

压电电子学和压电光电子学

王中林^{1,2,†}

(1 佐治亚理工学院 USA)

(2 华中科技大学 武汉国家光电实验室 武汉 430074)

压电效应是物质在应力作用下产生形变时出现的一种内部电势的现象. 压电效应已经广泛应用于微机械传感、器件驱动和能源领域. 锆钛酸铅(PZT)是目前应用最广泛的一类压电材料. 但是 PZT 是一种绝缘体, 很少使用在制备电子器件的过程中. 用来制备电子和光电子器件的压电材料需要具有半导体特性. 对于纤锌矿材料, 比如 ZnO, GaN, InN 和 ZnS 等, 它们同时具有压电和半导体性质, 然而同时利用这两个性质的耦合来制作器件的研究以前几乎没有.

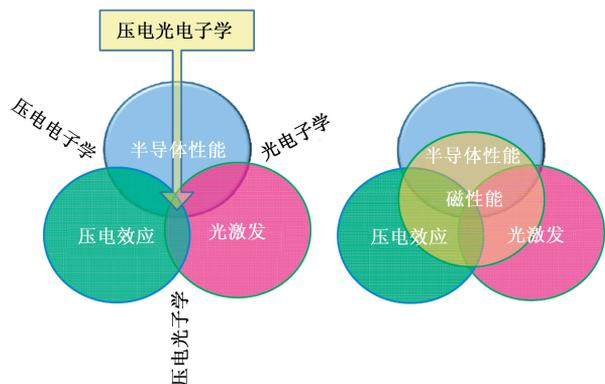


图1 压电场的引入可以产生几个新的研究领域: 压电电子学 (piezotronics), 压电光子学 (piezophotonics), 压电光电子学 (piezo-phototronics). 如果再引入磁性掺杂, 更多的效应有可能被发现. 纤锌矿材料是实现这些应用的最佳材料

在传统的基于半导体纳米线的电子器件中, 研究最多的是单沟道场效应晶体管(FET), 其中源极和漏极位于纳米线的两端, 栅极电压加在纳米线沟道上. 在源极和漏极之间加一个外加电压(V_{ds}), 半导体器件中的载流子输运过程通过栅极电压来调控或触发. 利用压电效应产生的内场, 我们首次提出了在由压电材料形成的氧化锌纳米线中, 压电势可以起到与栅极电压相似的作用, 这样 FET 中载流子的输运过程就可以通过外加在器件上的应力进行调控或触发^[1,2]. 我们把这一类利用机械形变来调控或触发的电子器件叫压电电子学器件^[3,4]. 另一方面, 如果器件在源极或漏极中有一端或两端是肖特基接触的, 当激光照射在源极或漏极时, 由于压电效应、光激发和半导体特

性的三相耦合, 可以产生一种新的效应, 即压电光电子学效应, 详见文献综述^[5-7].

让我们使用 ZnO 材料来阐释什么是压电势. ZnO 是一种非中心对称的晶体, Zn^{2+} 正离子和 O^{2-} 负离子形成正四面体结构. 在无应力作用下, 正电荷和负电荷中心重合, 总偶极矩等于零. 如果有应力加在正四面体的一个顶点上, 正负离子的中心会相对错位, 从而在晶体中引入偶极矩. 所有单元偶极矩的叠加会在晶体中沿应变方向形成宏观的电势差. 这就是压电电势(压电势)^[8-10]. 压电势是由非移动的不能消除的离子电荷引起的, 只要应力存在, 压电势就存在, 不过其大小受掺杂浓度影响.

半导体晶体在应力作用下, 可观察到两种效应: 压阻效应和压电效应. 压阻效应是由应力导致的禁带宽度和导带中态密度的变化引起的导电性的变化. 这种效应没有极性, 因此对 FET 器件中的源极和漏极作用相同, 即整体改变导电性. 如果该材料有压电特性, 应力还会引起压电势. 因为压电势具有极性, 它可以使源极和漏极的肖特基势垒有效高度往两个相反方向调节. 这是一种非对称效应. 使用压电势作为栅极电压的一类器件叫压电电子学器件^[11-13].

应力可有效地增加 ZnO 纳米线和金属接触处的肖特基势垒的高度, 从而精确调节器件中的电子传输特性. 相反地, 使用一束光子能量大于材料禁带宽度的激光照射结区, 可以增加局域的电子空穴浓度, 通过载流子的分离和重新分布以改变结区特性, 从而引起肖特基结有效势垒高度的降低. 通过控制应力大小和激光强度, 我们可有效地调控器件的传输特性, 实现从肖特基接触到欧姆接触或从欧姆接触到肖特基接触的转换. 对 ZnO 纳米线的机械、光学和电学性质的三相耦合的研究, 阐明了一个新的机理, 这个机理可作为压电光电子学器件的基础. 因此, 压电光电子学效应是通过应力引起的压电势来

2010-07-09 收到

† Email: zhong.wang@mse.gatech.edu

调控电光过程的效应^[14-17]. 用来制备压电电子学和压电光电子学器件的材料主要是纤锌矿材料, 例如 ZnO, GaN, InN 和 CdS. 在这些材料中, ZnO 可能是唯一的一种可以通过化学方法在低于 100°C 的条件下大面积制备的纳米材料. 其他的一些纳米材料通常需要通过气相法制备, 这就需要比较高的温度. 2009 年, 美国著名的《MIT Technology Review》(《麻省理工学院技术综述》) 期刊把我们发展的压电电子学评选为十大新兴技术之一. 目前, 许多小组已经开始研究这些效应和潜在的应用^[18-22].

压电势作为栅极电压调控的电子器件显示了一种制备由应变、应力或压强驱动和控制的电子器件、传感器和逻辑电路的新方法. 压电-光电子学是压电效应、光激发和半导体传输特性三相耦合的一种效应, 它是通过应变引起的压电势来调节和控制电-光过程. 这些效应是以前在薄膜技术中基本没有探讨过的, 它们是在研究纳米线器件中首次提出来的, 因此它们可以被认为是纳米材料的一类独特应用(killer applications). 它们将来有可能是固体物理教科书中特有的一章. 我们预期压电电子学和压电光电子学将启发新的电子和光电子器件的发明, 并将在发光二极管、光电池和太阳能电池, 人和计算机界面, 纳米机器人, 微纳机电系统, 人和机器相互

作用等领域中都有广泛的应用.

参考文献

- [1] Wang X D, Zhou J, Song J H *et al.* Nano Lett., 2006, 6: 2768
- [2] He J H, Hsin C L, Liu J *et al.* Adv. Mater., 2007, 19: 781
- [3] Wang Z L. Adv. Mater., 2007, 19: 889
- [4] Wang Z L. Adv. Funct. Mater., 2008, 18: 3553
- [5] Wang Z L. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2010, 1: 1388
- [6] Wang Z L, Yang R S, Zhou J *et al.* Lateral nanowire/nanobelt based nanogenerators, piezotronics and piezo-phototronics. Mater. Sci. and Engi. Reports. doi:10.1016/j.mser.2010.06.015
- [7] Wang Z L. Mater. Sci. and Engi. Report, 2009, 64 (issue 3-4): 33
- [8] Wang Z L, Song J H. Science, 2006, 312: 242
- [9] Gao Y F, Wang Z L. Nano Lett., 2007, 7: 2499
- [10] Gao Z Y, Zhou J, Gu Y D. J. Appl. Phys. Lett., 2009, 105: 113707
- [11] Zhou J, Gu Y D, Fei P *et al.* Nano Lett., 2008, 8: 3035
- [12] Zhou J, Fei P, Gu Y D *et al.* Nano Lett., 2008, 8: 3973
- [13] Fei P, Yeh P H, Zhou J *et al.* Nano Lett., 2009, 9: 3435
- [14] Hu Y F, Chang Y L, Fei P *et al.* ACS Nano., 2010, 4: 1234
- [15] Hu Y F, Zhang Y, Chang Y L *et al.* Optimizing the Power Output of a ZnO Photocell by Piezopotential, ACS Nano, 10.1021/nn1010045
- [16] Zhang Y, Hu Y F, Xiang S *et al.* Appl. Phys. Lett., in press
- [17] Lin Y F, Song J H, Yong D *et al.* Adv. Mater., 2008, 20: 3127
- [18] Liu K H, Gao P, Xu Z *et al.* Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 213105
- [19] Yang Y, Qi J J, Liao Q L *et al.* Nanotechnology, 2009, 20: 125201
- [20] Scrymgeour D A, Hsu J W P. Nano Lett., 2008, 8: 2204
- [21] Kwon S S, Hong W K, Jo G *et al.* Adv. Mater., 2008, 20: 4557
- [22] Hong K S, Xu H F, Konishi H *et al.* J. Phys. Chem. Lett., 2010, 1: 997