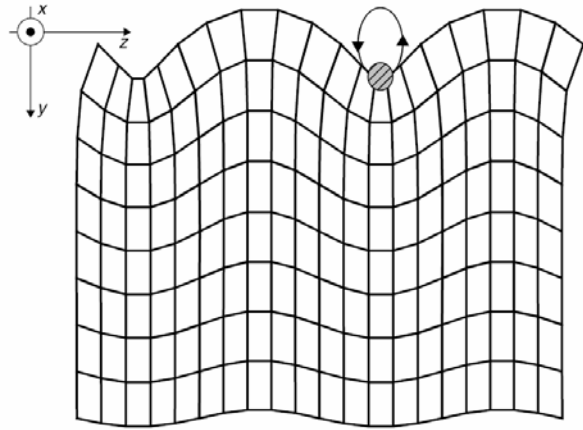


Transponder SAW (Surface Acoustic Waves)

- **Cristallo piezoelettrico = cristallo soggetto all'effetto piezoelettrico:**

- **Campo elettrico \leftrightarrow Distorsione del cristallo**
 - es: Quarzo (SiO_2),
 - Niobato di litio (LiNbO_3)

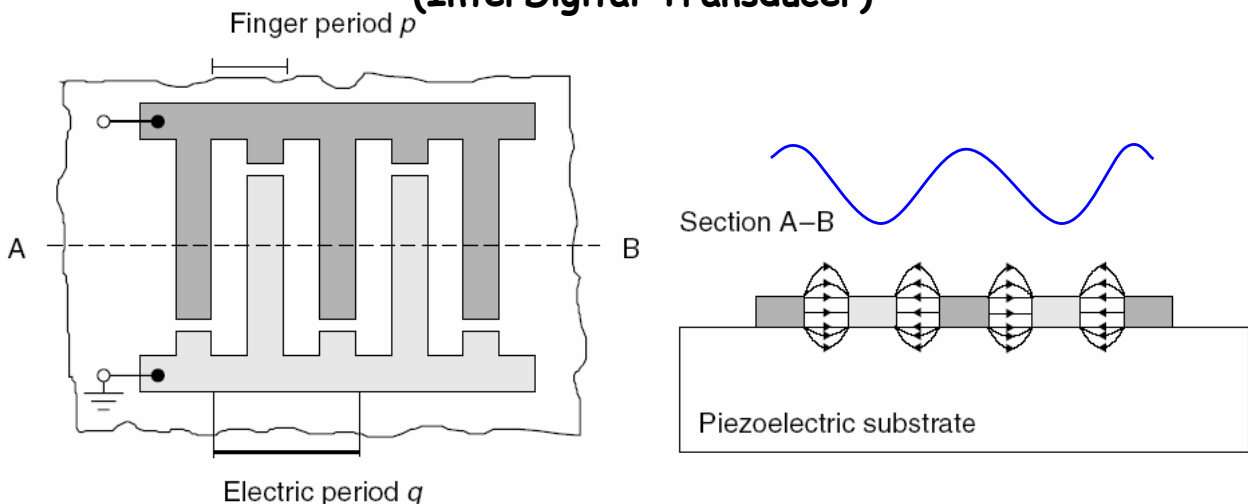
- **L'effetto è reversibile**



- **Tensione alternata sulla superficie \leftrightarrow SAW (onde di Rayleigh)**
- **SAW:**
 - Profondità approx λ
 - velocità 3000-4000 m/s ($\ll c$!)
 - dispersione nulla !!

Giuseppe Iannaccone - 2005

(IDT) Trasduttore interdigitato (InterDigital Transducer)

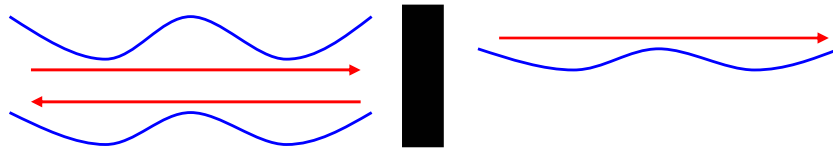


- **E' un trasduttore elettroacustico**
- **La deformazione ha come periodo il periodo elettrico q dell'IDT e si propaga con velocità v in tutte e due le direzioni (quasi senza dispersioni) \rightarrow frequenza onda acustica = v/q**
- **Per massimizzare il trasferimento si sceglie q in modo che $f_0 = v/q$**
- **Banda $B = 2f_0/N$ (N numero di finger (diti))**

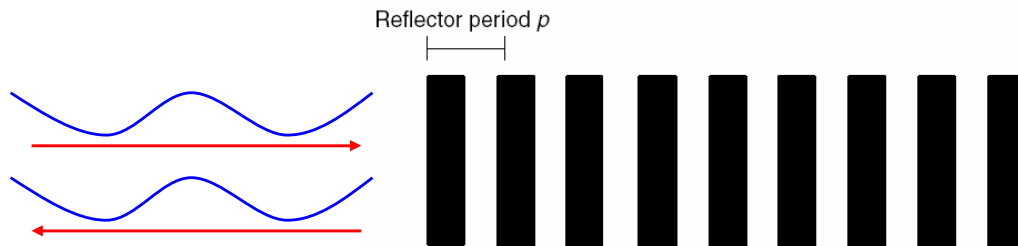
Giuseppe Iannaccone - 2005

Riflettore di Bragg

- Se c'è una discontinuità sulla superficie, l'onda viaggiante viene in parte riflessa.



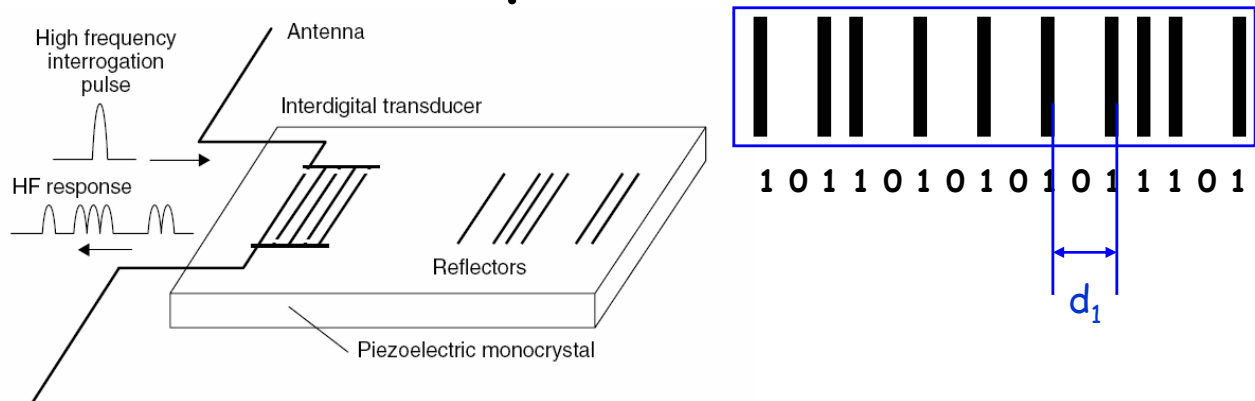
- Se si ha una serie di riflettori singoli a distanza $q = \lambda/2$, tutte le riflessioni sono in fase, e si ha la massima riflessione:



$$r_{tot} = r + r\sqrt{1-|r|^2} \exp\left(i2\pi \frac{2q}{\lambda}\right) + r(1-|r|^2) \exp\left(i2\pi \frac{4q}{\lambda}\right) + \dots$$

Giuseppe Iannaccone - 2005

Transponder SAW



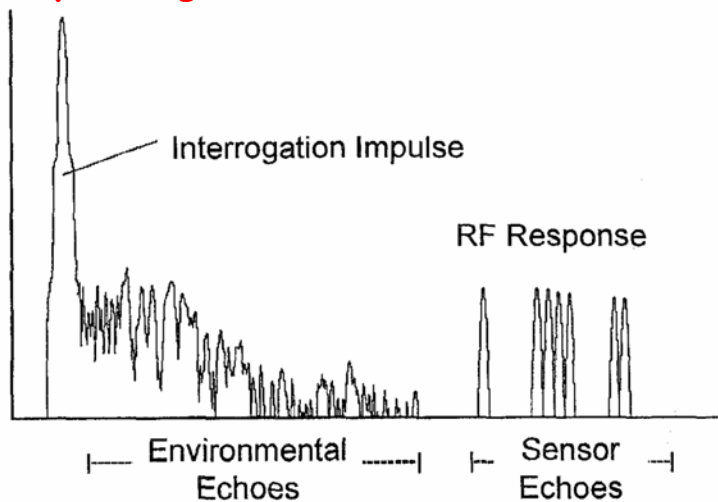
- Una sequenza di riflettori dà luogo a una sequenza corrispondente di impulsi. Due riflettori separati da una distanza d_1 danno luogo a due impulsi trasmessi a distanza temporale $2d_1/v$
- Una sequenza di N (per es. $N=16$) riflettori equidistanziati presenti o assenti, dà luogo a $2N$ diversi codici possibili
- Il numero seriale viene scritto in hardware, al momento in cui i riflettori vengono definiti

(Reindl et al. IEEE TUFFC 45, 1281,1998)

Giuseppe Iannaccone - 2005

Transponder SAW

- con onde SAW si riesce a ottenere un ritardo significativo con un piccolo chip (poniamo $v=3000\text{cm/s}$):
 - $1\text{ cm} \rightarrow \Delta t' = 1\text{ cm}/v = 3.3\ \mu\text{s}$
- Echi da oggetti posti nell' ambiente hanno un ritardo minore. Se anche ponessimo: $d = 50\text{ m}$ avremmo: $\Delta t = 2d/c=0.33\ \mu\text{s}$
- **Tipico segnale ricevuto al lettore**



Il ritardo consente di eliminare il clutter e quindi di aumentare la sensibilità del ricevitore

(Reindl et al.
IEEE TUFFC 45, 1281,1998)

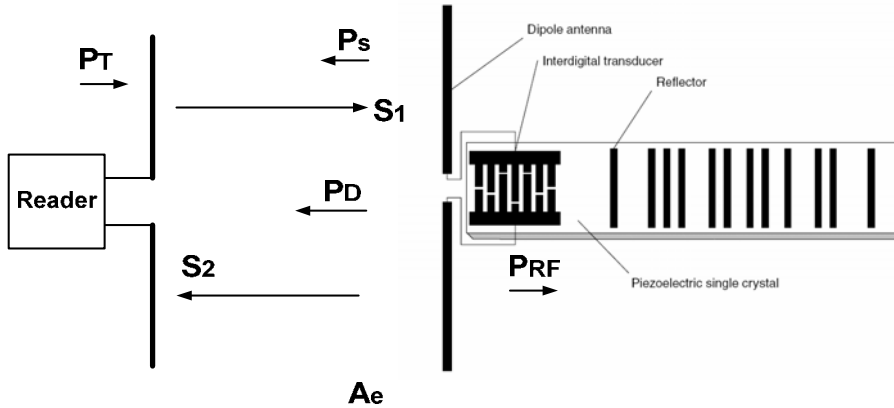
Giuseppe Iannaccone - 2005

Transponder SAW

- **Estremamente robusti**, resistono a intemperie, radiazioni, shock meccanici, temperatura (-190 C - $+200\text{ C}$ o piu' alte con cristalli speciali)
- **Molto veloci**: pochi μs per una interrogazione, fino a 10^5 al secondo
- Bande disponibili - low power devices $P_{\text{EIRP}} = 25\text{ mW}$:
 - 434 MHz (ISM)
 - 2.45 GHz (ISM)
- Transponder di identificazione
 - Si arriva fino a $N=32$ riflettori $\rightarrow 2^{32} = 4\text{ G}$ oggetti
- Transponder con sensori

Giuseppe Iannaccone - 2005

Portata (I)

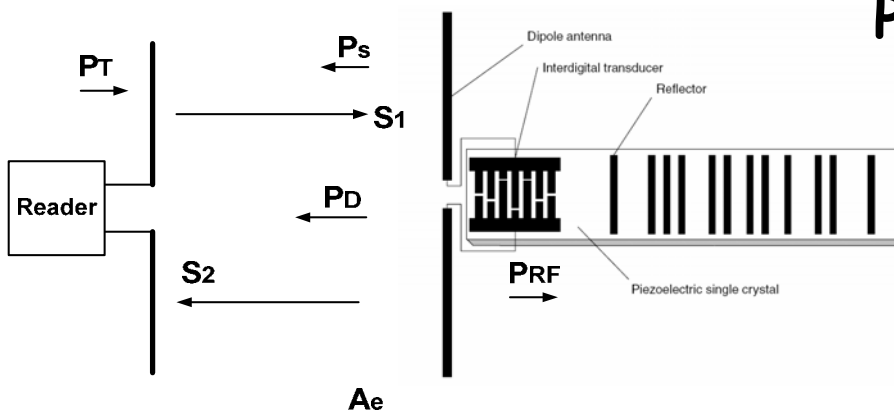


- Potenza per unità di superficie all'antenna del tag $S_1 = \frac{G_T P_T}{4\pi R^2}$
- Potenza assorbita dal tag $P_{RF} = A_E S_1 = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R S_1$
- Potenza riflessa dopo $P_D = \frac{P_{RF}}{D}$

D perdite di inserzione (20-50 dB)

Giuseppe Iannaccone - 2005

Portata (II)



- Potenza per unità di superficie all'antenna del lettore $S_2 = \frac{G_R P_D}{4\pi R^2}$
- Potenza ricevuta al lettore $P_R = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_T S_2 = \frac{P_T G_T^2 G_R^2 \lambda^4}{(4\pi)^4 R^4 D}$
- Chiamiamo P_{Rmin} la potenza minima necessaria al lettore per ottenere una prob. di errore fissata sia $P_{Rmin} = Fk_B T B \left(\frac{S}{N} \right)_{min}$

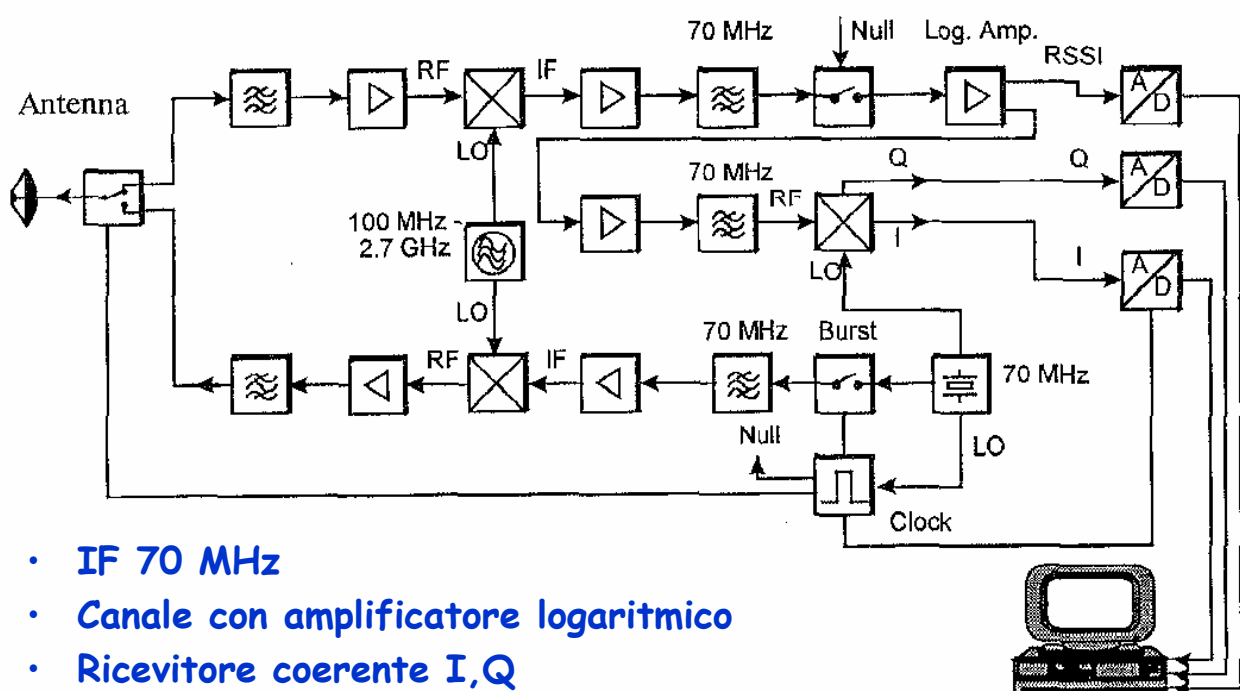
Giuseppe Iannaccone - 2005

Portata (III)

- da cui otteniamo $R_{\max} = \frac{1}{4\pi} \sqrt[4]{\frac{P_T G_T^2 G_R^2 \lambda^4}{k_B T B F (S/N)_{\min} D}}$
- i valori tipici sono
 - $D \sim 20\text{-}50 \text{ dB}$, $F \sim 5 \text{ dB}$, $(S/N)_{\min} \sim 10 \text{ dB}$
 - $G_T \sim 12 \text{ dB}$, $G_R \sim 6 \text{ dB}$
- ricordando che $P_T G_T = 25 \text{ mW}$
- Con questi numeri otteniamo:
 - per $f = 434 \text{ MHz} \rightarrow R_{\max} = 2.5 \text{ m}$
 - per $f = 2.45 \text{ GHz} \rightarrow R_{\max} = 36 \text{ cm}$
- Con una somma coerente dei segnali le portate possono essere aumentate sensibilmente

Giuseppe Iannaccone - 2005

Schema a blocchi del lettore

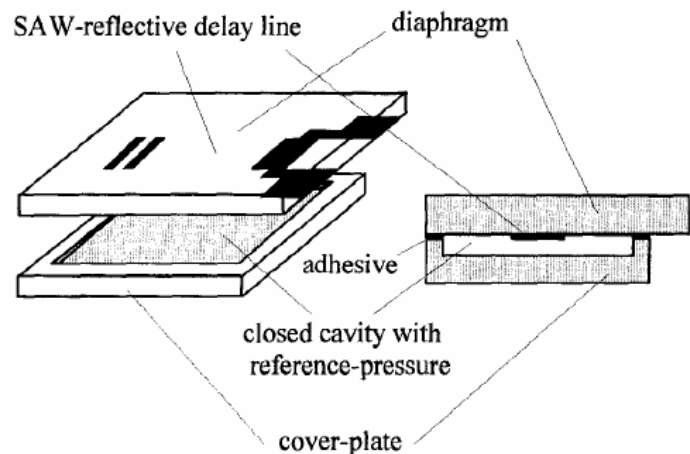


- IF 70 MHz
- Canale con amplificatore logaritmico
- Ricevitore coerente I,Q

Giuseppe Iannaccone - 2005

Sensori SAW (I)

- La grandezza che si vuole misurare deve avere un effetto sulla propagazione dell'onda acustica superficiale
- Esempi di grandezze misurabili con sensori SAW:
 - pressione
 - stress statico
 - torsione
 - accelerazione
 - temperatura
- **Alterano la lunghezza del cammino acustico o la velocità delle onde superficiali**



- **Es.: sensore SAW di pressione**
- Sono utilizzabili in condizioni ambientali estreme (e.g. pressione pneumatici, temperatura delle pale di turbine)

Giuseppe Iannaccone - 2005

Sensori SAW (II)

- Chiamiamo τ il ritardo dell'impulso, e supponiamo che dipenda da una grandezza y .

$$\tau(y_0 + \Delta y) = \tau(y_0) + \left. \frac{\partial \tau}{\partial y} \right|_{y_0} \Delta y = \tau(y_0) \left[1 + S_\tau^y \Delta y \right]$$

- S_τ^y è la sensibilità di τ rispetto a y in y_0

$$S_\tau^y = \frac{1}{\tau(y_0)} \left. \frac{\partial \tau}{\partial y} \right|_{y_0}$$

- Se τ dipende da y attraverso, ad esempio v , abbiamo

$$\Delta \tau = \tau(y_0) S_\tau^y \Delta y = \frac{\partial \tau}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y = \frac{\partial \tau}{\partial v} v \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y = \tau \left[\frac{v}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial v} \right] S_v^y \Delta y$$

Giuseppe Iannaccone - 2005

Linee di ritardo a riflessione (I)

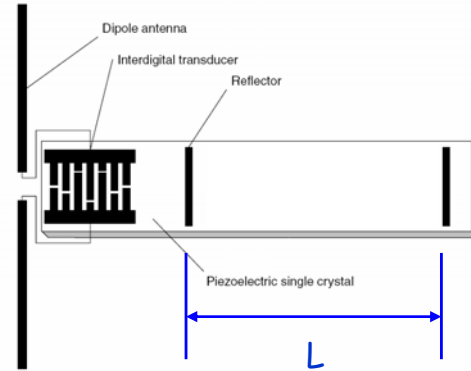
- Supponiamo di voler fare un sensore di temperatura:
 - per il niobato di litio

$$S_v^T = \left. \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial T} \right|_{T_0} = 85 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$

$$- v = 3488 \text{ m/s @ } 300 \text{ K} \quad \left(1 + \frac{\Delta v}{v}\right)$$

$$\tau(v + \Delta v) = \frac{2L}{v + \Delta v} = \frac{2L}{v} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta v}{v}\right)} = \frac{2L}{v} \left(1 - \frac{\Delta v}{v}\right) = \tau \left(1 - S_v^T \Delta T\right)$$

- se $L = 1 \text{ cm}$, $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$
 - $\rightarrow \tau = 2L/v = 5.73 \text{ } \mu\text{s}$,
 - $\rightarrow \Delta\tau = \tau S_v^T \Delta T = -0.487 \text{ ns}$
- per ΔT così piccoli $\Delta\tau$ è troppo breve per misurarlo



Giuseppe Iannaccone - 2005

Linee di ritardo a riflessione (II)

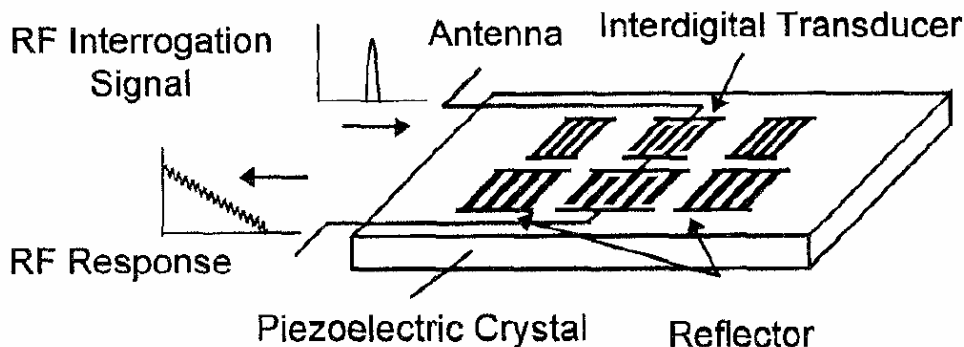
- Per apprezzare ΔT piccoli si puo' fare una **rivelazione di fase**
- La variazione di fase tra i due impulsi è

$$\phi = 2\pi f \tau \rightarrow \Delta\phi = 2\pi f \Delta\tau$$

- Nel caso di prima, avremmo $\Delta\phi$ apprezzabili:
 - per $f = 434 \text{ MHz}$ $\rightarrow \Delta\phi = -1.33 \text{ rad}$.
 - per $f = 2.45 \text{ GHz}$ $\rightarrow \Delta\phi = -7.49 \text{ rad}$.
- E' ragionevole avere un rivelatore con una sensibilità di 0.1 rad
- L'altra possibilità per aumentare la risoluzione è aumentare il cammino efficace delle onde acustiche superficiali, ad esempio con un risonatore

Giuseppe Iannaccone - 2005

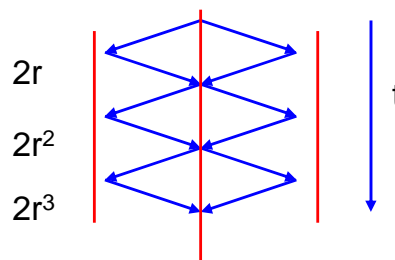
Risonatori (I)



- **Coefficiente di riflessione nel percorso IDT-riflettore-IDT:**
 $r = |r| \exp(i\phi)$
- **A: ampiezza dell'onda all'IDT includendo le due direzioni e tutte le riflessioni**

$$A = 2 \left[r + r^2 + r^3 + r^4 + \dots \right] =$$

$$\frac{2r}{1-r} = \frac{2|r| \exp(i\phi)}{1 - |r| \cos \phi - i|r| \sin \phi}$$



Giuseppe Iannaccone - 2005

Risonatori (II)

$$\angle A = \phi + \arctan \left(\frac{\sin \phi |r|}{1 - |r| \cos \phi} \right) \quad |A| = \frac{2|r|}{1 + |r|^2 - 2|r| \cos \phi}$$

- **A è massimo se $\cos \phi = 1$. In quel caso abbiamo $\angle A = 0$**
- **intorno a $\phi=0$ è possibile fare uno sviluppo al I ordine**

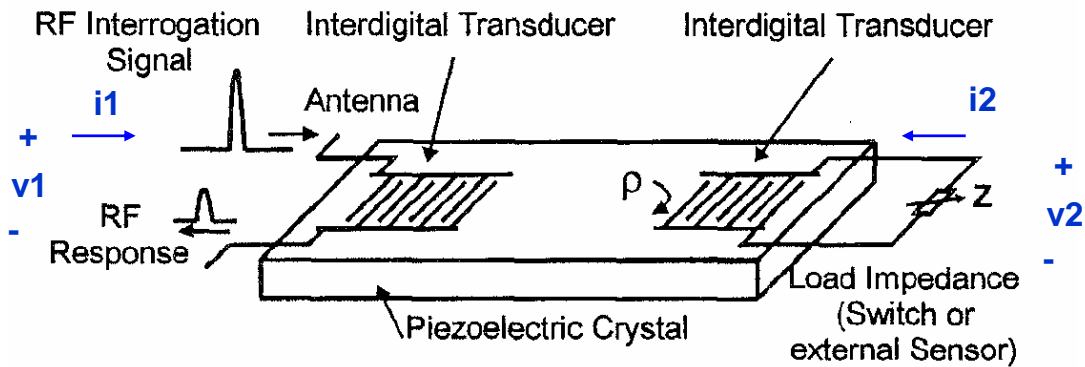
$$\angle A = \phi + \arctan \left(\frac{\phi |r|}{1 - |r|} \right) = \phi + \frac{\phi |r|}{1 - |r|} = \frac{\phi}{1 - |r|} = Q\phi$$

- **$Q = (1 - |r|)^{-1}$ è il fattore di qualità della cavità**
- **Con riflettori di Bragg si riescono a ottenere fattori di qualità**
- **$Q \sim 10000$ a 434 MHz** **$Q \sim 1500-3000$ a 2.45 GHz**
- **A parità di dimensioni, lo sfasamento è moltiplicato per un fattore Q rispetto a quello ottenibile con un riflettore semplice**

$$\angle A = Q \angle r = Q 2\pi f_0 \tau = Q 2\pi f_0 \frac{2L}{v}$$

Giuseppe Iannaccone - 2005

Sensori di impedenza (I)



- Invece di un riflettore possiamo usare un IDT caricato con un'impedenza
- descrizione a parametri Y

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \\ I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \end{cases} \quad \text{in un sistema passivo } Y_{21} = Y_{12}$$

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z} \quad \rightarrow \quad V_2 = -\frac{Y_{21}}{Y_{22} + 1/Z} V_1$$

Giuseppe Iannaccone - 2005

Sensori di impedenza (II)

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12} \frac{-Y_{21}}{Y_{22} + 1/Z} V_1 \quad \rightarrow \quad \frac{I_1}{V_1} = Y_{11} - \frac{[Y_{21}]^2}{Y_{22} + 1/Z}$$

- L'ammettenza vista dall'IDT dipende da Z. Se Z è influenzata da una proprietà fisica, si può effettuare una misura a distanza.
- Caso tipico - catena del freddo: vogliamo vedere se una certa temperatura T_c viene superata
 - Z è costituita da due lamine metalliche a contatto, con diverso coefficiente di dilatazione. per $T > T_c \rightarrow Z = \infty$, per $T < T_c \rightarrow Z = 0$
 - E' necessario leggere il tag continuamente per accorgersi della variazione.

Giuseppe Iannaccone - 2005

Applicazioni dei transponder SAW

- **TAG di identificazione per vagoni ferroviari**
 - si piazza sui fianchi del vagone
 - è immune alle interferenze elettromagnetiche
 - resiste a condizioni ambientali difficili (sporco, pioggia, ghiaccio)
- **Sensori di temperatura (in ambienti ostili)**
 - termometri clinici
 - reagenti chimici
 - temperatura di freni e di lame di turbine
 - motori elettrici

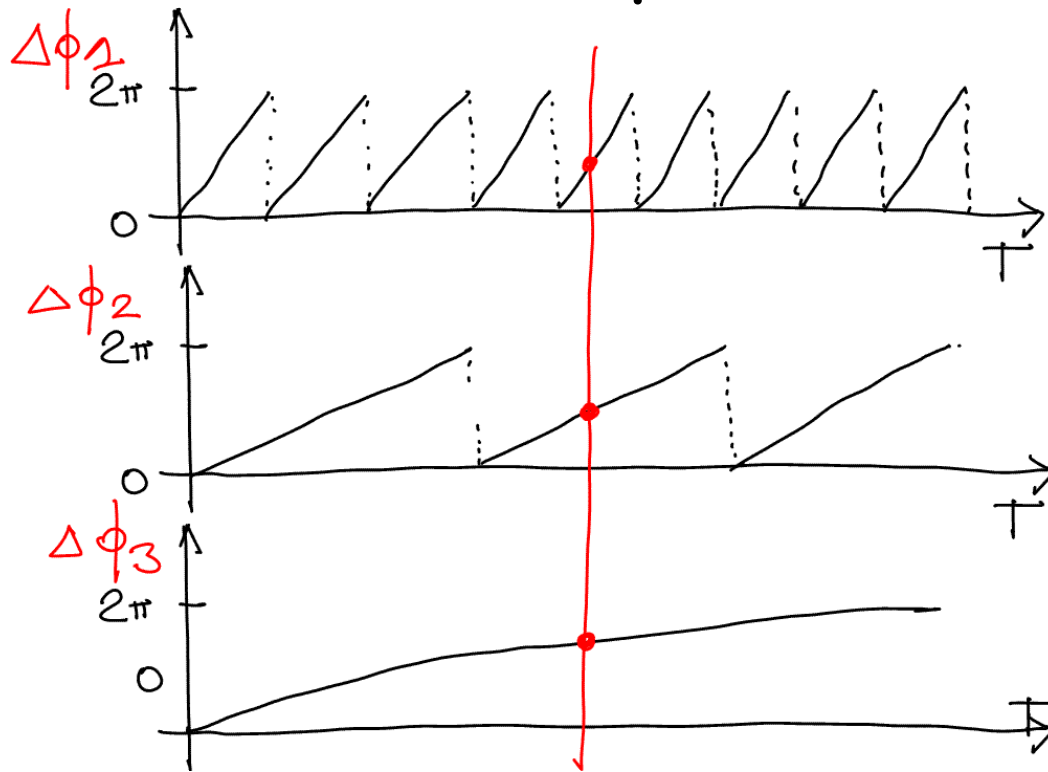
Giuseppe Iannaccone - 2005

Sensori di temperatura

- Per il niobato di litio la sensibilità del ritardo rispetto alla temperatura è 85 ppm/°C
- Se la risoluzione di fase è 1 grado posso risolvere una ΔT
$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta\tau = 2\pi f \tau S_{\tau}^V \Delta T \rightarrow \Delta T = 0.014 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
- Per una $\Delta T > 360 \times 0.014 = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lo sfasamento supera 360 gradi, e avremmo ambiguità in lettura
- Se vogliamo un intervallo di temperatura più ampio, con la stessa risoluzione di fase, possiamo usare più riflettori.

Giuseppe Iannaccone - 2005

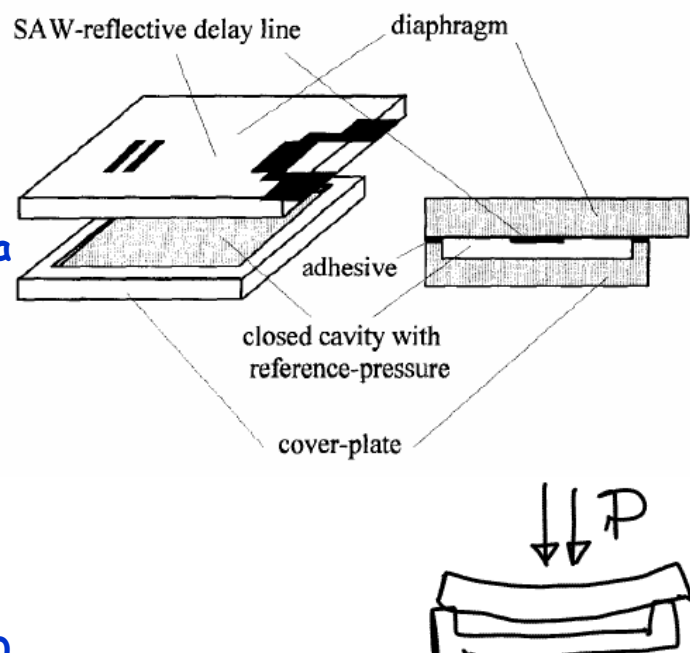
Sensori di temperatura



Giuseppe Iannaccone - 2005

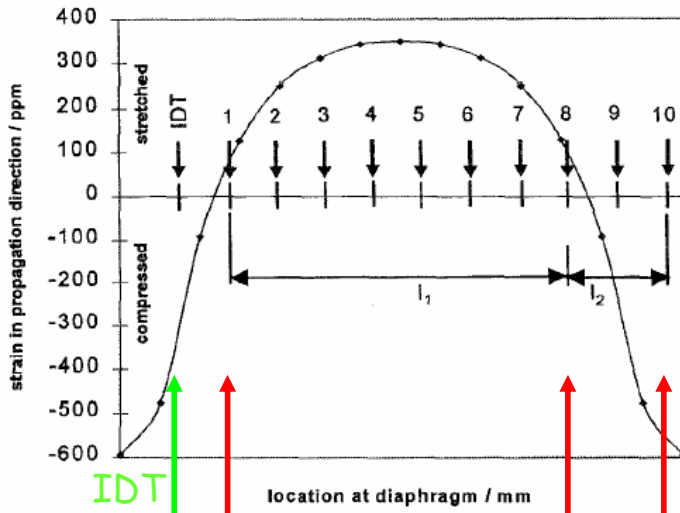
Sensori di pressione (I)

- Diaframma di Quarzo \rightarrow sensibilità alla temperatura trascurabile $\rightarrow S_V^P \gg S_V^T$
- Zone compresse $\rightarrow v$ aumenta
- Zone tese $\rightarrow v$ diminuisce
- Cavità chiusa ermeticamente con pressione di riferimento. Anche il *cover plate* è in quarzo.
- Intervallo di Pressione 0-250 KPa



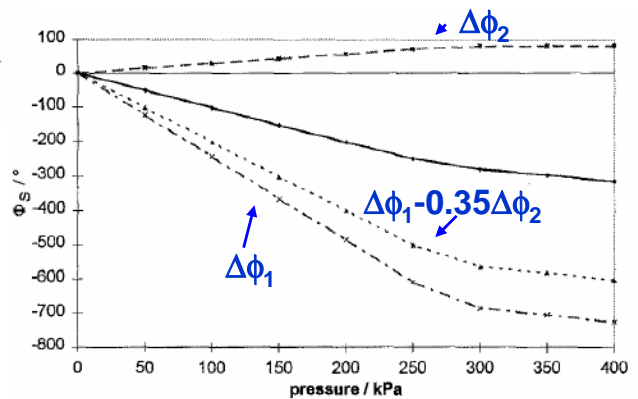
Giuseppe Iannaccone - 2005

Sensori di pressione (II)



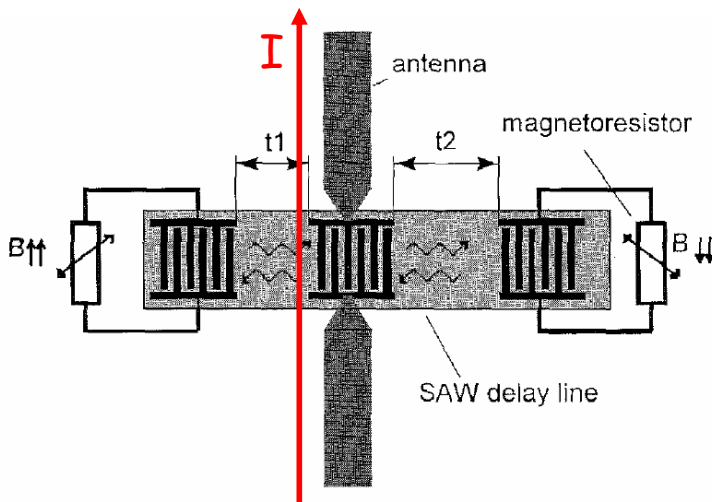
- Strain in funzione della posizione
- $\Delta\phi_1$ aumenta con P
- $\Delta\phi_2$ diminuisce con P
- $\Delta\phi_1 - 0.35 \Delta\phi_2$ è quasi indipendente da T

- E' importante che i riflettori siano posizionati opportunamente, in modo da massimizzare l'effetto e da rendere il sensore indipendente alle variazioni di temperatura



Giuseppe Iannaccone - 2005

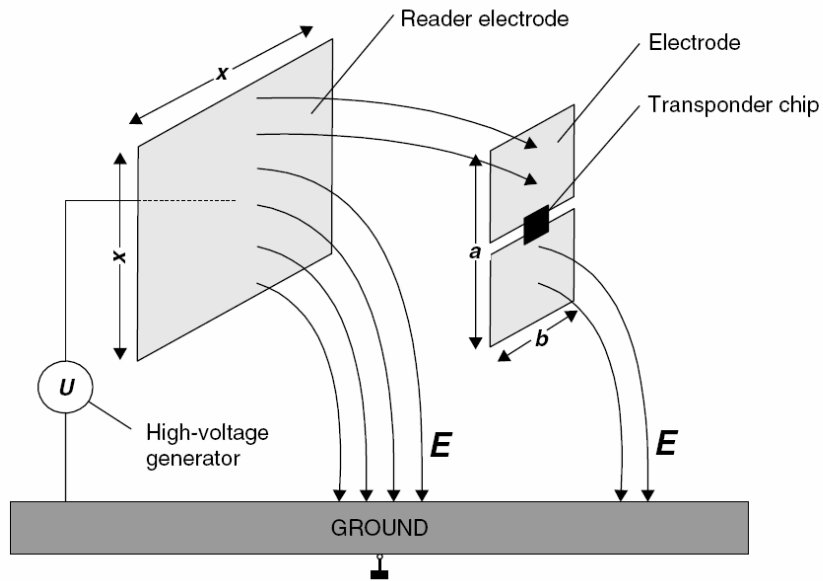
Sensore di corrente



- L'IDT è collegato a una magnetoresistenza $R(B)$
- Si usano due magnetoresistenze, per diminuire la cross-sensibilità (cross-sensitivity)
- Si rileva il rapporto tra le ampiezza dei due impulsi (indipendente da T, P)
- Risoluzione in corrente 5%

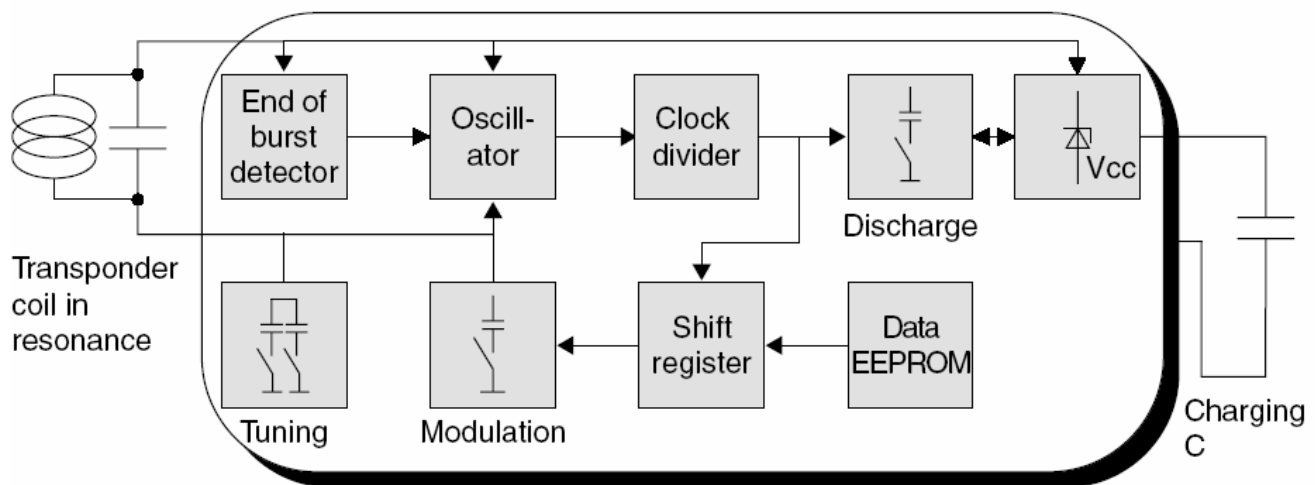
Giuseppe Iannaccone - 2005

Accoppiamento elettrostatico



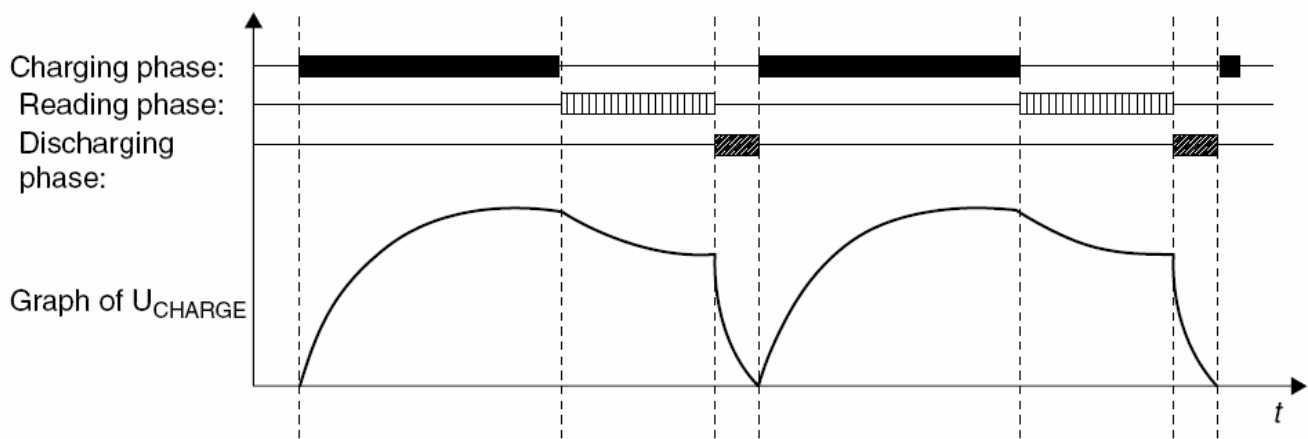
Giuseppe Iannaccone - 2005

Tag Passivi Sequenziali (I)



Giuseppe Iannaccone - 2005

Tag Passivi Sequenziali (II)



- Tempo di carica, 30-50 ms
- Tempo di lettura 20-30 ms