

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA  
prot. 2005025173

<b>Coordinatore Scientifico</b>	Adalberto BALZAROTTI
<b>Ateneo</b>	Università degli Studi di ROMA "Tor Vergata"
<b>Titolo della Ricerca</b>	Nucleazione spazialmente controllata di punti quantici per emettitori a singolo fotone
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 140.000
<b>Durata</b>	24 Mesi

## Obiettivo della Ricerca

*Tra le applicazioni più promettenti dei punti quantici per dispositivi optoelettronici innovativi vi è quella dei LED emettitori in microcavità. La realizzazione pratica di tale dispositivo implica la capacità di far nucleare il singolo emettitore, cioè il singolo punto quantico, in un'area selezionata della superficie, di dimensioni tipicamente 100 nm, in maniera controllata e ripetibile. Questo obiettivo, benché perseguito ampiamente da molti gruppi di ricerca con varie strategie che combinano tecniche di crescita epitassica e tecniche di strutturazione del substrato, non è stato ancora conseguito appieno.*

*Lo scopo principale del presente progetto è di affrontare il problema della crescita di punti quantici di InAs, su substrati opportunamente strutturati di GaAs al fine di ottenere la nucleazione controllata di singoli QD in nanobuchi con dimensioni di 50-100 nanometri per applicazioni optoelettroniche basate sul singolo emettitore. Al fine di essere utilizzati come centri luminescenti per emettitori a singolo fotone, è necessario che il nanoemettitore sia una sorgente efficiente di luce. Si devono scegliere configurazioni che incrementino il rate di generazione di fotoni e quindi la disposizione spaziale dei QD all'interno della microcavità deve essere tale che l'accoppiamento fra gli stati elettronici del QD e i modi del campo elettromagnetico nella cavità cambi la probabilità di emissione spontanea (SER) dell'atomo artificiale schematizzabile come un sistema quantistico a due livelli. La strategia perseguita nel presente progetto per delimitare le aree di nucleazione è quella di utilizzare una maschera di SiO<sub>2</sub>, depositata sul GaAs, sulla quale siano stati realizzati i microfori con litografia elettronica ed etching chimico. Questa configurazione sfrutta la differenza nella diffusione dell'elemento III sul SiO<sub>2</sub> e sul GaAs per ottenere la nucleazione dei punti quantici sul solo substrato esposto di GaAs.*

*Il secondo obiettivo che verrà perseguito, al fine di ottimizzare il sistema, è di comprendere i meccanismi di nucleazione attraverso simulazioni di tipo atomistico per stimare le lunghezze di diffusione dell'elemento III con modelli cinetici realistici che tengano conto delle ricostruzioni sperimentalmente osservate e della morfologia del substrato.*

*Il terzo obiettivo è la caratterizzazione spettrale avanzata con tecniche di microfotoluminescenza per individuare l'emissione del substrato e l'emissione da singolo QD, la determinazione dei tempi di cattura e ricombinazione del singolo QD e la sua dipendenza dall'omogeneità della struttura e dall'accoppiamento eventuale fra punti quantici disposti in geometrie predefinite.*

## Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

*Negli ultimi anni l'applicazione dei singoli QDs nel sistema InAs/GaAs, ha avuto notevoli successi, quali la generazione di stati a singolo fotone, e la loro applicazione per la crittografia quantistica, il controllo dell'emissione spontanea in microcavità, la dimostrazione di interferenza tra due fotoni generati da singoli QDs, e di strong coupling tra un singolo eccitone e un modo di microcavità. Il controllo coerente della carica o dello spin in singoli QD può essere utilizzato per la realizzazione di porte quantistiche e potenzialmente di un computer quantistico, come proposto in molti lavori teorici, con prime interessanti conferme sperimentali.*

*Da quanto detto appare evidente che la crescita controllata di QD di In(Ga)As su superfici di GaAs con elevato grado di confinamento laterale (dell'ordine di 100 nm) e' di grande interesse. Il raggiungimento di questo obiettivo è reso difficile dal fatto che vari fattori di tipo cinetico-termodinamico influenzano la crescita dei QD, quali la diffusione anisotropa dovuta alla ricostruzione della superficie e alla formazione di una lega InGaAs, la segregazione in superficie dell'In, l'effetto della temperatura sul valore del ricoprimento critico e la formazione di difetti e strutture dovute alle instabilità cinetiche della crescita.*

*Le strutture quantiche per le applicazioni ottiche devono soddisfare altri requisiti fondamentali: i) la dimensione laterale dei QD deve essere abbastanza piccola da garantire un vero confinamento quantistico dei portatori ii) i livelli elettronici devono essere ben definiti e avere una separazione maggiore dell'energia di interazione coulombiana dei portatori, il che implica un controllo accurato delle modalità di fabbricazione; le interfacce devono mantenere la loro integrità chimica ed essere stabili rispetto alla formazione di difetti strutturali durante la fase di crescita.*

*Vari metodi sperimentali sono stati descritti in letteratura per ottenere il controllo della distribuzione laterale dei QD in modalità di crescita epitassiale auto-organizzata di tipo Stranski-Krastanov (SK). Molti di essi sono basati su multistrati di (In,Ga)As/GaAs e sfruttano la diffusione anisotropa delle superfici singolari di GaAs(100) indotta dalla ricostruzione della superficie e la tendenza dei QD a nucleare lungo gli step per formare catene quasi unidimensionali di parecchi micron nella direzione [01-1]; altri usano superfici misorientate o di alto indice per introdurre gradini di tipo A o B di differente densità. Va tuttavia detto che il conseguire un significativo ordine laterale dei QD senza un controllo litografico del substrato rimane ancora una sfida aperta.*

*Dal punto di vista teorico, la comprensione a livello atomico dei meccanismi che controllano il processo di formazione dei QD nel sistema InAs/GaAs con elevato mismatch reticolare (7.2%) e' ancora limitata.*

*Il presente progetto si propone di realizzare la crescita di punti quantici di InAs, su substrati strutturati di GaAs al fine di ottenere la nucleazione controllata di singoli QD in nanobuchi con dimensioni di 100 nanometri per applicazioni come centri luminescenti in*

emettitori a singolo fotone. Questo progetto è altamente innovativo rispetto alle strategie sperimentali e teoriche utilizzate finora a questo scopo.

### **Criteri di verificabilità**

La valutazione globale del programma si basa sulla verifica dei seguenti punti:

- a) Realizzazione di matrici di buchi di SiO<sub>2</sub> su GaAs con dimensione dell'ordine di 100 nm.
- b) Crescita epitassica di singoli punti quantici all'interno dei buchi.
- c) Caratterizzazione spettrale con tecniche di microfotoluminescenza per individuare l'emissione da singolo punto quantico.
- d) Calcoli di parametri cinetici realistici con metodi *ab initio* e delle caratteristiche di emissione luminescente attraverso la modellizzazione atomistica delle strutture cresciute e caratterizzate.

La verifica dei punti a)- d) verrà documentata da topografie AFM, spettri di fotoluminescenza e analisi teoriche.

La produzione di articoli scientifici su riviste internazionali del settore e la presentazione di lavori a congressi costituirà, infine, un oggettivo elemento di valutazione del progetto.

### **Elenco delle Unità di Ricerca**

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di ROMA "Tor Vergata"
<b>Responsabile Scientifico</b>	Adalberto BALZAROTTI
<b>Finanziamento assegnato</b>	<b>Euro</b> 56.500

### **Compito dell'Unità**

#### *Fase 1*

Si mette a punto il protocollo per la fabbricazione di buchi di dimensioni nanometriche su film di SiO<sub>2</sub> depositati su GaAs e processati con litografia a fascio elettronico.

#### *Fase 2*

Si ottimizza la qualità del buffer layer dentro i nanobuchi e le condizioni per localizzare un singolo QD. La forma e le dimensioni dei QD verranno esaminate con spettroscopia AFM. Viene determinato il profilo ottimale della maschera (forma e distanza dei fori ecc.) e studiate le condizioni di crescita di GaAs di buona qualità come emettitore di luce all'interno dei microfori.

---

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di FIRENZE
<b>Responsabile Scientifico</b>	Anna VINATTIERI
<b>Finanziamento assegnato</b>	<b>Euro</b> 42.000

### **Compito dell'Unità**

#### *Fase 1*

1) Studio del ruolo dei difetti introdotti dai processi superficiali nella dinamica dei portatori, sia sullo spettro che sull'efficienza di ricombinazione, determinando rate radiativi e non-radiativi.

2) Studio della larghezza di riga in funzione della temperatura e della densità di eccitazione al fine di determinare contributi dovuti a inhomogeneità, interazione con il reticolo ed effetti a molti corpi.

#### *Fase 2*

3) Caratterizzazione spettrale avanzata con tecniche di microfotoluminescenza (microPL) per individuare l'emissione da singolo punto quantico e studiare l'interazione del QD con fononi e difetti nell'environment.

4) Determinazione dei tempi di cattura e ricombinazione nel singolo punto Quantico: dipendenza dall'omogeneità della struttura e dall'accoppiamento eventuale fra punti quantici disposti in geometrie predefinite.

Nello sviluppo del progetto verso la realizzazione di emettitori inseriti in microcavità aggiungiamo il seguente punto:

5) Determinazione delle condizioni di accoppiamento (forte o debole), misurando il rate di emissione spontanea (SER) e l'effetto Purcell.

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di MODENA e REGGIO EMILIA
<b>Responsabile Scientifico</b>	Rita MAGRI
<b>Finanziamento assegnato</b>	<b>Euro</b> 41.500

### **Compito dell'Unità**

#### *Fase 1*

1) *Calcolo dei siti di adsorbimento e delle barriere di diffusione per un singolo atomo di In sulla superficie del wetting layer In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ricostruito alpha(2x4) e per composizioni  $x > 0.8$  su GaAs(001).*

2) *Calcolo degli spettri di emissione, tempi di ricombinazione radiativa, e tensore dielettrico di QD di InAs su GaAs di diverse forme e dimensioni.*

#### *Fase 2*

1) *Simulazione con il metodo Monte Carlo cinetico, calcolo della lunghezza di migrazione e del coefficiente di diffusione dell'In per diverse ricostruzioni e composizioni dello wetting layer.*

2) *Calcolo dei siti di adsorbimento e delle barriere energetiche per la diffusione sulla superficie del SiO<sub>2</sub>.*

---