

离子辐照对单晶 Si 中预注入 B 原子扩散的影响*

刘 昌 龙

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

B. J. Sealy A. Nejim R. M. Gwilliam

(School of Electronic Engineering Information Technology and Mathematics,
University of Surrey, Guildford GU2, 7XH, UK)

摘要 室温下使用 MeV 能量级 Si, F 和 O 离子对 5keV B 离子预注入后的 n-型单晶 Si(100)进行了辐照,应用二次离子质谱仪测试分析了掺杂物 B 原子的分布剖面及其变化.结果表明,高剂量 Si, F 和 O 离子的附加辐照可以抑制热激活退火中 B 原子发生的瞬间增强扩散.在相同的辐照条件下, Si 近表面区域中 SiO₂ 层的存在更有助于限制 B 原子的瞬间增强扩散.结合卢瑟福沟道背散射分析和 DICADA 程序计算对实验结果进行了讨论.

关键词 注入 瞬间增强扩散 二次离子质谱仪 单晶 Si

1 引言

单晶 Si 中低能离子注入掺杂是形成 p-n 结的主要途径之一.但是,在注入后的热激活退火中,注入损伤会引起掺杂原子如 B 或 P 等发生反常扩散,即瞬间增强扩散 (TED)^[1,2],掺杂原子的瞬间增强扩散率要比理论模型描述的正常状态下掺杂原子的扩散率高几个量级以上.因此,常规的低能离子掺杂注入很难得到结深度小于 100nm 的超浅 p-n 结.为了满足 Si 集成电路技术飞速发展的需要,必须从微观上认识 TED 发生的物理机制,并探索有效的途径来抑制热激活退火中掺杂原子的 TED,从而研制出超浅 p-n 结.

大量的实验和理论研究结果揭示,注入掺杂原子在随后的热激活退火中发生的 TED 与注入本身产生过量的间隙原子相关^[3,4].在热退火中,掺杂原子会与间隙子耦合,形成可动的掺杂原子与间隙子的复合体,从而导致了掺杂原子的瞬间增强扩散.因此,通过采取一定的途径消除注入引起的过量间隙原子,就有可能抑制掺杂原子的 TED.从这个思想出发,目前已提出了几种可能抑制 TED 的途径,如在掺杂原子 B 预注入后,在注入

2001-02-09 收稿

* 英国皇家学会奖学金资助

区域引入 C 或 F, C 和 F 的存在可以有效地捕获过量的间隙子,从而抑制在随后退火中出现 TED. 不过 C 和 F 在捕获过量间隙子的同时,还会与注入 B 原子发生耦合,降低了 B 原子的激活性^[5,6]. 此外,还采用高剂量的 keV 能量级的重离子,如 Si, Ge 等先对单晶 Si 进行预辐照,在近表面区域中产生一定厚度的非晶层,该非晶层的存在有两个优点,一是可以有效地抑制注入掺杂原子发生沟道效应;其二是处在非晶层中的掺杂原子在随后的热激活退火中不会发生 TED. 但是,由于非晶层在外延再结晶后,在原始的晶态和非晶态界面上会形成射程末端缺陷(EOR 缺陷),它的存在不但导致所形成的 p-n 结的性能变坏,而且从 EOR 缺陷中不断逸出的间隙子会导致掺杂原子的 TED 持续更长的时间^[7]. 本工作针对以上几种方法的优缺点,选择了采用 MeV 能量级的重离子对 5keV B 离子预注入的单晶 Si 进行附加辐照,进而研究 MeV 能量级离子辐照对预注入 B 原子扩散的影响.

2 实验过程

本工作所选用的 Si 样品是电阻率处在 4—7 Ω cm 的 n-型单晶 Si(100). 首先采用 5keV B 离子在室温下对上述样品进行了预注入掺杂,剂量为 3.3×10^{14} ions/cm². 注入时为了避免离子的沟道效应,样品分别倾斜和旋转 7° 和 20°. 随后,在室温下采用 1MeV Si, 0.5MeV O 和 F 离子对预注入样品实施进一步辐照. Si 离子的照射剂量为 1×10^{12} — 1×10^{16} ions/cm², F 和 O 离子的照射剂量固定为 5×10^{15} ions/cm². 注入或辐照后,对部分样品进行了快速热退火(RTA),退火温度为 1000℃,退火时间为 10s. 另外,为了研究 Si 近表面区域中 SiO₂ 层的存在对注入 B 原子扩散的影响,在相似的注入和辐照条件下,对三类 SIMOX(Separated by Implantation of OXygen)结构进行了研究,它们分别为 SIMOX I (50nmSi-50nmBOX-Si), SIMOX II (100nmSi-115nmBOX-Si)和 SIMOX III (190nmSi-370nmBOX-Si),括号中的 BOX 即表示 SiO₂ 层. 所谓 SIMOX 结构是指通过高剂量 O 离子注入单晶 Si 而形成的一种含一定厚度 SiO₂ 层的 Si 结构.

采用二次离子质谱仪(SIMS)测试分析了注入 B 原子剖面及其在辐照后的变化,采用卢瑟福沟道背散射(RBS/c)并结合 DICADA(晶体中的退道和缺陷分析)程序对 MeV 能量级离子在单晶 Si 中产生的位移原子分布进行了测试和分析.

3 实验结果和分析

图 1 给出了 SIMS 测量得到的 B 的注入剖面及其在热退火和 1MeV Si 离子辐照后发生的变化. 从图中可以清楚地发现:(1) 热激活退火导致注入 B 原子发生了显著的 TED;(2) 对于低剂量(1×10^{12} ions/cm²)的附加辐照,1MeV Si 离子对 B 原子的瞬间增强扩散并不起作用;(3) 当照射剂量增加到 1×10^{14} ions/cm² 时, B 原子的 TED 不但没有被抑制,反而略有增加;(4) 进一步增加剂量到 1×10^{16} ions/cm², 热退火引起的 B 原子的 TED 明显减小. 可见只有照射到较高的剂量时,1MeV Si 离子的附加辐照才能对注入 B 原子的 TED 起抑制作用.

图 2 给出了在经 1MeV Si 离子辐照到不同剂量和在未辐照的单晶 Si 上测量得到的

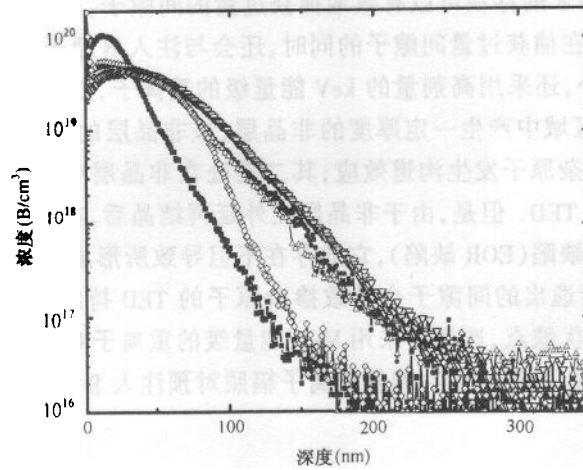


图 1 SIMS 测量得到的 B 原子的分布及其热退火和 1MeV Si 离子附加辐照产生的影响
 ■5keV B 注入, ●5keV B 注入 + RTA, △5keV B 注入 + 1MeV Si (1×10^{12} ions/cm²) + RTA,
 ▽5keV B 注入 + 1MeV Si (1×10^{14} ions/cm²) + RTA, ◇5keV B 注入 + 1MeV Si (1×10^{16} ions/cm²) + RTA.

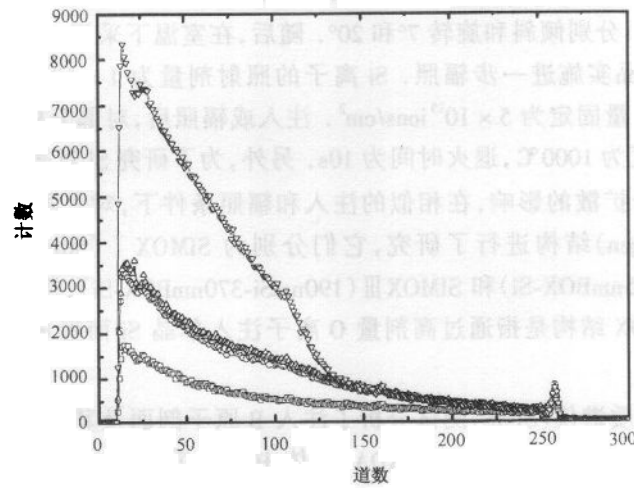


图 2 原始单晶 Si 样品和不同剂量 Si 离子照射的单晶 Si 样品上测量得到的 RBS/c 谱

□原始单晶 Si; ○单晶 Si + 1MeV Si, 1×10^{12} ions/cm²; △单晶 Si + 1MeV Si, 1×10^{14} ions/cm²; ▽单晶 Si + 1MeV Si, 1×10^{16} ions/cm².

RBS/c 谱, 根据该谱并利用 DICADA 程序计算得到的位移原子深度分布表示在图 3 中, 根据这个结果, 我们可以对上述 SIMS 测得的结果进行定性的分析. 首先, 对于低的照射剂量, RBS/c 分析显示, 1MeV Si 离子辐照并未在单晶 Si 中产生明显的损伤, 即在 B 原子分布的近表面区域中并没有产生过量空位来湮没由注入本身带来的过量的间隙子, 同时也没有足够的由 Si 离子产生的间隙子参与 B 原子的扩散, 所以在此情况下, B 原子的分布基本不发生变化. 当增加剂量到 1×10^{14} ions/cm² 时, 尽管 Si 离子的辐照在近表面区域中产生了较多的空位, 但是, 以下两个因素起着相反的作用, 一是在这种情况下, 表面是

一个强有力的空位陷阱,由 Si 离子产生的空位大部分会被表面捕获而消失;二是在 Si 离子的射程末端产生的主要是过量的间隙子,这些间隙原子在热退火中会发生背扩散,即向表面方向扩散,它们一方面湮没了由 Si 离子在近表面区域中产生的过量的空位,另一方面也参与了 B 原子的扩散,从而使得 B 原子的扩散不但没被抑制,反而有所增强. 对于更高的辐照剂量, Si 离子在单晶 Si 的近表面区域中产生足够多的空位,尽管表面陷阱、背扩散了湮没注入产生的过量间隙子的过程,从而使 B 原子的 TED 受到了一定的抑制.

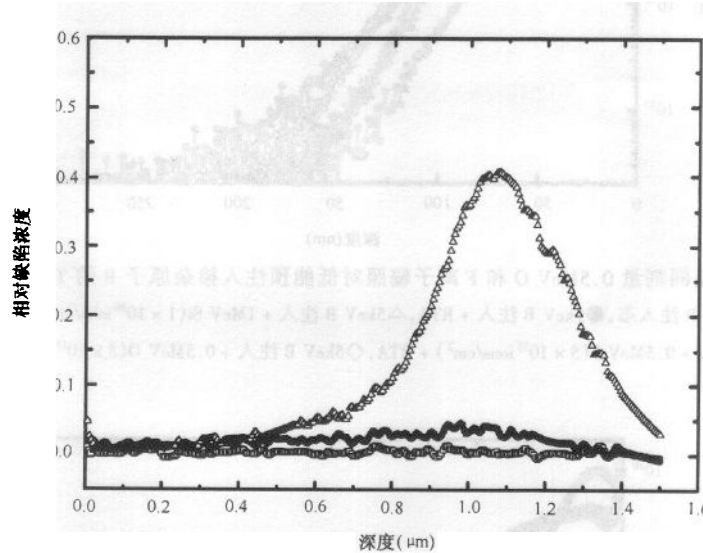


图 3 根据图 2 结果结合 DICADA 程序计算得到的 Si 离子辐照在单晶 Si 中引起的相对缺陷浓度的深度分布

□单晶 Si + 1MeV Si, 1×10^{12} ions/cm²; ●单晶 Si + 1MeV Si, 1×10^{14} ions/cm²;
△单晶 Si + 1MeV Si, 1×10^{16} ions/cm².

相同剂量(0.5×10^{15} ions/cm²)不同离子照射(0.5MeV O 和 F 离子)引起 B 原子分布的变化表示在图 4 中. 从图中可以看到,较之 O 离子辐照,相同剂量的 F 离子的附加辐照更有助于抑制 B 原子的 TED. 由于 O 和 F 处在元素周期表相邻的位置,因此,在相同的照射条件下,在近表面区域以及射程末端区域中应该产生相似的缺陷(RBS/c 测量结合 DICADA 程序计算的结果也是如此). 它们应该对 B 原子的 TED 有相近的抑制作用. 实验结果显示有如此大的差异,说明有其它的因素在起作用. 实际上,正如引言中所描述的,单晶 Si 中 F 原子的存在会捕获间隙子,形成比较稳定的复合体,因此, F 的存在本身消除了一定量的过量间隙子,从而使得它的辐照更有助于抑制掺杂原子 B 的 TED. 相反,对于 O 来说,它的存在却能捕获空位,形成 O + v 复合体,这就减弱了 O 离子辐照对 B 原子的 TED 的抑制作用.

上面的结果显示了 MeV 能量级离子在射程末端产生的过量的间隙子会发生背扩散,从而影响了 MeV 量级离子附加辐照抑制 B 原子 TED 的效率. 为了进一步证实这一点,我们采用了 SIMOX 结构来进行相似的辐照和分析实验. SIMOX 结构中的 SiO₂ 层是间隙子

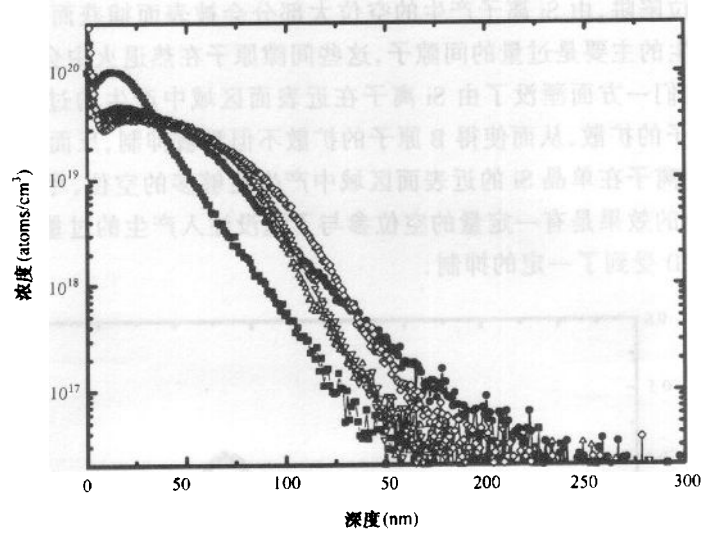


图 4 相同剂量 0.5MeV O 和 F 离子辐照对低能预注入掺杂原子 B 的 TED 的影响

■ 5keV B 注入态, ● 5keV B 注入 + RTA, △ 5keV B 注入 + 1MeV Si (1×10^{16} ions/cm²) + RTA,
 ▽ 5keV B 注入 + 0.5MeV F (5×10^{15} ions/cm²) + RTA, ◇ 5keV B 注入 + 0.5MeV O (5×10^{15} ions/cm²) + RTA.

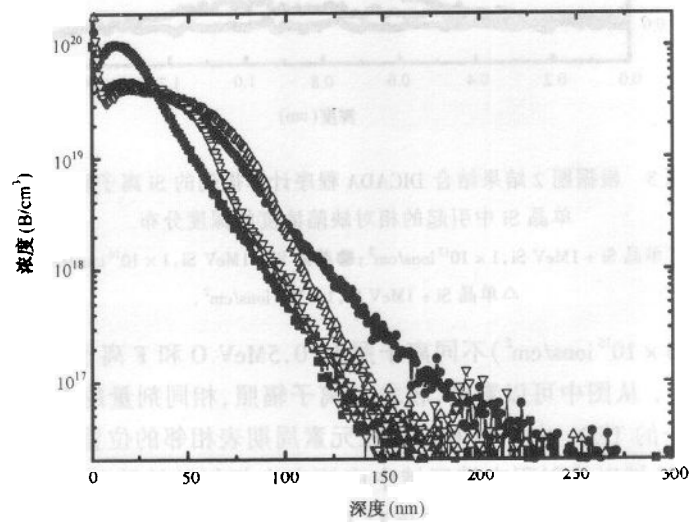


图 5 相同照射条件下单晶 Si 和 SIMOX 结构中 B 原子剖面的比较

■ 单晶 Si + 5keV B, ● 单晶 Si + 5keV B 注入 + RTA, △ 单晶 Si + 5keV B 注入 + 1MeV Si (1×10^{16} ions/cm²) + RTA,
 ▽ SIMOX III + 5keV B 注入 + 1MeV Si (1×10^{16} ions/cm²) + RTA.

的阻挡层,即位于氧化层后的间隙子不会穿过氧化层而向表面发生背扩散.结果表示在图 5 中.由图可见,与单晶 Si 相比,相同的辐照条件下,SIMOX 结构更有助于抑制 B 原子的 TED.这种有效性说明,MeV 量级离子在射程末端产生的过量的间隙子确实会发生向表面的扩散.此外,对 3 种 SIMOX 结构的比较还发现,SIMOX 结构中的氧化层越靠近表面,则 B 原子的 TED 被抑制的越显著.

4 结论和展望

以上的结果充分说明,高剂量的 MeV 能量级离子附加辐照可以有效抑制预注入掺杂原子在随后热激活退火中发生的瞬间增强扩散. 与纯的单晶 Si 相比, SIMOX 结构中由于存在氧化层,限制了位于 MeV 离子射程末端处的过量间隙子的背扩散,在相同的辐照和处理条件下,它对于抑制 B 原子的 TED 更为有效. 不过,由于单晶 Si 样品中 BOX 的存在,它在随后的外延再结晶中,会形成 EOR 缺陷,从而会影响所形成的 p-n 结的电性能. 考虑到这些因素,以后的研究可以采用更高能量的重离子来对预注入的单晶 Si 进行附加辐照,它具有的优势是:(1)离子的射程更大,位于射程末端的过量的间隙子不会参与到近表面区域中掺杂原子的扩散;(2)由于射程大,射程末端难以消除的缺陷对于所形成的超浅 p-n 结的性能的影响非常小. 另外,在该研究工作中,我们还发现,经高剂量 MeV 能量级离子附加辐照后,在所显示的测量区域中测量出的 B 原子的总量均少于注入量,一个可能的解释是,在退火过程中由高能离子产生的 EOR 缺陷(主要是间隙子型的缺陷)捕获了一定量的 B 原子. 这种推测是否合理,还有待于进一步实验研究.

参考文献(References)

- 1 Claverie A, Giles L F, Omri M et al. Nucl. Instru. Meths., 1999, **B147**:1—12
- 2 Collart E J, Weemers K, Cowern N E B et al. Nucl. Instru. Meths., 1998, **B139**:98—107
- 3 Stolk P A, Gossmann H J, Eaglesham D J et al. J. Appl. Phys., 1997, **8**(9):6031—6050
- 4 Claverie A, Luanab L, Bonafos C et al. Nucl. Instru. Meths., 1995, **B96**:202—209
- 5 Cowern N E B, Cacciato A, Custer J S et al. Appl. Phys. Lett., 1996, **68**(8):1150—1153
- 6 Downey D F, Chow J W, Ishida E et al. Appl. Phys. Lett., 1998, **79**(9):1263—1265
- 7 Cowern N E B, Alquier D, Omri M et al. Nucl. Instru. Meths., 1999, **B148**:257—261

Effects of Ion Irradiation on the Diffusion of Pre-implanted B Atoms in Crystalline Silicon*

LIU Chang-Long

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

B. J. Sealy A. Nejim R. M. Gwilliam

(*School of Electronic Engineering Information Technology & Mathematics,*

University of Surrey, GU2 7XH, Guildford, Surrey, UK)

Abstract N-type crystalline Si (100) implanted with 5keV B ions was subsequently irradiated with MeV Si, O and F ions. The B atom profiles were measured by means of secondary ion mass spectrometer after the treatment of rapid thermal annealing. The results show that the transient enhanced diffusion of B atoms is effectively limited by the post-implantation of high energy ions at high dose. At the same irradiation conditions, it is found that the existence of a SiO₂ layer in the near surface of Si is even more effective in suppressing the transient enhanced diffusion of the doped B atoms. The results are qualitatively discussed in combination with the analyses of RBS/*c* measurements and calculation of the DICADA code.

Key words implantation, transient enhanced diffusion, secondary ion mass spectrometer, crystalline silicon

Received 9 February 2001

* Supported by Royal Society Fellowship