

Sommario

Mag = 1.00 K X 10.0 µm WFO = 6.0 mm CRT = 5.00 kV Signal A = InLens 1.50 Load = 1000 V Date = 16 Sep 2010 Time = 12:10:00
 1640550-0722 1.00 Magnify = 1.00k Name: Reductious - Pinel Aug 1.00 Probe = 300A-50 pA System Vacuum = 2.67e-06 Torr

Figura 1: Immagine in microscopia elettronica di una struttura ZARI tipo, realizzata nel corso del periodo di lavoro presso la Molecular Foundry. Il campione è silicio e le strutture, ottenute tramite litografia elettronica e successivo etching in plasma, sono viste dall'alto e profonde più di 2 micron nel silicio. L'area mostrata è di circa $100 \times 100 \mu\text{m}^2$

Messa a punto del processo litografico

In un processo di litografia elettronica un fascio di elettroni viene focalizzato in un punto di dimensione di qualche nanometro e poi mosso a coprire l'area che si vuole scrivere. Sul substrato (silicio, in questo caso) viene depositato un sottile film di materiale plastico che, una volta illuminato dagli elettroni diviene solubile in un particolare sviluppo. In funzione del numero di elettroni che raggiunge effettivamente una data zona, il materiale si dissolve più o meno velocemente nello sviluppo e, a parità di tempo di sviluppo, zone esposte con un numero diverso di elettroni si aprono in un intorno più o meno grande rispetto al punto originariamente esposto, a causa dello scattering degli elettroni che interagiscono con il materiale che li fa arrivare in punti lontani rispetto a quello di impatto originale.

Una caratteristica di un dispositivo di tipo ZARI è la densità diversa di strutture da zona a zona, ossia la presenza di aree con buchi e aree senza, come mostrato in figura 1. Ciò fa sì che la scrittura su materiale fotosensibile risenta in modo variabile degli elettroni che vengono diffusi dalle zone scritte nelle vicinanze (effetto di prossimità). Per ovviare a questo problema, che darebbe luogo ad uno scostamento tra le dimensioni volute delle strutture e quelle effettivamente ottenute, si sono sfruttate due caratteristiche della macchina di litografia della *molecular foundry*:

1. L'impiego di un'energia di accelerazione degli elettroni pari a 100KeV, che rispetto ad energie inferiori utilizzate spesso in altri tipi di apparecchiature meno sofisticate, riduce il numero di elettroni che raggiunge punti non voluti.
2. L'uso di un sofisticato software di simulazione e correzione che suddivide il disegno fatto in piccole areole per calcolarne poi il numero di elettroni che effettivamente le raggiunge. A questo punto viene generato un secondo disegno in cui si modula punto per punto il numero di elettroni che la macchina di scrittura usa per esporre quella data area in modo da eliminare ogni tipo di disuniformità nella dose di esposizione. Normalmente i parametri che vengono forniti al software sono il risultato di un certo numero di prove e di misure effettuate al microscopio elettronico.

In figura 2 viene mostrato un dettaglio della struttura ottenuta sul polimero una volta completato il processo di ottimizzazione.

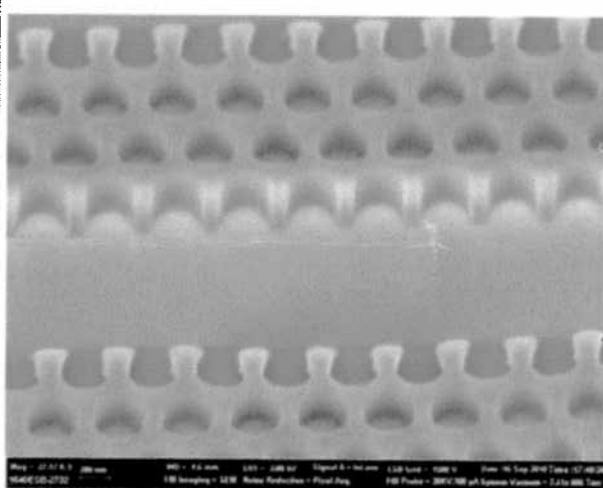


Figura 2: Immagine al microscopio elettronico del polimero fotosensibile dopo lo sviluppo. Si noti che i fori aperti hanno tutte le stesse dimensioni indipendentemente dall'essere vicini a zone più o meno dense di strutture.

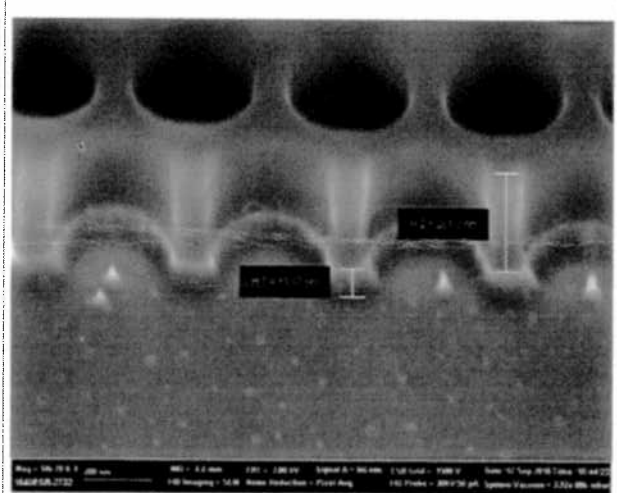


Figura 3: Immagine del trasferimento del disegno dal film plastico (sopra) al film metallico sottostante che verrà utilizzato come mascheratura per trasferire il disegno su silicio nei successivi attacchi al plasma, che eroderebbero il polimero troppo velocemente.

Una volta ottimizzato il processo di litografia elettronica vero e proprio, occorre trasferire il disegno dal film polimerico al substrato vero e proprio, che nel caso della presente ricerca è silicio. Tale operazione, descritta in maggior dettaglio nella prossima sezione, viene effettuata tramite dei sistemi al plasma che spesso per la loro aggressività distruggono le strutture polimeriche, in particolar modo quando, come nel caso delle strutture ZARI, la profondità delle strutture che si vogliono realizzare eccedono di un fattore due o tre lo spessore del film polimerico (che, per motivi tecnici legati alla risoluzione delle strutture, non può essere alzato oltre i 200nm utilizzati). Per ovviare a questo problema, si è deciso di realizzare una maschera intermedia metallica, molto più resistente. A tal fine il silicio era stato coperto, prima della deposizione del polimero, con un film di 50nm di cromo sul quale è stato appunto trasferito il disegno fatto sul polimero utilizzando un attacco al plasma basato sulla chimica del cloro (gas usati $\text{Cl}_2 + \text{Ar}$).

In figura 3 è mostrato il risultato finale di questo processo dove si vede il film polimerico ancora presente e le strutture ottenute sul film metallico.

Messa a punto del processo di etching

Il trasferimento di un dato disegno su un substrato richiede lo sviluppo di processi di rimozione del materiale basati su processi chimico-fisici, noti con il nome di *etching*. Tra le caratteristiche che un tale processo deve avere, il più importante è probabilmente l'anisotropia, ossia la capacità di mantenere la stessa geometria del disegno iniziale, sia nella forma sia nelle dimensioni, man mano che l'erosione del materiale procede in profondità. In sostanza questo vuol dire che se si deve ottenere un foro cilindrico in un materiale, il processo di *etching* deve mantenere il più possibile la verticalità delle pareti della struttura che via via si propaga nel substrato. Un tale effetto può essere ottenuto solamente utilizzando macchine molto sofisticate che, formando dei plasmi reattivi tramite scariche elettriche generate in gas dalla chimica specifica rispetto al materiale da erodere, bombardano con ioni reattivi la superficie del materiale dove non protetto dalla mascheratura di polimero, o, nel caso della presente ricerca, di metallo. Nonostante l'utilizzo di tali macchine, molti parametri devono essere modificati ad hoc in base alla geometria ed ai dettagli del materiale utilizzato.

Il lavoro svolto principalmente durante la permanenza alla *molecular foundry* ha riguardato principalmente la messa a punto di questi tipi di processi. In particolare, poiché le strutture di interesse per gli ZARI sono fori cilindrici, si è dovuto lavorare molto per mettere a punto un processo suddiviso in vari passaggi che evitasse fenomeni di erosione indesiderata lungo le strutture dovute principalmente al "ristagno" dei gas reattivi all'interno dei fori, man mano che la profondità degli stessi aumentava. Ulteriori parametri che sono stati ottimizzati riguardavano il controllo dei campi elettrici all'interfaccia tra il campione ed il plasma che creavano irregolarità nelle strutture di silicio che, causando scattering nella luce che si propaga nelle strutture provoca una dispersione del segnale ottico con conseguente perdita di funzionalità delle strutture. I risultati migliori si sono ottenuti raffreddando a temperature criogeniche (azoto liquido) il campione su cui si sono realizzate le strutture. Ciò è stato possibile grazie alla presenza nella *clean room* della *molecular foundry* di macchine allo stato dell'arte per i processi di *etching*.

Solo a titolo di esempio, in figura 4 ed in figura 5 viene mostrata la differenza tra i risultati dei processi di *etching* prima della loro ottimizzazione ed il dettaglio della struttura finale.

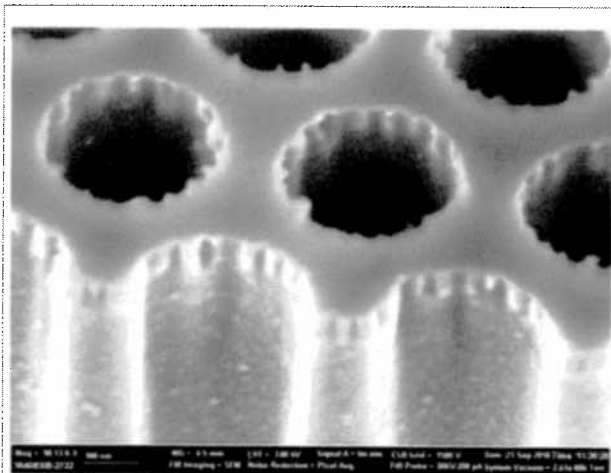


Figura 4: Dettaglio di una struttura dopo un processo di etching non ottimizzato per le fluttuazioni di campo elettrico alla superficie. Si può notare la presenza di rugosità molto accentuata che distruggerebbe la capacità della luce di propagarsi all'interno delle strutture di silicio per lunghe distanze

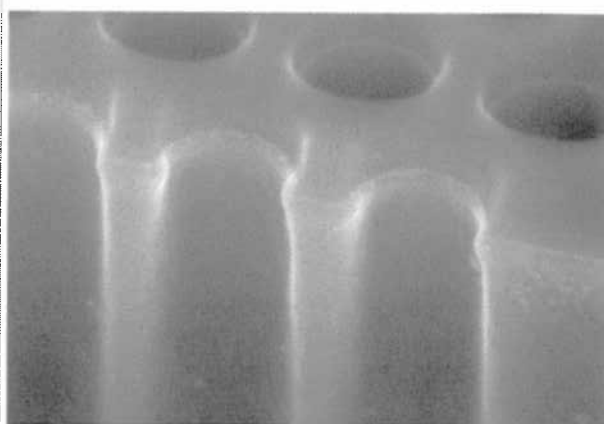


Figura 5: Dettaglio di una struttura ZARI priva di rugosità superficiale dopo l'ottimizzazione di un processo di etching basato sulla chimica delle fluorine a temperatura dell'azoto liquido.

Conclusioni

Durante il periodo in questione sono stati ottimizzati sia i processi di litografia elettronica che quelli di *etching* per la nanofabbricazione di strutture in silicio di tipo ZARI. Il lavoro è stato reso possibile grazie alla strumentazione all'avanguardia presente alla *molecular foundry*, in particolare alla macchina di litografia elettronica che ha permesso di scrivere strutture assolutamente omogenee su aree di diversi centimetri quadri, ed ai sistemi di *etching* criogenico che hanno permesso di realizzare strutture perfettamente verticali e con ottima qualità delle superfici dal punto di vista ottico, necessario per garantire la propagazione dei segnali all'interno dei dispositivi.

Sono attualmente in fase di preparazione presso i laboratori del CNR le misure ottiche sulle strutture realizzate.

Luca Businaro
Luca Businaro