

Indice

Indice	i
Indice delle Figure	iv
Indice delle Tavole	vii
Introduzione	1
1 Meccanismi principali di sputtering	5
1.1 Introduzione	6
1.2 Meccanismi primari dello sputtering	7
1.3 Fenomenologia dello sputtering indotto da impulsi laser	16
2 Interazione laser-superfici, trasporto del calore e transizioni di fase	22
2.1 Introduzione	23
2.2 Assorbimento della radiazione laser	23
2.3 Equazione di Fourier	28
2.4 Equazione di trasporto del calore	30
2.4.1 Equazione del calore per sistemi con bordi mobili	31
2.5 Transizioni di fase	32
2.5.1 Concetto di fase	32
2.5.2 Fasi in equilibrio e transizioni di fase	34
2.5.3 Punto critico	37
2.6 La transizione di fase solido-liquido	37
2.6.1 Interfaccia solido-liquido	38
2.7 Transizioni di fase liquido-gas	40
2.7.1 Calcolo della tensione di vapore	42
2.8 Condizioni di non equilibrio	45
2.9 Ebollizione o evaporazione semplice ?	46

3	Equazione di Boltzmann, equazioni della fluidodinamica e dinamica del gas evaporato da una superficie	49
3.1	Introduzione	50
3.2	Equazione di Boltzmann per il trasporto	52
3.3	Un'equazione per i valori medi: l'equazione di Enskog	58
3.4	Grandezze fisiche conservate nei processi collisionali ed equazione di Enskog.	60
3.4.1	Equazione di continuità	60
3.4.2	Conservazione della quantità di moto	61
3.4.3	Conservazione dell'energia cinetica	64
3.5	Le equazioni della gas dinamica	65
3.5.1	Velocità del suono	68
3.6	Equazione per la conservazione dell'energia nel caso del moto adiabatico di un gas ideale: adiabatica di Poisson	69
3.7	Dalle perturbazioni infinitesime alle perturbazioni finite: onde di compressione e di rarefazione	72
3.7.1	Onde d'urto	72
3.7.2	Onde di rarefazione	76
3.7.3	La superficie di contatto	78
3.7.4	Descrizione delle discontinuità	80
3.8	Condizioni di non applicabilità delle equazioni della fluidodinamica	83
3.8.1	Distribuzione delle velocità di un gas che evapora da una superficie	84
3.8.2	Flusso di particelle in assenza di collisioni	86
3.8.3	Passaggio dal regime caratterizzato da assenza di collisioni alla formazione dello strato di Knudsen	88
3.8.4	Lo strato di Knudsen	91
3.9	Modelli semplificati per lo sputtering secondario	93
3.9.1	Modello ad efflusso	94
3.9.2	Modello ad effusione	95
3.9.3	Modello a ricondensazione	99
4	Metodi numerici per la risoluzione dell'equazione del calore e delle equazioni dell'idrodinamica	101
4.1	Introduzione	102
4.2	Descrizione unidimensionale della conduzione termica	102
4.3	Metodo alle differenze finite per la risoluzione dell'equazione di trasporto del calore per sistemi con bordi mobili	103
4.4	Condizioni iniziali, condizioni di bordo, problema delle transizioni di fase e calcolo della velocità di evaporazione	107
4.4.1	Transizioni di fase nell'ambito della trattazione numerica	110
4.5	Caratteristiche dell'impulso laser considerato nel calcolo numerico	112

4.6	Le equazioni della gas-dinamica e il metodo di Godunov	113
4.6.1	Condizioni iniziali e di bordo per l'integrazione delle equazioni dell'idrodinamica con il metodo di Godunov	119
5	Presentazione dei risultati ottenuti	123
5.1	Introduzione	124
5.2	Proprietà fisiche del campione irraggiato ed effetti dell'impulso laser stimati con l'equazione del trasporto del calore	124
5.3	Dinamica del gas generato dall'evaporazione della superficie	136
5.3.1	Risultati del modello ad effusione	137
5.3.2	Risultati del modello a ricondensazione	146
6	Conclusioni	151
	Bibliografia	155

Indice delle Figure

1.1	Meccanismi di sputtering collisionale.	9
1.2	Sputtering collisionale ad urto singolo.	10
1.3	Sputtering collisionale a cascata lineare.	11
1.4	Sputtering a cascata multipla.	12
1.5	Potenziale della molecola nello stato di legame e in quello di antilegame.	14
1.6	Sputtering di Au policristallino.	18
1.7	Sputtering di Al policristallino.	19
1.8	Meccanismo di emissione di goccioline dalla superficie di un campione colpito da più impulsi laser	20
1.9	Sputtering di W policristallino.	21
1.10	Sputtering di un cristallo singolo di Al_2O_3 irraggiato attraverso una maschera di metallo.	21
2.1	Relazione la sezione d'urto e la frequenza della radiazione incidente.	24
2.2	Flusso di calore tra due faccie piane parallele.	29
2.3	Flusso di calore in un sistema con bordi mobili.	31
2.4	Relazione tra pressione e temperatura in condizioni di equilibrio tra più fasi.	35
2.5	Relazione tra volume e temperatura in condizioni di equilibrio tra più fasi.	35
2.6	Punto critico.	37
2.7	Velocità di evaporazione dell'alluminio in funzione della temperatura: valori calcolati sulla base dall'uguaglianza del potenziale chimico tra la fase liquida e quella gassosa in condizioni di equilibrio.	44
2.8	Velocità di evaporazione dell'alluminio in funzione della temperatura: valori calcolati sulla base dell'equazione di Clausius-Clapeyron.	45
2.9	Possibilità di formazione di liquido surriscaldato in metalli attraversati da scariche elettriche.	46
3.1	Urto tra due particelle.	54

3.2	Pressione esercitata su una superficie infinitesima dS dal gas circostante.	62
3.3	Dipendenza del fattore di proporzionalità tra ρ^γ e P dalla temperatura.	71
3.4	Formazione di un fronte d'urto a seguito del cambiamento di velocità della parete a contatto con un gas.	73
3.5	Caratteristiche del gas in un sistema solidale con il fronte d'urto.	74
3.6	Formazione di onde di rarefazione.	77
3.7	Contatto tra due zone del gas con diverse variabili termodinamiche e diversa velocità di flusso.	79
3.8	Suddivisione del piano in 4 zone con dinamiche distinte per il gas.	82
3.9	Valori previsti analiticamente e mediante simulazione per il regime di flusso caratterizzato da assenza di collisioni.	87
3.10	Evoluzione della distribuzione delle velocità nel passaggio attraverso lo strato di Knudsen.	91
3.11	Rappresentazione schematica della formazione dello strato di Knudsen seguito da un regime di flusso caratterizzato da assenza di collisioni (a) e da un'espansione adiabatica non stazionaria (b).	93
3.12	Modello ad efflusso nel vuoto: il gas presente in una riserva finita fugge nel vuoto non appena la parete viene rimossa.	94
3.13	Modello ad efflusso nel vuoto.	95
3.14	Modello ad effusione.	98
3.15	Modello a ricondensazione.	99
4.1	Zona colpita dall'impulso laser a confronto con lo spessore interessato al riscaldamento.	103
4.2	Transizione di fase solido liquido	110
4.3	Discretizzazione del piano t-x	115
4.4	Introduzione dello strato fittizio.	122
5.1	Temperatura della superficie del campione irraggiato con un impulso laser di densità di energia $3.0 J/cm^2$ 1) e $3.3 J/cm^2$ 2).	126
5.2	Velocità di evaporazione (densità di energia dell'impulso laser, E_{im} , pari a $3.0 J/cm^2$).	127
5.3	Velocità di evaporazione ($E_{im} = 3.3 J/cm^2$).	127
5.4	Profondità del cratere ($E_{im} = 3.0 J/cm^2$).	128
5.5	Profondità del cratere ($E_{im} = 3.3 J/cm^2$).	128
5.6	Temperatura della superficie del campione ($E_{im} = 10 J/cm^2$).	129
5.7	Velocità di evaporazione ($E_{im} = 10 J/cm^2$).	129
5.8	Profondità del cratere ($E_{im} = 10 J/cm^2$).	130
5.9	Temperatura del campione ($E_{im} = 3.0 J/cm^2$).	132
5.10	Energia per unità di area contenuta nel campione ($E_{im} = 3.0 J/cm^2$).	132
5.11	Temperatura del campione ($E_{im} = 3.3 J/cm^2$).	133

5.12	Energia per unità di area contenuta nel campione ($E_{im} = 3.3 J/cm^2$).	133
5.13	Temperatura del campione ($E_{im} = 3.0 J/cm^2$).	134
5.14	Energia per unità di area contenuta nel campione ($E_{im} = 10 J/cm^2$).	134
5.15	Variazione della profondità massima dello strato fuso all'aumentare della densità di energia dell'impulso laser.	135
5.16	Densità del gas in funzione della distanza dalla superficie per $t = 22.5 nsec$.	138
5.17	Velocità di flusso in funzione della distanza dalla superficie per $t = 22.5 nsec$.	138
5.18	Densità del gas in funzione della distanza dalla superficie per $t = 25.0 nsec$.	139
5.19	Velocità di flusso in funzione della distanza dalla superficie per $t = 25.0 nsec$.	139
5.20	Densità del gas in funzione della distanza dalla superficie per $t = 27.5 nsec$.	140
5.21	Velocità di flusso in funzione della distanza dalla superficie per $t = 27.5 nsec$.	140
5.22	Densità del gas in funzione della distanza dalla superficie per $t = 29.0 nsec$.	141
5.23	Velocità di flusso in funzione della distanza dalla superficie per $t = 29.0 nsec$.	141
5.24	Densità del gas in funzione della distanza dalla superficie ad istanti diversi.	143
5.25	Velocità di flusso in funzione della distanza dalla superficie ad istanti diversi.	143
5.26	"Dinamica" del gas di PMMA generato da un impulso laser.	145
5.27	Modello a ricondensazione: densità del gas in funzione della distanza dalla superficie per $t = 25.0 nsec$.	147
5.28	Modello a ricondensazione: velocità di flusso in funzione della distanza dalla superficie per $t = 25.0 nsec$.	147
5.29	Modello a ricondensazione: densità del gas in funzione della distanza dalla superficie per $t = 27.5 nsec$.	148
5.30	Modello a ricondensazione: velocità di flusso in funzione della distanza dalla superficie per $t = 27.5 nsec$.	148
5.31	Modello a ricondensazione: densità del gas in funzione della distanza dalla superficie ad istanti diversi.	149
5.32	Modello a ricondensazione: velocità di flusso in funzione della distanza dalla superficie ad istanti diversi.	149

Indice delle Tavole

1.1	Presenza dei vari meccanismi di sputtering primario al variare della specie delle particelle incidenti.	17
3.1	Determinazione della densità e della velocità di un gas in corrispondenza di una discontinuità.	84
5.1	Parametri utilizzati per descrivere l' alluminio.	125
5.2	Principali risultati ottenuti simulando l'irraggiamento di un campione di alluminio con impulsi laser di 30 <i>nsec</i>	131