

中子嬗变掺杂单晶硅

李石岭

一. 先从半导体说起

半导体,顾名思义是介于导体和绝缘体之间的物质,它在一定的条件下可以导电,而且它的导电能力受外界条件(如温度、光照等)的影响很大。半导体借以导电的载流子有两种:电子和空穴(导体只有电子一种载流子)。以电子为主导电的半导体称作N型半导体,以空穴为主导电的称作P型半导体,完全纯净的半导体,电子和空穴数目相等,呈现本征导电,这样的材料称作本征半导体。实际上本征半导体是很难获得的,而且应用也不广泛。人们往往是向半导体内掺入一定量的某种杂质以获得不同导电类型和不同电特性的半导体,这就是掺杂。例如向硅中掺磷,磷在硅中是施主杂质(施放电子的杂质),就可以获得N型半导体硅;如向硅中掺硼(硼为受主杂质)就可得到P型硅。而半导体硅的电阻率和杂质浓度存在如下关系:

$\rho = 1/(B \cdot N)$, ρ 为电阻率; B 为常数 N 为杂质浓度。所以又可通过掺入杂质量的不同而得到不同的电阻率值。过去沿用的常规掺杂方法,不管是溶液掺杂法、硅芯掺杂法、每合金掺杂法还是气相掺杂法,都是把外部杂质在热分解、混合和沉积过程中经过弥散掺到半导体内去。这样,由于溶解度、分凝系数等的限制,要得到很均匀的掺杂是很困难的,其次要使掺入的杂质浓度很准确也是很难控制的。这就象一杯盐水,在溶液态相对而言还比较均匀,而当凝结成冰时就变得不那么均匀了。比较明显的是,尚未成冰的溶液和冰层的含盐浓度是不同的,靠近溶液的冰层和远离溶液的冰层含盐浓度也是不同的。常规掺杂半导体的这些缺点在用于制造大功率器件(如整流器、可控硅)时变得很突出,因为这些器件要经受大电流高电压,晶片直径很大,如果掺入杂质分布不均匀,那么半导体晶片的电阻率就不均匀,器件在使用中就on易在电阻率偏低的局部区域击穿。要解决这些问题,靠常规掺杂法是很困难的。

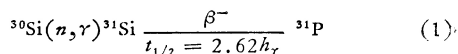
二. 核物理的启示

原子物理和核物理告诉我们,利用核反应可以达到物质改性的目的。这就启发人们在半导体内部去寻找可以利用的同位素,通过核反应达到内部掺杂,而不

是把外部物质掺入半导体内,以此来克服常规掺杂法不能克服的困难。中子嬗变掺杂硅就是这样产生的。

三. NTD 硅

硅,是应用广泛、性能较好的一种半导体材料,通常含有三种同位素,即 ^{28}Si 、 ^{29}Si 和 ^{30}Si , 它们的相对丰度分别是 92.2%, 4.7% 和 3.1% 人们发现 ^{30}Si 同位素与热中子存在辐射俘获反应,其反应式为:



由该反应产生的磷的浓度为:

$$N_p = N_0 \cdot \bar{\sigma} \cdot \phi \cdot t \quad (2)$$

其中, N_p —— ^{31}P 的浓度,原子个数/ cm^3

N_0 —— ^{30}Si 的浓度, $(1.53 \times 10^{21} \text{ a}/\text{cm}^3)$;

$\bar{\sigma}$ —— ^{30}Si 的 (n, γ) 反应截面, $(0.11 \times 10^{-24} \text{ cm}^2)$;

ϕ ——热中子通量, $n/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$;

t ——辐照时间,秒。

通过上述反应,就在硅中存在大量 ^{28}Si 、 ^{29}Si 同位素的基础上,掺入了一定浓度的磷 (^{31}P),这就达到了在硅体内部掺磷的目的,这就是中子嬗变掺杂(简称 NTD),由此造成的硅称作 NTD 硅。

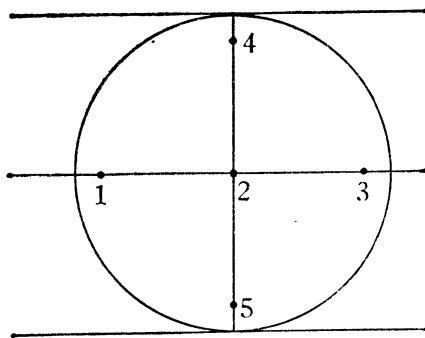
很显然,通过 NTD 方法较之常规掺杂法至少有如下优越性:

1. 由于是内部掺杂,就避免了常规掺杂法在掺杂过程中带入其他杂质的可能。

2. ^{30}Si 同位素在硅中的分布是很均匀的,所以由其嬗变而得到的磷在硅中的分布也很均匀,这就大大改进了硅单晶电阻率的均匀性,克服了常规掺杂法的一大难题。例如,为了定量地给出硅单晶的断面电阻率的不均匀度,可以在硅单晶棒的横断面上测 5 点电阻率值(如下图),并定义不均匀度为:

$$\Delta = \frac{\rho_{\text{极大}} - \rho_{\text{极小}}}{(\rho_{\text{极大}} + \rho_{\text{极小}})/2} \times 100\% \quad (3)$$

常规掺杂法获得硅单晶,不均匀度 Δ 值很大,达 20%



左右;而 NTD 硅的不均匀度 Δ 只有 2% 左右。

3. 从式 (2) 可以看出,NTD 硅掺入磷的浓度可

通过控制热中子通量 ϕ 和辐照时间 t 来调节,因此可以实现精确掺杂和重复掺杂(即可以使每次辐照样品的掺磷量都相同,这一点常规掺杂法是很难办到的)。

由于上述几点,NTD 硅在制作半导体器件上的优越性是显著的。例如用这个办法制造可控硅,其耐压性能很理想,可达到或超过常用的雪崩击穿电压理论计算值,耐压一致性也好,产品的等级合格率大幅度提高(例如由常规硅的 30% 提高到 60% 或 80%)。

四. 发展现状和展望

七十年代以来,NTD 硅得到迅速的发展,很多国家如西德、丹麦、美国、日本等都先后投入了 NTD 硅的商业生产,大功率器件已广泛采用 NTD 硅材料来制做,我们国内也已开展了这方面的工作,大功率器件和高反压器件用 NTD 硅来制做,已取得较好的结果。

NTD 硅只是核物理应用于半导体材料工业的一个例子。而半导体工业的发展,现在和今后还存在着许多新的课题,这些都期待着原子物理、核物理、高能物理等学科的启示和推动。相信随着科学技术的发展,不同学科在半导体工业上的应用必将是百花争艳!