

# Chapter I

## Diluted magnetic semiconductor quantum dots

### I.1 II-VI semiconductor quantum dots

#### I.1.1 Band structure of CdTe/ZnTe

ZnTe and CdTe are two II-VI semiconductor, meaning they are composed of an anion from the column VI of periodic table (Te), and a cation from the column II (Cd and Zn). They both crystallize as zinc blend when grown in Molecular Beam Epitaxy. As shown in Fig. I.1, in this structure, each species is organized in a face centred lattice, one them being shift from the other by a quarter of the  $[111]$  diagonal. Each ion is then in a tetragonal environment, meaning the zinc-blende structure is of the  $T_d$  space-group.

The external orbital of the cation are  $s$  for the cation ( $4d^{10}5s^2$  for Cd,  $3d^{10}4s^2$  for Zn) and  $p$  for the anion ( $4d^{10}5s^25p^4$  for Te). Considering a  $N$  unit crystal, it then contain  $8N$  valence electron, coming from the  $s$  and  $p$  levels of the ions. The  $s$  and  $p$  orbital of these atoms hybridize to form 8 levels, 4 bonding and 4 anti-bonding.

The lowest band of the bonding levels, coming from  $s$  orbitals, will be filled by  $2N$  valence electron.  $6N$  will be taken to fill the three higher energy bonding band, formed by the hybridization of  $p$  orbitals. Those bonding states form the valence band. At higher energy, the anti-bonding states form the conduction band. Since all the electron available are used to fill the valence band, the conduction band is empty in the ground state. The lower energy band of the conduction band are formed by the anti-symmetric combination of the  $s$  orbitals. At higher energy, the anti-symmetric hybridization of  $p$  orbitals form three other bands.

Introducing the spin-orbit interaction, the conduction band, formed by the hybridization of  $s$  orbitals, is of  $\Gamma_6$  (spherical) symmetry at the center of the Brill-

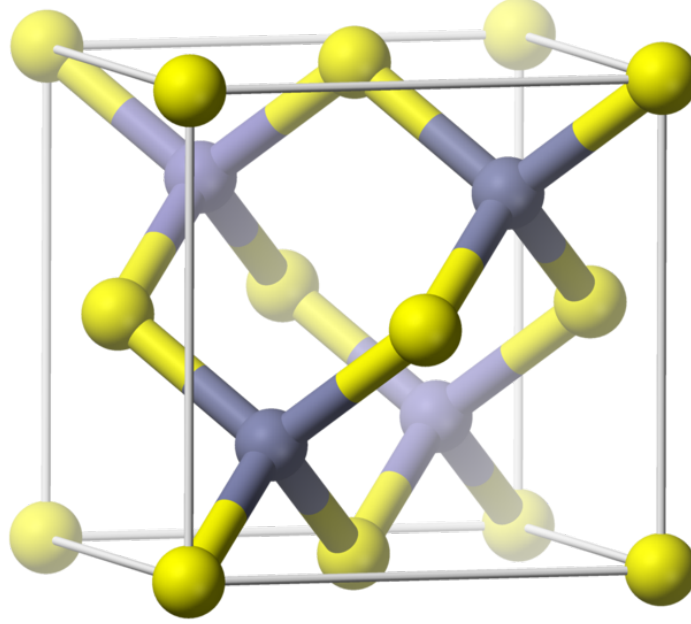


Figure I.1: Zinc-blende crystal structure and first Brillouin zone.

loun zone, two-fold degenerated, with an orbital momentum  $\sigma = 1/2$ . In a similar fashion, the valence band will be split into to band: a first one of  $\Gamma_8$  symmetry, with an angular momentum  $J = 3/2$ , four-fold degenerated ; and the second one, at lower energy, of  $\Gamma_7$  symmetry, with an angular momentum  $J = 1/2$ , two-fold degenerated. The splitting  $\Gamma_7 - \Gamma_8$  is of about 0.9eV in II-VI semiconductor.

### I.1.2 Lattice mismatch and the Bir-Pikus Hamiltonian

ZnTe crystal has a lattice parameter of  $6.10\text{\AA}$ , while CdTe one is of  $6.48\text{\AA}$ . This lattice mismatch will induce strain in a CdTe layer grown on a ZnTe substrate.

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim



Figure I.2: CdTe/ZnTe band structures

condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.

### I.1.3 Valence band mixing

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim

condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.

#### I.1.4 Electron-hole interaction in confined structure

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.



Figure I.3: Dots STM images

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim

condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.

## I.2 Fine and hyperfine structure of a magnetic atom in II-VI semiconductor

### I.2.1 Mn atom in II-VI semiconductor

Mn in a lattice  $\rightarrow$  modification of orbital  $\rightarrow$  spin-orbit interaction. Magnetic anisotropy + anisotropy of strain. (Mn has nuclear spin  $5/2 \rightarrow$  hyperfine interaction?)



Figure I.4: Mn in Zinc-Blend lattice

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit



Figure I.5: Mn fine and hyperfine structure

lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.

### I.2.2 Cr atom in II-VI semiconductor

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit



Figure I.6: Cr in Zinc-Blend lattice



Figure I.7: Atomic configuration in Jahn-Teller effect + three minima

lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat.



Figure I.8: Degeneracy breaking under Jahn-Teller effect

Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.



Figure I.9: Strain effect on ground state + degeneracy breaking by this symetry reduction





Figure I.10: Overall energy structure (with  $\pm 2$  which doesn't luminesce)

## I.3 Exchange interaction between carrier and magnetic atom

### I.3.1 Exchange interaction in Diluted Magnetic Semiconductors

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum,

lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.

### **I.3.2 Mn case**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.

### **I.3.3 Cr case**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.

### **I.3.4 Effect of the confinement**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.

## **I.4 A simple example: the X-Mn system**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur tortor quam, imperdiet quis facilisis sed, fringilla a quam. Cras ante odio, hendrerit ac ante

nec, cursus imperdiet urna. Mauris convallis ultricies purus, nec condimentum erat bibendum vel. Aliquam erat volutpat. Pellentesque condimentum, eros a consequat accumsan, turpis sem euismod nisi, sed fringilla quam turpis sit amet erat. Mauris dictum odio sed nisi dapibus, et molestie mauris rutrum. Praesent convallis dolor in nibh blandit bibendum. Quisque sit amet arcu consectetur lorem luctus venenatis nec quis dui. Aliquam erat volutpat. Aenean auctor elit nec tristique dignissim. Nulla massa mi, efficitur semper ex id, pretium eleifend massa. Vivamus sit amet orci scelerisque, gravida est ut, vulputate odio.



Figure I.11: QD spectra 0 Mn, 1 Mn, 2 Mn

Curabitur eget ipsum egestas dui viverra suscipit. Cras aliquet lacus vitae erat finibus semper. Nulla pharetra eget urna vitae sodales. Nunc faucibus velit lacus, nec ornare eros aliquet quis. Donec a orci nec sem pulvinar ultricies sit amet ut arcu. Nullam id vehicula enim, at tincidunt velit. Duis vestibulum lorem a molestie fringilla. Nullam tincidunt semper placerat. Donec nibh sem, ornare eget cursus ac, luctus sit amet eros. Phasellus eget interdum nisi. Donec mollis risus id lectus fringilla, et commodo risus iaculis. Donec at lacus sed nibh posuere posuere sit amet eget sapien. In dignissim, enim sit amet convallis fermentum, lacus nulla gravida tortor, non facilisis ex nisl sit amet augue. Maecenas eu enim condimentum, consectetur ligula vel, tincidunt nisl. Nam laoreet dictum volutpat. Donec at erat venenatis, ultrices lorem ac, vestibulum neque.



Figure I.12: Mn energy level in a QD