



Quantum dot e nanostrutture zero-dimensionali

Marco Felici

Dipartimento di Fisica- Sapienza Università di Roma

I. Introduzione:

- La buca di potenziale **tridimensionale**: energia di **confinamento**, livelli **discreti**;
- Realizzazione **pratica**: i **quantum dot (QD)** a **semiconduttore**.

I. Introduzione:

- La buca di potenziale **tridimensionale**: energia di **confinamento**, livelli **discreti**;
- Realizzazione **pratica**: i **quantum dot (QD)** a **semiconduttore**.

II. Sistemi di QD:

- QD **Stranski-Krastanow** (o **self-assembled**);
- QD **colloidali**;
- QD **site-controlled**;

I. Introduzione:

- La buca di potenziale **tridimensionale**: energia di **confinamento**, livelli **discreti**;
- Realizzazione **pratica**: i **quantum dot (QD)** a **semiconduttore**.

II. Sistemi di QD:

- QD **Stranski-Krastanow** (o **self-assembled**);
- QD **colloidali**;
- QD **site-controlled**;

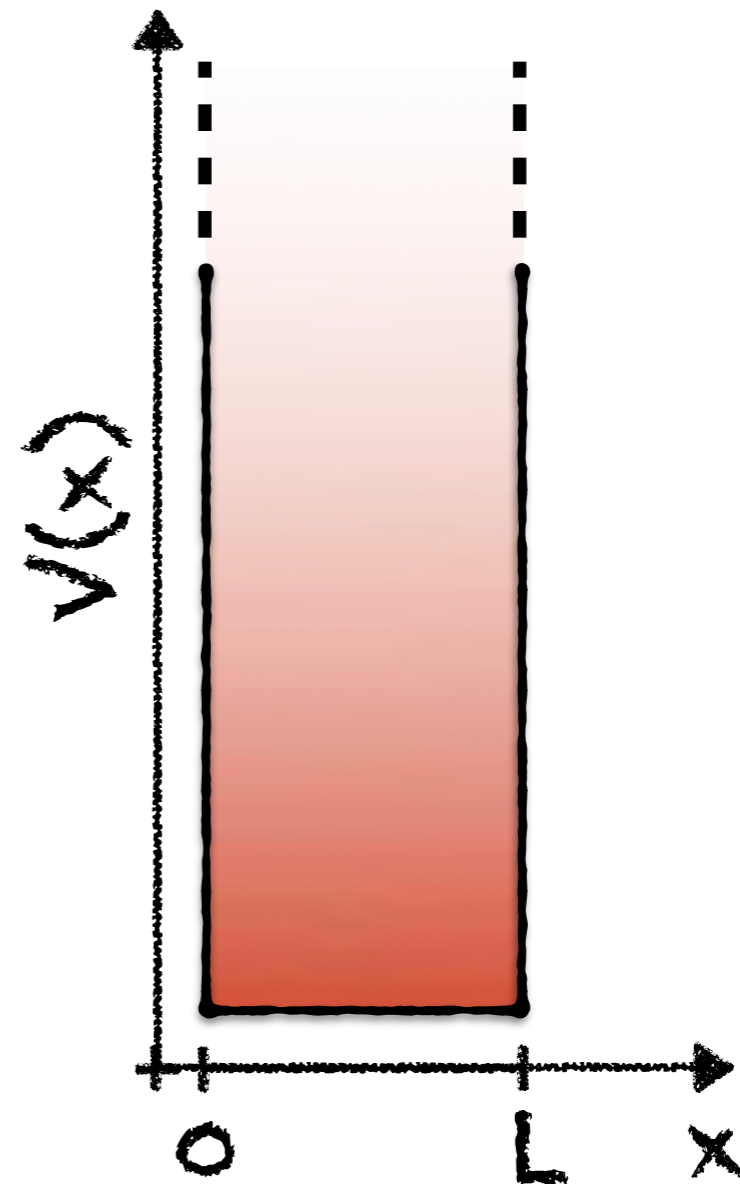
III. Applicazioni:

- I quantum dot come “**atomi artificiali**”: emissione di luce “**non classica**”;
- Interessi **applicativi**: realizzazione di **laser**, **LED**, schermi **TV**...

La buca di potenziale:

- **Barriera infinita, 1 dimensione:**

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



La buca di potenziale:

- **Barriera infinita, 1 dimensione:**
- Una **particella** che si trovi nella **buca** è vincolata a rimanervi, per cui il **principio di indeterminazione**

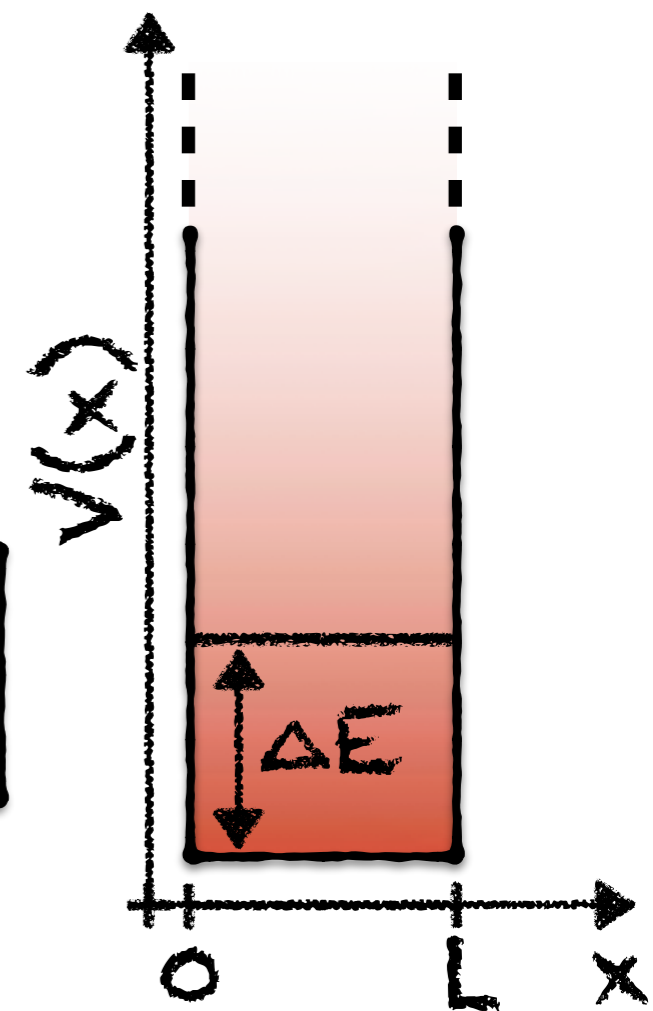
$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

impone un **limite inferiore** sul suo **momento** (e quindi sulla sua **energia cinetica**):

$$\Delta p \cdot L \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Rightarrow \quad \Delta p \geq \frac{\hbar}{2 \cdot L} \quad \Rightarrow \quad \Delta E \geq \frac{\hbar^2}{2m \cdot L^2}$$

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

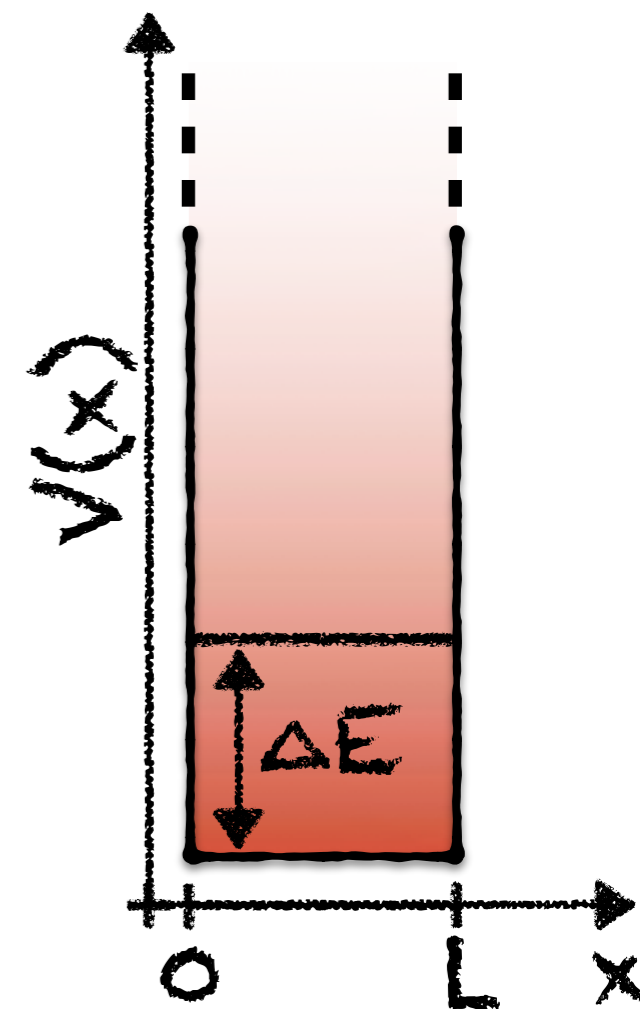


La buca di potenziale:

- **Barriera infinita, 1 dimensione:**
- Una **particella** che si trovi nella **buca** è vincolata a rimanervi, per cui il **principio di indeterminazione**

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Rightarrow \quad \Delta E \geq \frac{\hbar^2}{2m \cdot L^2}$$



La buca di potenziale:

- **Barriera infinita, 1 dimensione:**
- Una **particella** che si trovi nella **buca** è vincolata a rimanervi, per cui il **principio di indeterminazione**

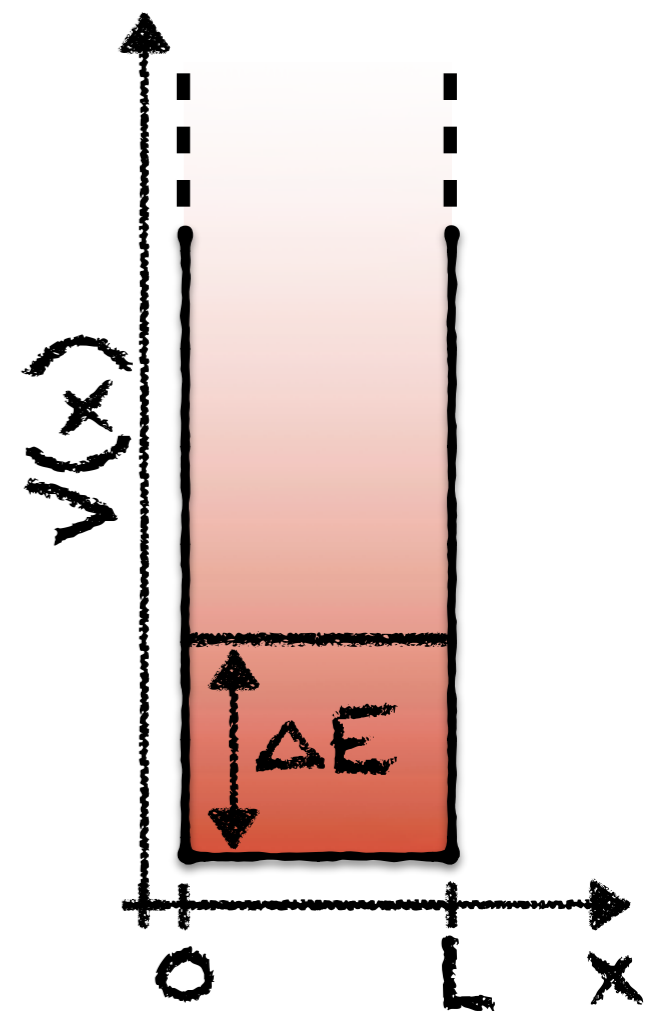
$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Rightarrow \quad \Delta E \geq \frac{\hbar^2}{2m \cdot L^2}$$

- In effetti, un calcolo rigoroso dei **livelli di energia** del sistema porta ad ottenere

$$E_n = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m \cdot L^2}$$

il che, per quanto riguarda lo **stato fondamentale**, ($n=1$) è in buon accordo qualitativo con quanto visto sopra.



La buca di potenziale:

- **Barriera infinita, 1 dimensione:**
- Una **particella** che si trovi nella **buca** è vincolata a rimanervi, per cui il **principio di indeterminazione**

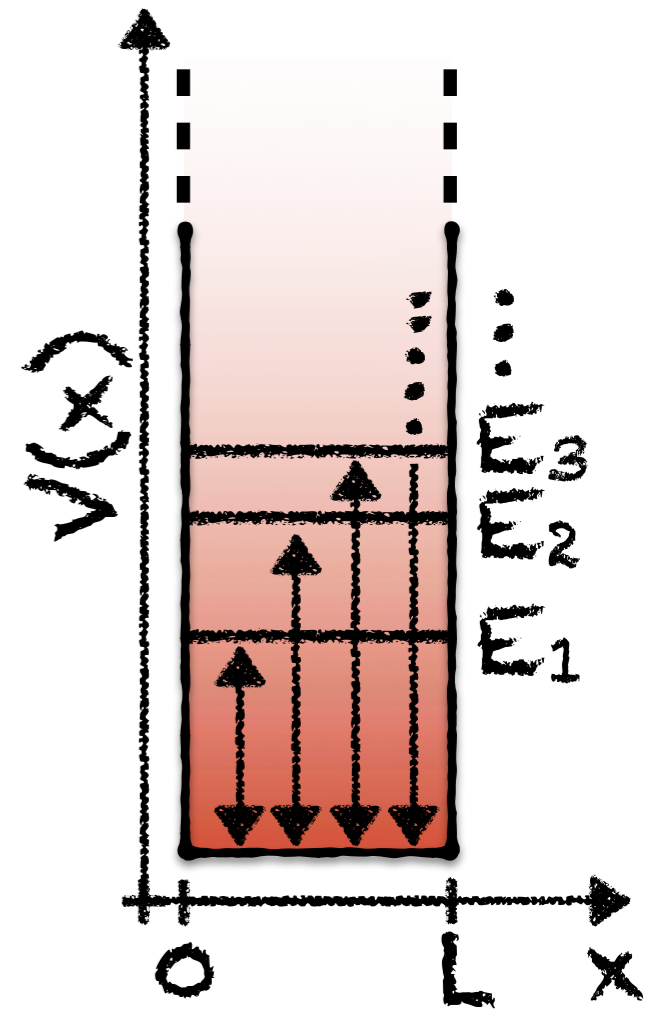
$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Rightarrow \quad \Delta E \geq \frac{\hbar^2}{2m \cdot L^2}$$

- In effetti, un calcolo rigoroso dei **livelli di energia** del sistema porta ad ottenere

$$E_n = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m \cdot L^2}$$

il che, per quanto riguarda lo **stato fondamentale**, ($n=1$) è in buon accordo qualitativo con quanto visto sopra.



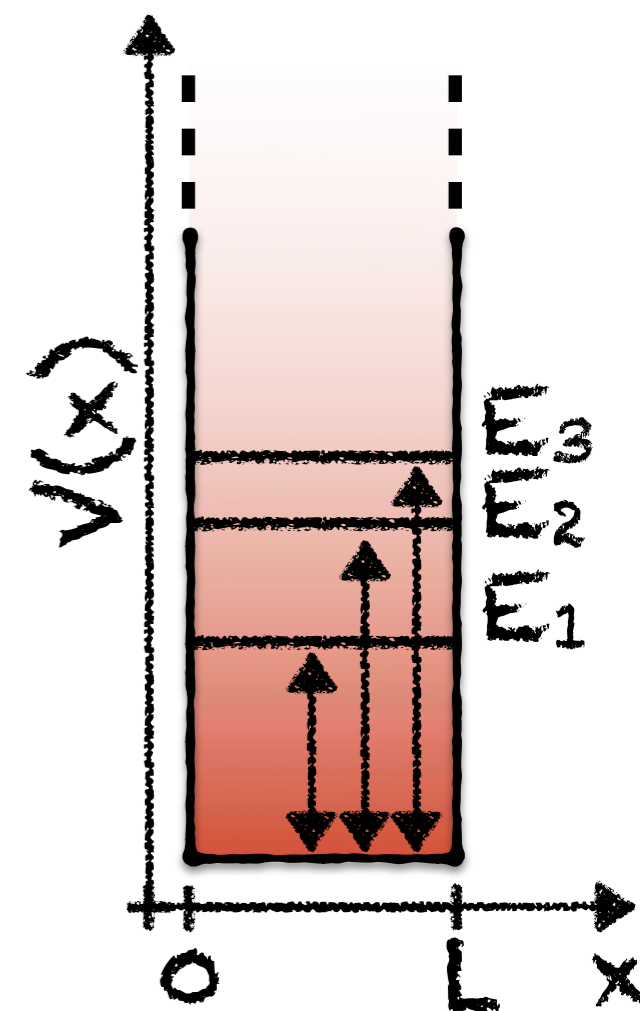
La buca di potenziale:

- **Barriera infinita, 1 dimensione:**
- In effetti, un calcolo rigoroso dei **livelli di energia** del sistema porta ad ottenere

$$E_n = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m \cdot L^2}$$

- Dunque il **confinamento** porta alla formazione di **infiniti livelli discreti**, la cui **energia** dipende dalle **dimensioni** (L) della buca di potenziale.

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



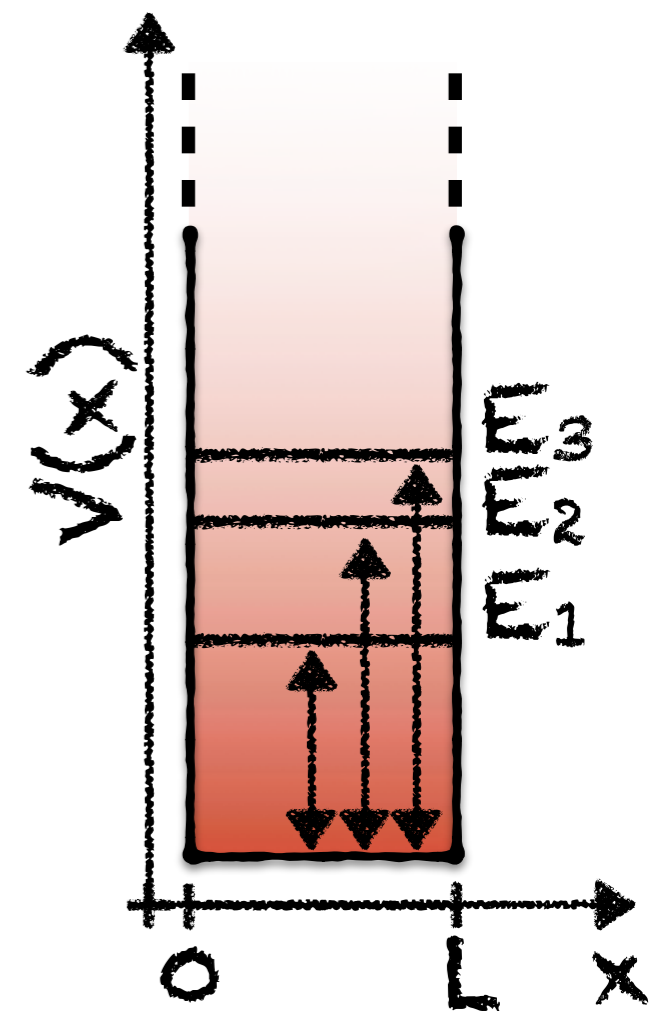
La buca di potenziale:

- **Barriera infinita, 1 dimensione:**
- In effetti, un calcolo rigoroso dei **livelli di energia** del sistema porta ad ottenere

$$E_n = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m \cdot L^2}$$

- Dunque il **confinamento** porta alla formazione di **infiniti livelli discreti**, la cui **energia** dipende dalle **dimensioni** (L) della buca di potenziale.
- Naturalmente, sistemi di questo tipo possono essere facilmente definiti in **due** o **più dimensioni**.

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



La buca di potenziale:

- **Barriera infinita, 1 dimensione:**

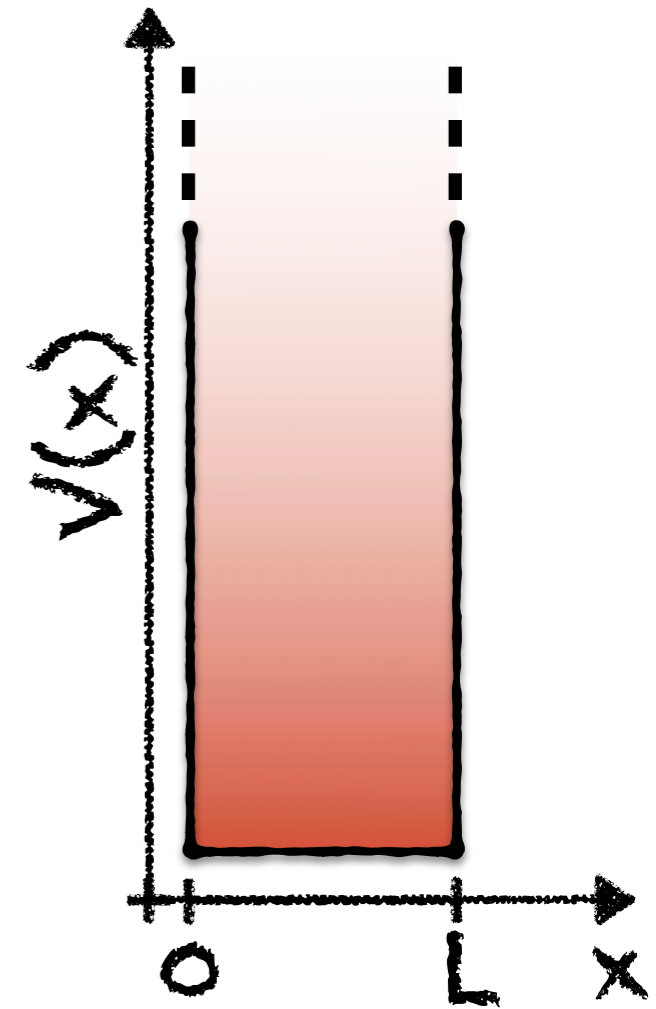
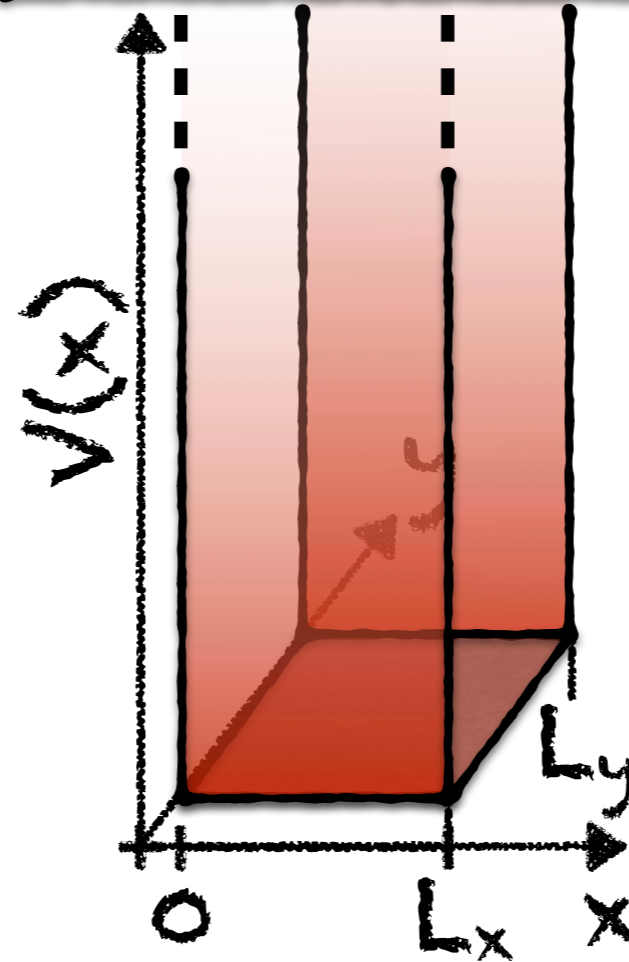
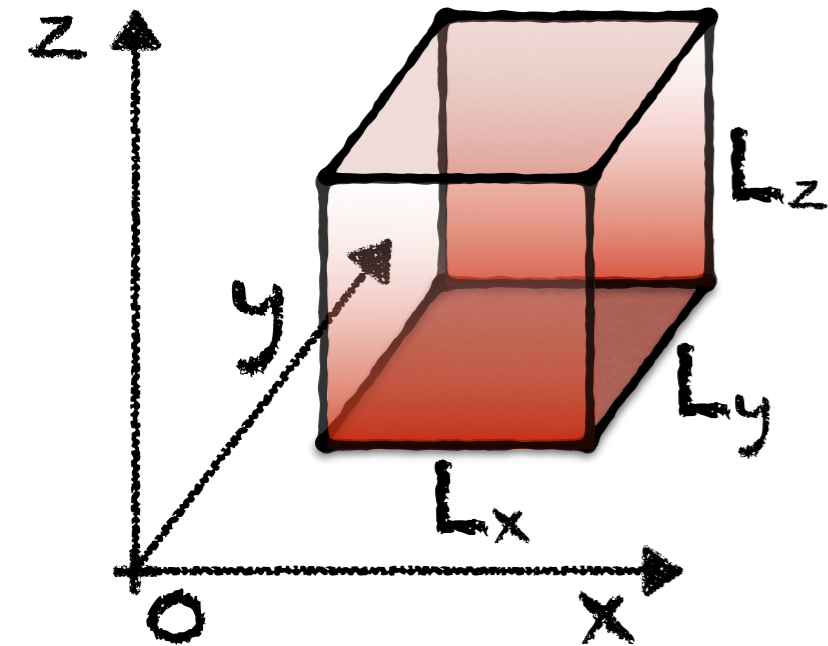
- **2 dimensioni:**

- **3 dimensioni:**

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x \leq L_x, \\ 0 & \text{per } 0 \leq y \leq L_y, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

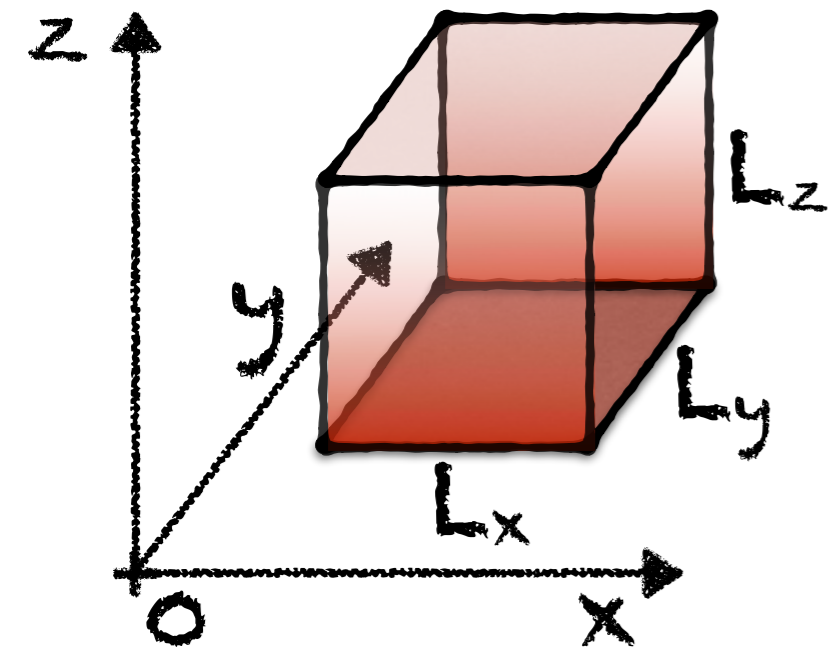
$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x_i \leq L_i, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



La buca di potenziale:

- **Barriera infinita,**
3 dimensioni:

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \leq x_i \leq L_i, \\ \infty & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



- In questo caso, l'**energia** dei **livelli** diviene

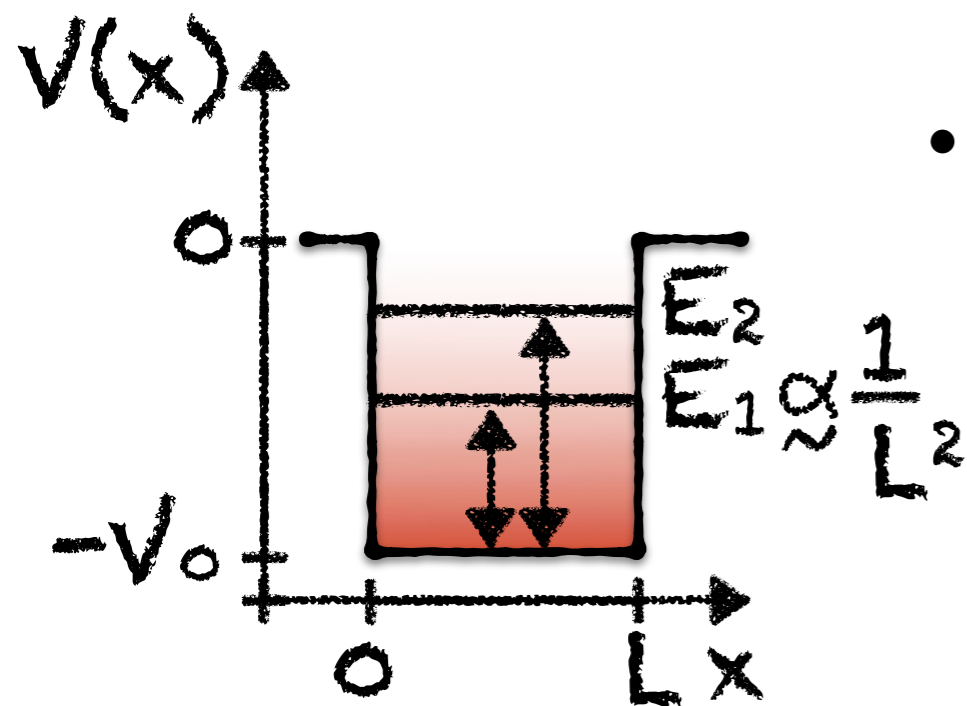
$$E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \cdot \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right)$$

- **Primo esempio** di sistema **confinato** in **tre dimensioni**;
- Risolvibile **analiticamente**, riproduce alcune delle proprietà **osservabili** negli **esperimenti**;
- Naturalmente, la presenza di **barriere infinite** è **irrealistica**.

La buca di potenziale:

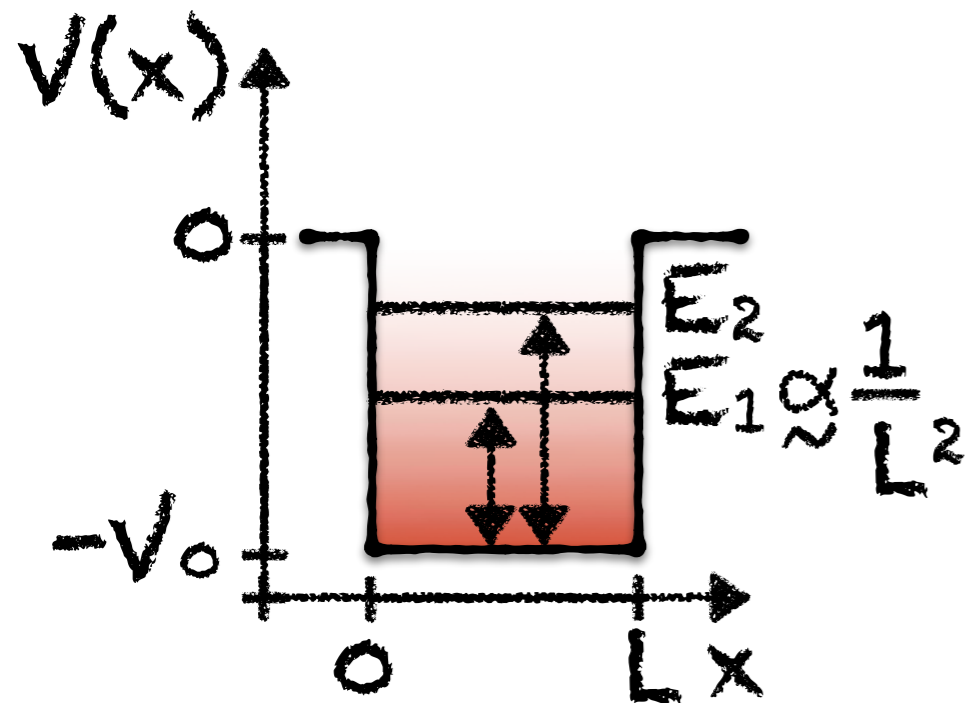
- **Barriera finita (1 dimensione)**

$$V(x) = \begin{cases} -V_0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ 0 & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



- In questo caso, l'**energia** dei **livelli** non è ottenibile **analiticamente**, anche nel semplice caso unidimensionale;
- In **tre dimensioni**, e per sistemi più **complessi** e **realistici**, diviene fondamentale l'uso di **metodi numerici**.
- **Proprietà generali nei sistemi confinati con barriere finite:**
 - Il **numero** di stati **confinati nella buca** diventa (anch'esso) **finito**;
 - Persiste una forte **dipendenza** dell'**energia di confinamento** dalle **dimensioni** della buca.

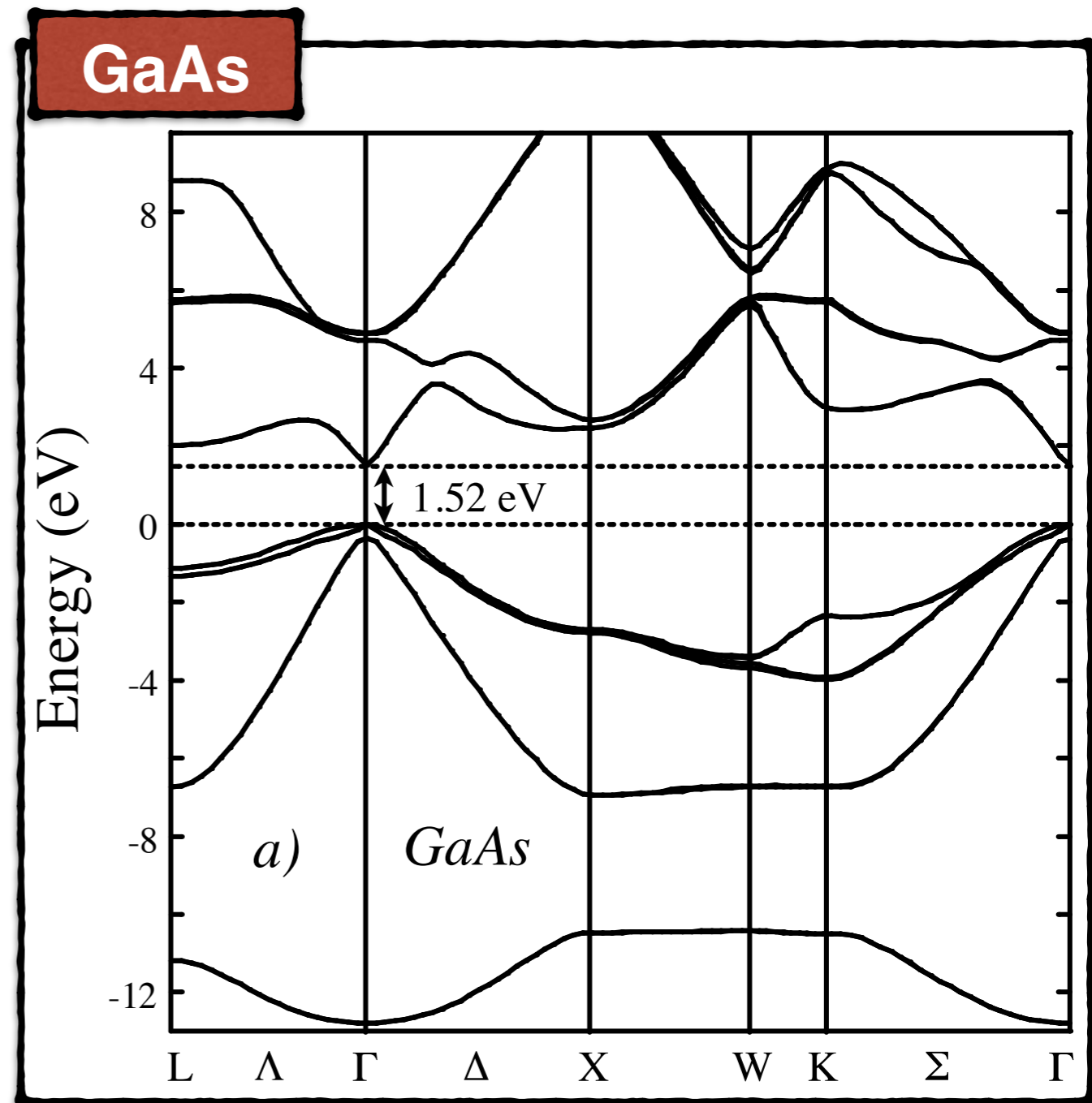
$$V(x) = \begin{cases} -V_0 & \text{per } 0 \leq x \leq L, \\ 0 & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



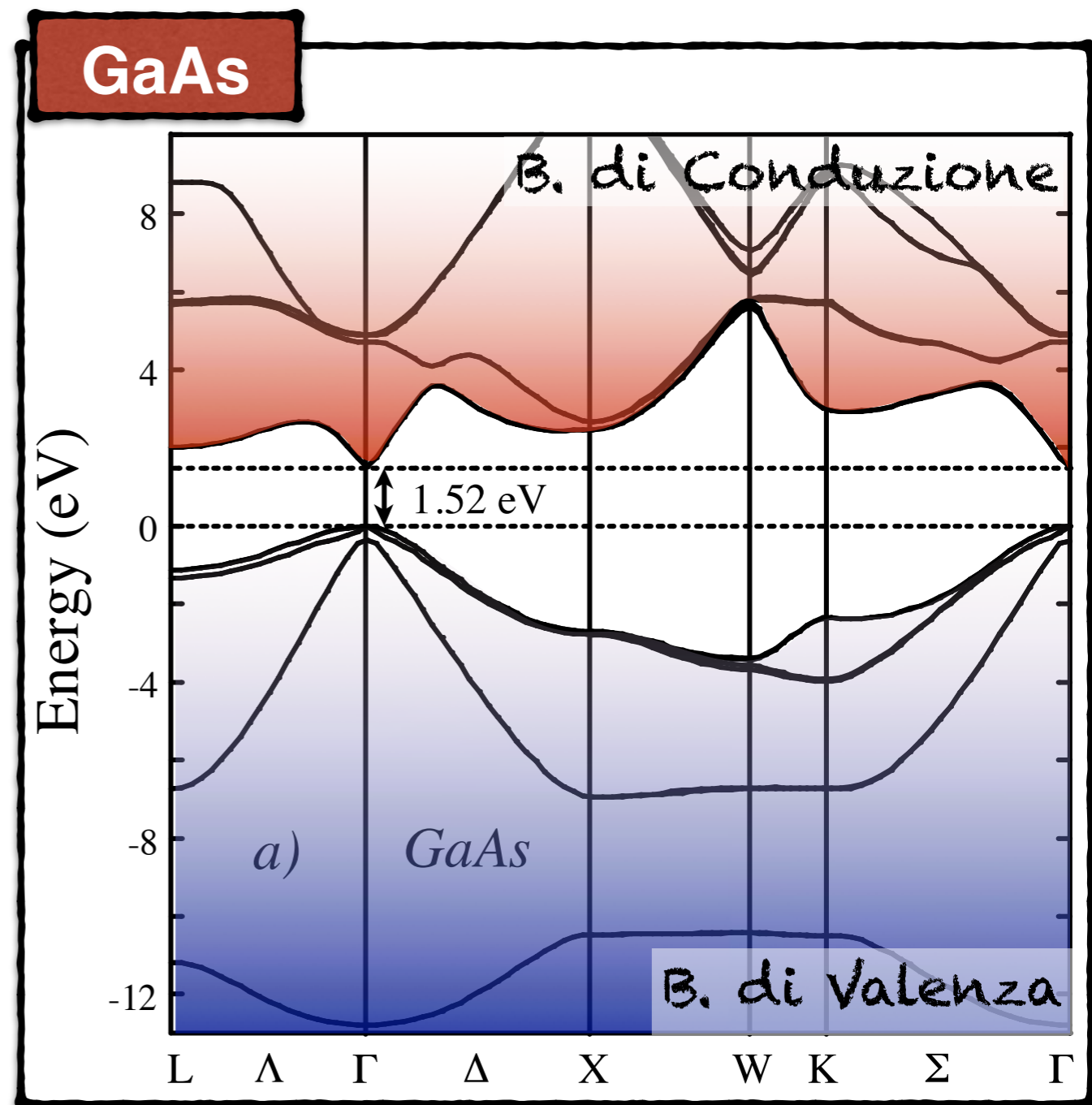
- **Proprietà generali nei sistemi confinati con barriere finite:**
 - Il **numero** di stati **confinati nella buca** diventa (anch'esso) **finito**;
 - Persiste una forte **dipendenza** dell'**energia di confinamento** dalle **dimensioni** della buca.

Quali sono i metodi per la realizzazione pratica di sistemi confinati?

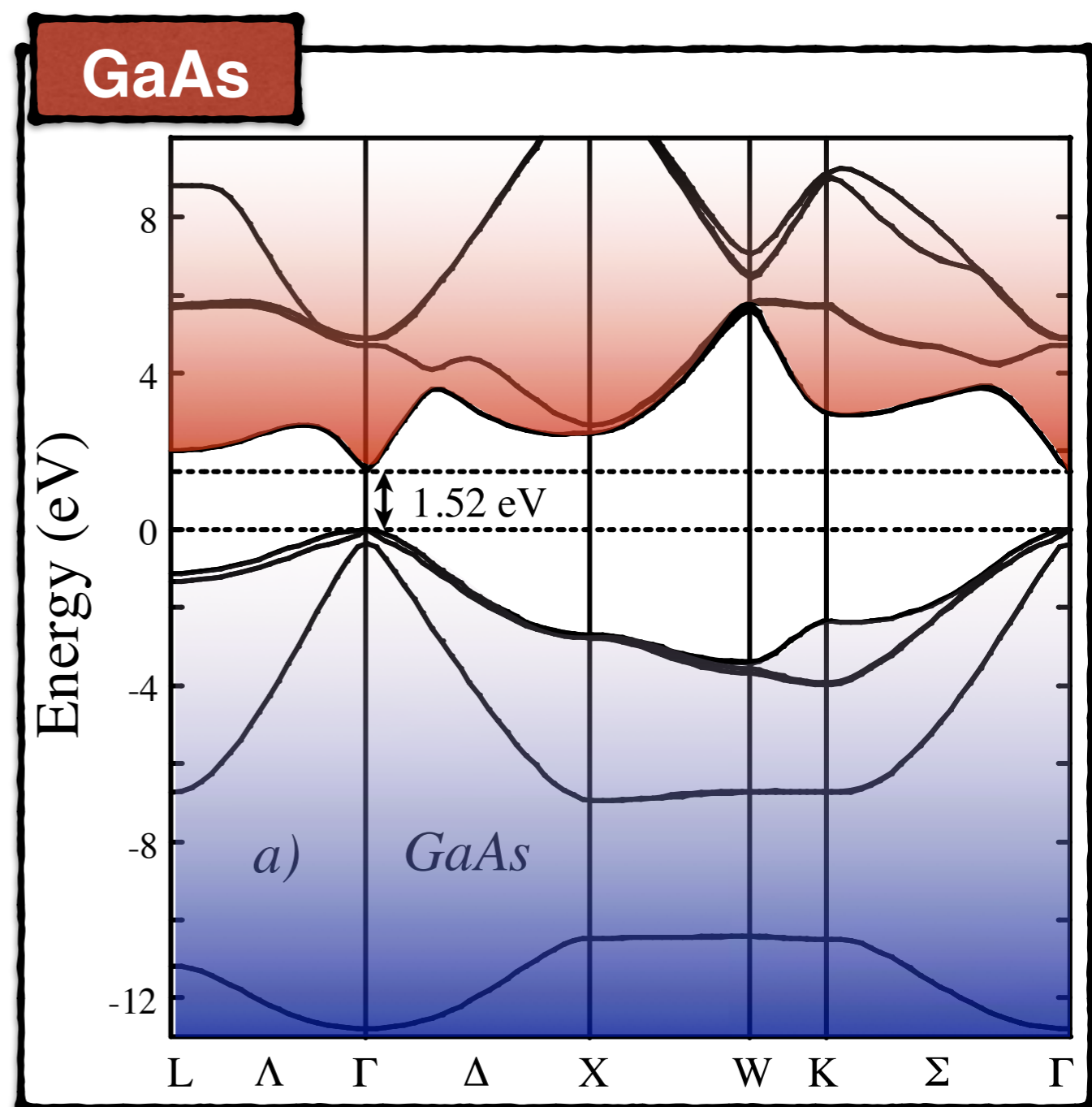
- I **semiconduttori** sono **solidi** (in genere) **cristallini**, che si distinguono per la presenza di una **gap** proibita, tipicamente della larghezza di **1-2 eV**, tra **massimo** della banda di **valenza (VBM)** e **minimo** della banda di **conduzione (CBM)**.



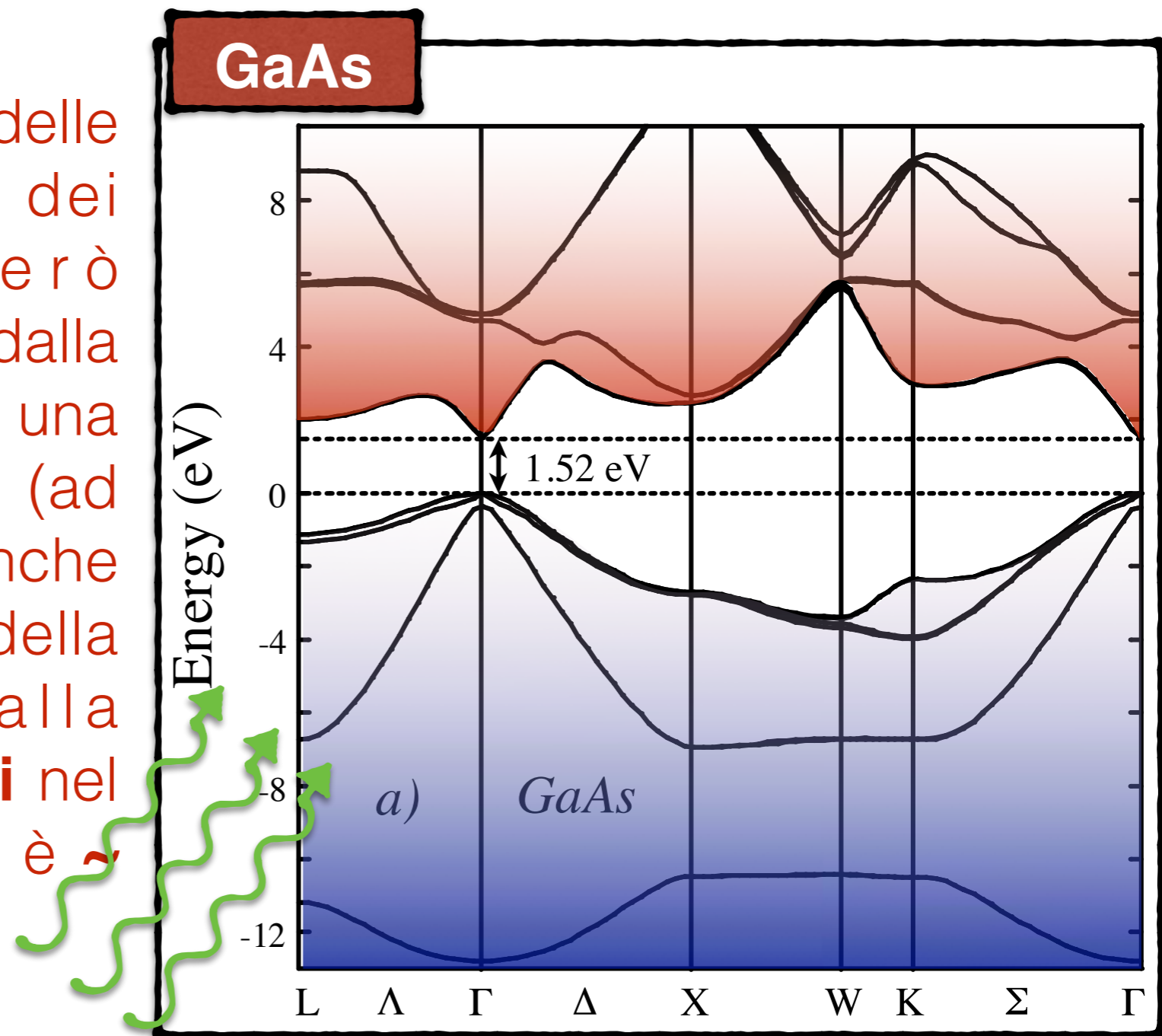
- I **semiconduttori** sono **solidi** (in genere) **cristallini**, che si distinguono per la presenza di una **gap** proibita, tipicamente della larghezza di **1-2 eV**, tra **massimo** della banda di **valenza (VBM)** e **minimo** della banda di **conduzione (CBM)**.
- A **$T=0K$** , la banda di **valenza (conduzione)** è completamente **piena (priva)** di **elettroni**.
- Ciò che distingue i **semiconduttori** dagli **isolanti** (più del criterio "storico" basato **sull'ampiezza** della **gap**) è innanzitutto la possibilità di "**drogare**" il materiale, ovvero di modificarne le **proprietà di trasporto** attraverso l'incorporazione di **impurezze (donori e accettori)** attive **eletttricamente**.



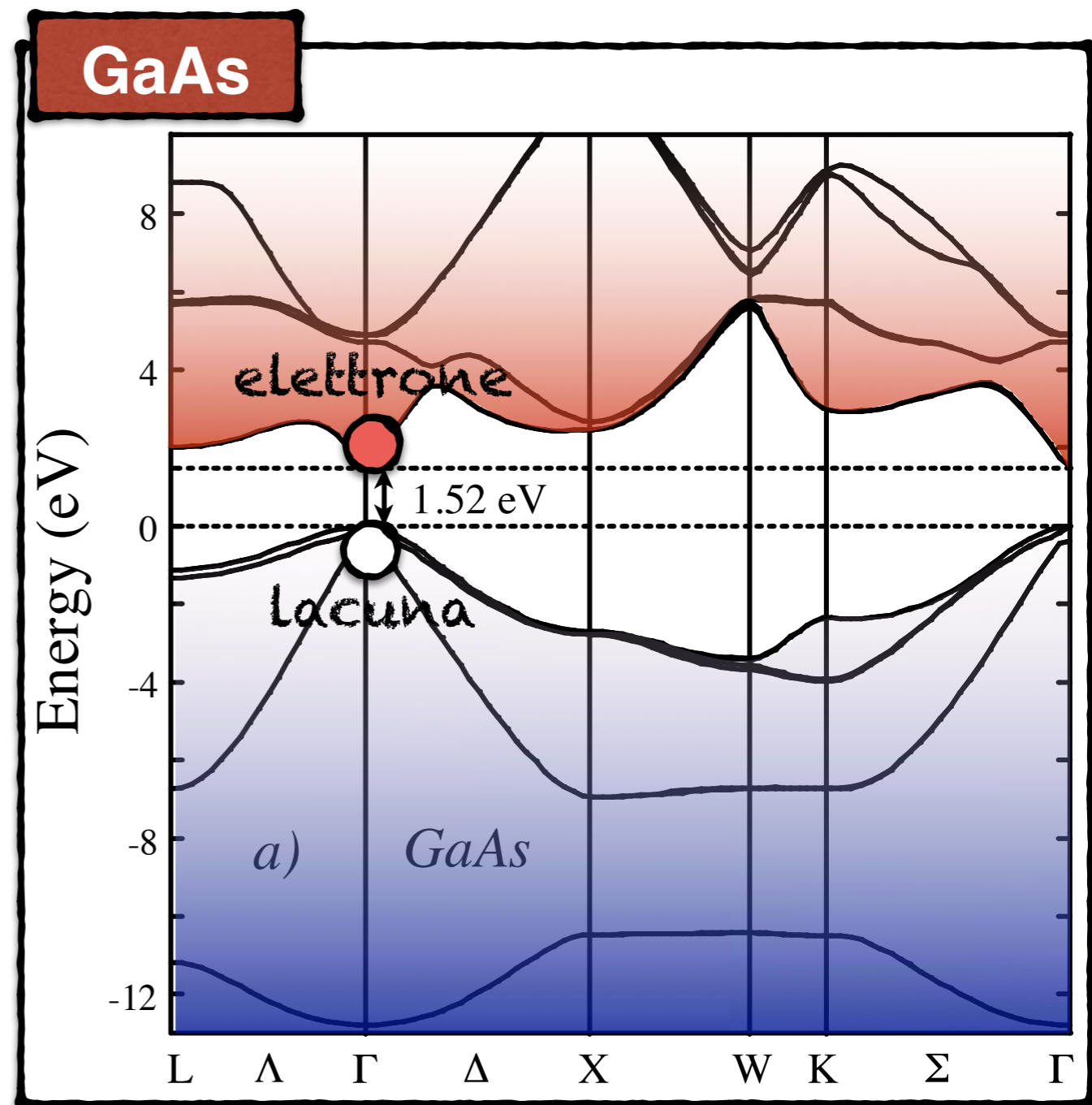
- I **semiconduttori** sono **solidi** (in genere) **cristallini**, che si distinguono per la presenza di una **gap** proibita, tipicamente della larghezza di **1-2 eV**, tra **massimo** della banda di **valenza (VBM)** e **minimo** della banda di **conduzione (CBM)**.
- Per quanto discusso qui, una delle proprietà più interessanti dei **semiconduttori** è però probabilmente rappresentata dalla loro capacità di **emettere luce** una volta **eccitati** opportunamente (ad esempio con un **laser**, o anche **elettricamente**). L'**energia** della **luce emessa**, dovuta alla **ricombinazione** degli **elettroni** nel **CBM** con le **lacune** nel **VBM**, è **~ pari all'energia di gap**.



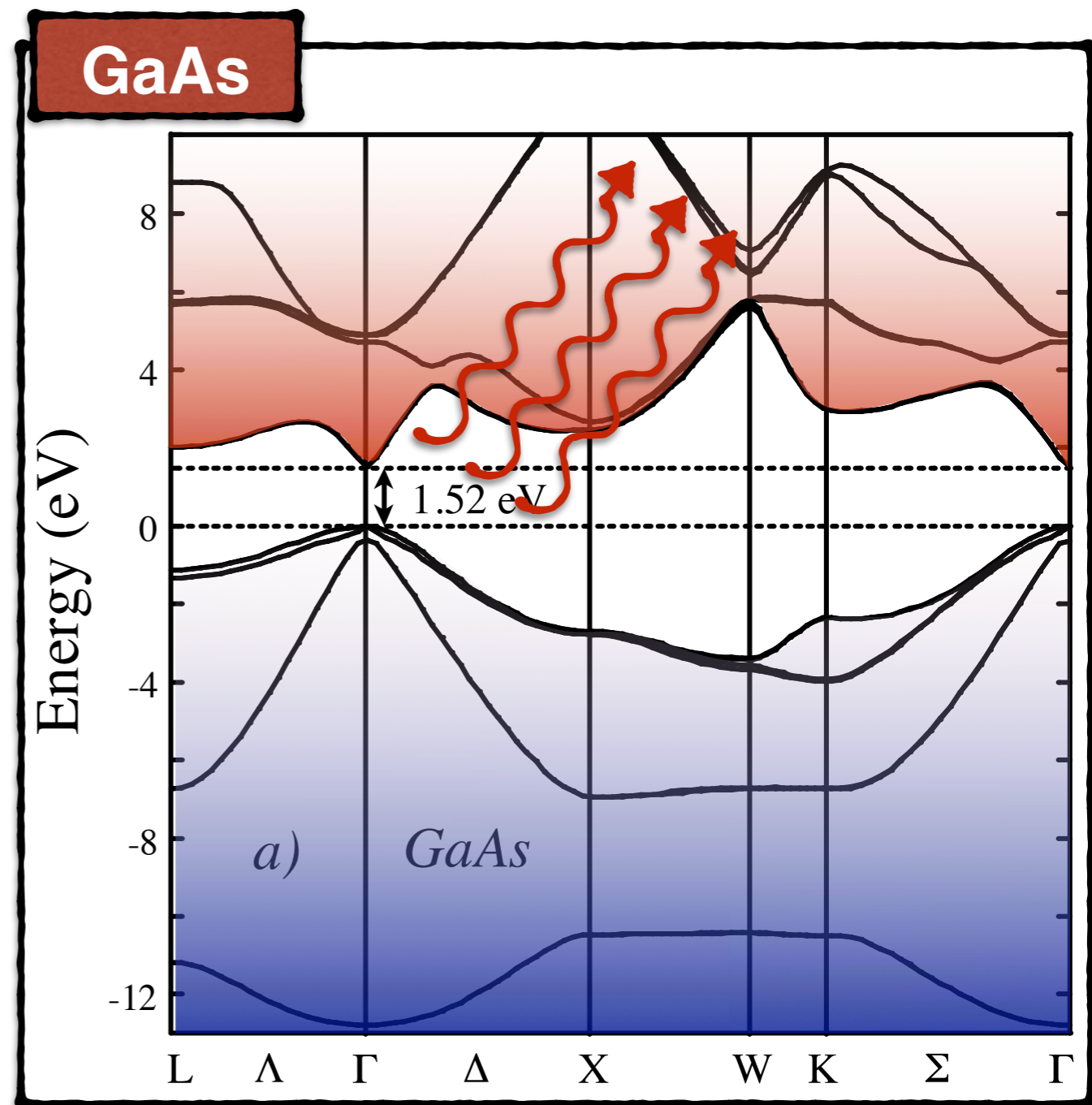
- I **semiconduttori** sono **solidi** (in genere) **cristallini**, che si distinguono per la presenza di una **gap** proibita, tipicamente della larghezza di **1-2 eV**, tra **massimo** della banda di **valenza (VBM)** e **minimo** della banda di **conduzione (CBM)**.
- Per quanto discusso qui, una delle proprietà più interessanti dei **semiconduttori** è però probabilmente rappresentata dalla loro capacità di **emettere luce** una volta **eccitati** opportunamente (ad esempio con un **laser**, o anche **elettricamente**). L'**energia** della **luce emessa**, dovuta alla **ricombinazione** degli **elettroni** nel **CBM** con le **lacune** nel **VBM**, è **pari all'energia di gap**.



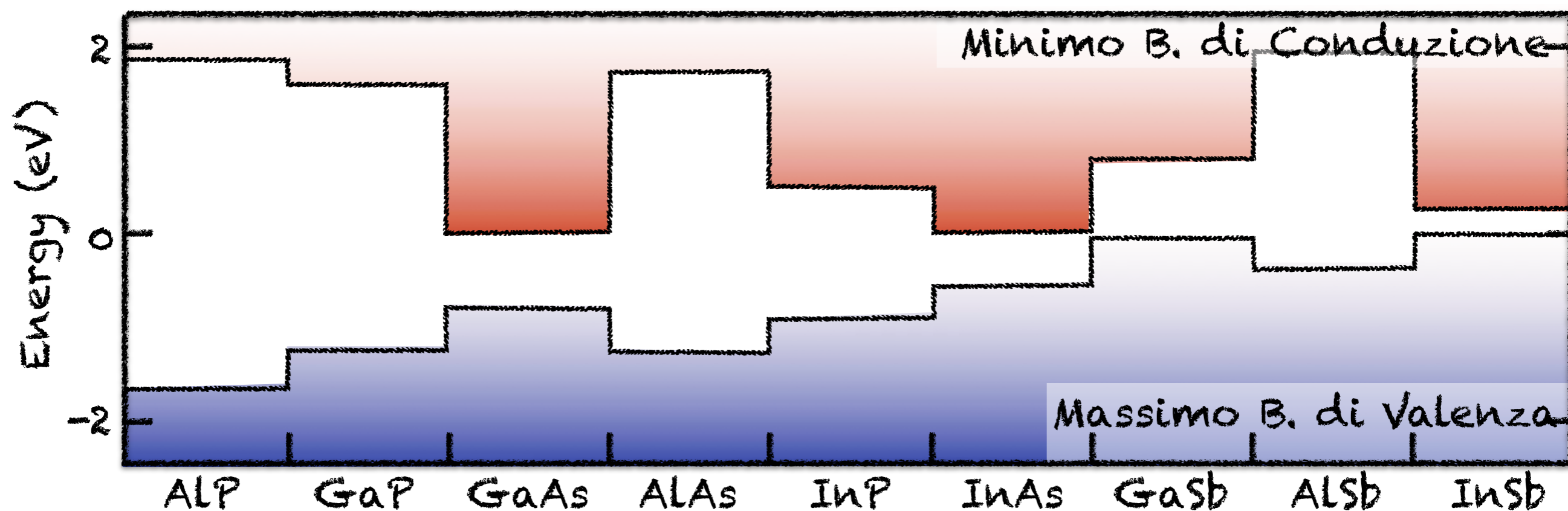
- I **semiconduttori** sono **solidi** (in genere) **cristallini**, che si distinguono per la presenza di una **gap** proibita, tipicamente della larghezza di **1-2 eV**, tra **massimo** della banda di **valenza (VBM)** e **minimo** della banda di **conduzione (CBM)**.
- Per quanto discusso qui, una delle proprietà più interessanti dei **semiconduttori** è però probabilmente rappresentata dalla loro capacità di **emettere luce** una volta **eccitati** opportunamente (ad esempio con un **laser**, o anche **elettricamente**). L'**energia** della **luce emessa**, dovuta alla **ricombinazione** degli **elettroni** nel **CBM** con le **lacune** nel **VBM**, è **~ pari all'energia di gap**.



- I **semiconduttori** sono **solidi** (in genere) **cristallini**, che si distinguono per la presenza di una **gap** proibita, tipicamente della larghezza di **1-2 eV**, tra **massimo** della banda di **valenza (VBM)** e **minimo** della banda di **conduzione (CBM)**.
- Per quanto discusso qui, una delle proprietà più interessanti dei **semiconduttori** è però probabilmente rappresentata dalla loro capacità di **emettere luce** una volta **eccitati** opportunamente (ad esempio con un **laser**, o anche **elettricamente**). L'**energia della luce emessa**, dovuta alla **ricombinazione** degli **elettroni** nel **CBM** con le **lacune** nel **VBM**, è **~ pari all'energia di gap**.



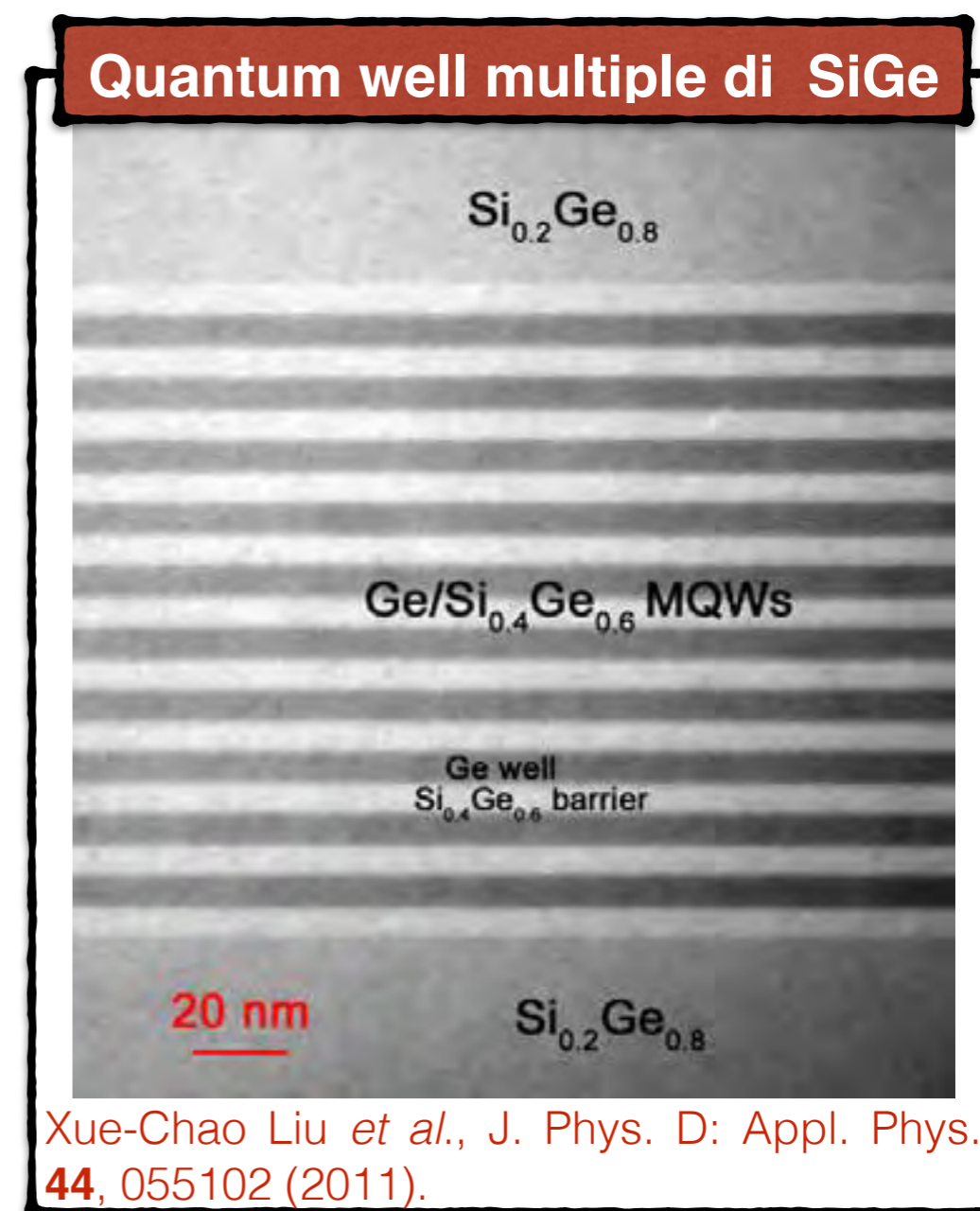
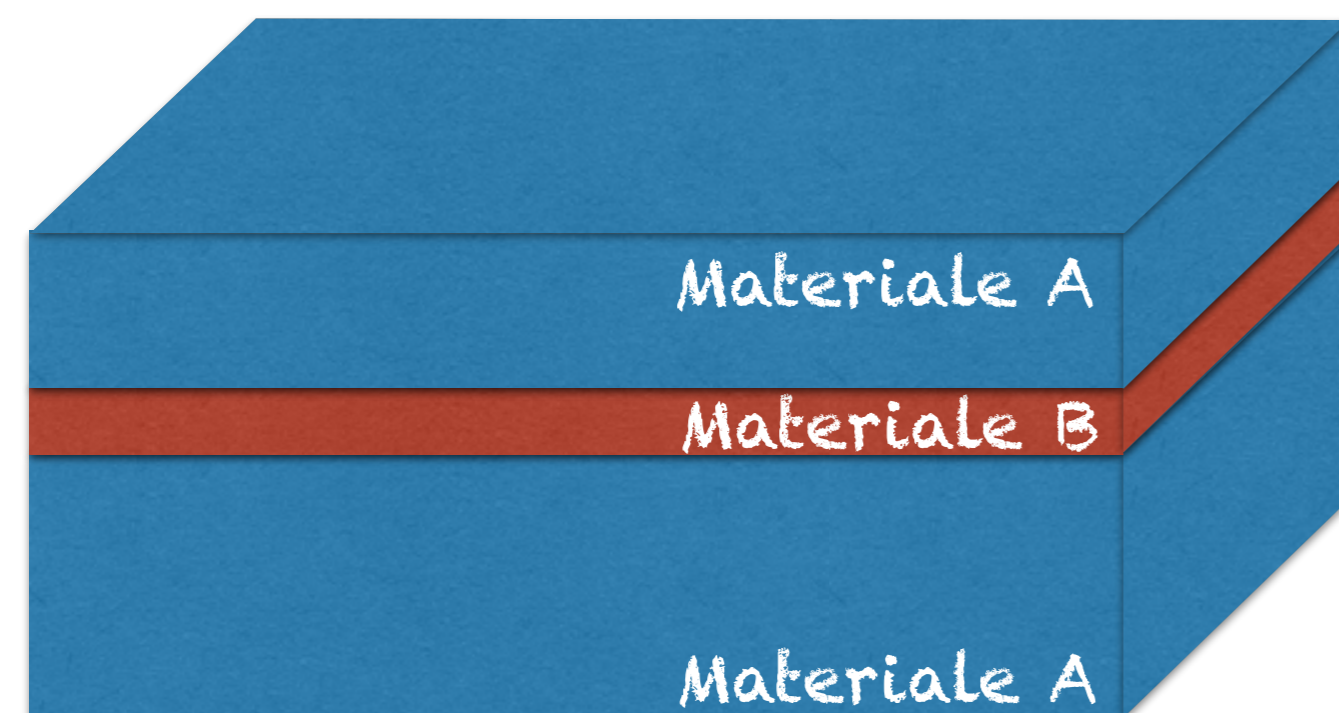
- I **semiconduttori** sono **solidi** (in genere) **cristallini**, che si distinguono per la presenza di una **gap** proibita, tipicamente della larghezza di **1-2 eV**, tra **massimo** della banda di **valenza (VBM)** e **minimo** della banda di **conduzione (CBM)**.
- È interessante notare che **CBM** e **VBM** dei **vari composti semiconduttori** sono caratterizzati da un ben preciso **allineamento** su una scala di **energia assoluta**.

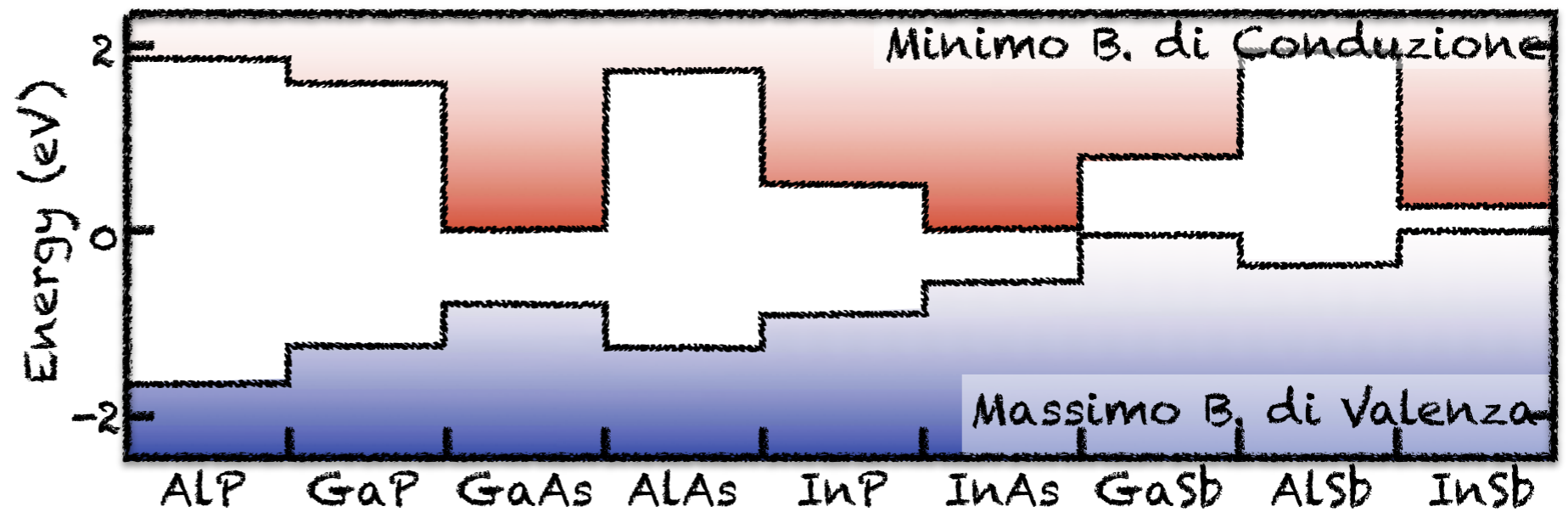
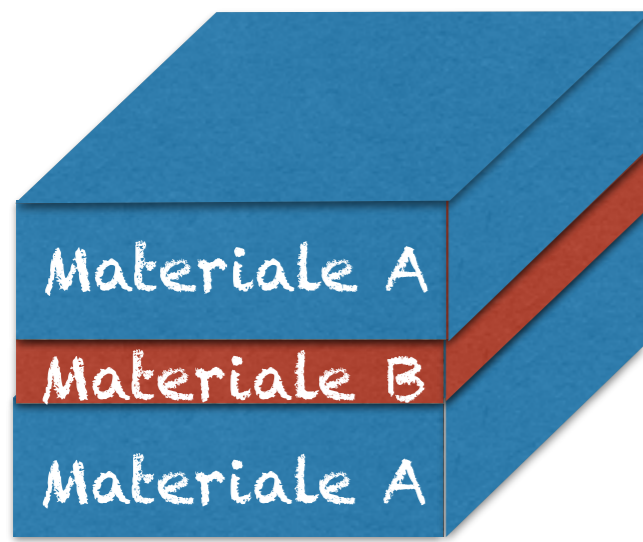


- Grazie alle moderne tecniche di **crescita epitassiale** (**Molecular Beam Epitaxy, MBE**, o **MetalOrganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD**), è possibile crescere uno sull'altro **film sottili** di semiconduttori di **diversa composizione chimica**, con la **precisione** di un **singolo monolayer** (*i.e.*, pochi Å).

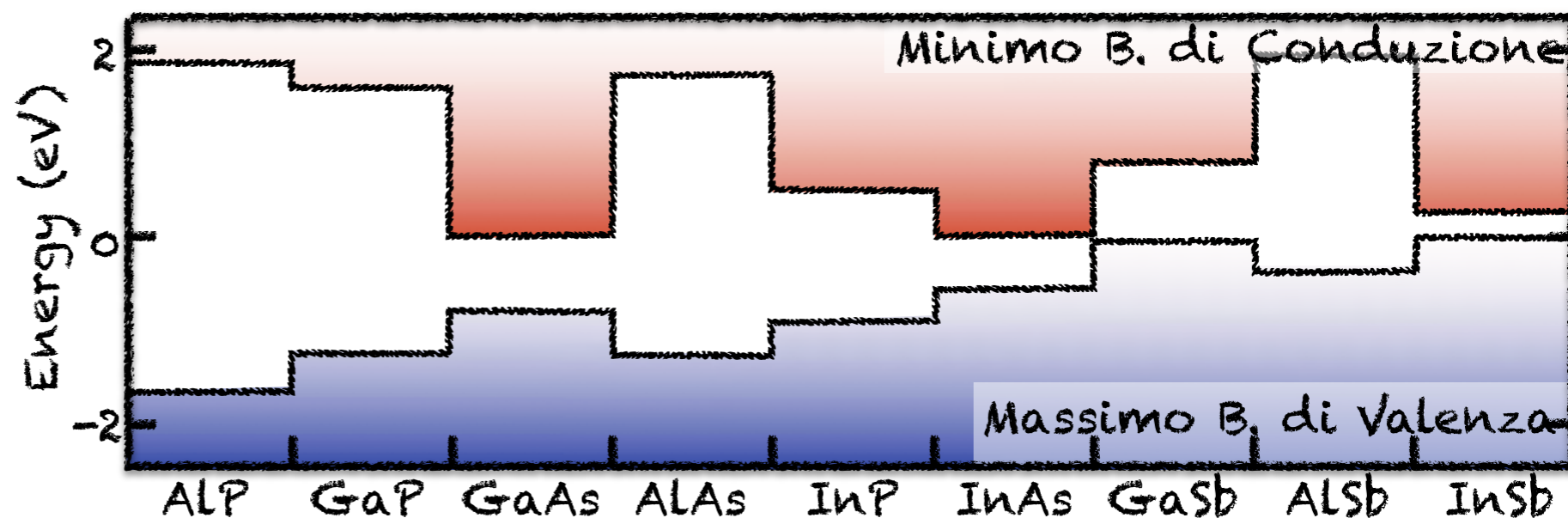
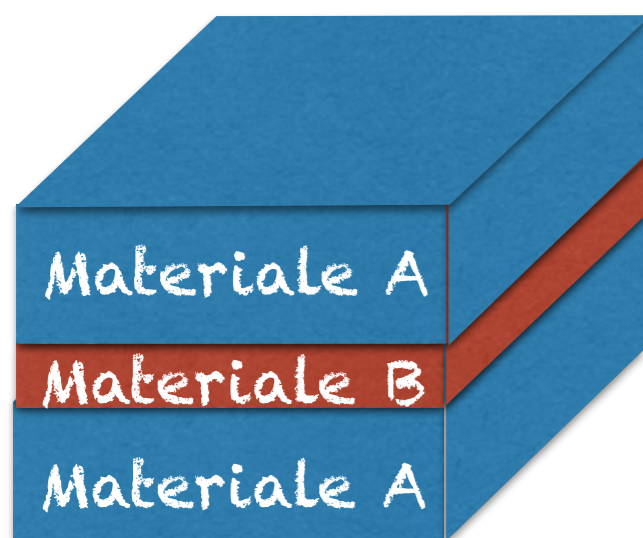


- Grazie alle moderne tecniche di **crescita epitassiale** (**Molecular Beam Epitaxy, MBE**, o **MetalOrganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD**), è possibile crescere uno sull'altro **film sottili** di semiconduttori di **diversa composizione chimica**, con la **precisione** di un **singolo monolayer** (*i.e.*, **pochi Å**).



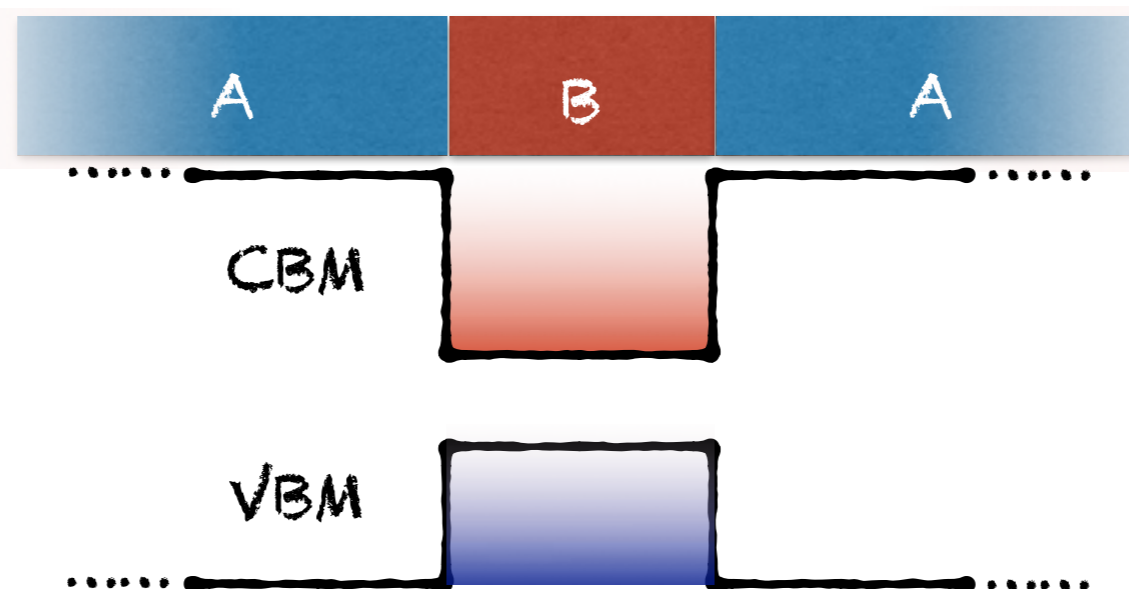


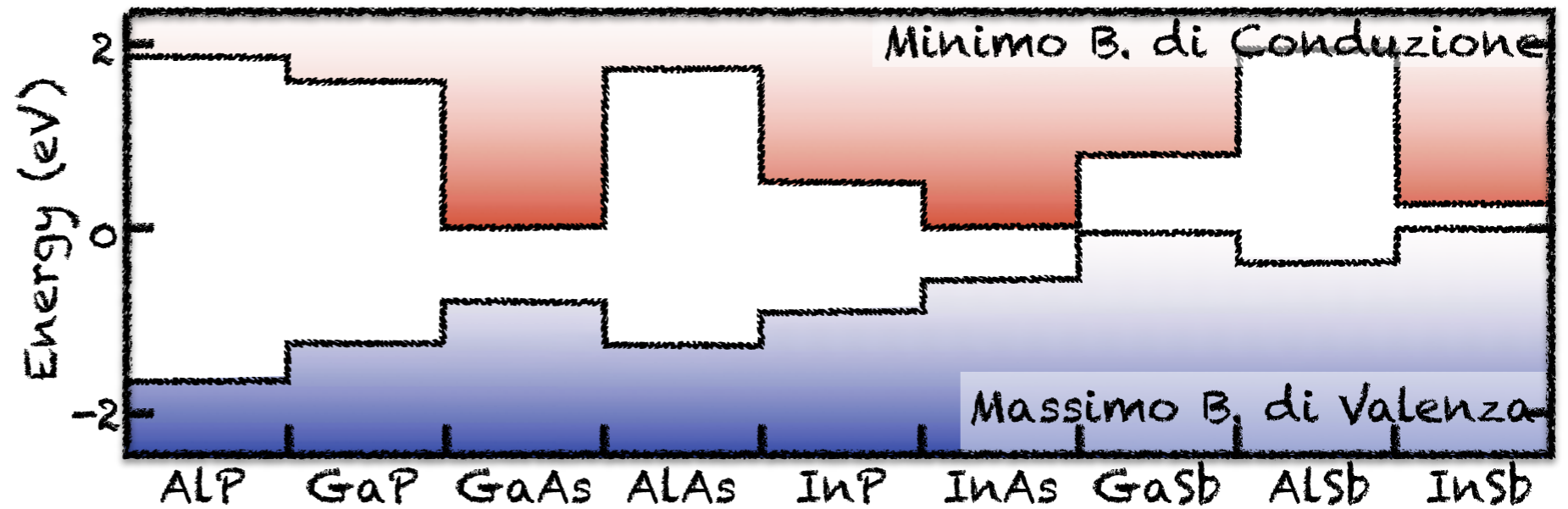
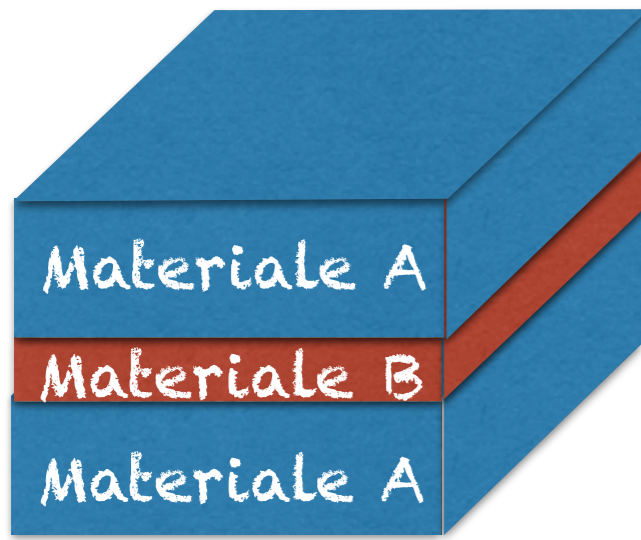
- Sfruttando il **disallineamento** tra **CBM** e **VBM** dei diversi **semiconduttori** e le **tecniche di crescita epitassiali**, è possibile costruire **eterostrutture** in cui ad un layer di dimensioni **nanometriche** corrisponda di un **minimo di potenziale** sia per gli **elettroni** che per le **lacune**.



- Sfruttando il **disallineamento** tra **CBM** e **VBM** dei diversi **semiconduttori** e le **tecniche di crescita epitassiali**, è possibile costruire **eterostrutture** in cui ad un layer di dimensioni **nanometriche** corrisponda di un **minimo di potenziale** sia per gli **elettroni** che per le **lacune**.

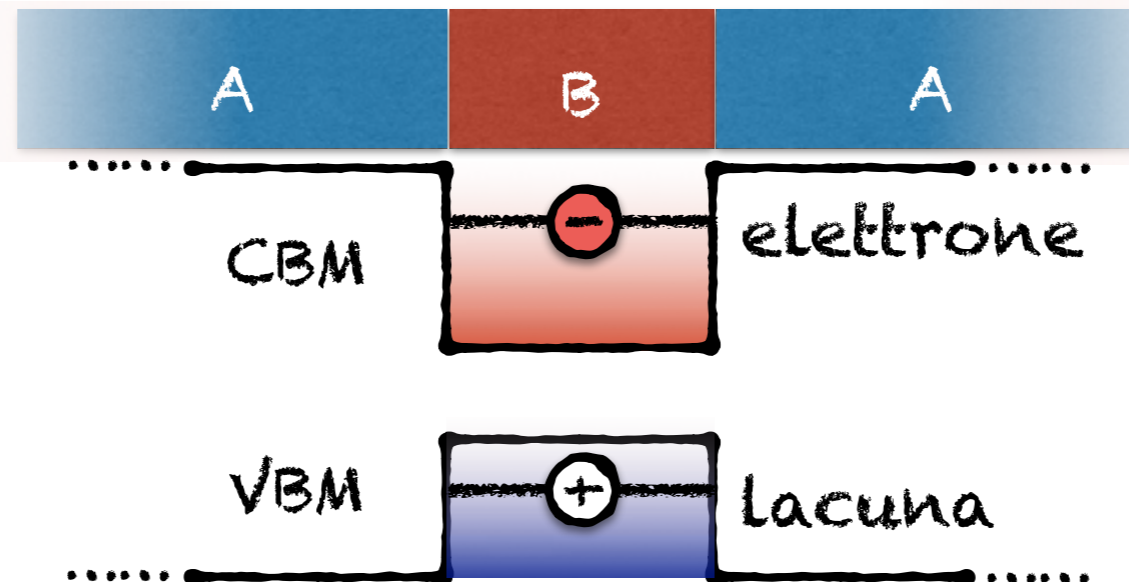
Es.: A=GaAs
B=InGaAs

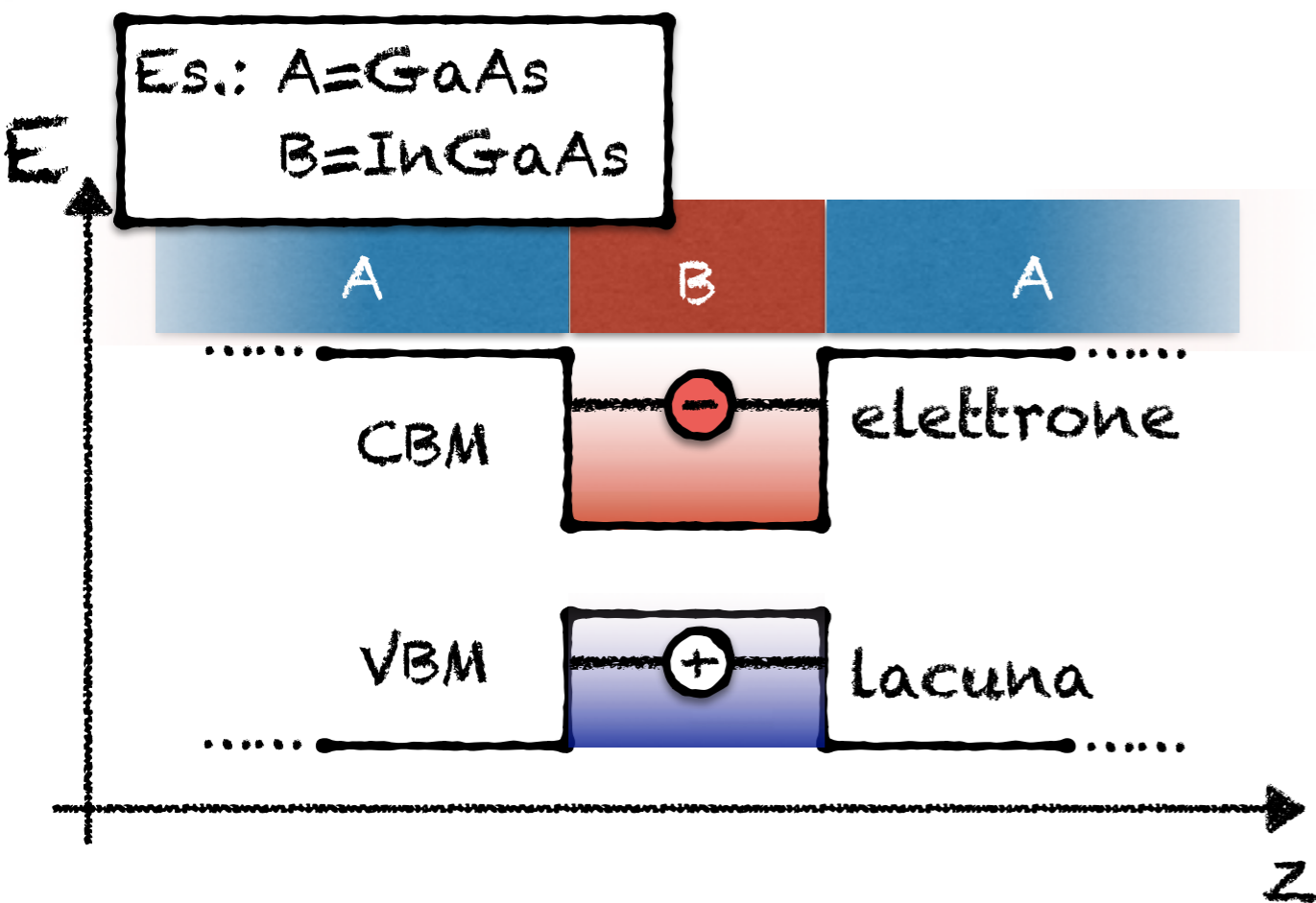




- Sfruttando il **disallineamento** tra **CBM** e **VBM** dei diversi **semiconduttori** e le **tecniche di crescita epitassiali**, è possibile costruire **eterostrutture** in cui ad un layer di dimensioni **nanometriche** corrisponda di un **minimo di potenziale** sia per gli **elettroni** che per le **lacune**.

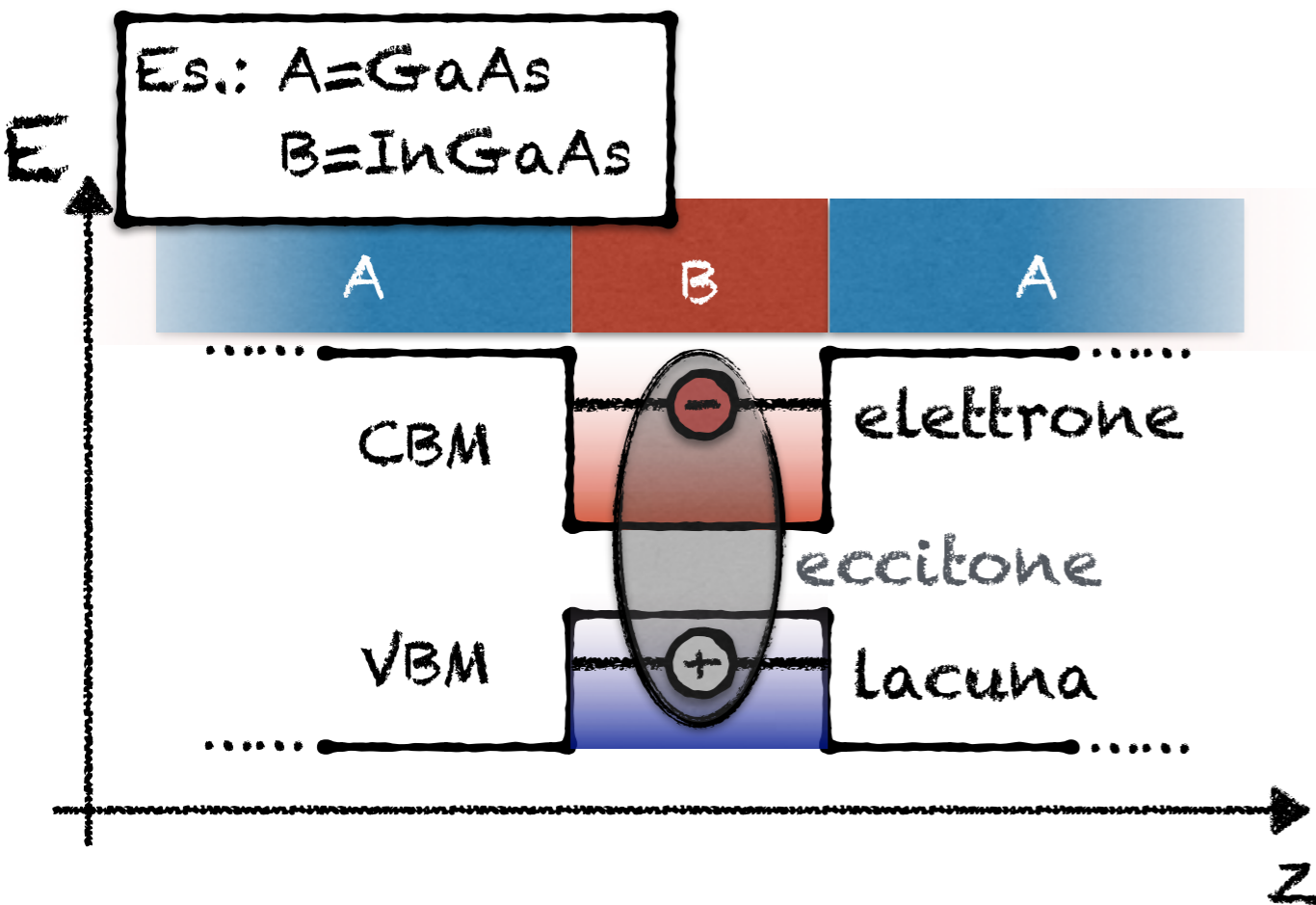
Es.: A=GaAs
B=InGaAs





Quantum well

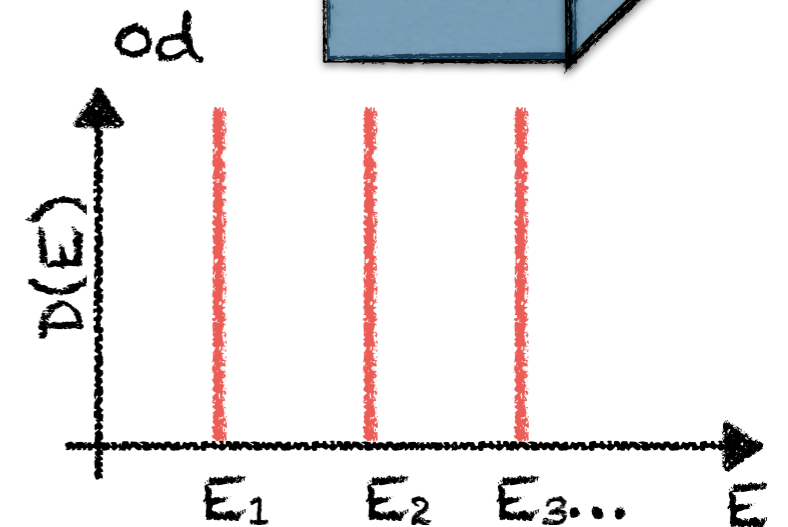
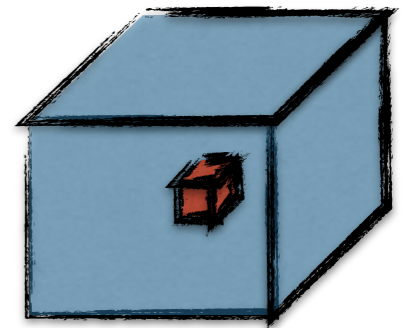
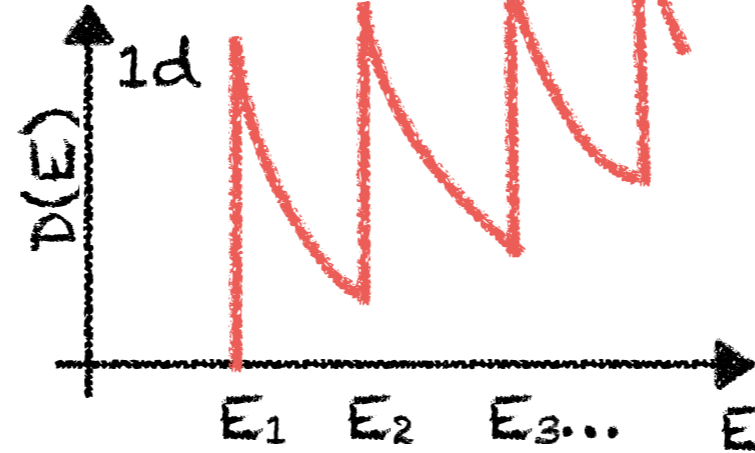
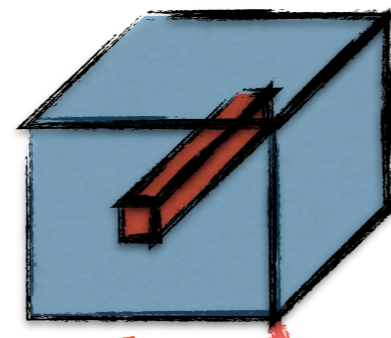
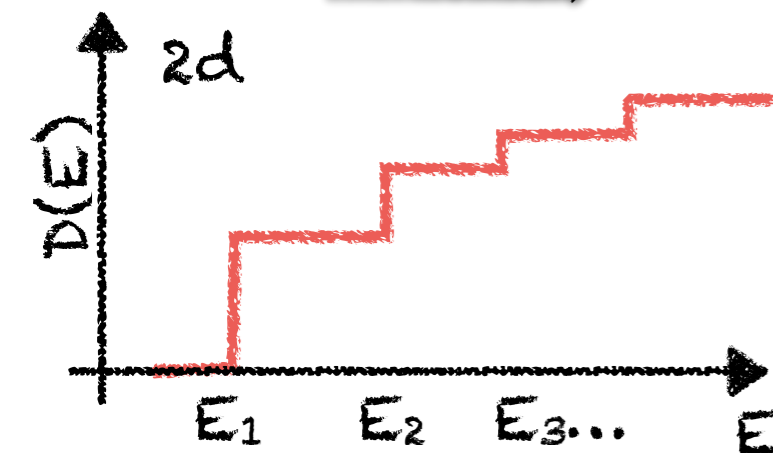
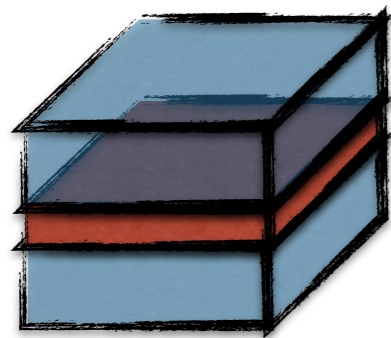
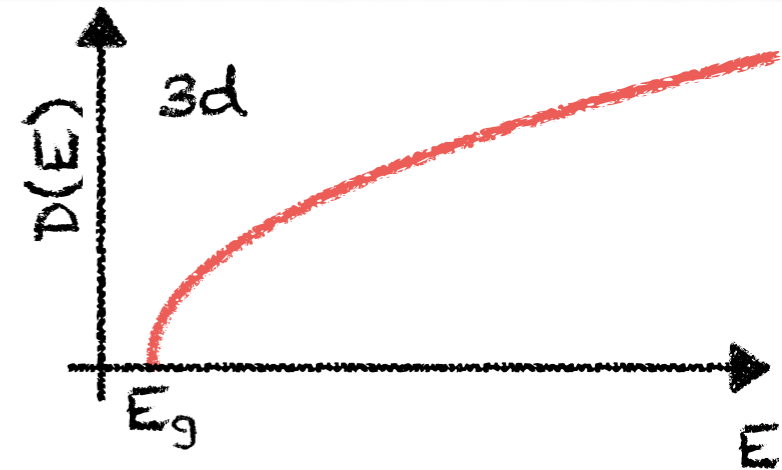
- Abbiamo quindi ottenuto una realizzazione pratica della buca di potenziale (**quantum well**) **unidimensionale**. Si ha **confinamento** solo in una direzione (**z**); nelle altre due, i portatori sono liberi di muoversi come in un semiconduttore **bulk**.



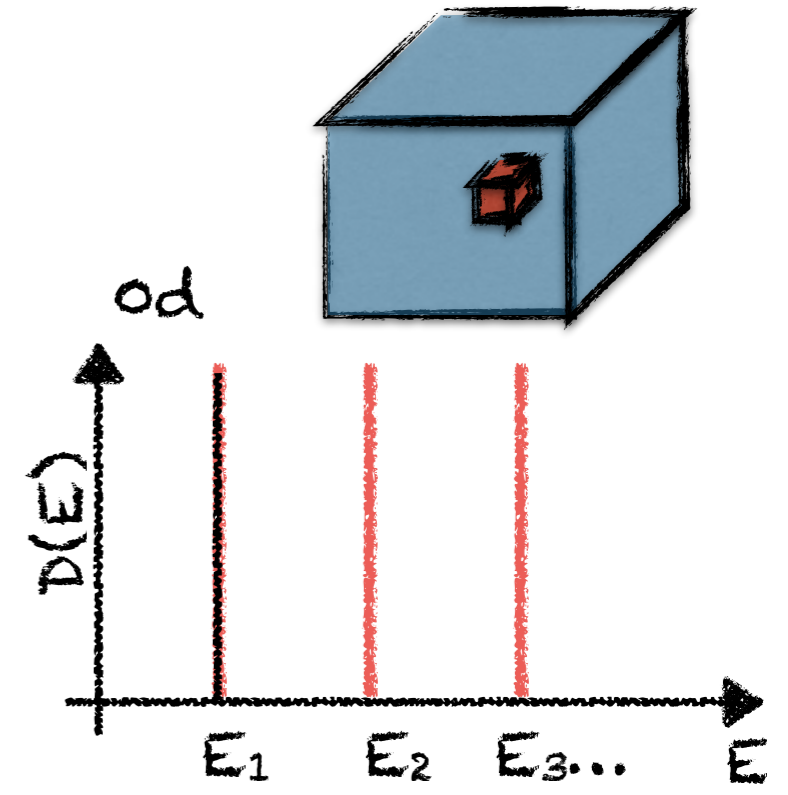
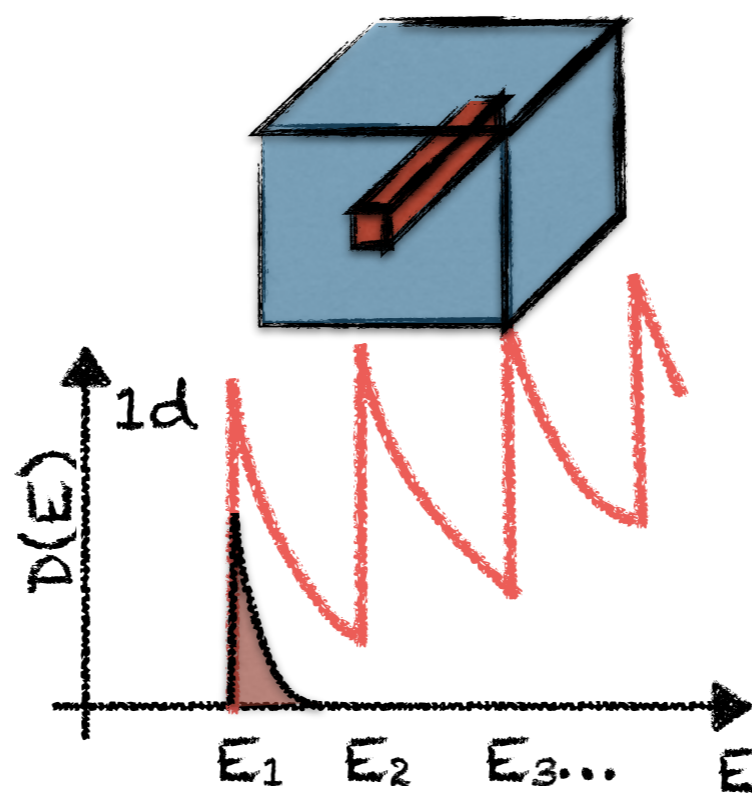
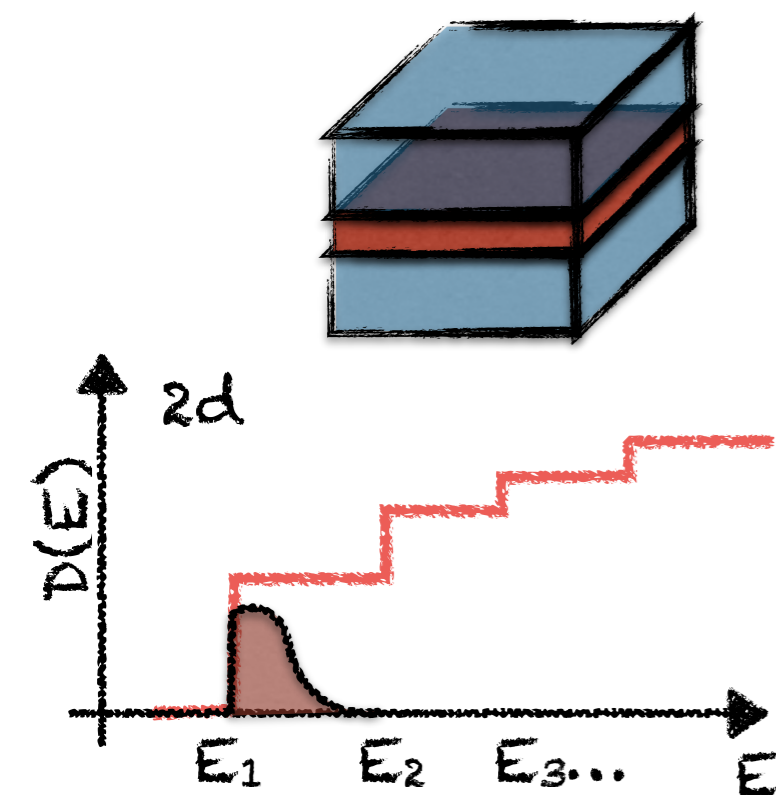
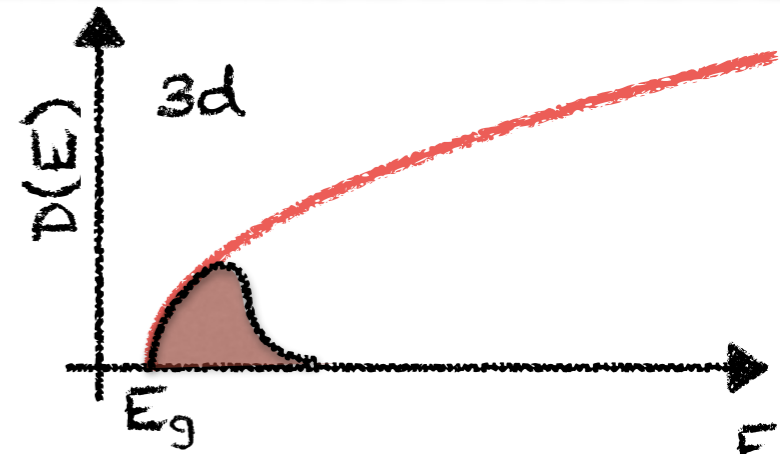
Quantum well

- Abbiamo quindi ottenuto una realizzazione pratica della buca di potenziale (**quantum well**) **unidimensionale**. Si ha **confinamento** solo in una direzione (**z**); nelle altre due, i portatori sono liberi di muoversi come in un semiconduttore **bulk**.
- L'**interazione coulombiana** tra **elettrone** e **lacuna** risulta nella formazione di un **sistema legato**, detto **eccitone**. Gli effetti del **confinamento** cominciano a farsi apprezzabili per **quantum well** di **spessore** dell'ordine del **raggio di Bohr** eccitonico (**~10 nm** nei semiconduttori III-V).

- Con l'introduzione del **confinamento**, la **densità degli stati** elettronica del sistema viene **modificata** dall'insorgere di **discontinuità** legate alla formazione di **livelli discreti**.



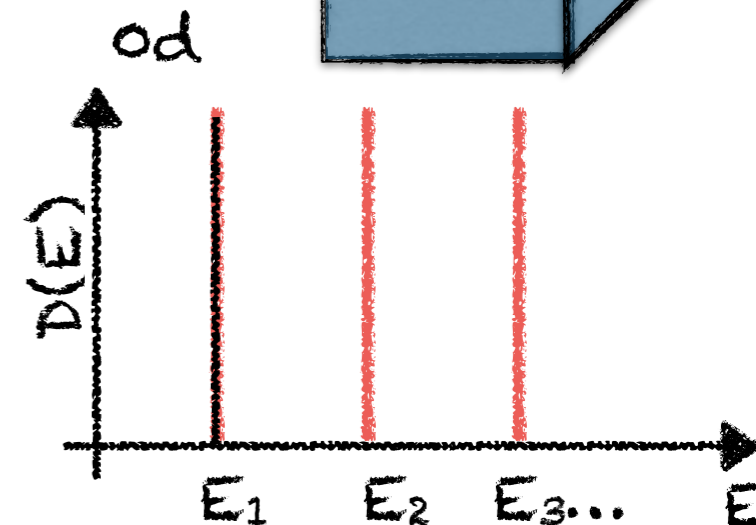
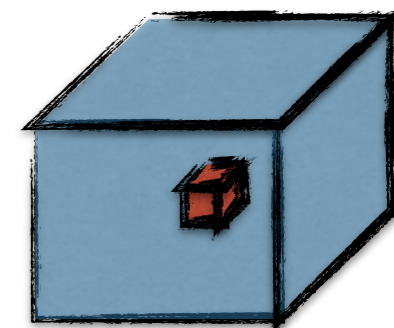
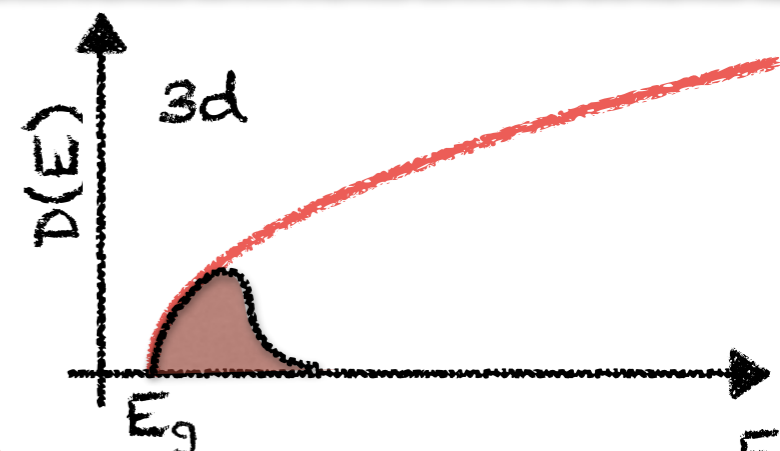
- Con l'introduzione del **confinamento**, la **densità degli stati** elettronica del sistema viene **modificata** dall'insorgere di **discontinuità** legate alla formazione di **livelli discreti**.
- Ciò porta ad una **diminuzione** della **larghezza** della **distribuzione** dei **portatori** in funzione dell'**energia**, che a sua volta risulta in un **restringimento** della **riga di emissione** del sistema.



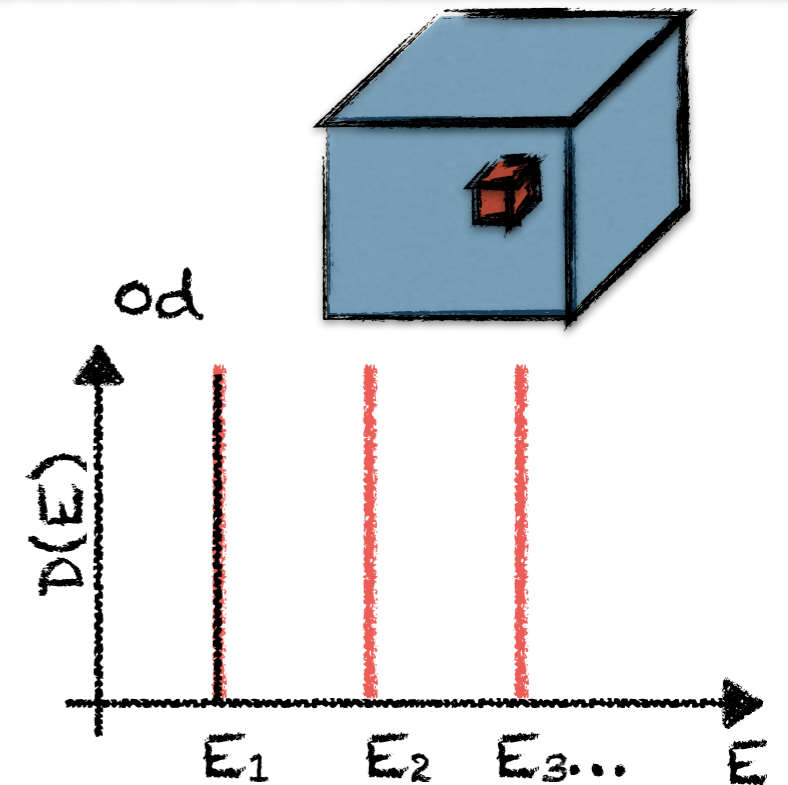
- Con l'introduzione del **confinamento**, la **densità degli stati** elettronica del sistema viene **modificata** dall'insorgere di **discontinuità** legate alla formazione di **livelli discreti**.
- Ciò porta ad una **diminuzione** della **larghezza** della **distribuzione** dei **portatori** in funzione dell'**energia**, che a sua volta risulta in un **restringimento** della **riga di emissione** del sistema.



- Vantaggi per la realizzazione di **laser** e **LED**.
- L'effetto è particolarmente eclatante per sistemi **confinati in tre dimensioni**, la cui densità degli stati è formata da una serie di "**delta**".



Come realizzare un sistema confinato in tre dimensioni?



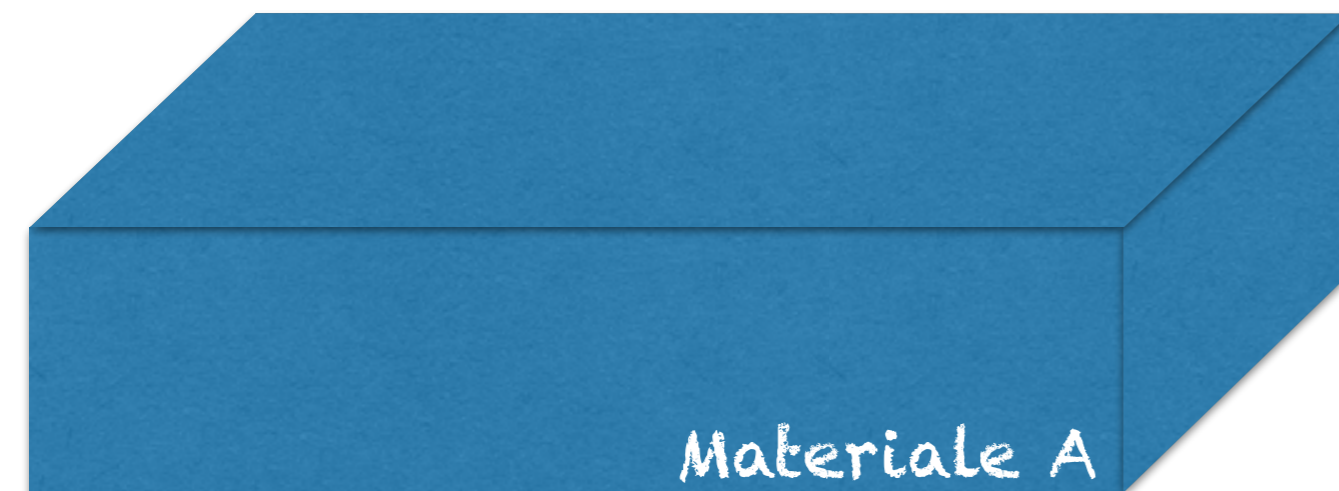


I. QD self-assembled:

- Metodo basato sulla **crescita epitassiale**;
- Quando si cresce un materiale su un altro, bisogna anche tenere conto dell'**accumulo di strain** dovuto ai diversi passi reticolari dei due materiali.

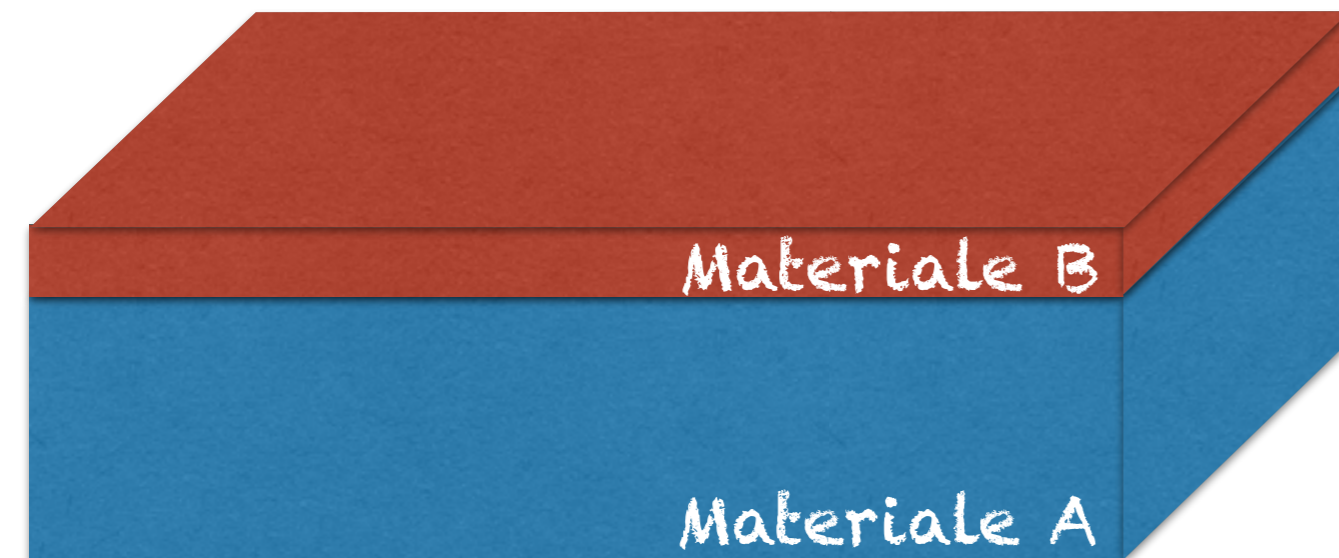
I. QD self-assembled:

- Metodo basato sulla **crescita epitassiale**;
- Quando si cresce un materiale su un altro, bisogna anche tenere conto dell'**accumulo di strain** dovuto ai diversi passi reticolari dei due materiali.



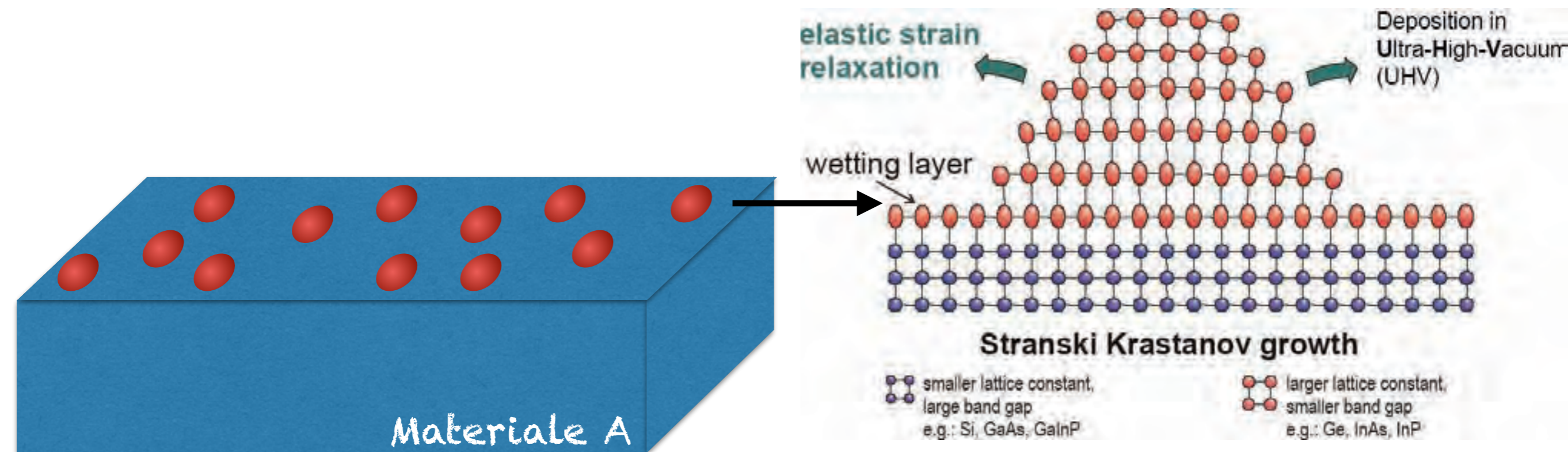
I. QD self-assembled:

- Metodo basato sulla **crescita epitassiale**;
- Quando si cresce un materiale su un altro, bisogna anche tenere conto dell'**accumulo di strain** dovuto ai diversi passi reticolari dei due materiali.



I. QD self-assembled:

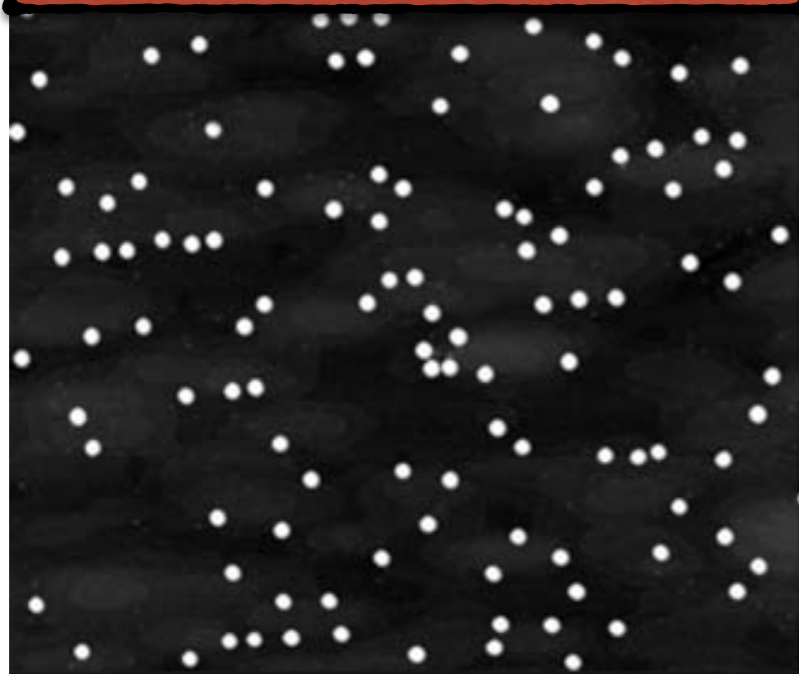
- Metodo basato sulla **crescita epitassiale**;
- Quando si cresce un materiale su un altro, bisogna anche tenere conto dell'**accumulo di strain** dovuto ai diversi passi reticolari dei due materiali.
- Una volta superato un certo **spessore critico**, lo **stress accumulato** viene **rilasciato** mediante la formazione di **isole tridimensionali**, che sotto certe condizioni sono a tutti gli effetti dei **QD** (**Stranski-Krastanow** QD).



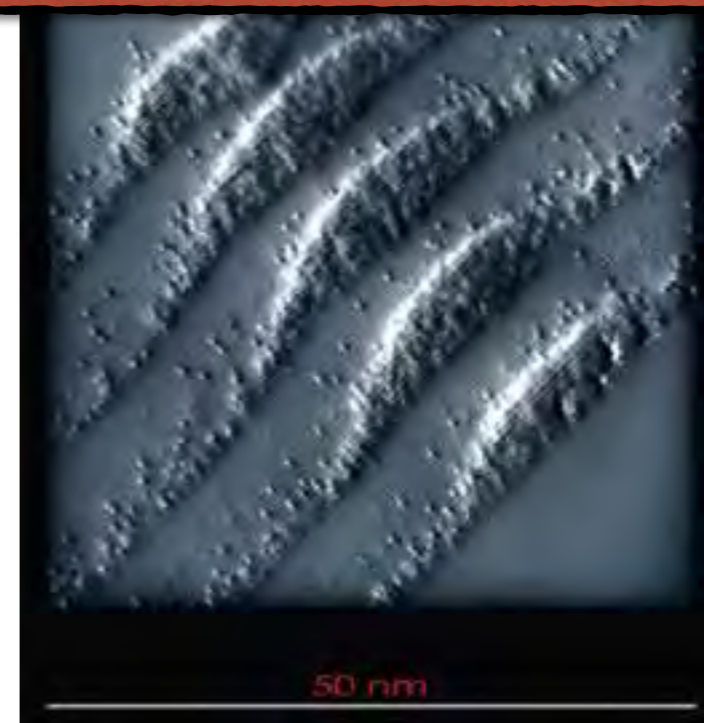
I. QD self-assembled:

- Metodo basato sulla **crescita epitassiale**;
- Quando si cresce un materiale su un altro, bisogna anche tenere conto dell'**accumulo di strain** dovuto ai diversi passi reticolari dei due materiali.
- Una volta superato un certo **spessore critico**, lo **stress accumulato** viene **rilasciato** mediante la formazione di **isole tridimensionali**, che possono assumere dimensioni nanometriche (**Stranski-Krastanow QD**).

Imm. AFM InAs/GaAs QD



Imm. STM stack di QD

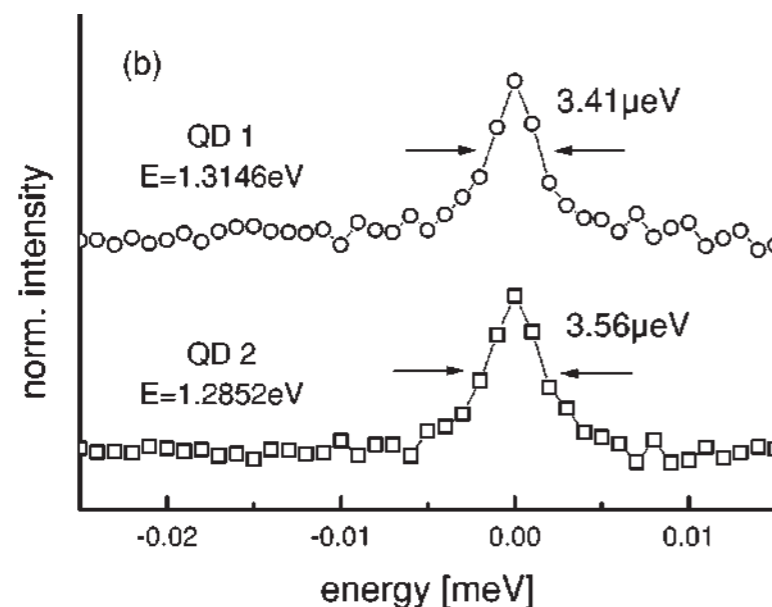


I. QD self-assembled:

Vantaggi

- Relativa **semplicità** di fabbricazione;
- Intrinseca **integrabilità** in **dispositivi a semiconduttore**;
- Larghezza di riga **Fourier-limited**, ovvero determinata da $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ (dove Δt è il **tempo di vita** dell'**eccitone** nel QD).

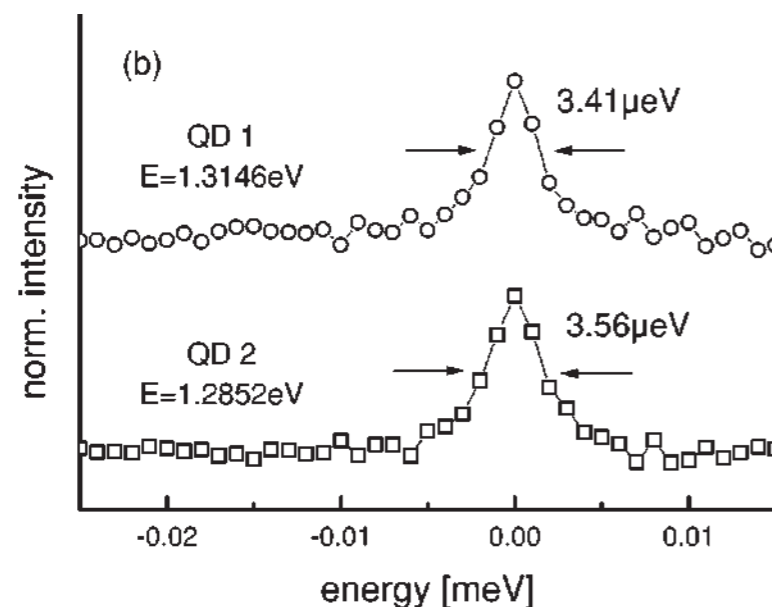
Svantaggi



I. QD self-assembled:

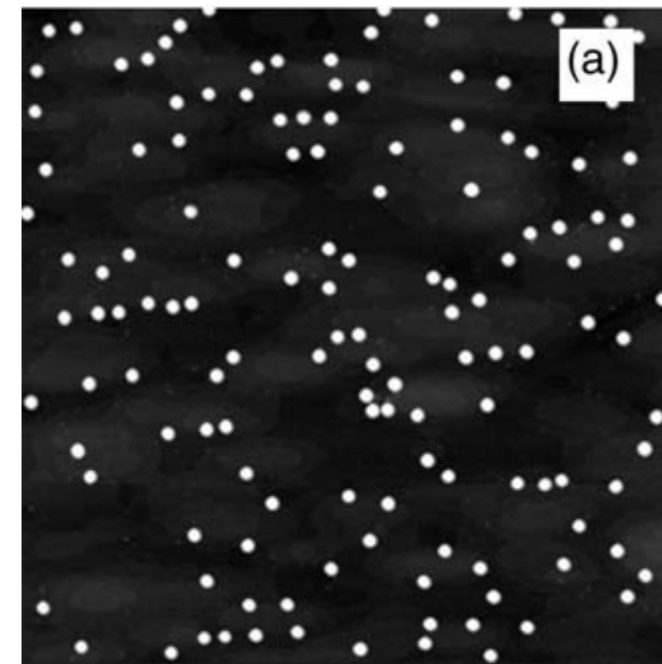
Vantaggi

- Relativa **semplicità** di fabbricazione;
- Intrinseca **integrabilità** in **dispositivi a semiconduttore**;
- Larghezza di riga **Fourier-limited**, ovvero determinata da $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ (dove Δt è il **tempo di vita** dell'**eccitone** nel **QD**).



Svantaggi

- **Posizione random**;



- Scarso **controllo** delle **dimensioni** dei **dot**.



- L'**energia** dei **QD** è distribuita su di un intervallo piuttosto **largo** (~30 meV)
D. Bimberg and U. W. Pohl, Materials Today **14**, 388 (2011).



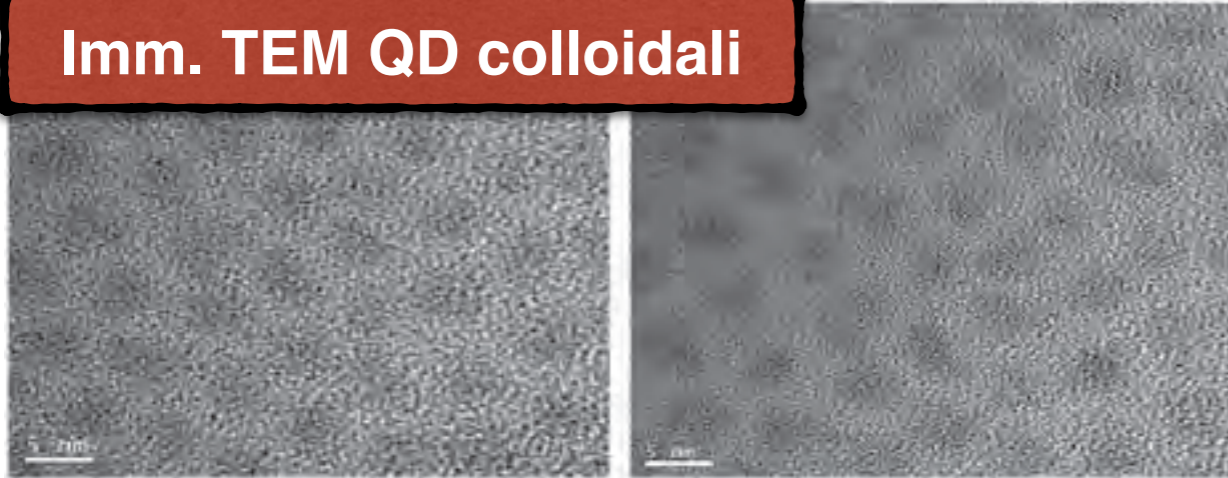
II. QD colloidali:

- Metodo basato sulla **sintesi chimica**;

II. QD colloidali:

- Metodo basato sulla **sintesi chimica**;
- Attraverso un'opportuna scelta di **precursori molecolari**, **surfattanti** e **solventi** è possibile indurre una reazione che spinge gli atomi ad **autoassemblarsi** in forma **cristallina**.

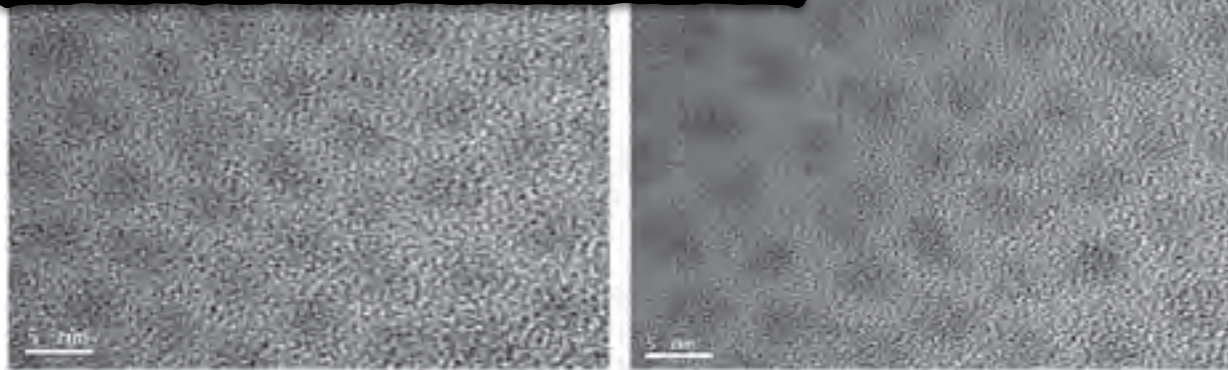
Imm. TEM QD colloidali



II. QD colloidali:

- Metodo basato sulla **sintesi chimica**;
- Attraverso un'opportuna scelta di **precursori molecolari**, **surfattanti** e **solventi** è possibile indurre una reazione che spinge gli atomi ad **autoassemblarsi** in forma **cristallina**.

Imm. TEM QD colloidali



Fluorescenza QD colloidali in soluzione

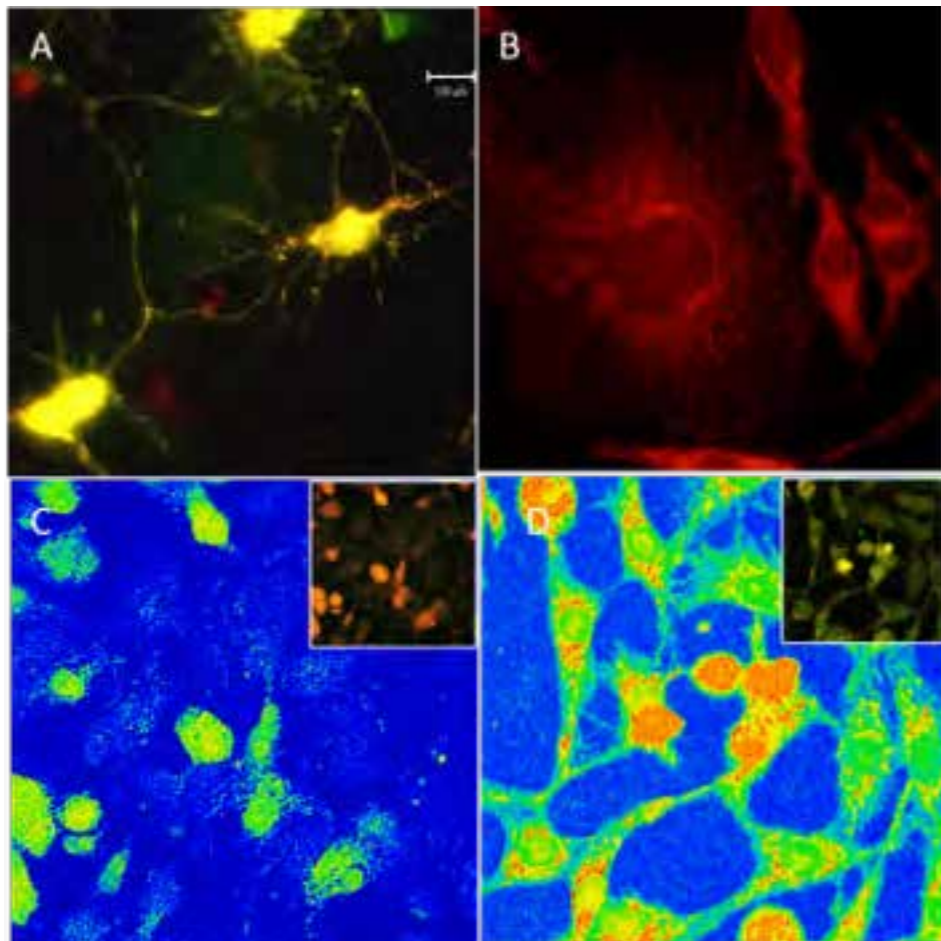


- **Calibrando** il **tempo** durante il quale si fa andare avanti la reazione, è possibile **regolare** in modo abbastanza preciso le **dimensioni** —e, quindi, l'**energia di emissione**— dei QD.

II. QD colloidal:

Vantaggi

- **Semplicità** di fabbricazione, possibilità di sintetizzare **grandi quantitativi** di QD;
- Possibilità di utilizzare i **QD** in **soluzione** come **marker** per **imaging biomedico**;

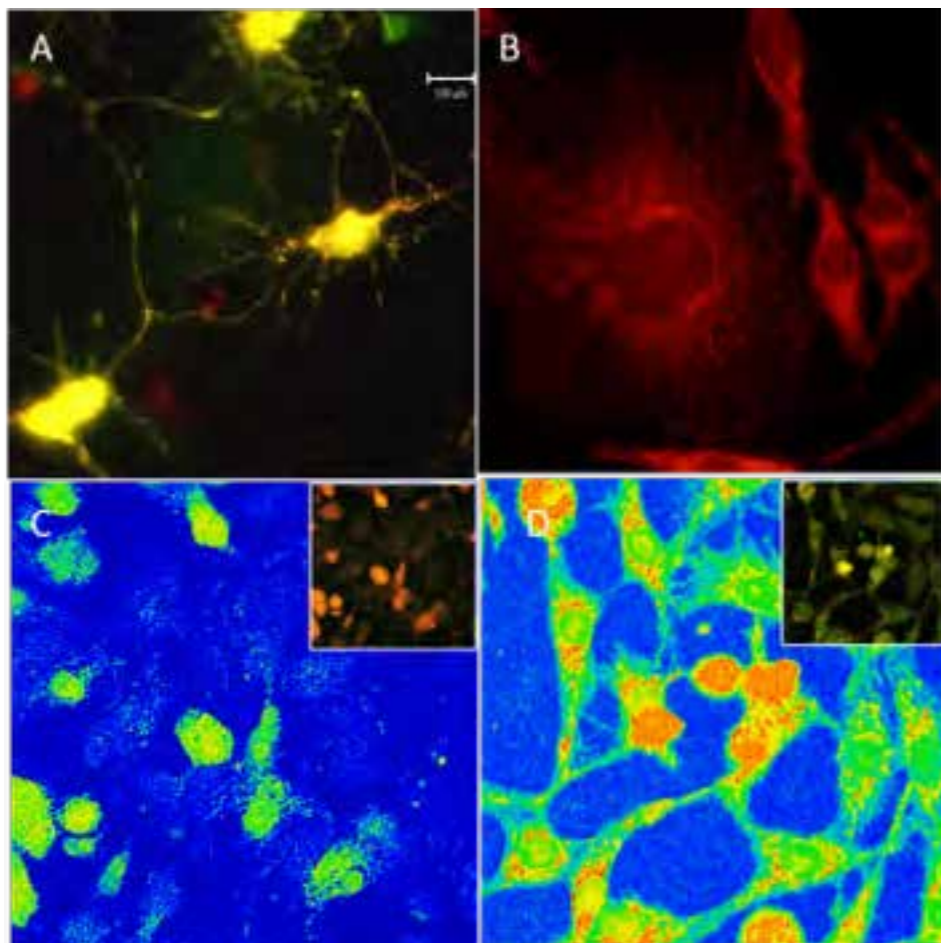


Svantaggi

II. QD colloidal:

Vantaggi

- **Semplicità** di fabbricazione, possibilità di sintetizzare **grandi quantitativi** di QD;
- Possibilità di utilizzare i **QD** in **soluzione** come **marker** per **imaging biomedico**;



Svantaggi

- **Proprietà ottiche** (tempi di vita, omogeneità dell'energia di emissione dei dot) non all'altezza dei **QD self-assembled**;
- Presenza di **elementi tossici** (e.g., **Cd**) nei QD.



III. QD site-controlled:

- **Vari metodi** sono stati messi a punto per **controllare** la **posizione** (e, in parte, l'**energia di emissione**) dei **QD**; per brevità, qui ci concentreremo su uno:

III.QD site-controlled:

- **Vari metodi** sono stati messi a punto per **controllare** la **posizione** (e, in parte, l'**energia di emissione**) dei **QD**; per brevità, qui ci concentreremo su uno:

QD piramidali

- Uno **strato di InGaAs** viene depositato per **MOCVD** su un **substrato di GaAs** su cui è presente un **pattern di recessi tetraedrici (piramidi)**; un **singolo dot** si forma, per **capillarità**, sul **fondo** di ogni piramide.

Imm. AFM QD piramidali di InAs/GaAs

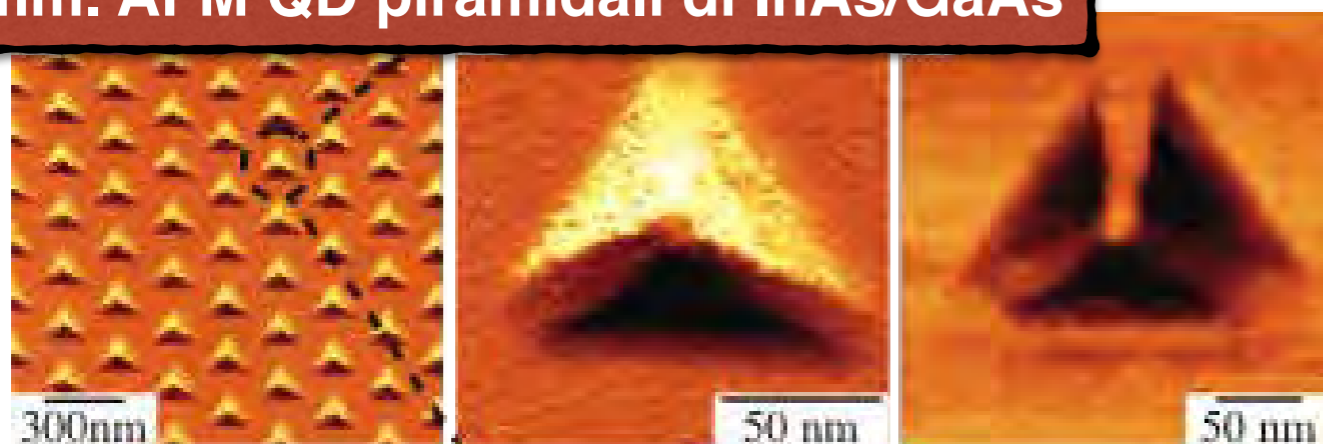


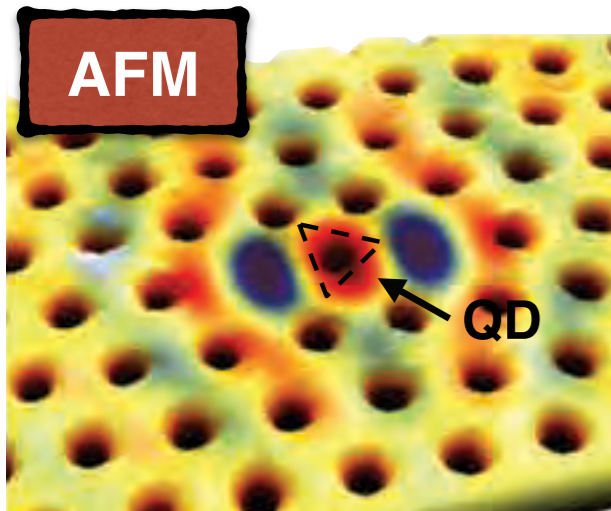
Image courtesy of A. Surrente

III.QD site-controlled:

QD piramidali

Vantaggi

- **Controllo** della **posizione** con precisione **~ 10 nm** (consente l'integrazione in **microcavità** a cristalli fotonici).



Svantaggi

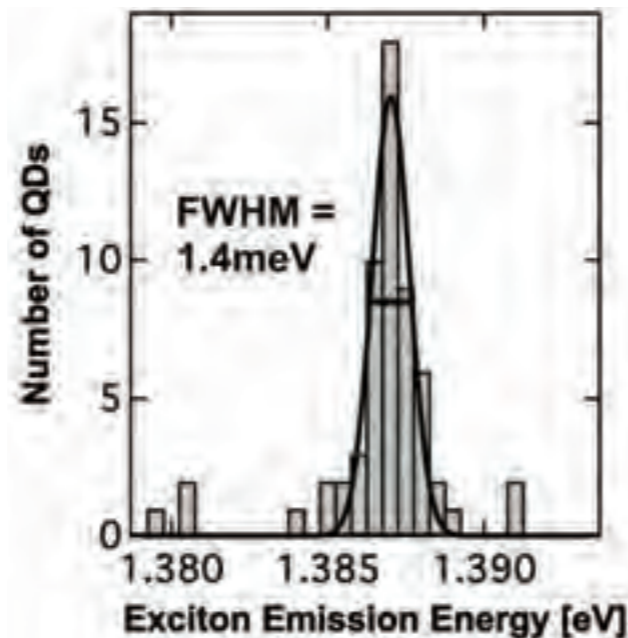
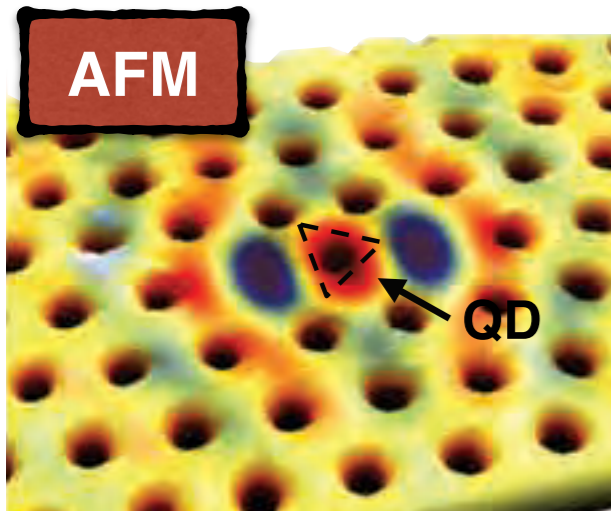
III. QD site-controlled:

QD piramidali

Vantaggi

Svantaggi

- **Controllo** della **posizione** con precisione **~ 10 nm** (consente l'integrazione in **microcavità** a cristalli fotonici).



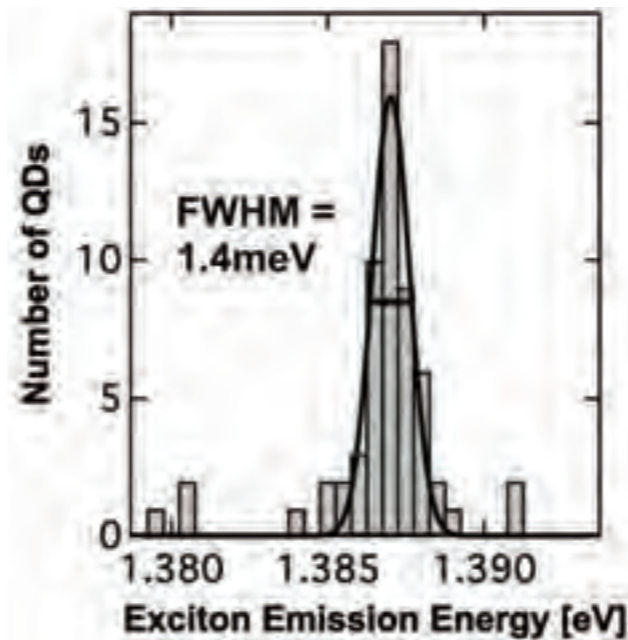
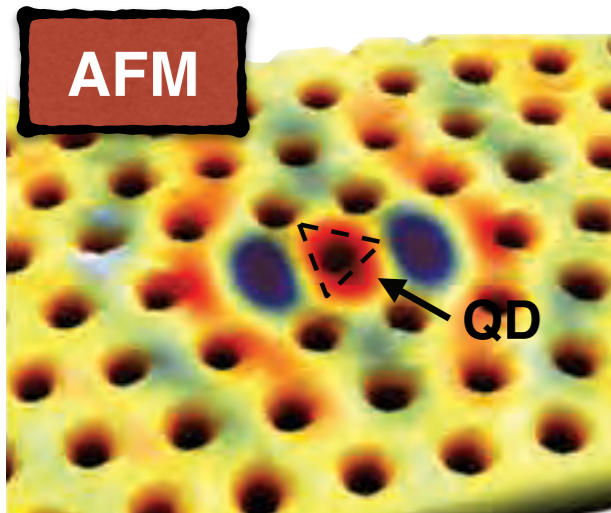
- **Miglioramento** dell'**omogeneità** dell'energia di emissione dei QD (FWHM ~ 2 meV)

III. QD site-controlled:

QD piramidali

Vantaggi

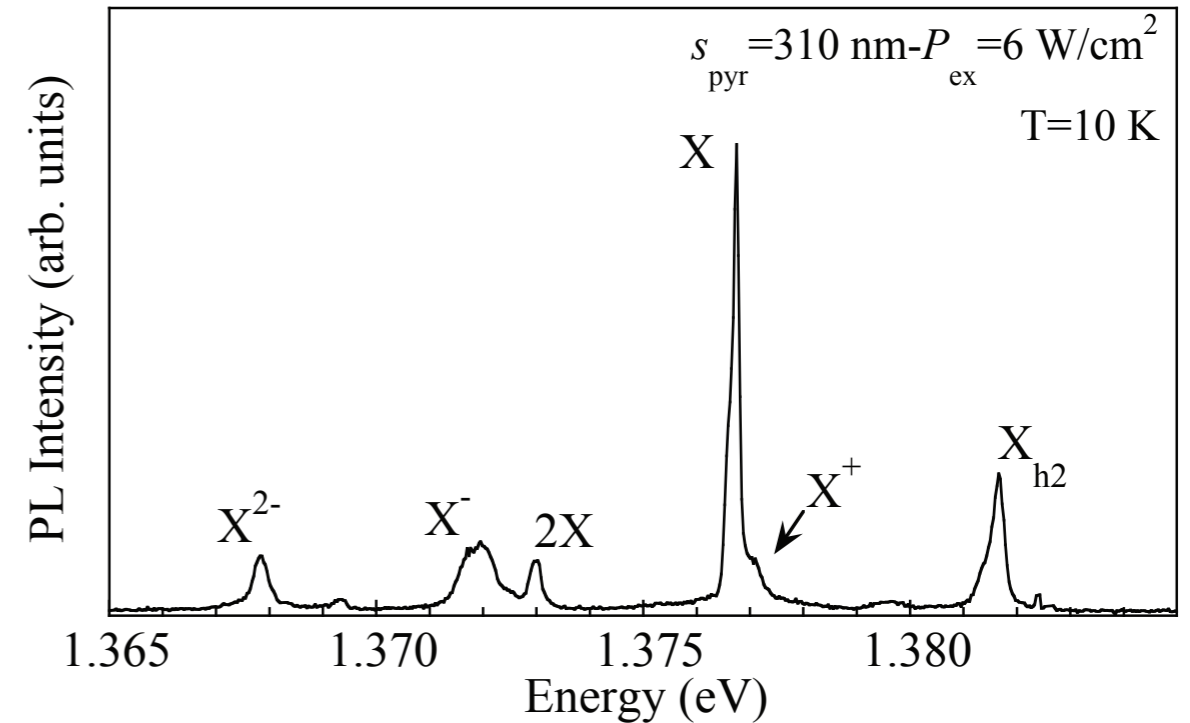
- **Controllo** della **posizione** con precisione **~ 10 nm** (consente l'integrazione in **microcavità** a cristalli fotonici).



- **Miglioramento** dell'**omogeneità** dell'energia di emissione dei QD (FWHM ~ 2 meV)

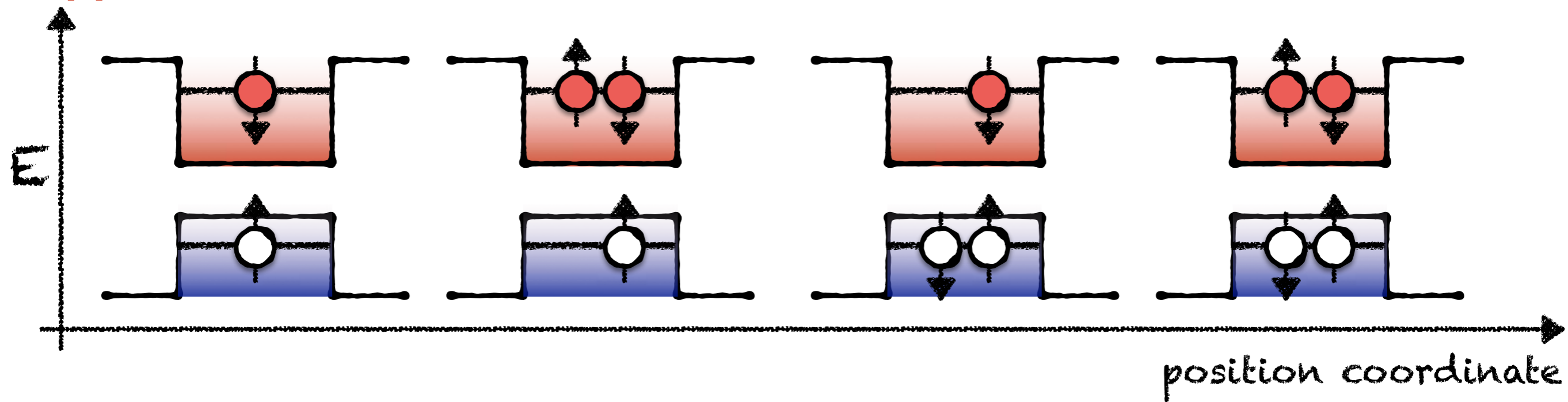
Svantaggi

- **Maggiore** (≥ 50 μ eV) **larghezza** della **riga di emissione** del **singolo QD**.

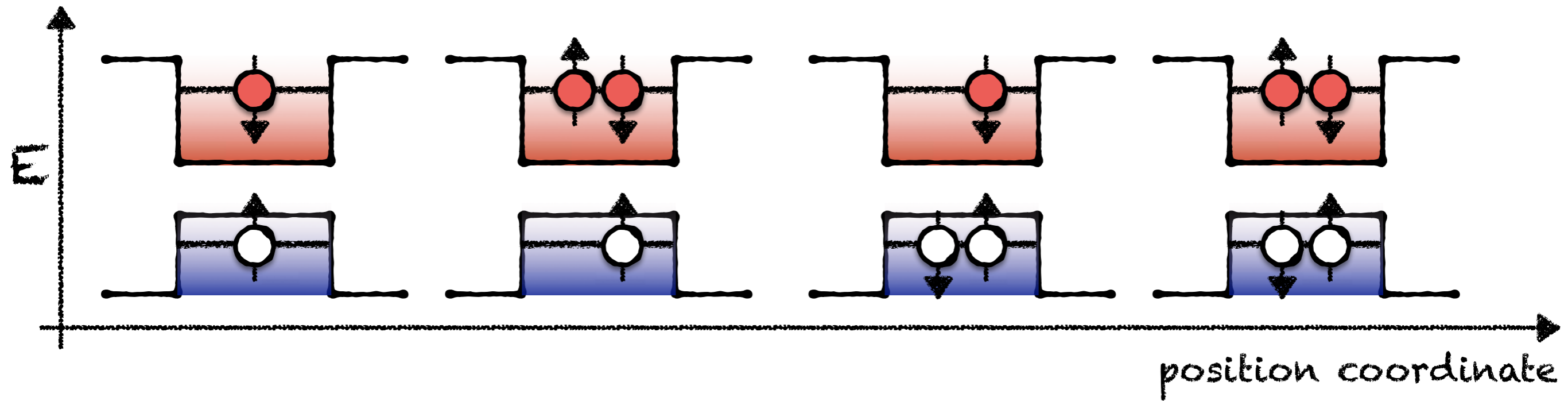


- **Densità massima** di QD **vincolata** dalla **distanza minima** tra le piramidi (**~ 100 nm**).

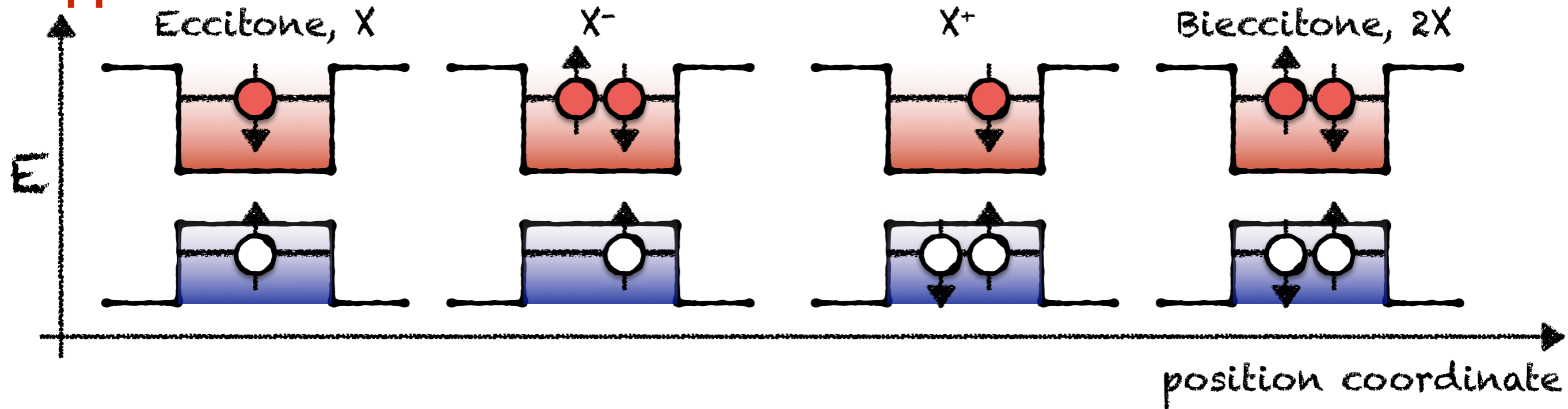
- Dunque i **portatori** (elettroni, e^- e lacune, h^+) **localizzati** in un **QD** sono **confinati** su tre dimensioni, e vanno a occupare **livelli discreti**. È quindi legittimo attendersi comportamenti simili a quelli osservati in **fisica atomica**.
- Limitiamoci al caso di un QD con **un solo** stato legato per e^- e h^+ . Tale sistema può ospitare fino a due coppie e^-/h^+ , caratterizzate da **spin opposti**.



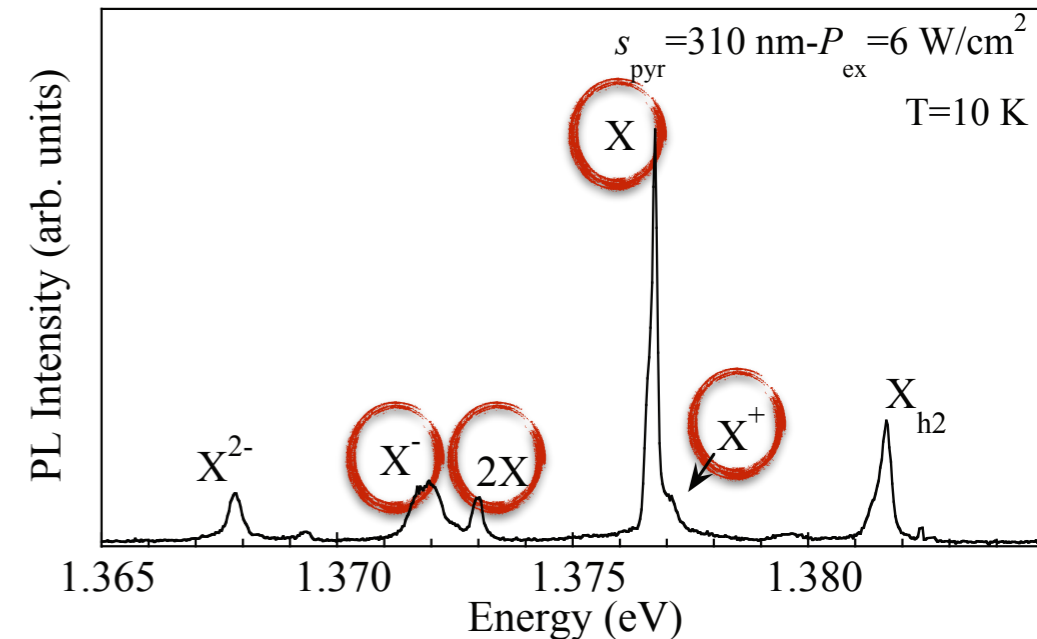
- Limitiamoci al caso di un QD con **un solo** stato legato per e^- e h^+ . Tale sistema può ospitare fino a due coppie e^-/h^+ , caratterizzate da **spin opposti**.



- Limitiamoci al caso di un QD con **un solo** stato legato per e^- e h^+ . Tale sistema può ospitare fino a due coppie e^-/h^+ , caratterizzate da **spin opposti**.

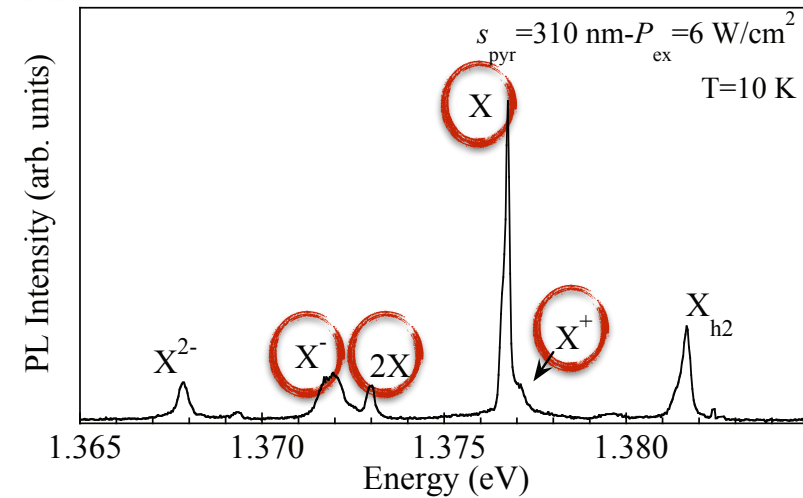


- A causa delle interazioni tra i portatori, la ricombinazione di un e^- e di una h^+ in **ognuna** delle **4 configurazioni** qui mostrate corrisponde a un **picco** distinto nello **spettro di emissione** del QD.



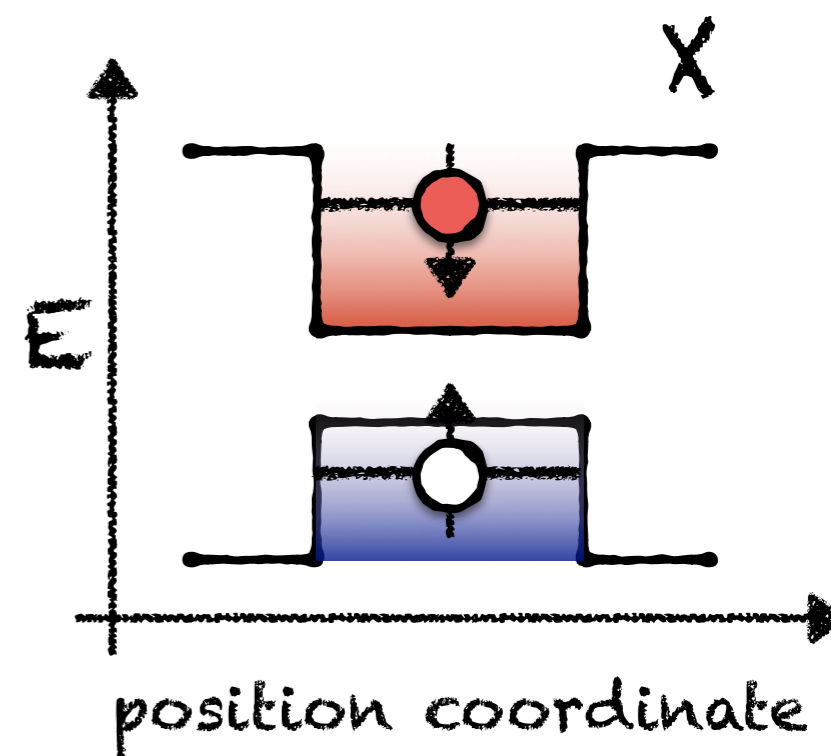
- Studiando la **correlazione** tra queste **transizioni eccitoniche**, è possibile mettere in evidenza eventuali **deviazioni** della **luce emessa dal QD** dalla **statistica poissoniana**.

$$g_{X_1, X_2}^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I_{X_1}(t) \cdot I_{X_2}(t + \tau) \rangle}{\langle I_{X_1}(t) \rangle \cdot \langle I_{X_2}(t) \rangle}$$



- Studiando la **correlazione** tra queste **transizioni eccitoniche**, è possibile mettere in evidenza eventuali **deviazioni** della **luce emessa dal QD** dalla **statistica poissoniana**.

$$g_{X_1, X_2}^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I_{X_1}(t) \cdot I_{X_2}(t + \tau) \rangle}{\langle I_{X_1}(t) \rangle \cdot \langle I_{X_2}(t) \rangle}$$

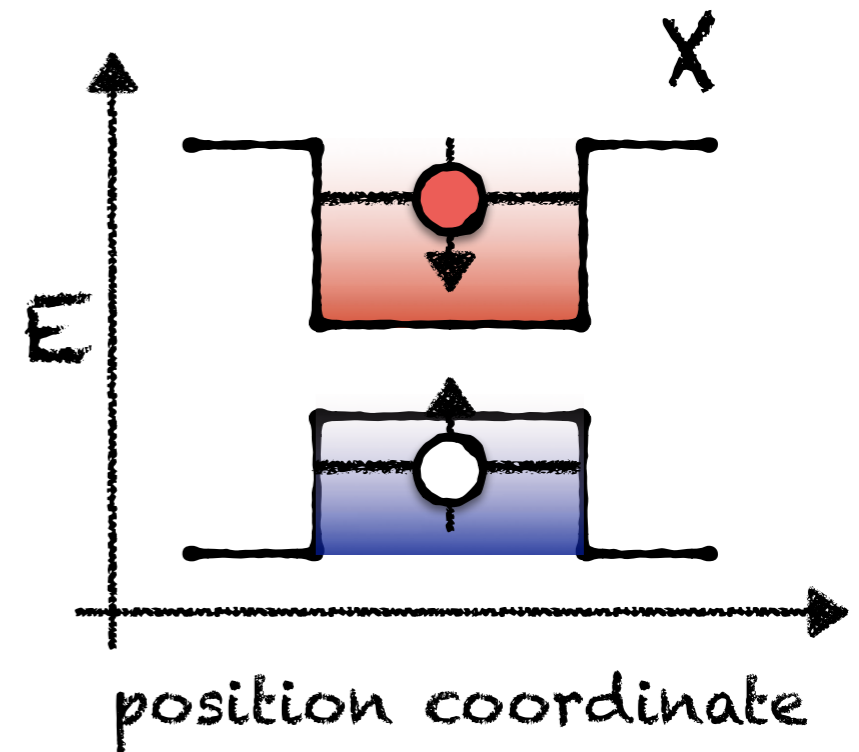


- Per l'**autocorrelazione** dell'**eccitone**, ad esempio, a ritardo **τ nullo** si ha

$$g_{X, X}^{(2)}(\tau = 0) = 1 - \frac{1}{N}$$

- Studiando la **correlazione** tra queste **transizioni eccitoniche**, è possibile mettere in evidenza eventuali **deviazioni** della **luce emessa dal QD** dalla **statistica poissoniana**.

$$g_{X_1, X_2}^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I_{X_1}(t) \cdot I_{X_2}(t + \tau) \rangle}{\langle I_{X_1}(t) \rangle \cdot \langle I_{X_2}(t) \rangle}$$



- Per l'**autocorrelazione** dell'**eccitone**, ad esempio, a ritardo **τ nullo** si ha

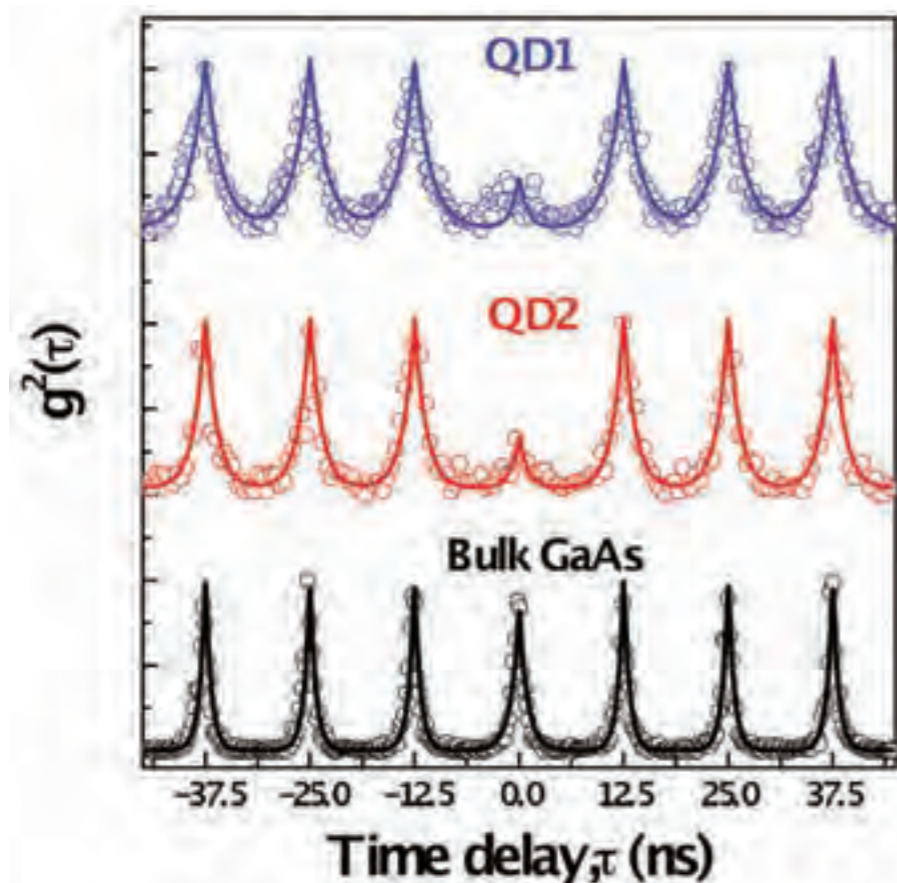
$$g_{X, X}^{(2)}(\tau = 0) = 1 - \frac{1}{N}$$

dove **N** è il **numero di fotoni** presenti nel **sistema**. A un sistema a **due livelli** (a cui abbiamo **approssimato** il **QD**) dovrebbe essere accessibile il regime di **singolo fotone** (**$N=1$**), per cui chiaramente la **$g^{(2)}(0)$** si **annulla**. In effetti, vediamo che ad esempio per un QD di **GaAsN/GaAsN:H** si ha

- Per l'**autocorrelazione** dell'**eccitone**, ad esempio, a ritardo **τ nullo** si ha

$$g_{X,X}^{(2)}(\tau=0) = 1 - \frac{1}{N}$$

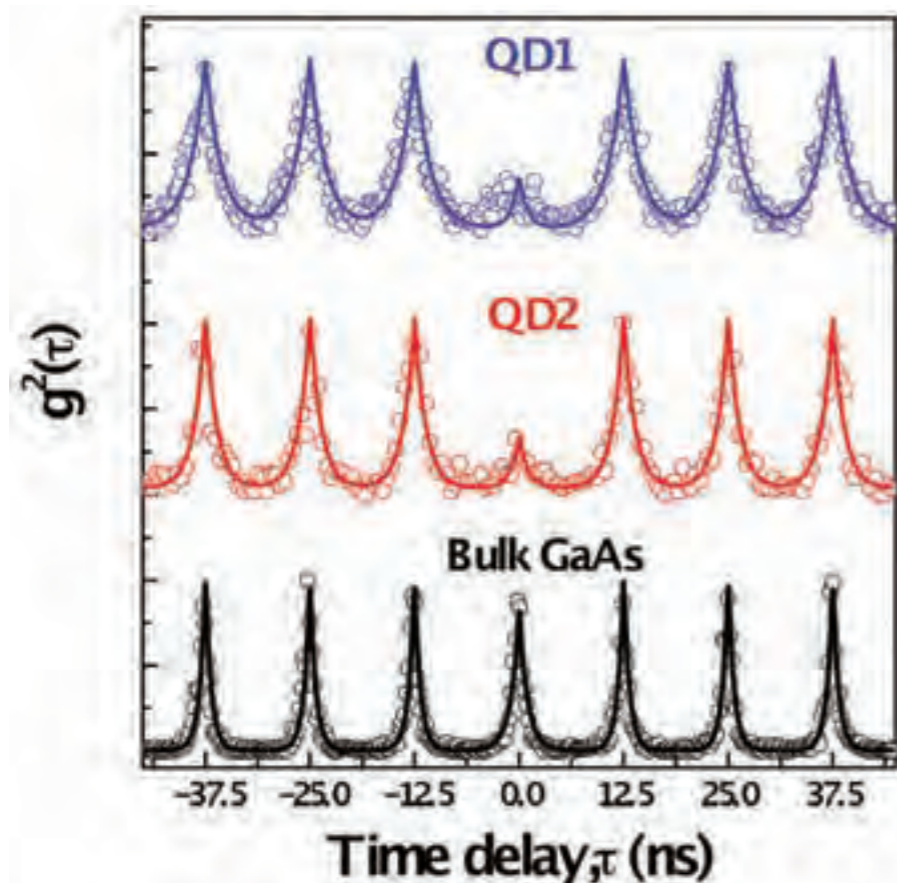
dove **N** è il **numero di fotoni** presenti nel **sistema**. A un sistema a **due livelli** (a cui abbiamo **approssimato** il **QD**) dovrebbe essere accessibile il regime di **singolo fotone** (**$N=1$**), per cui chiaramente la **$g^{(2)}(0)$** si **annulla**. In effetti, vediamo che ad esempio per un QD di **GaAsN/GaAsN:H** si ha



- Per l'**autocorrelazione** dell'**eccitone**, ad esempio, a ritardo τ **nullo** si ha

$$g_{X,X}^{(2)}(\tau=0) = 1 - \frac{1}{N}$$

dove N è il **numero di fotoni** presenti nel **sistema**. A un sistema a **due livelli** (a cui abbiamo **approssimato** il **QD**) dovrebbe essere accessibile il regime di **singolo fotone** ($N=1$), per cui chiaramente la $g^{(2)}(0)$ si **annulla**. In effetti, vediamo che ad esempio per un QD di **GaAsN/GaAsN:H** si ha



$$g^{(2)}_1(0) = 0.24 < 0.5$$

$$g^{(2)}_1(0) = 0.26 < 0.5$$

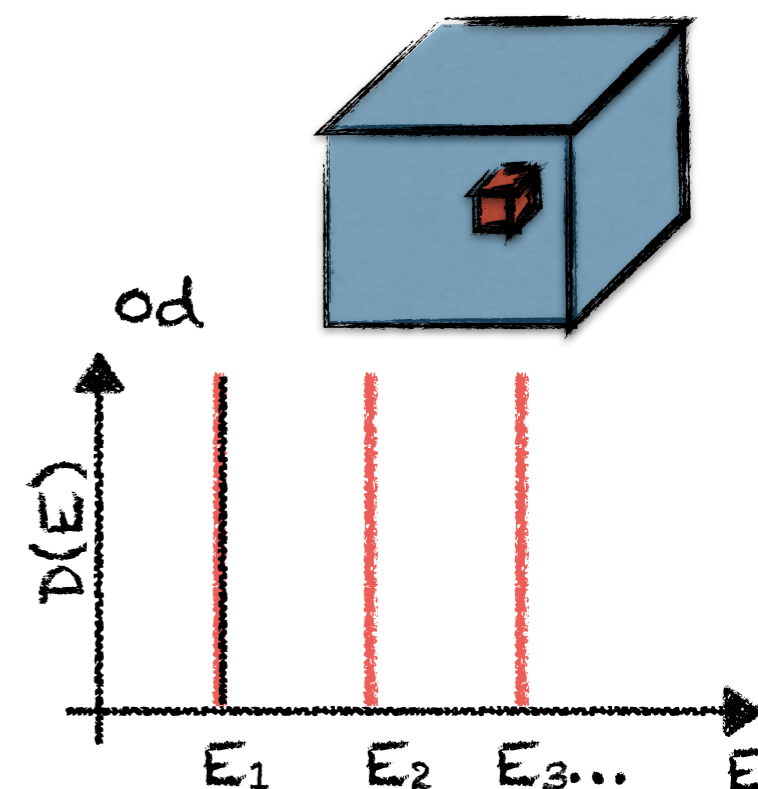
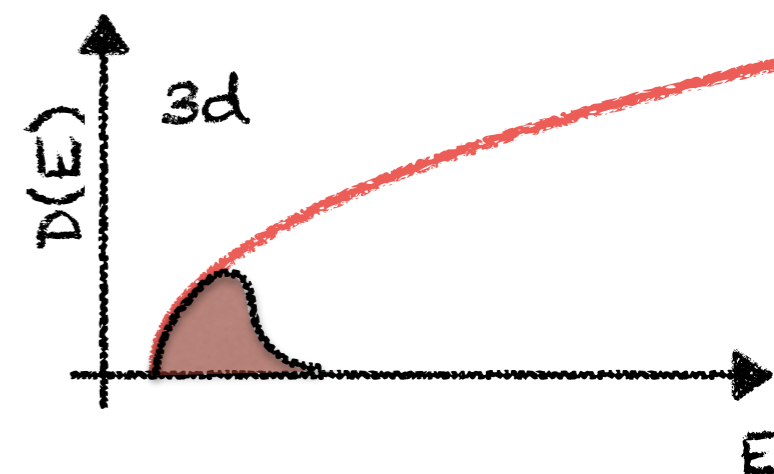


$$N < 2$$

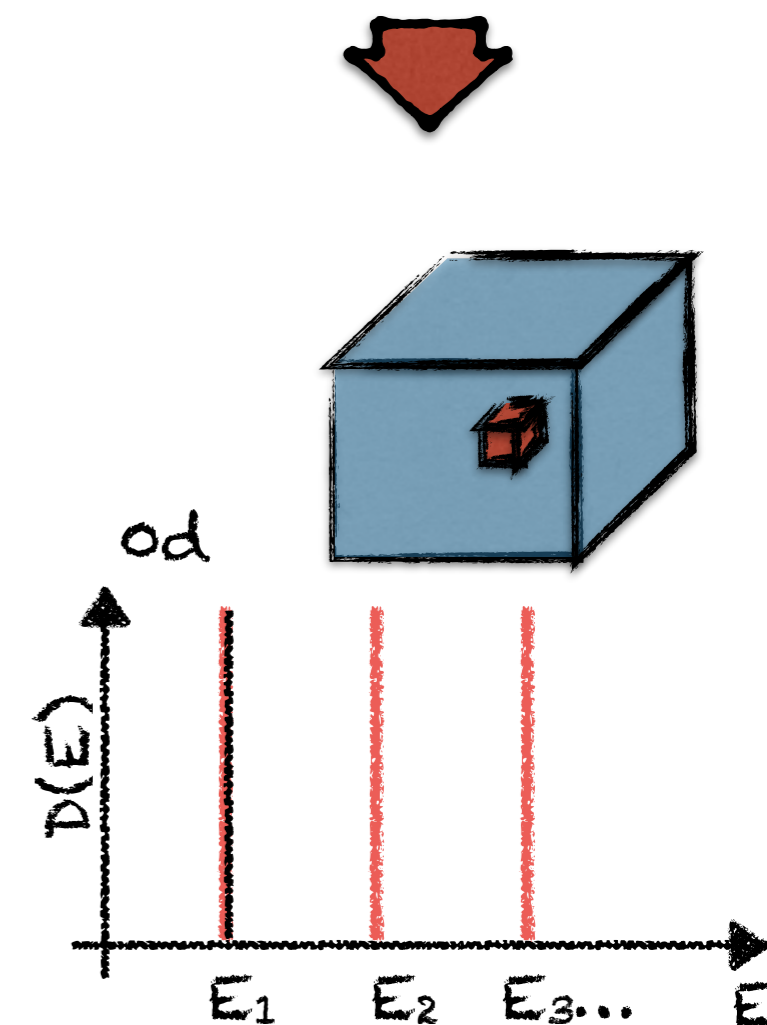
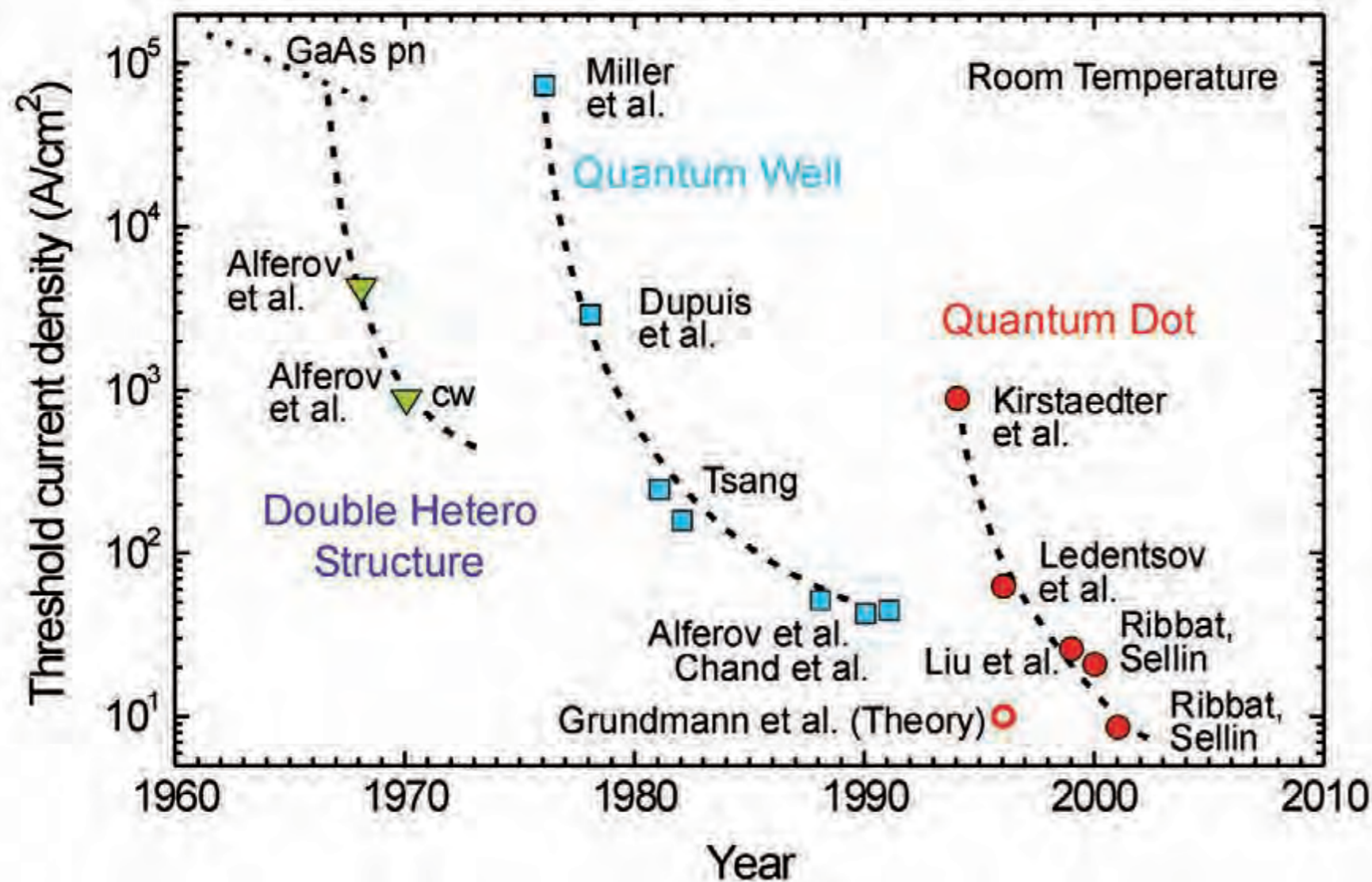
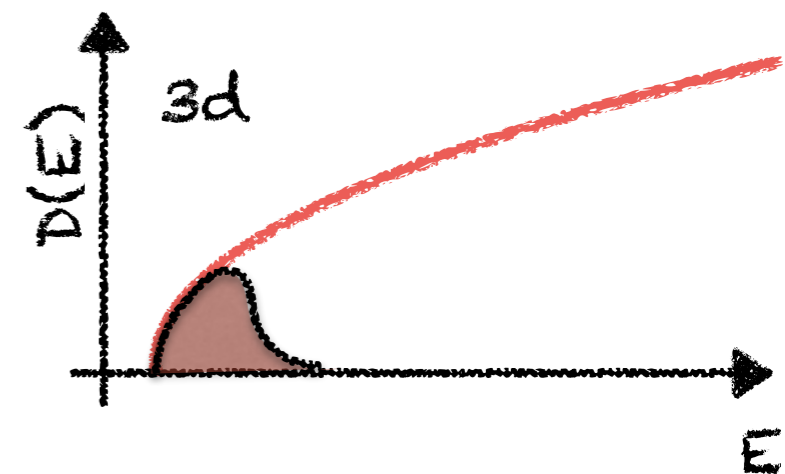


Emissione di singolo fotone!

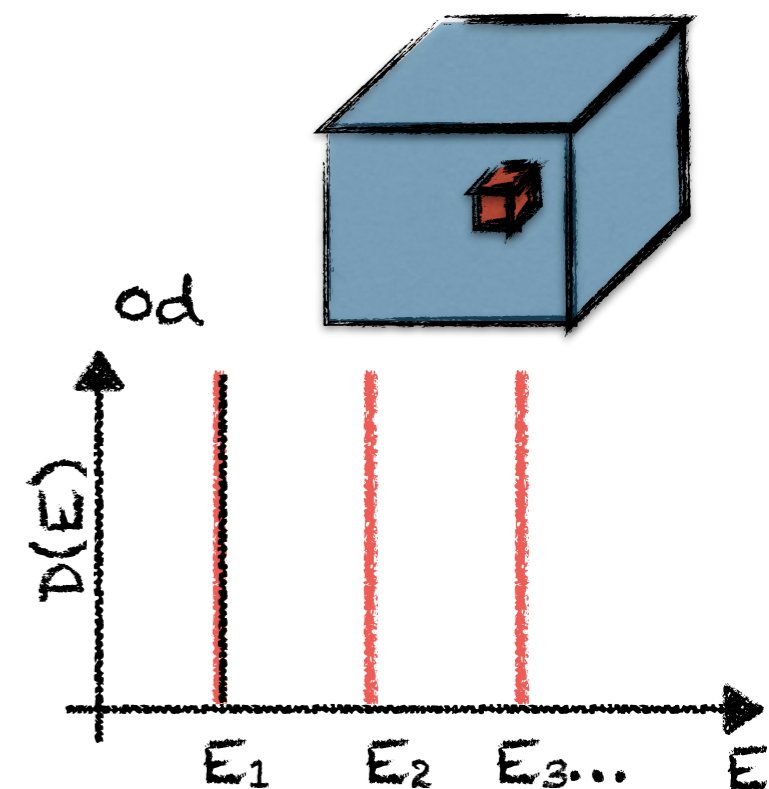
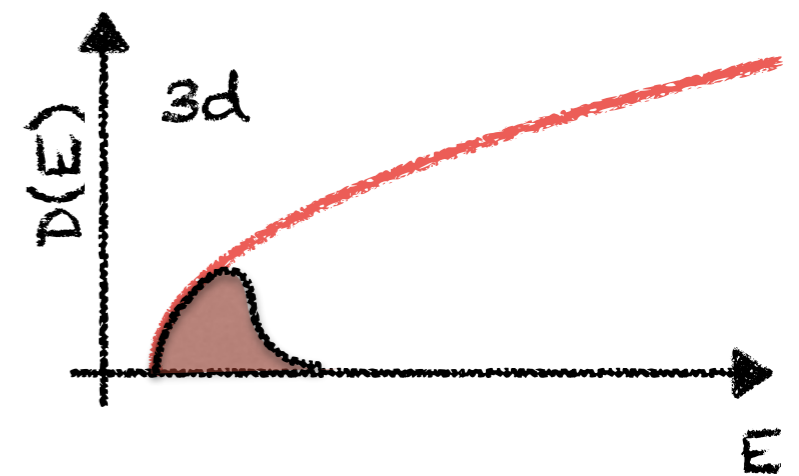
- Negli ultimi anni, i sistemi a **dimensionalità ridotta** (**QW** e **QD**) hanno finalmente cominciato a mantenere le promesse per quello che riguarda le **performance** degli emettitori di luce (**laser**, **LED**) in cui essi vengono impiegati.



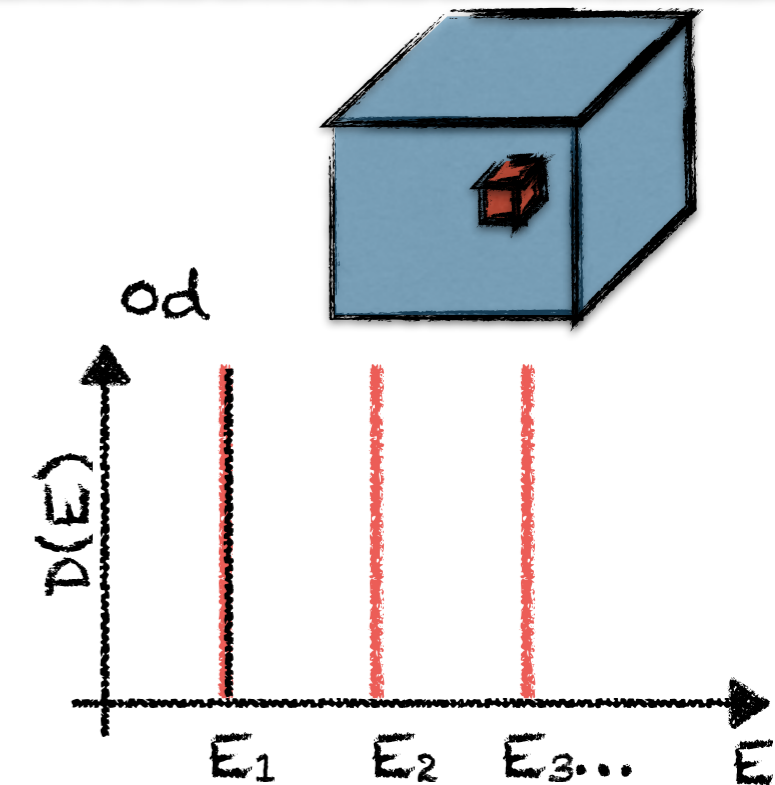
- Negli ultimi anni, i sistemi a **dimensionalità ridotta** (**QW** e **QD**) hanno finalmente cominciato a mantenere le promesse per quello che riguarda le **performance** degli emettitori di luce (**laser**, **LED**) in cui essi vengono impiegati.



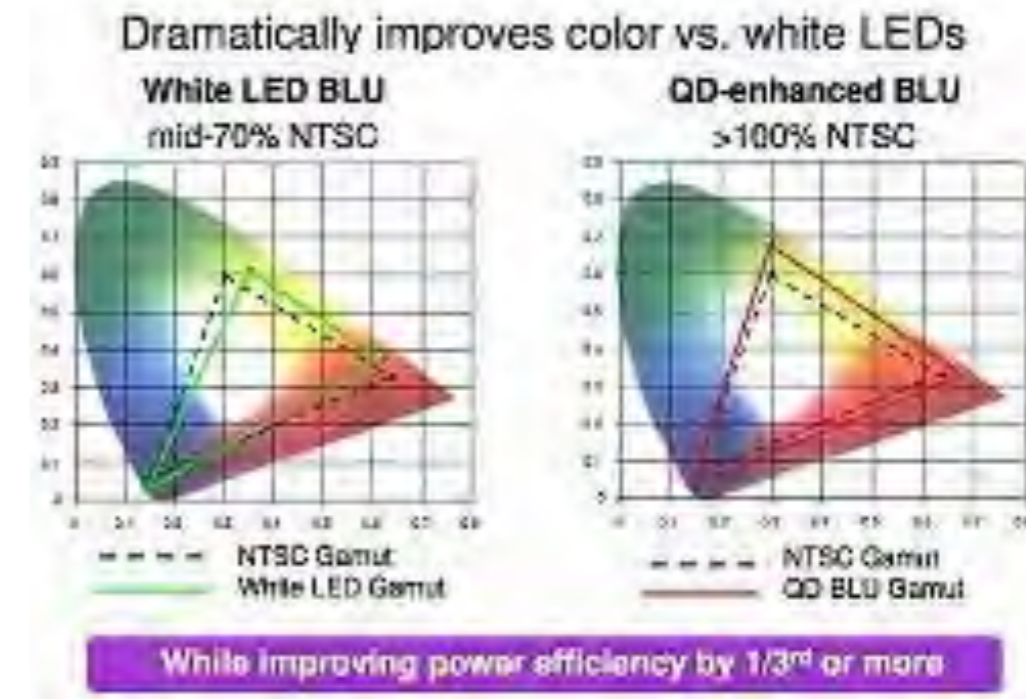
- Negli ultimi anni, i sistemi a **dimensionalità ridotta** (**QW** e **QD**) hanno finalmente cominciato a mantenere le promesse per quello che riguarda le **performance** degli emettitori di luce (**laser**, **LED**) in cui essi vengono impiegati.
- In virtù di questi miglioramenti, molto recentemente i **QD** hanno visto un'applicazione in sistemi destinati al **consumo di massa**;



- In virtù di questi miglioramenti, molto recentemente i **QD** hanno visto un'applicazione in sistemi destinati al **consumo di massa**;
- Ad esempio, **Sony** ha messo in commercio una **TV** in cui l'**illuminazione** è fornita da un **LED blu**. Da un lato, questo LED fornisce la **componente blu** all'**illuminazione** dello schermo; dall'altro, esso eccita **due layer di QD**, che emettono rispettivamente nel **rosso** e nel **verde**. Ciò garantisce colori più vividi rispetto a un tradizionale **LED bianco**, aumentando il **Gamut** dello schermo.



SONY
TRILUMINOS
DISPLAY



- **GRAZIE PER
L'ATTENZIONE!**