

Cristalli fotonici e loro applicazioni

Davide Mascoli

Dipartimento di fisica 'A. Volta', Università degli studi di Pavia

8 maggio 2009

solidi cristallini = reticolo + base

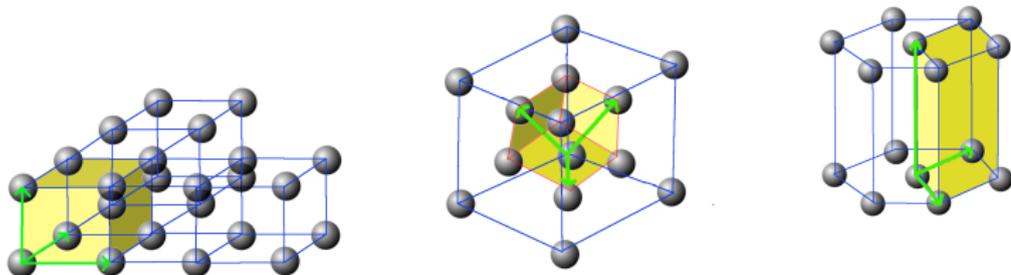


Figura: alcuni reticoli di Bravais 3D con 3 vettori primitivi $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$;

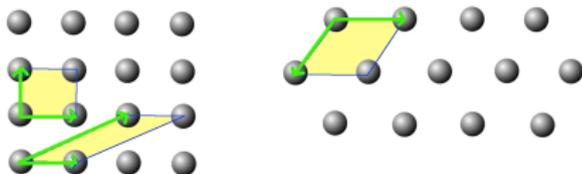


Figura: alcuni reticoli di Bravais 2D con due vettori primitivi \mathbf{a}, \mathbf{b} ;

La periodicità spaziale è in una, due, o tre direzioni.

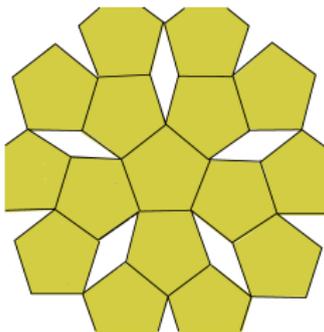


Figura: Assenza di reticoli di Bravais con simmetria pentagonale;

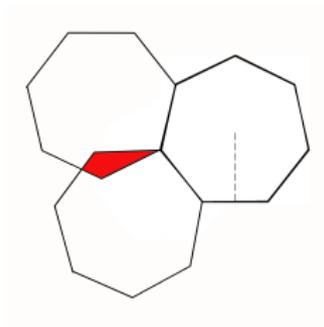
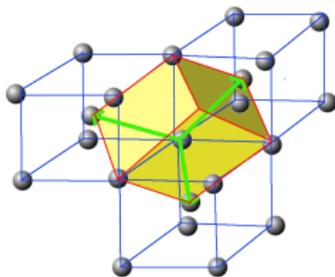


Figura: Assenza di reticoli di Bravais con simmetria ettagonale;

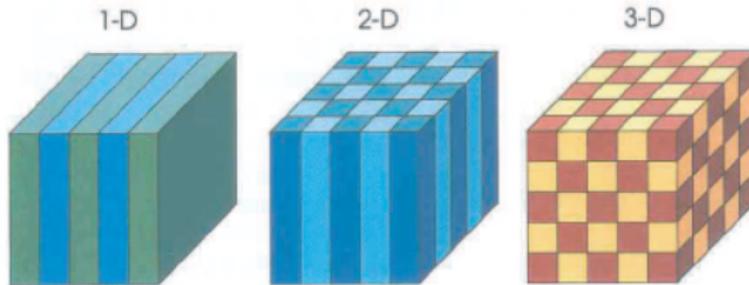
- la possibilità di caratterizzare un cristallo tramite **diffrazione ai raggi X** deriva dall'esistenza di un ordine reticolare.
- la regolarità spaziale permette lo sviluppo di modelli per una teoria fisica con più immediatezza rispetto allo stato liquido o gassoso.
*Esempio: il sodio metallico ha un reticolo cubico a corpo centrato e base monoatomica; gli elettroni atomici nel cristallo sentono un potenziale $V(\mathbf{r})$ con **periodicità cristallina**.*

$$V(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r} + n\mathbf{a} + m\mathbf{b} + l\mathbf{c});$$

\mathbf{r} punto generico, n, m, l numeri interi, $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ vettori primitivi del reticolo di Bravais;



I cristalli fotonici sono materiali dielettrici con periodicità in una 1D due 2D o tre direzioni 3D.



L'indice di rifrazione ottico ha periodicità del reticolo di Bravais

$$n(\mathbf{r}) = n(\mathbf{r} + n\mathbf{a} + m\mathbf{b} + l\mathbf{c});$$

Ogni **interfaccia tra due materiali** a diverso indice agisce come centro di diffrazione per l'onda elettromagnetica che si propaga. Ad ogni interfaccia parte dell'onda elettromagnetica viene riflessa e parte trasmessa.

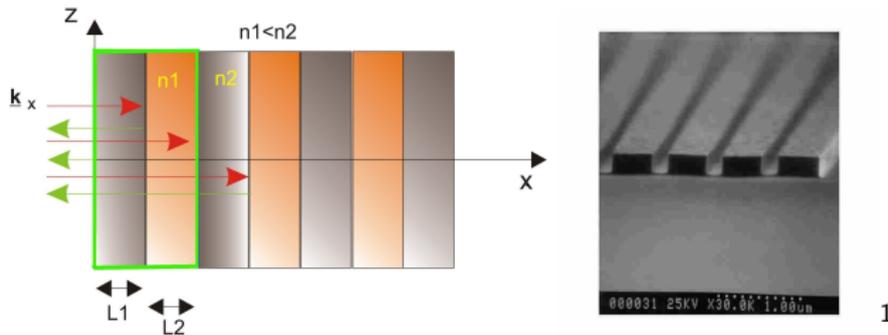


Figura: Modello di cristallo fotonico 1D con periodo $L_1 + L_2$ e campione reale;

A spessori e indici fissati esiste una lunghezza d'onda e una frequenza tale per cui l'onda viene completamente riflessa. La riflettività del multistrato è massima quando $L_{1,2} = \frac{\lambda_{1,2}}{4}$, o **lamina a un quarto d'onda**.

¹Concessione del dipartimento di fisica 'A. Volta', Università degli studi di Pavia. < > < > < >

- A incidenza normale il gap è proporzionale al contrasto fra gli indici di rifrazione $\Delta n = n_2 - n_1$;
- la riflettività del multistrato tende asintoticamente ad 1 all'aumentare del numero di periodi;
- il gap diminuisce tanto più quanto si incide fuori asse e nel limite $|\mathbf{k}_z| \gg |\mathbf{k}_x|$ si ricade nel caso della guida d'onda con sparizione dei gap.

Risultati del calcolo a bande per il multistrato mono-dimensionale al variare del contrasto dielettrico e dell'angolo d'incidenza fuori asse per le bande ai punti Γ e X a contrasto fissato:

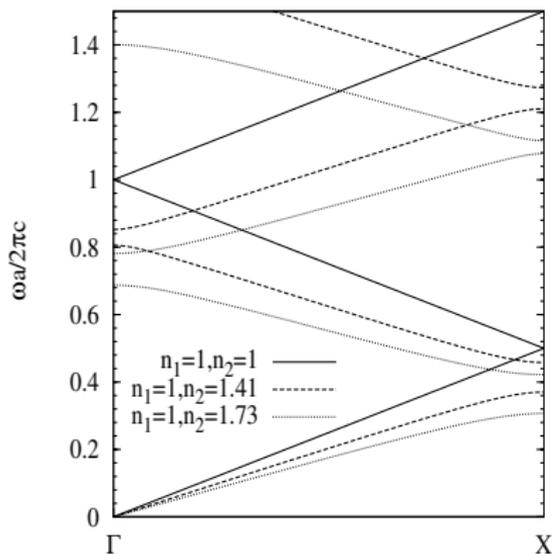


Figura: Bande al variare del contrasto dielettrico $\Delta n = n_2 - n_1$ per il multistrato;

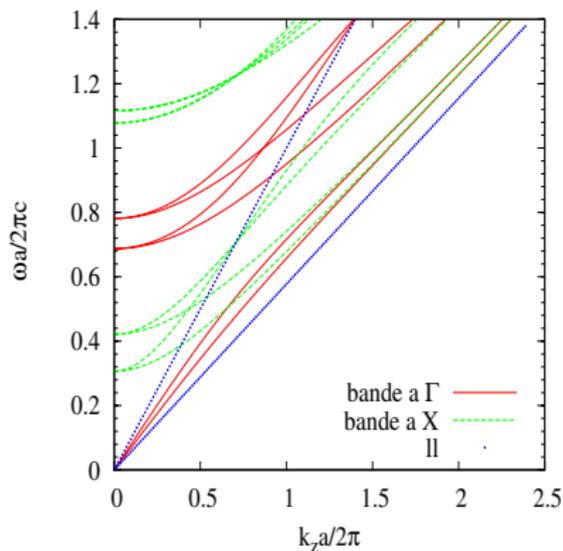
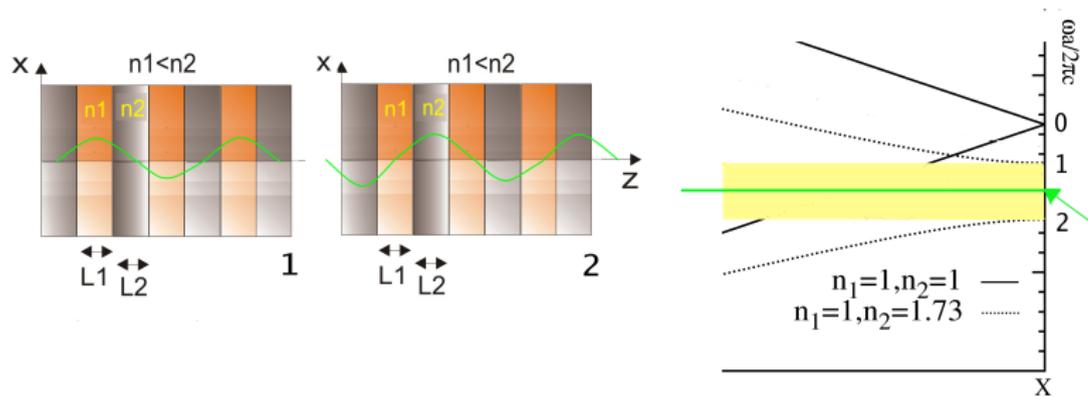


Figura: Bande al variare dell'angolo d'incidenza fuori asse $\times |\mathbf{k}_z| \neq 0$;

Per comprendere la formazione dell'insieme di frequenze proibite è necessario l'uso del **principio variazionale** applicato all'ottica.

Il campo elettromagnetico ha energia minima nella regione ad **alto** indice di rifrazione. Ma non sempre ci riesce!

Per la lunghezza d'onda calcolata dalla condizione d'interferenza costruttiva di tutte le onde riflesse alle varie interfacce si hanno due possibili configurazioni che differiscono in energia (**il gap ottico**).



La presenza di gap in energia è una certezza nei cristalli monodimensionali anche se in presenza di un contrasto dielettrico ridotto. Non è così nei cristalli con reticolo di Bravais 2D e 3D.

Nei sistemi bi-dimensionali la periodicità è in due direzioni. Si parla di gap 2D quando per tutte le direzioni in un piano di periodicità 2D esiste una comune regione di frequenze proibite. Conta ora anche la natura vettoriale del campo elettromagnetico. Il gap dipende dalla **polarizzazione** del campo elettrico.

La presenza di gap in energia è una certezza nei cristalli monodimensionali anche se in presenza di un contrasto dielettrico ridotto. Non è così nei cristalli con reticolo di Bravais 2D e 3D.

Nei sistemi bi-dimensionali la periodicità è in due direzioni. Si parla di gap 2D quando per tutte le direzioni in un piano di periodicità 2D esiste una comune regione di frequenze proibite. Conta ora anche la natura vettoriale del campo elettromagnetico. Il gap dipende dalla **polarizzazione** del campo elettrico.

Per cilindri di dielettrico $\epsilon = 8.9$ in aria disposti a reticolo quadrato il calcolo del campo al punto X per la prima coppia di bande risulta :

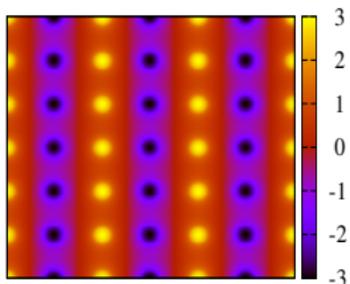


Figura: E_z , punto X, banda 1, TM

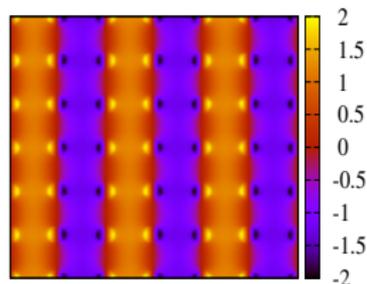


Figura: E_z , punto X, banda 2, TM

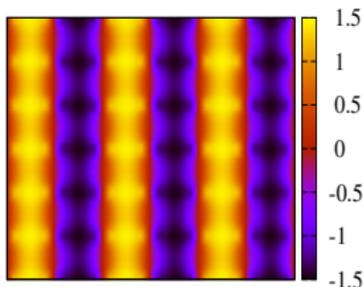


Figura: H_z , punto X, banda 1, TE

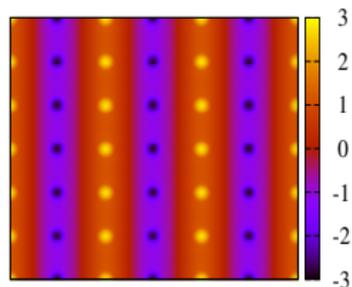


Figura: H_z , punto X, banda 2, TE

Al punto X si può ipotizzare la presenza di un **ampio gap** per i modi **TM** ed un **ridotto gap** per i modi **TE**.

Ragionando per tutte le direzioni nel piano di periodicità, la distribuzione del campo per le due polarizzazioni determina lo schema a bande seguente:

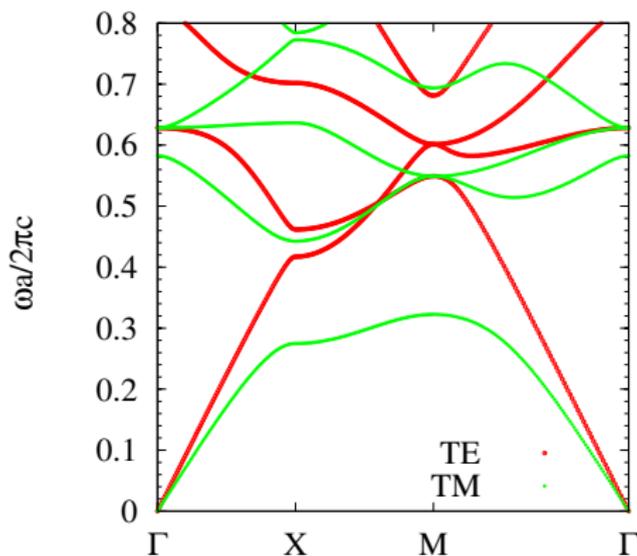


Figura: bande in polarizzazione TE e TM, per il caso di cilindri di dielettrico con $\varepsilon_2 = 8.9$ in aria disposti a reticolo quadrato;

Un cristallo fotonico 3D ha un gap di frequenze proibite per ogni direzione spaziale. Il problema tuttora attuale è la difficoltà della fabbricazione.

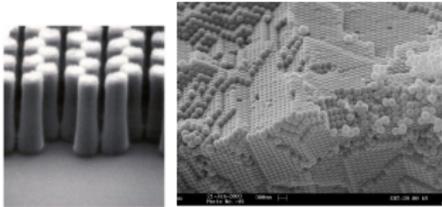


Figura: A sinistra: un cristallo fotonico 2D di cilindri di dielettrico avente struttura della grafite (base biatomica); a destra: un cristallo fotonico 3D di sfere di dielettrico a reticolo cubico a facce centrate (opale diretto);

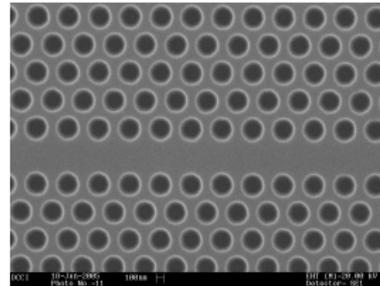


Figura: Un cristallo fotonico 2D in guida (spessore non mostrato) con difetto lineare;

Un confinamento quasi 3D è ottenuto con i cristalli fotonici bidimensionali in guida.^a

^aFoto per concessione del dipartimento di fisica 'A. Volta', Università degli studi di Pavia.

Lo scopo dei cristalli fotonici è consentire la manipolazione del campo elettromagnetico, confinandolo in una o più direzioni a seconda della dimensionalità del gap fotonico. A tale scopo si introducono difetti strutturali^a:

^aNoda et al., Nature **425**, 944-947.

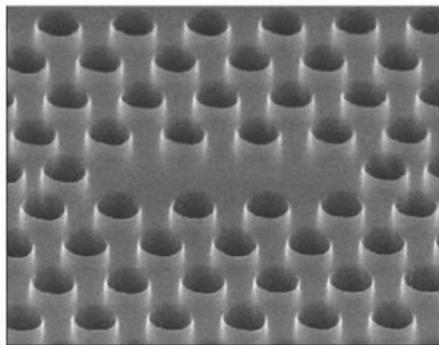


Figura: Una cavità L3 in reticolo triangolare di fori d'aria;

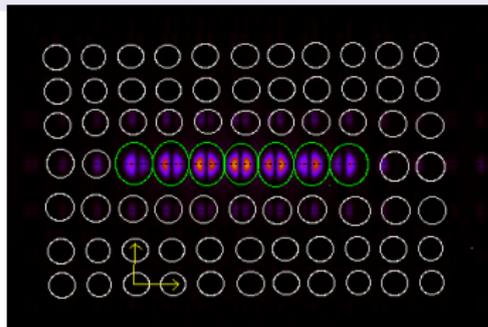


Figura: Una cavità L7 in reticolo quadrato di cilindri di dielettrico $\epsilon = 12$ immerso in guida $\epsilon = 2$;

La mancanza di un confinamento ottico 3D in tutti i sistemi a cristallo fotonico senza gap spaziale completo comporta nel tempo perdite di energia per il modo di difetto.

Lo scopo dei cristalli fotonici è consentire la manipolazione del campo elettromagnetico, confinandolo in una o più direzioni a seconda della dimensionalità del gap fotonico. A tale scopo si introducono difetti strutturali:

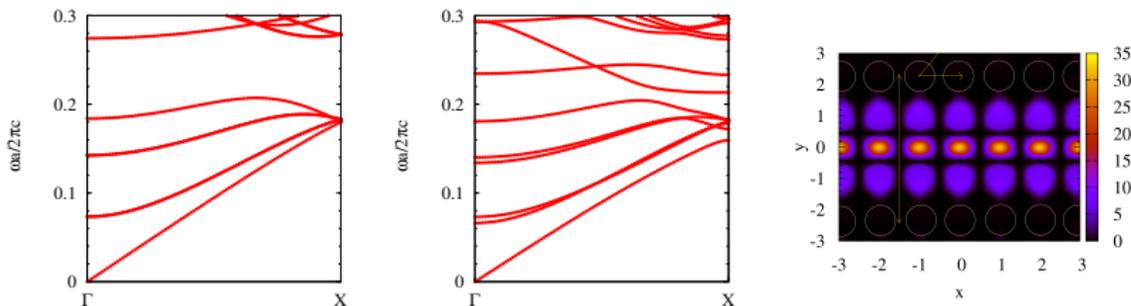


Figura: Dispersion a bande (modi TE) di un reticolo 2D triangolare di fori d'aria in matrice dielettrica $\epsilon = 12$ senza e con difetto lineare e campo elettrico di un modo di difetto;

La mancanza di un confinamento ottico 3D in tutti i sistemi a cristallo fotonico senza gap spaziale completo comporta nel tempo perdite di energia per il modo di difetto.

E' possibile ridurre le perdite di energia del modo di difetto agendo sulla geometria locale del difetto.^a

^aNoda et al., Nature **425**, 944-947.

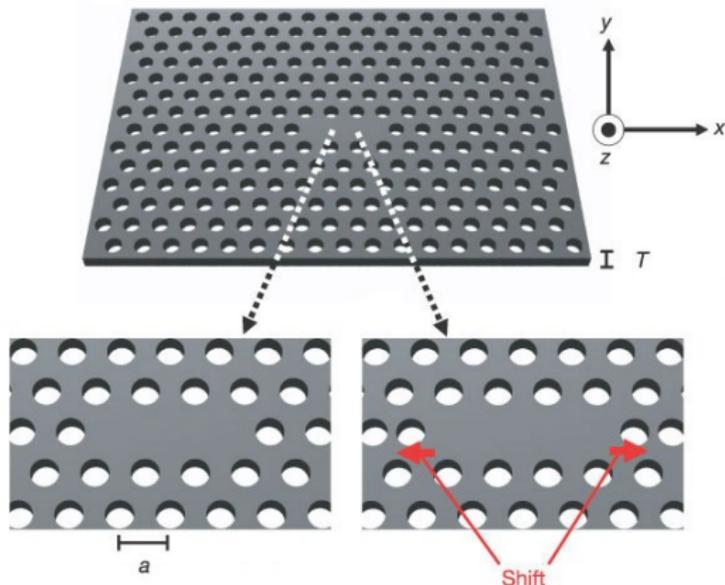


Figura: Uno spostamento dei fori di bordo può aumentare il tempo di vita del modo di cavità;

Cristalli fotonici bidimensionali in guida con difetto lineare possono essere applicati nel campo del biosensing con:

- misure di indice di rifrazione;
- misure di concentrazioni;

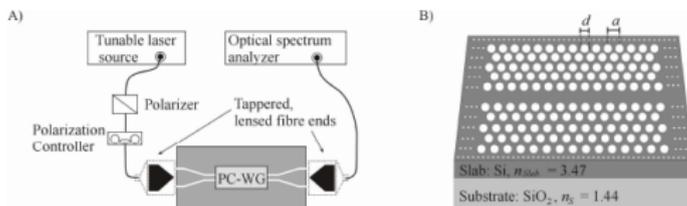


Fig. 1. (A) Experimental setup. (B) PC-WG configuration on a SOI wafer comprising a SiO_2 layer with a thickness of 2 μm , RI, $n_s = 1.44$, and a 320 nm thick silicon slab with RI, $n_{\text{slab}} = 3.47$. The lattice constant, $a = 370$ nm, and the hole diameter, $d = 240$ nm.

Figura: Schema esperimento;

Le quantità fisica in gioco è la trasmissione del modo **TE-like** in uscita dal difetto lineare di guida alla soglia del gap.

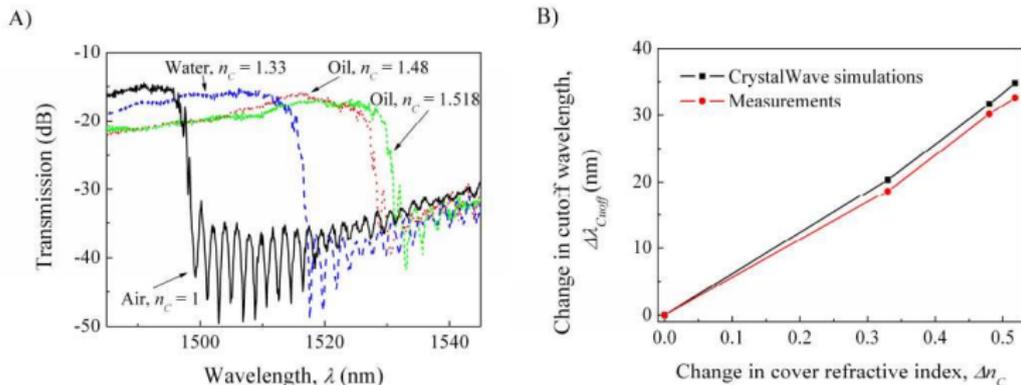


Fig. 3. (A) Measured transmission spectra from the fabricated PC-WG for four different cover solutions: Air ($n_c = 1$), MQW ($n_c = 1.33$) and two immersion oils ($n_c = 1.48$ and $n_c = 1.518$). (B) Curves showing the experimental (circles, red line) and simulated (squares, black line) changes in cutoff wavelength vs. changes in cover RI.

Le quantità fisica in gioco è la trasmissione del modo **TE-like** in uscita dal difetto lineare di guida alla soglia del gap.

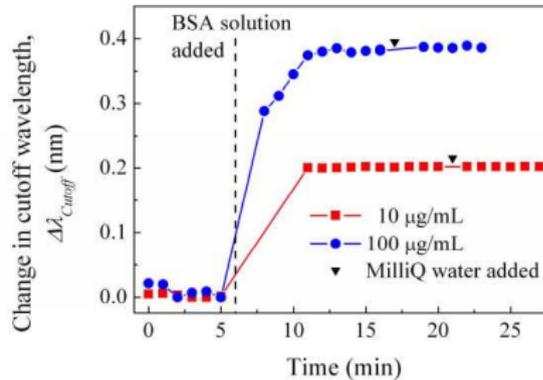


Fig. 4. Time measurements of the change in cutoff wavelength for two BSA/MQw solutions of 10 $\mu\text{g/ml}$ (squares, red line) and 100 $\mu\text{g/ml}$ (circles, blue line), respectively.

Altre applicazioni:

- filtri in frequenza (per le frequenze esterne al gap presente per la direzione scelta);
- pareti di cavità risonanti (per le frequenze interne al gap presente per la direzione scelta);
 - per dispositivi laser (serve accumulo di energia elettromagnetica);
 - per ottica non lineare (serve accumulo di energia elettromagnetica);
- guide d'onda nanometriche per futuri circuiti a segnale ottico;