

CRISTALLI FOTONICI

I cristalli fotonici sono una classe di materiali avanzati dalle molteplici risorse e possibilità di impiego futuro in campi più disparati.

Possono essere considerati l'analogo ottico dei semiconduttori: nei semiconduttori la presenza di un potenziale periodico, quale la successione ordinata di atomi che caratterizza il cristallo, provoca la formazione di bande energetiche elettroniche separate da intervalli proibiti, in cui non sono presenti stati elettronici; in un cristallo fotonico una successione periodica di dielettrici a diverso indice di rifrazione, o eventualmente di un mezzo alternato a vuoto, causa la formazione di un cosiddetto energy gap fotonico: fotoni con valori energetici interni alla gap proibita non potranno attraversare il cristallo e saranno riflessi o confinati all'interno dello stesso. L'effetto è tanto più evidente quanto la differenza tra gli indici di rifrazione risulta elevata; l'ampiezza dell'intervallo proibito può essere, in linea di principio, modellata a piacere, giocando sulla dimensione dei vuoti e dei dielettrici.

La dimensione e la posizione delle bande energetiche

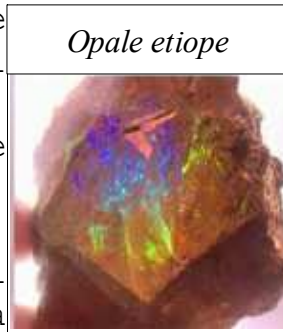
fotoniche dipende inoltre dalla disposizione e dall'impacchettamento dei dielettrici, nonché dalla direzione di propagazione dell'onda luminosa, ovvero dal suo vettore d'onda, esattamente come nel caso di onde elettroniche in un cristallo classico. Anche per quanto riguarda i pacchetti d'onda fotonici si viene a determinare una velocità di propagazione del segnale, o velocità di gruppo, che può essere diversi ordini di grandezza più bassa rispetto alla velocità della luce nel vuoto.

La realizzazione di simili materiali è molto complessa: infatti, analogamente ai difetti nei semiconduttori, rotture di periodicità all'interno dei cristalli fotonici localizzano degli stati permessi nella gap proibita; tale effetto può essere voluto per la costruzione di particolari dispositivi, ma in generale provoca una perdita di efficienza del sistema.

La sintesi di cristalli fotonici non è però un brevetto dell'uomo: da miliardi di anni la natura produce questi materiali e da milioni di anni ne fa un uso oculato per proteggere la vita nelle sue forme più disparate.

CRISTALLI FOTONICI NATURALI

La versione più antica del cristallo fotonico è sicuramente l'opale, minerale di silice amorfa



Opale etiopio

idrata formato per lentissima deposizione geologica di un gel colloidale a bassa temperatura; l'effetto fotonico crea stupendi giochi di colori e iridescenze, che variano con l'angolo di osservazione e con le caratteristiche della roccia. La variazione di indice di rifrazione è piuttosto ridotta per cui la gap energetica è stretta.

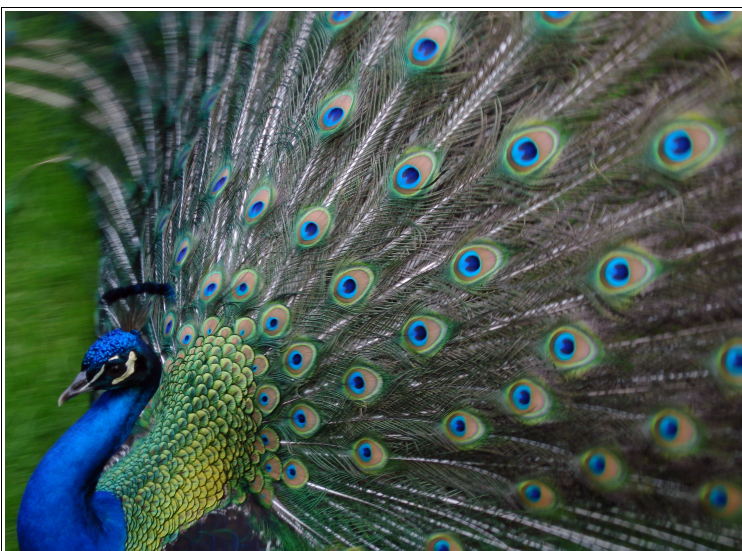
Sono numerose le specie animali che mostrano



Opale australiano

iridescenza sul proprio corpo: nella quasi totalità dei casi le cause sono da ricercarsi in meccanismi di riflessione di questo tipo; è stata verificata la presenza di cristalli fotonici in fossili di granchio di 500 milioni di anni fa.

Un esempio particolarmente maestoso tra gli animali odierni è il pavone, le cui nanostrutture chitinose presenti nelle penne della superba coda assumono riflessi verdi, blu o dorati e creano motivi simili a grandi occhi; questi sono di utilità fondamentale al pennuto sia come richiamo sessuale sia come mezzo di intimorimento e confusione dei predatori, soliti colpire le proprie prede agli occhi.



Pavone dell'Isola Madre, Lago Maggiore



Topo di mare

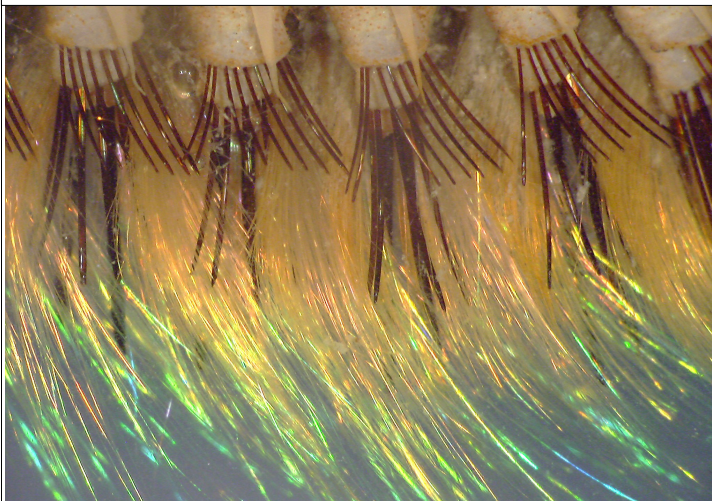
Un altro animale tanto sconosciuto quanto di grande effetto alla vista è il topo di mare, o



Topo di mare, su una mano

Afrodita aculeata, un mollusco peloso che striscia sui fondali da 1 a 2000m di profondità; la peluria che lo ricopre

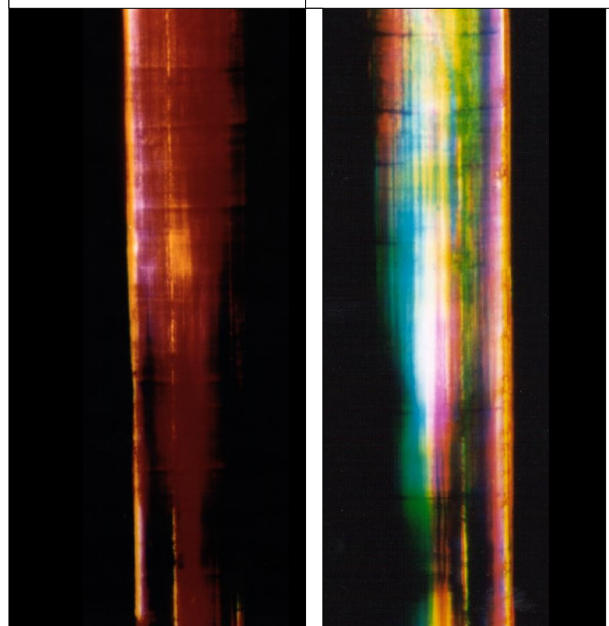
Topo di mare, particolare della peluria



appare molto simile alle nostre fibre ottiche, ma con una raffinatezza propria soltanto della natura.

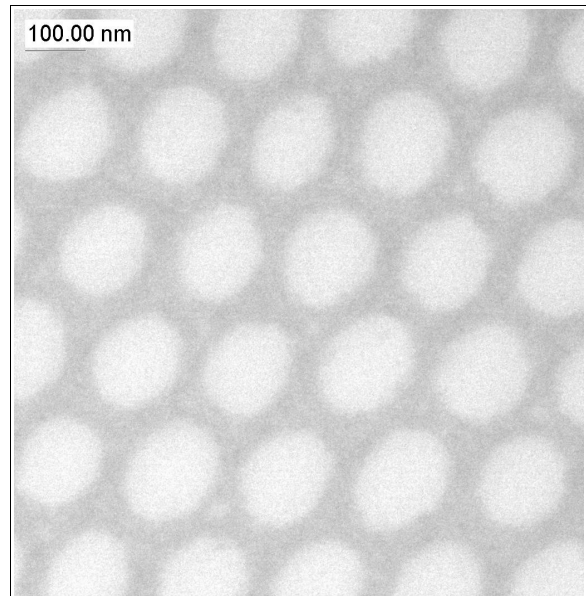
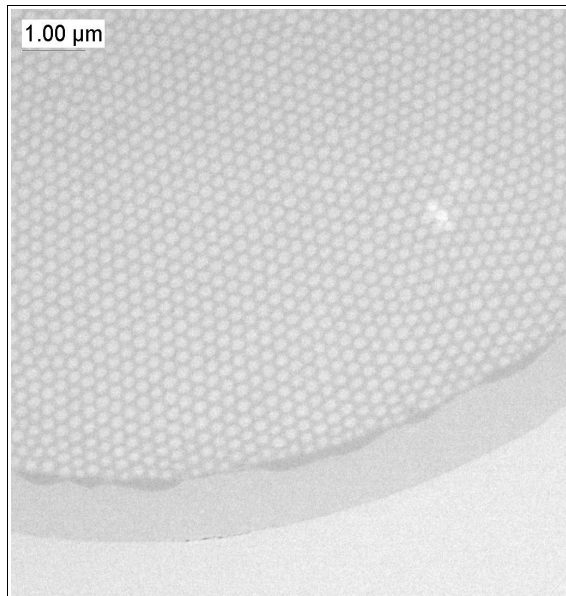
L'iridescenza anche in questo caso è attribuibile alle nanostruttura della peluria; lo stesso vale per gli aculei: ognuno di essi assume una colorazione rosso carminio se illuminato perpendicolarmente all'asse della fibra, mentre un diverso angolo di incidenza provoca una dispersione delle lunghezze d'onda ed un effetto straordinario; nel primo caso in direzione perpendicolare la sola luce rossa viene espulsa dal cristallo, mentre nel secondo agisce l'effetto di differenti band gap in diverse direzioni cristallografiche.

Aculei in illuminazione perpendicolare e non



Ingrandendo al microscopio elettronico la sezione di un aculeo si riscontra una struttura di chitina con dei vuoti perfettamente ordinati

alle corazze dei coleotteri forgiate con una maestria di colori ancora una volta nella chitina. Recentemente è stato analizzato un particolare coleottero del



Aculei del Topo di mare, immagine SEM della sezione

Quello degli insetti è il genere animale in cui più spesso si evidenzia la presenza di cristalli fotonici, basti pensare

Brasile, il *Lamprocyphus augustus*, la cui brillante corazza verde con riflessi giallo dorati tradiva chiaramente la presenza di cristalli fotonici; le nanoparticelle che compongono le scaglie, disposte in una struttura a zinco-blenda/diamante, ma ovviamente di maggiori dimensioni rispetto a quella atomica, si sono rivelati essere un materiale di sintesi inaccessibile all'uomo con le attuali tecnologie: un cristallo fotonico tridimensionale perfetto. Questa struttura ideale sarà usata come modello



Lamprocyphus augustus

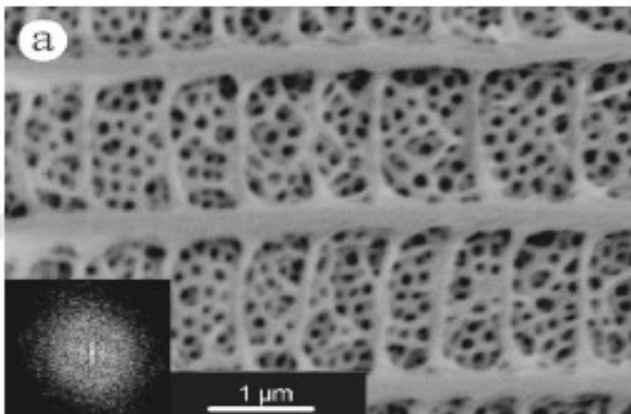
per la teorizzazione e creazione di nuovi cristalli fotonici. L'insetto che ha però raccolto il maggior numero

verificare un'ipotesi sul differenziamento cromatico di farfalle molto simili. La *Polyommatus daphni* e la *Polyommatus marcidus* sono

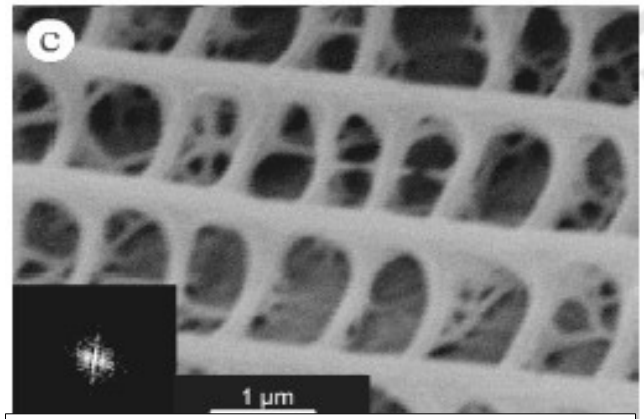


di studi in questo ambito è però la farfalla: la maggior parte dei Lepidotteri ha infatti ali variopinte a causa di effetti di interferenza e diffrazione come quelli

due specie molto simili, la prima caratterizzata da ali blu iridescenti, tipica delle basse quote, e la seconda dotata di ali marroni e localizzata sui monti oltre i 2500m.



P. daphni, immagine SEM



P. daphni, immagine SEM

dei cristalli fotonici, piuttosto che di pigmenti. Uno dei ruoli più particolari di queste nanostrutture è quello di regolazione termica. In un articolo del 2003, Birò et al., hanno tentato di

Con l'obiettivo di cogliere le differenze tra le due specie le ali delle due farfalle sono state

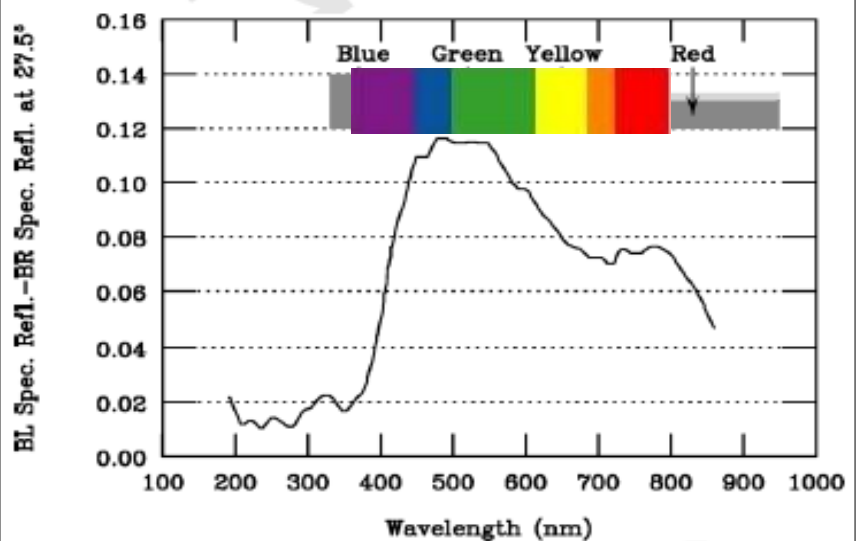
osservate al microscopio ottico ed al SEM; le squame alari della prima

presentano una struttura nanometrica in corrispondenza delle regioni colorate di blu e di viola, struttura completamente assente o minimamente abbozzata nelle squame della seconda.

La struttura della prima ha un comportamento di tipo fotonico nonostante non manifesti un ordine a lungo raggio: si ha una sorta di energy gap in un materiale amorfo, del tutto simile a quella del silicio amorfo idrogenato; la forma e la dimensione media dell'unità nanometrica detta le condizioni della gap fotonica: celle più circolari e ridotte portano a riflessione del violetto, mentre celle ovali e più grandi riflettono il blu.

La differenza tra ali nanostrutturate e non viene evidenziata anche da misure di riflettanza: nel grafico i due spettri sono stati sottratti e si nota un picco di riflessione nel blu-verde assente nelle ali marroni.

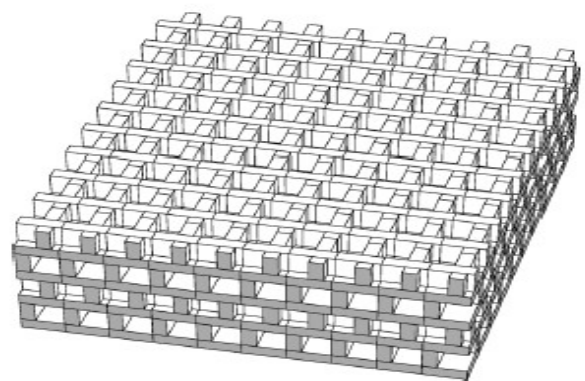
Si può notare l'estrema flessibilità di questo tipo di struttura, le cui proprietà possono essere variate secondo necessità modificando anche solo



Differenze in riflessione tra le due ali

lievemente alcuni dei parametri del materiale, a patto di possedere le conoscenze necessarie a tale sintesi.

Nello stesso articolo è proposto un modello di questa struttura, reso periodico e calcolata sulla base delle immagini ottenute al SEM ed alle relative trasformate.

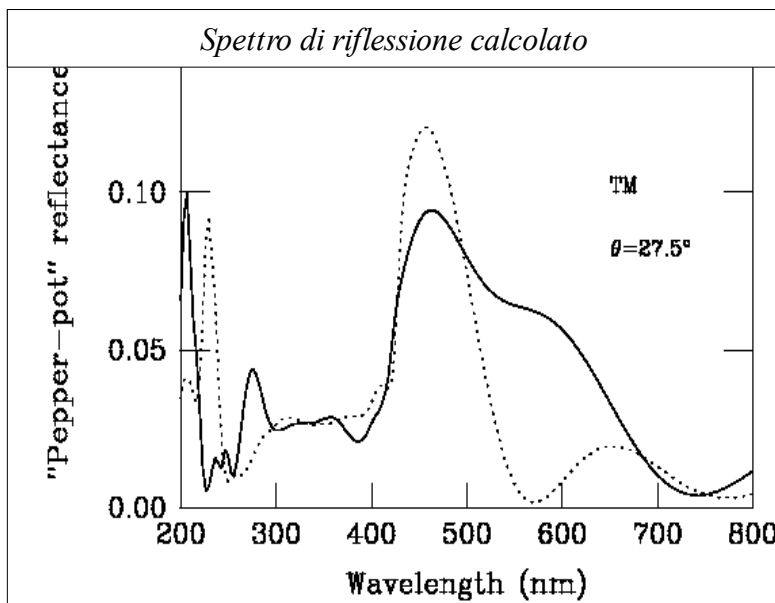


Modello della nanostruttura fotonica

Partendo dal modello è stata calcolata l'interazione con una perturbazione elettromagnetica per

determinare uno spettro di riflessione teorico: la variazione di parametri di forma e dimensione delle cavità nel calcolo si traduce effettivamente in un modifica dello spettro. Come accennato in precedenza, l'ipotesi sulla funzione della

fondamentale per la sopravvivenza, soprattutto ad alta quota: ecco che le farfalle meno riflettenti, quelle marroni, sono più adatte alla vita sui monti e riescono a riprodursi e trasmettere il proprio corredo cromosomico. Può allo stesso modo essere vero il fatto che le farfalle blu, nanostrutturate, che effettivamente sono più complesse, siano un'evoluzione delle più semplici, le marroni; le farfalle, a bassa quota, potrebbero aver avuto bisogno di una miglior sistema di "raffreddamento" per non raggiungere temperature troppo elevate: ecco che per colonizzare le pianure le farfalle avrebbero sviluppato la struttura fotonica come mezzo di difesa. Fatto reale e comprovato è l'effettivo maggior riscaldamento per assorbimento luminoso subito dalle ali marroni: questo dato è stato ottenuto tramite misure di calorimetria differenziale di campioni illuminati, usando come riferimento della carta bianca, poiché la cellulosa ha caratteristiche molto simili a quelle della chitina.



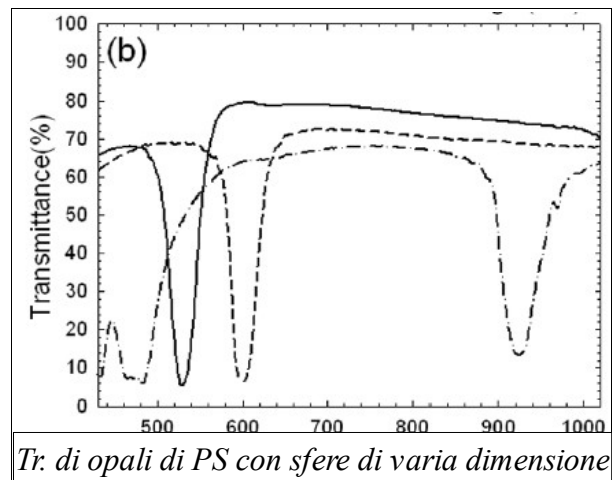
diversa morfologia delle scaglie alari delle farfalle delle due specie riguarda la termoregolazione: gli esemplari maschili delle farfalle fuoriescono dai bozzoli con una settimana di anticipo rispetto alle femmine, per poter pattugliare il territorio in cerca di luoghi per la deposizione delle uova. Essendo le farfalle, come tutti gli insetti, animali a sangue freddo, la capacità di assorbire la luce solare per il proprio riscaldamento è

CRISTALLI FOTONICI SINTETICI

La fabbricazione artificiale di cristalli fotonici non ha nulla a che vedere con la precisione e l'efficacia della natura nello stesso ambito; proprio per questo motivo le reazioni di sintesi naturale devono essere studiate e prese d'esempio per mimarle e riprodurle.

È il caso della fabbricazione di opali a base polistirenica messa in atto, fra i tanti, da *Ha* e *Wu*. Nell'articolo da essi presentato i due ricercatori hanno preparato un impacchettamento ordinato e compatto di sferette di polistirene da una sospensione colloidale. La sospensione è stata versata in una camera ottica di spessore controllato ed il processo di deposizione delle sferette, che decorrerebbe spontaneamente nel giro di alcune settimane, è stato accelerato dall'uso di una centrifuga.

Del campione così ottenuto è stato misurato uno spettro di trasmittanza, trovando un legame, come atteso, tra dimensione delle sferette e posizione della gap energetica.



Già all'osservazione ad occhio nudo i cristalli creati mostrano una caratteristica iridescenza. Successivamente il solvente è stato evaporato ed una delle due pareti della cella ottica è stata rimossa. La superficie dell'opale sintetico esposta all'esterno è stata ricoperta da Pt per permetterne l'osservazione al SEM: da questa si è potuto classificare come *fcc* l'impacchettamento delle sfere, con le facce (111) parallele alle paratie della camera ottica.

Immagine SEM di un opale di PS

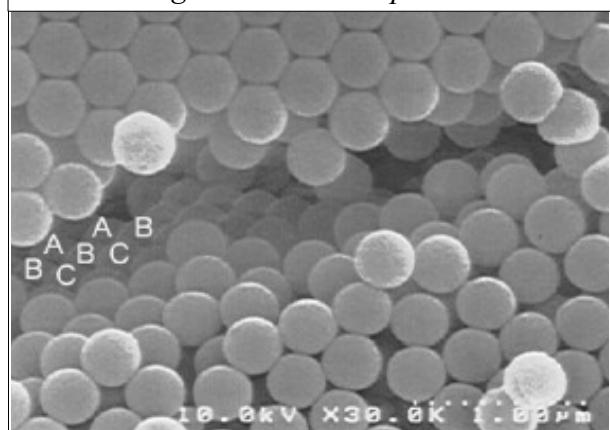
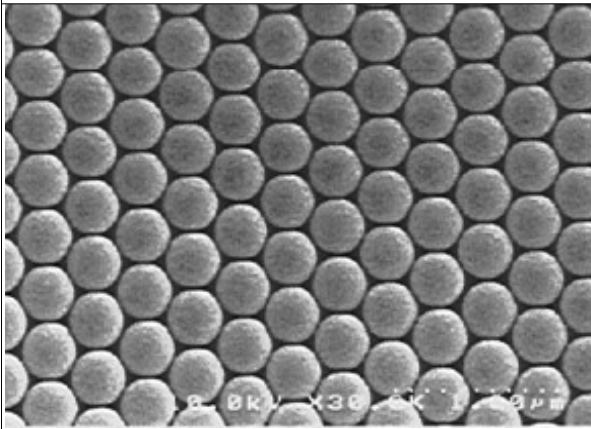


Immagine SEM della faccia (111)



Il calcolo teorico della gap proibita di questi opali sintetici è stato svolto con l'uso della legge di Bragg, modificata per includere gli effetti della presenza alternata di vuoto e di un mezzo dielettrico con indice di rifrazione caratteristico. La formula risultante per il calcolo delle lunghezze d'onda che subiranno diffrazione contiene effettivamente una dipendenza dalla dimensione delle sfere e propone risultati coerenti con le misure sperimentali di trasmittanza (meglio definibile in questo caso come diffrazione di IR-visibile); il secondo picco presente nello spettro sperimentale viene a coincidere con una diffrazione del second'ordine.

Lo sviluppo della conoscenza dei cristalli fotonici apre le porte a

tutta una serie di applicazioni. La possibilità di diffrangere ed intrappolare la luce visibile permette l'ottimizzazione di pannelli solari: aumentando il cammino dei fotoni è possibile ridurre drasticamente lo spessore dello strato di semiconduttore usato per la costruzione del dispositivo, mantenendo elevata la probabilità di assorbimento e creazione di coppie elettrone-lacuna. Traendo spunto dai suggerimenti delle ali delle farfalle sarà possibile l'utilizzo come schermo e meccanismo di raffreddamento o protezione termica delle apparecchiature più disparate, a partire dai satelliti. Sicuramente i cristalli fotonici troveranno largo impiego nelle telecomunicazioni: tutt'ora la trasmissione di dati viene sempre più affidata alla fibra ottica; un avanzamento delle potenzialità di questa potrà avvenire con l'utilizzo di più segnali a diverse lunghezze d'onda: per far ciò sono necessari emettitori laser ancor più monocromatici e a risposta ancor più

rapida; la loro realizzazione può essere analoga a quella degli attuali diodi laser, ma con l'utilizzo, in aggiunta come specchi selettivi o sostitutivo come veri e propri emettitori, di cristalli fotonici. Altra necessità per questo scopo è quella di separare il segnale in arrivo secondo la lunghezza d'onda, ruolo brillantemente svolto sempre da questi materiali.

La possibilità di maneggiare i fotoni nella maniera in cui oggi trattiamo gli elettroni dei semiconduttori sta dando il via alla ricerca ed alla progettazione di computer fotonici: fino ad oggi i segnali luminosi delle connessioni necessitano di essere trasdotti in impulsi elettrici. Un computer fotonico sostituirà gli odierni circuiti elettronici con percorsi ottici, con ovvio aumento nelle potenze di calcolo (si stimano processori fino a 1000Thz) e crollo della dissipazione di calore tramite effetto Joule. Uno dei maggiori problemi in questo ambito è la realizzazione di guide d'onda in grado di piegare la direzione di

propagazione della luce con ridottissimi raggi di curvatura (basti pensare alle dimensioni di un circuito stampato su un wafer di Si) senza perdite di segnale: le fibre ottiche, che si basano sulla totale riflessione interna, possiedono un raggio critico di curvatura al di sotto del quale l'impulso luminoso viene rapidamente perso. La localizzazione di stati all'interno della gap di un cristallo fotonico, introducendo difetti nella periodicità, può portare all'intrappolamento ed al confinamento di luce ad una λ tipica, e quindi alla realizzazione di guide d'onda senza i limiti delle fibre ottiche.

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

▲ Greg Parker G. & Charlton M. - **Photonic crystals** - Aug 1, 2000 - <http://physicsworld.com>

▲ Kevin Bullis - **Cheaper, More Efficient Solar Cells** - Mar 21, 2007 - <http://www.technologyreview.com>

▲ L. P. Birò et al. - **Role of photonic-crystal-type structures in the thermal regulation of a Lycaenid butterfly sister species pair** - 2003 - The American Physical Society

▲ N. Y. Ha & J. W. Wu - **Fabrication and Optical Characterization of 3-D Polystyrene Colloidal Photonic Crystal** - 1, Jul 2004 - Journal of the Korean Physical Society

▲ University of Utah - **Brazilian Beetle Lights the Way for Optical Computers of the Future** - 21, May 2008 - <http://www.nano.org.uk>

▲ <http://www.wikipedia.org>