



# Composti polimerici conduttivi e Quantum Tunneling Composite

Versione: 24/10/2012



I materiali di NANOLAB, inclusa la presente guida, sono proprietà degli autori di NANOLAB ([www.nanolab.unimore.it](http://www.nanolab.unimore.it)) e distribuiti con licenza Creative Commons 3.0

## I composti polimerici conduttivi

Il confine tra isolanti e conduttori elettrici non è così netto come in genere si tende a pensare: metalli da una parte, plastica, vetro, ceramica, legno dall'altra. Oggi, grazie alla scienza dei materiali, la gamma della conducibilità è estremamente modulata. La ricerca conduce verso materiali conduttori sempre più leggeri, economici e versatili. Si possono avere vetri, materiali ceramici, polimeri...tutti conduttivi grazie ad opportuni trattamenti. Un vetro, per esempio, può essere ricoperto da un sottile film di biossido di titanio. In particolare, pensiamo spesso alla plastica come ad un isolante. Tuttavia per certe applicazioni è necessario avere a disposizione materiali plastici conduttori. Ad esempio gli stivali antistatici di sicurezza dei pompieri sono dotati di una suola che conduce la corrente per evitare la generazione di scintille che potrebbero portare ad esplosioni in ambienti saturi di gas. Il packaging di certi strumenti elettronici, che potrebbero venire danneggiati da scariche prodotte dall'accumulo di carica, è anche esso in materiale plastico antistatico.

La gomma elettro-conduttiva tradizionale è tipicamente prodotta da gomma vulcanizzata ad alto contenuto di nerofumo. Particelle conduttive di carbonio o metalli, fibre di carbonio, grafite, carboni pirolitici, carboni neri (questi ultimi con una larga gamma di purezza e morfologia) sono state inserite in composti polimerici<sup>1</sup> fin dagli '50.

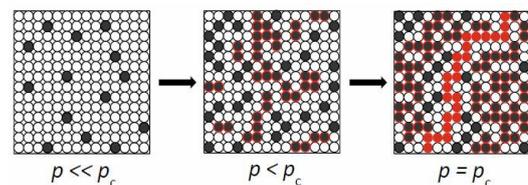


Fig.1 Percolazione: il formarsi dei cammini conduttivi all'aumentare della concentrazione.- Image courtesy: .T.Zimmerman, Pennsylvania State University, Altoona College.

<sup>1</sup> Attualmente vengono utilizzati come filler anche nanotubi di carbonio.



## Percolazione

I composti polimerici conduttivi tradizionali conducono grazie ad un meccanismo detto percolazione. Questi materiali sono costituiti da una matrice isolante nella quale sono disperse delle particelle conduttive di dimensioni micrometriche. Per la conduzione del composto è determinante la **concentrazione**, ovvero il rapporto filler-matrice polimerica.

Immaginiamo infatti di creare diversi campioni con contenuto di particelle metalliche crescente. Esiste una soglia critica di tale contenuto (indicata in figura 1 come  $p_c$ ) a cui il campione diventa improvvisamente un eccellente conduttore, poiché si è creato almeno un percorso continuo per il passaggio di corrente attraverso le particelle metalliche (fig.1). Oltre questa soglia la conduttività  $\sigma$  del campione aumenta ulteriormente col formarsi di nuovi cammini ottenuti aggiungendo altro metallo, ma tenderà poi a saturarsi.

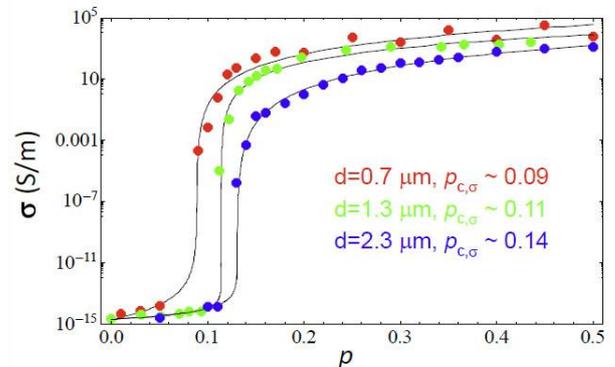


Fig.2 Soglia di percolazione e saturazione per particelle di diametro variabile. . Image courtesy: D.T.Zimmerman, Pennsylvania State University, Altoona College.

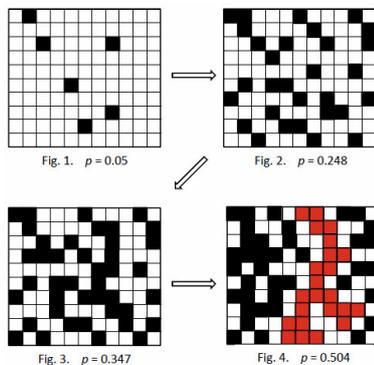


Fig.3 Soglia di percolazione e saturazione per particelle di diametro variabile Image courtesy: T.Zimmerman, Pennsylvania State University, Altoona College.

La Fig. 2 mostra il cambiamento drammatico nella conducibilità alla **soglia di percolazione** per particelle sferiche di diverso diametro. Anche altre proprietà fisiche e chimiche del campione cambiano nelle vicinanze di tale soglia. E' inoltre possibile ingegnerizzare la soglia di percolazione, che dipende anche dalla forma delle particelle che compongono il filler, risultando inferiore all'1% per particelle "ad ago" e superiore al 10% per particelle sferiche. E' possibile abbassare la soglia di percolazione in composti anisotropi durante la manifattura: catene di particelle allineate vengono forzatamente prodotte tramite l'applicazione di campi elettrici o magnetici.

Il meccanismo della percolazione può anche essere studiato efficacemente con simulazioni al computer. Immaginate una scacchiera su cui vengano annerite a caso delle caselle. Se la probabilità per ogni singola casella di venire dipinta è bassa (per es. 20%), allora la frazione di caselle dipinte sulla intera scacchiera sarà attorno allo 0.05 (Fig.3.1). Se si si ripete il processo aumentando la probabilità di annerimento della singola casella allora si nota che si vanno formando interi gruppi di caselle adiacenti nere. (Fig.3.2). Procedendo ulteriormente in questo modo la dimensione dei raggruppamenti cresce. In Fig.3.3 uno dei clusters attraversa quasi tutta la scacchiera. In Fig. 3.4, quando  $p = p_c = 0.5$ , i cluster



più grandi formano dei percorsi completi senza interruzione da un lato all'altro della scacchiera. Tale transizione da nessun percorso conduttivo ad almeno uno di essi è detta **transizione di percolazione**, ed è una vera e propria transizione di fase. Se la scacchiera rappresenta un vero campione costituito di particelle conduttive (nere) e isolanti (bianche) allora esso diventa un buon conduttore una volta che il cluster più grande attraversa tutto il campione. I ricercatori usano i calcolatori per simulare i vari schemi e investigare come crescono i cluster incrementando il valore di  $p$ . Tali simulazioni permettono di modellizzare veri campioni fisici e di capire il meccanismo tramite cui le proprietà di materiali reali cambiano vicino alla soglia di percolazione.

In genere i composti elettro-conduttivi basati sul fenomeno della percolazione presentano una conducibilità che varia con la sollecitazione meccanica. Infatti, per un dato campione, il numero di particelle a contatto, e conseguentemente di percorsi conduttivi, aumenta comprimendo il materiale e quindi la concentrazione relativa di particelle. Nel caso di trazione, le particelle vengono allontanate e la conducibilità diminuisce (con qualche rara eccezione). Questo meccanismo può essere sfruttato per progettare sensori e trasduttori molto sensibili. Tuttavia, la resistenza elettrica  $R$  di questi materiali varia in un **range** abbastanza ristretto, tipicamente tra  $10^3\Omega$  e  $10^2\Omega$  per campioni di pochi  $\text{mm}^2$ .  $R$  cioè non si azzerava mai e non supera mai una soglia max., dipendente dal materiale specifico. Inoltre la **risposta alla pressione** applicata è per lo più **lineare**. Questo limita le prestazioni dei composti polimerici conduttivi tradizionali come sensori di pressione.

## II QTC

I quantum tunneling composites (QTC) sono materiali apparentemente simili ai composti polimerici tradizionali, ma sulla scala nanometrica differiscono da questi in un modo del tutto speciale. Il meccanismo di conduzione è molto diverso, basato su effetti quantistici, il che li rende adatti ad applicazioni particolari.

L'inventore del QTC, David Lussey, lavorava alla ricerca di un adesivo che conducesse corrente per un sistema di etichette antifurto da applicare ai PC di una scuola, quando un apparente tentativo fallito (1996) si rivelò invece l'inizio di una strada molto promettente. Di prassi Lussey testava i propri adesivi ponendoli tra due lastre metalliche che poi venivano separate, misurando nel contempo la conducibilità. Nell'applicare lo stesso procedimento ad un nuovo composto basato su particelle di Nickel, si rese conto che sottoponendo a trazione un particolare campione, apparentemente isolante, questo al contrario diventava un ottimo conduttore.

La cosa curiosa era che il nuovo materiale raccoglieva in sé proprietà che già erano state osservate separatamente in singoli campioni di diversi materiali, ma mai tutte assieme. Il QTC nello stato non deformato è praticamente un isolante ( $R$  quasi infinita) mentre qualunque tipo di deformazione meccanica, compressione, trazione o torsione, ne diminuisce la resistenza fino a raggiungere comportamenti metallici.



### Il meccanismo di conduzione

L'evidenza delle immagini TEM e SEM è stata fondamentale nel guidare i ricercatori nella comprensione delle proprietà del materiale. Due fattori che emergono chiaramente dalle immagini al microscopio elettronico, sono

- la presenza di **punte**: la superficie delle particelle di Nickel presenta una struttura con numerose e sottilissime punte, progettata appositamente per facilitare lo scorrimento della polvere nell'uso metallurgico (Fig. 4 );
- la forte **bagnabilità** (adesione) del materiale polimerico con le particelle metalliche, che risultano così interamente ricoperte ed isolate.

Nella preparazione del QTC, particelle metalliche di Nickel di dimensioni micrometriche vengono mescolate alla matrice polimerica (elastomero) in modo del tutto casuale e praticamente a mano. Solitamente nei materiali simili a questo il mescolamento avviene per via meccanica e produce un effetto collaterale di "macinatura" che riduce le particelle del filler ad una forma sferica. Ciò non è accaduto nel QTC dove, grazie al mescolamento più delicato, la nano struttura superficiale conserva delle punte finissime che appaiono come uno degli elementi fondamentali del particolare meccanismo conduttivo. Infatti, se vengono di proposito danneggiate le punte, lo stesso tipo di composto diventa molto meno sensibile alle pressioni applicate. La morfologia delle particelle è visibile al TEM.

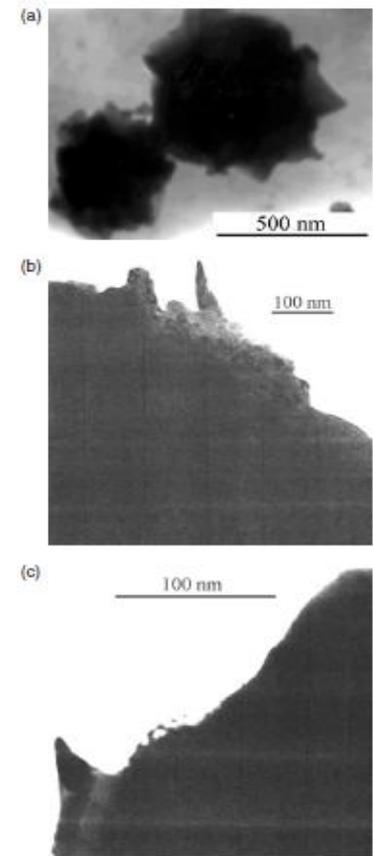


Fig.4 Le immagini TEM evidenziano le dimensioni delle particelle ( $0,5 \mu$ ) e delle punte (100 nm). Image courtesy D.Bloor Durham University, UK

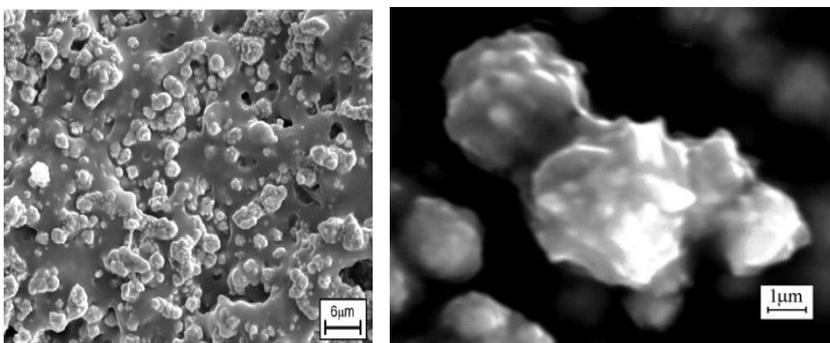


Fig.5 Le immagini SEM permettono di apprezzare come l'elastomero avvolga isolandole completamente, le particelle di Nickel Image courtesy: D.Bloor Durham University, UK.

Nelle immagini SEM (Fig. 5) il coating non permette di vedere immediatamente e distintamente le punte. Utilizzando un potenziale acceleratore elevato, tuttavia, in modo da avere una maggior penetrazione degli elettroni è possibile discernere la struttura a punte sottostante tramite immagini di elettroni secondari.



Si nota anche l'elevata concentrazione del filler. Le distanze tra le particelle sono variabili in un intervallo piuttosto ampio, ma molte particelle distano tra loro meno di 100 nm. Una concentrazione così elevata del filler in assenza del coating polimerico isolante produrrebbe sicuramente numerosi percorsi conduttivi per percolazione. Nel caso del QTC, invece, a causa della alta bagnabilità delle particelle, tali percorsi risultano continuamente interrotti dalla barriera isolante costituita dall'elastomero. Di conseguenza, "iniettando" cariche nel composto queste non riescono a fluire liberamente e si installano sulle particelle metalliche dando vita a campi elettrostatici locali, che alle punte possono raggiungere valori estremamente elevati. Tali punte possono produrre aumenti fino ad un fattore mille del campo elettrostatico locale, favorendo la **emissione di campo assistita** dal cosiddetto processo **Fowler Nordheim tunneling**.

Nel QTC, perciò, le particelle non entrano mai in contatto, pur diminuendo la propria distanza. Ciò esclude la possibilità di percolazione. Tuttavia tale diminuzione rende possibile il passaggio di carica per effetto tunnel<sup>2</sup> tramite le punte.

### I dati sperimentali

Diversi tipi di dati sperimentali sono consistenti con il modello ipotizzato, secondo il quale i meccanismi di conduzione sono dominati dall'effetto tunnel.

Innanzitutto la dipendenza di tipo esponenziale di  $R$  dalla pressione esercitata. Come si è detto, nel

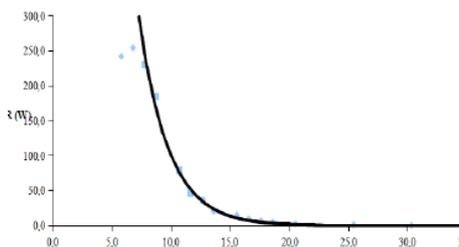


Fig. 6. Resistenza in funzione della forza peso applicata.

QTC non può esserci un meccanismo di percolazione. Nel suo stato normale (zero compressione) dovrebbe perciò essere isolante, ovvero avere  $R$  infinita. Sperimentalmente si trovano invece valori con ordine di grandezza elevati ma comunque finiti (anche fino a  $10^{14}$  Ω, mentre i composti al carbonio normalmente non vanno oltre il migliaio di Ω, in quanto, anche al di sotto della soglia di percolazione, permane un minimo di conducibilità). Il risultato appare ancora più strano se si considera che il QTC

rimane isolante ad una proporzione a peso di 4-6:1 metallo/polimero, rapporto di solito più che sufficiente a raggiungere e superare la soglia di percolazione.

L'effetto piezoresistivo<sup>3</sup> mostrato dai QTC è molto forte e la resistività del materiale è estremamente sensibile alla deformazione: sotto una modesta compressione,  $R$  può passare

<sup>2</sup> Vedi in fondo al documento "Effetto tunnel quantistico"

<sup>3</sup> I materiali piezoresistivi sono materiali che modificano la propria resistenza al variare della pressione applicata.



rapidamente da  $10^{12}$ - $10^{13} \Omega$  a meno di  $1 \Omega$ . Si tratta di un *range* dinamico eccezionalmente ampio per una proprietà di un materiale solido a temperatura ambiente. Coerentemente con l'ipotesi dell'effetto tunnel, se la deformazione e la conseguente diminuzione degli interspazi tra le particelle metalliche fosse lineare, il decadimento esponenziale della funzione d'onda elettronica deve riflettersi in una probabilità esponenzialmente più alta di tunneling. A tensione costante, perciò, questo dovrebbe produrre una decrescita **esponenziale** della resistenza, ciò che infatti si osserva (Fig.6).<sup>4</sup>

Un'altra caratteristica insolita è il fatto che la resistenza cali reversibilmente in modo esponenziale anche sotto estensione, trazione, torsione o piegatura. Normalmente nei composti tradizionali  $R$  aumenta a seguito di estensione, come è facile intuire dal fenomeno della percolazione, poiché questa tende mediamente ad allontanare le particelle disperse nell'elastomero.

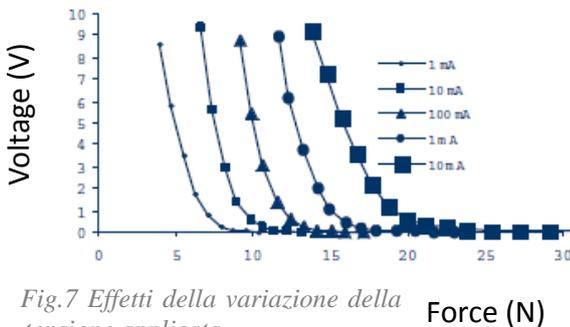


Fig.7 Effetti della variazione della tensione applicata.

Forza (N)

Anche gli effetti di una variazione di tensione applicata, a parità di compressione esercitata (fig.7), sono coerenti con il modello di conduzione basato sull'effetto tunneling. Con tensioni molto basse gli elettroni ricevono poca energia e non

sono in grado di attraversare in numero significativo la barriera del materiale isolante per effetto tunnel. Pertanto, nel suo stato normale (zero compressione) il QTC è un isolante. Anche ad un livello di compressione che consente la conduzione, le correnti risultano comunque molto basse. Aumentando la tensione, ovvero l'energia fornita agli elettroni, la probabilità di avere un tunneling aumenta in maniera considerevole. A parità di pressione esercitata rispetto al caso precedente si osserva un passaggio di corrente maggiore.

Per comprendere meglio i meccanismi di diffusione della carica nei QTC, è utile considerare anche la caratteristica IV, che presenta comportamenti decisamente anomali. Sostanzialmente ohmica per pressioni quasi nulle od estremamente elevate risulta invece altamente non lineare, con un regime di resistenza negativa ed una pronunciata isteresi a pressioni intermedie. In genere i composti al carbonio tradizionali mostrano andamento lineare, a meno che non ci sia un effetto Joule intenso (in tal caso si vede un piccolo regime di resistenza negativa). In figura 8b) si osserva

<sup>4</sup> Nella pratica è difficile effettuare una compressione lineare lungo la direzione che congiunge le particelle (ancora più difficile nelle QTC *pills* che nella QTC *sheet*, dato il maggior spessore). Invariabilmente, infatti, il materiale si deforma in modo molto complesso, in relazione al modo in cui la forza viene applicata. Perciò il rapporto (compressione percentuale) / Forza non è esattamente lineare, e il comportamento di  $R$  in funzione della forza applicata può deviare da una curva esponenziale. Ciononostante, l'andamento rimane molto diverso da quello osservato per i composti tradizionali.

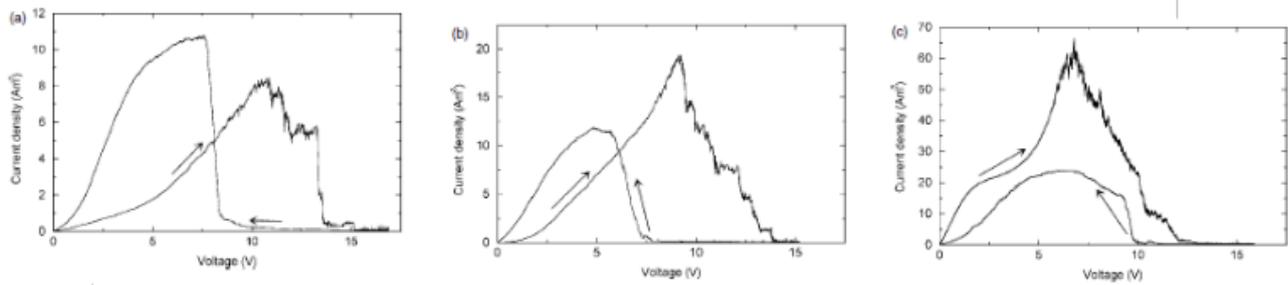


Fig.8 Curve caratteristiche IV del QTC per  $R$  iniziale di  $100\text{ k}\Omega$ ,  $900\ \Omega$  e  $10\ \Omega$ . Image courtesy D. Bloor Durham University. Effetto del variare la tensione mantenendo la compressione costante. Si nota il comportamento altamente non ohmico. Risulta invece ohmico per stati di bassa e ultra compressione.

una curva caratteristica a compressione intermedia. La resistenza iniziale  $R_0$  può essere determinata dalla pendenza iniziale del grafico. La crescita, all'inizio sempre più veloce, raggiunge una corrente  $I_{\max}$ . Continuando ad aumentare la tensione la corrente cala, e si ha un regime di resistenza negativa caratterizzato da apparenti fluttuazioni casuali di  $I$ . Diminuendo la tensione poi la tensione si nota una isteresi pronunciata. La corrente aumenta lentamente, rimanendo molto bassa su un ampio intervallo di tensioni, per poi crescere rapidamente all'interno di un intervallo molto stretto di  $V$ . Continuando a diminuire la tensione la corrente cala fino a zero, ma con andamento non lineare. Dalla pendenza si nota che la resistenza finale è sostanzialmente diversa da quella iniziale. Ripetendo lo stesso processo a pressioni (e conseguentemente resistenze  $R_0$ ) iniziali diverse si ottengono le figure 8(a) e 8(c). Si vede che in condizioni di elevata compressione (bassa  $R_0$ ), fig.8(a), il comportamento è inizialmente ohmico, ma seguito da regioni di dipendenza sotto e sopra lineare. A tensioni sufficientemente elevate  $I$  cala in tutti i casi. La resistenza finale in caso di bassa compressione è minore della resistenza iniziale. Accade il contrario ad elevata compressione.

Questa fenomenologia è interpretabile in modo consistente all'ipotesi di conduzione per tunnel quantistico. Il regime di resistenza negativa è dovuto all'immagazzinamento di carica elettrica sulle particelle metalliche, in particolare sulle punte, ed al conseguente "pinch off" della corrente. Per dare un ordine di grandezza, ad una tensione applicata di  $240\text{ V}$  si misurano campi elettrostatici interni  $>3 \cdot 10^6\text{ Vm}^{-1}$ . La distribuzione disordinata delle particelle per forma e numero da luogo ad una serie di barriere di potenziale differenti che ostacola il trasporto di carica. Quando la conducibilità comincia a manifestarsi, la carica fluisce attraverso barriere di materiale ancora sormontabili, fintanto che non arriva su una particella da cui il tunnelling non è più possibile. La carica allora si accumula e deforma il campo elettrostatico circostante. Paradossalmente questo inibisce il tunneling in tutta la regione vicina: anche altri percorsi conduttivi presenti nella regione vengono interrotti ("pinched off") ed il flusso della corrente si blocca. La distribuzione di carica che si è definita in seguito all'aumentare della tensione inizialmente persiste anche al calare della medesima. Alla fine il campo applicato non è però più sufficientemente intenso da mantenere stabile la distribuzione di carica intrappolata che viene ridistribuita ma non eliminata. La redistribuzione appare nella curva caratteristica sotto forma di "salti di corrente". La carica intrappolata residua alla fine del ciclo fa sì che il campione presenti una resistenza  $R$  diversa da quella iniziale (stato elettricamente neutro).



Oltre a quanto descritto bisogna tenere presente che la carica accumulata internamente dà vita a forze elettriche tra le particelle di Ni che a seguito della deformazione della matrice producono una risposta meccanica. Si tratta di un ulteriore contributo alle modifiche dei percorsi conduttivi formati nel campione durante le variazioni di tensione. La micro geometria del campione varia rispetto alla configurazione iniziale e c'è una continua redistribuzione di carica che spiega l'isteresi e la differenza tra R iniziale e finale. Con una maggior compressione la conducibilità aumenta e l'accumulo di carica è inibito. Infatti comprimendo fino ad una bassa resistenza l'accumulo di carica è inibito, la carica accumulata scivola via e si torna alla configurazione iniziale.

Le caratteristiche IV dipendono quindi da deformazione (cioè resistenza) iniziale, massimo voltaggio applicato, storia del campione. Più in generale il comportamento di ogni componente QTC è influenzato dai seguenti fattori tutti controllabili al momento della produzione o dell'utilizzo per soddisfare a specifici usi:

- distanza originariamente presente tra le varie componenti metalliche (a sua volta legato alla concentrazione del filler nella matrice polimerica);
- geometria dello specifico elemento di QTC;
- proprietà elastomeriche del polimero usato come legante;
- modo in cui è applicata la deformazione;
- tensione applicata.

	Composti tradizionali	QTC
Forma particelle del filler	tondeggianti	con punte nanometriche
Concentrazione del filler		più bassa della soglia di percolazione
Meccanismo	percolazione	effetto tunnel assistito
Matrice		estremamente aderente
Resistenza non compressi	$\approx 10^3 \Omega$	fino a $10^{14} \Omega$

Tab.1 QTC e composti tradizionali a confronto.

### Applicazioni del QTC

Per la sua incredibile sensibilità alle deformazioni, unita alle minime dimensioni, il QTC è adatto a molteplici applicazioni, molte delle quali già commercializzate, dai touch screen (clear QTC – lanciato sul mercato nel 2011) ai pulsanti integrati nei tessuti (spessore 75 micron), all'integrazione nella printed electronics. In particolare si presta come



- **Interruttore di sicurezza:** negli interruttori tradizionali prima dell'effettivo contatto tra gli elettrodi scocca una scintilla. In ambienti saturi di gas o, ad esempio, sulle piattaforme petrolifere questo può essere estremamente pericoloso.
- **Sensore di impatto o di pressione.** Essendo in grado di avvertire minimi cambiamenti di pressione o minime deformazioni, una tra le più interessanti applicazioni riguarda l'uso come sensore tattile negli arti artificiali (protesi o mani robotiche). E' stato per esempio inserito nei guanti che ricoprono le mani di Robonaut 2 (il robot umanoide della Nasa inviato il 24 febbraio 2011 sulla Stazione Spaziale Internazionale)
- Integrato nei bendaggi permette di monitorare se si stringono troppo ed evitare problemi alla circolazione.
- Per la capacità di sopportare il passaggio di correnti elevate, fino a diversi Ampere, permette il **controllo diretto dei carichi.**
- E' stata registrata una risposta molto intensa ad una vasta gamma di volatili diversi. Per questa caratteristica, il QTC si presta ad essere utilizzato nel **Naso elettronico.** Per tale applicazione si è usato QTC in granuli tra due retini di nickel. L'aumento di resistenza è dovuto alla espansione omogenea che risulta dal rigonfiamento dovuto all'assorbimento dei vapori.

## Effetto tunnel quantistico

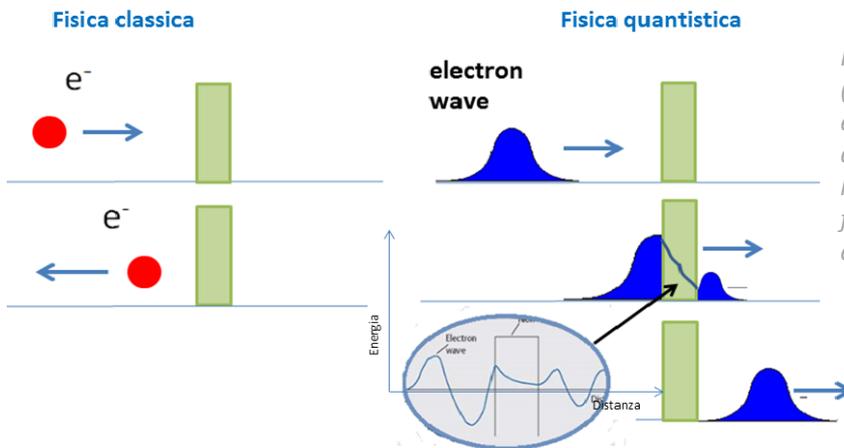


Fig.9 Secondo la fisica classica l'elettrone (corpuscolo) se non è dotato di sufficiente energia non riuscirà ad attraversare la barriera di isolante. Al contrario, nella visione quantistica l'elettrone onda ha comunque una probabilità finita di riemergere al di là della barriera per effetto tunnel.

L'effetto tunnel è un effetto tipicamente quanto-meccanico che permette una transizione tra due stati che non è possibile secondo le leggi della meccanica classica. Nella meccanica classica, la legge di conservazione dell'energia impone infatti che una particella non possa superare una barriera di potenziale se non ha l'energia necessaria per farlo. La meccanica quantistica, invece, prevede che una particella abbia una probabilità, eventualmente piccola ma finita, di attraversare



spontaneamente una barriera arbitrariamente alta. Come è noto dalla trattazione elementare della meccanica ondulatoria, infatti, nel caso semplice di una barriera di potenziale in una dimensione la funzione d'onda è rappresentata da una funzione esponenziale decrescente all'interno della barriera. Poiché la funzione d'onda ha un significato probabilistico, esiste una probabilità che la particella possa attraversare la barriera. Tale probabilità è esponenzialmente piccola con l'aumentare della larghezza della barriera.

Lungi dall'essere un comportamento esotico e riscontrabile solo in casi molto particolari, l'effetto tunnel, per quanto possa apparire paradossale e contro-intuitivo, è sostenuto da una enorme quantità di prove sperimentali, e da esso discende tutta una serie di applicazioni ampiamente in uso e commercializzate già da tempo. Tanto per citare le applicazioni più famose, esso permette il funzionamento dell'STM (Scanning Tunneling Microscope) e di molti dispositivi elettronici moderni (come ad esempio i diodi tunnel e le memorie flash).

Nel contesto specifico del QTC, lo strato di elastomero che bagna le particelle di Nickel separandole l'una dall'altra, corrisponde ad una barriera di potenziale molto elevata per i portatori di carica. Quando l'elettrone raggiunge la barriera di materiale non conduttivo senza possedere energia sufficiente per attraversarla, secondo una visione classica dovrebbe rimbalzare indietro o al più rimanervi conficcato (Fig.9 - sinistra). Secondo la visione quantistica invece poiché l'onda elettronica decade esponenzialmente, essa riemergerà all'estremità opposta, benché con ampiezza ridotta. In altre parole c'è una probabilità non nulla di ritrovare l'elettrone dall'altra parte della barriera, cioè che l'elettrone possa attraversare la barriera come attraverso un tunnel (Fig.9 - destra).

## Emissione di campo elettronica

L'emissione di campo elettronica è stata spiegata con il fenomeno del tunnelling quantistico degli elettroni già nel 1920, e fu appunto uno dei successi della nascente meccanica quantistica. La teoria della emissione di campo da metalli fu proposta da Fowler e Nordheim e consiste nella idea che l'emissione di elettroni sia indotta da campi elettrostatici.



Fig.10 Sistemi di scarica della carica elettrostatica accumulata sulla carlinga esterna. Immagine Wikipedia

Il caso più comune è quello della emissione dalla superficie libera di un solido nel vuoto, ma si conoscono esempi di emissione da superfici sia solide che liquide nel vuoto, nell'aria, in fluidi o in dielettrici non conduttori o debolmente conduttori. Nei metalli l'emissione di campo avviene in presenza di campi elettrici molto elevati (tipicamente le punte): i gradienti sono normalmente più alti di 1 GV/m e dipendono fortemente dalla funzione lavoro.



In alcuni casi tale forma di emissione elettronica è da considerarsi dannosa in quanto è la causa primaria di fenomeni di scariche elettriche e rottura nei sistemi a vuoto. In altri casi invece tale emissione è volutamente cercata, come ad esempio nei sistemi di scarica della carica elettrostatica indotta sugli aeroplani sulla carlinga esterna. Ciò permette di limitare l'interferenza ed i disturbi che tale accumulo di carica potrebbe arrecare alle le trasmissioni via radio.

Sorgenti elettroniche basate sulla emissione di campo hanno molteplici applicazioni. Tra gli esempi le sorgenti elettroniche “bright” per microscopi elettronici ad alta risoluzione. Inoltre oggi è possibile costruire emettitori della dimensione di un atomo. Array ordinati di tali emettitori, ciascuno avente il diametro della punta inferiore ai 100 nm (Fig. 11 e 12), sono prodotti in film sottili e utilizzati ad esempio nei *touchscreen* di nuova generazione.

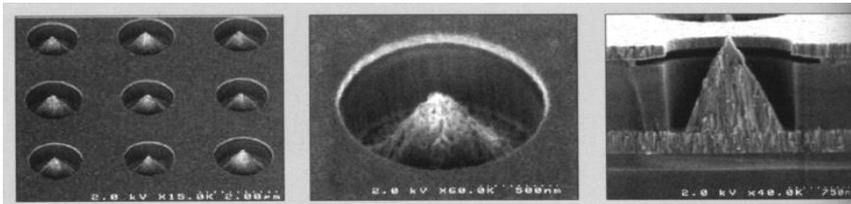


Fig.11 Emissione di campo elettronica da matrici di emettitori auto organizzati di nuova concezione - boron nitride films. Immagine <http://www.nanonet.go.jp>

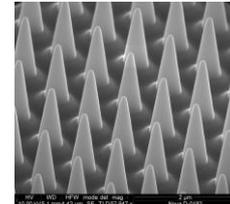


Fig.12 Emettitori di campo ottenuti con la tecnica del “focused ion beam milling.”. Il diametro delle punte è < 100 nm. Image courtesy of FEI & captured by Alexey Kolomytsev on an FEI Nova DualBeam

### Ulteriori materiali di approfondimento

Una serie di materiale divulgativo su QTC e composti polimerici conduttivi tradizionali

- Studio sui fenomeni percolativi nei composti polimerici [http://www.aa.psu.edu/physics/Materials\\_group.html](http://www.aa.psu.edu/physics/Materials_group.html)
- Sito della ditta produttrice del QTC <http://www.peratech.com/qtccapplications.php>
- “QTC a remarkable new material to control electricity” - SEP publication
- “QTC – Making the Most of a Novel Material” – [articolo divulgativo free](#)
- [www.msa.ac.uk/~fraser/wiringpg/files/integration-guide.pdf](http://www.msa.ac.uk/~fraser/wiringpg/files/integration-guide.pdf) guida tecnica all’uso del qtc

Una serie di articoli di ricerca dal gruppo dell’ Università di Durham:

- Sito dell'Università di Durham <http://www.dur.ac.uk/psm.group/pubqtc.html>



- “Metal–polymer composite with nanostructured filler particles and amplified physical properties” D. Bloor, A. Graham, and E. J. Williams 2006 Appl. Phys. Lett. 88, 102103
- “A metal-polymer composite with unusual properties” D Bloor et al 2005 J. Phys. D: Appl. Phys. 38 2851-2860
- Bloor, D., et al, Metal–polymer composite sensors for volatile organic compounds: Part 1. Flow-through chemi-resistors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011 **162**, Issue 1: p. 400-408
- Sito del progetto Robonaut2 NASA  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/main/robonaut.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/robonaut.html)

Sull'effetto tunnel e l'emissione di campo elettronica

- VIDEO: *How Quantum tunneling works* Ivar Giaever, Edison Tech Center  
<http://www.youtube.com/watch?v=AJY8farPqdl>
- SIMULAZIONI :
  - <http://concord.org/activities/quantum-tunneling> una applicazione Java free per studiare l'effetto tunnel attraverso vari tipi di barriere con un occhio alle applicazioni. Registrandosi nel sito del progetto è possibile salvare i dati. Prima di scaricare l'applicazione è possibile provarla.
  - <http://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-tunneling>
  - [web.phys.ksu.edu/vqm/vqmnexgen/qmbasics/](http://web.phys.ksu.edu/vqm/vqmnexgen/qmbasics/) e <http://web.phys.ksu.edu/vqm/software/online/vqm/html/qtunneling.html> Fa parte del progetto *Visual quantum mechanics*: il software è commercializzato dalla Ztek ma i materiali di accompagnamento sono liberamente scaricabili.
- <http://www.nanoscience.com/education/STM.html> Focalizzato sullo scanning tunneling microscope, fornisce tuttavia informazioni interessanti sul fenomeno del quantum tunneling
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Field\\_electron\\_emission](http://en.wikipedia.org/wiki/Field_electron_emission)
- Electron field emission from self-organized micro emitters of new-type boron nitride films  
<http://www.nanonet.go.jp/english/mailmag/2006/067b.html>