

## **Capitolo 6**

## **Conclusioni**

In questa tesi abbiamo esaminato l'insieme di quei fenomeni (transizioni di fase, processi idrodinamici, etc.) che avvengono quando un impulso laser di notevole potenza colpisce la superficie di un sistema metallico.

A tal fine abbiamo utilizzato, per quanto riguarda l'interazione della radiazione con il sistema e il successivo riscaldamento dello stesso, un modello basato sull'equazione della conduzione del calore con opportune condizioni al contorno per tenere conto delle transizioni di fase.

Il calcolo della temperatura in un sistema di riferimento solidale con la superficie del sistema irraggiato ci ha permesso di risolvere il problema costituito dalle condizioni al contorno in presenza di un fenomeno di evaporazione.

Per quanto riguarda il meccanismo di evaporazione abbiamo considerato, per temperature inferiori a quella di ebollizione,  $T_e$ , un modello basato sull'equazione di Clausius-Clapeyron.

Scartando l'ipotesi di un possibile surriscaldamento del campione (ci si è basati a tal fine su alcuni dati sperimentali disponibili in letteratura), con opportune condizioni di bordo abbiamo descritto, per  $T = T_e$ , un processo di ebollizione.

Il modello, nel suo insieme, si è rivelato particolarmente appropriato, permettendoci, infatti, di garantire oltre che la stabilità anche la convergenza delle soluzioni numeriche con l'utilizzo di intervalli spaziali e temporali non troppo piccoli e quindi con tempi di calcolo relativamente brevi (con un calcolatore modello VAX6320 lo studio dell'intero processo di riscaldamento, esclusa solo la parte riguardante la dinamica del gas evaporato, ha richiesto un tempo di CPU di poco superiore all'ora; includendo lo studio della dinamica del gas evaporato il tempo di CPU richiesto è salito a circa 15 ore).

Dai risultati ottenuti è emerso, in particolare, che il processo di ebollizione, rispetto a quello dell'evaporazione semplice, è di gran lunga più efficace nel rimuovere gli strati atomici superficiali del sistema.

Le informazioni sulla velocità di evaporazione, sulla densità e sulla temperatura del gas emesso sono state utilizzate per studiare la dinamica nel dominio spazio-temporale del gas stesso.

A tal fine abbiamo utilizzato le equazioni dell'idrodinamica, valide per flussi di par-

ticelle che si possono considerare localmente in equilibrio termico.

In particolare abbiamo considerato due possibili sviluppi descritti rispettivamente dal modello ad effusione e dal modello a riconsolazione.

L'algoritmo di calcolo utilizzato è relativamente nuovo per questi processi idrodinamici caratterizzati da condizioni al contorno di riflessione e di riconsolazione ed è basato sul metodo di Godunov.

I risultati ottenuti in questa seconda parte del nostro lavoro di tesi, pur non avendo ancora la possibilità di una verifica sperimentale, si accordano bene (quando è possibile un confronto) con quelli esposti in recenti pubblicazioni.

Rispetto a quest'ultimi, però, il nostro modello è in grado di collegare l'evoluzione del gas direttamente alla dinamica di emissione "reale" cosa questa che, per quanto è a nostra conoscenza, non era mai stata fatta in passato.

Alla luce dei risultati ottenuti possiamo affermare, quindi, che il nostro è stato il primo studio in grado di collegare (nel caso di sistemi irraggiati con impulsi laser), la dinamica dello sputtering primario a quella dello sputtering secondario.

Rispetto agli obiettivi che ci eravamo prefissati, ovvero lo sviluppo di un modello unificante che permettesse di avere una visione completa dei processi idrodinamici generati da impulsi laser di notevole potenza, abbiamo compiuto quindi un primo passo in avanti.

Le informazioni ottenibili sulla base del modello sviluppato dovrebbero già poter consentire una migliore comprensione di quanto avviene nei processi di "scrittura" laser in microelettronica (basti pensare, ad esempio, che siamo in grado di calcolare la profondità del "cratere" che si viene a formare in seguito ad irraggiamento laser).

Allo stesso tempo la conoscenza della densità del gas evaporato in funzione delle coordinate spazio-temporali potrebbe essere di supporto nello sviluppo delle tecniche di deposizione di film sottili e, in modo particolare, nella deposizione di materiali superconduttori ad alta temperatura.

Tuttavia rimangono ancora delle difficoltà da superare quando si voglia, per esempio, tener conto della presenza dello strato di Knudsen, vicino alla superficie di emissione delle particelle.

Per quanto riguarda invece il problema di un calcolo più preciso delle velocità di flusso in prossimità del fronte di evaporazione, questo può essere risolto utilizzando degli intervalli spaziali più piccoli e quindi disponendo di calcolatori più veloci.