequenti. Inoltre le pareti sono sottoposte ad un forte carico termico e per raggiungere le temperature necessarie a far avvenire le reazioni, i consumi saranno elevati. Questa tipologia di reattore è utilizzata nella maggior parte dei sistemi a bassa pressione e nel caso in cui le reazioni di deposizione siano esotermiche [32].

3.7.3 Principali Tipologie di Deposizione

Nell'industria per la produzione di wafers alcuni tra i processi maggiormente usati sono:

- 1) LPCVD
- 2) Deposizione Epitassiale (di cui si parlerà più avanti)

Per quanto riguarda la Deposizione a Bassa Pressione possiamo analizzare in breve due casi particolari che sono la deposizione di polisilicio e la deposizione di ossido di silicio.

3.7.3.1 Deposizione di Polisilicio

Per questa operazione si possono utilizzare reattori a pareti calde della tipologia a forno orizzontale o verticale e reattori a pareti fredde che elaborano un singolo wafer.

I gas utilizzati per questo tipo di reazione sono diversi, tra cui SiH_4 e SiHCl_3 . Un esempio di reazione tipica è quella dell'eq. (3.7), nella quale SiH_4 funge da fonte di Si, mentre H_2 è il gas vettore.

Durante la reazione si può ottenere anche polisilicio drogato usando gas quali PH_3 , AsH_3 o altri, insieme ai reagenti. Le concentrazioni del drogante dipendono da diversi fattori tra cui il flusso di gas reagente.

Il silicio policristallino depositato sul retro della fetta si comporta bene come un gettering estrinseco grazie alla sua capacità di generare difetti d'impilamento (stacking fault) e dislocazioni nel retro del wafer. Inoltre si è osservato che il polisilicio depositato sul retro della fetta possiede una maggiore precipitazione di ossigeno, aumentandone così l'efficienza del gettering [33].

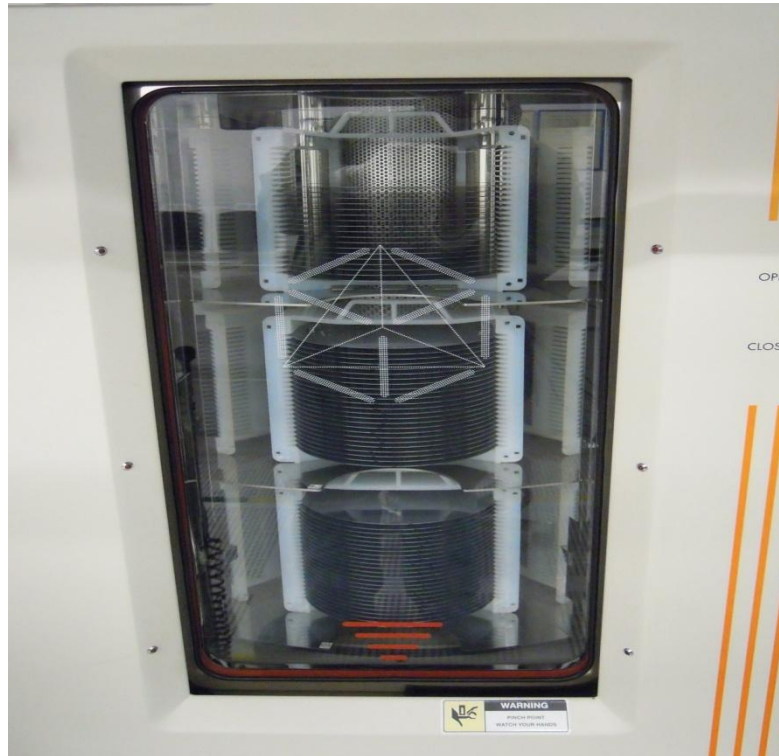


Figura 3.31. Forno per la deposizione di polisilicio.

3.7.3.2 Deposizione Ossido di Silicio (SiO_2)

L'ossido di silicio è un materiale dielettrico. La giunzione tra uno strato dielettrico depositato sopra ad un materiale semiconduttore, insieme ad altre proprietà tipiche dell'ossido di silicio, fa sì che comunemente si deponga questo strato di materiale. Si possono identificare tre pregi [34]:

- 1) Lo strato di ossido ha un ruolo importante per quanto riguarda la protezione dei dispositivi dalla contaminazione. L'ossido di silicio offre una protezione fisica della superficie superiore e della struttura sottostante il dispositivo. La durezza dello strato protegge la superficie del wafer dai graffi e permette di resistere alle lavorazioni successive. Inoltre SiO_2 fornisce una protezione chimica. Infatti nonostante i processi di pulizia, alcuni contaminanti possono depositarsi sopra o dentro la superficie. Questi finiscono nel nuovo strato di ossido, lontano dalla zona elettricamente attiva. Altri contaminanti sono trascinati

all'interno del film di ossido, dove risultano essere meno dannosi al dispositivo.

- 2) L'ossido di silicio depositato sopra la superficie funge da barriera per il drogante. Infatti questo diffonde molto lentamente se comparato con il silicio, permettendo di raggiungere i livelli richiesti. Oltre a non permettere al drogante di penetrare nello strato di silicio durante successive lavorazioni, evita che il drogante fuoriesca dal retro della fetta. L'ossido di silicio poi ha un coefficiente di dilatazione termica molto simile a quello del silicio, così da non provocare deformazioni durante le lavorazioni di tipo termico.
- 3) L'ossido di silicio è un dielettrico, perciò non conduce elettricità in condizioni normali e dunque nei dispositivi o circuiti elettrici è un isolante. Il compito dell'ossido di silicio è quello di prevenire un cortocircuito con altri dispositivi.

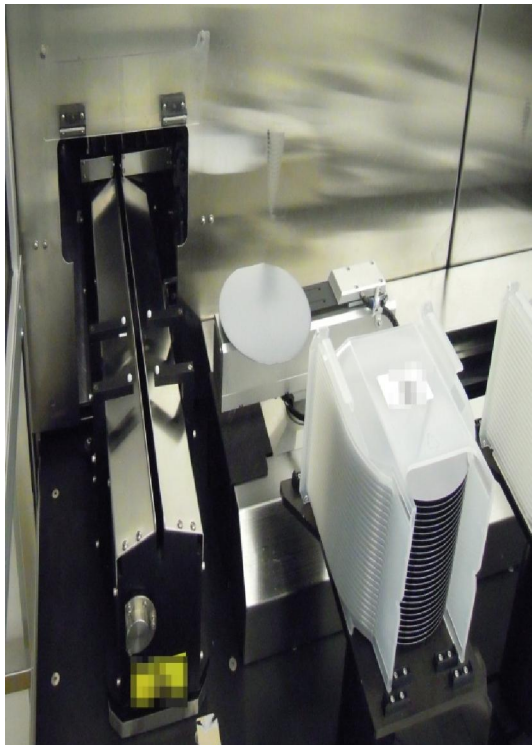


Figura 3.32. Prima della deposizione LTO

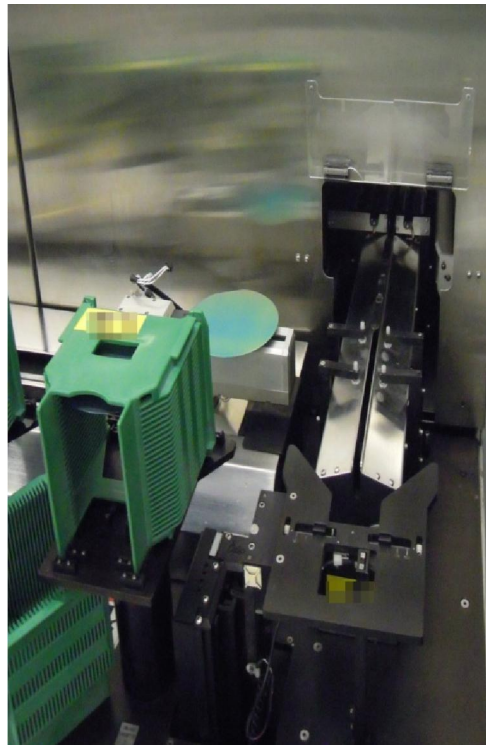


Figura 3.33. Dopo la deposizione LTO

3.8 Magic Denuded Zone® (MDZ®) e Annealing

Il processo denominato RTP, Trattamento Termico Rapido (Rapid Thermal Process) è una tra le tecnologie chiave dei circuiti integrati avanzati. La tecnologia degli RTP è completamente differente dai forni convenzionali. Un esempio tipico di questo processo utilizza fonti di energia radiante, come per esempio delle lampade, per riscaldare ad alta temperatura un wafer per tempi inferiori al minuto. Si prevede che in futuro sarà di utilizzo sempre più frequente. Già nell'ultimo decennio, il Rapid Thermal Process è passato da essere una tecnologia in applicazioni di nicchia ad essere la tecnologia dominante per quanto riguarda la fabbricazione dei circuiti integrati. Più ragioni hanno portato a questo cambiamento, ma principalmente se ne possono identificare due. La prima motivazione è una sempre maggior necessità di limitare la diffusione dei droganti durante i trattamenti termici. Per far ciò bisogna diminuire il bilancio termico (thermal budget). Il thermal budget è un termine che definisce l'ammontare totale dell'energia termica trasferita al wafer durante le operazioni ad alta temperatura. Questo è proporzionale alla temperatura e alla durata del processo. Inoltre per ridurre i difetti al minimo e formare strati di silicio ad alta qualità c'è bisogno di elevate temperature. Molto spesso un processo RTP risolve questi problemi, consentendo di avere un processo ad alta temperatura per poco tempo. Un secondo motivo è stato il miglioramento raggiunto nel campo del controllo della temperatura di processo, necessario nella fabbricazione di dispositivi avanzati [35].

Il Magic Denuded Zone®, brevettato da MEMC, è un RTP nel quale la precipitazione dell'ossigeno è controllata dalla manipolazione delle vacanze. MDZ® produce un wafer con un comportamento ideale di precipitazione dell'ossigeno, un gettering interno che è quasi indipendente dalla concentrazione iniziale di ossigeno e dagli effetti della storia termica di crescita dei cristalli.



Figura 3.34. Reattore per il processo MDZ.

L'ossigeno all'interno del silicio tende a precipitare quando la concentrazione supera il suo limite di solubilità, in seguito ad un trattamento termico. Generalmente si può considerare la precipitazione di ossigeno una cosa benefica, per la sua funzione di gettering d'impurità, in particolar modo metalliche [36]. Lo scopo del gettering è quello di ridurre le impurità eliminandole dal wafer, spostandole da una zona elettricamente attiva, che solitamente è quella superficiale, ad una non attiva o facendole legare ad altri composti, per ottenere degli elementi non nocivi al funzionamento di un futuro dispositivo. Si può definire Denuded Zone (zona denudata), quella regione del substrato del wafer priva di difetti e di contaminazioni, grazie ad un'azione di gettering. Proprio perché questa zona è stata decontaminata, i dispositivi saranno costruiti su questo strato. Il gettering è definito intrinseco quando sono sfruttati elementi presenti nella fetta, senza ausilio di esterni, con lo scopo di eliminare contaminanti. Si definisce gettering estrinseco quando il wafer è esposto ad interazioni con l'esterno, tali da portare i difetti nel retro della fetta [37]. Tuttavia la precipitazione di ossigeno in una maniera non controllata può provocare degli effetti negativi. Per esempio, una precipitazione veloce può portare ad una configurazione dove i precipitati e i difetti di impilamento saranno in grado di intersecare la superficie lucidata del wafer. A causa di questi problemi, nel processo successivo di crescita epitassiale, si genererà su tali superfici una sola struttura con difetti cristallografici.

Dopo il processo MDZ®, per poter stabilizzare la zona denudata, i wafers sono posti in un forno orizzontale, riscaldato da delle resistenze. Questo processo è detto genericamente Annealing.



Figura 3.35. Forno per il processo di Annealing.

3.9 Lucidatura

L'evoluzione della microelettronica moderna, che prevede la realizzazione su ogni wafer di strutture di dimensioni estremamente ridotte, richiede superfici perfettamente planari e pulite.

La lucidatura ha avuto origine con l'avvento del taglio di wafers da una barra di silicio monocristallino. Il processo di lucidatura è stato implementato principalmente per rimuovere gli strati superficiali danneggiati, creati durante il processo di taglio, per raggiungere così uno specificato spessore del wafer ed

infine per ottenere una planarità superficiale sia della faccia anteriore che di quella posteriore. Il danno provocato dall'azione di taglio si estende per diversi micron attraverso il wafer di silicio, e quindi il processo di lucidatura dovrà essere rapido per mantenere una grande produttività, ma allo stesso tempo ottenere una superficie planare. Per ottenere un'ottima planarità superficiale e un'elevata produttività, inizialmente veniva scartata una considerevole parte di materiale [38]. Tale specularità si ottiene sottoponendo ciascun wafer alla fase di lucidatura, operazione meccanico-chimica.

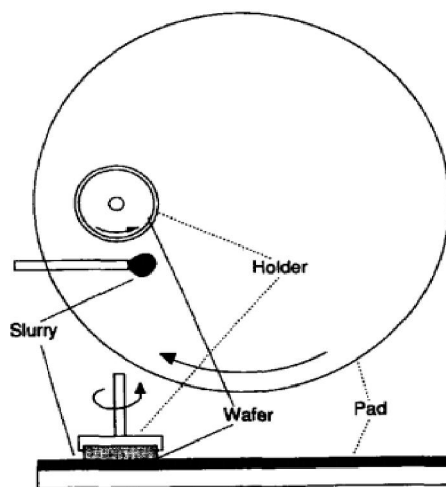


Figura 3.36. Schema della tecnica di lucidatura (vista dall'alto e di fronte).

I wafers sono montati su appositi supporti rotanti, sui quali si abbassa un particolare panno, il quale gira in direzione opposta ai wafers. I panni sono sufficientemente morbidi, sono imbevuti di soluzioni di abrasivo di dimensione ridottissima e permettono la rimozione controllata di pochi micron, producendo una superficie perfettamente piana e speculare. La dimensione delle particelle dell'abrasivo in letteratura è attestata tra i 100 Å e i 3 µm [39]. Lo slurry è composto da silice in una soluzione responsabile dell'attacco chimico, come l'idrossido di potassio (KOH) o di ammonio (NH₄OH). La soluzione alcalina forma sopra la superficie un sottile strato di biossido di silicio, che viene però rimosso dall'azione continua del panno. Per poter conseguire una grande planarità, bisogna avere sotto controllo diversi parametri, tra i quali il tempo di lucidatura, la pressione tra il panno e il wafer, la velocità di rotazione, la dimensione delle particelle dello slurry, il tasso di abrasione e il pH dello slurry ed infine le condizioni del materiale del panno [40]. Seppure la lucidatura venga

utilizzata per rimuovere i danni superficiali e ottenere delle superfici lucide, questa riduce la planarità del wafer ottenuta mediante lappatura. È quindi essenziale ottimizzare i parametri operativi in modo da minimizzare il tempo di lucidatura e la degradazione di planarità. Un modo per aumentare la planarità è stato quello di passare da una lucidatura single-sided, eseguita solo sul fronte della fetta, ad una double-sided, in altre parole sul fronte e il retro della fetta.

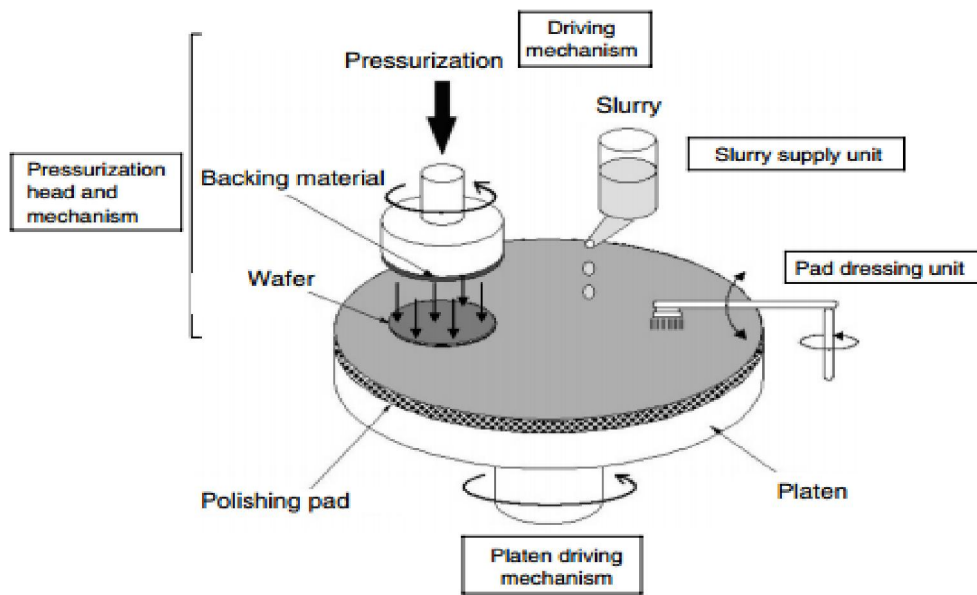


Figura 3.37. Rappresentazione di una lucidatrice single-sided.

Questo tipo di lucidatura ha mostrato che si possono raggiungere migliori valori di TTV, TIR e flatness. Questo approccio sta diventando uno standard per la produzione di wafer di grande diametro [41].

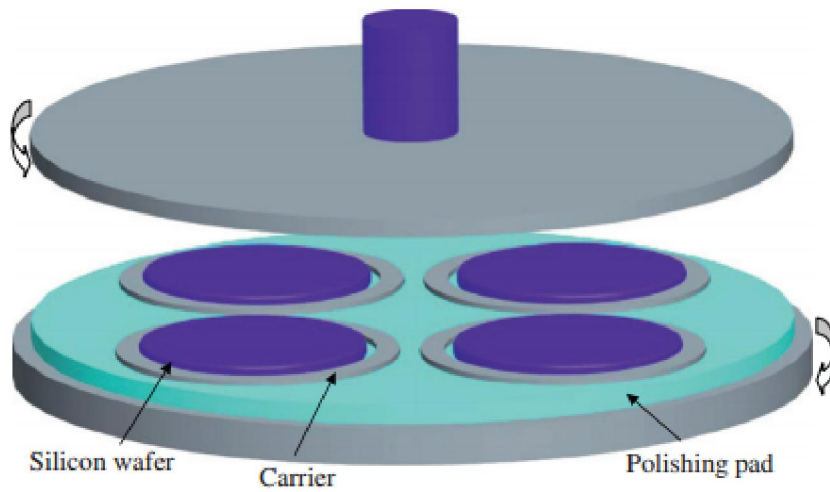


Figura 3.38. Rappresentazione di una lucidatrice double-sided.

La macchina, come prima operazione, incolla le fette su dei satelliti che avranno il compito di far ruotare la fetta e mantenerla vincolata. Tutto ciò avviene tramite un procedimento automatico, cosicché non ci possa essere contaminazione da parte degli operatori. In un secondo momento i wafers sono movimentati su dei nastri trasportatori e raggiungono le tre tavole rotanti che si occupano delle operazioni di lucidatura. Queste lavorazioni sono suddivise in prelucidatura, lucidatura intermedia e lucidatura finale. Le fette dopo quest'operazione dovranno essere esenti da difetti superficiali. La lucidatura infatti è l'ultima lavorazione in grado di modificare la morfologia e di conseguenza i parametri meccanici della fetta.



Figura 3.39. Stazione per la lucidatura.

3.10 Cleaning

Negli anni '50 è stata riconosciuta l'importanza di avere superfici sufficientemente pulite per la fabbricazione di dispositivi per la microelettronica su wafer di silicio. Le richieste da parte dei clienti sono diventate sempre più stringenti con il passare del tempo, per far sì che si potesse migliorare l'affidabilità ed incrementare le prestazioni dei dispositivi. Infatti è riconosciuto che più del 50% delle perdite di rendimento dei circuiti integrati in fase di fabbricazione è attribuibile a micro contaminazioni [42]. Anche la più piccola particella può portare all'interruzione di un circuito e quindi al suo non funzionamento. In particolare i metalli pesanti possono influenzare la conduzione superficiale, portare a difetti strutturali degli strati epitassiali e minare la stabilità del dispositivo elettrico. Le particelle sono in grado di causare corto circuiti se adiacenti a linee conduttive o bloccare processi come per esempio quello di fotolitografia su silicio. Il rischio è infatti che particelle diffondano all'interno del wafer durante i trattamenti ad alta temperatura come

la crescita epitassiale, ma anche con trattamenti a temperatura inferiore come la deposizione chimica da vapore [43].

3.10.1 Contaminanti

In generale un processo di pulizia (o una serie di processi, specialmente nella fase finale della catena produttiva) deve rimuovere tutte le forme di contaminazione, non danneggiare la superficie del wafer, essere sicuro ed economico per l'ambiente produttivo ed ecologicamente accettabile. Generalmente sono quattro le contaminazioni tipiche che colpiscono le superfici delle fette [44]. Ogni tipologia identifica un problema diverso e quindi è rimossa da processi diversi. Questi contaminanti sono:

- 1) Particolato
- 2) Residui Organici e Residui Inorganici
- 3) Strati di Ossido Indesiderati

3.10.1.1 Particolato

Il particolato presente sul fronte della fetta varia da particelle di grande dimensione, nell'intorno di 50 μm , a particelle molto più piccole, anche minori di 1 μm . Le particelle più grandi possono essere rimosse grazie a bagni chimici e risciacqui, mentre quelle più piccole sono più difficili da eliminare a causa di alcune forze che le trattengono. Una tra queste è la forza di van der Waals, la quale consiste in una forte interazione tra gli elettroni di un atomo e i nuclei di un altro. Una tecnica per minimizzare l'attrazione elettrostatica consiste nella manipolazione del potenziale zeta. Si può riuscire a far sì che le particelle abbiano la stessa carica della superficie del wafer, così da essere respinte e restare nella soluzione liquida. Altro problema si riscontra con la forza capillare, la quale si presenta quando c'è la presenza di un fluido ponte tra la particella e la superficie. Questa forza può essere superiore a quella di van der Waals. Tramite supporti meccanici, come la produzione di megasuoni, si possono rimuovere queste particelle.

3.10.1.2 Residui Organici e Residui Inorganici

Si parla di residui organici quanto nel contaminante è presente il carbonio. Un esempio su tutti è la contaminazione provocata dalle impronte digitali. Si possono rimuovere i residui tramite solventi quali alcool o acetone. Se possibile si cerca di evitare l'utilizzo di questi solventi, perché contengono alcune impurità che possono essere loro stesse una fonte di contaminazione. Si parla invece di residui inorganici quando i contaminanti non presentano carbonio nella loro composizione. Tipicamente si tratta di residui di acidi provenienti da precedenti trattamenti.

Verso la metà degli anni '60 fu sviluppato da Werner Kern, ingegnere della società RCA, Radio Corporation of America, un valido processo costituito da due fasi per rimuovere i residui organici e inorganici dalle fette di silicio, che per la sua efficacia fu semplicemente conosciuto con il nome di RCA clean. Quando si parla di RCA clean, si indica un lavaggio in cui si utilizza una sostanza acida o basica, insieme al perossido di idrogeno (H_2O_2 , acqua ossigenata). Il primo step, Standard Clean 1 (SC-1), consiste in un lavaggio con una soluzione di acqua, perossido di idrogeno e idrossido di ammonio (NH_4OH), ad una temperatura compresa tra 75 e 85°C. Il primo step permette di rimuovere i residui organici e mette le basi per la successiva fase di desorbimento dei contaminanti metallici presenti sulle superfici della fetta. Durante questo passaggio si forma e si dissolve un film di ossido sul wafer. La seconda fase, Standard Clean 2 (SC-2), è eseguita in una soluzione di acqua, perossido di azoto e acido cloridrico, anch'essa ad una temperatura mantenuta tra 75 e 85°C. Questa soluzione è in grado di rimuovere i residui metallici, gli idrossidi e gli ioni alcalini ed inoltre lascia sulla superficie uno strato protettivo di ossido. Secondo le esigenze, c'è la possibilità di invertire le fasi 1 e 2 e ripeterle più volte. Ancora oggi è uno dei processi più utilizzati, pur inserendo delle varianti per seguire i nuovi standard di purezza richiesta.

3.10.1.3 Strati di Ossido Indesiderati

Dopo alcuni processi, come la deposizione chimica da vapore di ossido di silicio o il lavaggio RCA, un requisito necessario per le successive lavorazioni è la rimozione parziale o totale dello strato di ossido di silicio presente sulle superfici del wafer. Inoltre essendo il silicio generalmente molto reattivo con l'ossigeno, quando è a contatto con quello presente nell'aria, si forma uno strato di ossido sopra le superfici. Anche in questo caso deve essere rimosso. L'acido fluoridrico (HF) è l'acido che assolve meglio questo compito, in quanto è in grado di incidere l'ossido, senza intaccare il silicio. La concentrazione di acido fluoridrico in acqua dipenderà semplicemente dalla quantità di ossido che dovrà essere asportata.

3.10.2 Miglioramento delle Tecniche di Lavaggio: Onde Sonore

Una tecnica che comporta il miglioramento del risciacquo e della decontaminazione dei wafers è l'aggiunta all'interno delle vasche di sistemi che generano onde sonore, i quali possono aumentare l'efficienza di pulizia. Le onde sonore sono generate da trasduttori posti al di fuori dei serbatoi. Sono utilizzati due diversi campi di frequenza: tra 20 e 50 kHz si parla di ultrasuoni, mentre nell'intorno degli 850 kHz sono detti megasuoni. Gli ultrasuoni tramite la cavitazione aiutano il lavaggio, poiché le onde, passando nel liquido, generano bolle microscopiche che si formano e collassano velocemente, così da riuscire a rimuovere le particelle. I megasuoni invece offrono un meccanismo differente. In fluidodinamica esiste uno strato statico o con lenti movimenti nei pressi della superficie. Le particelle più piccole possono essere trattenute in questo film, non venendo così esposte alla pulizia tramite gli agenti chimici. L'energia dei megasuoni riduce questo strato, esponendo così le particelle all'azione dei composti chimici. Inoltre un fenomeno chiamato flusso acustico (acoustic streaming) favorisce un aumento della velocità delle soluzioni chimiche e del risciacquo, incrementando così l'efficienza del lavaggio.



Figura 3.40. Esempio di una macchina per il lavaggio.

3.11 Epitassia (Epi)

In generale si incontrano diversi svantaggi nella fabbricazione di circuiti e dispositivi semiconduttori sopra un wafer. Questo è dovuto a fattori come la qualità del cristallo, la variazione e il controllo di drogante all'interno della fetta. A causa di questi elementi la fabbricazione di dispositivi ad elevate prestazioni è limitata. Per far fronte a ciò, si è sviluppata una particolare tecnica di deposizione di uno strato di silicio, chiamato strato epitassiale. Se il film epitassiale è composto dallo stesso materiale del substrato, dunque silicio su silicio, si dice omo-epitassia. In caso contrario se il materiale dello strato epitassiale è differente, come per esempio può essere arseniuro di gallio (GaAs) su silicio, si parla etero-epitassia [45].

Il termine deriva dal Greco ed è composto dalla parola “epi”, che significa “sopra”, e “taxis”, che vuol dire “in modo ordinato”. Per i semiconduttori ci si riferisce alla struttura del film del singolo cristallo. Se i parametri del sistema sono impostati correttamente e se i reagenti chimici sono controllati, gli atomi

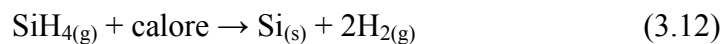
depositati giungono sulla superficie della fetta con un'energia tale da spostarsi sopra la superficie e disporsi nella stessa maniera degli atomi del cristallo, cioè con lo stesso orientamento.

3.11.1 Processo

Un rigoroso e completo lavaggio della superficie del wafer precede il processo di epitassia. All'interno della camera del reattore avvengono una serie di operazioni. Le prime fasi corrispondono ad una pulizia con dei gas. A questo segue un riscaldamento della camera alla temperatura di processo con la presenza in camera di un gas inerte per evitare contaminazioni. Raggiunta la temperatura necessaria, lo strato di materiale viene deposto, a cui segue una nuova pulizia e un ciclo di raffreddamento. In tutte le fasi il controllo dei flussi di gas e della temperatura è critico. Un grande vantaggio del processo di epitassia consiste nella possibilità di drogare in maniera precisa il materiale da depositare e di scegliere tipologie di droganti differenti.

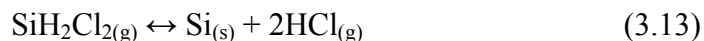
Il tetracloruro silano (SiCl_4) è uno tra i reagenti più comunemente usati per la deposizione come visto nell'eq. (3.8). Questa sostanza assicura una temperatura di reazione elevata, quindi un elevato tasso di crescita. La reazione è reversibile: in una direzione sono creati atomi di silicio, mentre nell'altra sono rimossi. Essendo reversibile, le due reazioni si oppongono. In un primo momento viene rimosso del silicio più esterno, preparando così la superficie alla deposizione. In un secondo momento, la reazione di deposizione è più veloce rispetto alla rimozione, così da riuscire a depositare il film.

Il secondo reagente usato nella maggior parte dei processi è il silano (SiH_4). Il silano non ha bisogno di altri gas per compiere la reazione di deposizione, ma ha bisogno di esser riscaldato affinché si decomponga in silicio.



La reazione avviene a temperature notevolmente inferiori rispetto alla prima, così da essere attrattiva da un punto di vista della qualità del film depositato, in quanto è possibile evitare diversi problemi causati dall'alta temperatura, come sarà spiegato successivamente. Nonostante questi pregi, il silano solitamente non è usato, perché la reazione avviene contemporaneamente in tutto il reattore, in maniera tale da creare una nube di polvere di silicio, fonte di contaminazione

dello stesso wafer. Infine un altro reagente che può essere utilizzato, soprattutto nella deposizione di film sottili, è il bicheloro silano (SiH_2Cl_2). Questo reagisce con temperature minori e quindi comporta meno difetti cristallini e legati alle alte temperature.



3.11.2 Problemi

La temperatura può essere considerata uno tra i maggiori fattori d'influenza del processo. Infatti la temperatura di deposizione influisce sulla velocità di crescita dello strato. Temperature maggiori comportano velocità maggiori di crescita. Il problema risiede nel fatto che velocità di crescita elevate comportano difetti cristallini e rotture del film epitassiato. Inoltre temperature troppo elevate causano problemi di autodoping e out-diffusion. Entrambi i problemi comportano una variazione di resistività e di conducibilità non desiderati.

L'autodoping consiste in una diffusione del drogante contenuto nel retro della fetta, all'interno della miscela di gas di processo, per poi essere depositato sopra il fronte della fetta.

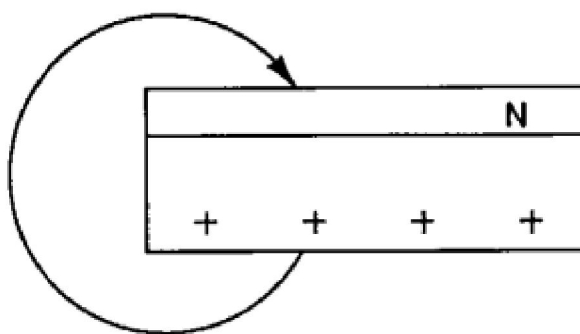


Figura 3.41. Principio dell'autodoping epitassiale.

L'out-diffusion è collocato all'interfaccia tra lo strato epitassiale e il wafer. Consiste in una diffusione di atomi di drogante da un materiale con livelli di drogante elevato ad uno con bassi livelli.

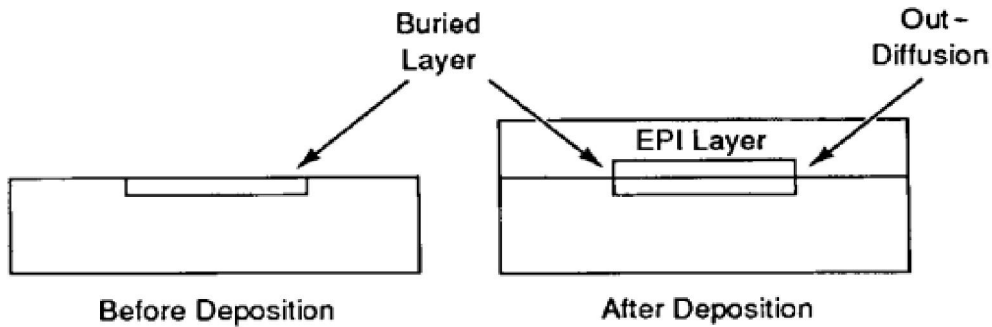


Figura 3.42. Principio di out-diffusion epitassiale.

Oltre a questi due problemi e a quelli tipici della contaminazione, possiamo riscontrarne altri che minano la qualità dello strato depositato. Uno di questi è denominato "haze". Si tratta di un problema riguardante la superficie, che varia da microscopiche a grandi interruzioni che sono osservabili come una superficie opaca. L'haze è causato dall'ossigeno residuo presente nei gas di processo o da rientrate d'aria nel sistema. Invece la presenza di contaminanti sulla superficie all'avvio della deposizione comporta una crescita accelerata conosciuta come spike, di altezza paragonabile allo spessore del film. Questi provocano fori e interruzioni nei trattamenti dei clienti. Possono verificarsi poi problemi legati al cristallo, come le dislocazioni, o complicazioni riguardanti la crescita, come lo slip cioè uno slittamento del cristallo lungo le interfacce piane.

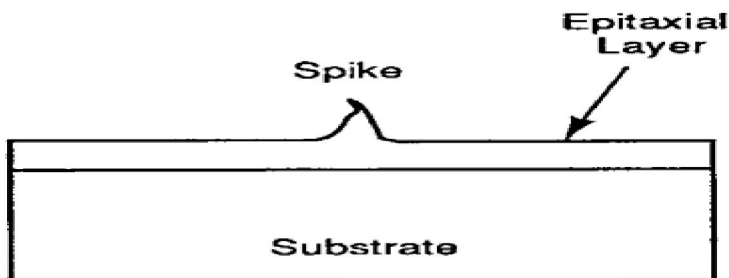


Figura 3.43. Rappresentazione schematica dello spike.

4 Mappa del processo

*Vivi come se dovessi morire domani.
Impara come se dovessi vivere per
sempre.*

Mahatma Gandhi

I lingotti di monocristallo, prodotti nello stabilimento di Merano o in altri del gruppo, subiscono nello stabilimento di Novara le lavorazioni necessarie per ottenere i wafers di silicio. La sequenza delle operazioni per ottenere delle fette aventi spessore inferiore al millimetro, pronte per essere vendute, è lunga e complessa ed è realizzata in base alle specifiche richieste dai clienti. Le specifiche analizzate seguono i due percorsi più lunghi ed *energy intensive* dello stabilimento. Per semplicità, nei Capitoli che seguiranno le due “ricette” saranno indicate con specifica A e specifica C. I tempi ciclo dei processi possono essere differenti in base alle specifiche, pur attraversando le medesime macchine. Nei paragrafi di seguito saranno mostrati questi passaggi e in *corsivo* sarà indicata la macchina responsabile del processo o l’operazione stessa.



Figura 4.1. Wafers di silicio da 200mm.

4.1 Reparto Taglio (Slicing)

La prima operazione che si svolge nel Reparto Taglio è quella di verificare l'*Orientamento Cristallografico* del lingotto. Fatto questo, si *incollano* le barre di monocristallo, opportunamente orientate, su apposite basi di resina e quindi su supporti metallici, affinché possano essere fissate nelle taglierine a filo. All'interno dello stabilimento si utilizzano due diversi processi per il taglio a filo. Avvenuto il *Taglio*, le fette sono poste in una soluzione di acqua e detergente per rimuovere l'abrasivo che le ricopre. Il componente è chiamato *Deoiler*. Per essere *scollate* dai supporti sono poste in acqua ad una temperatura di circa 80°C. Infine per togliere le impurità dovute a tutte le lavorazioni, le fette sono portate in una macchina di *Lavaggio post Taglio*, dove un braccio meccanico trasporta i cestelli in più vasche di soluzioni acide e basiche. Dopo l'asciugatura in una centrifuga, prima di inviare le fette nei successivi reparti, sono testati i *parametri meccanici* e la resistività, per controllare se i wafers sono conformi alle specifiche. Per rendere le fette meccanicamente più robuste e atte a sopportare senza danno le lavorazioni successive, i wafers subiscono un processo, detto *Edge Grinding*, mediante particolari mole, nel quale viene smussata e rettificata la circonferenza. Un'unica macchina compie l'operazione di arrotondamento del bordo e il successivo risciacquo. Si svolge quindi una *Bow Orientation*, operazione necessaria per collocare le fette in modo tale che il Bow assuma la posizione più vantaggiosa per le operazioni a valle del Reparto di Taglio. Bisognerà far sì che la parte concava sia quella del fronte della fetta, mentre quella convessa la parte del retro. Grazie ad alcune operazioni successive, come quella di deposizione di uno strato di silicio policristallino, si riuscirà a rendere la fetta maggiormente piana. Infatti, nel caso della deposizione del policristallo, la struttura disordinata è in grado di "tirare" la fetta e deformarla nella direzione d'interesse per rendere il wafer maggiormente piano. Altre operazioni che sorbiscono lo stesso effetto sono la deposizione di ossidi e la crescita di strati epitassiali. L'orientamento in direzione sbagliata tende ad aumentare la deformazione, con il rischio di superare i limiti richiesti dal cliente. Ultima operazione che compete al Reparto di Taglio è quella della *Laseratura*, in altre parole l'incisione laser di un codice che identifica le caratteristiche del prodotto.

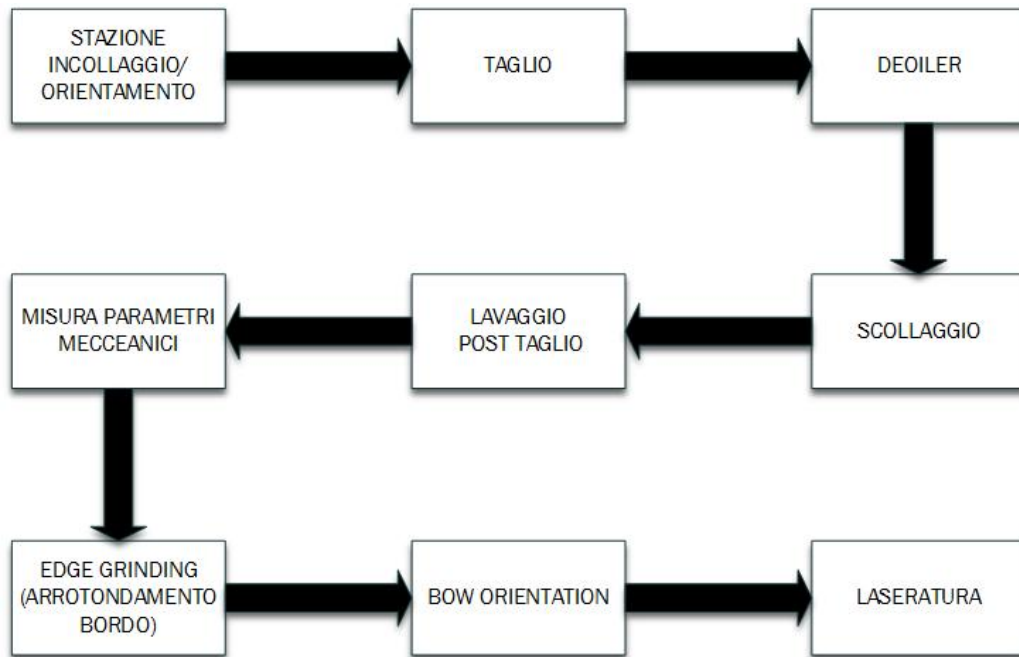


Figura 4.2. Schema Reparto Taglio.

4.2 Reparto Lappatura

4.2.1 Lappatura e Attacco Chimico

I wafers dopo aver subito le prime lavorazioni, dovranno essere trattati in modo tale da ricavare una superficie la più possibile piana ed esente da difetti. Il primo trattamento cui andranno incontro sarà la *Lappatura*. Le fette così lavorate affronteranno un *Lavaggio post Lappatura* con lo scopo di eliminare i residui di lavorazione e prepararle per l'operazione di *Attacco Chimico*. Il lavaggio è effettuato tramite una successione di bagni acidi e caustici. I processi di Attacco Chimico post lappatura hanno lo scopo di rimuovere il danneggiamento residuo sulla fetta di silicio causato dalle lavorazioni meccaniche precedenti. Ciò avviene trattando le fette in soluzioni chimiche molto potenti che possono essere di natura Acida oppure Caustica. La lavorazione avviene in macchine completamente automatiche in cui la miscela chimica assottiglia i wafers

rimuovendo lo strato danneggiato, lasciando superfici perfettamente piane e parallele. Prima e dopo il processo si fanno delle misurazioni sui parametri meccanici per verificare che l'Attacco Chimico abbia avuto successo. I rilevamenti dei consumi di queste macchine sono stati trascurati, perché non significativi essendo le fette campionate per i test dell'ordine di 1 su 75. Si è ritenuto ragionevolmente trascurabile il loro apporto. Le specifiche da noi considerate si dividono in questo punto della catena produttiva, per poi tornare a seguire il medesimo flusso di materiale nel tratto finale del reparto. La specifica A sarà quella che seguirà il percorso Acido, mentre la C seguirà il percorso Caustico.

4.2.2 Trattamento Termico

Durante la fase di crescita del cristallo molti atomi di ossigeno, provenienti dal crogiolo di quarzo, penetrano nella struttura cristallina del silicio. Tale ossigeno, raggruppato in microagglomerati, deve diffondere e disporsi in posizione interstiziale. Questi agglomerati, infatti, contribuiscono a modificare la resistività tra la periferia e il centro del cristallo. L'operazione avviene in forni o reattori riscaldati tramite resistenze elettriche, sottoponendo i wafers a Trattamenti Termici. Per evitare ulteriori contaminazioni, la lavorazione si compie in una Clean Room. La Clean Room utilizzata per i trattamenti termici è di tipologia Class 2, corrispondente a 100 particelle/m³.

4.2.2.1 Specifica con Attacco Acido

Prima di trattare termicamente si esegue un *lavaggio* delle fette. Il trattamento termico usato in questo percorso è la Chemical Vapor Deposition (CVD), che consiste in una deposizione di materiale contenuto in un gas, sopra la fetta. In particolare è *deposto uno strato di silicio policristallino (poly)*. Lo strato serve come *gettering*, cioè agisce come mezzo che assorbe e trattiene la maggior parte delle impurezze metalliche che possono essere presenti nel silicio. Potenzialmente si vorrebbe che la deposizione avvenisse solo sul retro della

fetta. Quest'operazione non è però tecnologicamente praticabile, quindi lo strato che è stato depositato sopra il fronte sarà rimosso durante la fase di Lucidatura. Il reattore opera ad una temperatura di circa 800 °C e sottovuoto. A questa, segue una deposizione di uno strato di ossido di silicio deposto a bassa temperatura detto LTO, Low Temperature Oxide. La *deposizione di LTO* sul retro del wafer serve come sigillante nel corso delle lavorazioni successive. L'azione sigillante si manifesta nei confronti del drogante per evitare che questo fuoriesca dalla fetta. La deposizione conferisce un caratteristico colore in base allo spessore depositato. Il reattore opera ad una temperatura di 400 °C circa e a pressione ambiente. Finiti i trattamenti termici, bisogna rimuovere una parte dello strato deposto LTO, localizzata sul bordo del retro della fetta. La presenza di ossido sul bordo fetta genera, infatti, problemi nella successiva lavorazione di crescita Epitassiale. Un'altra difficoltà risiede nell'incremento del valore dei parametri meccanici da associarsi ad una deposizione anomala in prossimità del bordo. Per questo motivo si esegue l'operazione di *Edge Stripping*. Tale lavorazione consiste in una serie di quattro fasi su quattro macchine diverse: Taping, in cui la macchina incolla una pellicola protettiva sulla fetta mantenendo libera la zona del bordo con LTO da rimuovere; Stripping, la fetta è immersa in una vasca di HF il quale reagisce e asporta l'ossido; Detaping, in cui la macchina rimuove la pellicola protettiva; Risciacquo, in cui sono immerse le fette in una Cappetta di lavaggio per rimuovere i residui di colla. Per conferire una maggiore resistenza meccanica e ridurre l'effetto di una possibile sorgente di contaminazione particellare dovuta ad un bordo con elevata rugosità, viene eseguita un'operazione di *Bordo Lucido*. Le fette sono successivamente inserite in un'*Asciugatrice post Bordo Lucido*, perché risciacquate nella macchina che esegue l'operazione di Bordo Lucido. Infatti non possono essere trattate con un lavaggio completo, come invece sarebbe preferibile, in quanto lo strato di LTO sarebbe asportato dall'acido fluoridrico presente in alcune vasche delle macchine di lavaggio. Le fette prima di passare al reparto successivo sono prima ispezionate da una macchina, detta *IR Tool*, che è in grado di rilevare Air Pocket, in altre parole sacche d'aria sia di superficie che di Bulk, presenti sulle fette. I wafers sono sottoposti ad un'*Ispezione Visiva*, in cui gli operatori svolgono un lavoro di controllo per verificare se il prodotto in uscita è conforme alla qualità richiesta dal cliente. Infine vengono testati i *parametri meccanici* e di resistività dei wafers.

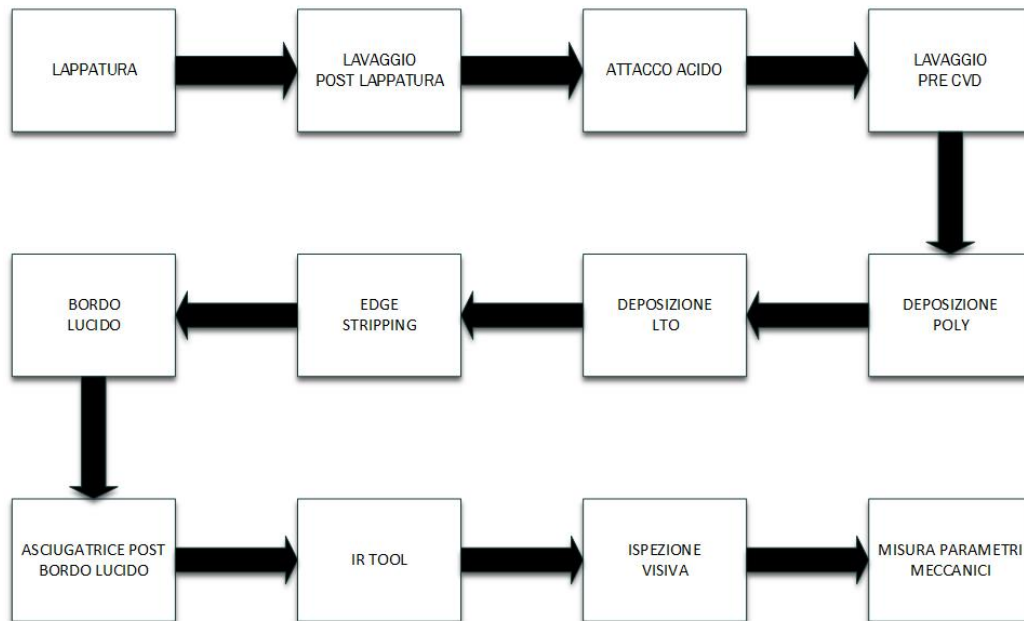


Figura 4.3. Schema Reparto Lappatura con specifica A.

4.2.2.2 Specifica con Attacco Caustico

Per ripulire la superficie delle fette da eventuali contaminazioni si procede eseguendo un *Lavaggio pre MDZ* prima di passare a trattare termicamente il wafer. Il wafer viene prima posto in un reattore *MDZ*, nel quale si riesce a creare una zona denudata. Le fette così trattate sono poste in un reattore per *Annealing*. Finiti i trattamenti termici, le fette subiscono un *lavaggio* completo. La lavorazione che segue è quella di *Back Buffing*, in altre parole un'operazione di lucidatura preliminare. Scopo del processo è quello di migliorare la qualità superficiale e di planarità del retro delle fette provenienti dall'operazione di Attacco Chimico e Termico. Quest'operazione ha diverse analogie con il processo di lucidatura finale, ma i due processi differiscono principalmente tra di loro per gli asporti di materiale implementati. Finita l'operazione, si *lavano* le fette per rimuovere le impurità dovute alla lavorazione. Si procede eseguendo una lavorazione di *Bordo Lucido*, simile a quella eseguita nel percorso Acido. Infine si procede con una nuova sequenza di *lavaggio*. Rispetto alla specifica A, questa successione di tre lavaggi accurati può essere fatta senza problemi,

perché non è stato depresso uno strato LTO. I wafers ora sono pronti per affrontare i test per la verifica della presenza di Air Pocket nell'*IR Tool*, per l'*Ispezione Visiva* e infine per i test dei *parametri meccanici* e di resistività, come avvenuto per la specifica A.

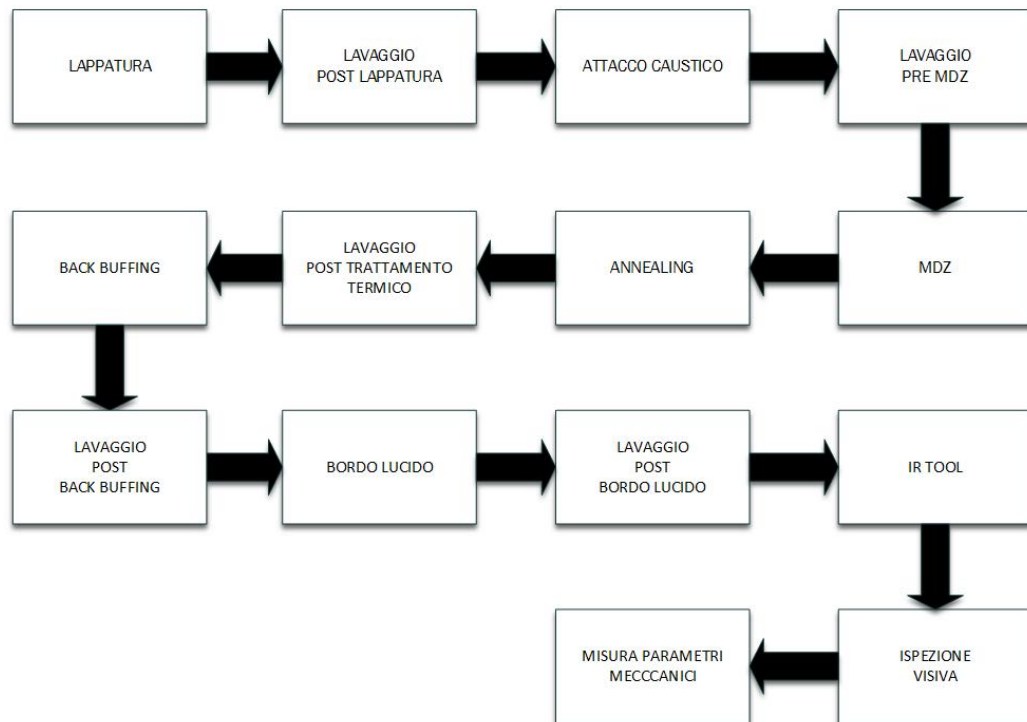


Figura 4.4. Schema Reparto Lappatura con specifica C.

4.3 Reparto Lucidatura

Le fette in arrivo dal Reparto Lappatura dovranno essere trattate in modo tale da essere rese il più possibile lucide ed esenti da difetti. Il Reparto Lucidatura è una Clean Room di tipologia Class 3 (1000 particelle/m³). Le fette prima di esser lucidate sono lavate in una *Cappetta*, per pulire i wafers in arrivo dalle ultime operazioni subite, prima dell'incollaggio delle fette per la Lucidatura. Affrontano poi la *Lucidatura* in una macchina completamente automatica.



Figura 4.5. Schema Reparto Lucidatura.

4.4 Reparto Cleaning

Dopo la lucidatura, che generalmente interessa una sola delle due facce di ciascun wafer, gli stessi sono sottoposti ad una complessa fase di lavaggio in una sequenza di vasche contenenti diverse soluzioni chimiche (H₂O₂, NH₄OH, HF, H₂SO₄, Ozono, Detergente, ecc) e H₂O Deionizzata. La potenza chimica delle soluzioni viene accentuata da trasduttori inseriti in ciascuna vasca che generano ultrasuoni o megasuoni. Per raggiungere lo scopo di ridurre la contaminazione superficiale organica, particellare e metallica si svolgono delle immersioni sequenziali in diverse vasche contenenti le soluzioni chimiche (vasche di processo) ed in vasche di risciacquo. Il lavaggio è svolto in due macchine uniche nel loro genere, che sono le macchine di *Lavaggio PPC* e *Lavaggio SFC*. La linea di lavaggio è dotata di dispositivi automatici atti a ridurre al minimo l'intervento manuale per eliminare qualsiasi rischio per chi opera sulla macchina e per il materiale in lavorazione. Alla fine di tale sequenza, ciascun wafer sarà decontaminato in maniera tale da rispettare gli standard stabiliti. Ogni wafer verrà controllato in modo completamente automatico da macchine *Ispezionatrici a Laser*, in grado di intercettare eventuali fette che presentano difetti di qualsiasi tipo o dimensione. Lo strumento utilizzato per l'ispezione, consente di valutare la contaminazione particellare della superficie delle fette di silicio lucidate. Lo strumento si pone come mezzo sostitutivo dell'ispezione visiva manuale. Le fette dovranno avere un grado di pulizia sufficiente alle specifiche, altrimenti se recuperabili verranno processate nuovamente. Per ridurre al minimo la contaminazione, l'ambiente è una Clean Room di Classe 1, con una contaminazione massima di 10 particelle/m³. Per

movimentare i wafers nel reparto successivo, le fette dovranno essere isolate dal resto dell'ambiente. Poste in apposite scatole decontaminate verranno dunque *confezionate* tramite una macchina per la saldatura a vuoto.



Figura 4.6. Schema Reparto Cleaning.

4.5 Reparto Epitassia

Le fette dovranno qui affrontare il loro ultimo trattamento. Dopo aver affrontato la *deposizione epitassiale*, sono nuovamente analizzate tramite una macchina *Ispezionatrice a Laser* per controllare se sono conformi alle specifiche. Il reparto è una Clean Room Class 1. Sono poi *imbustate* e mandate nuovamente ad affrontare un nuovo *Lavaggio SFC* presente al Reparto Cleaning. I wafers subiscono l'ultimo controllo da parte di un'*Ispezionatrice a Laser*, per poi esser *confezionati* ed esser pronti per la vendita al cliente.

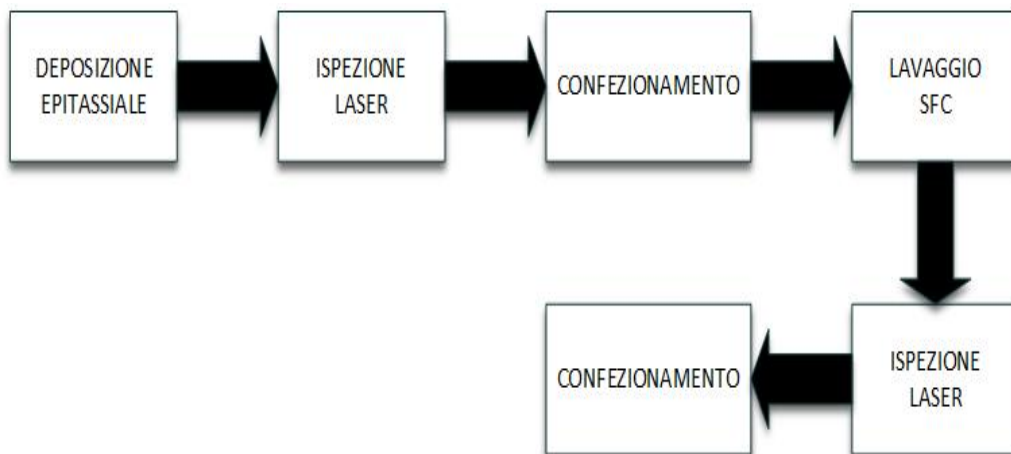


Figura 4.7. Schema Reparto Epitassia.

5 Obiettivi e metodologia del lavoro

*Qualunque cosa sogni d'intraprendere,
cominciala. L'audacia ha del genio, del
potere, della magia.*

Johann Wolfgang von Goethe

Lo scopo del lavoro è stato quello di compiere la mappatura di dettaglio dei consumi energetici del flusso produttivo dello stabilimento di Novara, nell'ottica della successiva applicazione dei concetti della Value Stream Map ai consumi energetici di stabilimento, per individuare le cause principali di spreco dei consumi e segnalarle al personale tecnico competente ai fini della loro possibile eliminazione. Il lavoro compiuto è risultato essere una serie di sei attività, alcune svolte in successione e altre in sovrapposizione. Di seguito si espone la realizzazione del lavoro.

5.1 Ambiente lavorativo

Nella prima parte del lavoro è stato svolto uno studio della realtà lavorativa. Frutto di questo studio sono, infatti, i Capitoli 3 e 4. Assistito da personale tecnico competente, ho seguito la linea produttiva, riuscendo a fare una mappatura dei percorsi svolti dalle due specifiche assegnatemi. Questo è servito a meglio capire quali macchinari erano più degni di attenzione e a poter svolgere adeguatamente il mio compito. Infatti conoscere i processi, singolarmente e nel loro complesso, permette di affrontare in maniera migliore il lavoro di ricerca degli sprechi, perché diviene un'attività mirata. Non è stato possibile lavorare direttamente sull'ottimizzazione dei processi in termini di parametri operativi, perché questi sono già studiati e quindi ottimizzati all'interno dell'azienda. Si è potuto però agire in altre aree, come vedremo in seguito. Inoltre capire lo scopo e il lavoro dell'azienda, anche se magari tal volta in maniera non approfondita, perché *“richiederebbe una vita intera comprendere alcuni processi”*, a detta di alcuni ricercatori, permette di interfacciarsi meglio con il personale dei reparti e di fare un lavoro più efficace. Si è dimostrato anche importante cercare la collaborazione da parte sia degli operatori, che dei Process Engineer già

presenti, perché conoscendo l'ambiente lavorativo si sono dimostrati una fonte di conoscenza molto importante e stimolante.

5.2 Metodologia di raccolta dati e strumentazione

Questa fase del lavoro è stata fondamentale per la buona riuscita dell'indagine. Si sono infatti definite insieme al Tutor aziendale le modalità con cui affrontare l'analisi nello stabilimento.

Si possono principalmente usare due metodi per analizzare i consumi:

- 1) utilizzare i dati di targa rilasciati dai costruttori,
- 2) misurare direttamente i consumi energetici.

Siccome l'obiettivo del lavoro consisteva nel mappare energeticamente i processi produttivi dello stabilimento e individuare, se presenti, possibili cause di spreco, si è deciso di utilizzare la seconda metodologia.

Tutti i macchinari analizzati sono alimentati tramite corrente alternata. Seguendo dunque il fondamento dell'elettrotecnica, la potenza attiva per un carico monofase corrisponde a:

$$P = V * I * \cos(\varphi) \quad [W] = [V] * [A] \quad (5.1)$$

mentre per un carico trifase la potenza attiva corrisponde a:

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos(\varphi) \quad [W] = [V] * [A] \quad (5.2)$$

dove P è la potenza, V la tensione, I l'intensità di corrente e $\cos(\varphi)$ è il fattore di potenza che consiste nel rapporto tra la potenza attiva e la potenza apparente, che alimenta un carico elettrico. Per un carico lineare ha un valore considerato tra 0 e 1 e φ rappresenta l'angolo di sfasamento tra tensione e corrente in un sistema elettrico in corrente alternata.

Conoscendo i tempi ciclo, per ottenere il consumo elettrico delle lavorazioni, dalla teoria sappiamo che:

$$E = \frac{1}{3600} \int_0^t P dt \quad [Wh] \quad (5.3)$$

L'azienda ha un accordo con una centrale di trigenerazione costruita nei pressi dello stabilimento. Per i carichi monofase $\cos(\varphi)$ viene posto pari ad 1, perché si considera che il rifasamento avvenga a monte, mentre per i carichi trifase non è possibile considerare che le tre fasi siano rifasate. $\cos(\varphi)$ è stato posto per nostra scelta uguale a 0.9, come valore conservativo in quanto mediamente assume un valore più alto.

Tenendo a mente i principi sopra esposti, si è scelto innanzitutto di fare una prima divisione dei processi. Questa è risultata necessaria a catalogare le lavorazioni energivore dalle non energivore, scegliendo così due metodi di misurazione differenti.

- Per la categoria *non energy intensive*, è stato scelto di utilizzare una pinza amperometrica per misurare i valori istantanei massimi di corrente e tensione, in ottica conservativa. Nel caso di macchine trifase il valore assunto come effettivo per poter applicare la (5.2) è stato mediato aritmeticamente sulle tre fasi.
- Per la categoria *energy intensive* si è scelto di utilizzare un analizzatore di reti elettriche. Tale strumento, collegato al quadro elettrico della macchina, campiona una volta al minuto i valori di tensione e corrente. I dati registrati sono scaricati sul PC. Come prima operazione, si verifica che i dati raccolti siano significativi e non vi siano delle irregolarità non comprensibili. In questo caso ci si rivolge ai tecnici per ottenere spiegazioni. Se la misurazione ha avuto buon fine, vengono selezionate le serie di dati che si riferiscono al periodo in cui la macchina sta eseguendo il processo desiderato. Solitamente sono scelte più serie, per fare in modo di stabilizzare il risultato finale. Tramite un foglio di calcolo Excel è stata calcolata una media aritmetica dei valori istantanei di corrente e tensione delle fasi. Nel caso di carico monofase è stata applicata la (5.1), mentre nel caso di sistema trifase è stata eseguita un'ulteriore media tra le tre fasi per ottenere il valore effettivo di corrente e tensione, per poi utilizzare la (5.2). Per ogni lavorazione sono stati campionati più cicli, di cui alcuni hanno richiesto anche giorni. Di

seguito è riportato l'elenco dettagliato delle operazioni che annoverano macchinari assunti in questa categoria:

- 1) Taglio,
- 2) Lavaggio post Taglio,
- 3) Lappatura,
- 4) Lavaggio post Lappatura,
- 5) Attacco Acido,
- 6) Lavaggio pre CVD, Lavaggio pre MDZ,
- 7) Deposizione Poly,
- 8) Deposizione LTO,
- 9) Attacco Caustico,
- 10) MDZ,
- 11) Annealing,
- 12) Lavaggio post Trattamento Termico, Lavaggio post Back Buffing, Lavaggio post Bordo Lucido,
- 13) Back Buffing,
- 14) Lucidatura,
- 15) Lavaggio PPC,
- 16) Lavaggio SFC x2,
- 17) Deposizione Epitassiale,
- 18) Ispezione Laser.

Le operazioni n.6 e n.12 sono state raggruppate, poiché la macchina utilizzata per le operazioni, anche se considerate diverse da un punto di vista logico, è la stessa. Gli assorbimenti saranno dunque i medesimi. Nel caso delle operazioni n.6 i tempi ciclo sono differenti, quindi in termini di consumi energetici i risultati saranno diversi. L'operazione n.16 è stata affiancata per semplicità di forma con un "x2", perché come si è visto nel Capitolo 4, viene eseguita due volte, per precisione durante la fase di cleaning e dopo l'epitassia. Bisogna dire che la maggior parte dei processi non è influenzata dalla specifica. Alcune operazioni hanno tempi ciclo differenti tra una specifica e l'altra, ma gli assorbimenti di tensione e corrente sono i medesimi, perché sono macchine che difficilmente funzionano a potenza costante. Solitamente infatti hanno comportamenti ripetitivi che non dipendono dal tempo totale della lavorazione. Quest'osservazione è importante perché sia per i lavaggi, sia per la lappatura che per la lucidatura non c'è stato bisogno di rilevare gli assorbimenti di entrambe le specifiche, in quanto erano i medesimi.

I tempi di percorrenza e i lotti medi, in altre parole il numero di wafers presenti mediamente in un lotto, sono dei dati forniti dall'azienda. In alcuni casi è stato necessario cronometrare i processi per ottenere dati più accurati. In entrambe le categorie si ottiene un valore di Potenza media (P_{media}), la cui unità di misura da noi utilizzata sarà [kW]. Ora si può ricavare il consumo medio dell'operazione, moltiplicando P_{media} per il tempo ciclo t_{ciclo} :

$$E_{medio} = P_{media} * t_{ciclo} \quad [kJ] \quad (5.4)$$

$$E'_{medio} = \frac{1}{3,6} P_{media} * t_{ciclo} \quad [Wh] \quad (5.5)$$

Per ottenere poi il valore pesato sul singolo wafer, la cui unità di misura sarà simbolicamente [wfr], è bastato dividere i valori ottenuti dalla (5.4) e dalla (5.5) per le fette contenute in un lotto medio, così da avere il consumo specifico.

$$E_{spec} = \frac{E_{medio}}{n. wafers} \quad \left[\frac{kJ}{wfr} \right] \quad (5.6)$$

$$E'_{spec} = \frac{E'_{medio}}{n. wafers} \quad \left[\frac{Wh}{wfr} \right] \quad (5.7)$$

È stato dunque implementato un foglio di calcolo Excel che comprende i passaggi sopraccitati. Il foglio di calcolo presenta delle semplici funzioni *if* per agevolare l'operazione di inserimento. Infatti una volta inseriti i dati campionati, il foglio è in grado di restituire i risultati finali.

Tabella 5.1. Esempio di foglio Excel utilizzato.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P_{media}	t	n. wfr	E_{medio}	E_{spec}	E'_{medio}	E'_{spec}
2	Tsk1													
3	Tsk2													
													TOT	

Nella Tabella 5.1 viene mostrato un tipico foglio utilizzato. Con $L1$, $L2$ ed $L3$ sono indicate le tre fasi, rilevate come già esposto, e con unità di misura gli Ampere. Nel caso di sistema trifase ogni colonna avrà un dato, in caso di sistema monofase è inserito manualmente 0 nelle caselle di $L2$ ed $L3$. La casella I è la media delle fasi e la cella riporta al suo interno la seguente funzione:

$$= SE (E (C2=0;D2=0); B2; (B2+C2+D2)/3) \quad (5.8)$$

Dunque se i valori nelle celle corrispondenti a $L2$ ed $L3$ sono nulli, si prende il valore della cella corrispondente ad $L1$, altrimenti si valuta la media aritmetica. Con V si indica la tensione, con Volt come unità di misura. In questo caso non si è utilizzata una funzione come prima, ma i valori sono inseriti direttamente. Nella cella $TRIFASE$ è inserita la seguente funzione:

$$= SE (E (C2=0;D2=0); "no"; "si") \quad (5.9)$$

La cella identifica se la macchina analizzata funziona tramite un sistema trifase o monofase. P_{media} è espressa tramite la seguente funzione:

$$= SE (G2="si"; RADQ(3)*F2*E2*0,9/1000; F2*E2/1000) \quad (5.10)$$

identificando così dalla cella $TRIFASE$ l'operazione da seguire, secondo quanto descritto in (5.1) e (5.2). Nella cella t viene inserito manualmente il t_{ciclo} in secondi, mentre nella cella $n. wfr$ sono segnati il numero dei wafers per lotto medio. Per ottenere i risultati delle celle E_{medio} ed E_{spec} bisognerà fare rispettivamente:

$$= H2 * I2 \quad (5.11)$$

$$= K2 / J2 \quad (5.12)$$

Si potranno infine ottenere E'_{medio} ed E'_{spec} seguendo quanto visto nella (5.5) e nella (5.7).

5.3 Raccolta dati

Seguendo quanto esposto nel paragrafo 5.2, la raccolta dati è stata possibile grazie alla collaborazione in team con il Tutor aziendale e un elettricista esperto, che mi hanno potuto accompagnare durante le varie misurazioni. Come schema logico nelle misurazioni è stato deciso di seguire il flusso produttivo delle due specifiche.

Il lavoro di raccolta dati ha presentato delle criticità, tra cui le principali sono state:

- 1) improvvisi fermi macchina che non hanno permesso un buon esito della misurazione;
- 2) quadri elettrici non sempre posizionati in zone facilmente accessibili;
- 3) quadri elettrici vecchi che presentano discordanze tra il riferimento segnato sul quadro e ciò che è effettivamente alimentato, dunque è capitato di misurare le macchine sbagliate accorgendosi poi tramite la consulenza con i tecnici;
- 4) misurazioni in clean room, le quali presentano norme stringenti di accesso.

Nell'Appendice A è possibile vedere il foglio di calcolo con i risultati di tutte le misurazioni svolte.

5.4 Analisi dati

Raccolti i dati relativi ad un reparto, è stato possibile intraprendere l'analisi. Grazie all'utilizzo del diagramma di Pareto, sono state individuate le aree di intervento. Si sono dunque ottenuti nuovi dati, relativi alle macchine da confrontare. Seguendo la metodologia di calcolo adottato nel paragrafo 5.2, sono stati messi a confronto i consumi delle tipologie analizzate. Seguendo quanto espresso nel paragrafo 5.1, il confronto con Process Engineer e manutentori esperti, la cui conoscenza delle macchine e dei processi in alcuni casi supera i vent'anni, è stato nuovamente essenziale per poter comprendere il significato dei dati raccolti. È stato così possibile capire in maniera postuma dove era necessario intervenire per migliorare i consumi. Avendo poi i dati riguardanti la produzione di wafers annui e il costo medio dell'energia dell'anno 2012, in quanto il prezzo dell'energia varia, per contratto, bimestralmente seguendo

l'andamento del prezzo del gas, si sono potuti valutare i possibili risparmi in caso di efficientamento.

5.5 Ritorno all'azienda

Al termine dell'analisi è stato fornito all'azienda il materiale raccolto. È stata sviluppata una presentazione Power Point ad hoc per fare il rendiconto del lavoro e i risultati ottenuti, indicando i possibili interventi da svolgere e cosa bisognerebbe fare nel prossimo futuro.

5.6 Project Management

Attraverso un continuo processo di pianificazione e controllo, assistito dal Tutor aziendale e dal Tutor accademico, è stato possibile portare avanti il lavoro, assicurandosi di perseguire gli obiettivi preposti.

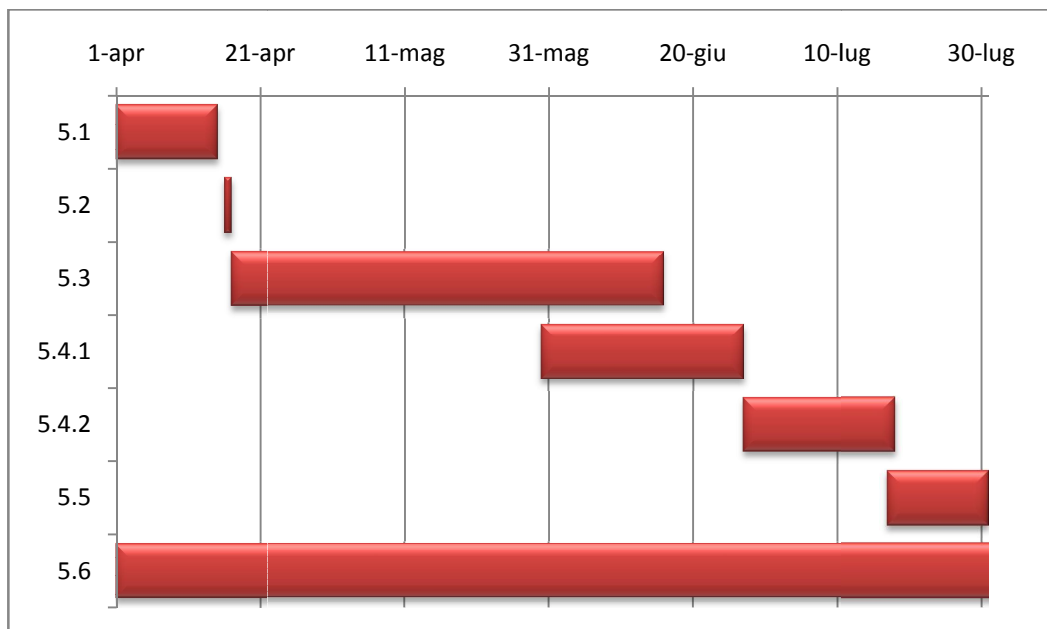


Figura 5.1. Diagramma di Gantt delle attività svolte.

6 Analisi dei dati

Il nostro guardare lontano è legato al nostro essere continuamente in cammino, alla ricerca, ma è anche guardare ogni tanto indietro per rivedere quale sentiero abbiamo seguito, se abbiamo lasciato le cose meglio di come le avevamo trovate. Dopo aver guardato indietro riguardare di nuovo lontano e accorgersi che si può guardare ancora più lontano.

Sir Robert Baden Powell

Nel Capitolo 5 sono stati esposti i passaggi svolti per portar a compimento il lavoro richiesto. In particolare nel paragrafo 5.4 ci si riferisce all'analisi svolta. Scopo di questo Capitolo sarà quello di approfondire l'indagine compiuta, mettendo in evidenza i risultati raggiunti.

6.1 Costruzione del diagramma di Pareto

Per individuare i problemi di maggior rilievo, e quindi le priorità d'intervento, si è scelto di utilizzare il diagramma di Pareto come metodologia decisionale. Avere chiare ed evidenti le priorità su cui intervenire, permette di focalizzare l'attenzione sugli interventi migliori. Essendo le operazioni da svolgere due nel Reparto Lucidatura, la costruzione del diagramma risulta superflua e dunque non sarà riportato.

Tabella 6.1. Legenda Reparto Taglio.

Taglio	WS	Lavaggio post Taglio	LAV TAGLIO
Laseratura	LASER	Edge Grinding	EG
Scollaggio	SCOL	Deoiler	DEOL
Bow Orientation	BO	Misura Parametri Meccanici	PARAM
Incollaggio/Orientamento	ORIEN		

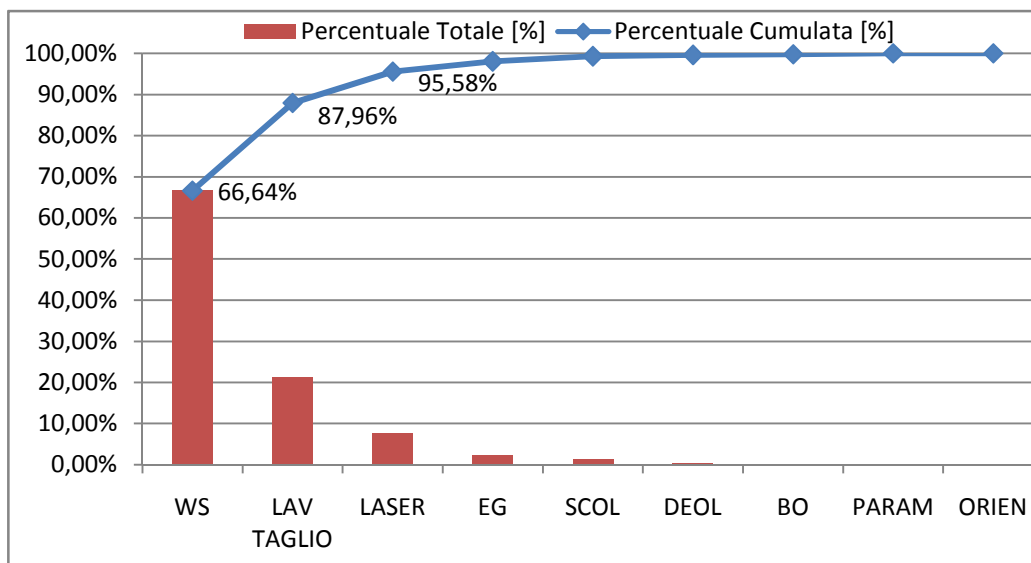


Figura 6.1. Diagramma di Pareto: Reparto Taglio specifica A.

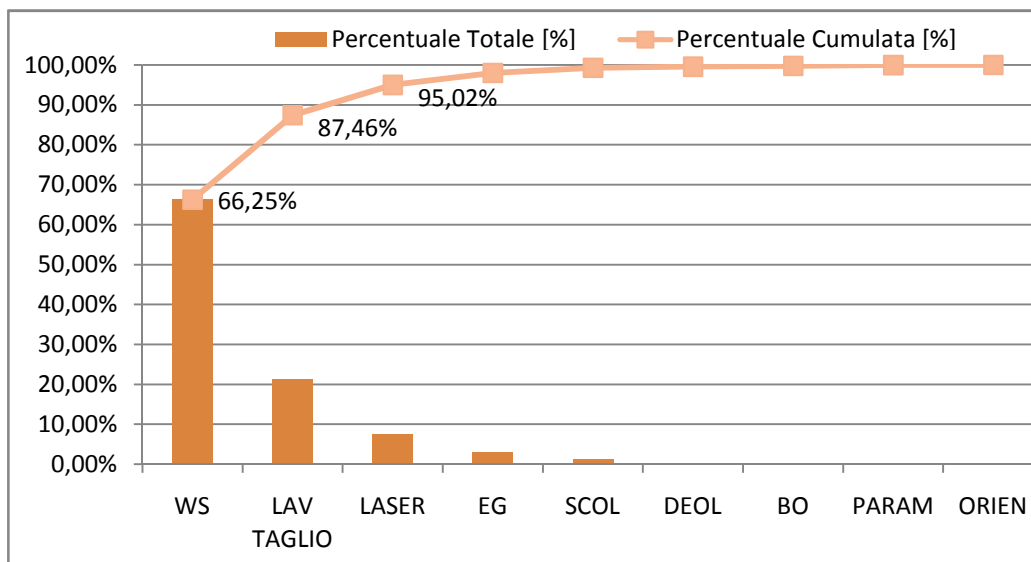


Figura 6.2. Diagramma di Pareto: Reparto Taglio specifica C.

Tabella 6.2. Legenda Reparto Lappatura specifica A.

Deposizione Poly	POLY	Lavaggio pre CVD	LAV CVD
Lavaggio post Lappatura	LpL	Deposizione LTO	LTO
Lappatura	LAP	Bordo Lucido	BL
Attacco Acido	ACID	Taping	TAP
Asciugatrice post Bordo Lucido	ASCIUGA	Misura Parametri Meccanici	PARAM
Risciacquo	RISCIAC	Detaping	DETAP
Stripping	STRIP	IR Tool	IR T
Ispezione Visiva	IV		

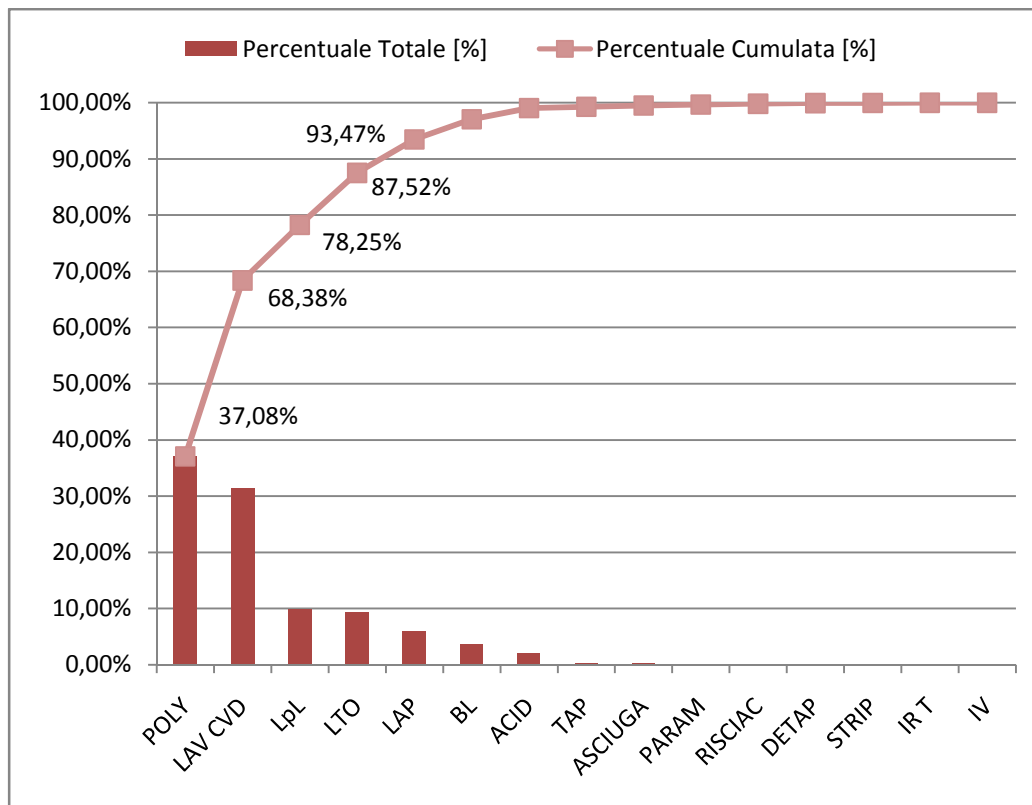


Figura 6.3. Diagramma di Pareto: Reparto Lappatura specifica A.

Tabella 6.3. Legenda Reparto Lappatura specifica C.

Annealing	ANNEAL	Lavaggio pre MDZ	LAV MDZ
Lavaggio x3*	LAV x3	Lavaggio post Lappatura	LpL
MDZ	MDZ	Lappatura	LAP
Bordo Lucido	BL	Back Buffing	BB
Attacco Caustico	CAUS	Misura Parametri Meccanici	PARAM
IR Tool	IR T	Ispezione Visiva	IV

*Nota: Lavaggio x3 indica le operazioni n.12 descritte nel paragrafo 5.2.

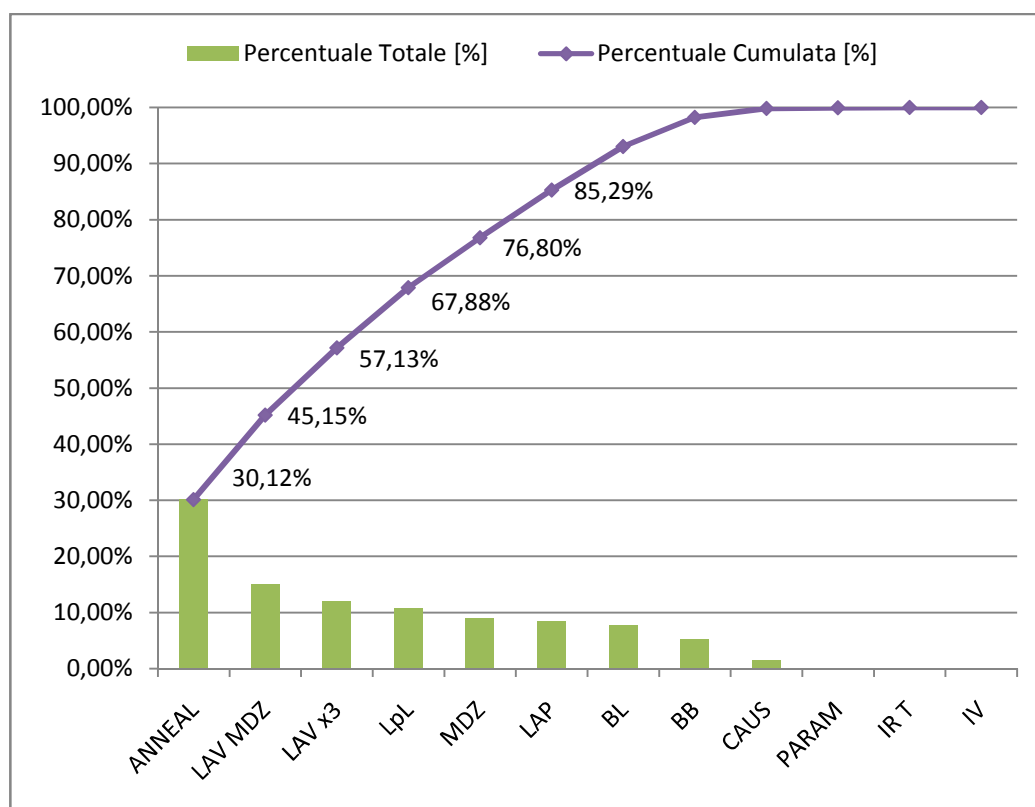


Figura 6.4. Diagramma di Pareto: Reparto Lappatura specifica C.

Tabella 6.4. Legenda Reparto Cleaning.

Lavaggio SFC Ispezione Laser	SFC Ispez	Lavaggio PPC Confezionamento	PPC Conf
---------------------------------	--------------	---------------------------------	-------------

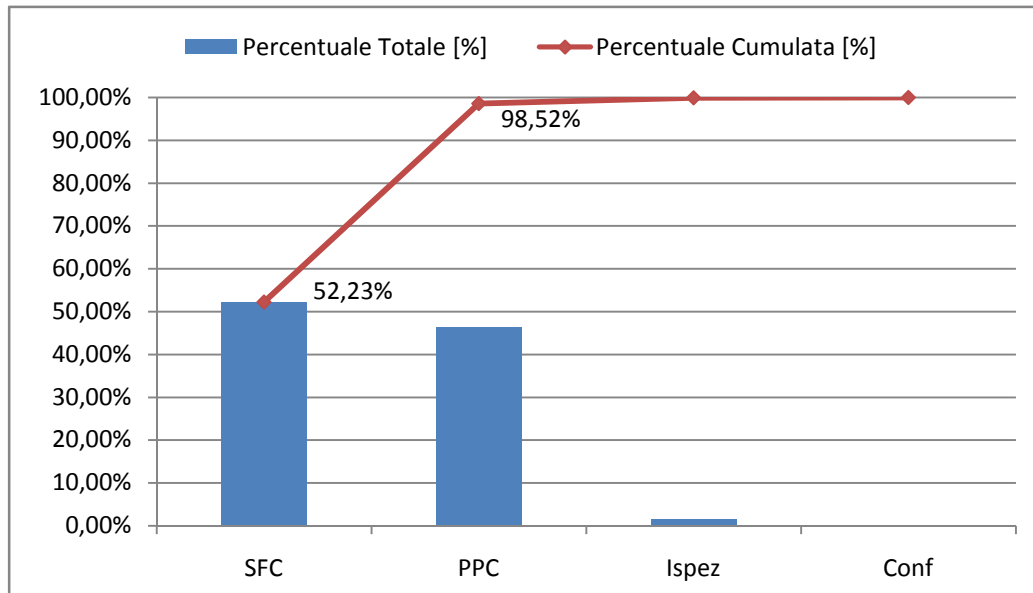


Figura 6.5. Diagramma di Pareto: Reparto Cleaning specifica A.

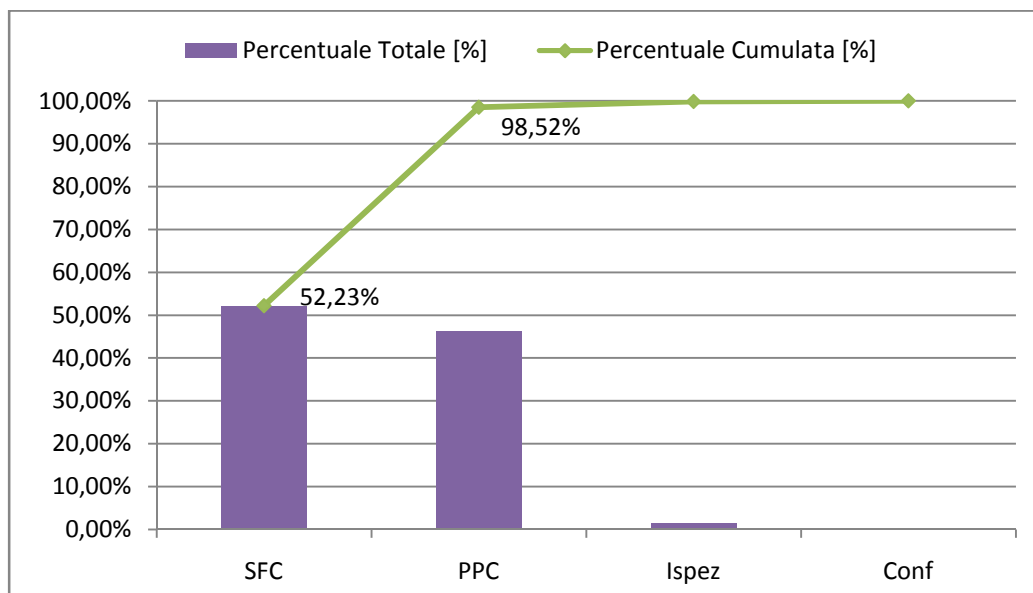


Figura 6.6. Diagramma di Pareto: Reparto Cleaning specifica C.

Tabella 6.5. Legenda Reparto Epitassia.

Epitassia	EPI	Lavaggio SFC	SFC
Ispezione Laser x2 *	Ispez x2	Confezionamento x2 *	Conf x2

*Nota: x2 viene indicato perché l'operazione si ripete due volte nel reparto.

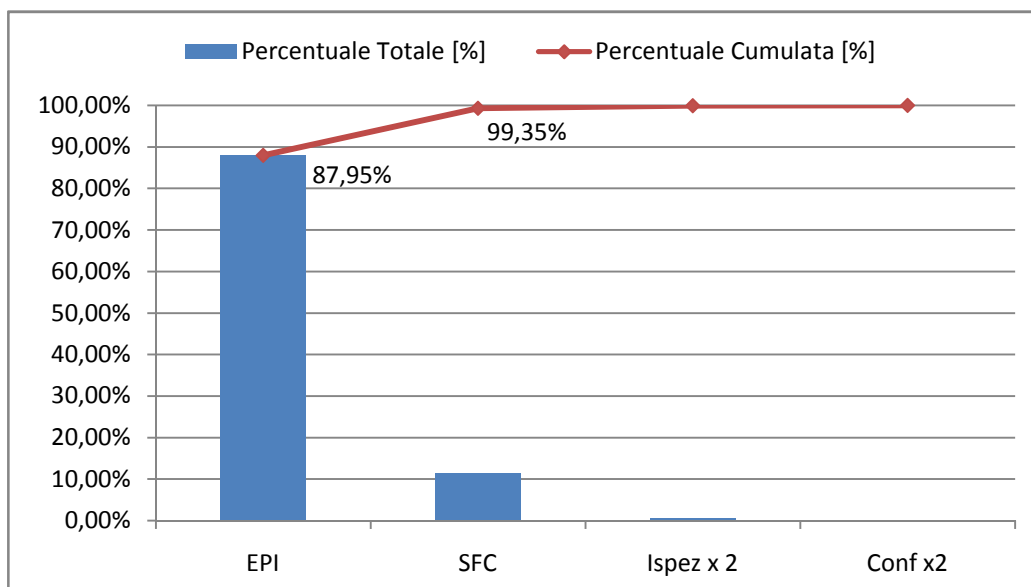


Figura 6.7. Diagramma di Pareto: Reparto Epitassia specifica A.

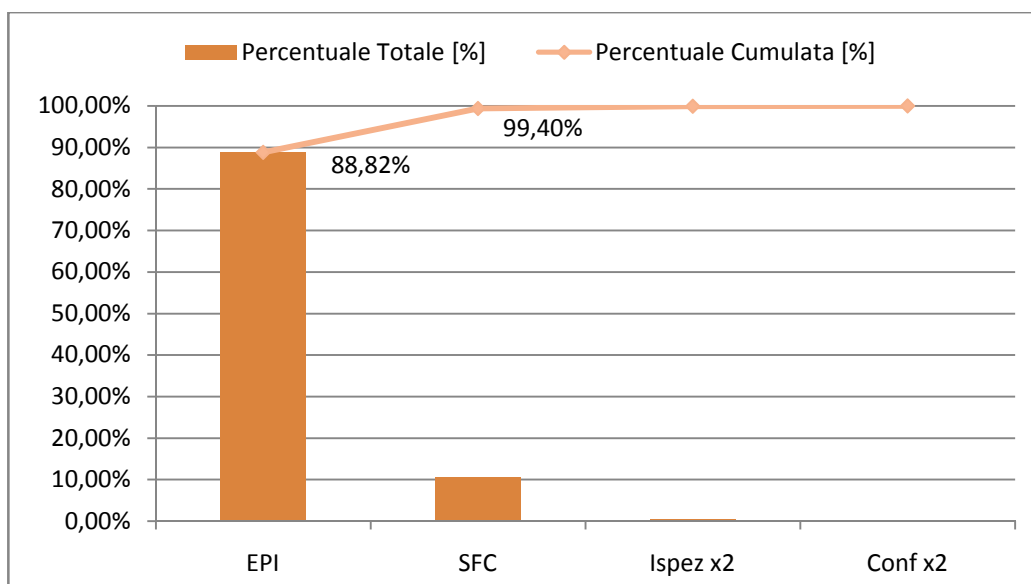


Figura 6.8. Diagramma di Pareto: Reparto Epitassia specifica C.

Grazie all'ausilio dei diagrammi e alle mappe energetiche (che vedremo nel prossimo capitolo) è stato possibile individuare i processi e le macchine più interessanti da indagare. Scoperte le aree d'intervento, ancora una volta il confronto con gli esperti del reparto è stato necessario. Non per tutte le tipologie più interessanti c'è stata possibilità di analisi. Per questo motivo solo per alcune operazioni che rientrano nella categoria *energy intensive*, sono state fatte misurazioni postume su macchine uguali da un punto di vista tecnologico, ma che tipicamente sono datate differentemente. Le macchine che sono state confrontate sono:

- 1) due macchine uguali per il taglio a filo, che presentano tecnologia di taglio diversa;
- 2) due lappatrici;
- 3) due forni per la deposizione del policristallo, di cui uno presenta l'installazione dell'inverter;
- 4) due forni per la deposizione del LTO;
- 5) due lucidatrici;
- 6) due reattori per deposizione epitassiale per la specifica A;
- 7) due reattori per deposizione epitassiale per la specifica C.

Nei casi 1, 2 e 5 il tipo di specifica non influenza gli assorbimenti della macchina, perché i parametri di funzionamento rimangono i medesimi. Possono cambiare però i tempi ciclo, come già detto in precedenza. I casi 3 e 4 invece riguardano macchine presenti solo nella specifica che segue il percorso Acido. Caso singolare invece ricopre l'analisi svolta sui reattori di epitassia, dove sono stati rilevati i consumi di due tipologie di reattore differente per entrambe le specifiche, per un totale di quattro misurazioni. È importante sottolineare che, a parte per i reattori per l'epitassia, le altre macchine controllate sono uguali. Ciò permette di fare un confronto efficace. Per le restanti macchine che avrebbero potuto portare ad un'interessante studio, come accennato poco sopra, non è stato possibile svolgere una rilevazione. Infatti alcune sono macchine uniche nel loro genere, come nel caso delle macchine di lavaggio, mentre per altre mi è stato consigliato di concentrarmi sulle altre aree di intervento, perché di rilevanza maggiore. Oltre a questo entrambe le tipologie di reattori per l'Attacco Chimico e le macchine Ispezionatrici a Laser sono state declassate alla categoria *non energy intensive*, dato il confronto con le altre macchine, sia in termini di diagramma di Pareto, che in termini di confronto assoluto.

6.2 Analisi dopo l'individuazione delle aree di intervento

L'analisi passa in rassegna tutti i reparti per poter riuscire a costruire la Value Stream Map Energetica richiesta dall'azienda. Questo metodo di visualizzazione grafica deriva dalla Toyota, che intorno agli anni '80 decise di attuare una politica di abbattimento degli sprechi che avvenivano durante i processi produttivi. Questa tecnica permette di individuare gli sprechi, con il beneficio di poterli eliminare e non diminuire il valore del prodotto finito, in modo tale da aumentare l'efficienza del ciclo produttivo.

Tabella 6.6. Definizione dei consumi.

Consumo Molto Basso	$0 \leq E'_{spec} < 10$
Consumo Basso	$10 \leq E'_{spec} < 40$
Consumo Medio	$40 \leq E'_{spec} < 100$
Consumo Alto	$E'_{spec} \geq 100$

Le operazioni che rientrano nella fascia dei consumi alti saranno lavorazioni considerate della categoria *energy intensive*.

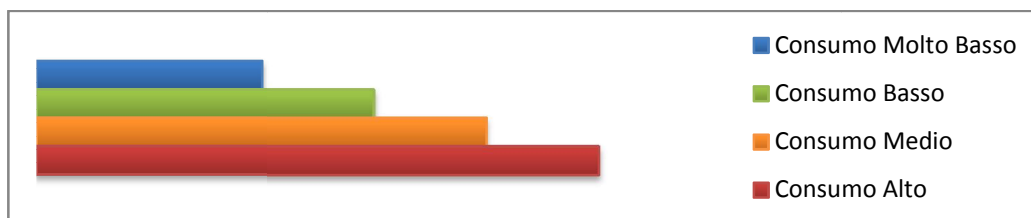


Figura 6.9. Legenda delle mappe energetiche.

6.2.1 Reparto Taglio

Di seguito nelle figure 6.2 e 6.3 sono mostrate le mappe degli assorbimenti delle due specifiche nel Reparto Taglio.

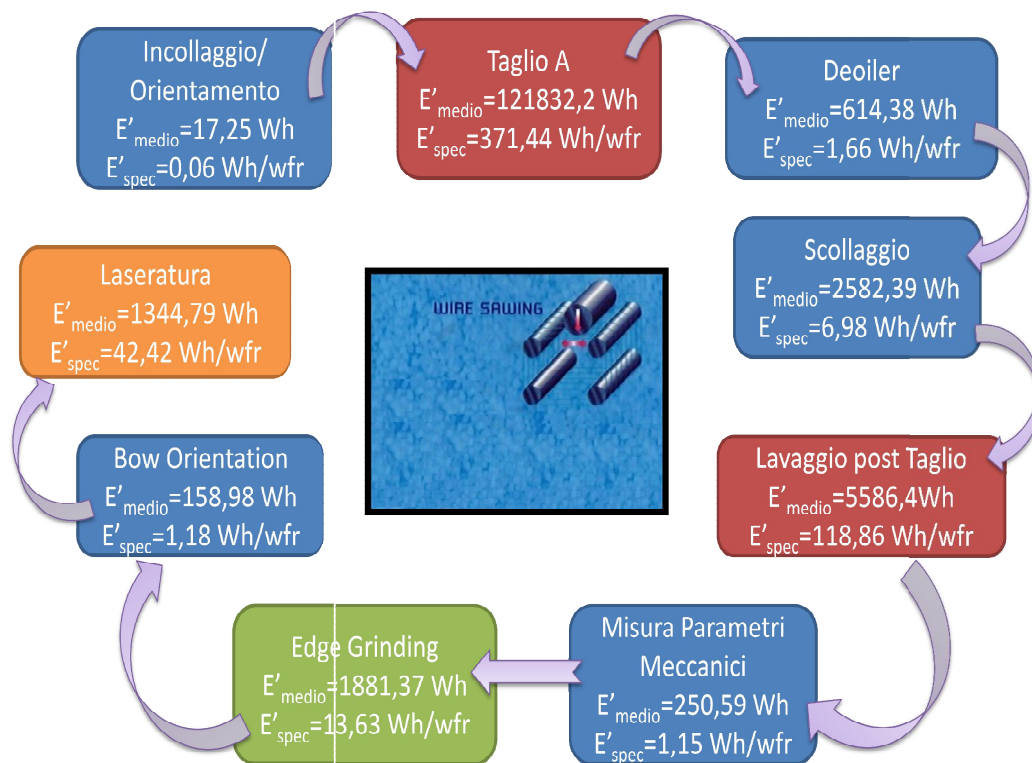


Figura 6.10. Mappa Energetica: Reparto Taglio specifica A.

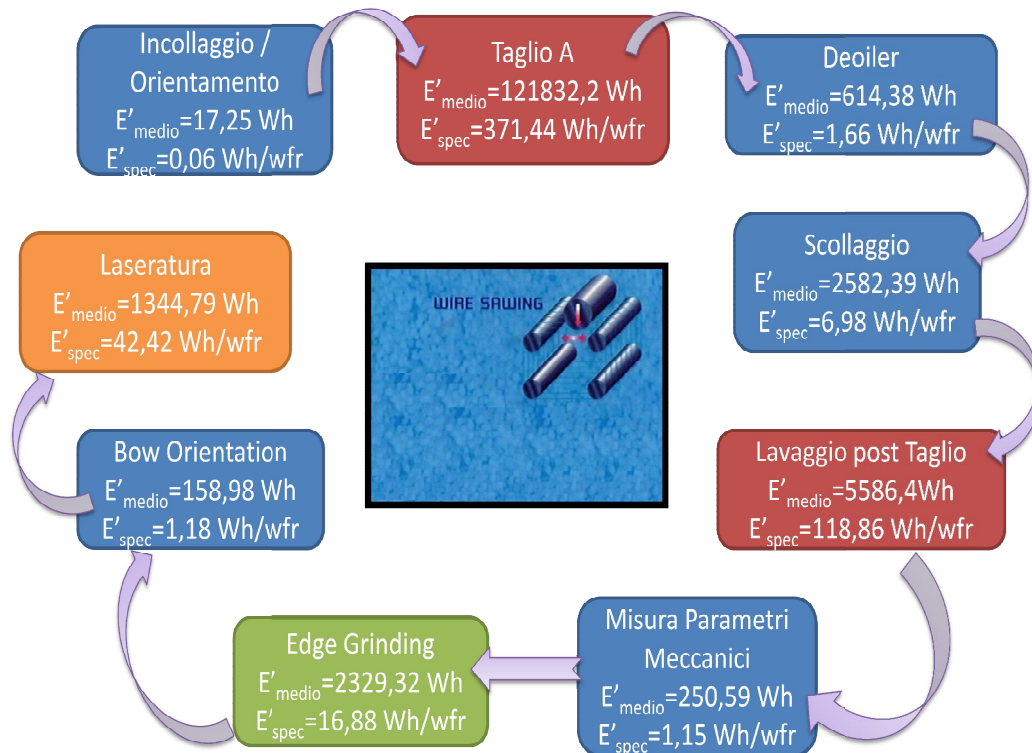


Figura 6.11. Mappa Energetica: Reparto Taglio specifica C.

Come già detto, i due percorsi non influenzano parte delle operazioni. Unica operazione che notiamo avere un consumo differente in questo reparto è quella di Edge Grinding, perché il tempo ciclo nella specifica C risulta essere maggiore. Questa peculiarità influenza anche il diagramma di Pareto visto nel Capitolo 5. La variazione non è tale da cambiare le priorità d'intervento. In questo reparto la macchina che può portare ad una diminuzione dei consumi è la macchina di taglio che utilizza due metodi differenti. Rilevando gli assorbimenti del Taglio B si possono mettere a confronto con i consumi del Taglio A.

Tabella 6.7. Confronto tra le due tecnologie di taglio.

Taglio	As is (A)	To Be (B)
P_{media} [kW]	16,58	14,39
t_{ciclo} [min]	441	179
n. wafers per lotto	328	334,56
E'_{medio} [Wh]	121832,20	42937,86
E'_{spec} [Wh/wfr]	371,44	128,34

La seconda tecnologia sembra veramente allettante. Si nota che la potenza necessaria al taglio decresce di circa il 13,2%. Questo è imputabile a minori sforzi di taglio e quindi minori sollecitazioni del motore. La gran parte del risparmio però si nota provenire da un tempo ciclo che è inferiore al caso base di circa il 59,4%. Questo è dovuto ad una tecnica di taglio migliore. Inoltre si denota un numero di wafers maggiore di circa il 2%. Infatti, la tipologia B permette di avere minore perdita di kerf e quindi una produttività maggiore, il che porta ulteriormente ad abbassare l'energia per pezzo.

È stato possibile comporre la Value Stream Map Energetica del reparto. Come unità di misura si è scelto di adottare [Wh/cestello]. Un cestello è composto da 25 wafers mediamente. Visivamente si nota subito il grande risparmio che ne deriverebbe. Si utilizzano le voci della tabella 6.1 come legenda di entrambi i grafici.

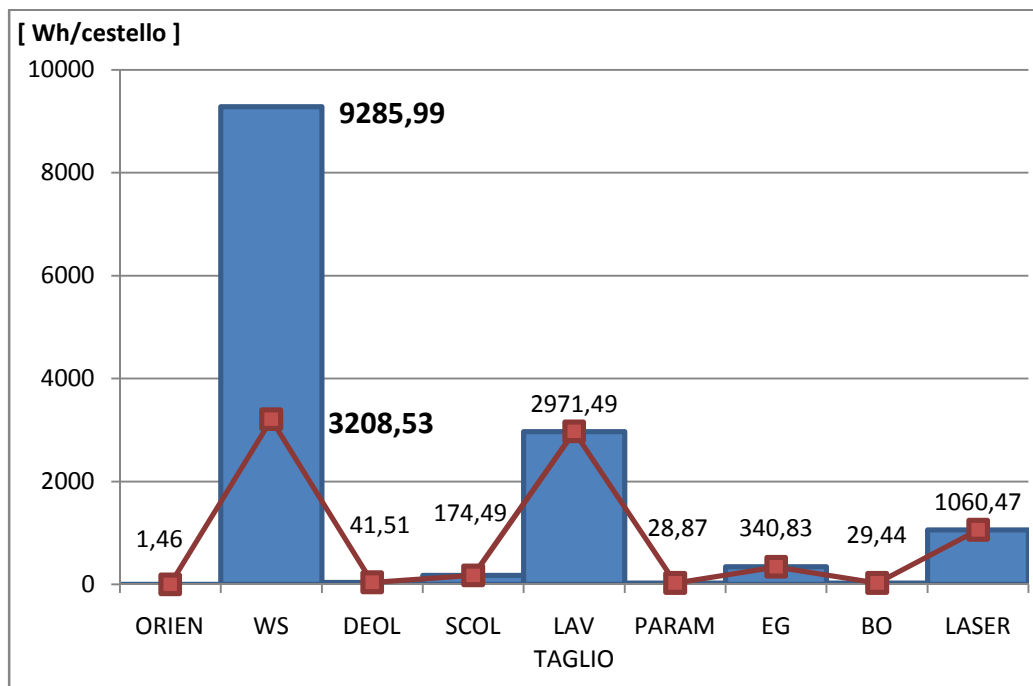


Figura 6.12. Value Stream Map Energetica del Reparto Taglio specifica A.

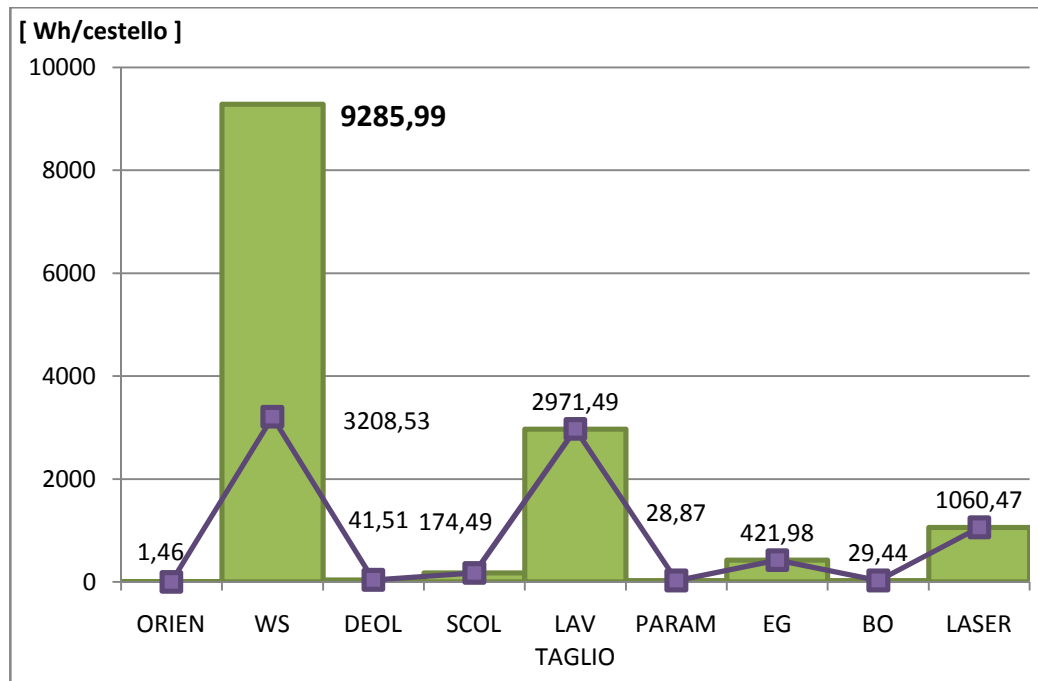


Figura 6.13. Value Stream Map Energetica del Reparto Taglio specifica C.

È stato possibile calcolare il potenziale risparmio in termini di energia elettrica di questa opera di efficientamento. Con i dati relativi al numero dei wafers prodotti nell'anno 2012 dalla taglierina che applica la tecnica di taglio di tipologia A ($wfr_{taglio A}$), il prezzo dell'energia p valutato in [€ / (MWh)] e con i valori dei consumi delle due tipologie è stato possibile valutare il potenziale risparmio R_{TAGLIO} in € / anno:

$$R_{TAGLIO} = \frac{(E'_{spec A} - E'_{spec B}) * wfr_{taglio A} * p}{10^6} \quad (6.1)$$

Il risparmio atteso, che si maturerebbe con questa opera di efficientamento, si stima essere nell'intorno di 8500 €/anno solo per il risparmio energetico durante il processo di taglio. Infatti, complessivamente, avendo la possibilità di tagliare più velocemente anche la produttività dell'intero impianto crescerebbe.

6.2.2 Reparto Lappatura

In questo reparto per la costruzione delle mappe energetiche è stata seguita la stessa suddivisione del paragrafo 4.2.

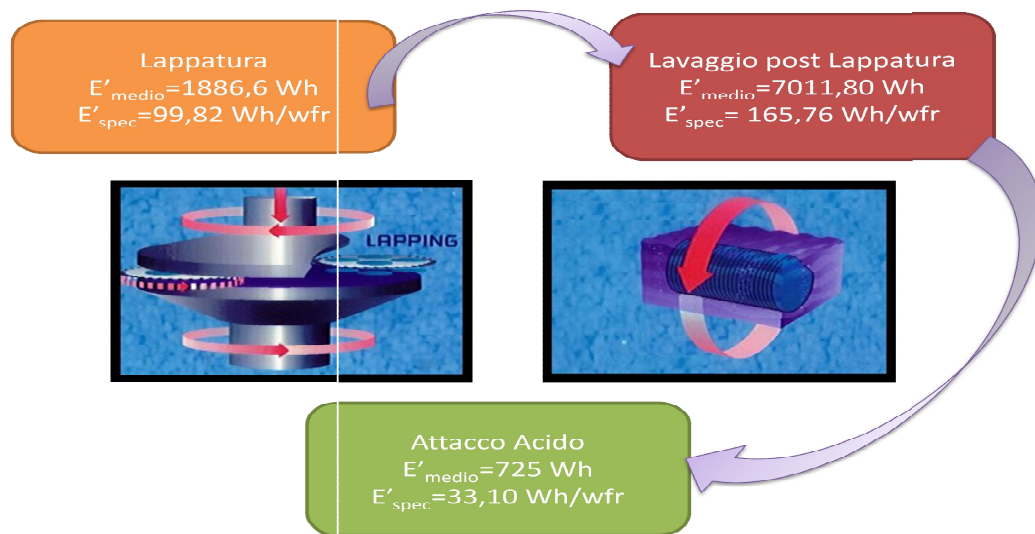


Figura 6.14. Mappa Energetica: Lappatura e Attacco Acido.

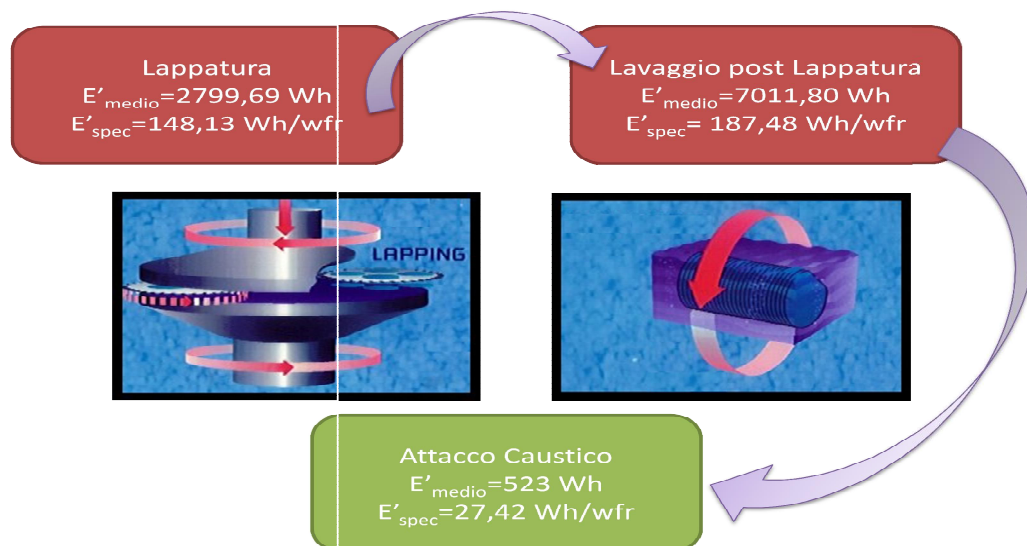


Figura 6.15. Mappa Energetica: Lappatura e Attacco Caustico.

Confrontando tra loro le specifiche vediamo che la lappatura nella seconda specifica comporta consumi maggiori. Questo è dovuto non ad assorbimenti superiori, ma ad un tempo ciclo più grande, poiché l'attacco caustico successivo richiede superfici delle fette maggiormente lisce per poter avere poi risultati soddisfacenti, rispetto all'attacco acido il quale è una tipologia di attacco chimico più aggressivo. Come si può notare, invece, il lavaggio ha lo stesso consumo medio, ma quello specifico è differente. Ciò è causato da un numero inferiore di wafers per lotto medio nella specifica C, perché è una richiesta più di nicchia. Infine le due tipologie di Attacco Chimico hanno consumi differenti. Dai dati raccolti, si può notare che in generale la macchina responsabile dell'Attacco Acido ha assorbimenti maggiori rispetto a quella responsabile dell'Attacco Caustico, ma che quest'ultimo è un processo che richiede tempi decisamente più lunghi, dunque complessivamente non c'è grande differenza tra i due consumi.

La macchina che è stata identificata come passibile di un'opera di efficientamento è la lappatrice. Utilizziamo come metro di confronto il tempo ciclo e il numero di wafers della specifica A per ottenere il consumo energetico. Come già detto, in termini di assorbimenti non c'è differenza tra le due specifiche.

Tabella 6.8. Confronto tra le due lappatrici.

Lappatura	As is (n. 01)	To Be (n. 10)
P_{media} [kW]	13,43	10,86
t_{ciclo} [min]	8,43	8,43
n. wafers per lotto	18,9	18,9
E'_{medio} [Wh]	1886,60	1525,84
E'_{spec} [Wh/wfr]	99,82	80,73

La seconda lappatrice ha assorbimenti energetici inferiori, che non dipendono dalla specifica. Questo è dovuto ai motori più efficienti, che in questo caso comportano un *saving* di circa 2,5 kW. Pensando di calcolare anche in questo caso il risparmio potenziale, si è operato diversamente rispetto a prima, essendo i consumi energetici differenti tra le due specifiche. Conoscendo le ore di funzionamento h della macchina 01, si è reso indipendente il dato dal tempo ciclo.

Si è potuto calcolare il risparmio R_{LAP} :

$$R_{LAP} = \frac{(P_{media\ 01} - P_{media\ 10}) * h * p}{1000} \quad (6.2)$$

La sostituzione dei motori vecchi con altri più efficienti porterebbe ad un risparmio atteso, approssimato per difetto in ottica conservativa, superiore ai 1000 €/anno.

Possiamo quindi passare all'analisi dei trattamenti termici delle due specifiche.

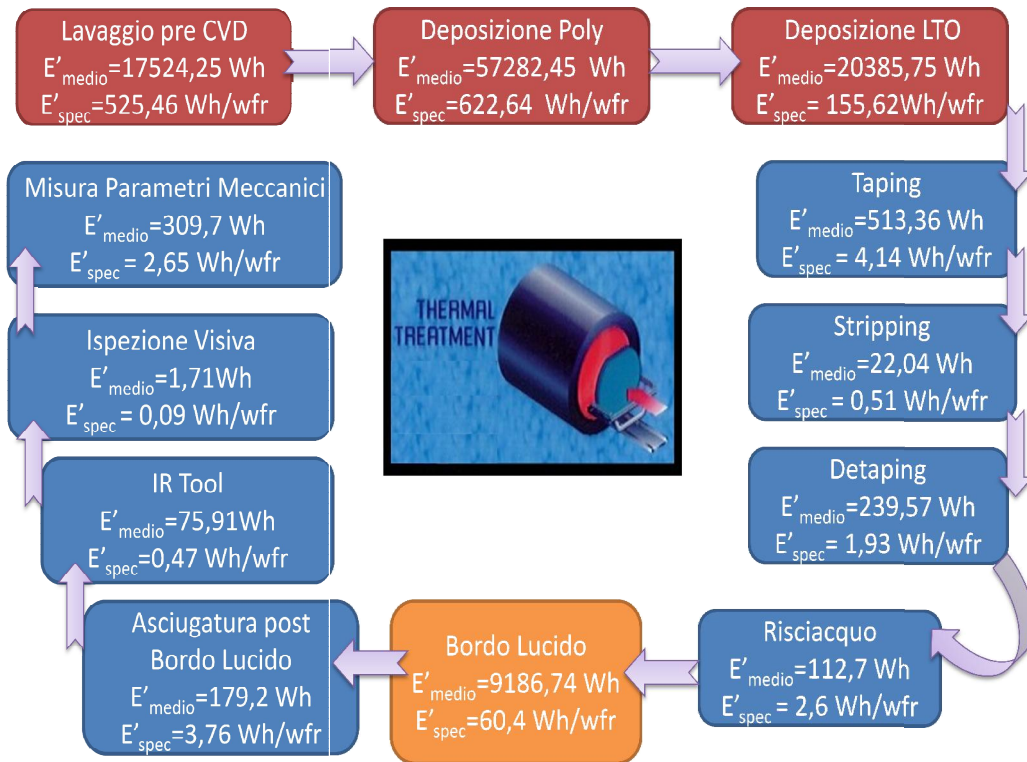


Figura 6.16. Mappa Energetica: Trattamento Termico specifica A.

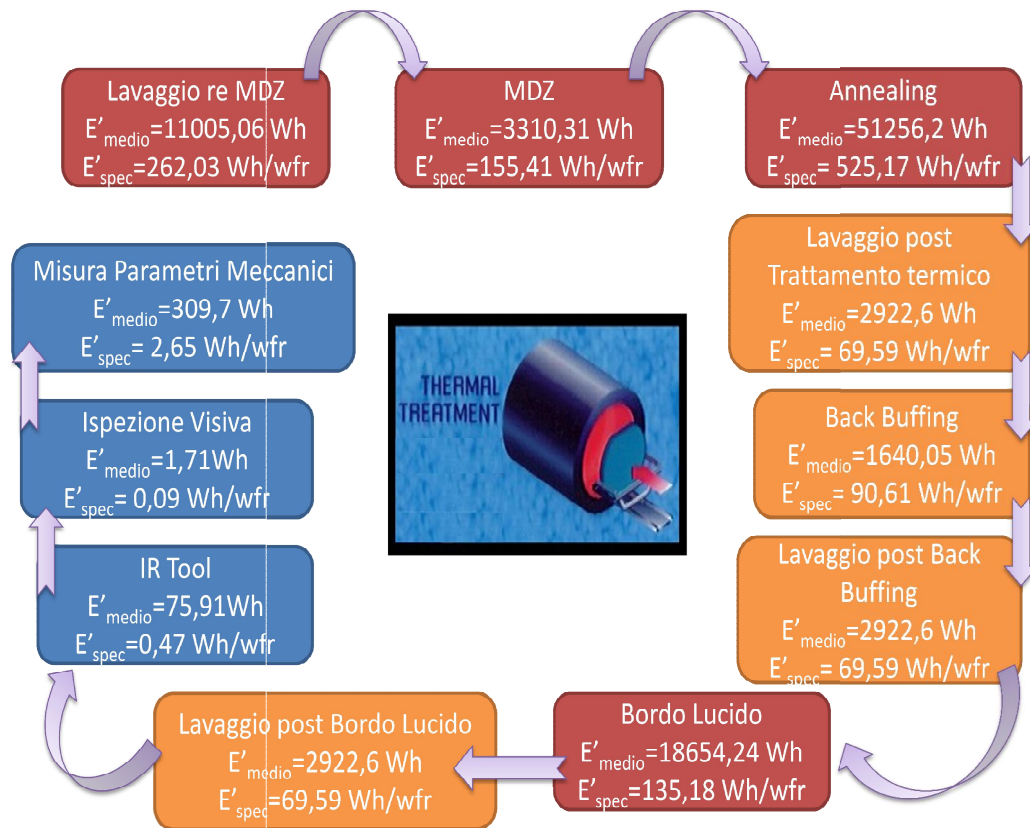


Figura 6.17. Mappa Energetica: Trattamento Termico specifica C.

Confrontando l'operazione di Bordo Lucido si denota una grande differenza di consumi tra le due specifiche. Questo è dovuto a tempi ciclo più che duplicati nella seconda specifica. In prima approssimazione si è deciso di far sì che questa operazione rimanesse nella categoria *non energy intensive*, anche se in un lavoro futuro si dovrebbe indagare questa possibilità. Dal diagramma di Pareto si nota infatti che il suo apporto ai consumi del reparto è rilevante e influenzato dai diversi tempi ciclo delle specifiche. Nella specifica C, come anticipato, i tre lavaggi sono identici, e anche se di per sé l'operazione singola non rientrerebbe nella fascia degli alti consumi, questa si ripete per tre volte nel reparto, quindi acquista un peso maggiore. Si capisce così perché è stata annoverata nella categoria *energy intensive*. L'operazione di Back Buffing invece è stata eliminata da questa tipologia in quanto rientra nella fascia Medio Consumo.

È stato possibile analizzare i forni per la deposizione del policristallo e per la deposizione del LTO. Iniziamo dunque ad esaminare i dati dei forni per la deposizione del poly.

Tabella 6.9. Confronto tra due forni per la deposizione del poly.

Deposizione Poly	As is (n. 6)	To Be (n. 7)
P_{media} [kW]	24,26	22,99
t_{ciclo} [min]	141,68	141,68
n. wafers per lotto	92	92
E'_{medio} [Wh]	57282,45	54286,11
E'_{spec} [Wh/wfr]	622,64	590,07

In questo caso, pur notando che il n.7 ha assorbimenti inferiori, ci siamo focalizzati su un altro punto. Il processo CVD è compiuto in una camera all'interno della quale è stato prodotto il vuoto. Per realizzarlo si utilizzano delle pompe per il vuoto. Il n.6 possiede tre pompe per il vuoto con regolazione on/off, mentre il n.7 possiede due pompe per il vuoto con inverter. La potenza nominale si attesta nell'intorno di 15 kW per entrambi i casi. Il problema riscontrato risiede nel fatto che il n.7 è installato da un anno e il sistema di regolazione utilizzato dalle pompe è on/off, pur avendo la possibilità di utilizzare l'inverter. La potenzialità di risparmio che l'inverter è in grado di dare dunque non è sfruttata. Anzi essendo installato e non utilizzato, diminuisce l'affidabilità del sistema senza portare vantaggi. La figura 6.18 mostra l'assorbimento del forno. Per caricare un nuovo cestello, la navicella che lo mantiene si abbassa. Così facendo l'aria entra nella camera. L'aumento dei consumi che si nota nel grafico corrisponde alla potenza richiesta dalla pompa per poter mantenere il vuoto. Caricato il nuovo cestello, il forno si chiude e la pompa può così poco a poco finire di fare nuovamente il vuoto. Si notare in figura che l'assorbimento comincia a diminuire, per poi portarsi a funzionare in un tratto costante. Una volta realizzato il vuoto, si può procedere con la deposizione.

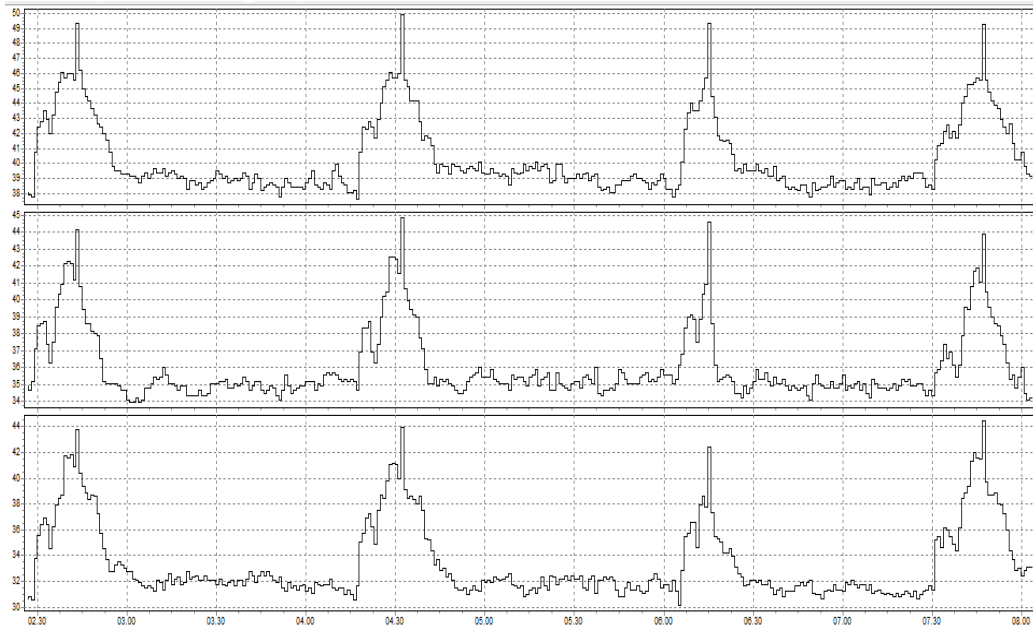


Figura 6.18. Assorbimento corrente del forno n.7.

Durante il tratto costante, le pompe per il vuoto funzionano a regime, ma teoricamente non si ha più bisogno del loro funzionamento, perché il forno è ermetico e dunque il vuoto rimane. In linea teorica si potrebbero addirittura spegnere. L'inverter potrebbe permettere di diminuire l'assorbimento in questo tratto, portando le pompe a consumare meno. Inoltre il reattore per depositare polisilicio rimane sempre acceso, in quanto i tempi di avviamento sono lunghi. Dunque le pompe del vuoto funzionano sempre a regime perché, come è stato detto, l'inverter non è utilizzato. Parlando con i tecnici si è definito che conservativamente sarebbe possibile diminuire del 12% l'assorbimento delle pompe durante il periodo di deposizione, che dura all'incirca 90 minuti. Nei periodi in cui la macchina non sta processando il risparmio sarebbe ancora maggiore perché, come riferitomi, si potrebbe arrivare a raggiungere conservativamente il 50% della potenza delle pompe. Stimando che il forno processi materiale per 17,5 ore al giorno di cui 10,5 ore corrispondono al tempo di deposizione t_1 , mentre t_2 vale 6,5 ore al giorno corrispondenti alle ore in cui il forno funzioni senza depositare polisilicio sui wafers, si ottiene che:

$$R_{POLY} = \frac{(P_{pompe} * 12\% * t_1) + (P_{pompe} * 50\% * t_2)}{1000} * 365 * p \quad (6.3)$$

Il mancato guadagno, in maniera conservativa, si attesta essere di circa 3360 €. Dunque utilizzando l’inverter potrebbero essere risparmiati più di 3360 €/anno.

Si passa quindi all’analisi dei forni per la deposizione del LTO.

Tabella 6.10. Confronto tra due forni per la deposizione del LTO.

Deposizione LTO	As is (n. 7)	To Be (n. 2)
P_{media} [kW]	11,39	10,39
t_{ciclo} [min]	107,42	107,42
n. wafers per lotto	131	131
E'_{medio}[Wh]	20385,75	18599,24
E'_{spec} [Wh/wfr]	155,62	141,98

La differenza tra gli assorbimenti rilevata si attesta nell’intorno di 1 kW. Questa discrepanza è assai piccola e difficilmente individuabile. Calcolando il risparmio R_{LTO} con l’equazione (6.1) si ottiene un risparmio di circa 380 €/anno. Non è stato interessante dunque approfondire ulteriormente questo possibile efficientamento, anche se compare nella costruzione della successiva Value Stream Map.

Avendo completato l’indagine di efficientamento del Reparto Lappatura è possibile costruire la Value Stream Map Energetica per le due specifiche. Per la legenda dei grafici si utilizzano la tabella 6.2 e la tabella 6.3. Quest’ultima però raccoglieva i tre lavaggi in un’unica voce. In questo caso, dovendo separare le voci per poter ricostruire la Value Stream Map, per i lavaggi sono state utilizzate le annotazioni della tabella 6.11, mentre per le altre si è continuata ad utilizzare la tabella 6.3:

Tabella 6.11. Legenda operazioni di Lavaggio, Reparto Lappatura specifica C.

Lavaggio post Termico	LAV TH
Lavaggio post Back Buffing	LAV BB
Lavaggio post Bordo Lucido	LAV BL

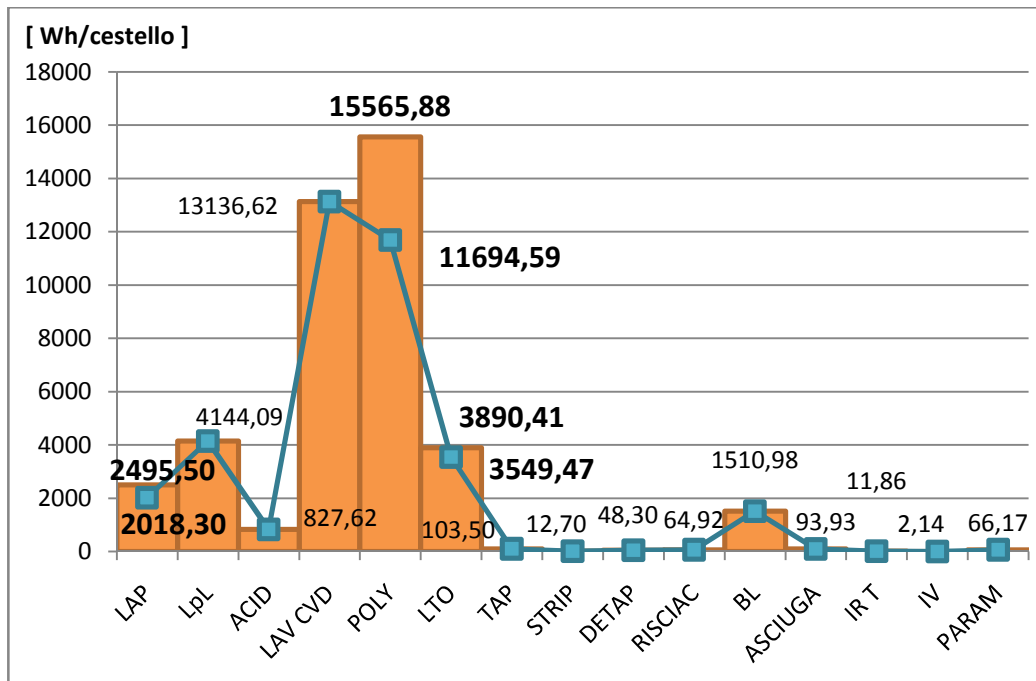


Figura 6.19. Value Stream Map Energetica del Reparto Lappatura specifica A.

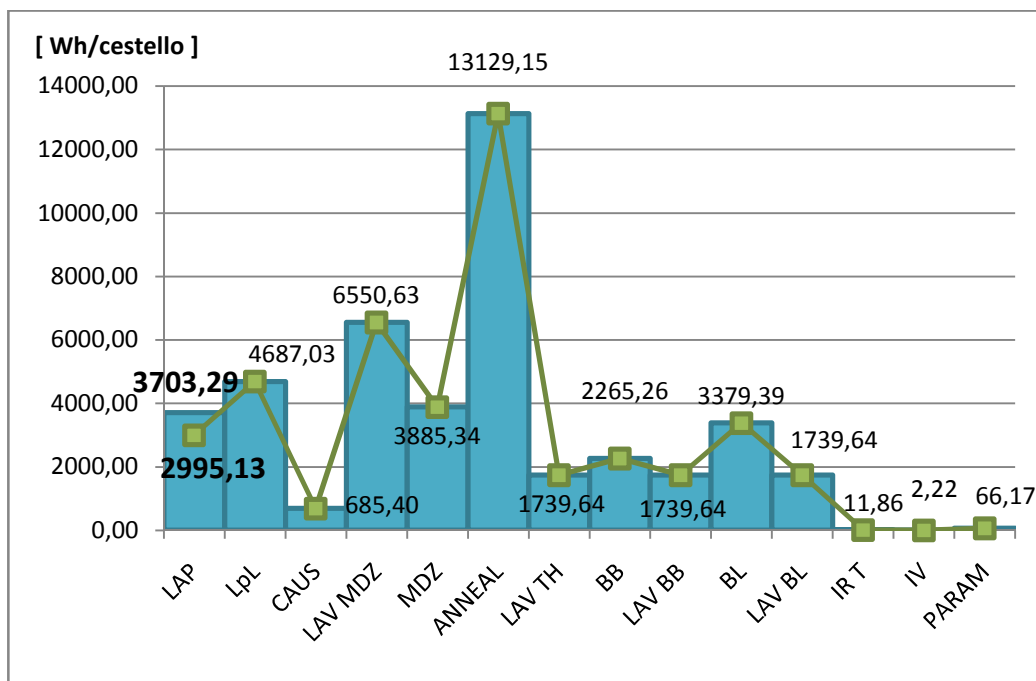


Figura 6.20. Value Stream Map Energetica del Reparto Lappatura specifica C.

6.2.3 Reparto Lucidatura e Reparto Cleaning

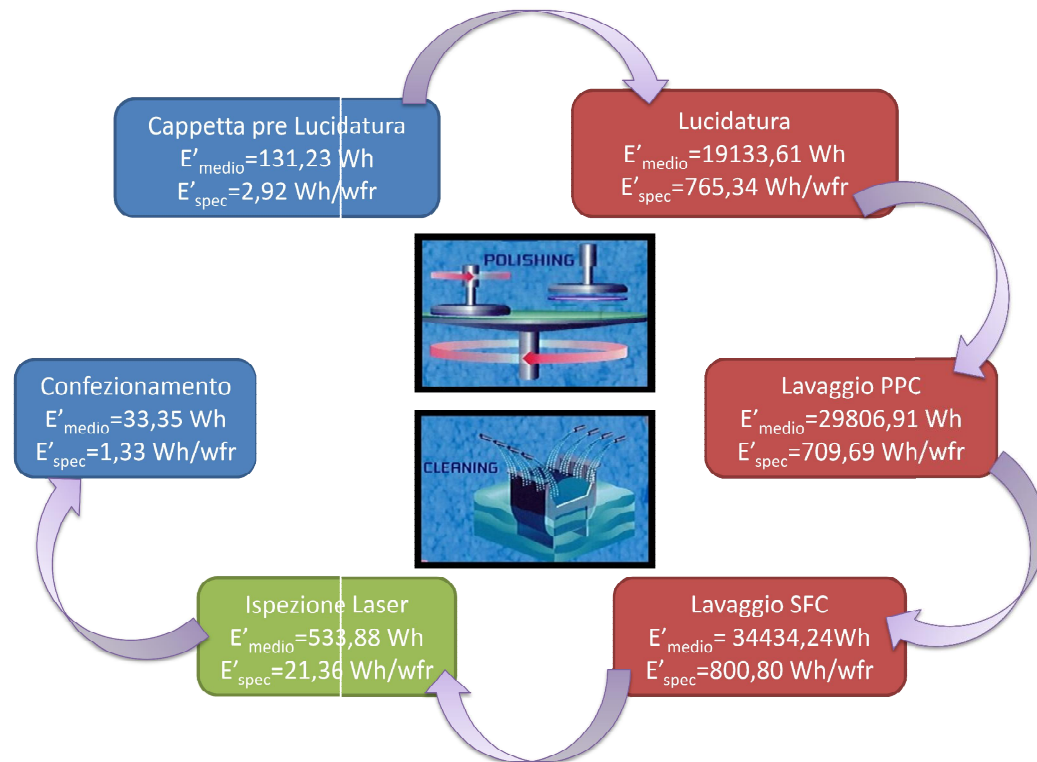


Figura 6.21. Mappa Energetica: Reparto Lucidatura e Reparto Cleaning.

Per le due specifiche considerate, i Reparti di Lucidatura e di Cleaning non presentano differenze. Infatti sono operazioni che non sono influenzate dalle richieste e quindi si può avere un'unica mappa energetica e una sola analisi.

In questo frangente, la macchina su cui si è svolta l'indagine è stata la lucidatrice. Anzitutto sono stati raccolti i dati e si è quindi svolto il confronto.

Tabella 6.12. Confronto tra due lucidatrici.

Lucidatura	As is (n. 13)	To Be (n. 23)
P_{media} [kW]	10,63	9,34
t_{ciclo} [min]	108	108
n. wafers per lotto	25	25
E'_{medio} [Wh]	19133,61	16807,83
E'_{spec} [Wh/wfr]	765,34	672,31

La differenza tra le due macchine è di quasi 1,3 kW. Questa differenza di assorbimento è imputabile al diverso sistema d'illuminazione interno della macchina e probabilmente ad una differenza di assorbimento della ventilazione. L'illuminazione della seconda macchina infatti è composta da led al posto dei neon che utilizza la prima macchina. Inoltre la n.23 è di più moderna costruzione e quindi molto probabilmente è dotata di un sistema di ventilazione a più basso impatto energetico. Questa differenza di assorbimento, che sembra molto simile a quella riscontrata nei forni LTO, oltre ad esserne stata individuata la causa, ha un'incidenza maggiore sui consumi. Infatti seppur il tempo ciclo sia considerevole uguale, i wafers per lotto processati sono circa l'80% in meno, quindi globalmente è più rilevante il risparmio. Utilizzando poi nuovamente la (6.1) otteniamo un risparmio $R_{LUCIDATURA 1}$ di circa 1500 €/anno.

Per queste tipologie di macchina sono in commercio oggi motori ad alta efficienza che permetterebbero un risparmio energetico di circa il 30%. Se dunque consideriamo in ottica conservativa come valore da utilizzare la P_{media} della lucidatrice n.23 che di per sé possiede un consumo inferiore, possiamo in prima approssimazione trovare il risparmio atteso da quest'opera di efficientamento, considerando il tempo ciclo di 1,8 ore tramite l'equazione (6.3). Il risparmio $R_{LUCIDATURA 2}$ si attesta essere superiore ai 3300 €/anno. Si può quindi capire come sia possibile in questo caso una doppia opera di efficientamento. Per le macchine più datate cambiare illuminazione, sistemare l'impianto di ventilazione e cambiare i motori, può comportare un risparmio $R_{LUCIDATURA TOT}$ superiore ai 4800 €/anno, mentre per le macchine più nuove sostituendo i motori sarà possibile risparmiare almeno 3300 €/anno.

Di seguito in Figura 6.22 è riportata la Value Stream Map dei due reparti affiancati. La lucidatrice considerata è la n.13 ovvero il caso base. Sono mostrati poi i risparmi possibili tramite le tre opere di efficientamento: il colore viola indica il cambio dell'illuminazione e la sistemazione della ventilazione, l'arancione indica la sostituzione dei motori, il verde indica la messa in atto di entrambe le opere di efficientamento. Come legenda è utilizzata la tabella 6.4 e la seguente:

Tabella 6.13. Legenda Reparto Lucidatura.

Cappetta pre Lucidatura	CAP
Lucidatura	LUC

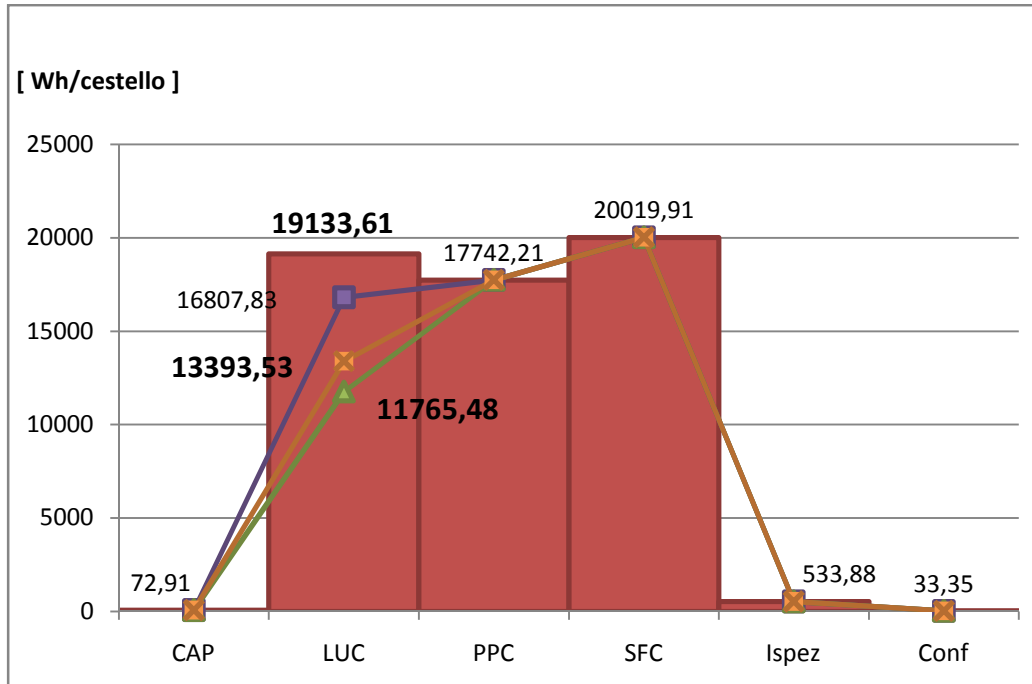


Figura 6.22. Value Stream Map Energetica del Reparto Lucidatura e Cleaning.

6.2.4 Reparto Epitassia

Come accennato nel Capitolo 5, l'analisi svolta per i reattori per l'epitassia è stata diversa. Sono stati confrontati due reattori differenti. Il caso base (caso 1) è un reattore che elabora una fetta alla volta, mentre il caso di confronto (caso 2) è un reattore che possiede tre camere e dunque è in grado di elaborare tre wafers. Avendo la possibilità di utilizzare entrambi i reattori per le specifiche considerate, si è voluto indagare la tipologia più conveniente. Infatti la maggior parte dei clienti ha omologato le specifiche per essere prodotte indifferentemente nei due reattori. In questo caso è stato necessario eseguire la rilevazione per entrambe le specifiche, perché il processo di epitassia è influenzato dalle richieste dei clienti.

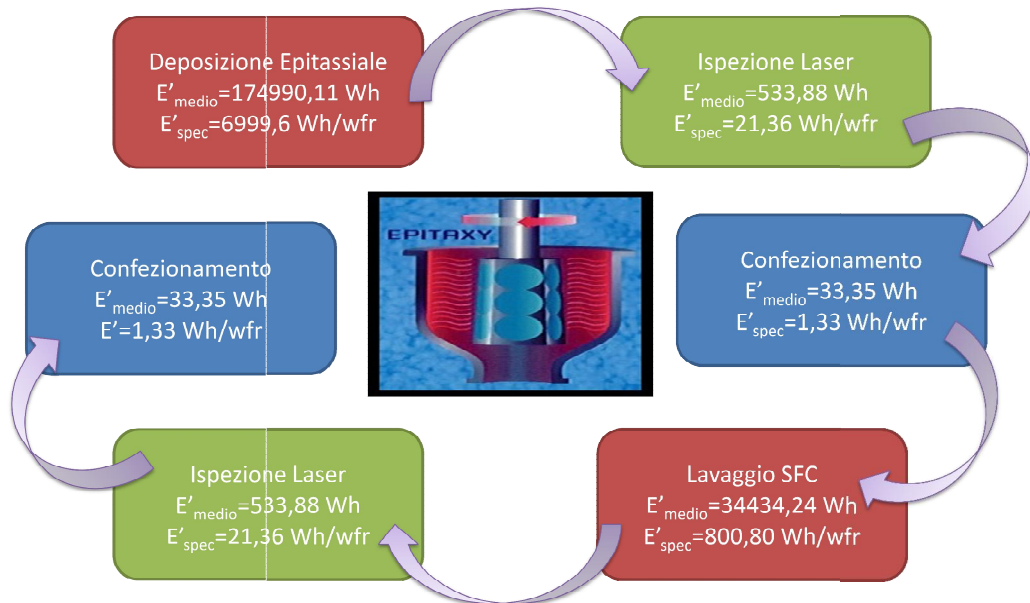


Figura 6.23. Mappa Energetica: Reparto Epitassia specifica A.

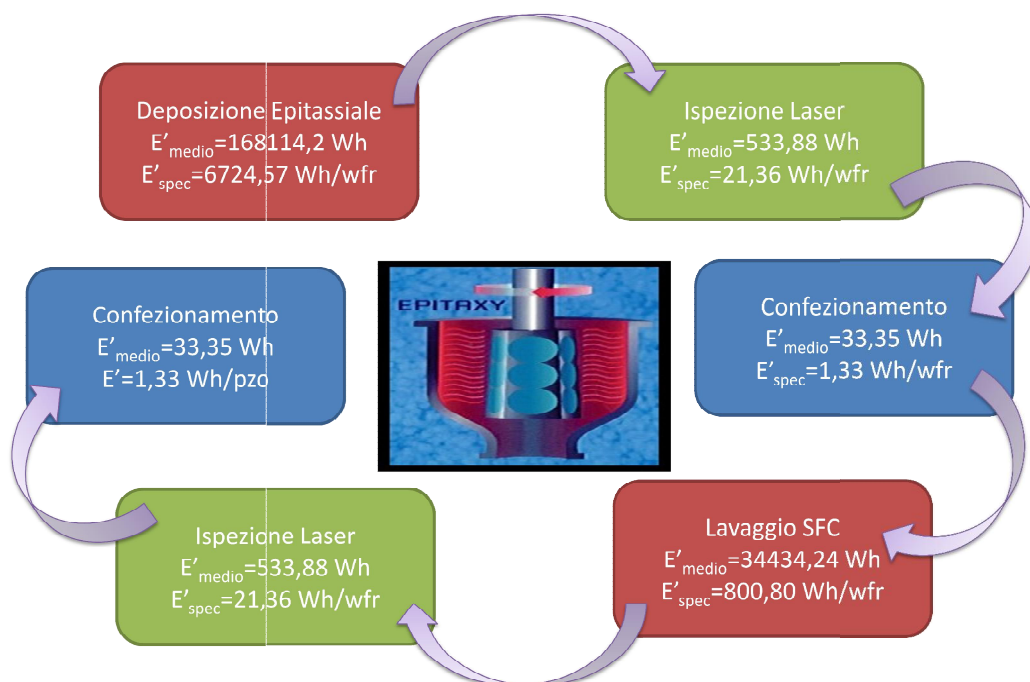


Figura 6.24. Mappa Energetica: Reparto Epitassia specifica C.

Per prima cosa notiamo che, per entrambe le specifiche, il processo di epitassia ha un consumo che non è paragonabile con nessun altro processo *energy intensive*. Risulta essere notevolmente il processo più energivoro dello stabilimento. La figura 6.25 vuole evidenziare la disparità tra gli assorbimenti, dunque non sono evidenziate le differenze di consumo tra la specifica A e C come accade per l'operazione di Lappatura e Lavaggio post Lappatura, perché non sarebbe in ogni caso rilevante. Il lavaggio SFC viene eseguito due volte durante le lavorazioni e quindi è stato sommato e indicato con dicitura x2. *EPI A1* ed *EPI C1* indicano i due processi di epitassia eseguiti con la prima tipologia di macchina. Le voci sono tratte dalle tabelle 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 e 6.13.

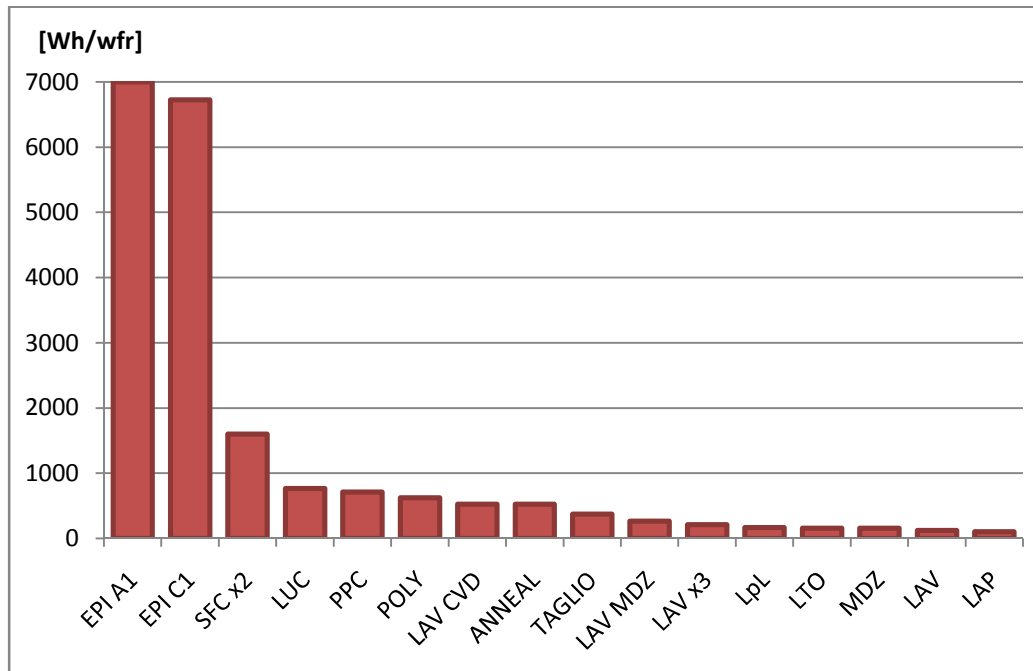


Figura 6.25. Confronto tra i casi base dei processi energy intensive.

Seppur le richieste dei clienti siano diverse, notiamo che i consumi differiscono all'incirca del 4%. È plausibile pensare che anche nelle macchine della seconda tipologia, la differenza di assorbimenti è mantenuta all'incirca costante. Si ipotizza che anche la specifica C del secondo caso avrà un consumo inferiore rispetto la specifica A. Bisogna infine notare come un efficientamento su questa tipologia di reattori può comportare un grandissimo risparmio. Si rende quindi evidente l'interesse che questo caso di studio suscita.

Procediamo con l'analisi della specifica A.

Tabella 6.14. Confronto tra caso 1 e caso 2 della specifica A.

EPI A	As is (A1)	To Be (A2)
P_{media} [kW]	45,85	121,88
t_{ciclo} [min]	229	48
n. wafers per lotto	25	25
E'_{medio} [Wh]	174990,11	97507,44
E'_{spec} [Wh/wfr]	6999,60	3900,30

Si nota subito che esiste un risparmio ad utilizzare la seconda tipologia di macchina rispetto alla prima, ed esso è molto significativo.

Definiamo un power ratio P_R come rapporto tra le potenze :

$$P_R = \frac{P_2}{P_1} \quad (6.4)$$

e un time ratio T_R come rapporto tra i tempi ciclo:

$$T_R = \frac{t_{ciclo\ 2}}{t_{ciclo\ 1}} \quad (6.5)$$

Il power ratio $P_{R(A)}$ vale 2,658. L'assorbimento della seconda macchina, nonostante abbia tre camere, è inferiore al consumo di tre macchine della prima tipologia, perché gli ausiliari della seconda macchina sono condivisi tra le camere e quindi i consumi sono ripartiti.

Il time ratio $T_{R(A)}$ invece vale 0,2096. Questo significa che per produrre le stesse fette, la seconda tipologia impiega quasi un quinto del tempo, poiché oltre ad avere due camere in più, con questa macchina anche il tempo ciclo per l'epitassia di una fetta è ridotto.

Seppur conti di più la riduzione dei tempi, entrambi i vantaggi permettono di ottenere un grande miglioramento. Infatti si consegue un risparmio sui consumi di circa il 45%.

Si passa ora ad analizzare la specifica C.

Tabella 6.15. Confronto tra caso 1 e caso 2 della specifica C.

EPI C	As is (3)	To Be (4)
P_{media} [kW]	42,38	114,30
t_{ciclo} [min]	238	70
n. wafers per lotto	25	25
E'_{medio} [Wh]	168114,20	133354,98
E'_{spec} [Wh/wfr]	6724,57	5334,20

I dati raccolti mostrano come la differenza tra le specifiche non rimanga per nulla costante, diversamente da quanto si era ipotizzato poco sopra. Infatti, utilizzando le formule (6.4) e (6.5), si calcolano $P_{R(C)}$ e $T_{R(C)}$ che risultano essere rispettivamente di 2,697 e 0,2941. Il rapporto tra le potenze, come era logico aspettarsi, rimane circa costante tra le due tipologie, per lo stesso motivo di cui sopra. Il rapporto tra i tempi ciclo invece è superiore a quello precedente e si avvicina ad un terzo. È stato possibile capire il motivo di tutto ciò, grazie nuovamente all'aiuto apportato da personale competente. Infatti, oltre ai parametri tipici dei processi chimici, come pressione e temperatura, entra in gioco un'ulteriore variabile, che consiste nel numero di pulizie che sono svolte per ciclo nella camera. In questo caso particolare il cliente che richiede la specifica C esige una pulizia della camera dopo ogni deposizione, mentre nella prima specifica la pulizia della camera viene compiuta con meno frequenza, il che comporta un risparmio di tempo. Il risparmio anche se inferiore esiste e si attesta essere di circa 20,7%.

Visti i risultati molto variabili secondo la specifica, non è stato stimato un risparmio, perché non sarebbe attendibile, essendoci una varietà di specifiche grande all'interno dello stabilimento.

Per completare l'analisi si riporta di seguito la Value Stream Map Energetica del Reparto Epitassia per entrambe le specifiche, con la relativa legenda utilizzata in tabella 6.16.

Tabella 6.16. Legenda Reparto Epitassia.

Epitassia	EPI	Ispezionatrice Laser	Ispez
Lavaggio SFC	SFC	Confezionamento	Conf

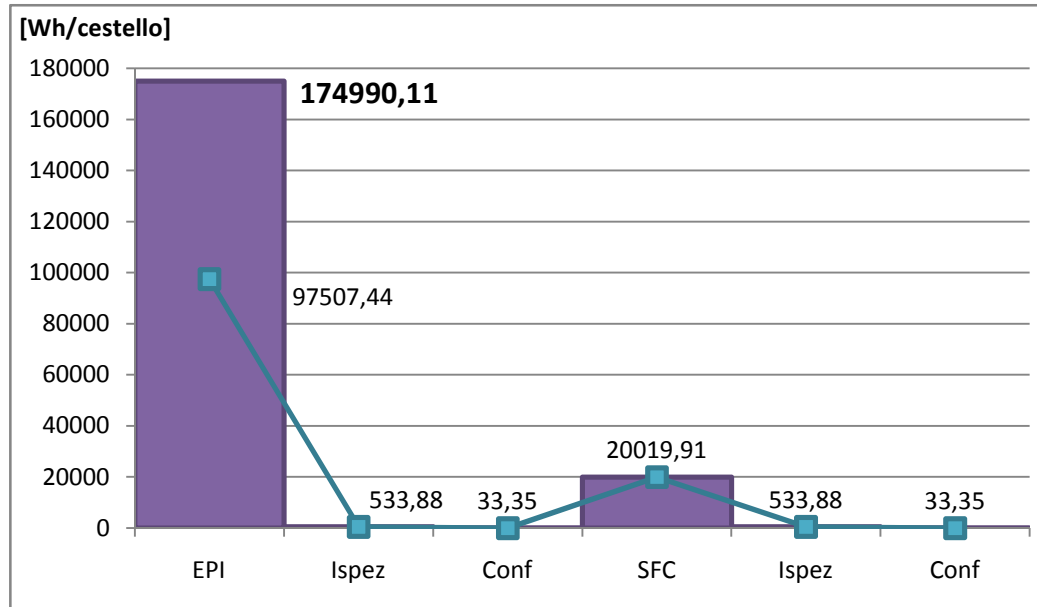


Figura 6.26. Value Stream Map Energetica del Reparto Epitassia specifica A.

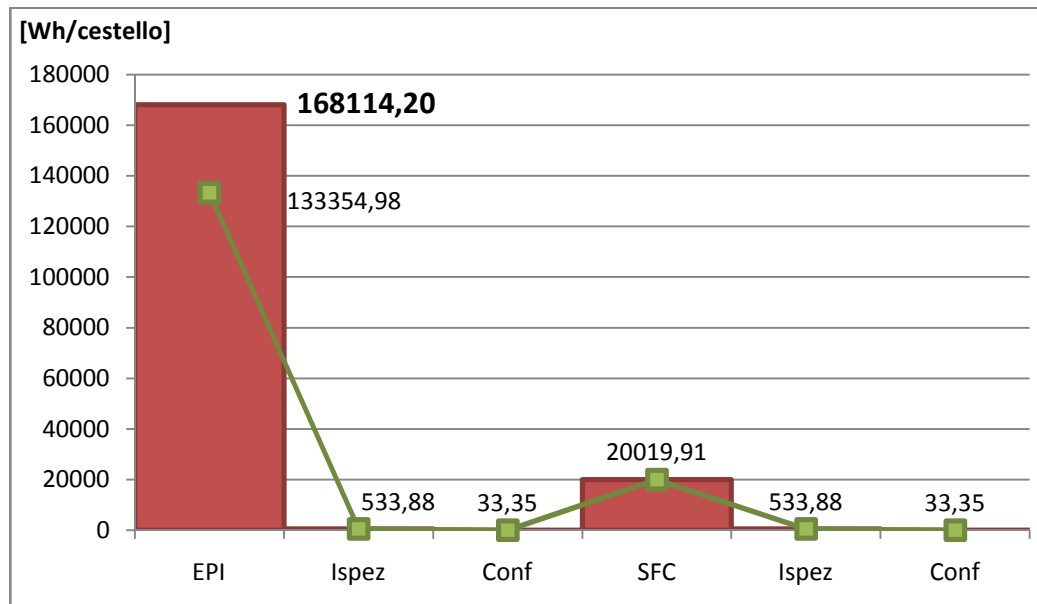


Figura 6.27. Value Stream Map Energetica del Reparto Epitassia specifica C.

7 Conclusioni e Lavoro Futuro

Il mio unico dispiacere è di non poter visitare il mio periodo storico preferito, il vecchio West. Ma viaggiare nel tempo è troppo pericoloso. È meglio che mi dedichi a studiare l'altro grande mistero dell'universo ... le donne!

Dr. Emmett Brown, "Doc"

Il presente Capitolo raccoglie le conclusioni a cui sono giunto al termine del lavoro e un possibile percorso da seguire in futuro per portare avanti l'impegno contro la lotta agli sprechi.

7.1 Conclusioni

Di seguito si riportano i risultati raggiunti durante lo studio effettuato.

La tabella 7.1 riassume l'analisi svolta nel precedente Capitolo, indicando la macchina che può comportare un risparmio, la causa dello spreco e il possibile risparmio stimato, rispondendo così alle domande che mi sono posto durante il lavoro di questi mesi, cioè:

- 1) Dove agire?
- 2) Come agire?
- 3) Quanto è possibile risparmiare?

Tabella 7.1. Riassunto delle soluzioni individuate.

DOVE	COME	QUANTO
Taglierina a filo	Cambio di tecnologia	8500 €/anno
Lappatrice	Sostituzione motori	1000 €/anno
Forno per Deposizione poly	Utilizzo inverter	3360 €/anno
Lucidatrice	Sostituzione luci e motori, controllo ventilazione	4800 €/anno

L'analisi svolta sui reattori per la deposizione dello strato epitassiale, evidenzia che in generale la seconda tipologia sia sempre più vantaggiosa, sia in termini di produttività perché i tempi ciclo sono inferiori, sia per quanto riguarda il consumo di energia. In generale è possibile ritenere che se ci fosse la possibilità, converrebbe utilizzare sempre la seconda tipologia. In realtà per compiere un lavoro maggiormente attendibile, bisognerebbe tenere in considerazione i tempi di set-up delle macchine. Infatti, la seconda tipologia ha un periodo più lungo di settaggio, il che potrebbe portare ad un esito finale opposto a quello desiderato, sia in termini di produttività, che di consumi, in particolar modo quando si lavorano lotti piccoli.

Riproponendo il grafico 6.17, ma eliminando la deposizione epitassiale, ne nasce la figura 7.1, rappresentata di seguito.

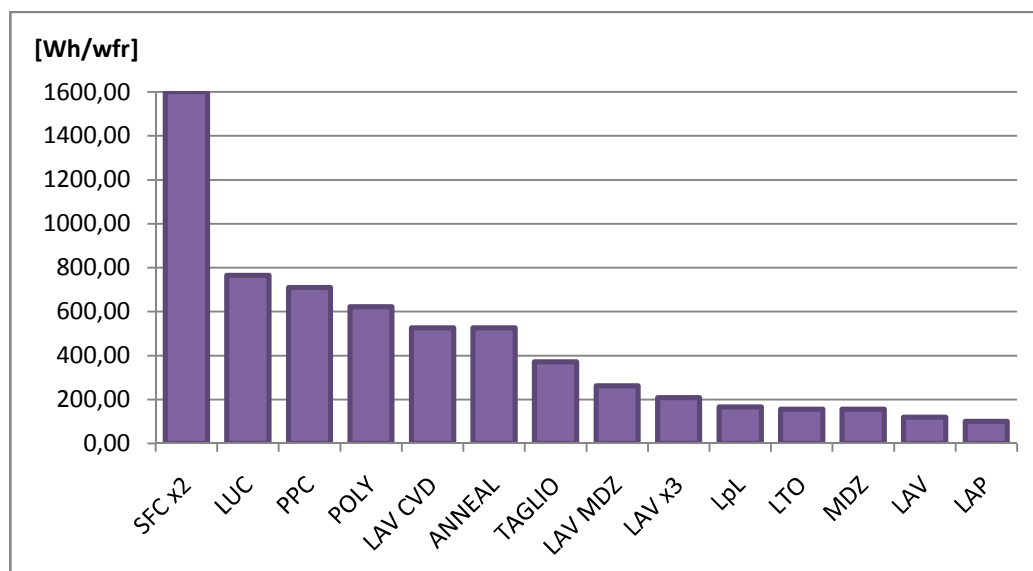


Figura 7.1. Confronto tra i casi base dei processi energy intensive, senza epitassia.

Tolto il processo di epitassia, si nota che i lavaggi forniscono un contributo sostanziale alla spesa energetica. Purtroppo non è stato possibile fare dei confronti, perché le macchine sono diverse e uniche nel loro genere all'interno dello stabilimento. In particolar modo, focalizzando l'attenzione sulle prime tre postazioni occupate in figura 7.1, risaltano il Lavaggio SFC e PPC. Tutti i wafers prodotti nello stabilimento sicuramente subiscono queste operazioni nel Reparto di Cleaning. Un efficientamento di questi processi di lavaggio potrebbe dunque comportare un grande risparmio.

È stato poi costruito un grafico in cui in ascissa è posto il consumo annuo espresso in [MWh/anno], mentre sulle ordinate è mostrato il risparmio percentuale che si otterrebbe con le attività individuate.

Il primo quadrante identifica processi ad elevato consumo e risparmio potenziale elevato. Il secondo quadrante mostra processi a basso consumo e risparmio elevato. Nel terzo sono posti tutti quei processi a basso consumo e basso risparmio. Infine il quarto e ultimo quadrante evidenzia i processi ad elevato consumo e basso risparmio.

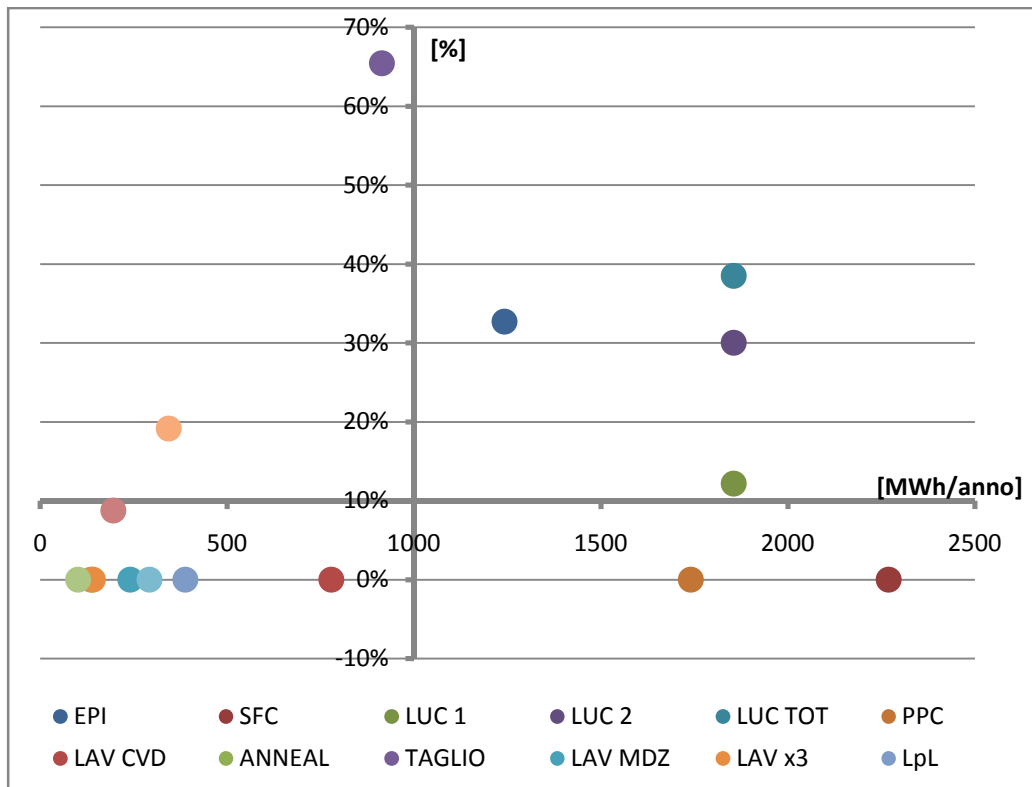


Figura 7.2. Grafico priorità di investimento.

Tabella 7.2. Consumi annui e percentuali di risparmio.

	CASO BASE [MWh/anno]	%
EPI	1242,27	33
SFC	2269,54	0
LUC 1	1855,20	12
LUC 2	1855,20	30
LUC TOT	1855,20	39
PPC	1740,81	0
LAV CVD	778,60	0
ANNEAL	136,54	0
TAGLIO	913,63	65
LAV MDZ	241,12	0
LAV x3	140,61	0
LpL	388,51	0
LTO	195,93	9
MDZ	101,26	0
LAV	292,36	0
LAP	343,75	19

Le abbreviazioni corrispondono a quelle utilizzate in precedenza. Per la Lucidatura con la dicitura 1 si indica la sostituzione dell'impianto d'illuminazione e ventilazione, con 2 si indica la sostituzione dei motori e con TOT si indica l'insieme delle due soluzioni.

Il risparmio del processo di epitassia è una media ponderata delle due percentuali di risparmio delle specifiche considerate. Il valore è molto approssimativo perché, come già detto, la dipendenza dalle richieste del cliente si dimostra forte.

Il grafico permette di assegnare un ordine di priorità agli investimenti, seguendo l'ordine crescente dei quadranti. Per quei processi in cui la specifica influenza fortemente i consumi, i dati utilizzati non sono molto accurati. Inoltre per ottenere i valori totali annui si è considerato di sfruttare tutto il parco macchine. Il grafico può essere utilizzato comunque per avere una prima idea sulla convenienza o meno dell'investimento. Il punto di origine è stato posto per le ordinate sul valore di 10%, mentre per le ascisse su 1000 MWh/anno.

Si nota, infatti, come risultano allettanti gli investimenti nelle lucidatrici e nei reattori di epitassia. La taglierina a filo spicca avendo un alto risparmio e trovandosi quasi al limite tra il 1° e il 2° quadrante. In successione poi abbiamo la lappatrice. Non è stato inserito il reattore per la deposizione del polisilicio, poiché nel caso da noi considerato l'inverter che porterebbe all'efficientamento è già installato. Infine, come già affermato precedentemente, l'efficientamento del reattore LTO non è conveniente, rientrando per l'appunto nel terzo quadrante.

Consideriamo ora di avere un'azienda media per la produzione di wafers di silicio. Si può stimare il saving totale per queste opere di efficientamento. Ipotizziamo di avere un parco macchine di 10 taglierine a filo, 10 lappatrici e 20 lucidatrici. Si immagini poi di avere 2 forni per la deposizione di polisilicio già comprensivi di pompe con l'inverter. Il parco macchine utilizzato per questa stima è ipotizzato e non rispecchia l'effettivo parco macchine dell'azienda, affinché non vengano rivelati dati sensibili della ditta, come per esempio la capacità di produzione annua. Di seguito vengono riportati i costi approssimativi degli investimenti.

Per il cambio di tecnologia delle taglierine sono necessari circa 45.000 € per macchina.

Per l'installazione dei motori per le lappatrici sono necessari 6.000 € e 12.000 € per gli azionamenti nuovi.

Per l'utilizzo dell'inverter è necessario l'acquisto di un'interfaccia per il controllo dell'inverter di circa 800 € per macchina.

Per le lucidatrici sono stimati dei costi di 500 € per la sostituzione dei led comprensiva di manodopera e di 450 € per motore da sostituire e 320 € di manodopera per motore.

È possibile costruire la tabella 7.2 in cui si evidenziano le stime dei ricavi, dei costi e il punto di ritorno dell'investimento.

Tabella 7.3. Stima dell'investimento sul parco macchine.

	Ricavi	Costi	Pay Back Period
Taglierina a filo	85.000 €/anno	450.000 €	5 anni e 3 mesi
Lappatrice	10.000 €/anno	180.000 €	18 anni
Forno per Deposizione poly	6.720 €/anno	1.600 €	3 mesi
Lucidatrice	96.000 €/anno	56.200 €	7 mesi

La tabella mette in luce la convenienza dell'investimento di efficientamento delle lucidatrici. Se anche la stima fosse sbagliata del 50%, l'investimento sarebbe recuperabile in un anno e due mesi. È inoltre conveniente acquistare l'interfaccia per il controllo dell'inverter così da poterlo testare e avere dati effettivi. Il risparmio potrebbe essere largamente superiore, così da poter comprare delle nuove pompe provviste di inverter per sostituire quelle vecchie. Risultato comunque soddisfacente sarebbe anche quello di scoprire che il risparmio ottenuto non giustifica l'investimento in pompe nuove. Per quanto riguarda le taglierine sembra che l'investimento sia sconveniente, ma l'analisi che bisognerebbe svolgere è molto più ampia, in quanto si dovrebbe tenere conto dell'incremento di produttività che questa nuova soluzione fornisce, variabile che è stata trascurata. Infine si nota come investire nelle lappatrici sia ampiamente sconveniente e sconsigliato. Il risparmio non giustifica assolutamente l'investimento richiesto.

Occorre poi ricordare che l'analisi svolta si è focalizzata sui consumi effettivi dei macchinari. Infatti, i consumi totali annui sono di per sé conosciuti da parte dell'impresa. I valori energetici che sono stati ottenuti, sono depurati da tutti gli ausiliari, come gli impianti di condizionamento dei reparti e gli impianti di trattamento per l'acqua.

Ciò detto si può affermare che:

- 1) possono essere trovate nuove opere di efficientamento per migliorare organi connessi al processo, per quanto concerne gli ausiliari;
- 2) i risparmi energetici calcolati nel capitolo precedente possono essere stati sottostimati.

Senza soffermarsi sulla prima, è necessario chiarire la seconda affermazione. La maggior parte delle macchine, nel periodo in cui non stanno processando del materiale, restano accese a pieno regime, pronte per accogliere nuovi wafers da lavorare. Infatti, per poter utilizzare alcuni macchinari, i tempi di avviamento sono lunghi, dunque solitamente non è possibile spegnerle. Come visto nel paragrafo 7.1 un caso evidente risulta essere quello del forno per la deposizione del polisilicio. Altro semplice esempio riguarda l'illuminazione delle lucidatrici, in quanto le luci delle macchine sono sempre accese.

Tutto questo fa pensare che il lavoro non è ancora finito, ma che ne è stata svolta una prima parte.

7.2 Lavoro Futuro

Il lavoro svolto ad oggi ha permesso di individuare alcune opere di efficientamento sulla catena produttiva. Non essendo mai stato realizzato prima un lavoro sistematico di controllo dei consumi, l'attenzione è stata posta soprattutto ad identificare alcune grandi aree d'interesse. Il lavoro compiuto è un primo passo per poter permettere all'azienda di crescere.

7.2.1 Nuove analisi

Il primo passo da compiere sarà quello di concludere i controlli sulle macchine della categoria *energy intensive*, per le quali non sono state fatte indagini ulteriori. Sarà poi possibile indagare il resto del parco macchine tramite controlli più accurati, con un occhio di riguardo all'operazione di Bordo Lucido, come detto nel paragrafo 6.2.2. Si consiglia poi di investire del tempo per studiare maggiormente le macchine di lavaggio, le quali possono portare ad ottenere degli ottimi risultati in termini di saving. Infatti le vasche per il lavaggio hanno due possibili disposizioni delle resistenze per il riscaldamento. Si potrebbe dunque individuare se una di esse è più vantaggiosa rispetto all'altra.

È stato poi evidenziato come la seconda tipologia di reattore per la deposizione epitassiale possa comportare dei grandi risparmi. In generale la sostituzione dei reattori sarebbe sicuramente la soluzione preferibile. Ciò detto il costo di questi macchinari è elevato, dunque non è certa la possibilità di affrontare nel breve periodo l'investimento. Si è visto però che il tipo di specifica trattata influenza molto l'operazione da svolgere e dunque gli assorbimenti. In primo luogo bisognerà completare la raccolta dati di tutte le possibili "ricette" utilizzate per entrambe le tipologie di reattore. Fatto ciò sarà possibile capire quale specifica comporta maggiori risparmi, se utilizzata nel secondo reattore piuttosto che nel primo. Sarà dunque possibile costruire un modello decisionale che indicherà su quale macchina conviene indirizzare il flusso di materiale. In questo modello bisognerà tenere conto dei tempi di set-up, perché potrebbero influenzare in maniera significativa la scelta.

Come già detto nel paragrafo precedente, l'analisi realizzata da me si è focalizzata sul processo, individuando dunque gli sprechi connessi alla

lavorazione. Bisognerà poi valutare di indagare metodi di efficientamento per le macchine che trascorrono parte del loro tempo in una situazione di standby, perché nonostante non stiano processando nessun wafer, i loro assorbimenti rimangono in ogni caso molto alti, essendo accese per essere pronte ad un nuovo carico di materiale. Sarà importante poi analizzare i consumi di tutti gli ausiliari dell'impianto. In particolar modo tutti i reparti hanno una temperatura controllata, per tutto l'anno. Gli assorbimenti dei macchinari non varieranno durante le stagioni, ma i climatizzatori saranno fortemente influenzati dalla temperatura esterna. Una ricerca in questi termini, sugli impianti di condizionamento, può permettere un grande risparmio, se i sistemi non sono già ottimizzati. Per concludere bisogna sottolineare che alcuni edifici sono dei prefabbricati. Una ricerca in termini di isolamento dall'ambiente esterno, potrebbe comportare delle notevoli riduzioni di consumi.

7.2.2 Certificati Bianchi

Con le opere di efficientamento individuate nelle precedenti analisi, la società ha la possibilità di accedere al sistema d'incentivazione dei certificati bianchi come soggetto volontario. Si può quindi operare per richiedere i Titoli di Efficienza Energetica, i quali comporterebbero una nuova entrata per successivi investimenti. Inoltre l'azienda è collocata nel polo industriale di Novara, punto notoriamente considerato dall'opinione pubblica come inquinante. Impegnarsi per ridurre i propri consumi e avere un riconoscimento statale per il lavoro compiuto, oltre che una diminuzione di costi e un maggior rispetto ambientale, può comportare un beneficio d'immagine da parte dell'opinione pubblica. L'azienda, infatti, può proporsi come promotrice per una campagna d'informazione per la cittadinanza, che certamente a livello territoriale e non solo, può essere un'ottima pubblicità. Steve Jobs ha affermato che:

“Investire in pubblicità in un momento di crisi, è come mettersi le ali, mentre gli altri precipitano.”

Dopo il lavoro di questo periodo di stage sono giunto a concludere che:

“Investire nell'EFFICIENZA ENERGETICA in un momento di crisi, è come mettersi le ali, mentre gli altri precipitano.”

*E quindi uscimmo a riveder le
stelle.*

Dante Alighieri

Bibliografia

- [1] William F. Smith, Javad Hashemi, *Scienza e Tecnologia dei Materiali*, The McGraw-Hill, Terza Edizione, 2008, Cap 15 pp 613-639.
- [2] Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, Cengage Learning, Fifth Edition, 2005, Cap 19, pp 719-744.
- [3] <http://www.laureaelettronica.ing.univpm.it>
- [4] Sohail Anwar, Barney L. Capehart, *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology - 3 Volume Set*, CRC Press, 2007, Chapter 61.
- [5] <http://unfcc.int/2860.php>
- [6] <http://www.europarl.europa.eu>
- [7] <http://www.agenziaentrate.gov.it>
- [8] <http://www.gse.it>
- [9] <http://www.mercatoelettrico.org>
- [10] Decreto Ministeriale 28 dicembre 2012
- [11] <http://www.enea.it/en>
- [12] <http://www.eco-newsperiodico.com/primo-piano/2013/5/efficienza-energetica-ruolo-centrale-per-il-nostro-paese.aspx>
- [13] <http://www.itimarconi.ct.it>
- [14] Peter Van Zant, *Microchip Fabrication*, The McGraw-Hill, Fifth Edition, 2004, pp. 52-60.
- [15] Toshiyuki Tsuchiya, *Comprehensive Microsystems - 3 Volume Set*, Elsevier Science, 2007, Volume 1, pp. 1-23.
- [16] Z.J. Pei, Graham R. Fisher, J. Liu, Grinding of silicon wafers: A review from historical perspectives. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008), pp 1297– 1307.

- [17] W.I. Clarka, A.J. Shih, C.W. Hardin, R.L. Lemaster, S.B. McSpadden, Fixed abrasive diamond wire machining-part I: process monitoring and wire tension force. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 2003, pp 523-532.
- [18] H.J. Moller, Wafering of silicon crystals, *Physica Status Solidi (A)-Applications and Materials* 203 (4), 2006, pp 659–669.
- [19] H.J. Moller, Basic mechanisms and models of multi-wire sawing, *Advanced Engineering Materials* 6 (7), 2004, pp 501–513.
- [20] Arve Holt, Annett Thøgersen, Carsten Rohr, Jan – Inge. Bye, Geir Helgesen, Ørnulf Nordseth, Sten Aksel Jensen, Lasse. Norheim and Øyvind Nielsen, Surface structure of mono-crystalline silicon wafers produced by diamond wire sawing and by standard slurry sawing before and after etching in alkaline solutions, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2010 35th IEEE.
- [21] Materiale interno all'azienda.
- [22] UNI EN ISO 2813.
- [23] UNI ISO 468,4287 (al posto di UNI 3963).
- [24] <http://www.astm.org/>
- [25] W.J. Liu, Z.J. Pei, X.J. Xin, Finite element analysis for grinding and lapping. *Journal of Materials Processing Technology* 129, 2002, pp 2-9.
- [26] Ioan Marinescu, Ion Benea, and Naga Jyothi Sanku, *Handbook of Lapping and Polishing*, CrC Press, 2006, Chapter 3.
- [27] Kazuo Sato and Mitsuhiro Shikida, *Comprehensive Microsystems - 3 Volume Set*, Elsevier Science, 2007, Volume 1, pp 188
- [28] Peter Van Zant, *Microchip Fabrication*, The McGraw-Hill, Fifth Edition, 2004, pp. 261-262.
- [29] Wen Lin, Howard Huff, *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, CrC Press, Second Edition, 2007, Chapter 3, pp 46-47.
- [30] Peter Van Zant, *Microchip Fabrication*, The McGraw-Hill, Fifth Edition, 2004, pp. 92-96.
- [31] Li-Qun Xia, Mei Chang, *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, CrC Press, Second Edition, 2007, Chapter 13.

- [32] M. Saif Islam, Chad Johns, Joanna R. Groza, *Materials Processing Handbook*, CrC Press, 2007, Chapter 8.
- [33] Li-Qun Xia, Mei Chang, *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, CrC Press, Second Edition, 2007, Chapter 13, pp 62-63.
- [34] Peter Van Zant, *Microchip Fabrication*, The McGraw-Hill, Fifth Edition, 2004, pp. 160-162.
- [35] P. J. Timans, *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, CrC Press, Second Edition, 2007, Chapter 11, pp 1-2, 74-75.
- [36] Wen Lin, Howard Huff, *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, CrC Press, Second Edition, 2007, Chapter 3, pp 64.
- [37] Jerzy Ruzyllo, *Semiconductor Glossary*, Prosto Publishing Multimedia, First Edition, 2004, pp. 32, 62.
- [38] Gregory B. Shinn, Vincent Korthuis, Gautum Grover, Simon Fang, Duane S. Boning, *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, CrC Press, Second Edition, 2007, Chapter 17, pp 4.
- [39] Gerd Nanz and Lawrence, E. Camilletti, *Modeling of Chemical-Mechanical Polishing: A Review*. *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, Vol. 8, no. 4, November 1995.
- [40] Peter Van Zant, *Microchip Fabrication*, The McGraw-Hill, Fifth Edition, 2004, pp. 160-162.
- [41] Wen Lin, Howard Huff, *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*, CrC Press, Second Edition, 2007, Chapter 3, pp 48.
- [42] Werner Kern, *The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology*, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 137, No. 6, 1990, pp. 1887-1892.
- [43] Mitsushi Itano, Frederick W. Kern, Jr., Masayuki Miyashita, and Tadahiro Ohmi, *Particle Removal from Silicon Wafer Surface in Wet Cleaning Process*, *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*. Vol 6, No 3, 1993, pp. 258-267.
- [44] Peter Van Zant, *Microchip Fabrication*, The McGraw-Hill, Fifth Edition, 2004, pp. 120-132.
- [45] Peter Van Zant, *Microchip Fabrication*, The McGraw-Hill, Fifth Edition, 2004, pp. 385-392.

Appendice A

	L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P _{media}	t	n. wfr	E _{medio}	E _{spec}	E' _{medio}	E' _{spec}
ORIEN	2,5	0	0	2,50	230	no	0,58	108	296	62	0,21	17	0,06
WS	20,73	29,67	29,35	26,58	400	si	16,58	26460	328	438596	1337,18	121832	371,44
DEOL	3,5	3,5	3	3,33	395	si	2,05	1078	370	2212	5,98	614	1,66
SCOL	16,81	18,67	17,72	17,73	395	si	10,92	851	370	9297	25,13	2582	6,98
LAV TAGLIO	21,61	18,15	25,69	21,82	399	si	13,57	1482	47	20111	427,89	5586	118,86
PARAM	3	0	0	3,00	230	no	0,69	1307	217	902	4,16	251	1,15
EG	2,71	1,47	2,13	2,10	396	si	1,30	5216	138	6773	49,08	1881	13,63
BO	2,56	0	0	2,56	230	no	0,59	972	135	572	4,24	159	1,18
LASER	6,86	6,75	8,09	7,23	396	si	4,47	4309	126	19241	152,71	5345	42,42
												TOTALE:	557,38

Figura A.1. Consumi Reparto Taglio specifica A.

	L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P _{media}	t	n. wfr	E _{medio}	E _{spec}	E' _{medio}	E' _{spec}
ORIEN	2,5	0	0	2,50	230	no	0,58	108	296	62	0,21	17	0,06
WS	20,73	29,67	29,35	26,58	400	si	16,58	26460	328	438596	1337,18	121832	371,44
DEOL	3,5	3,5	3	3,33	395	si	2,05	1078	370	2212	5,98	614	1,66
SCOL	16,81	18,67	17,72	17,73	395	si	10,92	851	370	9297	25,13	2582	6,98
LAV TAGLIO	21,61	18,15	25,69	21,82	399	si	13,57	1482	47	20111	427,89	5586	118,86
PARAM	3	0	0	3,00	230	no	0,69	1307	217	902	4,16	251	1,15
EG	2,71	1,47	2,13	2,10	396	si	1,30	6458	138	8386	60,76	2329	16,88
BO	2,56	0	0	2,56	230	no	0,59	972	135	572	4,24	159	1,18
LASER	6,86	6,75	8,09	7,23	396	si	4,47	4309	126	19241	152,71	5345	42,42
												TOTALE:	560,63

Figura A.2. Consumi Reparto Taglio specifica C.

APPENDICE A

	L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P _{media}	t	n. wfr	E _{medio}	E _{spec}	E _{medio}	E _{spec}
LAP	21,38	20,93	23,56	21,96	392	si	13,43	506	19	6792	359,35	1887	99,82
LpL	17,22	20,15	19,67	19,01	394	si	11,69	2160	42	25242	596,75	7012	165,76
ACID	15,48	15,70	17,26	16,14	396	si	9,95	262	22	2610	119,18	725	33,10
LAV CVD	27,73	28,66	20,73	25,71	392	si	15,72	4013	33	63087	1891,67	17524	525,46
POLY	43,30	38,17	35,42	38,96	399	si	24,26	8501	92	206217	2241,49	57282	622,64
LTO	15,82	18,97	20,09	18,29	399	si	11,39	6445	131	73389	560,22	20386	155,62
TAP	3,6	0	0	3,6	230	no	0,83	2232	124	1848	14,90	513	4,14
STRIP	1	0	0	1	230	no	0,23	345	43	79	1,83	22	0,51
DETAP	1,2	0	0	1,2	230	no	0,28	3125	124	862	6,96	240	1,93
RISCIAC	4,9	0	0	4,9	230	no	1,13	360	43	406	9,35	113	2,60
BL	6,45	6,3	6,2	6,32	396	si	3,90	8482	152	33072	217,58	9187	60,44
ASCIUGA	6	0	0	6	230	no	1,38	444	45	613	13,53	170	3,76
IRT	1,4	3,2	3,26	2,62	396	si	1,62	169	160	273	1,71	76	0,47
IV	-	-	-	-	-	si	0,02	410	20	6	0,31	2	0,09
PARAM	3	0	0	3	230	no	0,69	1616	117	1115	9,53	310	2,65
												TOTALE:	1678,98

Figura A.3. Consumi Reparto Lappatura specifica A.

	L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P _{media}	t	n. wfr	E _{medio}	E _{spec}	E _{medio}	E _{spec}
LAP	21,38	20,93	23,56	21,96	392	si	13,43	751	19	10079	533,27	2800	148,13
LpL	17,22	20,15	19,67	19,01	394	si	11,69	2160	37	25242	674,93	7012	187,48
CAUS	3,51	2,03	1,72	2,42	399	si	1,50	1256	19	1885	98,70	524	27,42
LAV MDZ	27,73	28,66	20,73	25,71	392	si	15,72	2520	42	39618	943,29	11005	262,03
MDZ	13,30	13,68	10,99	12,66	394	si	7,77	1534	21	11917	559,49	3310	155,41
ANNEAL	30,87	38,12	52,58	40,52	399	si	25,21	7320	98	184522	1890,60	51256	525,17
LAV TH	4,11	4,86	14,15	7,71	399	si	4,80	2193	42	10521	250,51	2923	69,59
BB	14,61	12,77	13,52	13,63	400	si	8,49	695	18	5904	326,20	1640	90,61
LAV BB	4,11	4,86	14,15	7,71	399	si	4,80	2193	42	10521	250,51	2923	69,59
BL	6,45	6,3	6,2	6,32	396	si	3,90	17222	138	67155	486,63	18654	135,18
LAV BL	4,11	4,86	14,15	7,71	399	si	4,80	2193	42	10521	250,51	2923	69,59
IRT	1,4	3,2	3,26	2,62	396	si	1,62	169	160	273	1,71	76	0,47
IV	-	-	-	-	-	no	0,02	410	19	6	0,32	2	0,09
PARAM	3	0	0	3	230	no	0,69	1616	117	1115	9,53	310	2,65
												TOTALE:	1743,39

Figura A.4. Consumi Reparto Lappatura specifica C.

	L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P _{media}	t	n. wfr	E _{medio}	E _{spec}	E' _{medio}	E' _{spec}
CAPP	1,8	2,3	0,1	1,4	400	si	0,87	541	45	472	10,50	131	2,92
LUC	24,41	15,03	11,90	17,11	398	si	10,63	6480	25	68881	2755,24	19134	765,34
												TOTALE:	768,26

Figura A.5. Consumi Reparto Lucidatura entrambe le specifiche.

	L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P _{media}	t	n. wfr	E _{medio}	E _{spec}	E' _{medio}	E' _{spec}
PPC	70,91	57,85	65,31	64,69	394	si	39,74	2700	42	107305	2554,88	29807	709,69
SFC	81,71	83,72	78,23	81,22	389	si	49,19	2520	43	123963	2882,87	34434	800,80
Ispez	11,49	0	0	11,49	232	no	2,67	720	25	1922	76,88	534	21,36
Conf	8,7	0	0	8,7	230	no	2,00	60	25	120	4,80	33	1,33
												TOTALE:	1533,17

Figura A.6. Consumi Reparto Cleaning entrambe le specifiche.

	L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P _{media}	t	n. wfr	E _{medio}	E _{spec}	E _{medio}	E _{spec}
EPI	52,30	70,28	59,42	60,67	485	si	45,85	13740	25	629964	25198,58	174990	6999,60
Ispez	11,49	0	0	11,49	232	no	2,67	720	25	1922	76,88	534	21,36
Conf	8,7	0	0	8,7	230	no	2,00	60	25	120	4,80	33	1,33
SFC	81,71	83,72	78,23	81,22	389	si	49,19	2520	43	123963	2882,87	34434	800,80
Ispez	11,49	0	0	11,49	232	no	2,67	720	25	1922	76,88	534	21,36
Conf	8,7	0	0	8,7	230	no	2,00	60	25	120	4,80	33	1,33
												TOTALE:	7845,78

Figura A.7. Consumi Reparto Epitassia specifica A.

	L1	L2	L3	I	V	TRIFASE	P _{media}	t	n. wfr	E _{medio}	E _{spec}	E _{medio}	E _{spec}
EPI	65,69	58,59	44,35	56,21	484	si	42,38	14280	25	605211	24208,44	168114	6724,57
Ispez	11,49	0	0	11,49	232	no	2,67	720	25	1922	76,88	534	21,36
Conf	8,7	0	0	8,7	230	no	2,00	60	25	120	4,80	33	1,33
SFC	81,71	83,72	78,23	81,22	389	si	49,19	2520	43	123963	2882,87	34434	800,80
Ispez	11,49	0	0	11,49	232	no	2,67	720	25	1922	76,88	534	21,36
Conf	8,7	0	0	8,7	230	no	2,00	60	25	120	4,80	33	1,33
												TOTALE:	7570,74

Figura A.8. Consumi Reparto Epitassia specifica C.