

# n-Si 低剂量 $B^+$ 、 $P^+$ 离子注入 产生的缺陷及其退火特性

陈建新<sup>†</sup> 李名复 李言谨

(中国科学技术大学研究生院)

1985年5月9日收到

对 n-Si 低剂量 ( $10^{11}\text{cm}^{-2}$ )  $B^+$  和  $P^+$  离子注入产生的电子和空穴陷阱及其热退火行为。用 DLTS 方法作了迄今最完整的研究。首次报道了空穴陷阱。注  $B^+$  引入五种空穴陷阱: 高浓度的  $H_2(0.62)$  和  $H_3(0.43)$  两种可能与 B 有关的受主陷阱, 还有  $H_4(0.37)$ ,  $H_1(0.63)$  和  $H_5(0.15)$ ,  $H_4$  可能是与 C 有关的受主缺陷, 注  $P^+$  引入四种空穴陷阱: 高浓度的  $H_1'(0.51)$ , 也引入  $H_4(0.37)$ ,  $H_1(0.63)$  和类似  $H_2$  的  $H_2'$ 。同时报道了注  $B^+$  引入七种和注  $P^+$  引入三种电子陷阱。注  $B^+$  引入可能与 B 有关的受主  $E_3(0.35)$ , 在  $280^\circ\text{C}$  退火时有高浓度, 在  $320^\circ\text{C}$  退火后激烈退化。另外三种  $E_2(0.41)$ ,  $E_4(0.25)$ ,  $E_5(0.15)$  在注  $B^+$  和注  $P^+$  情况都测到, 并基本符合过去离子、中子或电子辐照普遍报道的缺陷能级。研究了上述所有缺陷的退火行为, 在  $800^\circ\text{C}$  退火后, 所有缺陷都退至  $10^{12}\text{cm}^{-3}$  平均浓度以下。

## 一、引 言

离子注入已成为当前集成电路工艺中掺杂的重要手段<sup>[1,2]</sup>, 与热扩散掺杂相比, 它可以形成更浅而均匀的结, 更精确地控制掺杂浓度和深度, 而且它还与当前流行的低温工艺相适应。离子注入作为掺杂工艺, 其工艺温度决定于: 一、掺杂的电激活。杂质在退火条件下进入替位从而在禁带边形成一个有效的施主或受主能级。二、离子注入引入的缺陷<sup>[3-7]</sup>, 特别是有效复合中心的深能级的退火特性。这些深能级对器件成品率和器件特性至关重要。本工作是我们系统研究低温工艺中缺陷问题的开端。

本文讨论低剂量 ( $10^{11}\text{cm}^{-2}$ )  $B^+$  和  $P^+$  离子注入 n-Si 引入的简单缺陷及其热退火特性, 它在工艺上有其重要性, 比如调整 MOS 工艺中的阈值电压<sup>[8]</sup>, 而又落入通常 DLTS 的测量范围。

## 二、实 验 方 法

样品: 用 605 厂生产的 CZ (111) 面 n-Si 单晶, 分别用四探针测电阻率为  $0.31\ \Omega\text{-cm}$  以及 C-V 测量算得相符的掺 P 浓度为  $2.3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 。为获得完整的电子和空穴陷阱信

<sup>†</sup> 北京工业大学无线电系教员。

息,制作浅  $P^+N$  结作探测器,在样品背面扩浓  $P$  以形成良好的欧姆接触,在样品正面长氧化层并开  $\phi = 600$  微米窗口,注入  $20 \text{ keV}$  的  $B^+$ ,剂量  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ,然后在  $850^\circ\text{C}$  高纯氮中热退火 20 分钟,做成的  $P^+N$  结深约  $0.2$  微米。用 DLTS 谱仪检测,没有发现可测到的深能级。进而将这些片子分别注低剂量的  $B^+$  和  $P^+$ 。注  $B^+$  条件  $200 \text{ keV}$ ,  $2.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,算得其峰位在离表面  $0.53$  微米处,峰高浓度为  $1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,这样注入的条件不致形成反型,而又落入瞬态测量范围<sup>[9]</sup>。注  $P^+$  条件为  $240 \text{ keV}$ ,剂量  $4.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,算得其峰位在离表面  $0.31$  微米处,峰高浓度为  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。注入时片子对离子束倾斜一小角度以避免沟道效应,注  $B^+$  样片分别在高纯氮气中  $280-800^\circ\text{C}$  范围内以 14 个不同温度等时退火 15 分钟。注  $P^+$  样片在同样的温度范围内用 7 个不同温度分别退火 15 分钟。退火以后在低于  $200^\circ\text{C}$  条件下蒸铝电极和超声压焊。每一种退火温度做 2—3 个样管,以资比较。一共制成约 50 个样管以供测量。

测量:由于个别的深能级具有较小的俘获截面,因此注意调整了 DLTS 填充脉冲宽度。(一般用  $100 \mu\text{s}$ )使测得的 DLTS 峰都达到饱和。另外,调整偏压大小,使作用区盖过离子注入射程。(注  $B^+$  管偏压 10 伏,注  $P^+$  管偏压 6 伏)。我们用通常的浓度公式从 DLTS 峰高估算深能级浓度<sup>[10]</sup>,它仅在均匀分布以及不考虑边区效应时成立。对于离子注入情况由于缺陷集中在狭窄的峰区<sup>[9]</sup>,所以峰区缺陷浓度实际上要大很多。

每一块样品分别用正注入和非正注入条件测两个 DLTS 谱。正注入时可获得少子(空穴)陷阱的 DLTS 峰<sup>[10]</sup>。测量时调整正注入脉冲的高度和宽度使瞬态讯号达到饱和。此时瞬态过程的初始时间,陷阱被电子占据的几率为<sup>[11]</sup>:

$$\eta = \frac{C_n}{C_n + C_p} \quad (1)$$

其中  $C_n$ 、 $C_p$  分别为陷阱对电子和空穴的俘获率。由于从正注入到反偏的恢复过程不够快,实际的瞬态初始时间陷阱被电子占据的几率比(1)式算得的还要大些<sup>[11]</sup>。因此,在  $n\text{-Si}$  中对空穴陷阱由 DLTS 饱和注入峰高仅能估算空穴陷阱浓度的下限。

另一方面,如果  $C_p \gg C_n$ ,则  $\eta \rightarrow 0$ ,此时电子陷阱 DLTS 峰消失,电子陷阱峰也可能被大的空穴陷阱峰淹没。因此,分别用正注入和非正注入条件独立测量两次 DLTS 谱是必要的。

### 三、实验结果

我们用了一年半时间制作样管和进行反复的测量。实验结果归结在表 1—2 和图 1—6 中。它们总结了  $n\text{-Si}$  中低剂量注  $B^+$  和  $P^+$  所产生的缺陷能级,用 DLTS 方法在  $77-350 \text{ K}$  温度范围内所能测到的迄今最完整的电子和空穴陷阱的能级和退火行为。

由下列熟知公式:

$$c_n = g_n \sigma_n \bar{V}_n N_c e^{-(E_c - E_T)/kT} \quad (2n)$$

其中  $c_n$  为电子发射率,  $\sigma_n$  为电子俘获截面,  $\bar{V}_n$  为电子热运动速度;  $N_c$  为  $\text{Si}$  导带底  $E_c$  处有效能级密度<sup>[12]</sup>;  $E_T$  为缺陷能级;  $g_n$  为缺陷态简并因子。用  $\text{Si}$  电子质量  $= 0.32$  自由电子质量,从(2n)式算得:

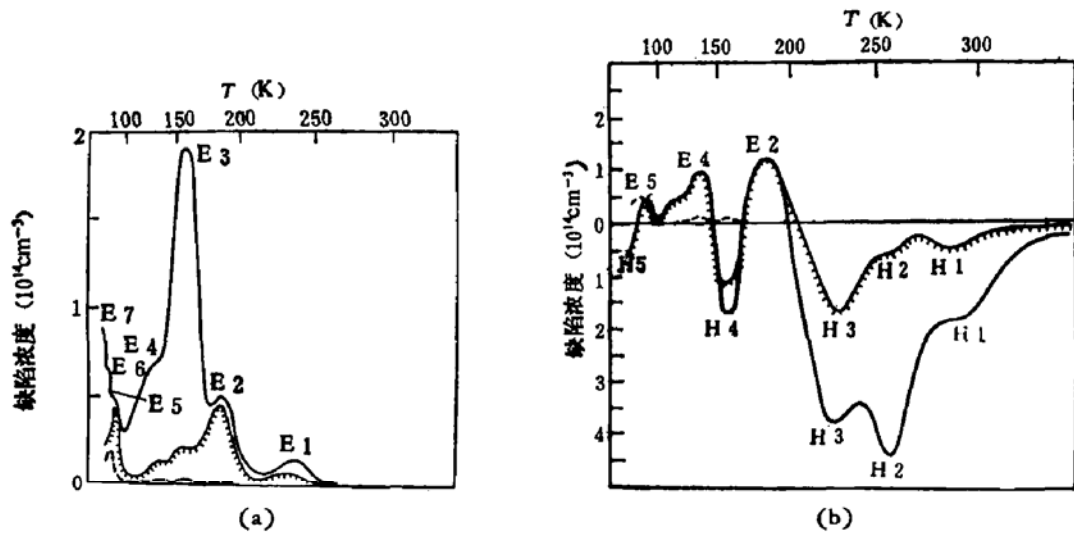


图1 n-Si 注 B<sup>+</sup> (200keV,  $2.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ) 引入的陷阱 DLTS 谱及其退火行为. DLTS 率窗 676mV  
(a) 非正注入电子陷阱 DLTS 谱 (b) 正注入后空穴和电子陷阱 DLTS 谱、图中缺陷浓度为用通常浓度公式算得的平均值<sup>[10]</sup>

—— 280°C AT ..... 445°C AT ---- 600°C AT

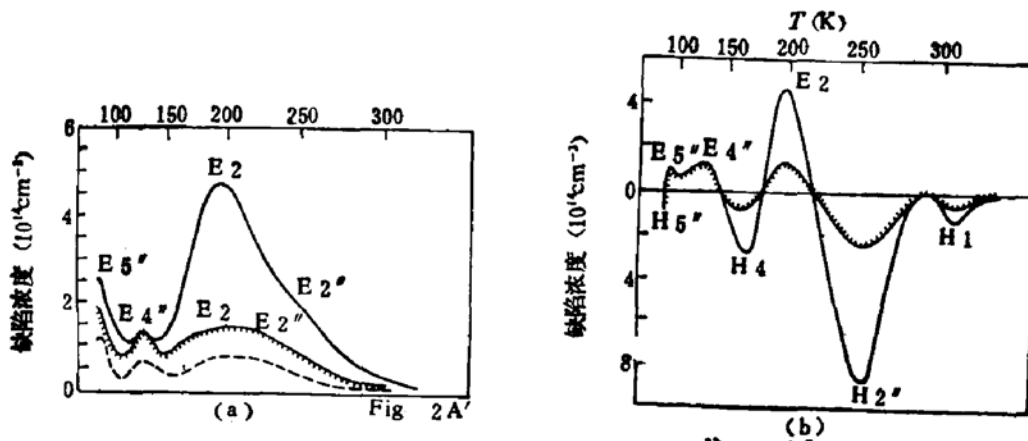


图2 图2与图1同但注 P<sup>+</sup> (240keV,  $4.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ )

图2 (a)

图2 (b)

—— 280°C AT ..... 445°C AT ---- 600°C AT

280°C AT ..... 400°C AT

$$\ln\left(\frac{c_n}{T^2}\right) = \ln(\sigma_n g_n) + 49.9 - \frac{E_c - E_T}{kT} \quad (3n)$$

由图3直线斜率在  $\frac{1}{T} = 0$  处截距按 (3n) 式算得能级  $E_c - E_T$  和准电子俘获截面  $g_n \sigma_n$ . 已经知道  $g_n$  除电子简并态贡献之外, 还有晶格振动熵变化的贡献. 而 (2n) 式中  $(E_c - E_T)$  更准确地应理解为电子跃迁时焓的改变, 它本身随温度弱变<sup>[13]</sup>. 因此用图3直线截距求得的准电子俘获截面  $g_n \sigma_n$  与直接测到的零电场下电子俘获截面  $\sigma_n$  可以有数量级的差别, 另外, 我们的 DLTS 窗口范围为 4 ms—2s, 不到三个数量级, 由直线外推至  $\frac{1}{T} = 0$  处的截距本身有较大的实验误差. 所以本文所获得的准俘获截面  $g_n \sigma_n$  仅仅作为一个供参考的参数. 类似的讨论用于空穴陷阱, 有相应的公式:

$$c_p = g_p \sigma_p \bar{V}_p N_V e^{-(E_T - E_V)/kT} \quad (2p)$$

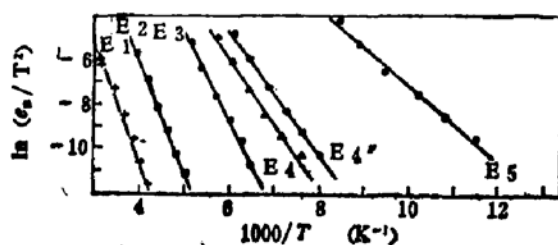
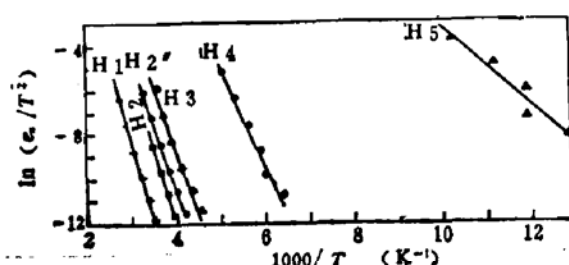
用 Si 空穴质量 = 0.59 自由电子质量, 从 (2p) 式算得:

表1 n-Si 中低剂量注 B<sup>+</sup> (200keV,  $2.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ ) 产生的陷阱能级

| 电子陷阱<br>$E_C - E_T (\text{eV})$ | 准俘获截面<br>$g_p \sigma_p (\text{cm}^2)$ | 电荷状态和识别                       | 相 对 浓 度 和 退 火 特 征                                                            |
|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $E_1$                           | $2 \times 10^{-11}$                   |                               | 浓度小, 280—600°C 逐渐退完                                                          |
| $E_2$                           | $5 \times 10^{-16}$                   | 双空位第一受主 $V_2^-$ 和 E 中心 (P, V) | 320°C 以后成为主要电子陷阱<br>445°C 开始退化, 600°C 退完                                     |
| $E_3$                           | $3 \times 10^{-15}$                   | 受主、含 B 次级缺陷                   | 280°C 时为主要电子陷阱, 320°C 即强烈退化<br>600°C 退完                                      |
| $E_4$                           | $7 \times 10^{-17}$                   | 双空位第二受主 $V_2^{--}$            | 浓度小, 一直到 600°C 以上才退完                                                         |
| $E_5$                           | $2 \times 10^{-17}$                   | A 中心 (O, V)                   | 500°C 以下与 $E_2$ 有相近的浓度和退火特性, 500°C 以上比<br>$E_2$ 退得更慢, 600°C 成为主要陷阱, 700°C 退完 |
| $E_6, E_7$                      | 太浅无法测准, 可能与 B 有关                      |                               |                                                                              |
| 空穴陷阱<br>$E_T - E_V (\text{eV})$ | 准俘获截面<br>$g_p \sigma_p (\text{cm}^2)$ | 电荷状态和识别                       | 相 对 浓 度 和 退 火 特 性                                                            |
| $H_1$                           | $2 \times 10^{-15}$                   | 不含 B                          | 浓度小 280—500°C 逐渐退完                                                           |
| $H_2$                           | $4 \times 10^{-16}$                   | 受主、含 B 次级缺陷                   | 280°C 时为主要空穴陷阱, 升温时激烈退化至 445°C 已很少<br>500°C 退完                               |
| $H_3$                           | $3 \times 10^{-15}$                   | 受主、含 B 次级缺陷                   | 445°C 以前不退化且有较大浓度, 380°C 以后成为主要空穴<br>陷阱, 445—500°C 很快退完                      |
| $H_4$                           | $3 \times 10^{-16}$                   | 受主缺陷 $C_I \cdot C_S$ 或 V.C.O  | 500°C 成为主要空穴陷阱, 600°C 退完                                                     |
| $H_5$                           | $4 \times 10^{-15}$                   |                               | 445°C 以前不退化, 至 600°C 还未退完, 700°C 以上退完                                        |

表 2 n-Si 中低剂量注  $P^+$  ( $240\text{keV}$ ,  $4.4 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ ) 产生的陷阱能级

|         | 电子陷阱<br>$E_C - E_T (\text{eV})$ | 准俘获截面<br>$g_n \sigma_n (\text{cm}^2)$ | 荷电状态和识别                                            | 相对浓度和退火特性                                                                                                                                          |
|---------|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_1$   | 0.41                            | $5 \times 10^{-16}$                   | 双空位第一受主 $V_2^-$ 和 E 中心 ( $P, V$ ), 可能还有其它和 P 有关的能级 | 有反常大的峰宽, $280^\circ\text{C}$ 时为主要电子陷阱, 退火可分为两段, $280-400^\circ\text{C}$ 时退火较快, $400^\circ\text{C}$ 至 $600^\circ\text{C}$ 较慢 $600^\circ\text{C}$ 退完 |
| $E_1''$ | 无法测准                            |                                       | 可能和 P 有关                                           |                                                                                                                                                    |
| $E_4''$ | 0.25                            | $1 \times 10^{-16}$                   | 可能是双空位第二受主 $V_2^-$                                 | 浓度小, 但退火温度至 $600^\circ\text{C}$ 以上才退完                                                                                                              |
| $E_5''$ | 0.15                            | $6 \times 10^{-15}$                   | 可能是 A 中心 ( $O, V$ )                                | 退火较慢, $400^\circ\text{C}$ 以上成为主要的电子陷阱, $600^\circ\text{C}$ 以上才退完                                                                                   |
|         | 空穴陷阱<br>$E_T - E_V (\text{eV})$ | 准俘获截面<br>$g_p \sigma_p (\text{cm}^2)$ | 荷电状态和识别                                            | 相对浓度和退火特性                                                                                                                                          |
| $H_1$   | 0.63                            | $2 \times 10^{-15}$                   |                                                    | 浓度小, 退火行为与注 $B^+$ 情况相似                                                                                                                             |
| $H_1''$ | 0.51                            | $1 \times 10^{-15}$                   |                                                    | $300-400^\circ\text{C}$ 退化快, $400^\circ\text{C}$ 以上退化慢至 $600^\circ\text{C}$ 退完                                                                     |
| $H_4$   | 0.37                            | $3 \times 10^{-14}$                   | $C_1 \cdot C_5$ 或 $V \cdot C \cdot O$ 受主           | $280-600^\circ\text{C}$ 逐渐退完                                                                                                                       |
| $H_5''$ | 无法测准                            |                                       |                                                    |                                                                                                                                                    |

图 3 图 1 和图 2 中不同率窗 ( $4.7\text{ms}-2\text{s}$ ) DLTS 峰对应的电子陷阱 Arrhenius 图图 4 图 1 和图 2 中不同率窗 ( $4.7\text{ms}-2\text{s}$ ) DLTS 峰对应的空穴陷阱 Arrhenius 图

$$\ln\left(\frac{c_p}{T^2}\right) = \ln(g_p \sigma_p) + 48.6 - \frac{E_T - E_V}{kT} \quad (3p)$$

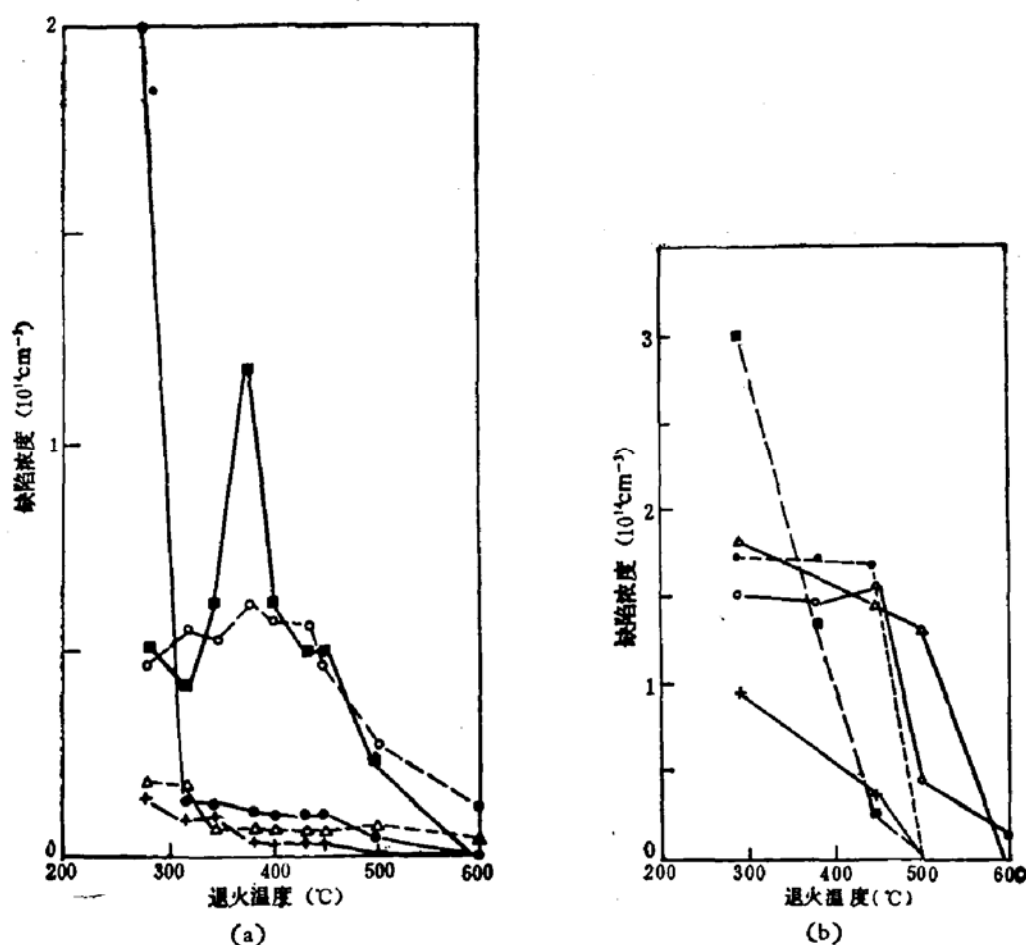
由图 4 直线可求出空穴能级  $E_T - E_V$  和准空穴俘获截面  $g_p \sigma_p$ 。

注  $B^+$  和  $P^+$  n-Si 的电子和空穴陷阱 DLTS 谱分别示于图 1, 2。诸电子和空穴能级的 Arrhenius 图分别示于图 3, 4。该图用最小二乘法拟合直线然后用 (3n) (3p) 式算得的能级和准俘获截面值列于表 1, 2。图 5, 6 分别给出注  $B^+$  和注  $P^+$  样品缺陷的更详细的等时退火行为, 退火时间 15 分钟。

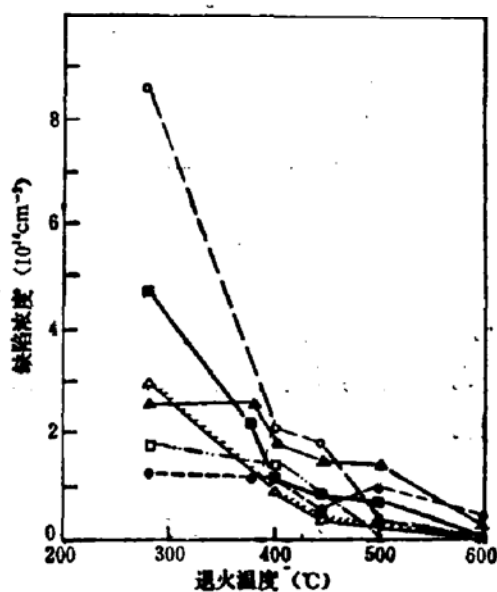
## 四、讨 论

### 1. 电子陷阱:

在注  $B^+$  n-Si 中, 一共测到七种电子陷阱。注  $P^+$  n-Si 中一共测到 3 种电子陷阱, 见表

图 5 n-Si 注 B<sup>+</sup> 引入陷阱的退火行为

(a) 电子陷阱 +  $E_1(0.45)$  ■  $E_1(0.41)$  ●  $E_2(0.35)$  ▲  $E_4(0.25)$  ○  $E_5(0.15)$   
 (b) 空穴陷阱 +  $H_1(0.63)$  ■  $H_2(0.62)$  ●  $H_3(0.49)$  ▲  $H_4(0.37)$  ○  $H_5(0.15)$

图 6 n-Si 注 P<sup>+</sup> 引入陷阱的退火行为

■  $E_2(0.41)$  ●  $E_2'(0.25)$  ▲  $E_2''(0.15)$  □  $H_1(0.63)$  ⊖  $H_1''(0.51)$  ▲  $H_4(0.37)$

1,2.

 $E_3(0.35)$ 、 $E_6$ 、 $E_7$ :

$E_3(0.35)$  是注 B<sup>+</sup> 280℃ AT (退火温度) 样品中最主要的电子陷阱。另外在低温端还有浓度较低不易分辨的  $E_6$ 、 $E_7$ 、 $E_3$ 、 $E_6$  和  $E_7$  在 320℃ AT 时即激烈退化至很小的浓度。由于在注 P<sup>+</sup> 样品中没有类似能级, 因此,  $E_3$ 、 $E_6$  和  $E_7$  可能是与 B 有关的次级缺陷。由于它们的退火温度很低, 所以在大部分以前的工作中并未发现。仅在文献[13]中, 报道了类似  $E_3$  的受主缺陷, 但是具有更大的浓度, 这是可以理解的。从图 5 (a) 给出的  $E_3$  退火行为表明在 280℃ 左右的  $E_3$  浓度具有极陡的变化, 因此可以预期不同实验室由于温度定标和操作的微小差别可能导致很大的  $E_3$  浓度起伏。不过我们的  $E_3$  峰位在折算到文献[9]所用窗口时, 与文献[9]的峰位略有不同。整个 DLTS 谱形在 280℃ AT 时与[9]也在细节上有所不同。我们的结果, 280℃ AT 与较高 AT 的 DLTS 谱可以很好地对应起来而求得诸能级的退火规律, 并不存在[9]中指出的能级分裂和移动。

 $E_1(0.45)$ :

电子陷阱  $E_1(0.45)$  也并未见诸其它文献的报道。显然这是因为其它文献所用测量温度不够高。它在 280—600℃ AT 范围内都只有很小浓度且逐渐退化。对比图 2(a), 由于注 P<sup>+</sup> 样品在  $E_1$  峰位处有宽而平缓的 DLTS 讯号, 很难断定是否包含  $E_1$  峰。

 $E_2(0.41)$ 、 $E_4(0.25)$ 、 $E_5(0.15)$ :

这是三种多次报道过的能级。从图 1 (a) 和图 5 (a) 可以看出, 在高于 320℃ AT 时, 由于  $E_3$  的激烈退化,  $E_2(0.41)$  和  $E_5(0.15)$  成为主要的电子陷阱。有趣的是比较图 1(a) 中 445℃ AT 的 DLTS 谱, 除高温端的  $E_1$  和与 B 有关的  $E_3$  外, 剩下的  $E_2(0.41)$ 、 $E_4(0.25)$  和  $E_5(0.15)$  峰具有辐射缺陷的共性。对比 Troxell<sup>[3]</sup> 的图 1 (n-Si 注 B<sup>+</sup>, H<sup>+</sup> 和 Si<sup>+</sup>), Meese<sup>[4]</sup> 的图 7 和杜永昌等<sup>[45]</sup> 图 1 (n-Si 中子辐照), Kimerling<sup>[46]</sup> 的图 1 (n-Si 电子辐照), Wang<sup>[47]</sup> 的图 1 (n-Si 中注 H<sup>+</sup>, B<sup>+</sup>, P<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>), 张玉峰等<sup>[48]</sup> 图 1 (n-Si 注 O<sup>+</sup>) 都有对应于本文  $E_2$ 、 $E_4$ 、 $E_5$  的三个 DLTS 峰, 而且大致相似的 DLTS 谱形。

再看本文图 2 (a) 和表 2 的 P<sup>+</sup> 注入 n-Si 也具有典型的三个 DLTS 峰  $E_2$ 、 $E_4'$ 、 $E_5'$ 。各人报道的三个电子陷阱能级大致落在统一的范围:  $E_c - E_2 = 0.39—0.44$  eV,  $E_c - E_4 = 0.23—0.25$  eV,  $E_c - E_5 = 0.15—0.17$  eV。结合过去顺磁共振的研究<sup>[19]</sup>,  $E_3$  被认为是空穴和 O 结合的次级缺陷 (O、V), 称 A 中心<sup>[15,14-18]</sup>。  $E_4$  被认为是双空位的第二受主中心  $V_2^-$ <sup>[15,14-18]</sup>。  $E_2$  被认为包含两种缺陷能级<sup>[15,14-20]</sup>, 一种是双空位的第一受主中心  $V_2^-$ , 另一种是空位和 P 结合的次级缺陷 (P、V) (或者 E 中心)<sup>[21]</sup>。值得指出的是: 虽然在电子辐照, 中子辐照和各种离子注入情况下都有落入以上范围的三个能级, 但所报道的退火行为, 相对浓度, 俘获截面等并不尽相同。比如在我们的工作中, 注 P<sup>+</sup> 样品的  $E_2$  峰比注 B<sup>+</sup> 样品的  $E_2$  峰宽得多, 甚至还有隐约的另一峰  $E_2'$ 。从图 6 中注 P<sup>+</sup> 引入  $E_2$  的退火特性, 可以认为有两类退火很不同的  $E_2$  能级, 一类在 300—400℃ 时有激烈的退化。在注 B<sup>+</sup> 样品中没有类似的现象。另一种有比较缓慢的退火特性, 一直延伸到 600℃, 和注 B<sup>+</sup> 样品有同样的规律。以上现象都显示注 P<sup>+</sup> 情况下的  $E_2$  能级, 除公认的  $V_2^-$  和 P、V 中心以外, 还有其它种类的可能与 P 有关的缺陷。另外注 P<sup>+</sup> 样品中的  $E_4'$ 、 $E_5'$  和注 B<sup>+</sup> 样品中的  $E_4$ 、 $E_5$ , 虽然有大致相同的能级, 但前者的 DLTS 峰在同样率窗下在实验误差可分辨的

情况下偏向更低的温度。还值得指出, Krynicky 等人<sup>[22]</sup>曾对 n-Si 中注入  $P^+$  (140 keV,  $4 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ ) 并在 500°C 热退火后测 DLTS 谱, 其结果与我们的也有较大差异。

## 2. 空穴陷阱:

在注  $B^+n\text{-Si}$  中, 一共测到 5 种空穴陷阱, 注  $P^+$  测到 4 种, 见表 1, 2.

$H_2$  (0.62),  $H_3$  (0.49):

在注  $B^+$  280°C AT,  $H_2(0.62)(E_v + 0.62\text{eV})$  和  $H_3(0.49)$  是最主要的。它们具有比  $E_3$  更大的浓度。  $H_2$  具有较低的退火温度。在 280—445°C AT 过程中迅速退化至极低浓度。  $H_3$  具有较高的 AT, 约 500°C。  $H_2$  和  $H_3$  在率窗快于 100 ms 时, 两个 DLTS 峰完全合并到一起无法区别。在 450°C 退火后,  $H_2$  基本退化, 因此可以测到准确的  $H_3$  能级。而  $H_2$  是所取率窗高于 100 ms 时的实验点, 因此能级的误差较大。  $H_2, H_3$  仅在注  $B^+ n\text{-Si}$  中测到, 因此可能是与 B 有关的次级缺陷。

$H'_2$  (0.51):

对比图 1 (b) 和图 2 (b) 可以看出: 注  $P^+$  具有和注  $B^+$  很相近的空穴陷阱 DLTS 谱, 仅仅  $H_2$  和  $H_3$  换以  $H'_2$  (0.51)。  $H'_2$  在 280°C AT 时具有巨大的浓度且在 400°C 时激烈退化, 这与注  $B^+$  时的  $H_2$  相似, 但它的峰位显然与  $H_2$  不同, 因此不是同一种缺陷。

$H_5(0.15), H'_5$ :

注  $B^+$  还在低温端测到浓度较小的  $H_5(0.15)$ 。它具有很高的 AT。直到 445°C, 它的浓度还近乎不变。但其能量似乎转化得更接近价带顶以至在 77 K 的液氮杜瓦瓶中无法准确测量。一直到 600°C 还保留相当浓度。另一种  $H'_5$  出现在注  $P^+$  最低温度处, 没有成功地测准其有关参数因此无法确定它是否与注  $B^+$  引入的  $H_5$  属于同一种缺陷。

$H_1(0.63), H_4(0.37)$ :

它们分别在注  $B^+$  和注  $P^+$  样品中测到, 具有大致相似的退火行为, 因此可能是与 B 无关的。

在目前的文献中, 还从未有 n-Si 中离子注入引入空穴陷阱的报道。没有直接的结果可资比较。但引用一些其它结果作间接的比较还是有意义的。秦国刚等<sup>[9]</sup>从注  $B^+ n\text{-Si}$  中载流子空间分布和电子陷阱空间分布严重的不符, 间接猜测可能存在浓度很大的空穴陷阱受主中心。本文测到的  $H_2, H_3, H_4$ , 如果假设它们都是受主, 它们的高浓度和退火行为解释了文献 [9] 中反常的载流子空间分布以及随 AT 的变化规律。Walker 和 Sah<sup>[21]</sup> 以及 Kimmerling<sup>[16]</sup> 报道了 n-Si 和 p-Si 中电子辐照, Mooney 等人<sup>[23]</sup>报道了 p-Si 中电子辐照, Wang<sup>[17]</sup>, Mitic<sup>[24]</sup> 和 Troxell<sup>[9]</sup> 等报道了 p-Si 中离子注入引入的空穴陷阱, 这些结果相互有很大的分散性, 和我们的结果也有不同。我们在 280°C AT 时最主要的  $H_2$  (0.62) 并未在其它工作中有所报道。这可能因为它的退火温度低, 而且在快的率窗 ( $< 100 \text{ms}$ ) 下与  $H_3$  (0.49) 合到一起所以不易发现。  $H_1$  (0.63) 也未见过报道, 可能因为它们的 DLTS 峰位在其它工作的相应率窗下都超过了测量温度。在率窗快于 100 ms 时,  $H_2$  和  $H_3$  (0.49) 两个峰合成一个峰。由于它们有不同的退火特性, 因此在快率窗情况下不同退火所测得的等效能级很可能不同。这也许是由于不同作者测到结果分散性很大的原因。比如 Kimmerling 在电子辐照 n-Si 中测到一个空穴陷阱  $H_2$  (0.42)。在 AT = 400°C 时

大致退完。Troxell<sup>[1]</sup> 在 p-Si 中注 Si 测得  $H$  (0.53), 它在 370—420℃ 逐渐退净, 但在 420℃ 以后又重新出现一直到 700℃。A. Mifc 等<sup>[2]</sup> 在 p-Si 中注 B, AT = 500℃ 时, 测到  $H$  (0.43),  $H$  (0.47),  $H$  (0.56) 三个较大的空穴陷阱。其中  $H$  (0.43),  $H$  (0.47) 被认为与 B 有关,  $H$  (0.56) 是双空位 ( $V$ 、 $V$ ) 或空位·碳 ( $V$ 、 $C$ )。我们测到的  $H_3$  (0.49) 和  $H'_1$  (0.51) 能级与以上报道较为相近但有不同的退火行为。很难说明与上面那一种属于同一类空穴陷阱。

文献中与  $H_4$  (0.37) 能级相近的空穴陷阱有 Troxell<sup>[1]</sup> 在 p-Si 中注 Si 测得的  $H$  (0.36)、Kimerling<sup>[16]</sup> 在 p-Si 中注电子测得的  $H$  (0.33)。Mooney 等<sup>[23]</sup> 在 p-Si 注电子测到的  $H$  (0.38) 所报道的这些空穴陷阱能级和退火行为的分散性很大, 这些作者把以上能级归于间隙  $C$  和替位  $C$  ( $C_i - C_s$ ), 或  $C$ , 空位,  $O$  结合物 ( $V \cdot C \cdot O$ ), 从我们的结果看  $H_4$  能级, 可能属于此类结构。

由以上讨论可知空穴陷阱的研究和识别还处于很不成熟的阶段。我们要再次强调, 由第二节分析可知 n-Si 中由 DLTS 得到的空穴陷阱浓度仅仅是下限值。也可能还存在一些空穴陷阱由于没有形成瞬态初始条件而没有测到。

## 五、总 结

本文对低剂量 ( $10^{11} \text{cm}^{-2}$ , 200keV)  $B^+$  和  $P^+$  离子注入 n-Si 产生的电子和空穴陷阱, 以及它们在 280—800℃ 的退火行为, 用 DLTS 方法在 77—350 K 的范围内作了测量研究。

1) 第一次报道了 n-Si 中离子注入引入的空穴陷阱。注  $B^+$  和注  $P^+$  分别引入 5 种和 4 种空穴陷阱。注  $B^+$  引入的  $H_2$  (0.62) 和  $H_3$  (0.49) 在 280℃ AT 时有巨大的浓度, 它们的 DLTS 峰在率窗快于 100 ms 时合而为一, 它们可能是与 B 有关的受主次级缺陷。注  $P^+$  引入的  $H'_1$  (0.52) 在 280℃ AT 时有巨大的浓度。注  $B^+$  和注  $P^+$  都引入  $H_1$  (0.63) 和  $H_4$  (0.37)。  $H_4$  可能是  $C_s \cdot C_i$  或者  $V \cdot C \cdot O$  受主。注  $B^+$  还引入  $H_5$  (0.15) 它在 445℃ AT 时能量移向更浅, 以至难于在 77 K 液氮杜瓦瓶中测量。注  $P^+$  还引入  $H'_1$ , 它难于在 77 K 液氮杜瓦瓶中测到有关参数。

2) 对电子陷阱, 注  $B^+$  情况发现 7 种, 注  $P^+$  情况发现 3 种。其中注  $B^+$  情况的  $E_1$  (0.41)、 $E_4$  (0.25) 和  $E_5$  (0.15), 以及注  $P^+$  情况的  $E_2$  (0.41),  $E'_1$  (0.25) 和  $E'_2$  (0.15) 在电子辐照<sup>[16,19]</sup>, 中子辐照<sup>[14,15]</sup>, 和其它离子注入<sup>[5,17]</sup> 工作都已有类似的报道。  $E_2$  是双空位  $V_2^-$  和 P 空位 ( $P$ 、 $V$ ) (又称 E 中心)<sup>[20]</sup> 的混合。在注  $P^+$  情况,  $E_2$  有更宽的 DLTS 峰。其退火行为分成明显的两部分。因此  $E_2$  可能还有其它种与 P 有关的电子陷阱。  $E_4$  和  $E'_1$  被认为是双空位  $V_2^-$ 、 $E_5$  和  $E'_2$  被认为是氧空位 ( $O$ 、 $V$ ) 又称 A 中心<sup>[19]</sup>。不过  $E_4$  和  $E'_1$  (以及  $E_5$  和  $E'_2$ ) 的 DLTS 峰位之间有实验可分辨的温度移动, 它们到底是否完全属于同一种电子陷阱是值得进一步研究的。在注  $B^+$  情况, 还发现下列几种电子陷阱: 280℃ AT 时浓度很大的受主  $E_3$  (0.35) 和浓度小的  $E_6$ 、 $E_7$ , 由于能级太浅, 交迭太严重, 无法测出  $E_6$ 、 $E_7$  能级位置,  $E_3$ 、 $E_6$ 、 $E_7$  在 300℃ 左右即激烈退火至很小, 它们可能是与 B 有关的次级缺陷。还报道了  $E_1$  (0.45), 它仅有很小的浓度, 而且在 DLTS 高温端, 容易被过去

的工作忽略。

由以上结果可知,过去有人认为<sup>[17]</sup>,离子注入产生的缺陷种类与离子种类无关的结论是不对的。

3) 在 800℃ 15 分钟退火情况下,所有陷阱都退化至平均浓度  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  以下,以至无法在我们的 DLTS 仪器上观察到。

我们感谢韩一琴同志在整理数据和手稿中给予的很多帮助。

在本文定稿之后,萨支唐 (C. T. Sah) 教授寄来了文献 [25] [26]。特别是 [25] 中报道的空穴陷阱与我们的工作对比是很有意思的。我们对萨支唐教授表示感谢

### 参 考 文 献

- [1] 北京师范大学:“离子注入原理与技术”,北京出版社,1982.
- [2] 罗晋生:“离子注入物理”,国防工业出版社,1980.
- [3] L. C. Kimerling and J. M. Poate: Defect and Radiation effects In semiconductors, 1974 (Inst. Phys. Conf. Ser. no. 23. London, 1975) p. 126.
- [4] K. Masuda, Radiation effects In Semiconductors. 1976. Ed. N. B. Urli and J. W. Corbett (Inst. Phys. Conf. Ser. no. 31. London, 1977) p. 174.
- [5] J. R. Troxell, *Solid State Electronics*, 26, 539(1983).
- [6] J. W. Corbett and J. C. Bourgoin, Point Defects in Solids, Vol. 2, Ed. J. H. Crawford Jr and L. M. Slifkin (Plenum, New York, 1975) p. 1.
- [7] J. W. Corbett *et al.*, Radiation effects in semiconductors 1976, Ed. n. b. urli and J. W. Corbett, (Inst. Phys. Conf. Ser. no. 31, London, 1977) p. 174.
- [8] W. M. Penney, L. Lau, Mos integrated circuits, (Van Nostrand, New York, 1972).
- [9] G. G. Qin (秦国刚), M. F. Li (李名复) and C. T. Sah, *J. Appl. Phys.*, 53, 4800(1982).
- [10] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, 45, 3023(1974).
- [11] A. Wang and C. T. Sah, *J. Appl. Phys.*, 56, 1021(1984).
- [12] S. M. Sze, Physics of semiconductor devices, (Wiley, New York, 1969)
- [13] O. Engstrom and A. Alm, *Solid State Electronics*, 21, 1571(1978).
- J. E. Lowther, *J. Phys. C. Solid State Phys.*, 13, 3681(1980).
- 秦国刚,姚秀琛,中国科学, A(1984) No.5, 432
- [14] J. M. Meese, Defects in Semiconductors, Ed. J. Narayan and T. Y. Tan, (North Holland, New York, 1981), p. 225.
- [15] 杜永昌、张玉峰、秦国刚,半导体学报, 5, 7(1984),
- [16] L. C. Kimerling, Radiation effects in Semiconductors, 1976, Ed. N. B. Urli and J. W. Corbett, (Inst. Phys. Conf. Ser. No. 31. London, 1977) p. 221.
- [17] K. L. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, 36, 48(1980).
- [18] 张玉峰,张丽珠,吴书祥,杜永昌,半导体学报 3, 251(1982).
- [19] G. D. Watkins and J. W. Corbett, *Phys. Rev.*, 121, 1001(1961).
- [20] J. W. Walker and C. T. Sah, *Phys. Rev.*, 7, 4587(1973).
- [21] G. D. Watkins and J. W. Corbett, *Phys. Rev.*, 134, A1359(1964).
- [22] J. Krynicki and J. C. Bourgoin, Defects and Radiation effects in Semiconductors, 1978 (Inst of Phys. Conf. Ser. No. 46. London, 1979), p. 432.
- [23] P. M. Mooney *et al.*, *Phys. Rev.*, B15, 3836(1977).
- [24] A. Mitic, T. Sato, M. Nishi and H. Hashimoto, *Appl. Phys. Lett.*, 37, 1727(1980).
- [25] D. B. Jackson and C. T. Sah, *J. Appl. Phys.*, 58, 1270(1985).
- [26] D. B. Jackson and C. T. Sah, *J. Appl. Phys.*, 59, 459(1986).

## Low Dose B<sup>+</sup> and P<sup>+</sup> Implantation Associated Defects in n-Si and Their Annealing Behaviours

Chen Jianxin, Li Mingfu and Li Yanjin

(Graduate School, University of Science and Technology of China)

### Abstract

A detailed information of H(hole) as well as E(Electron) traps produced by low dose ( $10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ) B<sup>+</sup> and P<sup>+</sup> ion implantation in n-Si and their thermal annealing behaviours are reported. The hole traps are for the first time investigated: For B<sup>+</sup> implantation five hole traps are produced: two B related acceptor levels H<sub>2</sub>(0.62), H<sub>3</sub>(0.49) of huge concentrations, and other three hole traps H<sub>4</sub>(0.37), H<sub>1</sub>(0.63), H<sub>5</sub>(0.15). H<sub>4</sub> is probably C related acceptor. For P<sup>+</sup> implantation, four hole traps are produced: H<sub>5</sub><sup>\*</sup>(0.15) of huge concentration, and H<sub>4</sub>(0.37), H<sub>1</sub>(0.63), H<sub>3</sub><sup>\*</sup>. Electron traps are also reported. For B<sup>+</sup> implantation, 7 electron traps are produced: B related acceptor E<sub>2</sub>(0.35) with huge concentration at 280°C AT (Annealing Temperature), E<sub>6</sub>, E<sub>7</sub> with small concentrations and shallow levels hard to test precisely. They anneal out drastically above 320°C. Other 3E traps E<sub>2</sub>(0.41), E<sub>4</sub>(0.25) and E<sub>5</sub>(0.15) are detected in both B<sup>+</sup> and P<sup>+</sup> implantation, and are consistent with previous reports for ion, neutron or electron irradiation induced defects of V<sub>2</sub>- or (P. V), V<sub>2</sub>-<sup>\*</sup>, and (O. V) centers respectively. Another low concentration E<sub>1</sub>(0.45) is also detected for B<sup>+</sup> implantation. Annealing behaviours of E and H traps are reported. For 800° AT, all traps diminish to average concentrations less than  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .