



CONTROLLO FINE DELLE PROPRIETÀ RADIATIVE DI NANOANTENNE ACCOPPIATE

Andrea Locatelli

**Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII),
Università degli Studi di Brescia**

E-mail: andrea.locatelli@ing.unibs.it

SOMMARIO

- Introduzione.
- Nanoantenne accoppiate.
- Analisi numerica e modello circuitale.
- Parametri della struttura.
- Rapporto avanti-indietro.
- Diagrammi di radiazione.
- Antenna Yagi-Uda plasmonica?
- Impedenza di ingresso.
- Conclusioni.

INTRODUZIONE (1)

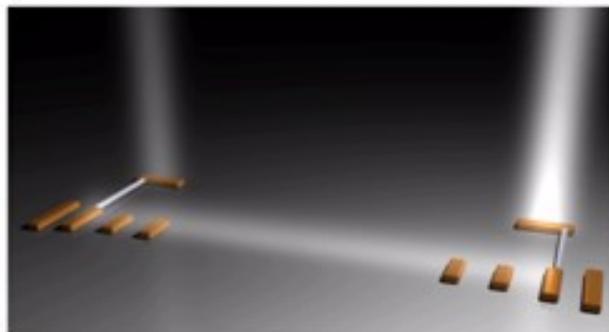
- Elettronica:
 - miniaturizzazione, velocità di elaborazione limitata.
- Fotonica:
 - miniaturizzazione limitata dalla diffrazione, elevata velocità di elaborazione.
- **Plasmonica:**
 - miniaturizzazione, e elevata velocità di elaborazione;
 - combinazione delle migliori qualità di elettronica e fotonica;
 - funzioni elettroniche e ottiche sullo stesso chip;
 - **applicazioni:** interconnessioni, fotovoltaico, imaging, immagazzinamento dati, spettroscopia ... e molto altro!

INTRODUZIONE (2)

- Le linee di trasmissione plasmoniche sono limitate dalle perdite ohmiche:
 - **reti ottiche senza fili:** soluzione ottima per sistemi di comunicazione su scala nanometrica?
- **Antenna ottica** (nanoantenna): *dispositivo in grado di convertire radiazione propagante in energia localizzata, e viceversa* (Novotny, 2009).
- Le applicazioni richiedono un controllo fine delle proprietà radiative delle nanoantenne:
 - antenne Yagi-Uda;
 - array di nanoantenne;
 - antenne Vivaldi, e anche strutture più complesse.

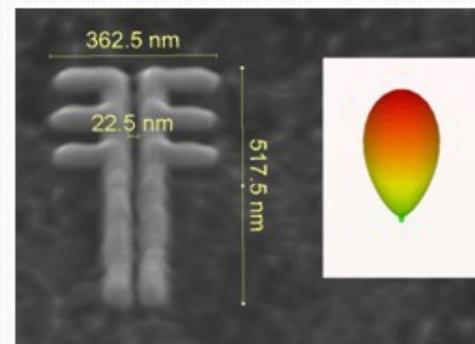
INTRODUZIONE (3)

Antenna Yagi-Uda:
ricezione segnali TV



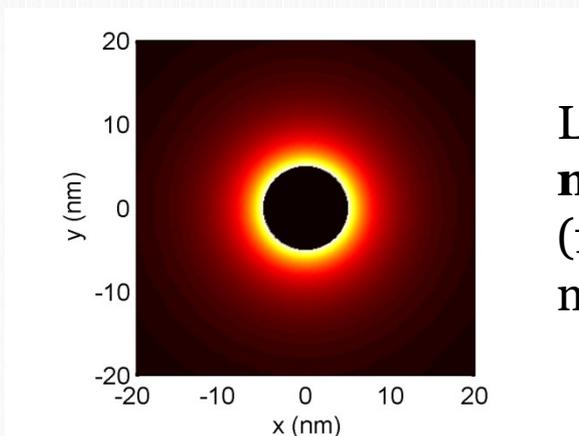
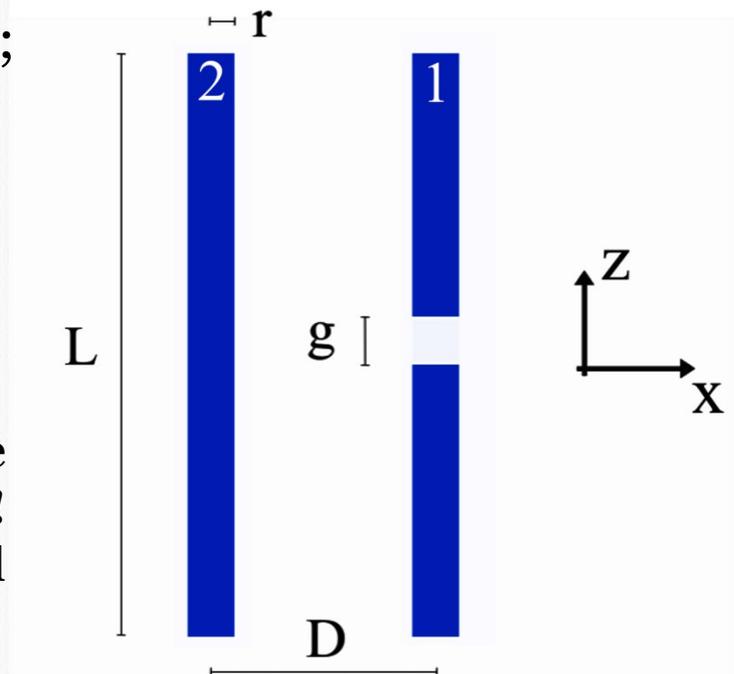
Connessione wireless ottica on-chip:
progetto FET Young Explorers in fase di valutazione,
(consorzio Bristol – Brescia – ETH – Stoccarda)

Array di nanoantenne:
prototipo di array a 3 dipoli



NANOANTENNE ACCOPPIATE

- Si considerano due barre cilindriche in argento:
 - il dipolo 1 è alimentato mediante una regione di gap;
 - il dipolo 2 agisce come **riflettore**;
 - $L=110\text{nm}$, $r=5\text{nm}$, $g=3\text{nm}$;
 - la distanza D varia tra 40 e 90nm;
 - range frequenziale: 240-270THz.



La singola barra è **molto confinante!**
(flusso di potenza del modo plasmonico)



(1)

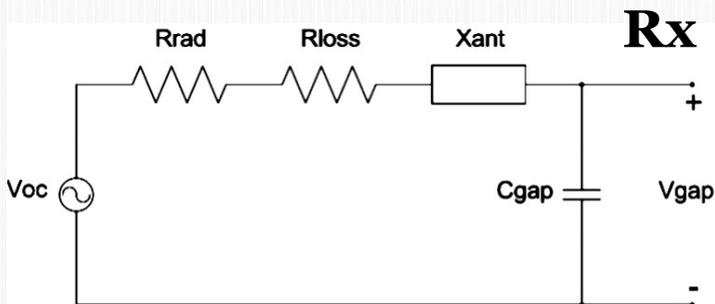
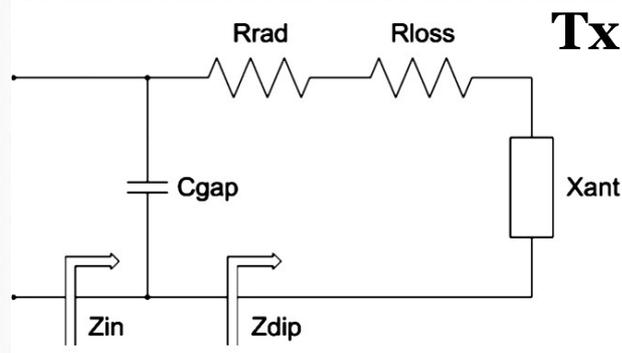
- Simulazioni full-wave **in ricezione (Rx)**:
 - simulazioni agli elementi finiti, eccitazione onda piana;
 - uscita: campo elettrico E_z nella regione di gap.
- Simulazioni full-wave **in trasmissione (Tx)**:
 - simulazioni agli elementi finiti, eccitazione delta-gap;
 - in uscita: distribuzione di corrente lungo i dipoli.
- **Equazione di Pocklington** per dipoli accoppiati:
 - risoluzione di un'equazione integro-differenziale;
 - estensione del metodo sviluppato per dipoli singoli;
 - efficiente e accurato, ma solo per fili sottili!
 - in uscita: distribuzione di corrente lungo i dipoli.

ANALISI NUMERICA E MODELLO CIRCUITALE (2)

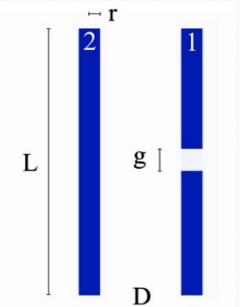
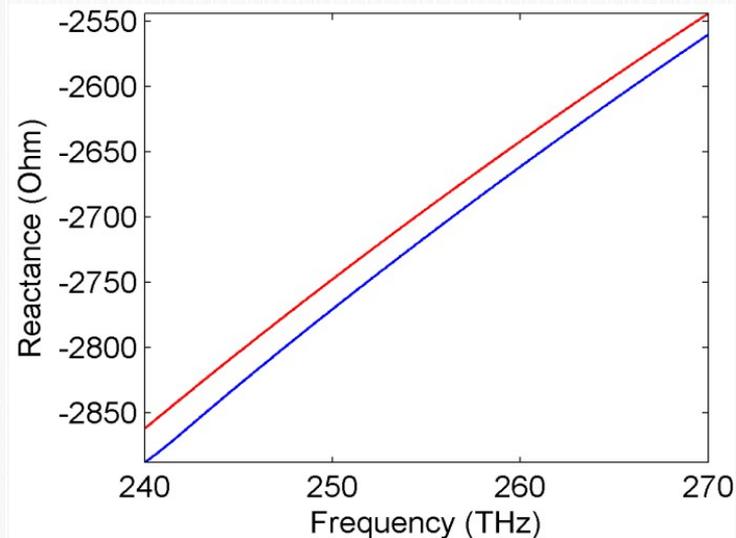


○ Circuito equivalente:

- un semplice **partitore di tensione**;
- equivalente di Thevenin dell'antenna + modello a parametri **concentrati** della regione di gap.



Reattanza di carico,
condensatore a facce piane parallele



PARAMETRI DELLA STRUTTURA (1)

○ Rapporto avanti-indietro:

- Rx: $FB = E_{gap}(0)/E_{gap}(\pi)$

○ Diagramma di radiazione:

- Rx: $E_{gap}(\varphi)$

○ Impedenza di ingresso:

- Tx:

- $Z_{ant} = V_g/I_1$, e $Y_{in} = Y_{ant} + Y_c$

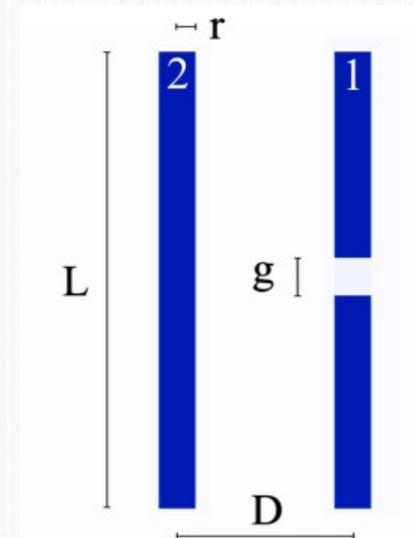
- Rx:

- due simulazioni variando il carico ($\epsilon_{gap1,2}$);

- $Y_{in} = Y_{ant} + Y_L$

$$Z_{ant} = \frac{V_{L2} - V_{L1}}{I_{L1} - I_{L2}}$$

$$V_{oc} = \frac{Z_{ant} + Z_{L1}}{Z_{L1}} V_{L1}$$



PARAMETRI DELLA STRUTTURA (2)

- Nanoantenne accoppiate viste **come un array**:
 - simulazioni in trasmissione;
 - I_1 e I_2 : correnti calcolate al centro dei dipoli 1 e 2;
 - teoria delle antenne: calcolo del fattore di composizione.

$$AF = I_1 \exp\left(\frac{1}{2} ik_0 D \cos \varphi\right) + I_2 \exp\left(-\frac{1}{2} ik_0 D \cos \varphi\right)$$

$\Phi=0,\pi$



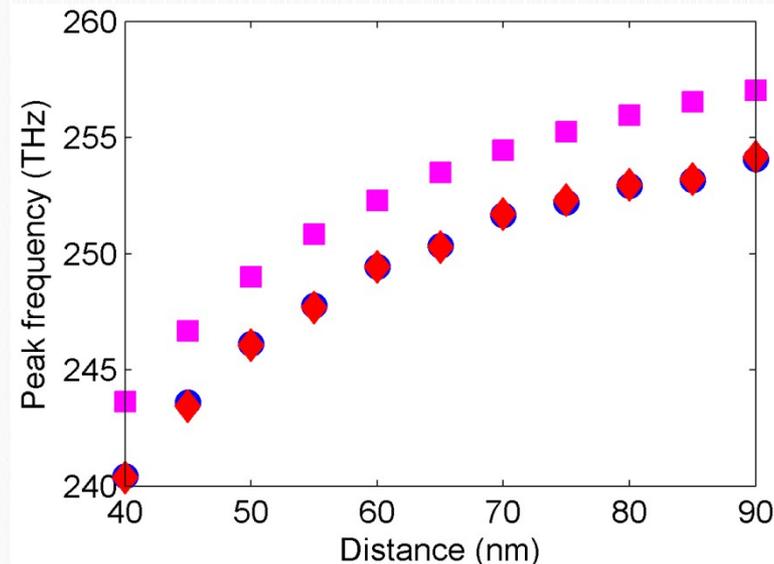
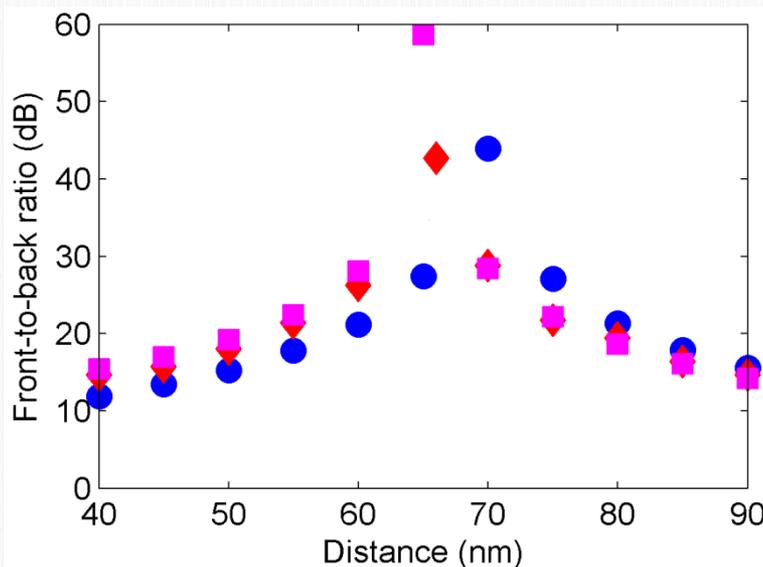
$$FB = \frac{|I_1 + I_2 \exp(-ik_0 D)|^2}{|I_1 + I_2 \exp(ik_0 D)|^2}$$

ⓘ AF è un fattore di composizione, tuttavia il singolo dipolo è **omni-direzionale!**

RAPPORTO AVANTI-INDIETRO

- Radiazione unidirezionale su scala nanometrica:
 - *FB* maggiore di **40dB** con *D* intorno a 65-70nm!
 - eccellente accordo tra metodi diversi;
 - la struttura si comporta come un array di 2 elementi!

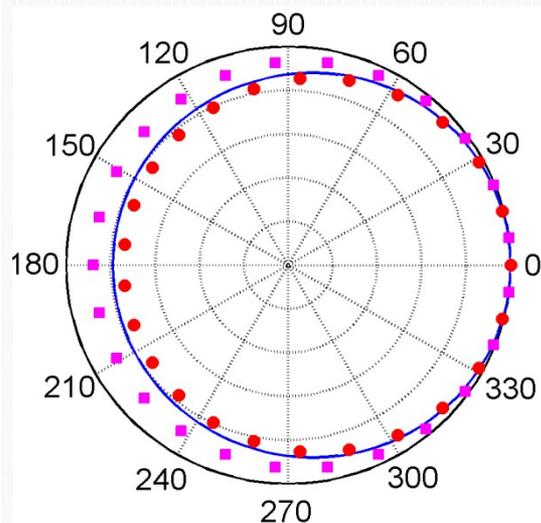
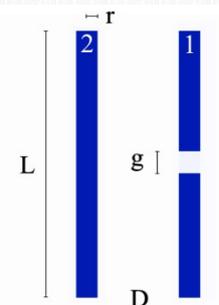
Full-wave Rx, full-wave Tx+array, Pocklington+array



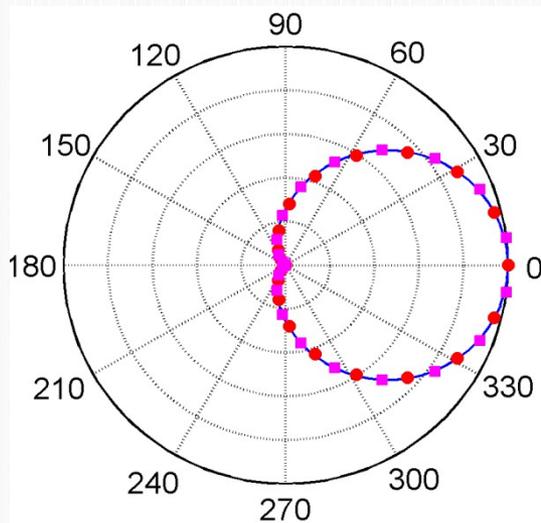
DIAGRAMMI DI RADIAZIONE

- Controllo delle proprietà radiative sulla nano-scala:
 - commutazione tra pattern omni- e uni-direzionale con shift su scala nanometrica (nell'ordine di $\lambda/40$);
 - eccellente accordo tra metodi diversi.

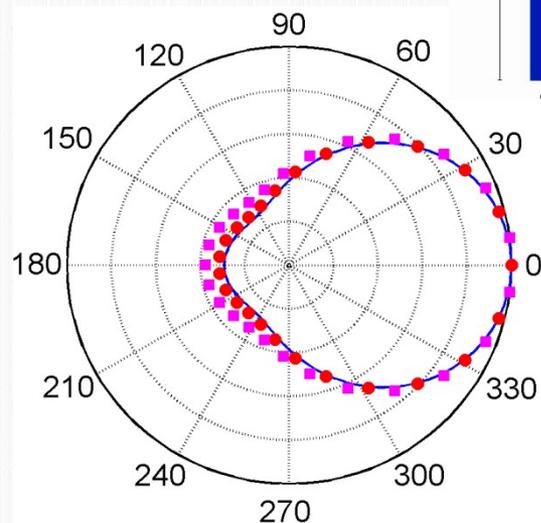
Full-wave Rx, full-wave Tx+array, Pocklington+array



D=40nm



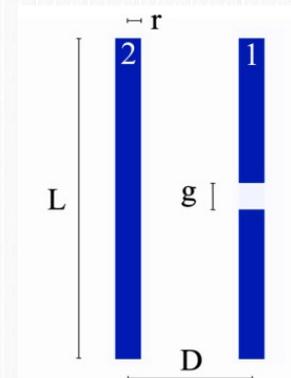
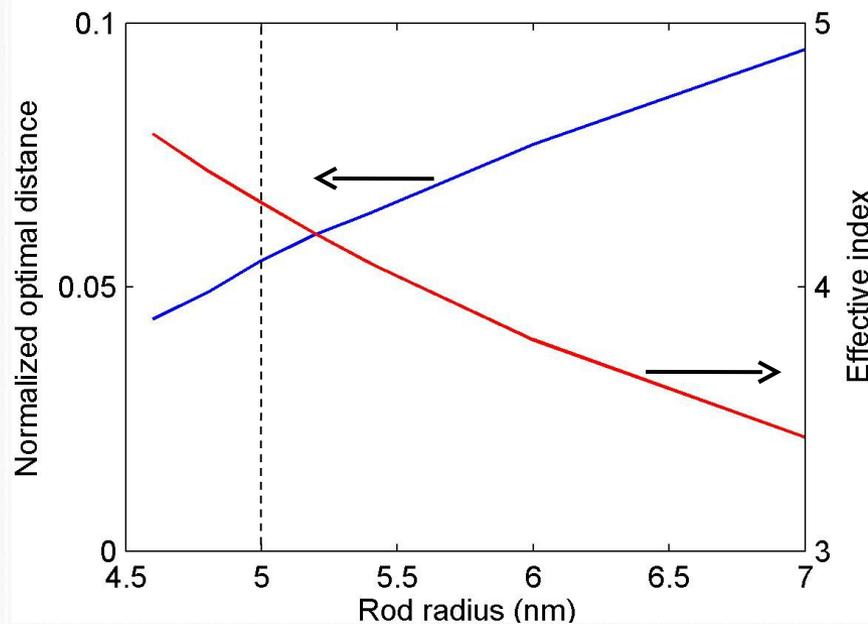
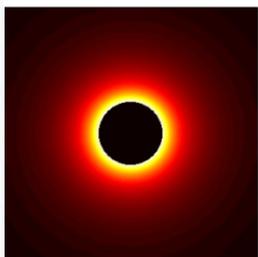
D=70nm



D=90nm

ANTENNA YAGI-UDA PLASMONICA?

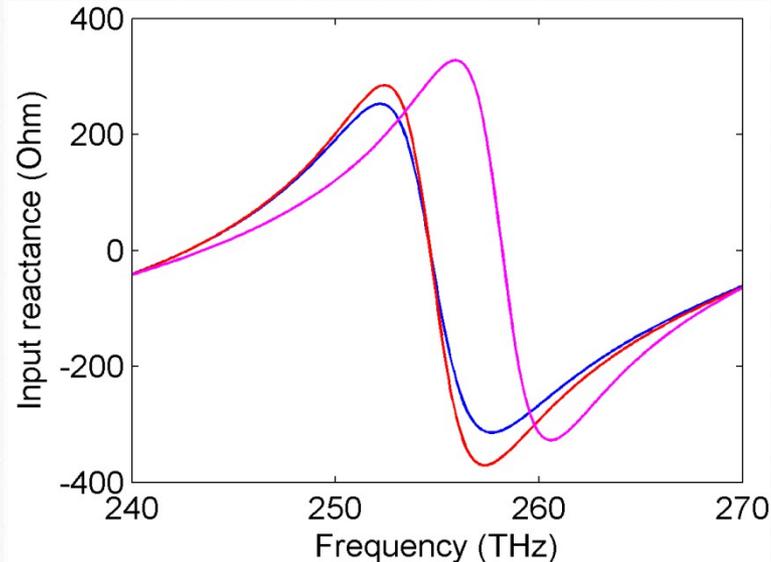
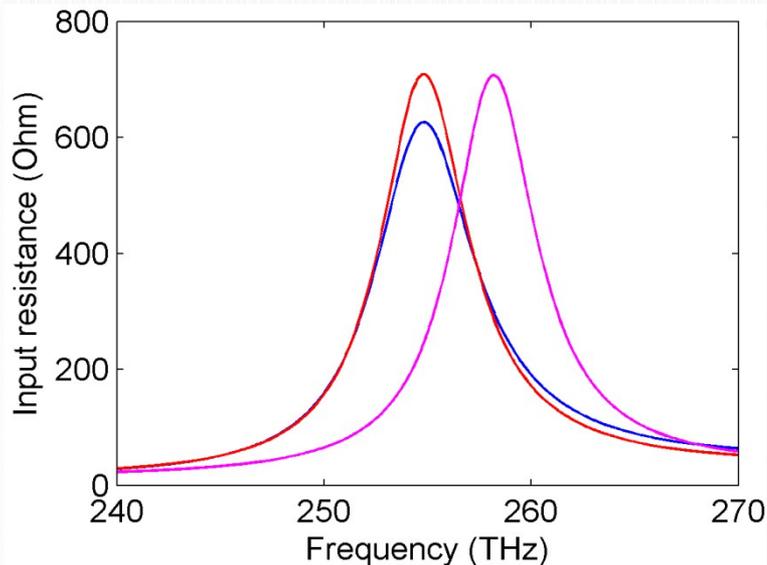
- D è circa $\lambda/4$ per antenne Yagi-Uda alle microonde.
- Al contrario, in questo caso D è nell'ordine di $\lambda/20$.
- D “scala” con l'indice efficace del modo plasmonico, e quindi con il raggio della singola barra cilindrica.



IMPEDENZA DI INGRESSO (1)

- Dipolo singolo: prima risonanza a 265THz.
- Dipoli accoppiati: 2 risonanze a frequenze minori.
- Eccellente accordo tra metodi diversi!

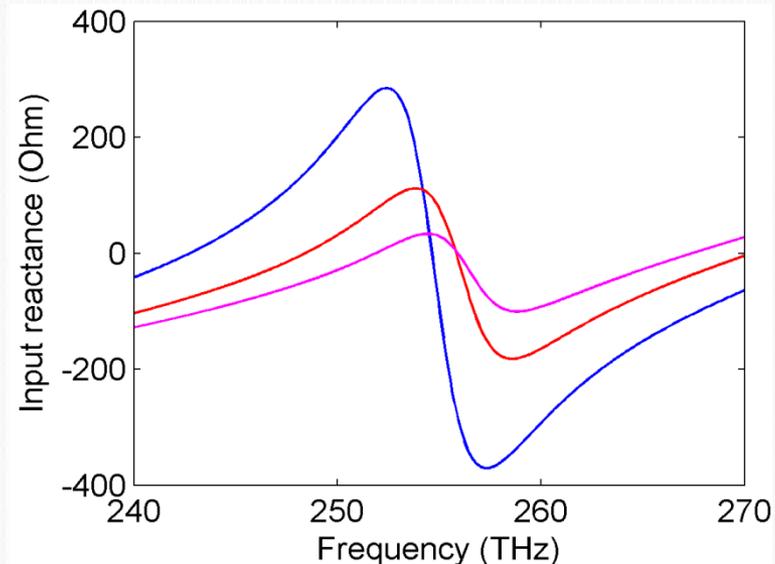
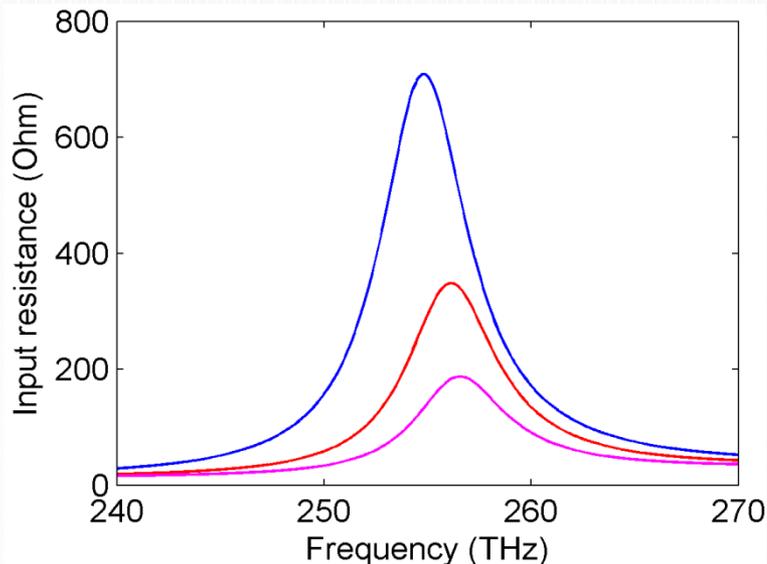
Full-wave Tx+carico capacitivo, full-wave Rx, Pocklington $D=40\text{nm}$



IMPEDENZA DI INGRESSO (2)

- Al crescere della distanza D :
 - la prima risonanza si muove a frequenze maggiori;
 - la seconda risonanza tende a rimanere fissa a 255THz;
 - con D maggiore di 60nm le risonanze scompaiono!

$D=40\text{nm}$, $D=50\text{nm}$, $D=60\text{nm}$

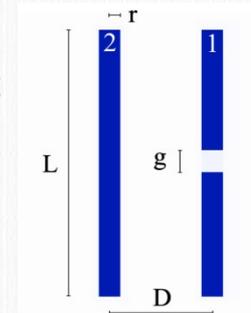


IMPEDENZA DI INGRESSO (3)

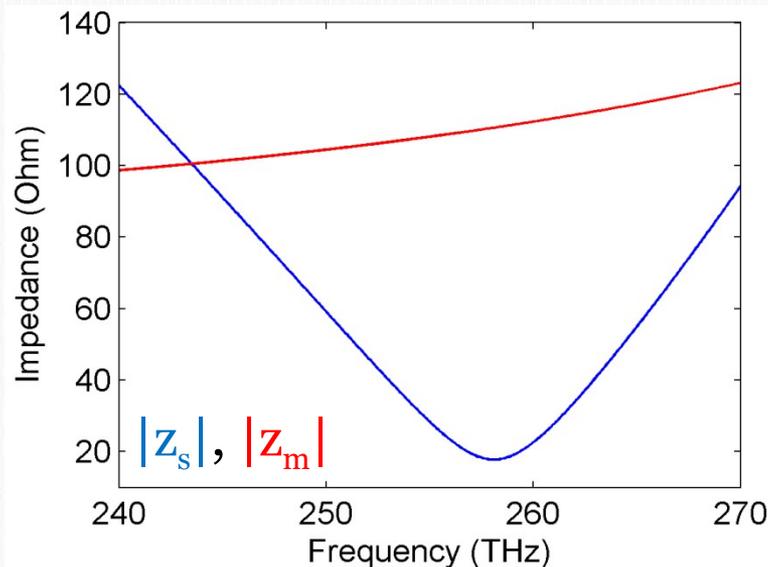
$$\begin{cases} V_g = z_s I_1 + z_m I_2 \\ 0 = z_m I_1 + z_s I_2 \end{cases}$$

○ Modello a doppio bipolo:

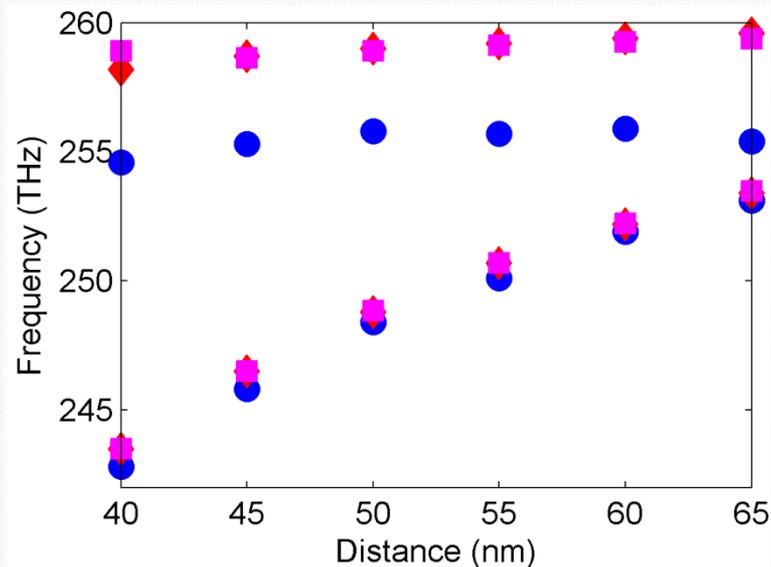
- prima risonanza: $|z_s|$ e $|z_m|$ sono uguali;
- seconda risonanza: risonanza a mezz'onda di z_s .



D=40nm



Full-wave Rx, Pocklington, modello a doppio bipolo



CONCLUSIONI

- Sono state analizzate le proprietà peculiari di una coppia di nanoantenne fortemente accoppiate.
- È stata dimostrata la possibilità di commutare tra pattern di radiazione omni- e uni-direzionale su scala nanometrica.
- Si è mostrato che la distanza tra le nanoantenne “scala” con l’indice efficace del modo plasmonico della singola barra cilindrica.
- È stato studiato l’effetto dell’accoppiamento tra i dipoli sull’impedenza di ingresso della struttura.

Questa ricerca è in parte finanziata da Fondazione Cariplo, progetto METAMETA.