



INO-CNR
ISTITUTO
NAZIONALE DI
OTTICA

La “sempre discussa” teoria delle sheaths: scariche di plasma per applicazioni tecnologiche

Andrea MACCHI *

Simposio

**“Le tecnologie del vuoto
a supporto di uno stile
di vita sostenibile”**

**Fiera di Milano, Rho,
19 Novembre 2010**

INO Research Unit “Adriano Gozzini”

CNR Research Area, Pisa, Italy

***also at Dipartimento di Fisica “Enrico Fermi”,
Largo Bruno Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy
www.df.unipi.it/~macchi**



MOTIVAZIONI

Domanda: perché invitare un fisico “teorico” a parlare della “teoria” di un problema classico di fisica dei plasmi in questo contesto prevalentemente tecnologico e industriale?

Mia interpretazione: illustrare brevemente e possibilmente “senza equazioni” un terreno comune a problemi teorico-modellistici interessanti e “*challenging*” ed allo sviluppo di applicazioni avanzate.

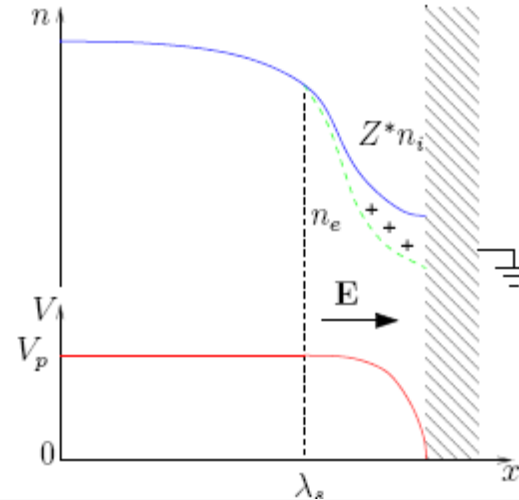
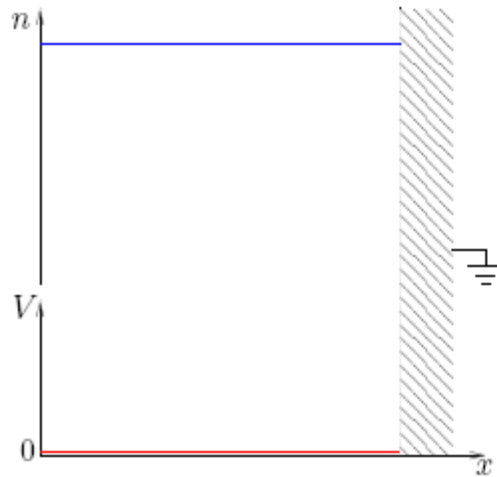
Mia esperienza di base: ricerca in fisica dei plasmi (*non* “industriali”) e insegnamento universitario di “Plasmi a bassa temperatura”



- [**LL**] M.A. Lieberman, A.J.Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, 2nd Ed. (Wiley, 2005)
- [**LW**] M.A.Lieberman's web page:
<http://www.eecs.berkeley.edu/~lieber/>
- [**RR**] J. Reece Roth, *Industrial Plasma Engineering*, vol.1 & 2 (IoP, 2001)
- [**KO**] K. Ostrikov, “*Colloquium: Reactive plasmas as a versatile nanofabrication tool*”, *Reviews of Modern Physics* **77**, 489 (2005)



SHEATH : CONCETTO DI BASE

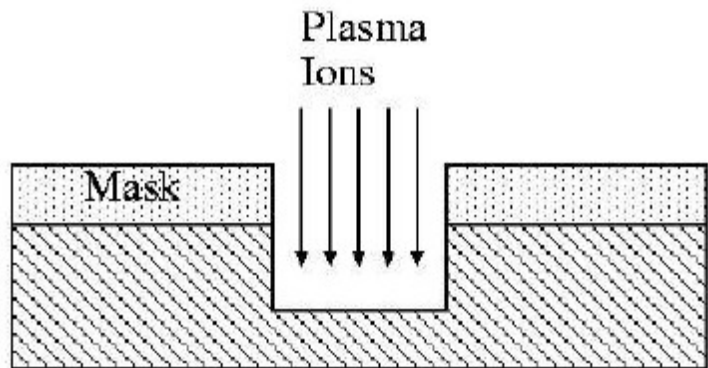


Gli elettroni del plasma grazie alla loro piccola massa tendono a separarsi dagli ioni generando una regione carica (*sheath*) ed un campo elettrostatico \mathbf{E} .

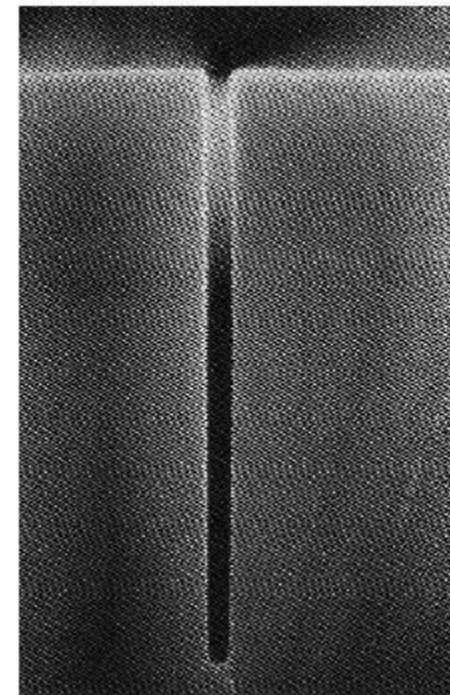
Il campo \mathbf{E} accelera gli ioni che nella configurazione mostrata (plasma-parete conduttrice) “bombardano” la parete



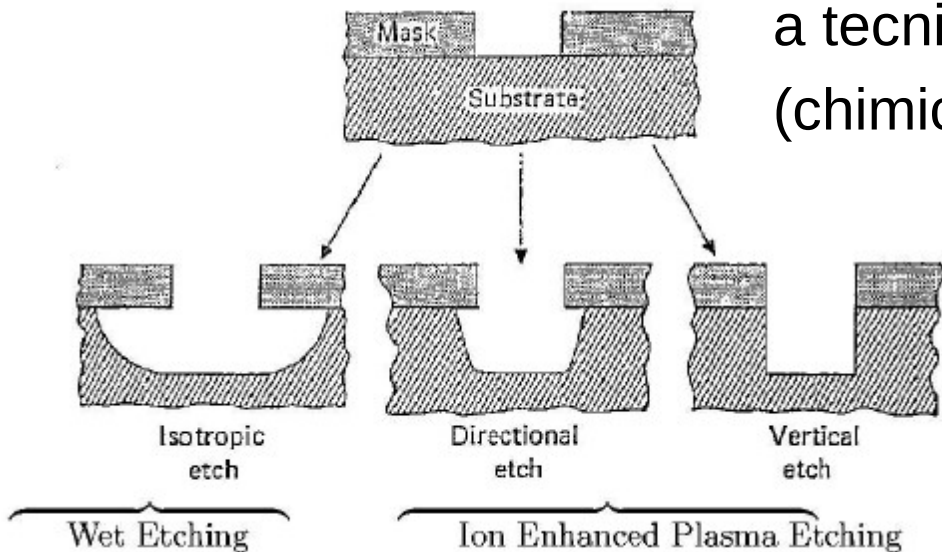
APPLICAZIONI: PLASMA ETCHING



“Plasma etching”
anisotropico
consente micro-
incisioni molto più
direzionali rispetto
a tecniche “wet”
(chimiche)



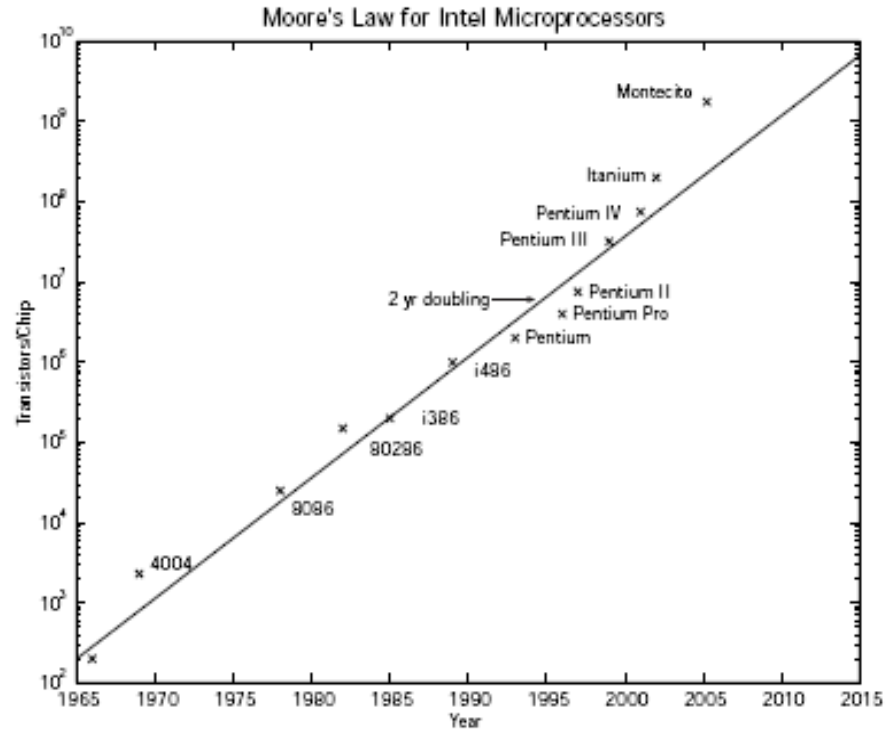
Incisione di
 $0.2 \times 4 \mu\text{m}$ in Si



(v. [LL], Cap.1)



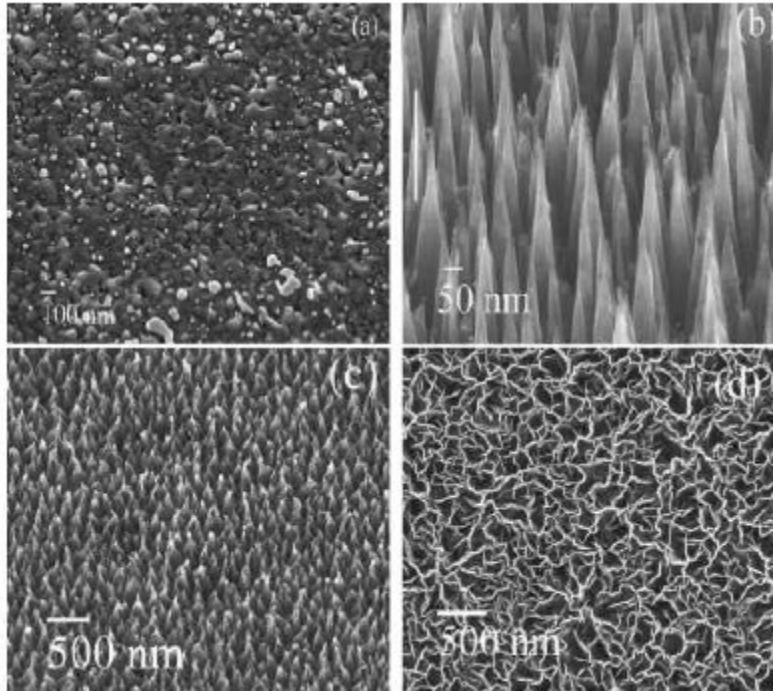
Il “*Plasma Etching*” ha sostenuto la **Legge di Moore** (incremento esponenziale del numero di *transistors/chip*) rendendo scalabile la tecnologia CMOS su **scala nanometrica [LW]**



Dal punto di vista **ambientale** le tecnologie al Plasma sono **vantaggiose energeticamente** e **senza residui tossici** rilevanti (es. bonifica della *Silicon Valley*: **[RR]**, vol.2, cap.14)



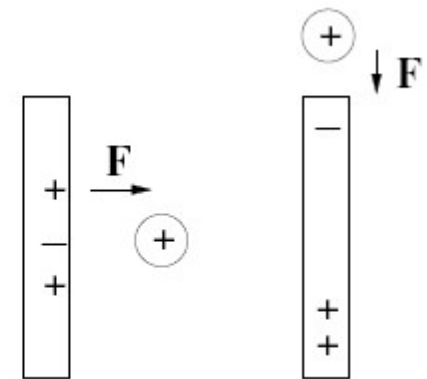
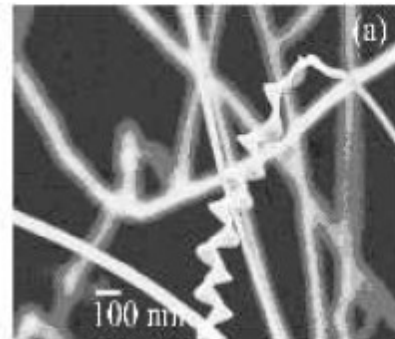
NANOFABBRICAZIONE AL PLASMA



- a) Si "normale"
- b) nanopunte
- c) nanopiramidi
- d) nanopareti

Effetti di **induzione elettrostatica** e **auto-organizzazione** nella *sheath* favoriscono la crescita di varie nanostrutture

Rif.: [KO] e K.Ostrikov, S.Xu,
Plasma-Aided nanofabrication
(Wiley, 2007)





RUOLO DEI CAMPI NELLA *SHEATH*

In geometria piana (rilevante per l'*Etching*) la formazione del campo di *sheath* determina le proprietà degli ioni “catalizzanti”:

- 1 - **flusso** (--> **velocità del processo**)
- 2 - **energia** (--> **attivazione della reazione chimica**)
- 3 - **orientazione** (--> **anisotropia e direzionalità**)

E' desiderabile aumentare 1 e controllare precisamente 2:
sviluppo di schemi avanzati (scariche duali, alte frequenze, accoppiamenti con onde di superficie, ...) -> **fisica più complessa**

In geometrie multi-dimensionali effetti di “nanofocalizzazione”, induzione, etc. determinano la formazione di nanostrutture.



Anche nella modellizzazione più semplice (elettrostatica, elettroni in equilibrio di Boltzmann, ioni fluidi) la soluzione del problema della formazione e stabilità della sheath è tuttora discusso (anche **accesamente**) in letteratura

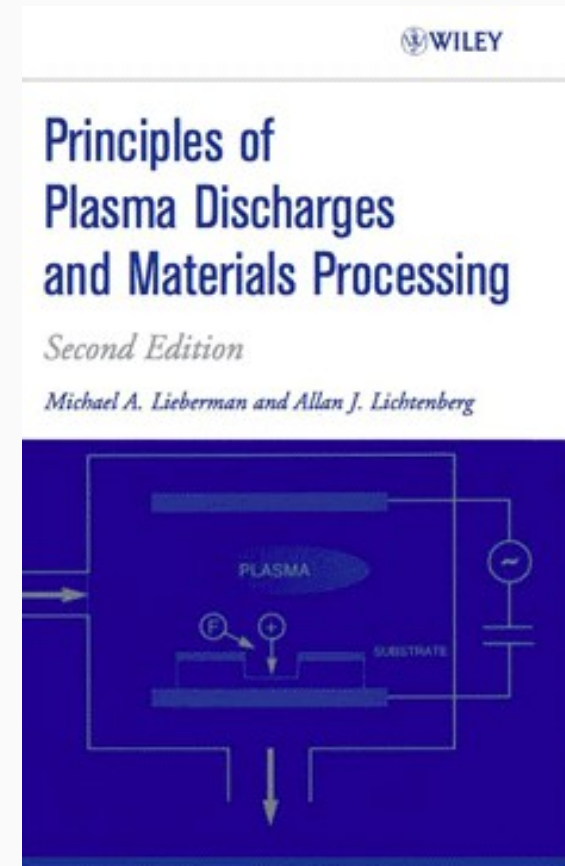
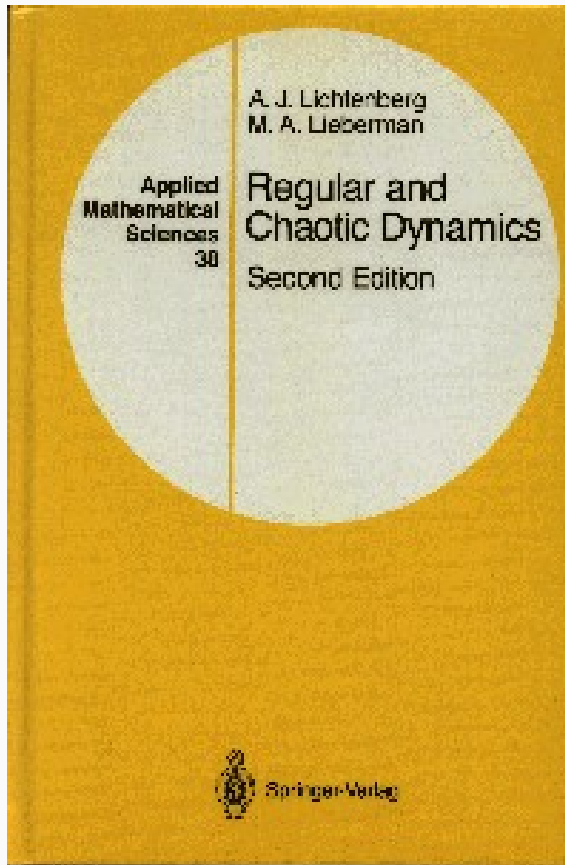
vedi, e.g: Riemann, Plasma Phys. Contr. Fus. **47**, 1949 (2005)
e referenze incluse!

Gli schemi avanzati richiedono una modellizzazione cinetica ed elettromagnetica

Significative sovrapposizioni concettuali con problemi in fisica di: interazione superintensa laser-materia, plasmi ultrafreddi, plasmonica, etc.



... UNA FISICA NONLINEARE E COMPLESSA



... quindi attraente (anche per chi ha gusti “teorici”)!



“Vecchio” modello
(fluidico, elettrostatico)

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{e\Phi}{k_B T_e}\right)$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{e}{\epsilon_0} (n_e - Z n_i)$$

$$(\partial_t + \mathbf{v}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i = Z e \nabla \Phi$$

“Nuovo” modello
(cinetico, elettromagnetico)

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{J} + \epsilon_0 \partial_t \mathbf{E})$$

$$\left(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} + \frac{q_a}{m_a} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_{\mathbf{v}} \right) f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) = (\partial_t f_a)_{\text{coll}}$$

$$\rho = \sum_{a=e,i} \int f_a(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) d^3 \mathbf{v}$$

$$\mathbf{J} = \sum_{a=e,i} \int \mathbf{v} f_a(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) d^3 \mathbf{v}$$

Tipicamente questo richiede l'uso di supercalcolatori...



UNA POSSIBILE CONCLUSIONE...

Le questioni di modellistica (teorica, computazionale, numerica...) di plasmi da scarica sono

- 1) la base fisica per **l'avanzamento di tecnologie** al plasma
- 2) una fonte di **problemi difficili e interessanti**

Talvolta esse appaiono “snobbate” dagli insegnamenti universitari “tradizionali” di fisica del plasma...

Far “permeare” questo tipo di problemi al tempo stesso **intellettualmente stimolanti** e **rilevanti per applicazioni pratiche** è la condizione per reclutare nuove risorse umane (*studenti*) in un campo che promette ancora evoluzioni



INO-CNR
ISTITUTO
NAZIONALE DI
OTTICA

PER FINIRE...



... un'immagine per ricordare che l'atmosfera è un reattore al plasma utile alla vita (fissazione dell'azoto)

Per rivedere il talk:

www.df.unipi.it/~macchi/TALKS

Andrea MACCHI, "Vacuum" workshop, ρ , Milan Fair Centre, 19/11/2010