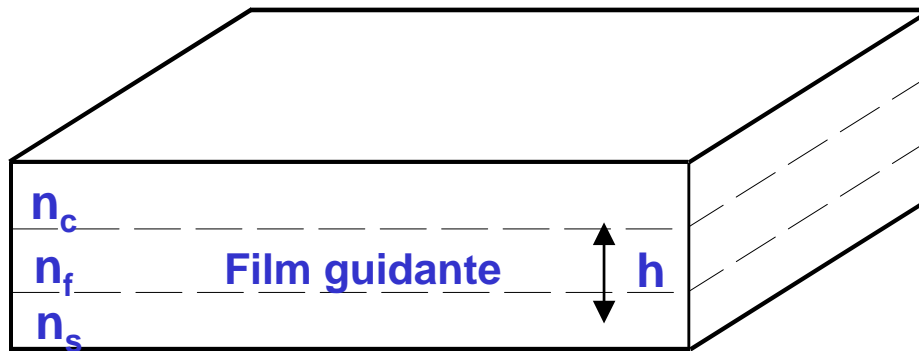
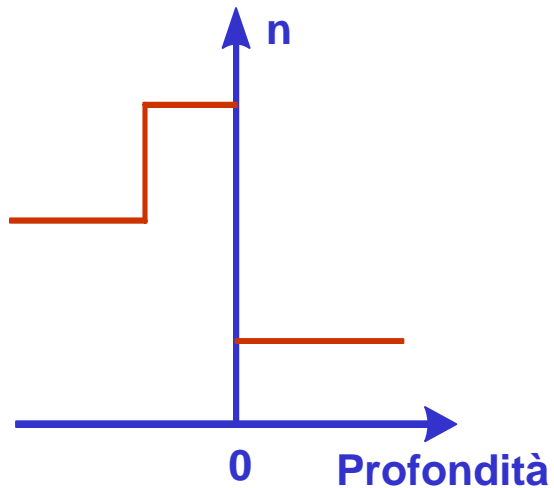


# Struttura guidante

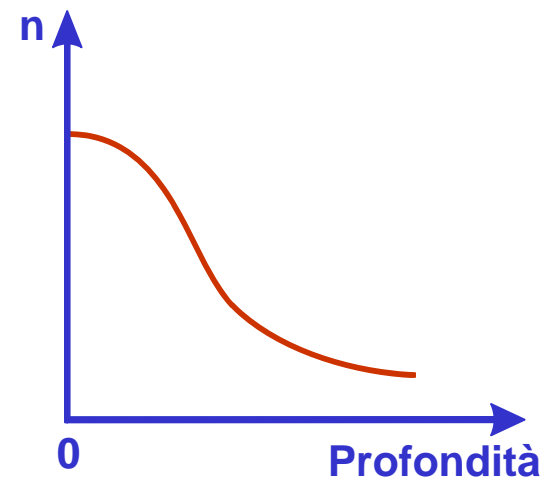


$$n_s, n_c < n_f$$

## Profilo d'indice di rifrazione



Step-index



Graded index

# Scambio ionico: Profilo storico

? Egiziani **Decorazione** di piatti e vasellame in giallo ocra

X-XI sec. Mori **Colorazione** di vetri per finestre

XIV sec. Francia *Jaune d'argent* (giallo argento)

(l'**argento** veniva spalmato sul vetro come impasto di argilla e cloruro o solfuro di argento; mediante riscaldamento gli ioni argento diffondevano nel vetro e a contatto con ferro e altre impurità si riduceva producendo il colore caratteristico).

Anche colorazioni di **rame** venivano prodotte in modo simile.

1913 Prima applicazione industriale: la **tempratura** del vetro.

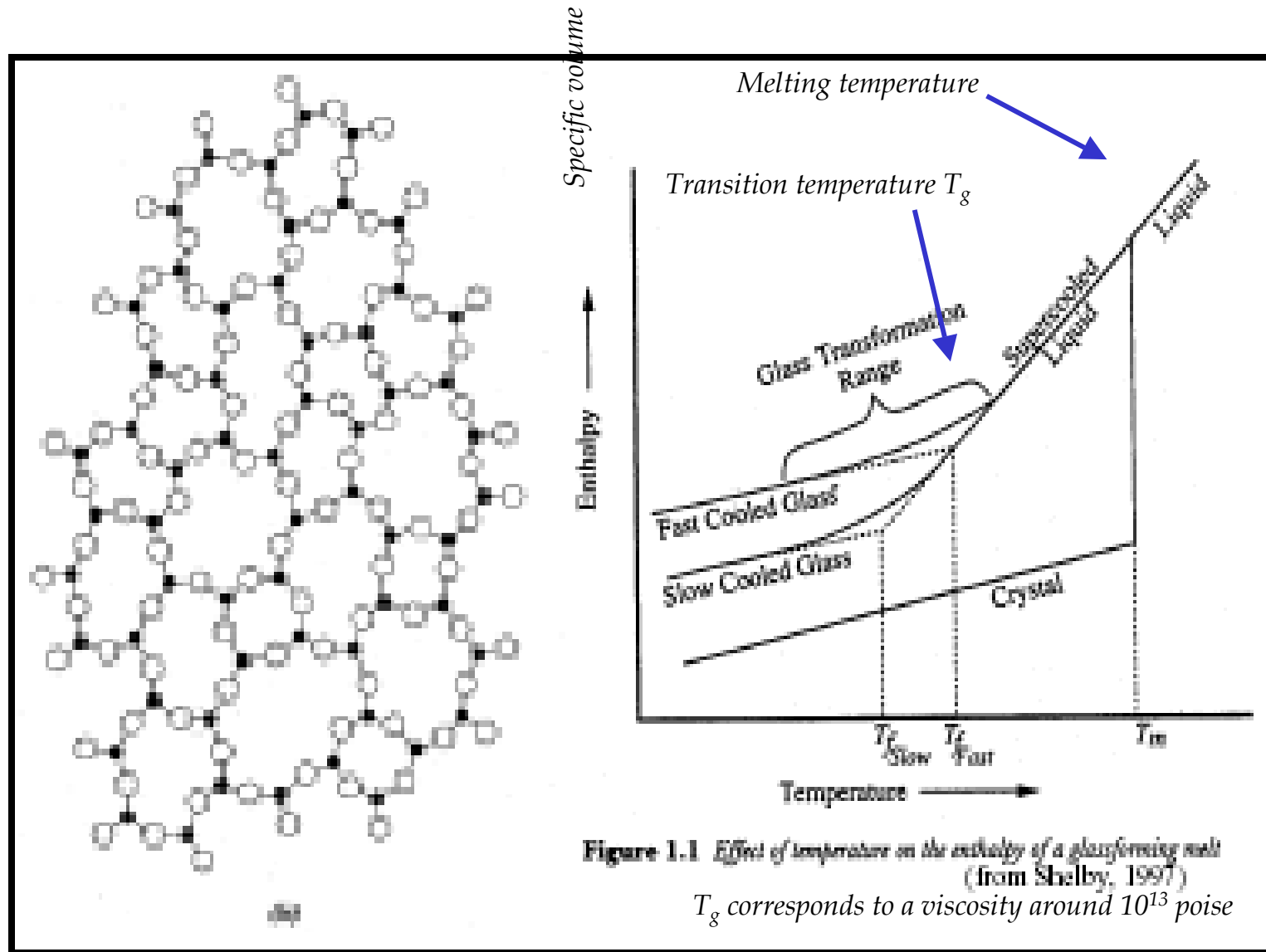
1918 Presso la Schott viene misurato il conseguente **aumento dell'indice di rifrazione**.

'60 Lo **ion-stuffing** diventa un processo industriale standard.

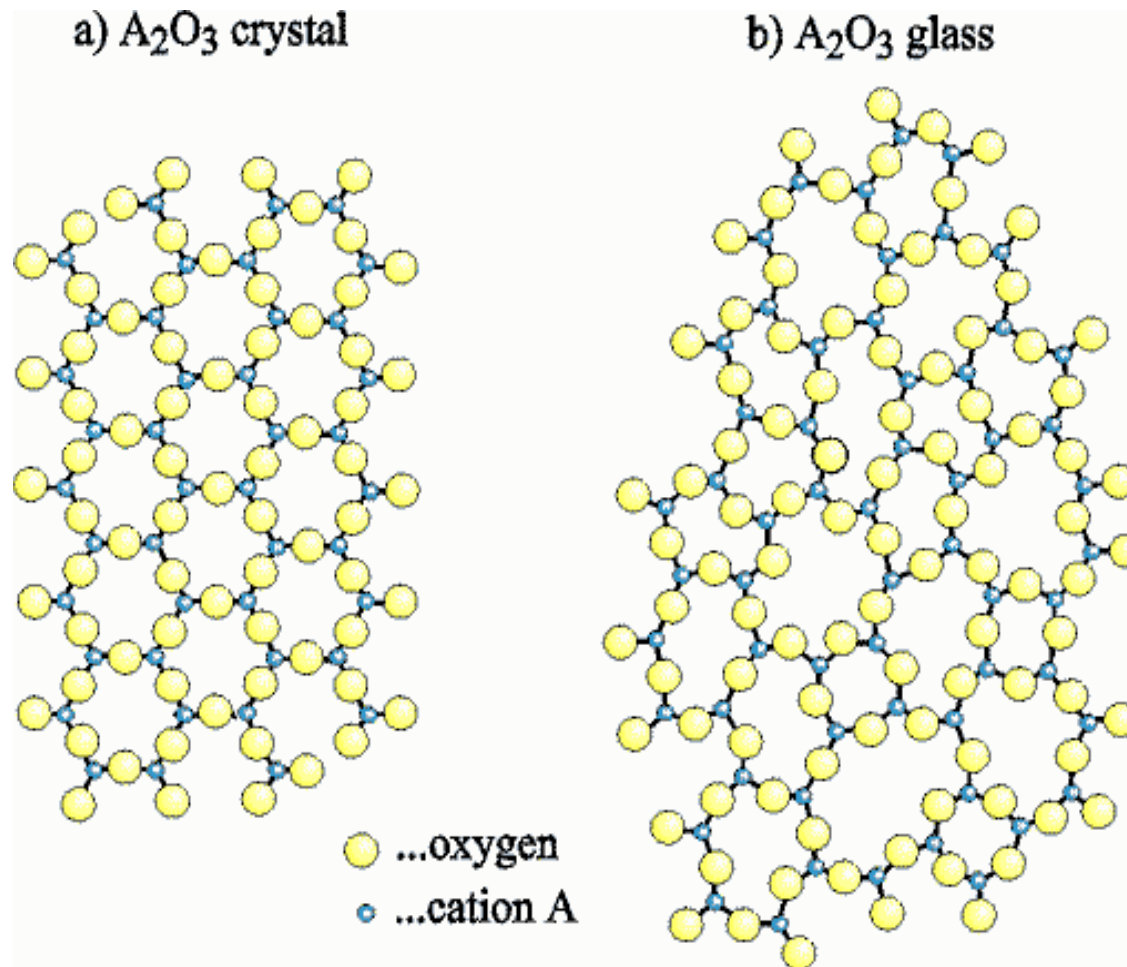
1972 Primo (?) articolo sulla fabbricazione di guide planari ottiche mediante **diffusione indotta da campo elettrico** in vetro (*Izawa e Nagakome*).

1973 Primo (?) articolo sulla fabbricazione di guide planari ottiche mediante **diffusione termica** di ioni in vetro (*Giallorenzi et al.*).

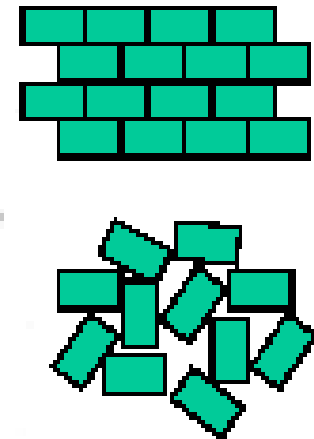
# Una breve introduzione alle proprietà dei vetri



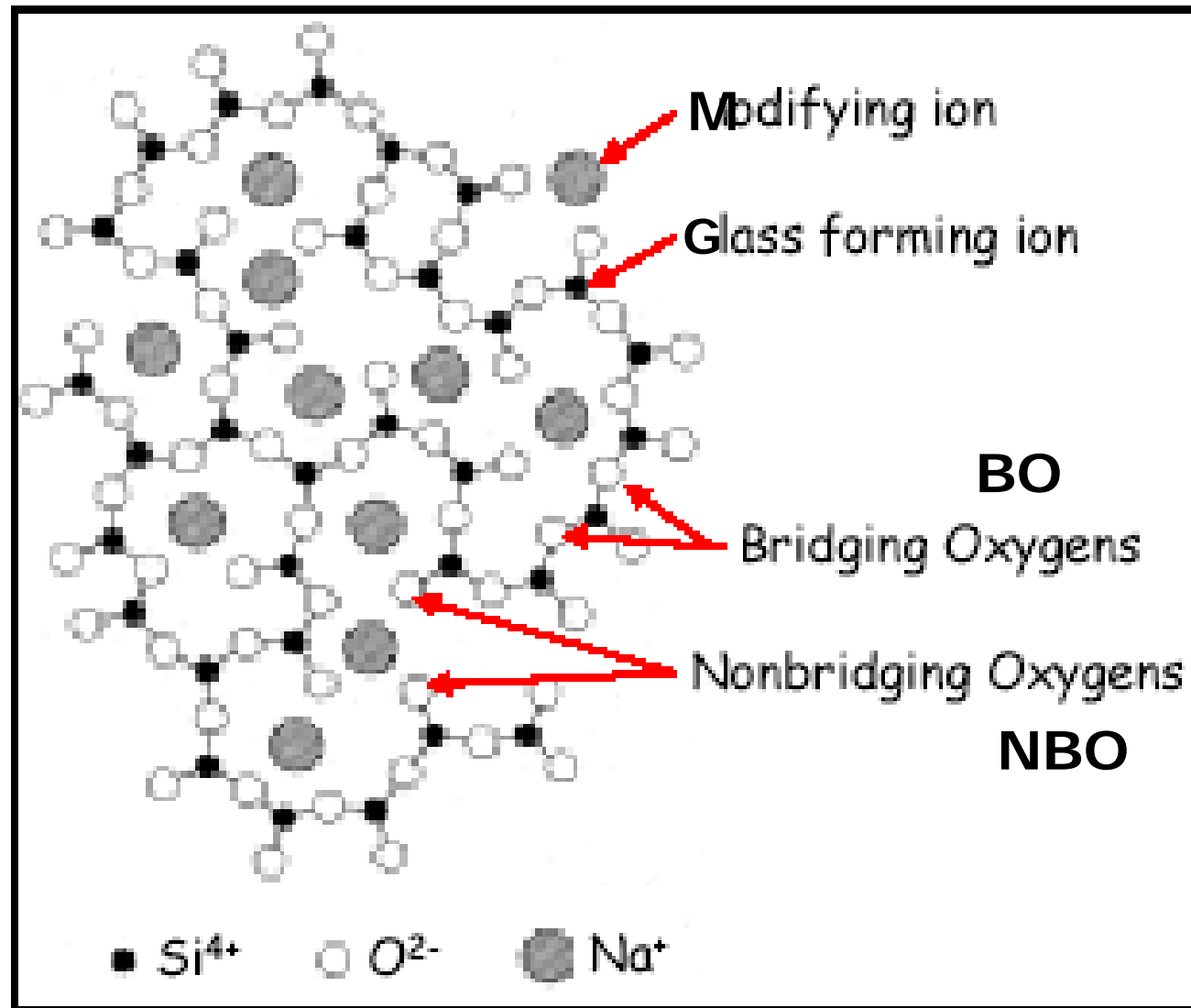
# Struttura di un vetro rispetto ad un cristallo



*Gli stessi poliedri, ma in configurazioni differenti*



# Elementi formatori e modificatori di un vetro



# COMPOSIZIONE DI UN VETRO

I vetri sono costituiti da una miscela di elementi (tipicamente ossidi) nelle dovute concentrazioni molari. Tali ossidi possono classificarsi in:

## **Formatori di reticolo o vetrificanti**

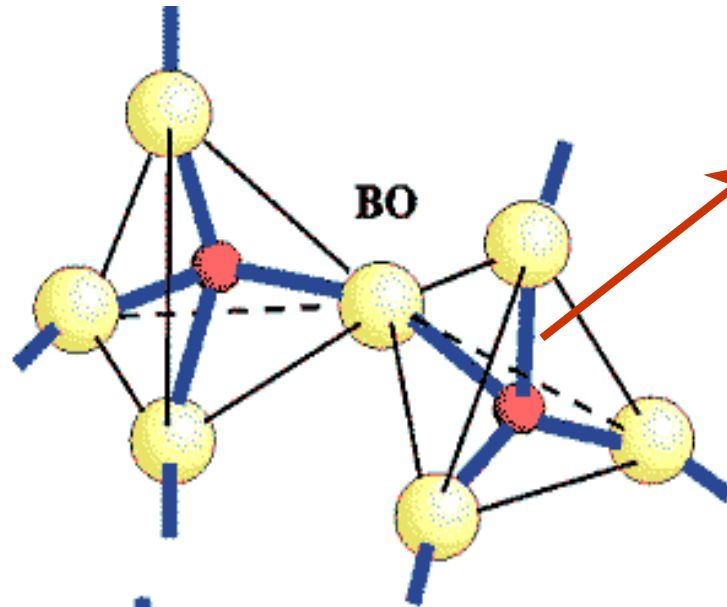
come la silice, e gli ossidi di boro, fosforo, alluminio ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ecc..) che, presenti nelle maggiori concentrazioni, vanno a formare il vetro durante il suo processo di realizzazione.

## **Modificatori di reticolo**

come il sodio, il calcio, il potassio, il piombo (e altri) con i loro rispettivi ossidi metallici  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$ , ecc..

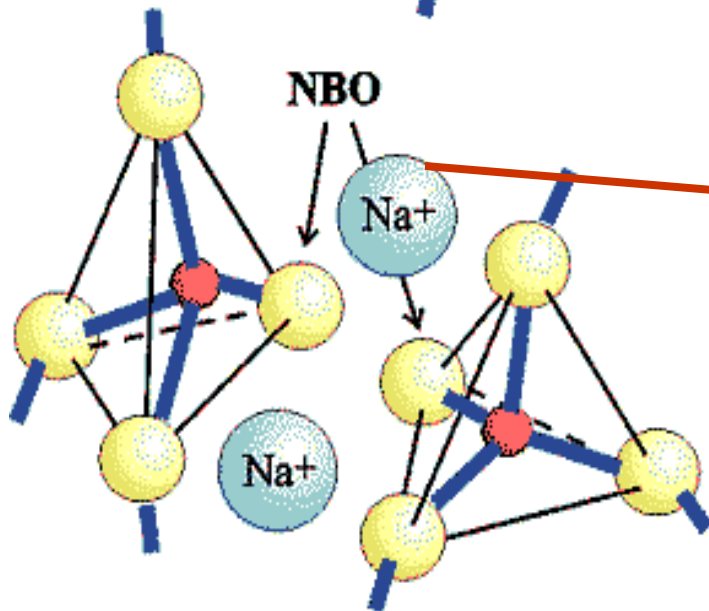
Questi ultimi non generano la struttura del vetro, ma ne modificano le caratteristiche chimiche e fisiche (come, ad esempio, la sua temperatura di transizione  $T_g$ )

# Elementi formatori e modificatori di un vetro



Unità fondamentale tetraedrica  $[\text{SiO}_4]$  di un vetro silicato.

Durante la fase di raffreddamento queste unità costituenti non si vanno ad orientare secondo una ben precisa configurazione spaziale (tipica dei reticoli cristallini), bensì si dispongono in domini caotici, dando luogo ad un materiale amorfo: il vetro.



Rottura dei legami “a ponte” Si - O - Si (di tipo covalente) costituenti il vetro;

Formazione di legami “non a ponte” Na - O di tipo ionico;

Conseguente mobilità degli ioni  $\text{Na}^+$  quando la matrice

vetrosa è sottoposta ad alte temperature (300-400)°C

⇒ **scambio ionico**;

Diminuzione della rigidità della struttura del vetro ( $T_g \downarrow$ ).

## Il vetro ottico

Per **vetro ottico** si intende generalmente qualsiasi tipo di vetro purché avente caratteristiche che lo rendano adatto alla fabbricazione di componenti ottici come lenti o prismi.

Un vetro per definirsi **ottico** deve presentare:

- alti valori di isotropia (indice di rifrazione costante in ogni direzione);
- ottima trasparenza e omogeneità;
- capacità di subire lavorazione a freddo fino alla perfetta lucidatura;
- buona durabilità chimica;
- assenza di difetti come bolle o strie;
- assenza di tensioni interne.



# Proprietà di un vetro ottico

Le proprietà ottiche di questa classe di vetri sono definite:

- dall'indice di rifrazione  $n$ ;
- dalla variazione dello stesso in funzione della differente lunghezza d'onda della propagazione luminosa che lo attraversa (**dispersione**);

Generalmente i produttori di vetro forniscono il valore dell'indice alla lunghezza d'onda di 587 nm ( riga D dello spettro di assorbimento dell'elio), mentre la dispersione è rappresentata dal **numero di Abbe**:

$$v = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c}$$

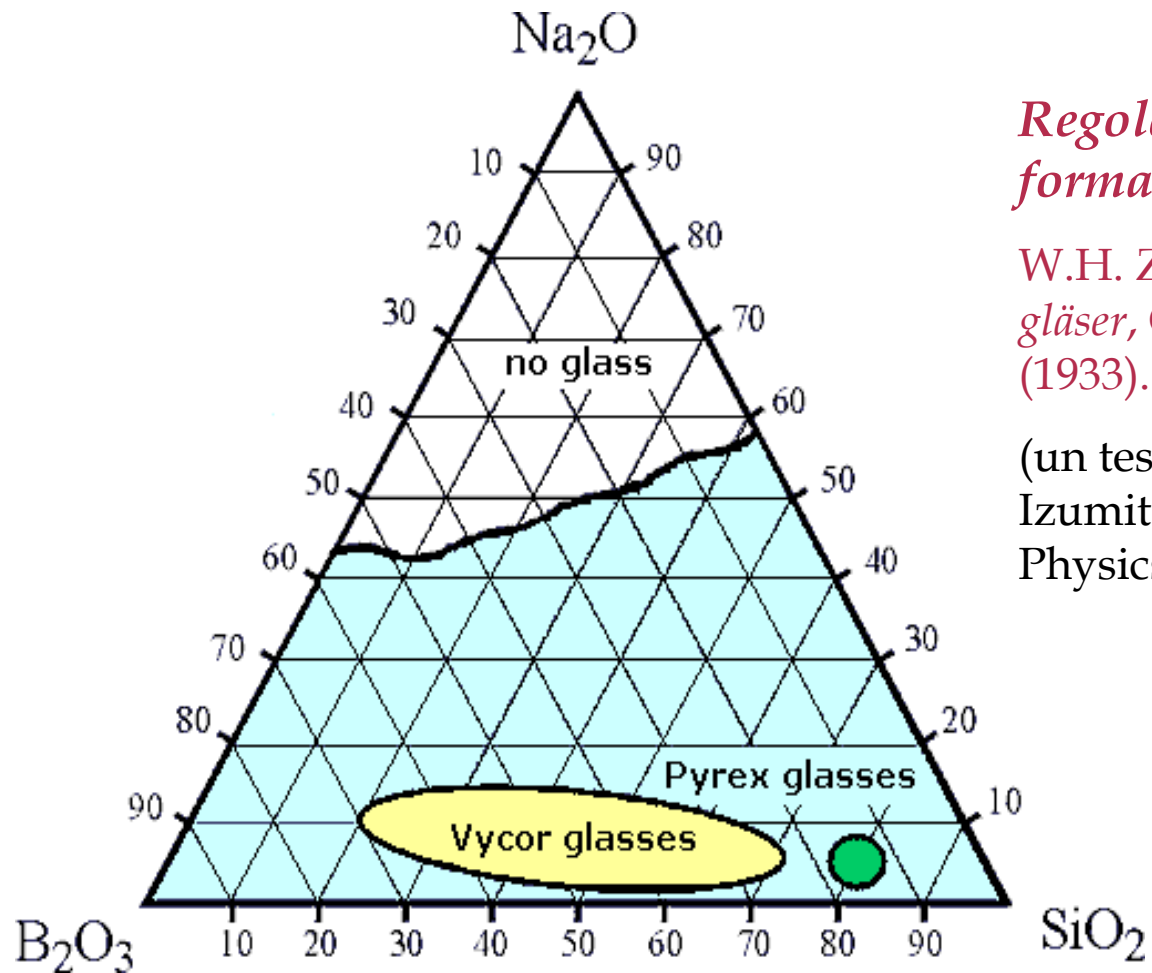
$n_f$ : indice di rifrazione a  $\lambda = 486.1$  nm

$n_c$ : indice di rifrazione a  $\lambda = 656.3$  nm

$v > 55$ , vetro **crown**  
vetri poco dispersivi come i  
borosilicati BK7 della Schott;

$v < 50$ , vetro **flint**  
vetri molto dispersivi come i  
vetri telluriti

**Solo alcune composizioni danno luogo ad un vetro: esempio del diagramma di formazione per un vetro borosilicato**

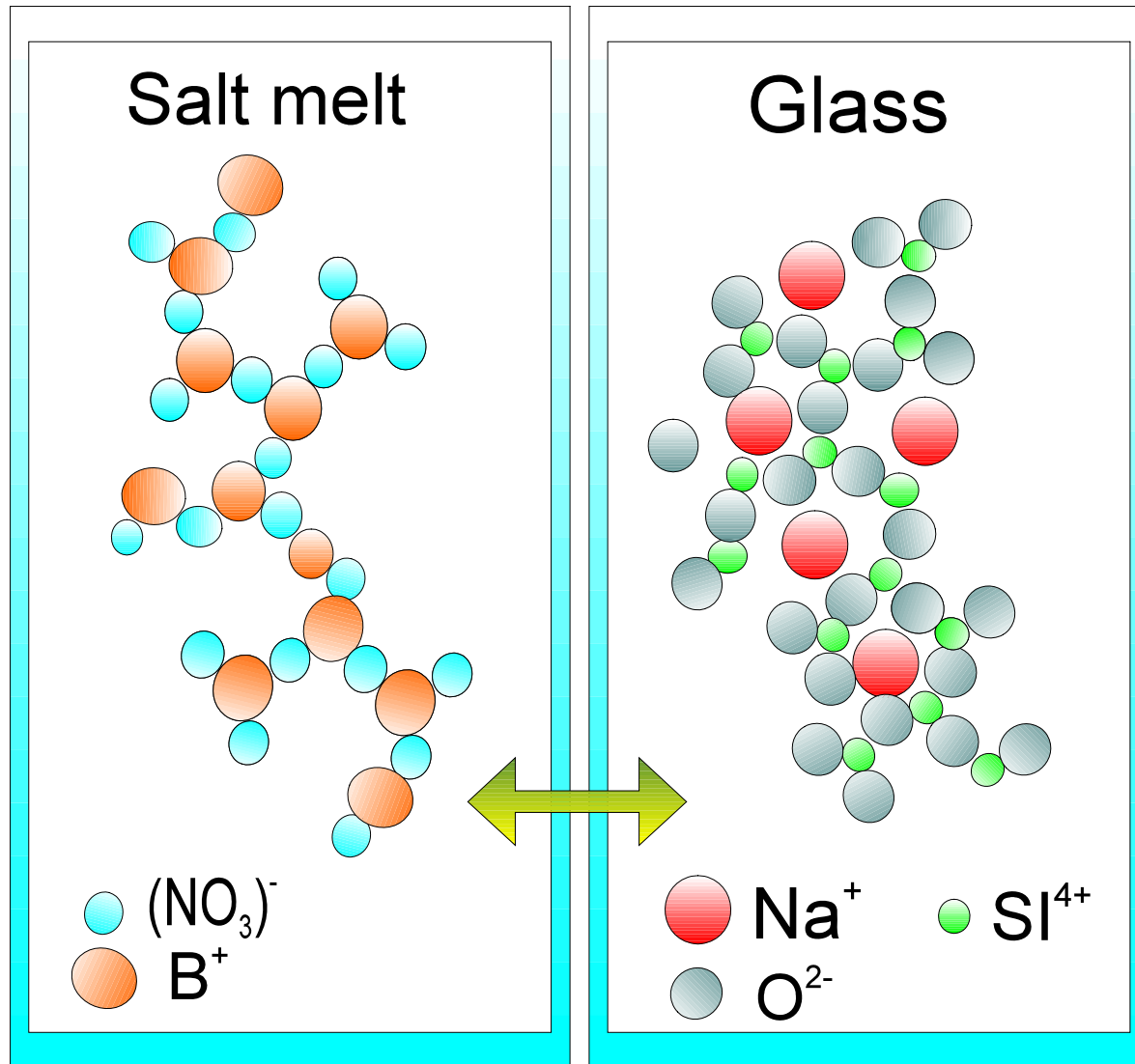


*Regole di Zachariasen per la formazione di un vetro*

W.H. Zachariasen: *Die struktur der gläser*, Glastechn. Ber. **11**, 120-123 (1933).

(un testo utile è quello di T.S. Izumitani, *Optical glass*, Amer. Inst. Physics, 1986)

# Struttura del vetro e scambio ionico

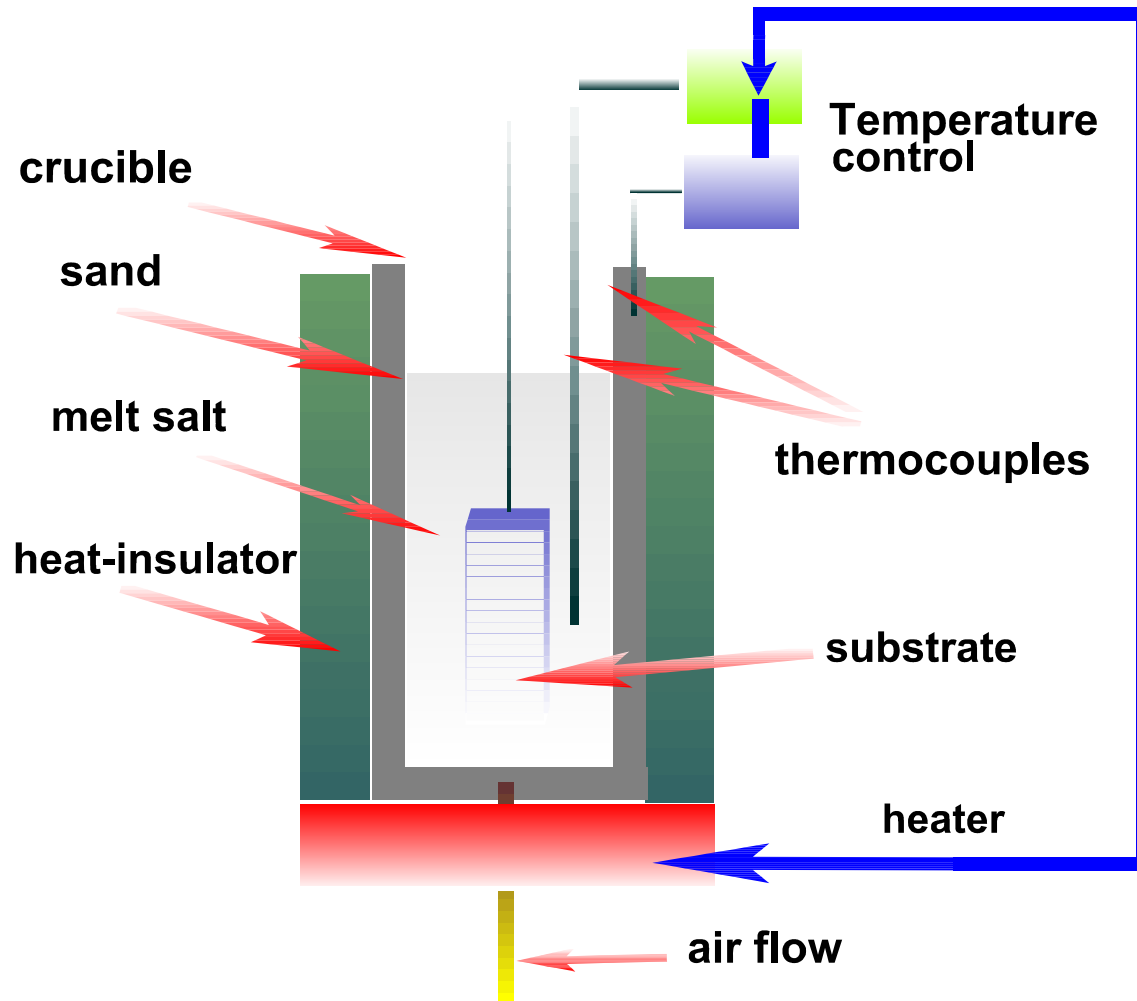


Ossido	Vetro SODA-LIME
$\text{SiO}_2$	73.24
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.46
$\text{Na}_2\text{O}$	14.07
$\text{K}_2\text{O}$	0.18
$\text{CaO}$	6.45
$\text{MgO}$	4.08
$\text{SO}_3$	0.34
$\text{P}_2\text{O}_5$	---
$\text{CoO}$	---
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.09
$\text{TiO}_2$	---
$\text{ZnO}$	---
$\text{Se}$	---

# Parametri principali degli ioni comunemente utilizzati per lo scambio ionico

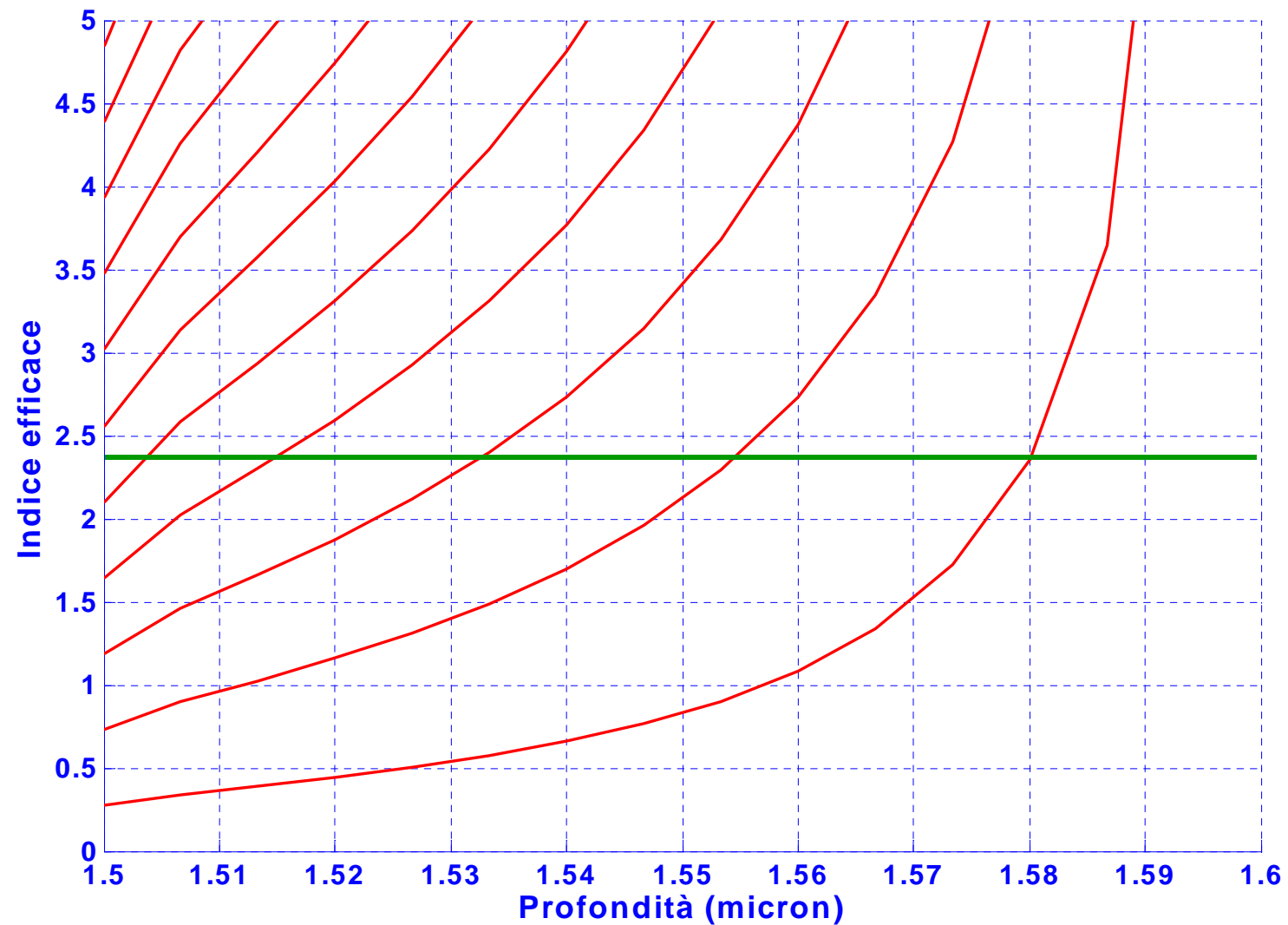
Ione	Polarizzabilità elettronica (Å <sup>3</sup> )	Raggio ionico (Å)	Sale	Temperatura di fusione (°C)	Δ n	Temperatura di decomposizione (°C)	Dose letale LD50 (mg/Kg)
Na <sup>+</sup>	0.41	0.95	NaNO <sub>3</sub>	307	---	380	1955 NaNO <sub>3</sub>
Li <sup>+</sup>	0.03	0.65	LiNO <sub>3</sub>	264	0.030	600	710 LiCO <sub>3</sub>
Ag <sup>+</sup>	2.40	1.26	AgNO <sub>3</sub>	212	0.090	444	2820 Ag <sub>2</sub> O
K <sup>+</sup>	1.33	1.33	KNO <sub>3</sub>	334	0.009	400	1894 KNO <sub>3</sub>
Rb <sup>+</sup>	1.98	1.49	RbNO <sub>3</sub>	310	0.015	-	1200 RbCl
Tl <sup>+</sup>	5.20	1.49	TlNO <sub>3</sub>	206	0.100	430	<b>25</b> Tl <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Cs <sup>+</sup>	3.34	1.65	CsNO <sub>3</sub>	414	0.030	-	1200 CsNO <sub>3</sub>

# Lo scambio ionico



**Forno ad aria per scambio ionico**

# Modi di una guida graded-index



# Dinamica dello scambio ionico (I)

Flusso degli atomi dovuto alla diffusione:

$$\bar{j} = -D \nabla c$$

Flusso degli atomi dovuto al campo elettrico:

$$\bar{j} = \frac{c D q \bar{E}}{f k T} \quad D = \frac{\sigma k T}{c q^2}$$

La somma dei due contributi per una specie ionica:  $\bar{j}_{[a,b]} = -D_{[a,b]} \nabla c_{[a,b]} + \frac{c_{[a,b]} D_{[a,b]} e \bar{E}}{f k T}$  (1)

Condizioni per la neutralità elettrica del vetro:

$$c_a + c_b = c_0 \quad ; \quad \nabla(c_a + c_b) = 0$$
 (2)

Flusso di corrente totale:  $\bar{j}_0 = \bar{j}_a + \bar{j}_b$  (3)

$$1+2 \rightarrow 3 \quad \Rightarrow \quad \frac{e \bar{E}}{f k T} = \frac{(M-1) \nabla c_a + M \bar{j}_0 / D_a}{c_a (M-1) + c_0} \quad \Rightarrow \quad \bar{j}_a = \frac{-D_a c_0 \nabla c_a + M c_a \bar{j}_0}{c_a (M-1) + c_0} \quad M = \frac{D_a}{D_b}$$

Il Legge di Fick:  $\frac{\partial c_a}{\partial t} = -\nabla \cdot \bar{j}_a$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D \nabla^2 C}{C(M-1)+1} - \frac{D(M-1)(\nabla C)^2 + M \bar{J}_0 \cdot \nabla C}{[C(M-1)+1]^2}$$

$$\bar{J} = \frac{\bar{j}_a}{c_0}$$

$$\bar{J}_0 = \frac{\bar{j}_0}{c_0}$$

$$C = \frac{c_a}{c_0}$$

# Dinamica dello scambio ionico (II)

Nel caso unidimensionale:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{D \partial C / \partial x}{C(M-1)+1} \right]}_{\text{Diffusione}} - \underbrace{\frac{M \partial C / \partial x}{[C(M-1)+1]^2}}_{\text{Trasporto}}$$

Per lo scambio  
ionico termico

M=1:  $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \cancel{J_0 \frac{\partial C}{\partial x}}$

$$C(x,0) = 0$$

$$C(0,t) = C_0$$

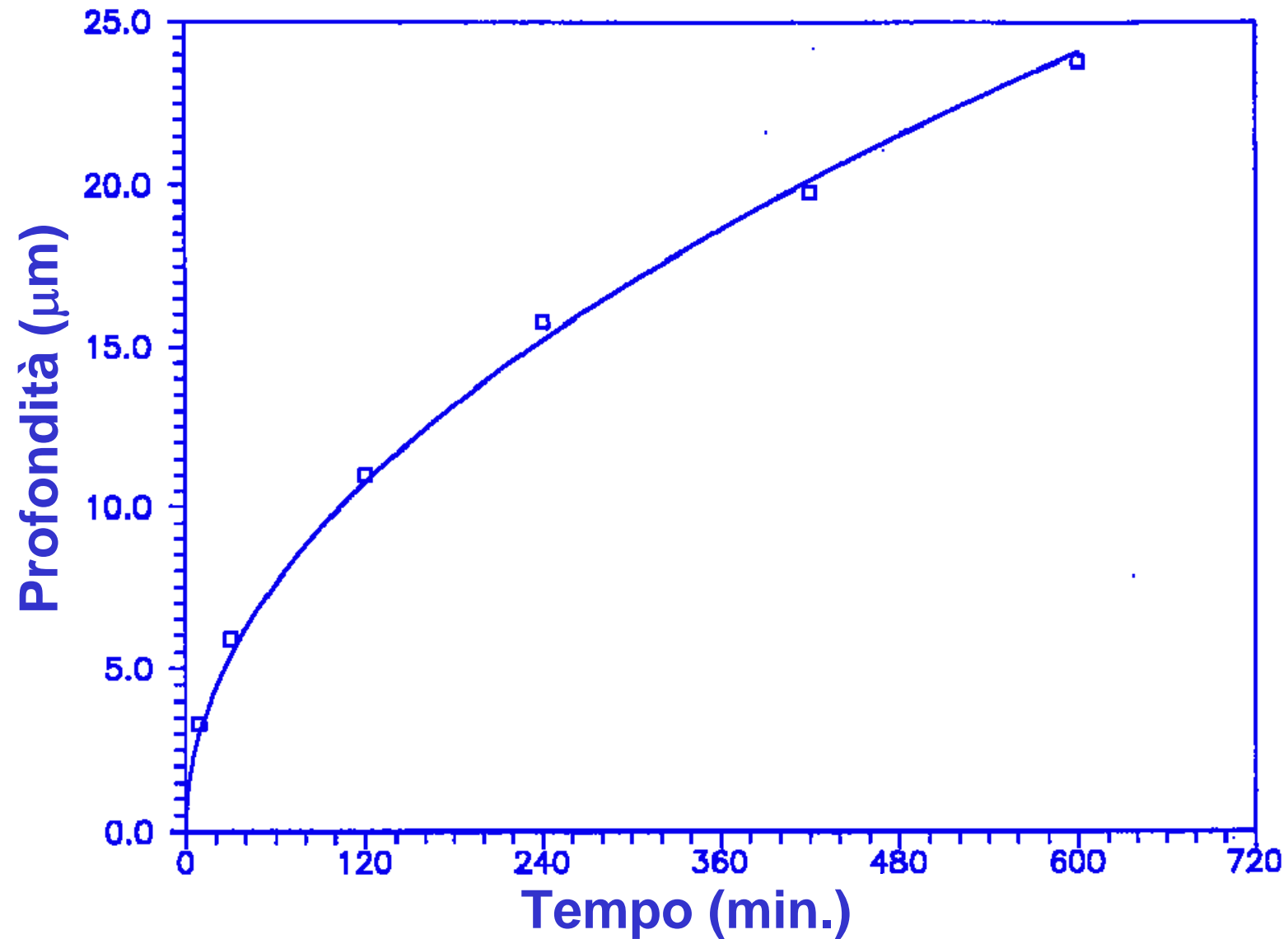
$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-t^2} dt$$

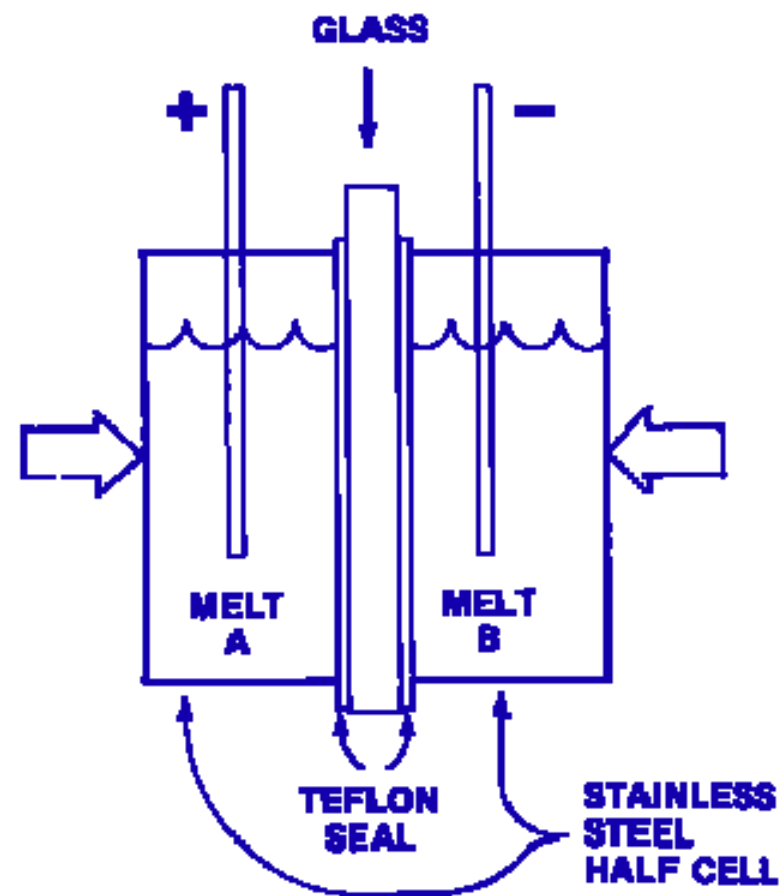
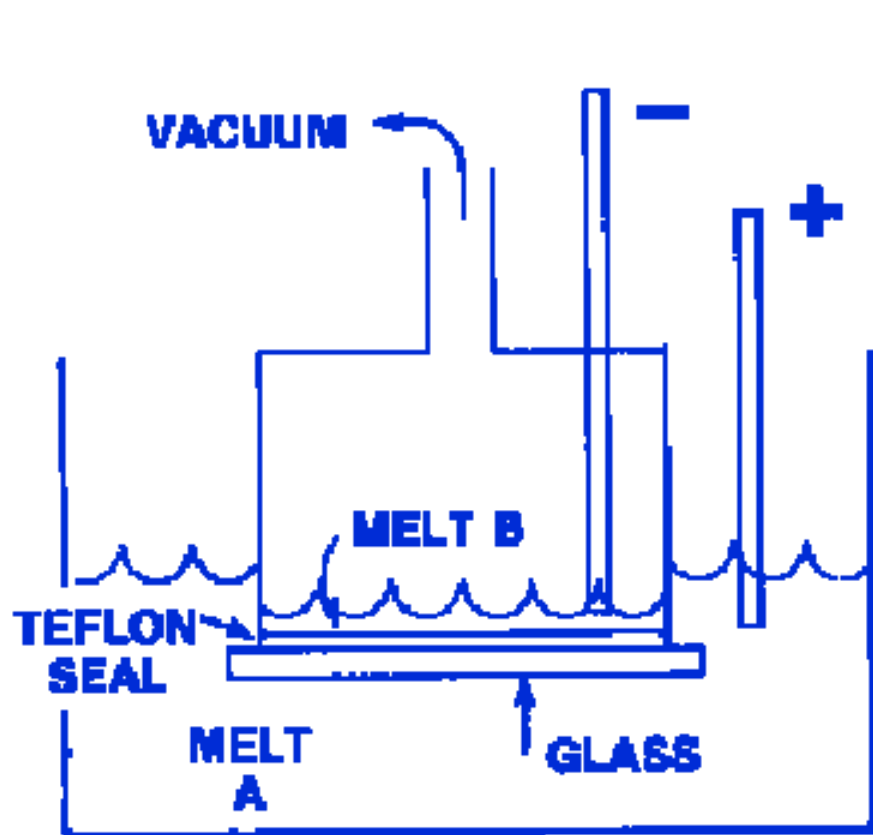
Andamento della profondità della  
diffusione secondo radice quadrata  
del tempo.



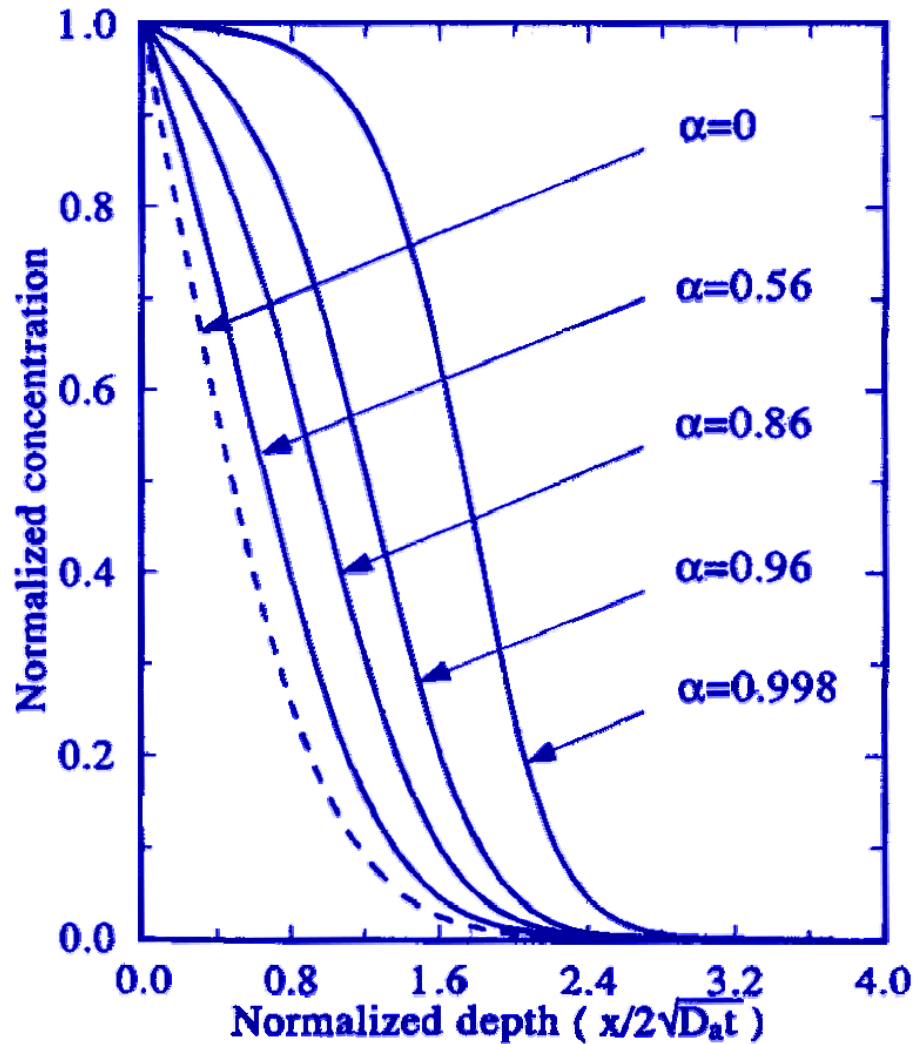
## Velocità di diffusione



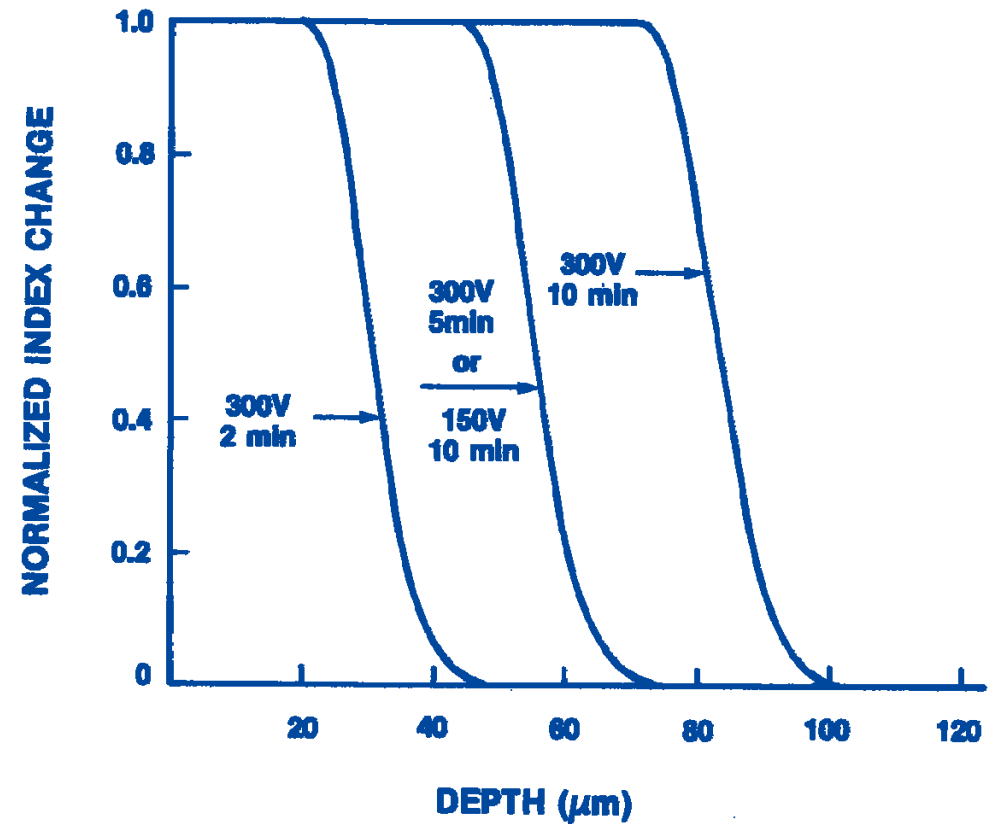
## Scambio ionico con campo elettrico



## Profilo d'indice



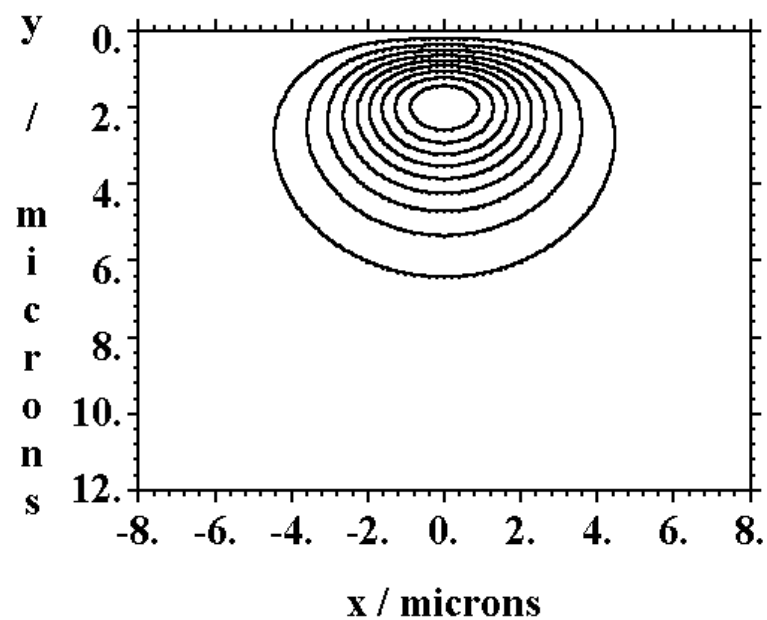
Scambio non assistito  
da campo elettrico



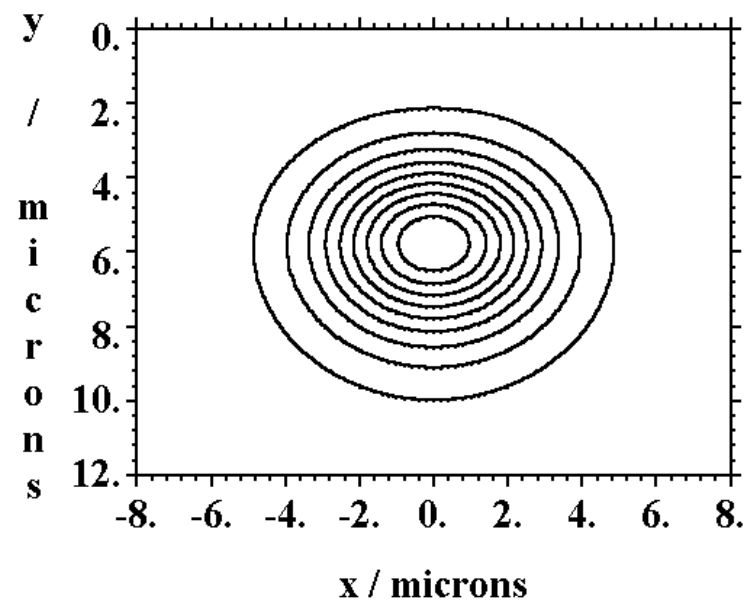
Scambio assistito da campo elettrico

# Guide di superficie e sepolte

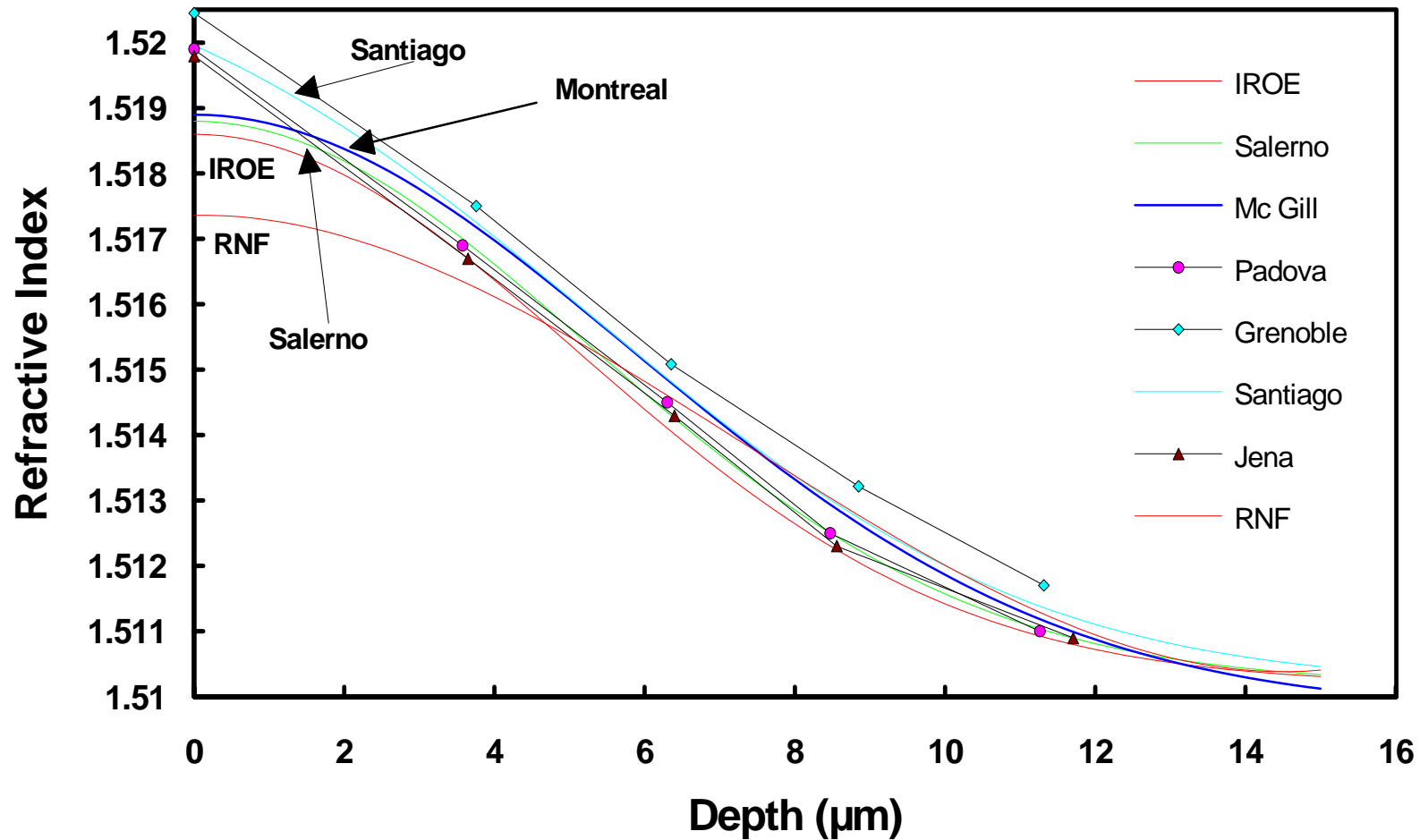
Guida di superficie



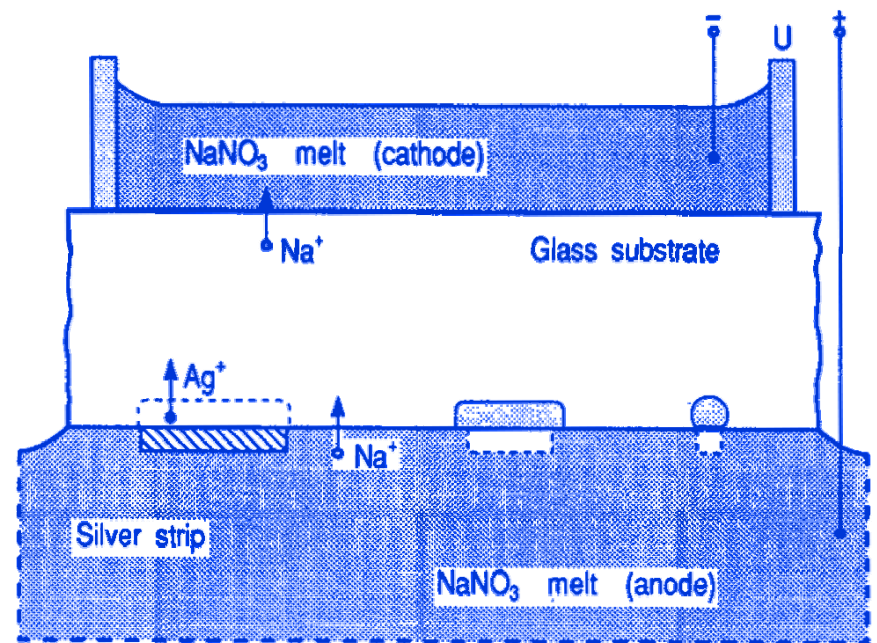
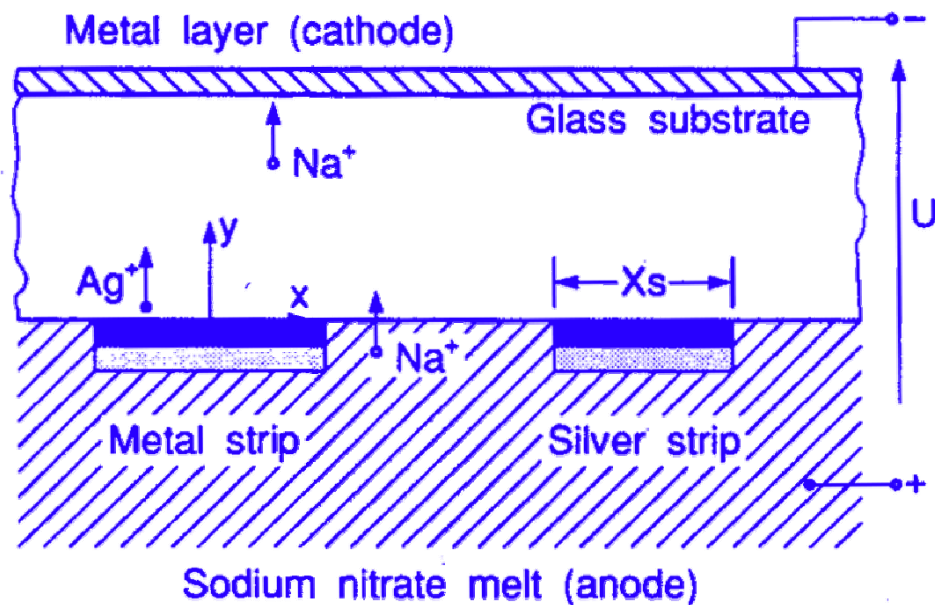
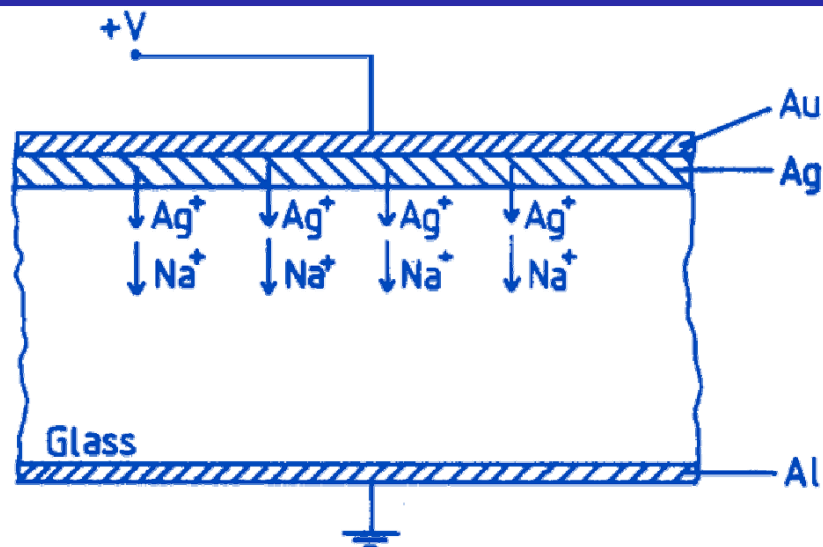
Guida sepolta



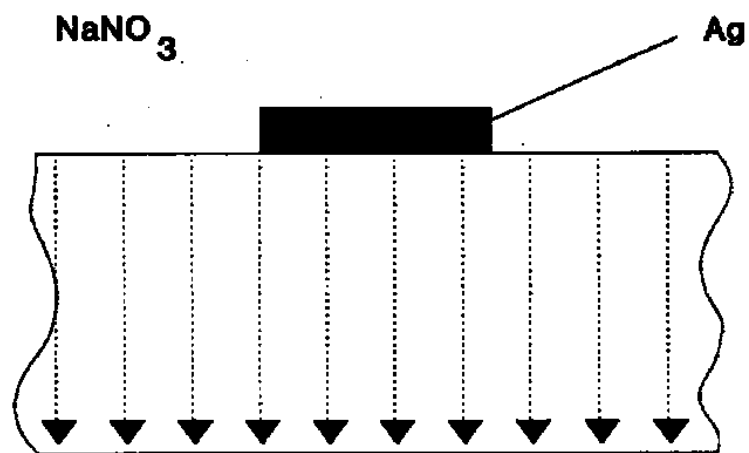
## Precisione della determinazione del profilo d'indice



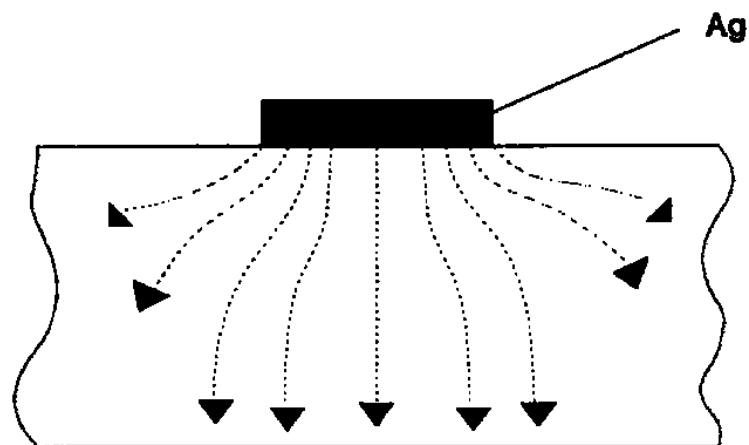
# Diffusione da film sottile



# Diffusione ionica con campo elettrico: andamento del campo elettrico

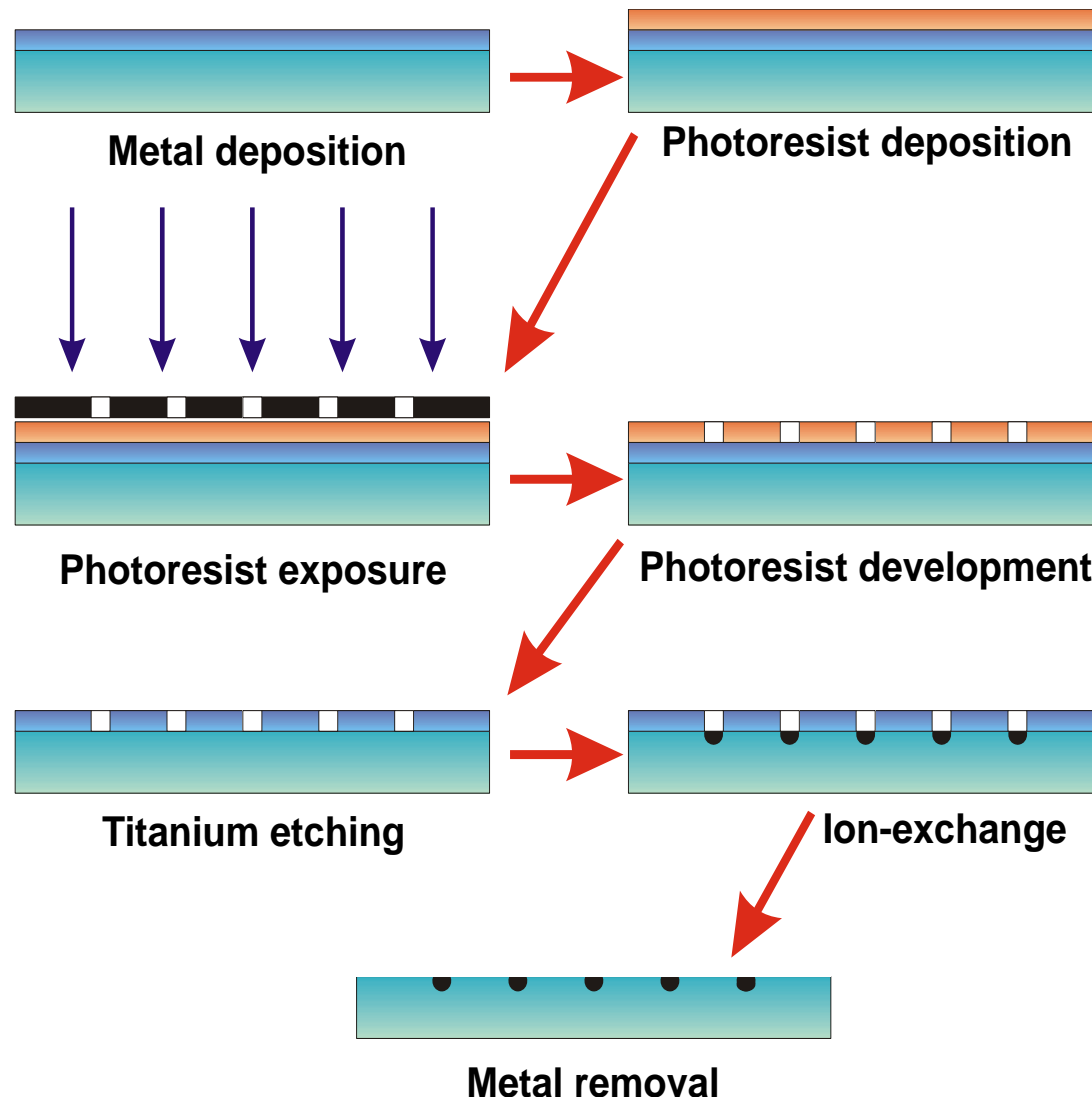


**Campo elettrico  
esterno presente**



**Campo elettrico  
esterno assente**

# Guide a canale mediante scambio ionico





## II FOTORESIST

**Pulizia** substrato

**Prime** - Cottura a 200 °C per 30 minuti

**Spinning** - 4000÷6000 rpm, > 25 s

**Softbake** - 90-100 °C, 30 minuti.

**Evaporano** i **solventi** (*xilene*, acetato di butile e acetato di 2-etossietile) e aiuta l'adesione al substrato

**Esposizione** - qualche secondo a 350÷450 nm

**Sviluppo**

**Hardbake** - 110÷120 °C, 30 minuti

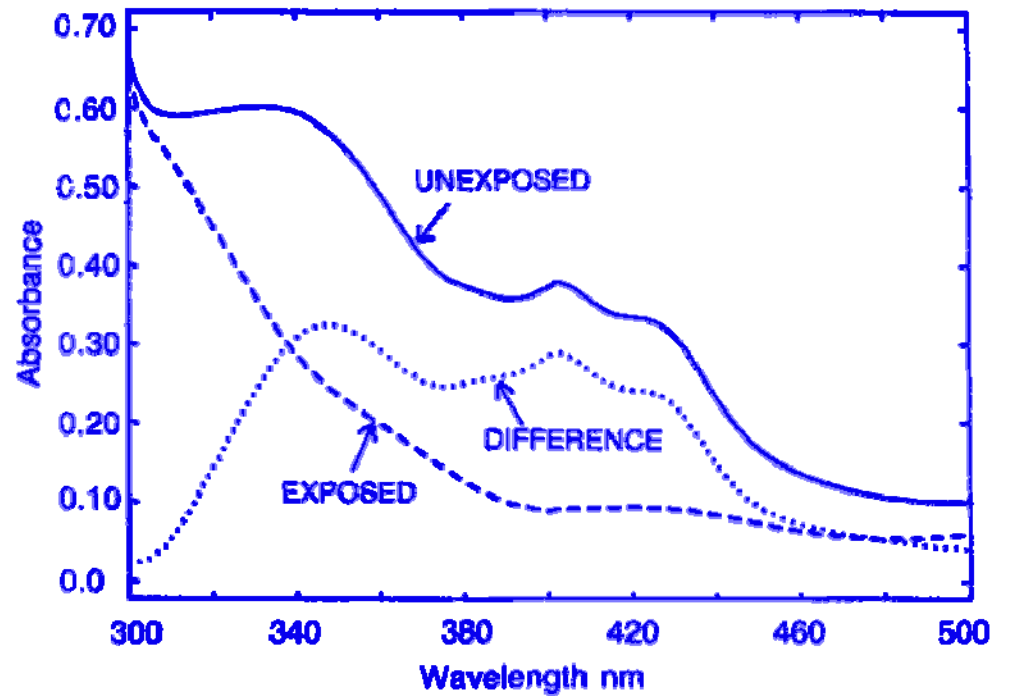
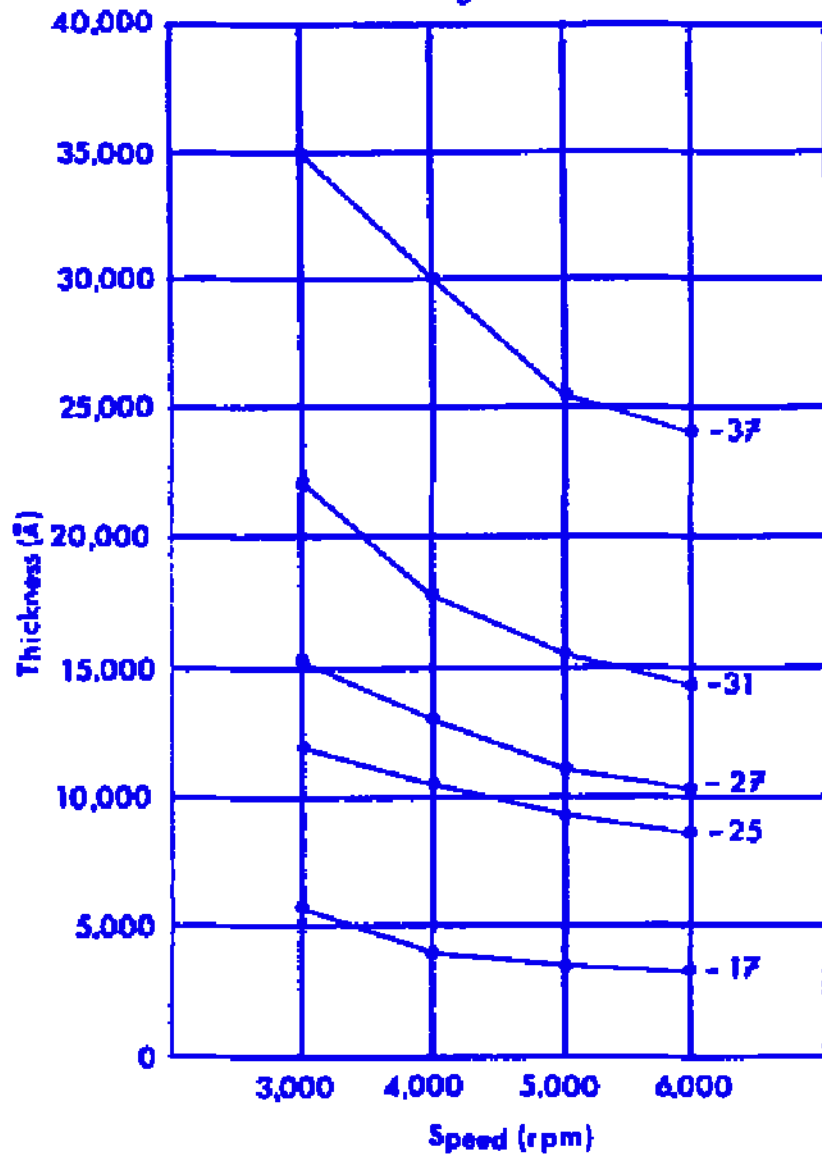
**Consolida** il fotoresist per i trattamenti di etching o lift-off

.....

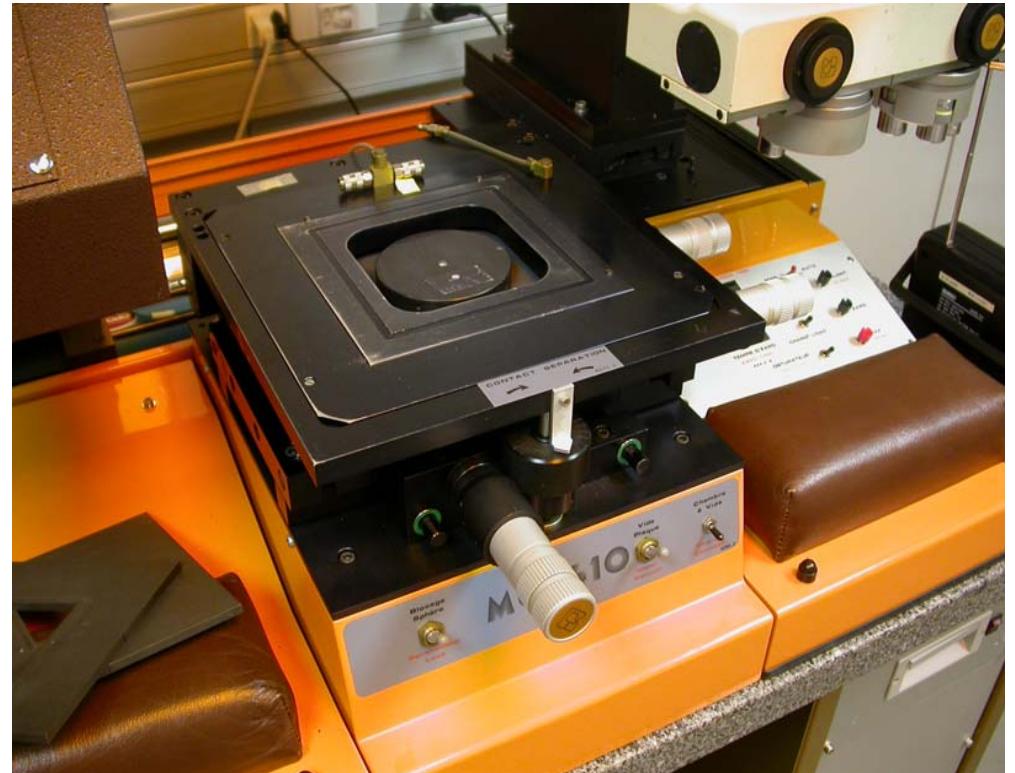
**Rimozione**

# Caratteristiche del fotoresist

Figure 1

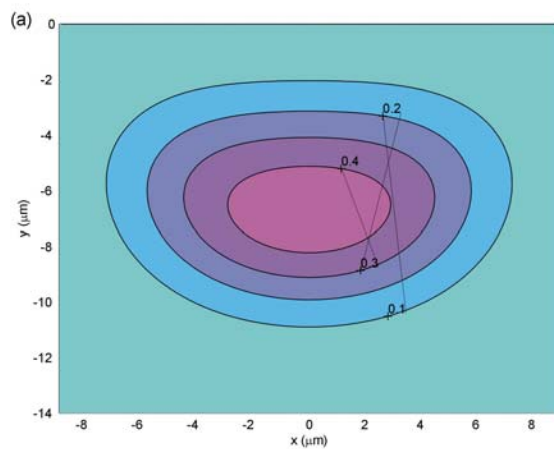
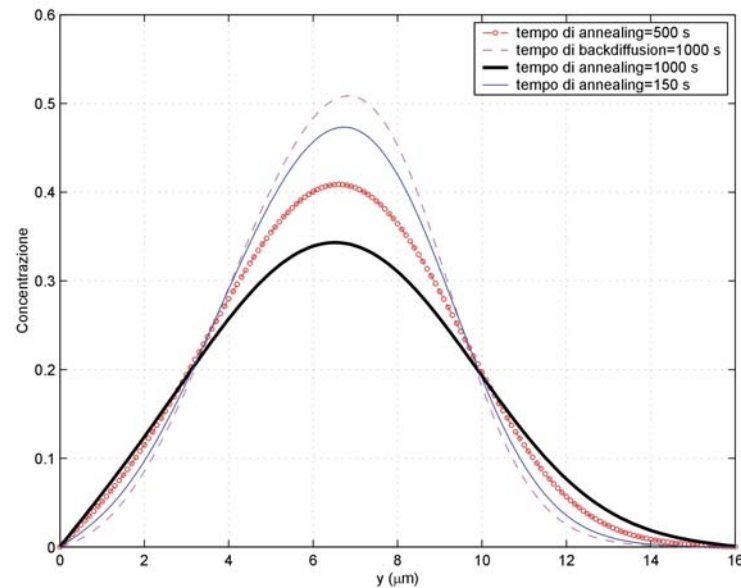


# IL MASK ALIGNER

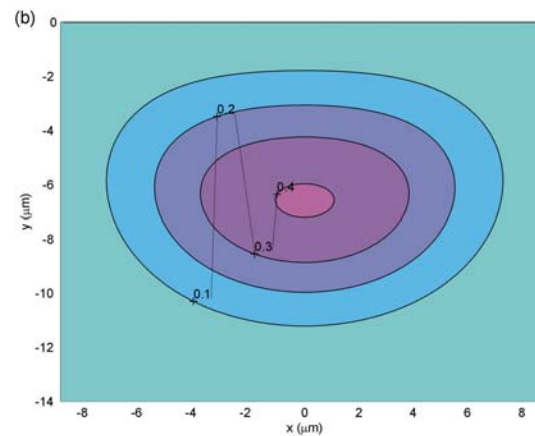


# Annealing

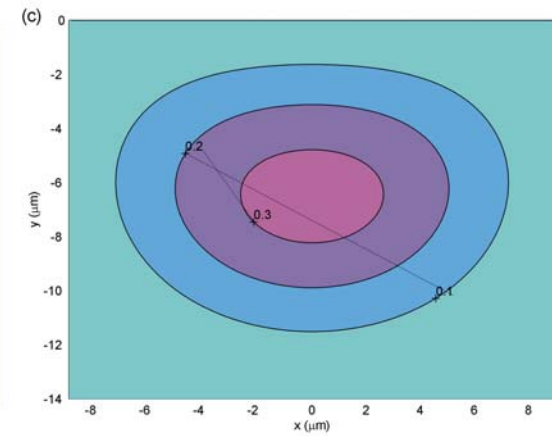
Processo termico che in questo caso si fa seguire alla diffusione per incrementare la simmetria circolare della guida.



**$t=150\text{s}$**



**$t=500\text{s}$**



**$t=1000\text{s}$**