

半导兒童不宜篇

-半导皇后與皇帝的亲密接触

Heterojunction Band Alignment

王不老說半导

半导兒童不宜篇

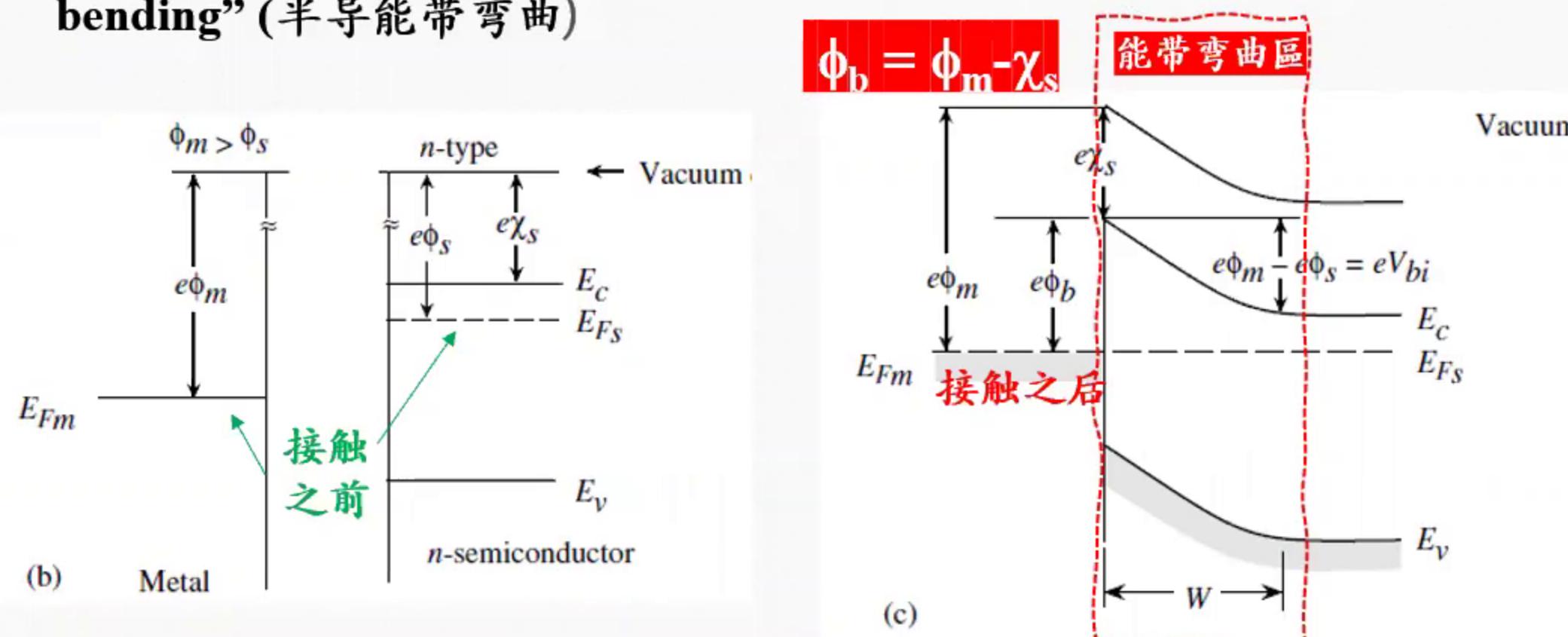
-半导皇后與皇帝的亲密接触

Heterojunction Band Alignment

王不老說半导

回味：“半导皇后”與“金屬渣男”的亲密接触

- 接触之后：皇后色诱渣男，渣男心甘情愿与她齐心： $E_{Fs} = E_{fM}$
- 接触之后：然而渣男与皇后之间仍有芥蒂，皇后有不豫之色（见右下红虚线区，能阶在皇后脸色泛红W区内，因为累积了电荷，产生弯曲），此现象约之“band bending”（半导能带弯曲）



”半导皇后”與”金屬渣男”的亲密接触

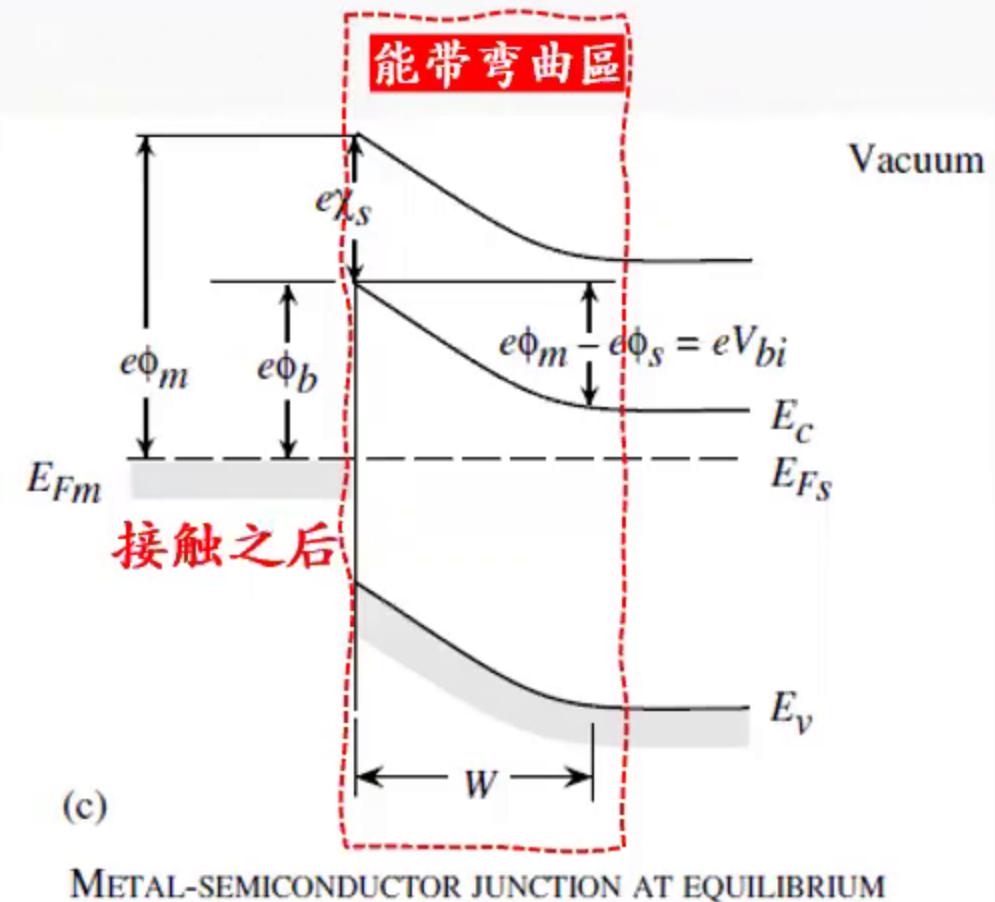
已知: 渣男心甘情愿與皇后齐心: $E_{Fs} = E_{fM}$

試問:

1. 渣男為什麼會心甘情愿, i.e., why $E_{Fs} = E_{fM}$?
2. 為何皇后臉面是向上仰望(能帶弯曲區向上翹)?

解答: (1) 渣男心甘情愿是因為保利大帝有令, 此令為 Pauli exclusion principle(保利排除原理): no two electrons can occupy the same state

1. 费米能级 = E_F = 电子的总势能。我們可以想像, 渣男與皇后接触以后是兩個相通的蓄水池
 - 若一侧有更高水位(E_F), 则电子往低处流。当电子在较低水位, 那里的 E_F 会增加 (由于保利排除原理: 没有两个电子可以占据相同的状态), 反之亦然。最终两个区域的 E_F 均等, 电子停止互流, E_{Fs} 必须等于 E_{fM}



保利大帝有令,
无人胆敢不从

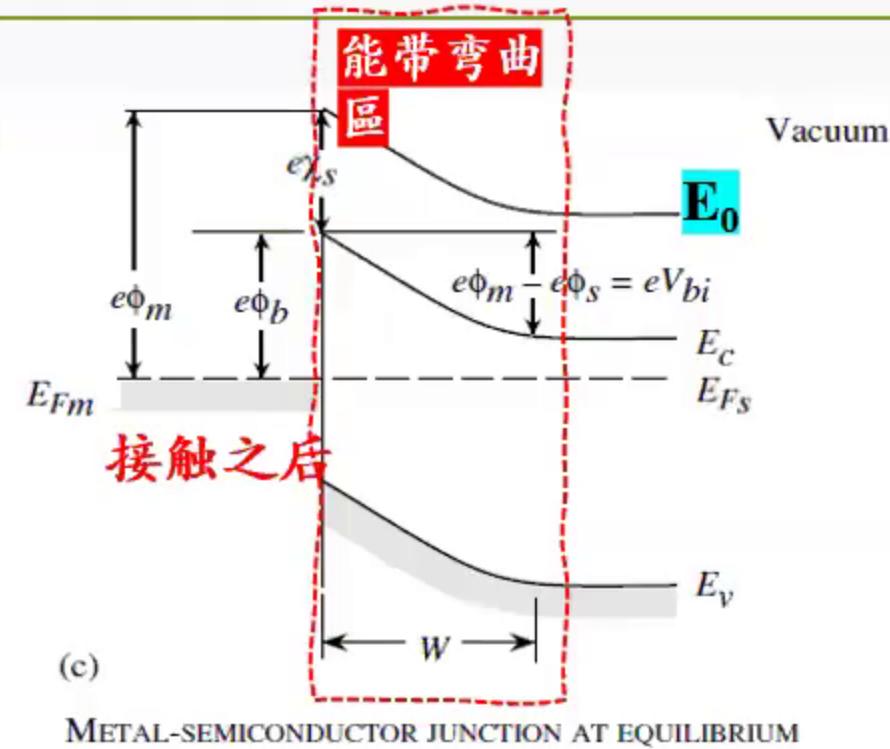
“半导皇后”與“金屬渣男”的亲密接触

試問：為何皇后臉面是向上仰望(能帶彎曲區向上翹)？

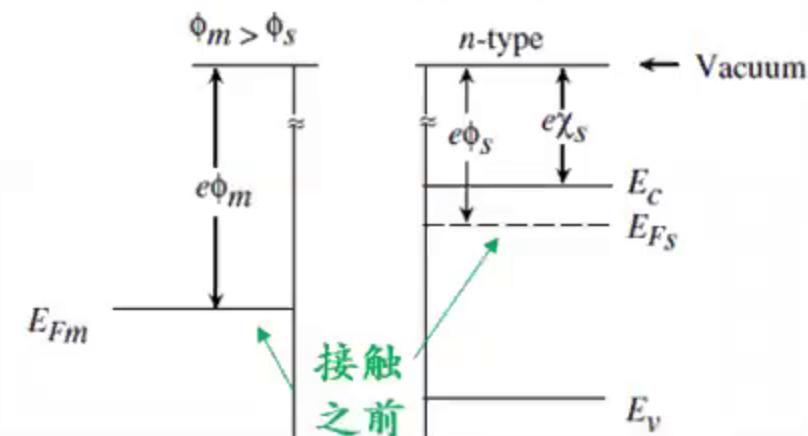
解答：這是個特例，其中有2个原因

1) 是因為絕對自由的位能($E_0 = \text{vacuum}$)，在接觸後，當然沒有改變

2) 渣男與皇后在接觸以後，皇后本身電子親和力 χ_s ，自然還是不變，然而右圖的假設是 $\phi_m > \phi_s$ ，在這個2個條件限制之下， E_{FM} 必須向上提升與 E_{Fs} 齊平後停止，所以皇后臉面只有仰望渣男囉



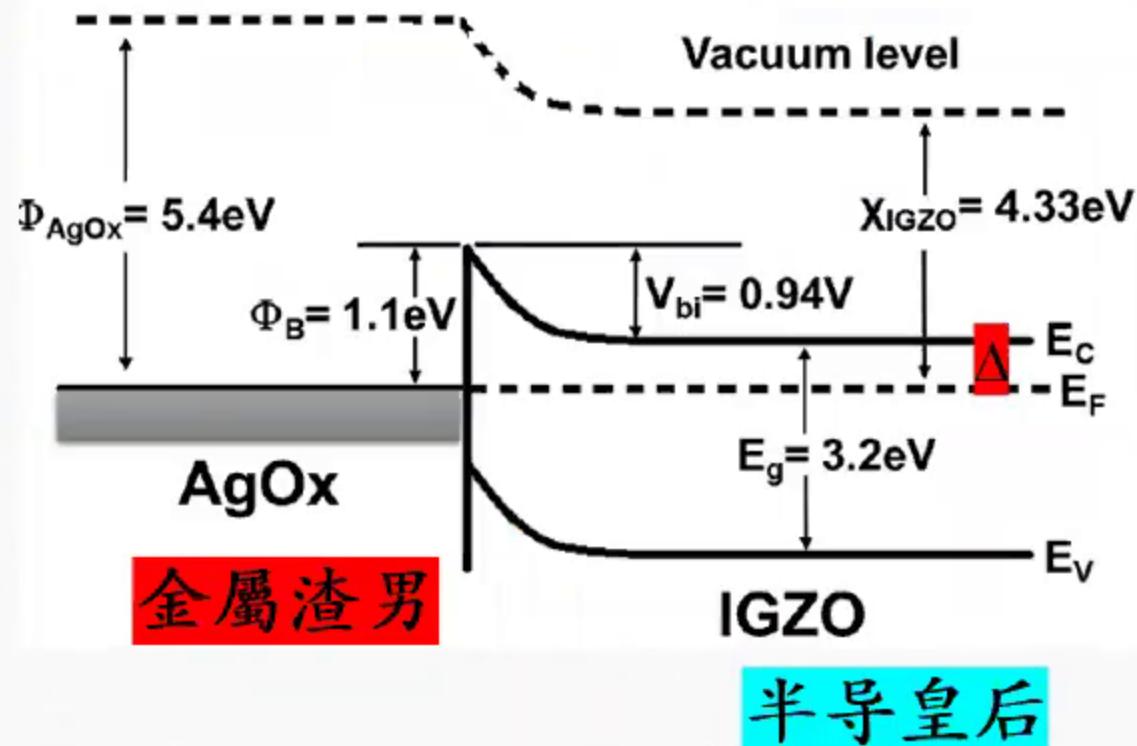
METAL-SEMICONDUCTOR JUNCTION AT EQUILIBRIUM



請目測: IGZO電子密度是 10^{18} 或 $10^{19}/\text{cm}^3$?

解答: 就看 E_f 是否很靠近 E_c ?

- E_f 是否很靠近 E_c , 可由 Δ 大小決定
 - $\Delta = \Phi_B - V_{bi} = 1.1 - 0.94 = 0.16\text{eV}$
- 上網找個 E_f 計算器(如下)
 - <https://www.pvlighthouse.com.au/bandgap>
- $N_D = 10^{18}/\text{cm}^3$ 時(Si), $\Delta=0.1\text{eV}$, 所以我們將心比心(IGZO)可以猜出答案: 10^{18}

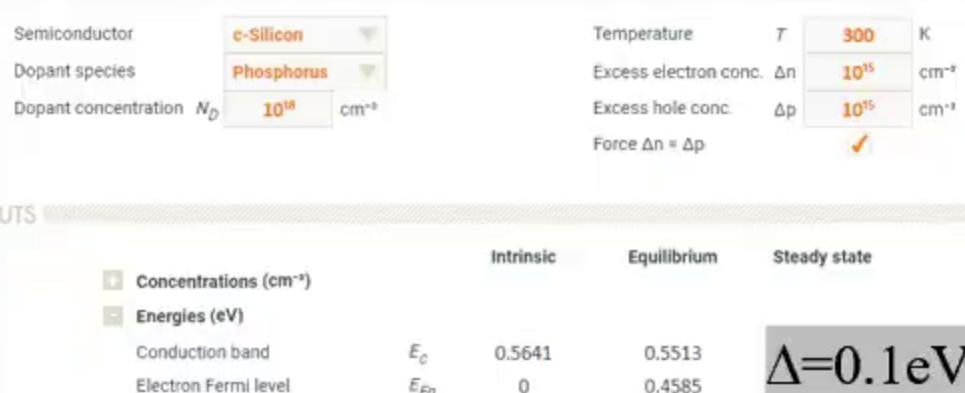
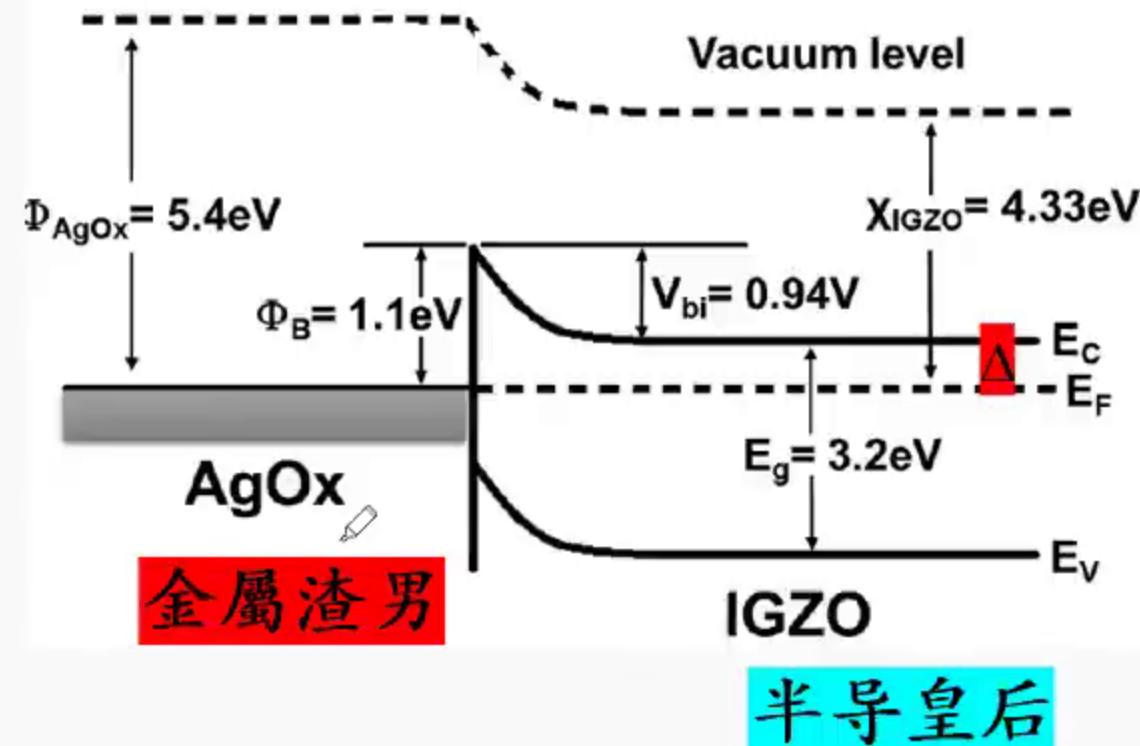


Schottky barrier diodes fabricated with metal oxides AgOx/IGZO, L.A. Santana,
Microelectronic Engineering 220 (2020) 111182

請目測: IGZO電子密度是 10^{18} 或 $10^{19}/\text{cm}^3$?

解答: 就看 E_f 是否很靠近 E_c ?

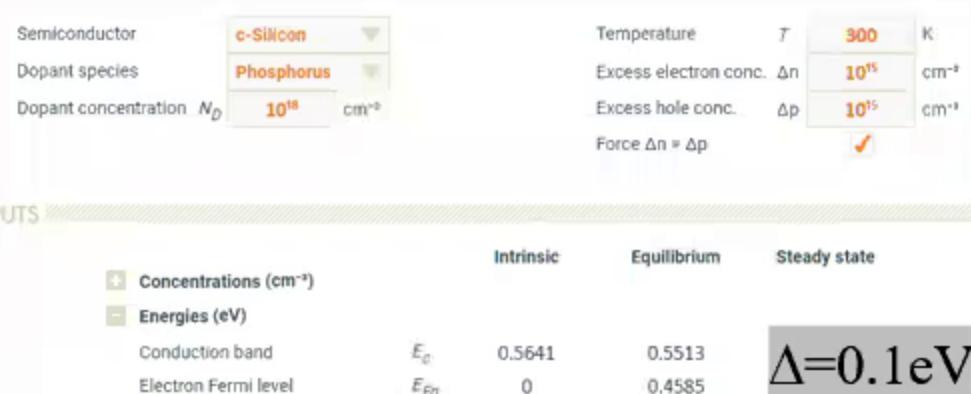
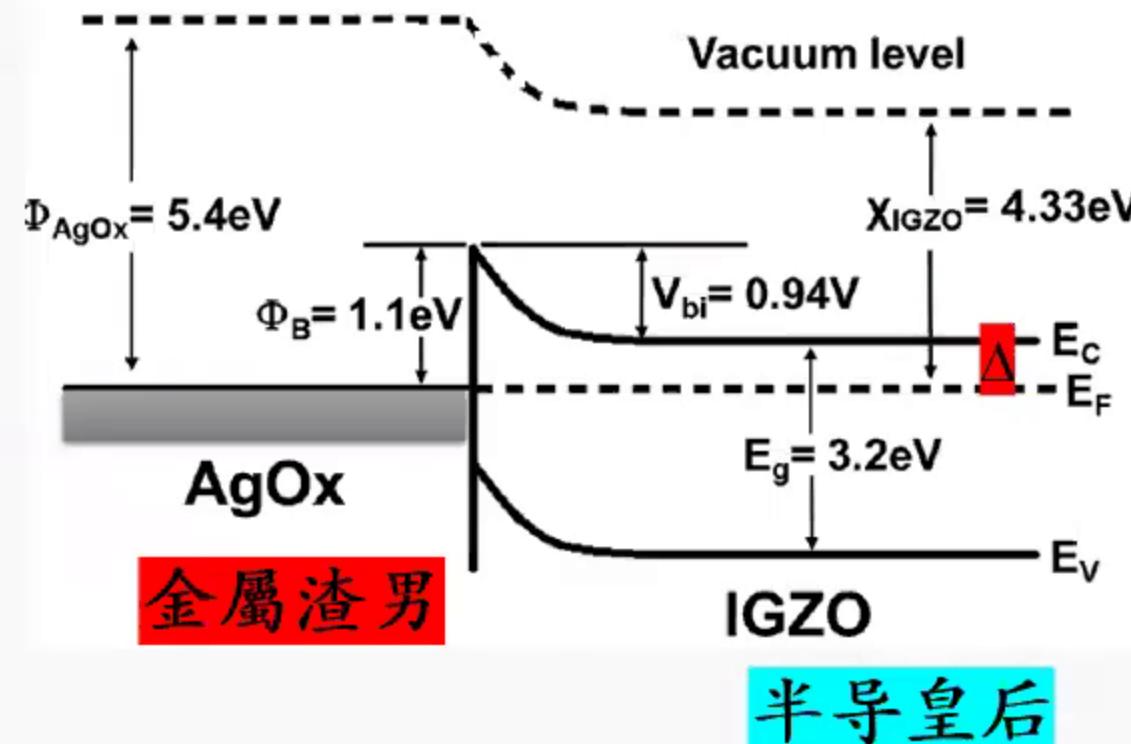
- E_f 是否很靠近 E_c , 可由 Δ 大小決定
 - $\Delta = \Phi_B - V_{bi} = 1.1 - 0.94 = 0.16\text{eV}$
- 上網找個 E_f 計算器(如下)
 - <https://www.pvlighthouse.com.au/bandgap>
- $N_D = 10^{18}/\text{cm}^3$ 時(Si), $\Delta=0.1\text{eV}$, 所以我們將心比心(IGZO)可以猜出答案: 10^{18}



請目測: IGZO電子密度是 10^{18} 或 $10^{19}/\text{cm}^3$?

解答: 就看 E_f 是否很靠近 E_c ?

- E_f 是否很靠近 E_c , 可由 Δ 大小決定
 - $\Delta = \Phi_B - V_{bi} = 1.1 - 0.94 = 0.16\text{eV}$
- 上網找個 E_f 計算器(如下)
 - <https://www.pvlighthouse.com.au/bandgap>
- $N_D = 10^{18}/\text{cm}^3$ 時(Si), $\Delta=0.1\text{eV}$, 所以我們將心比心(IGZO)可以猜出答案: 10^{18}



請問

解答：就

- E_f 是否
- Δ
- 上網找
- h
- $N_D =$
將心

pv Bandgap calculator

Band gap calculator

Status: Solved in 0.000226 s.

INPUTS

Semiconductor	c-Silicon	Dopant species	Phosphorus
Dopant concentration	$N_D = 10^{18}$ cm ⁻³		
Temperature	$T = 300$ K	Excess electron conc. $\Delta n = 10^{15}$ cm ⁻³	
Excess hole conc.	$\Delta p = 10^{15}$ cm ⁻³	Force $\Delta n = \Delta p$	<input checked="" type="checkbox"/>

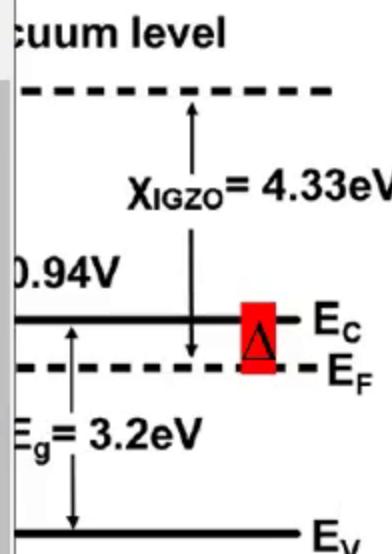
OUTPUTS

	Intrinsic	Equilibrium	Steady state
+ Concentrations (cm ⁻³)			
- Energies (eV)			
Conduction band	E_c	0.5641	0.5513
Electron Fermi level	E_{Fn}	0	0.4585
Hole Fermi level	E_{Fp}	0	0.4585
Valence band	E_v	-0.5662	-0.5523
Band gap	E_g	1.130	1.104
Band gap narrowing	ΔE_g	0	0.02675

PUTS

10/19/2021

/cm³?



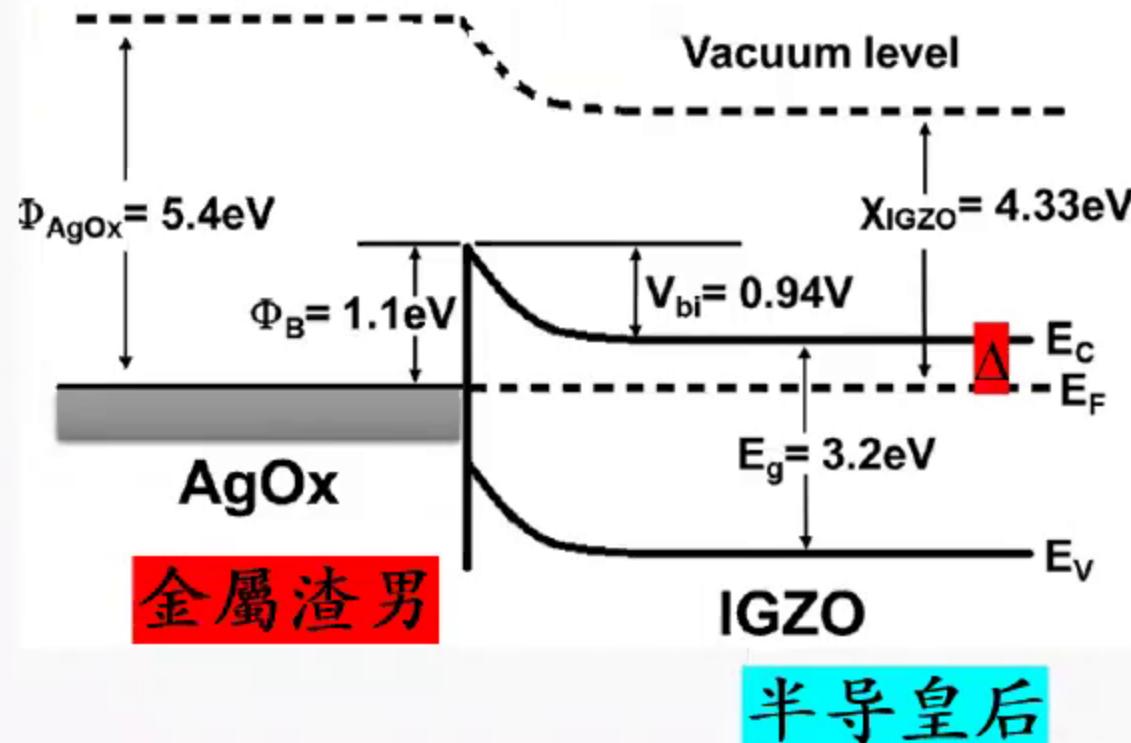
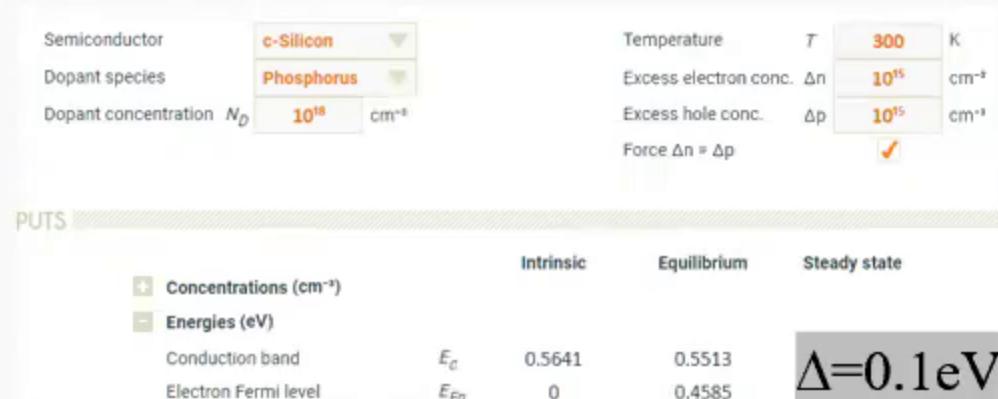
半导皇后

AgOx/IGZO, L.A. Santana,

請目測：IGZO電子密度是 10^{18} 或 $10^{19}/\text{cm}^3$ ？

解答：就看 E_f 是否很靠近 E_c ？

- E_f 是否很靠近 E_c ，可由 Δ 大小決定
 - $\Delta = \Phi_B - V_{bi} = 1.1 - 0.94 = 0.16\text{eV}$
- 上網找個 E_f 計算器(如下)
 - <https://www.pvlighthouse.com.au/bandgap>
- $N_D = 10^{18}/\text{cm}^3$ 時(Si)， $\Delta=0.1\text{eV}$ ，所以我們將心比心(IGZO)可以猜出答案： 10^{18}



請問

解答：就

- E_f 是否
- Δ
- 上網找
- h
- $N_D =$
將心

Band gap calculator

Status: Solved in 0.0956 s.

INPUTS

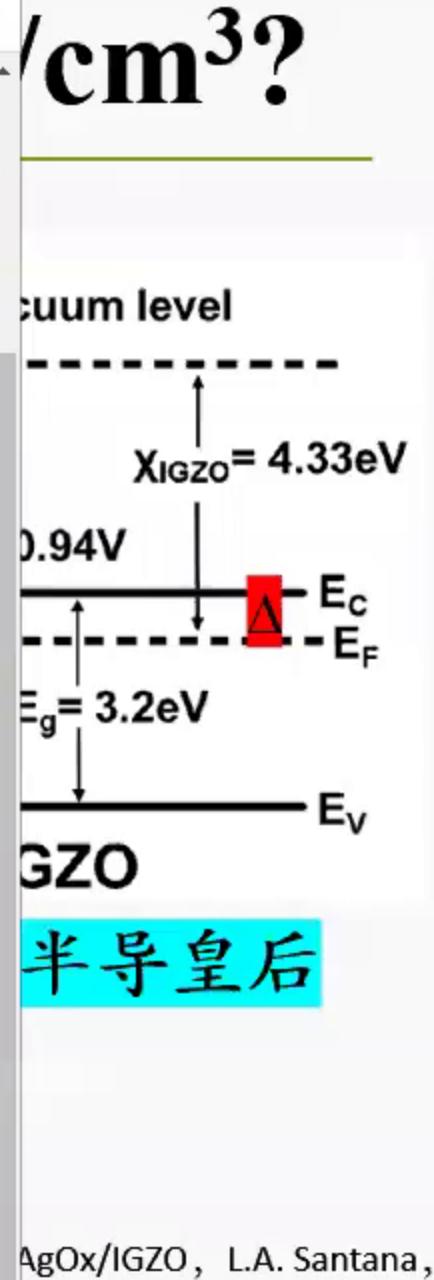
Semiconductor	c-Silicon	Dopant species	Phosphorus
Dopant concentration	$N_D = 10^{19}$ cm ⁻³		
Temperature	$T = 300$ K	Excess electron conc.	$\Delta n = 10^{15}$ cm ⁻³
Excess hole conc.	$\Delta p = 10^{15}$ cm ⁻³	Force $\Delta n = \Delta p$	

OUTPUTS

	Intrinsic	Equilibrium	Steady state
+ Concentrations (cm ⁻³)			
- Energies (eV)			
Conduction band	E_c	0.5641	0.5316
Electron Fermi level	E_{Fn}	0	0.5043
Hole Fermi level	E_{Fp}	0	0.5043
Valence band	E_v	-0.5662	-0.5454
Band gap	E_g	1.130	1.077
Band gap narrowing	ΔE_g	0	0.05335

PUTS

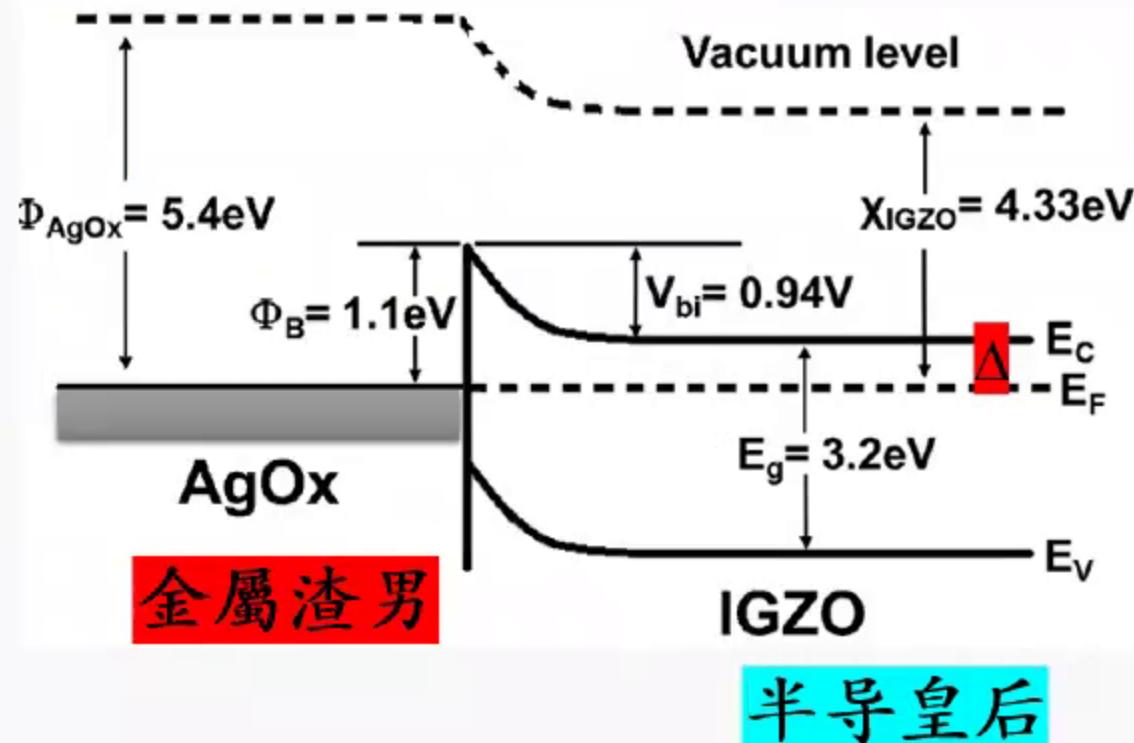
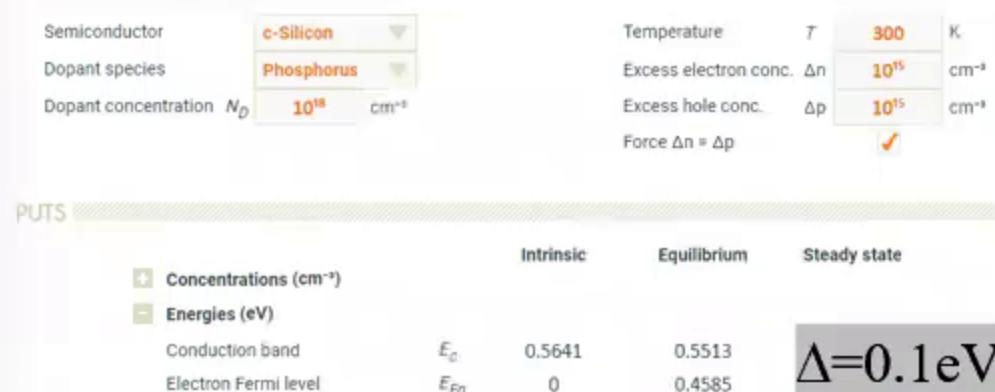
10/19/2021



請目測: IGZO電子密度是 10^{18} 或 $10^{19}/\text{cm}^3$?

解答: 就看 E_f 是否很靠近 E_c ?

- E_f 是否很靠近 E_c , 可由 Δ 大小決定
 - $\Delta = \Phi_B - V_{bi} = 1.1 - 0.94 = 0.16\text{eV}$
- 上網找個 E_f 計算器(如下)
 - <https://www.pvlighthouse.com.au/bandgap>
- $N_D = 10^{18}/\text{cm}^3$ 時(Si), $\Delta=0.1\text{eV}$, 所以我們將心比心(IGZO)可以猜出答案: 10^{18}



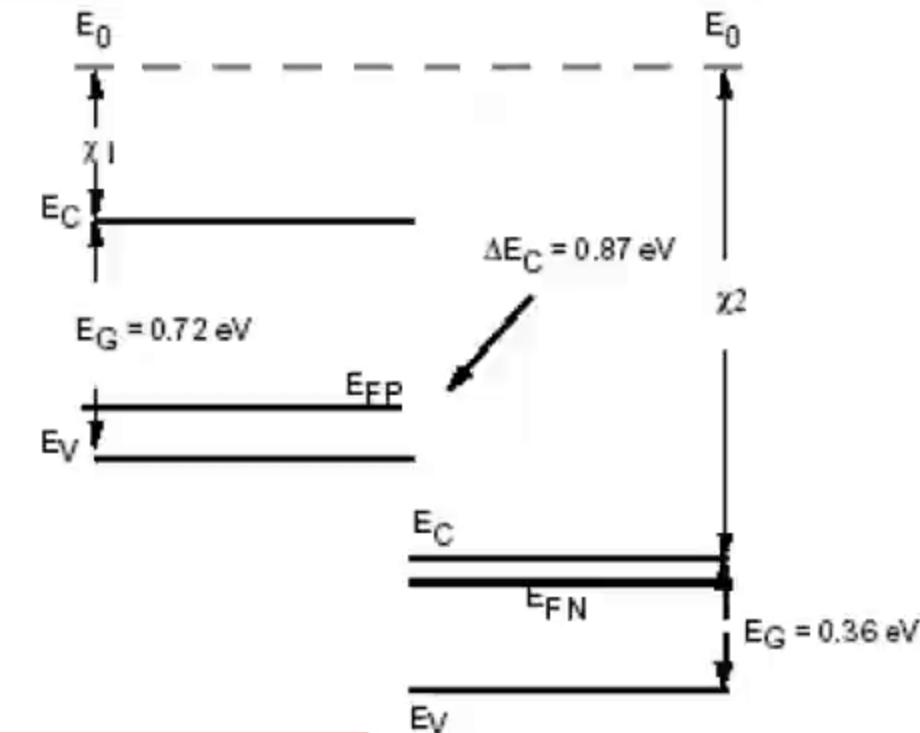
Schottky barrier diodes fabricated with metal oxides AgOx/IGZO, L.A. Santana,
Microelectronic Engineering 220 (2020) 111182

”半导皇后”與”半导皇帝”的亲密接触

已知：在半导界(如下)赫赫有名的半导皇后 InAs 與半导皇帝 GaSb 的亲密接触之前，其彼此能階量圖如右(明显的，他们个性非常不一样)

- Semiconductor lasers (Used in Compact Disk---CD player)
- High-efficient LED's(heterostructure light-emitting diodes) and low-noise, high-electron-mobility transistors(HEMTs) used in high-frequency devices
- Solar cells and photodetectors,based on wide-gap window effect.
- Bipolar wide-gap transistors
- High-power diodes and thyristors
- Infrared to visible converters

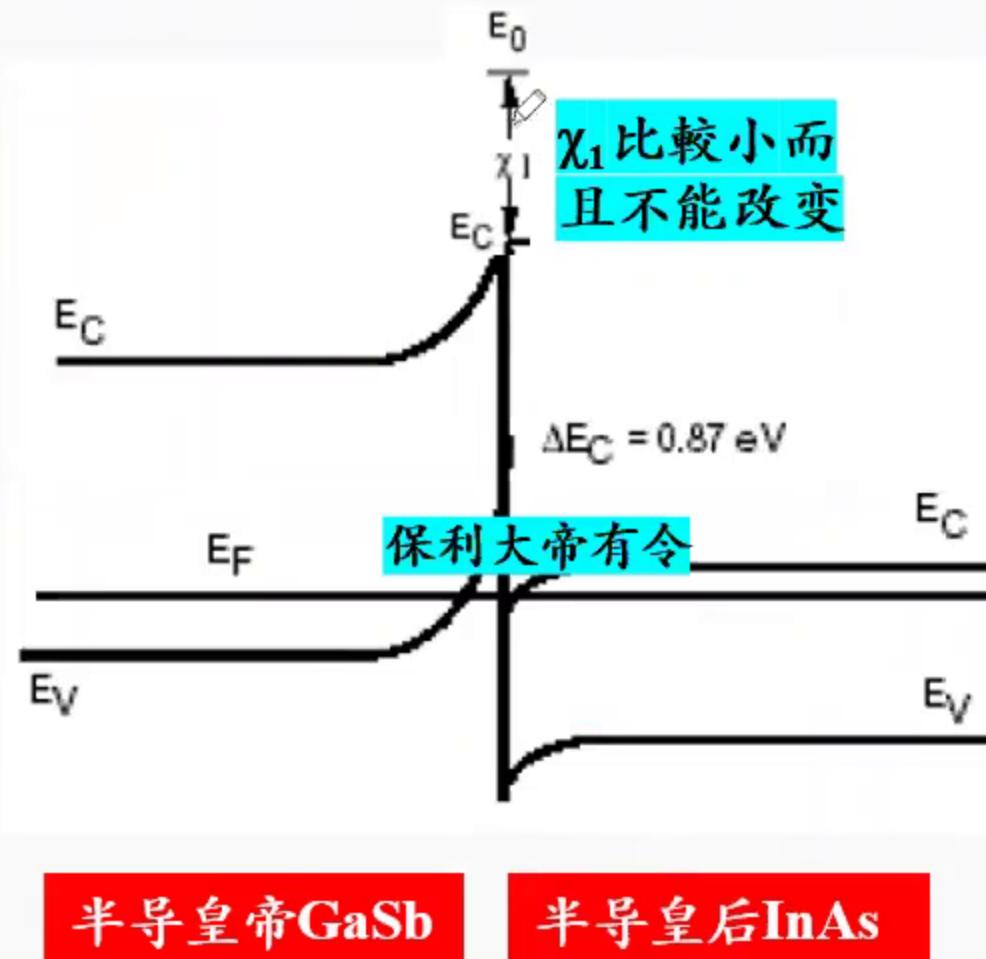
試問：二者亲密接触以后，皇后臉面是仰還是俯視？



”半导皇后”與”半导皇帝”的亲密接触

解答：已前為例有2个值是不能动的，他们是

1. 电子亲和力 χ 必须保持不变
 2. 费米能阶 E_F 必须齊平(保利大帝有令也)
- 所以半导皇帝GaSb必須下移，但是他的电子亲和力 χ_1 比較小且不能变，是以半导皇帝脸面被逼的只有仰望，皇后则必須俯視了
 - 因为没有电流流动，电荷之和必为零，所以一个往上翘就必须另外一个要往下俯視
 - 此二者接触以后产生的能阶上翘與俯視，乃是相關電子元件特殊功能(例如雷射)的根源



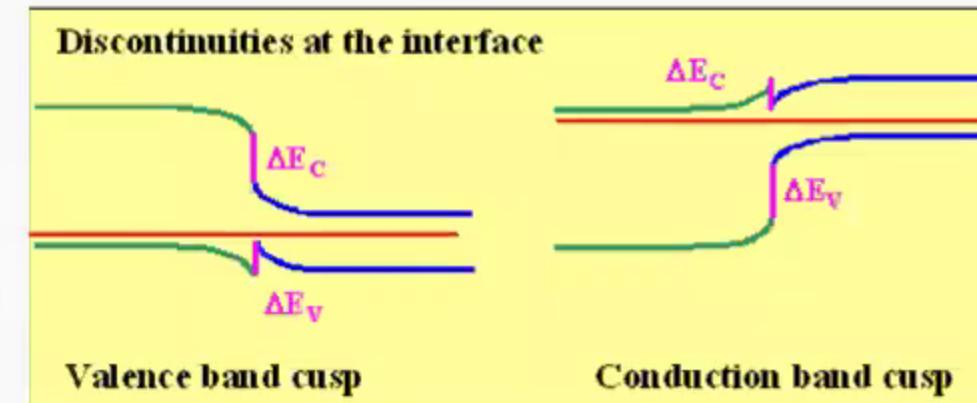
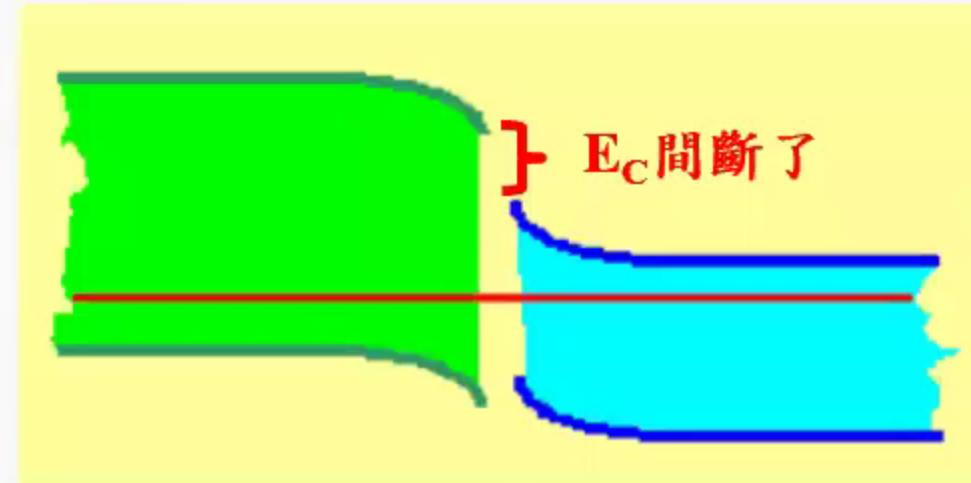
亲密接触後才發現"力不從心"

已知:InAs與GaSb亲密接触後，竟发现有些力不从心， E_C 能阶竟然无法完全密接(如右上中斷現象)

試問:为何如此?是件壞事嗎?

解答:

- 这其实不奇怪，因为二者之电子亲和力各有不同
 - $\Delta E_C = q(\chi_2 - \chi_1)$
- 能阶臉面仰望或俯視的趨勢照舊，但是在接縫處會有一個間斷區(如右下图)，似是无可奈何的事
- 但這不见得是坏事，有时候这种特性反而会造成元件的一些特殊功能，因为这种间斷提供电子在某方向会特別容易流动(相反方向则非常不易)



https://www.tf.uni-kiel.de/matlwis/amat/semi_en/kap_5/backbone/r5_3_1.html

Anderson's rule = 齊頭式平等造成面孔扭曲

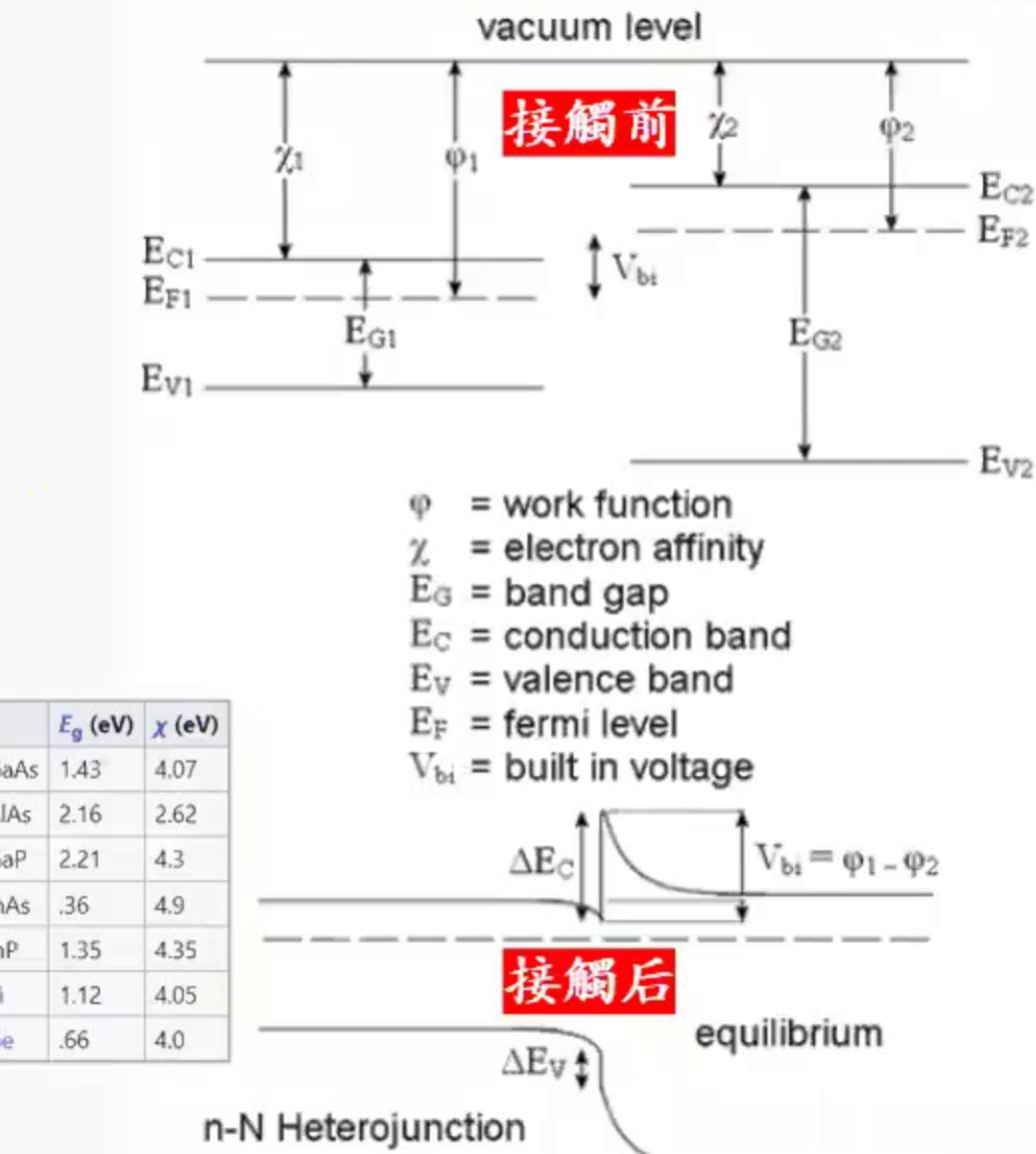
試問：若有二半導的能階如右上圖所示，哪麼當二者有最親密接觸時，會發生什麼事？

解答：Anderson 研究發現，其實在此二半導內，遠離介面的地方，山高皇帝遠，一切照舊，沒人搭理介面到底發生了什麼事，介面能階無處可訴冤苦，只有“委曲求全”，扭曲自己的介面能格如右下圖：

$$\Delta E_c = (\chi_2 - \chi_1)$$

$$\Delta E_v = (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2})$$

- 注意：齊頭式平等的原因是因為遠離介面的地方，一切照舊，vacuum level, E_g , χ 等，都不能變也，至於介面能階斷續處的 ΔE_c 與 ΔE_v 的大小，卻沒人真正知道



Anderson's rule = 齊頭式平等造成面孔扭曲

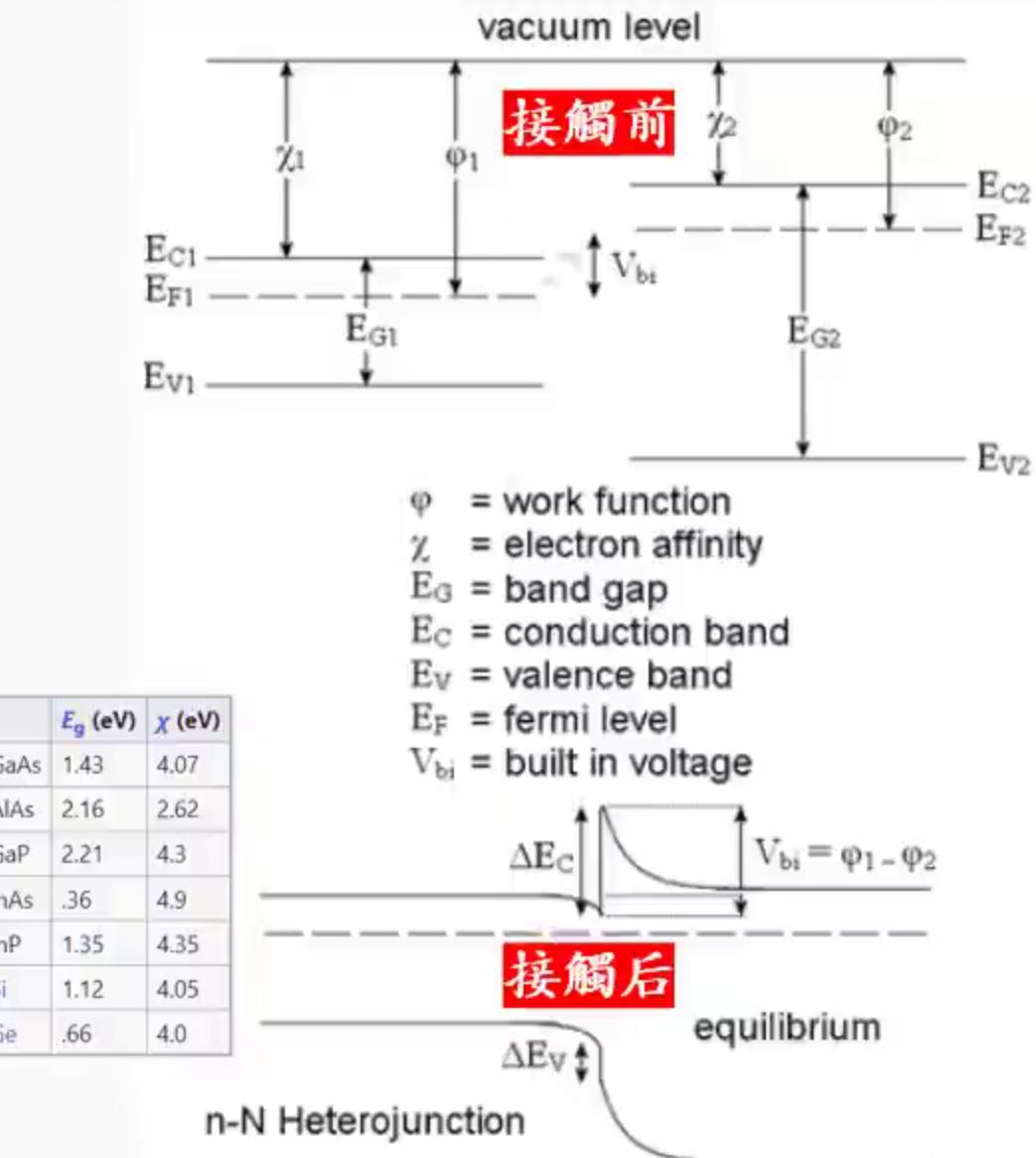
試問：若有二半導的能階如右上圖所示，哪麼當二者有最親密接觸時，會發生什麼事？

解答：Anderson 研究發現，其實在此二半導內，遠離介面的地方，山高皇帝遠，一切照舊，沒人搭理介面到底發生了什麼事，介面能階無處可訴冤苦，只有“委曲求全”，扭曲自己的介面能格如右下圖：

$$\Delta E_c = (\chi_2 - \chi_1)$$

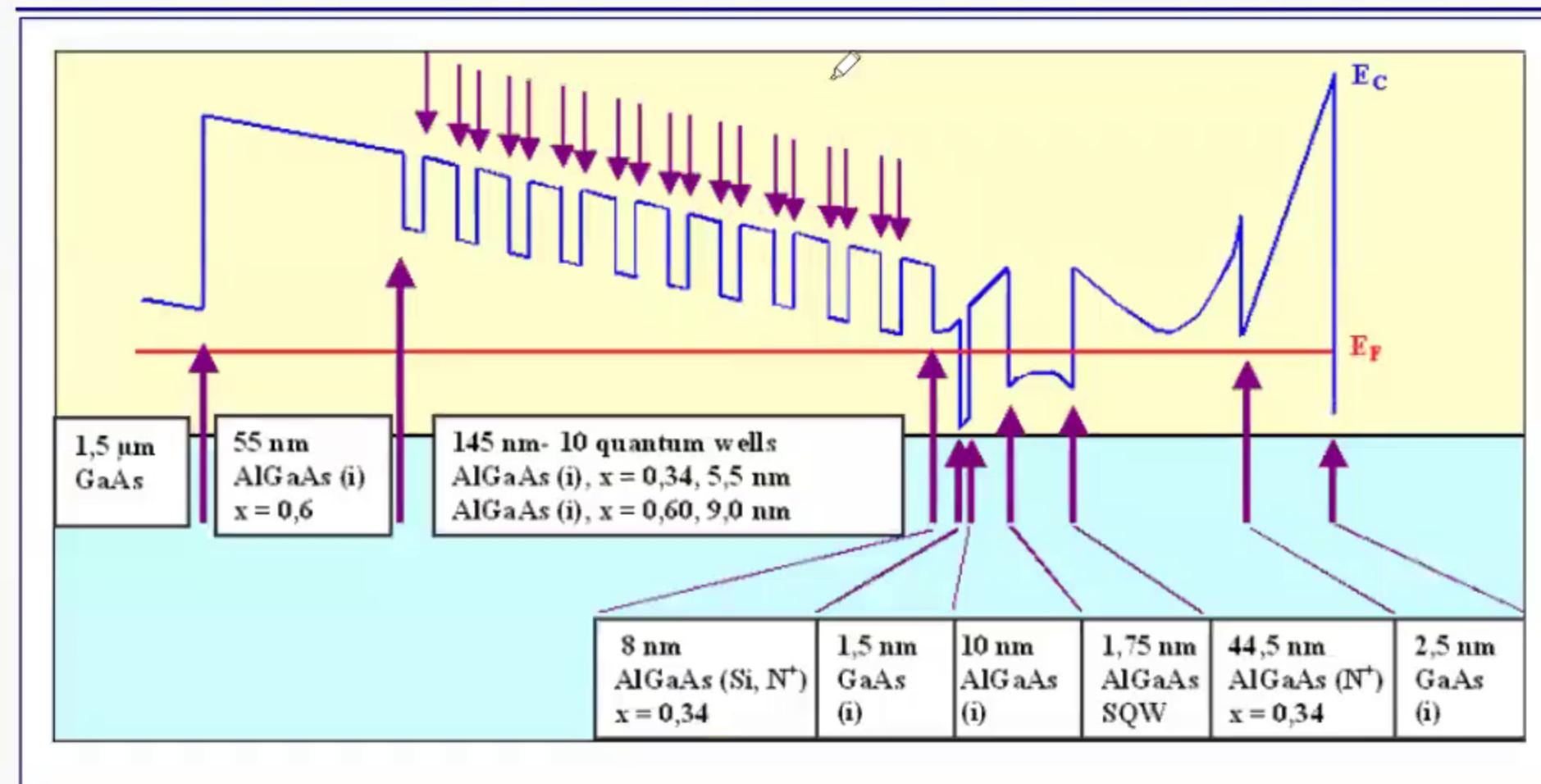
$$\Delta E_v = (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2})$$

- 注意：齊頭式平等的原因是因為遠離介面的地方，一切照舊，vacuum level, E_g , χ 等，都不能變也，至於介面能階斷續處的 ΔE_c 與 ΔE_v 的大小，卻沒人真正知道



打群架IIIIV族:超級訊號放放大器

- 以下是一个著名的三五族放大器，这么多能階层次，高手利用其彼此之間的交互作用，玩弄電子在其間的行動(或快或慢)，竟然可以产生巨大的作用



半导兒童不宜篇

-半导皇后與皇帝的亲密接触

Heterojunction Band Alignment

王不老說半导