

Dinamica Fuori Equilibrio in Sistemi Nanoelettromeccanici

Matteo Biggio¹, Marco Storace¹, Fabio Cavaliere², Maura Sassetti²

¹Dipartimento di Ingegneria Navale, Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni, Università di Genova, Via Opera Pia 11a, Genova.

²Dipartimento di Fisica, Università di Genova, Via Dodecaneso 33, Genova,
e-mail matteo.biggio@unige.it

Parole chiave: Sistemi Nanoelettromeccanici, Dinamica Fuori Equilibrio, Equazione di Langevin.

Con il termine “Sistemi NanoElettroMeccanici” (NanoElectroMechanical Systems, NEMS nel seguito) si intende una classe di nano-dispositivi in cui un oscillatore meccanico interagisce con un sistema elettronico, tipicamente un “quantum dot” [1]. L'oscillatore meccanico può essere realizzato, per esempio, attraverso nanotubi di carbonio, mentre il quantum dot può essere definito in eterostrutture a semiconduttore o all'interno dei nanotubi stessi [1]. Tipicamente, il flusso di elettroni attraverso il quantum dot può essere controllato per mezzo di una tensione di bias u e di una tensione di gate v_g . Negli ultimi anni, i NEMS hanno suscitato molto interesse sia dal punto di vista delle possibili applicazioni tecnologiche sia da quello della ricerca di base. In particolare, i NEMS sono stati oggetto di intensa ricerca per applicazioni di sensoristica; grazie alle loro elevate frequenze di risonanza (da pochi MHz a circa 1 GHz) i risuonatori NEMS possono essere impiegati per la misura di masse piccolissime (fino a 10^{-24} g) [2]. Dal punto di vista della ricerca di base, i NEMS costituiscono un terreno ideale per la comprensione degli effetti dovuti all'interazione fra vibrazioni meccaniche (fononi) ed elettroni, e per l'osservazione sperimentale di fenomeni prettamente quantistici, quali sovrapposizione coerente di stati ed entanglement [3].

Quando la frequenza di risonanza delle vibrazioni meccaniche è molto più piccola del rate medio di tunneling elettronico (*regime semi-classico*), la dinamica dell'oscillatore può essere descritta attraverso un'equazione differenziale stocastica, in cui la media e le fluttuazioni della forza agente sull'oscillatore meccanico (composta da un termine conservativo, derivabile da un potenziale efficace, e da un termine dissipativo) sono indotte dal sottosistema elettronico. In [4], abbiamo analizzato la dinamica di un oscillatore nanoelettromeccanico in regime semi-classico, considerando gli effetti dell'interazione con gli elettroni. Figura 1 mostra il potenziale efficace dell'oscillatore: al variare della tensione di bias applicata al sottosistema, il potenziale efficace può presentare uno, due o tre minimi.

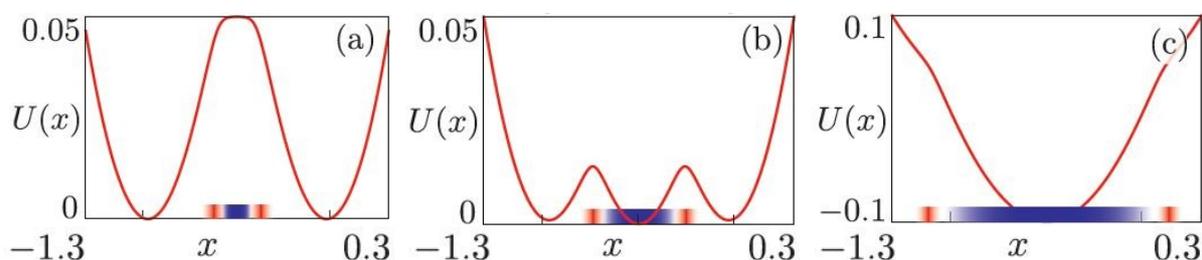


Figura 1: Potenziale efficace in funzione della posizione x dell'oscillatore, per diversi valori della tensione di bias normalizzata u applicata al quantum dot. (a) $u = 0.2$, (b) $u = 0.475$, (c) $u = 1.0$. Le barre colorate rossa e blu poste sotto il potenziale efficace denotano, rispettivamente, i valori massimi del termine dissipativo e della varianza della forza indotta dal sottosistema elettronico in funzione della posizione x dell'oscillatore.

Abbiamo mostrato in [4] che il sistema, a causa del rumore indotto dal sottosistema elettronico, converge sempre a un unico stato stazionario, in contrasto con quanto asserito da altri autori sulla base di approssimazioni meno accurate della dinamica [5]. Attraverso estensive simulazioni numeriche dell'equazione di Langevin descrivente l'oscillatore, e attraverso un'analisi spettrale dell'equazione di Fokker-Planck associata, abbiamo inoltre estratto le scale di tempo che caratterizzano la dinamica transitoria dell'oscillatore, al variare dei parametri di controllo del sistema (tensione di bias u e di gate v_g). Abbiamo mostrato come queste scale di tempo dipendano dalle tensioni di bias e di gate, e in particolare dalla forma del potenziale efficace che esse determinano (con uno, due o tre minimi).

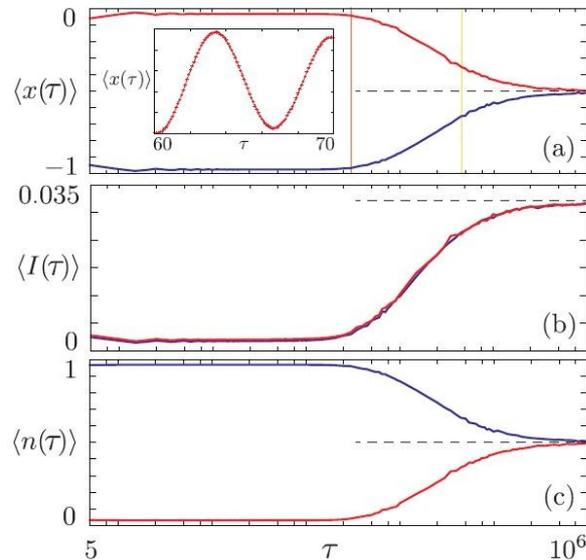


Figura 2

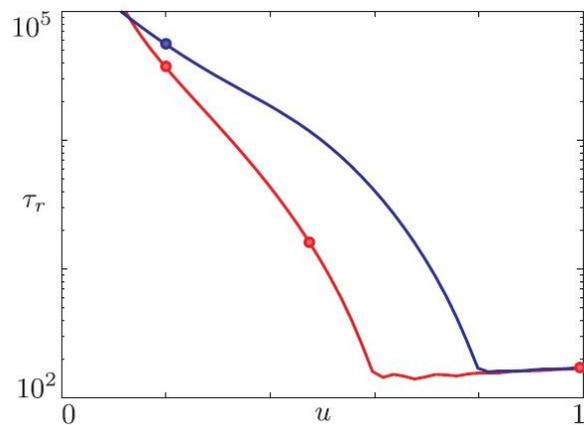


Figura 3

Figura 2 mostra, a titolo di esempio, l'andamento temporale della posizione media dell'oscillatore, della corrente e dell'occupazione media del quantum dot, al variare della condizione iniziale dell'oscillatore, per valori di tensioni di bias e di gate per cui il potenziale efficace presenta due minimi. Figura 3 mostra invece il tempo caratteristico di rilassamento del sistema al variare della tensione di bias u applicata. Si può notare come il tempo di rilassamento saturi a un valore minimo; in [4] abbiamo mostrato che la saturazione avviene in corrispondenza del valore di tensione di bias in cui i minimi del potenziale efficace passano da tre a uno.

Riferimenti bibliografici

- [1] S. Sapmaz, Y. M. Blanter, L. Gurevich, H. S. J. Van der Zant, "Carbon nanotubes as nanoelectromechanical systems", *Physical Review B*, 67(23), 235414 (2003).
- [2] J. Chaste, A. Eichler, J. Moser, G. Ceballos, R. Rurali, A. Bachtold, "A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution", *Nature nanotechnology*, 7(5), 301-304 (2012).
- [3] I. Katz, A. Retzker, R. Straub, R. Lifshitz, "Signatures for a classical to quantum transition of a driven nonlinear nanomechanical resonator", *Physical review letters*, 99(4), 040404 (2007).
- [4] M. Biggio, F. Cavaliere, M. Storace, M. Sassetti, "Transient dynamics of an adiabatic NEMS," sottoposto per la pubblicazione a *New Journal of Physics*.
- [5] M. Galperin, M. A. Ratner, A. Nitzan, "Hysteresis, switching, and negative differential resistance in molecular junctions: a polaron model", *Nano letters*, 5(1), 125-130 (2005).