

半导体硅材料的发展

王凯民

(陕西应用物理化学研究所,西安 710061)

韩汝芬

(北京科技大学,北京 100083)

在查阅大量文献的基础上,首次对半导体硅材料的发展过程进行了系统的总结,并将其划分为认识、工业化和高完整性发展的三个阶段.以半导体硅材料的技术发展为主线,论述了三个发展时期的特点,阐明了与之相关的军事、工业和科技背景,探讨了半导体硅材料发展中的技术及其实现条件.

硅作为半导体材料仅有 50 年的历史,但其发展速度是惊人的.世界多晶硅年产量从 1960 年的 50 吨上升到 1985 年的 7 千多吨;质量上完成了冶金级硅、超纯硅、高完整性单晶硅的发展,使之成为目前最完美、理解最为透彻的材料.硅材料在当今半导体工业的所有基片中约占百分之九十八,这充分说明它是影响电子工业乃至实现现代化的重要材料.晶体管发明者之一美国布拉顿(W.Brattain)曾说:“没有这些材料,就没有一切.”因此,研究半导体硅材料的产生、应用和发展,具有重要的意义.

半导体硅材料的发展分为三个阶段:1. 本世纪 50 年代之前,认识和应用硅材料;2. 50 年代至 60 年代初,研究超纯硅材料及其工业化生产;3. 60 年代之后,发展完整的硅材料.在每个时期,硅材料都和相应的器件一起迅速推动着科技及社会的发展.

一、对硅材料的认识和研究

本世纪初,随着通讯和无线电工业的发展,在质量和数量上对检波器都有了新的需求.由于首次使用的金属屑检波器不能连续工作,难以适应大规模应用而遭淘汰.从 1904 年起,人们陆续发现金属丝与方铅石、硅、硒、碳化硅等晶体接触具有检波作用,并相继制成了最初的固态检波器.但它们的可靠性差且不能在高温

下工作,因而很快被发展起来的真空整流器取代,固态检波器仅作为实验室仪器用于检测和调节超高频信号^[1].

30 年代前期,由于发送远距离定向无线电的发展,人们就试图开发具有准确方向的超短波.然而,要测到超高频信号,必须使检波器的电容极低,所以固态检波器再次受到注意.1937 年,美国贝尔实验室的无线电小组探索用于通讯的高频检波器,奥尔(R.S.Ohl)和索思沃思(G.T.Southworth)对几种晶体材料进行研究后发现:硅具有稳定性和化学惰性.应奥尔的邀请,化学家格里斯戴尔(R.O.Grisdale)通过对化学公司的硅晶体熔化,得到了能改进整流性质的纯硅小样品;冶金学家斯卡夫(J.H.Scaff)和特奥勒(H.C.Theuerer)也很快停下软合金的研究工作,通过真空下石英坩埚内硅粉的熔化,得到了面积较大且有整流性质的纯硅锭.由于它极易破碎,因而又进行了氦气氛下缓慢凝固硅熔体的实验.奥尔吃惊地发现:先凝固的锭顶部同后凝固底部的整流极性恰恰相反^[2].当用光照射沿垂直面切下的样品时,不仅会产生光电势,而且整流性质较好.1940 年,当奥尔给布拉顿做演示实验时,这位物理学家起初认为是骗局,尔后又惊讶不已^[3].不久,斯卡夫又从实验中发现:当从一端凝固硅锭时,有两类杂质(他当时也称为 N 和 P 型)会发生趋向不同的偏析现象.他进一步推断:如果初始

硅中的两类杂质含量相等,那么当硅熔体缓慢从一端向另一端冷却时,最后的硅锭一端为P型;另一端则为N型,且第III族元素是P型杂质,第V族元素是N型杂质。

第二次世界大战前夕,德国空袭的威胁直接刺激了英国雷达及与之相关的硅检波器的研究,早年的硅检波器主要靠经验摸索,它的灵敏点完全取决于金属丝在晶体上的精确位置,金属丝只有与晶体上的某些精确位置相接触,才有灵敏的整流性质,但金属丝常常偏离灵敏点而不能持久使用。为使硅材料处处有灵敏点,硅材料的提纯就成为改进检波器稳定性的唯一方向。英国休斯敦(T.Houston)首先使用99%的纯硅晶体制造检波器。英国通用电器公司从硅粉、铝等熔化的熔体中得到99.99%的纯硅^[4]。1939年,英国用纯硅材料制成的检波器改善了雷达的性能,在阻止德国的空袭中发挥了作用。

1941年底,日本对珍珠港的突然袭击,导致了美国迅速卷入第二次世界大战。英国对硅检波器的成功使用及德国西门子公司对锗检波器的研究表明:硅和锗是制造雷达检波器的理想材料;改进检波器的主要方向是材料的提纯。为此,美国政府组织三、四十个实验室进行硅锗材料的研究。由贝尔实验室和宾夕法尼亚大学负责的硅材料研究取得了重要进展^[5]。1942年,宾夕法尼亚大学的塞茨(F.Seitz)提出用锌还原四氯化硅制取纯硅,并与杜邦公司合作,制出纯度高于99.9%的硅针状多晶体,用此材料做出了性能远高于过去的检波器;贝尔实验室的斯卡夫则发现硼是增强纯硅导电性能的非常有效的杂质;蒂尔(G.K. Teal)却探索了氢气还原四氯化硅的实验。同年,珀杜大学锗材料研究的领导者拉克-霍罗维茨(K.Lark-Horowitz)宣布:“正如威尔逊(A. Wilson)10年前所指出的,硅和锗是本征半导体,而不是含杂质的金属。”在此之前,人们对此问题并没有明确的陈述。

雷达和原子弹的研制充分显示出基础科学的重要性。基础科学被喻为紧急情况下能抽出

水的“蓄水池”。1945年,在肖克利(W.Shockley)的建议下,贝尔实验室成立了关于固体物理的基础研究课题,其目的是研究半导体的基础理论,从而有利于通讯技术的改进。30年代初,虽然威尔逊已建立了半导体的“空穴和电子”概念,但直到1941年很少有科学家知道,因此该理论既未对长期处于技术停滞状态的固体检波器做任何解释,也未对半导体的实验工作有重大影响,可能的原因是尚未得到材料使实验和理论联系起来。战后,贝尔实验室再次把注意力集中到硅锗等简单的元素半导体上。肖克利首先提出了场效应固体放大器模型,但试验却很快失败了。1946年4月,巴丁(J.Bardeen)提出了解释失败原因的表面态理论,一年后,首次在N型硅上得到证实。当用锗材料代替硅时,结果更为显著。通过进一步的改进实验,1947年底,巴丁和布拉顿发现了晶体管效应^[6]。

如果没有超高频雷达,就不可能需求硅晶体检波器;没有检波器,也就没有硅材料的产生和提纯;没有纯硅,就不可能有晶体管。“正是奥尔和斯卡夫关于硅的开创性工作,使物理学家们得到新的半导体材料。晶体管的发现,既依赖于30年代建立的理论基础,又依赖于40年代材料,特别是硅锗的提纯和改进^[7]。

二、硅成为主要半导体材料

晶体管的效应发现尚未公开之前,只有贝尔实验室的极少数科学家知道这件事。受晶体管效应的启发,肖克利很快提出了结型晶体管理论。蒂尔认为:“若能象从真空管中抽出残余气体一样,除去锗晶体中的晶粒间界等缺陷,这对晶体管将是非常重要的”。他从早期利用碘化汞熔体制取单晶的实验中得到启发,于1948年2月向贝尔实验室提出了生产锗单晶的建议,但肖克利等人认为:“拉单晶不仅昂贵,而且多余”,于是,蒂尔只能到别的实验室进行研究,并于同年10月,拉出了第一根锗单晶。半年后,实现了肖克利预言的结型晶体管^[8]。此时,人们才认识到单晶的重要性。半导体电子

学的根本变革不仅决定于晶体管的发明,更重要的是取决于单晶半导体材料的应用。1951年,锗合金型晶体管要求锗材料的杂质浓度低于 1ppb。对于传统的化学家来说,似乎是不可思议的事^[9]。然而,贝尔实验室的冶金学家普范(W.G. Pfann)却很快发现:置于石墨坩埚中的锗材料,经过多次熔化和冷却,能使材料达到极高的纯度。他的这一发现同样也没有得到理解和重视。但这个称之为“区域提纯”的工艺,由于工艺简单,很快得到工业应用,从而为锗合金晶体管成品率提高提供了保证。

朝鲜战争的爆发,使美国政府对晶体管的购买额明显上升,主要用来装备其国防设备。但当温度高于 75℃ 时,锗器件性能变坏,所以 50 年代初期,对禁带较宽的硅材料的研究又开始加强。首先尝试用区域提纯工艺制备半导体级的硅材料,但熔点极高的硅不仅与所用的坩埚物质反应,使硅熔体受到污染,而且该工艺很难把在硅中偏析系数接近 1 的硼除去。这种残留在硅中的硼原子将起受主作用。为防止不可知的硼浓度对硅材料使用的影响必须将硅中硼含量降到 10^{-10} 以下。

区域提纯工艺制备硅的困难,迫使大多数材料工作者将注意力转移到化学提纯技术的研究。50 年代初期,尽管(原)联邦德国等国尚不具备生产晶体管的技术,但恢复电力工业急需的整流器的生产已使人们从经验上认识到:硅器件的性能要比锗、硒器件优越。因此,德国西门子公司开始研究用化学方法提纯硅材料的技术。他们首先重复了锌还原四氯化硅工艺,证明该方法能制出高纯的针状硅材料。为得到致密的硅棒,他们使用氢气做还原剂、三氯氢硅做原料,与慕尼黑大学的威博格(Wiberg)等人合作把三氯氢硅通入灼热的氢气放电管时,游离的硅开始沉积在电极上,并迅速生长成细棒。这一出乎意料的发现,不仅使他们得到了致密的硅棒,而且其纯度远高于锌还原法。然而,他们并不理解该反应的内在机理。1954 年,比肖夫(F. Bischof)对反应机理进行了详细的研究后认为:电子气放电本身对硅的沉积并不重要,它

仅起加热石墨电极的功能。若用通电流的细硅棒代替电极,那么反应生成的硅也会沉积在棒表面长成细棒。不久,比肖夫实现且完善了这一工艺^[10]。

在大多数材料专家研究用化学方法制取纯硅的同时,仍有部分人从事解决坩埚材料问题的研究。1953 年,贝尔实验室的特奥勒和凯克(P.H. Keck)、西门子公司埃米斯(R. Emis)独立地发明了无坩埚悬浮提纯工艺。与普范发明的工艺不同,悬浮法使用竖直的结构,熔区由硅的表面张力支持,且一次只有一个熔区通过硅棒,晶体的纯度就这样重复数次逐渐提高,但悬浮法的发明却没有区域提纯法那样幸运,它只作为实验室的一种装置并没有立即得到工业应用。部分原因是相当多的专家致力于化学法提纯硅的研究,此外该工艺并没有除去硼杂质。使这一形势改变的另外一个发现是:悬浮法和区熔法除提纯功能外,还具有将多晶结构转化为单晶结构的功能。从此,悬浮法就作为制取单晶棒工艺用于工业。

1953 年底,埃米斯又发明了一项“拉细棒”工艺。从直径为 20mm 的棒顶部熔区以相当快的速度拉出直径 5mm 的细棒,从而为比肖夫的沉积工艺提供了足够数量的硅芯发热体。1954 年,西门子公司建立了制造多晶棒、悬浮工艺提纯及拉细棒的循环工艺,简称为西门子工艺,满足了制造合金硅整流器急需的 P 型硅材料。1965 年,西门子公司展出第一批 1000V, 200A 的硅整流器产品,这与当时广泛使用的 30V, 80A 硒整流器相比确实是轰动一时的改进。

与(原)联邦德国相同,美国也在积极研究硅材料。虽然锗晶体管的制造已从点接触型发展到合金型,但硅晶体管的研究尚未成功。1951 年,蒂尔在直拉硅晶体技术方面取得了初步成功,但对于一些如空穴电子复合寿命等参数却难以控制。为解决这个问题,贝尔实验室的物理学家通过对熔体流动形状和热条件的研究,确定溶质在熔体中的分布;冶金学家们则主要解决在凝固过程中溶质在熔体中的分布;化学

家们却致力于掺杂物和生长方面的研究。次年5月,蒂尔在拉出一批高质量硅单晶后,离开了贝尔实验室,到德克萨斯仪器制造公司组建中心实验室,其目的是制造适于高温的硅晶体管。1954年,硅生长型晶体管的研制成功使得国防订货猛增,急需相当数量的高纯硅。该公司立即发展高纯硅的制备工艺。蒂尔在第二次大战期间发展的氢气还原四氯化硅工艺被加以改进并投入生产,不仅满足了自己的需要,而且向其他公司提供的高纯硅占所需数量的一半以上,成为美国高纯硅的主要供应者。

事实上,50年代初期,许多国家都致力于制备纯硅方法的研究,出现了许多新工艺并开始工业化生产。1956年前后,德国西门子公司利用西门子工艺进行生产;美国有几家公司用四氯化硅氢还原法和三氯氢硅热分解法建成年产72.5吨的生产线。1958年,美国又有两家公司引进西门子工艺建成年产20.5吨的生产线,从而使美国该年高纯硅产量达93吨。1960年,美国高纯硅出现过剩现象,价格急剧下降,一些工厂停产倒闭,但却又有两家公司引进西门子工艺投产。至此,欧美各国高纯硅的工业化生产主要集中到效益好、质量高的西门子工艺上。同年,日本也引进西门子工艺完成了工业化生产,确定了半导体硅的国内供应体制。

50年代中前期,硅和锗是制造半导体器件的两种重要材料,锗一直作为主要的半导体材料广泛应用。不仅锗器件数量多于硅器件,而且其价格也远比硅器件便宜。经过硅的工业化生产,不仅使超纯硅产量增加,而且价格也显著下降。1956年,美国高纯硅、锗年产量分别为6吨和60吨,价格分别为每公斤800美元和500美元;1960年,年产量则分别变为41吨和24吨,其价格也变为每公斤200美元和300美元。从产量和价格上看,60年代初期,硅已成为主要的半导体材料。而造成硅锗地位转换的主要原因是硅器件制造技术的发展和运用。1960年,仅适应于硅材料的平面工艺使晶体管等器件可以成批生产,自此硅半导体技术才获得了进一步的发展,使硅成为主要的半导体材料。

三、硅材料的完整性研究及应用

60年代初期,推动硅材料大量使用的另一动力是集成电路的发明和生产。像晶体管的发展一样,集成电路初期的生产也存在着成本高和价格贵的问题,所以几乎全部的集成电路产品被军方所购买,直至1965年,仍有72%的产品用于军事设备。随着硅晶体管和集成电路的工业化生产,它们在工业特别是计算机、电子工业的使用量增大,逐渐由军用转向民用。这种变化,不仅要求提高产品的成品率,而且推动了低成本、高产量的直拉单晶工艺的广泛应用,从而使直拉硅产量开始领先于区熔硅产量;同时,人们已认识到影响成品率的关键因素是所用硅材料的质量^[11]。

位错是最早研究半导体硅缺陷的突破口。1934年,为解释固体力学性质偏离理想晶体模型的矛盾,物理学家们提出了晶体位错的理论。但由于无法对位错进行直接观察,而被冶金学家认为是挽救不成功理论引进的复杂且虚构的假设。50年代前期,科学家们观察到了锗等晶体中的位错,从而证明了位错的实际存在。1956年,美国通用电器研究所的达什(W. C. Dash)发明了观察位错的缀饰技术,并首先观察到半导体硅中的位错。在此基础上,他的同事洛根(R. A. Logan)对含氧量不同的直拉硅进行研究后发现:当氧含量(主要来自坩埚污染)较高时,溶于硅中的氧将明显减小位错腐蚀坑的大小,甚至有些被遮盖^[12]。所以,直拉硅中确实含有不易发现的位错。可能受这一事实启发,达什开始研究无氧单晶硅的位错情况。他把一细籽晶放入用高频熔化的硅基座顶部,并拉出单晶棒,通过对该晶体进行位错观察,达什惊奇地发现:所得硅单晶既不含氧,也无位错存在。这一意外的收获促使他进一步研究了位错引入的来源。他认为:若选择好籽晶和生长方向,则位错可以通过拉一细颈得以消除^[13]。1958年,在纽约召开的晶体生长会议上,达什发表了《无位错单晶硅的生长》论文,提出了著名的“缩颈”工

艺。

直到 60 年代前期,晶体质量才受到工业界注意,集成电路和可控硅等器件的低成品率影响着它们的工业使用,同时许多学者从位错理论出发,解释半导体器件的失效问题。若消除位错,就能提高器件的成品率^[6]。但是,初期使用无位错晶片的器件并没有达到预期的高成品率,至 1965 年,器件制造者仍对无位错晶片存在着偏见。不久,在克服了 SiO_2 表面钠离子沾污及 SiO_2 -Si 界面态等困难之后,使用无位错晶片才有了较高的成品率,硅片制造商又极力推动无位错晶片的使用,使半导体工业界确信,无位错晶片是器件制造的基本要求,同时也推动了缩颈工艺的广泛采用。但是在长时间的拉制大直径单晶过程中,常规工艺却无法避免附着在内壁的氧化硅颗粒落入熔体表面,破坏了无位错单晶的继续生长,从而影响硅单晶的成品率,增加了无位错单晶的成本。1975 年,美国瓦瑞恩公司的查里特 (C.P.Chariter) 等发明了减压条件下拉制硅单晶的工艺,它通过在低正压气氛中抑制氧化硅颗粒的生成,保证硅单晶在长时间里稳定生长^[9]。从此,无位错缩颈工艺能够在生长大直径硅单晶时使用。

自从 50 年代后期以来,区熔单晶硅主要用于制造可控硅等功率型器件。从原理上说,既可在 P 型硅也可在 N 型硅片上制作这种 PNP 结构的新器件,但最初的可控硅都是在 P 型硅上完成的。由于西门子工艺生产的多晶棒总是 N 型,所以需要数十次的悬浮提纯除去引起 N 型电阻率的未知物 X。1956 年,最初作为一种兴趣和爱好,西门子公司半导体实验室的罗伊斯尔 (K.Reuschel) 开始寻找这个元素。由于当时用放射化学、光谱分析等手段检测它极其不易,他经过两年的艰苦探索才知道这个未知物是磷。1960 年,他和同事们已使多晶棒的含磷量下降并制出了高阻 N 型硅单晶,此时,从实验中已经发现制造可控硅的最佳材料是电阻率为 $120\text{--}200\Omega\text{cm}$ 的 N 型硅,因而还需要对高阻硅进行准确数量的磷掺杂。整个 60 年代,都是把含磷化合物作为掺杂剂通过氢气进入反

应器,从而获得掺磷的多晶棒。这不仅引入了其他杂质,而且磷的分布也很难控制。随着 70 年代器件功率提高,在电阻率不均匀或有杂质条纹的硅片上制作的器件难以保持稳定的性能。1974 年,为解决这个问题,西门子公司施诺雷 (M.Schmöller) 重新研究了中子嬗变技术。

中子嬗变就是利用中子流辐射硅单晶,使硅中分布均匀的 Si^{30} 转变为 Si^{31} , 而 Si^{31} 很快蜕变成 P^{31} , 达到掺磷的目的。美国的拉格-霍罗维茨于 1951 年首次提出这一设想。60 年代初期,贝尔实验室证实该技术能用于生产,但由于实验条件及性能和经济上的要求不明确,因而未引起人们的注意。1974 年,施诺雷利用该技术制出了均匀掺磷的硅片,不仅使可控硅的阻断电压明显增加,而且还大大提高了可控硅的功率,这引起了器件工业界的极大关注^[6]。1981 年,世界区熔中子掺杂单晶量占区熔硅的 50%,满足了高质量的功率器件的要求。

70 年代,由于无位错晶片的广泛使用,使空位、杂质、间隙原子等点缺陷失去了湮灭的地方,因而在退火时,晶片中的过剩点缺陷形成一种新缺陷——漩涡缺陷。其危害在于热处理时会形成二次缺陷,从而引入电活性杂质,导致器件参数下降。因此,70 年代前期,“缺陷工程”应运而生,一方面出现了利用缺陷吸除电活性杂质的外吸除技术;另一方面则对微缺陷形成机理加以探讨。尽管现在还没有一致的结论,但许多人认为“回熔”是产生漩涡缺陷的重要因素^[7]。因此,解决微缺陷问题的主要途径是抑制引起回熔的热对流。70 年代后期,人们还发现:除氧有增强硅片机械强度作用外,晶体内部的氧沉淀具有吸除表面金属杂质和抑制表面氧沉淀及堆垛层错形成的作用。这个被称为内吸除的效应使人们对硅中氧作用的认识变得极为复杂。从此,硅中氧、氧沉淀等就成为硅材料研究的重点。有人把硅-氧体系看成是整个硅材料研究的范例。正如“铁的时代”把注意力集中在铁-碳系一样,“硅的时代”必将衍生一门硅-氧相互作用的新学科。为利用这些有益的效应,必须使硅中氧含量适当且轴径向分布均

匀。而熔体中热对流则是影响氧含量及分布的决定因素。1980年,为抑制晶体生长时熔体的热对流,日本索尼公司提出了在磁场中拉单晶的工艺,被称为是重要的技术突破。

象中子嬗变技术一样,在磁场中拉单晶工艺的出现并非首次。根据磁流体力学理论,熔体的热对流在磁场中将会受到抑制。从1965年到1970年,人们在磁场中用水平舟生长出高质量的镓、铟化钢等晶体;1970年,日本索尼公司把该技术用于硅单晶的生长,取得了突破性进展。麻省理工学院教授高特斯(H.C.Gatos)认为:日本人就是使用了他研究的成果。1981年,在美国召开的国际半导体会议上,该技术引起了硅材料工作者的极大关注^[48]。该工艺不仅使氧含量及分布得到控制,而且对减少杂质条纹和微缺陷也颇有成效。美国、日本、德国等国对该工艺的开发进入实用阶段,用该工艺生长的硅材料已经在超大规模集成电路中使用。

经过几十年的发展,硅材料已成为目前最完美及理解最为透彻的材料。由于它具有极高的纯度和完整性,所以除满足器件发展需求外,还为科学研究提供了可能。在超纯硅基础上的实验纠正了“半导体导带底处于布里渊区原点”的结论,解释了电子在高强度电场中的行为,得到了电子极限漂移速度值。这些对于定量描述和预言半导体器件的特征都具有重要的意义。硅材料不仅使电子技术不断更新,而且能给人类带来新能源,太阳能电池已经是硅材料使用的一个重要部分。从1960年至今,集成电路已经发展到超大规模,据1986年报道,在一块最大实用硅片如 10cm^2 上可集成一亿个晶体管,比目前的集成二百万个晶体管高50倍。这将不可避免地使用更完整的硅材料^[49]。另外,由于砷化镓材料在电学性能上优越于硅,在一定程度上将替代硅的使用。但从经济和工艺的可靠性考虑,硅占有绝对优势。因此,硅材料在相当长时间内仍是主要的半导体材料。

总结半导体硅材料发展的特点是:第一、硅材料属技术科学范畴,有较强的应用性。在其发

展过程中,重要工艺有直拉法、磁拉法、区域和悬浮提纯法、化学反应提纯法、无位错法和中子嬗变法(后二者最初由物理学家提出)。其共同点是:技术专家们首先将这些工艺应用于硅材料的研究。在技术的使用和发展方面,技术专家比科学家更为敏感。正如摩顿(J.A.Mortor)所说:普范作为冶金学家,他思考的是与材料(不只是晶体管所用材料)有关的问题,在材料研究范围内,他的判断力要比一些科学家好^[20]。第二、半导体硅材料如同钢、铁材料,其本身是被使用的对象,决定了它的发展必须受器件及工艺发展的影响。事实上,硅材料的产生和发展都是在器件的进步中完成的。三、四十年代,由于高频检波器的需求,促使硅材料引起人们的注意,并开始进行提高纯度的研究;50年代,晶体管和整流器等分离元件的发展和工业化生产,促使硅材料向超高纯和单晶化方向发展,而平面工艺的发明则推动了硅材料的大量使用;60年代,集成电路和可控硅等功率型器件的出现,促使了细颈工艺的应用和无位错晶片的使用,这不仅是硅材料完整性提高的决定性的一步,而且为以后微缺陷的发现研究提供了可能;70年代以后,随着大规模集成电路和高功率型器件的生产,促使了许多抑制微缺陷和掺杂物不均匀性工艺的出现。总之,器件的发展是硅材料发展的动力。而器件又是社会生产力提出的要求,所以归根结底,硅材料的发展是由社会生产不同阶段所需的愿望不同而推动前进的。

本文是在柯俊教授指导下完成的。韩汝琦教授、肖治纲副教授、马纪东教师审阅了全文,在此谨致诚挚谢意。

- [1] K. J. Dean et al., *Wireless World*, 79 1(1973), 2.
- [2] J. H. Scaff, *Metallurg. Trans.*, 1-3(1970), 561
- [3] E. Braun and S. Macdonald, *Revolution in Miniature*, Cambridge University Press., (1978), 44.
- [4] R. L. Petritz, *Proc. IRE.*, 50-5(1962), 1025.
- [5] H. C. Tory and C. A. Whitmer, *Crystal Rectifiers*, McGrawhill Publ. Co., New York/London, (1948), 301.
- [6] C. Weiner, *IEEE Spectrum*, No.1(1973) 24.
- [7] E. Amsterdam, Nobel Lecture: Physics, 1942—1962, (1964), 318—378.
- [8] G. K. Teal, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-23-7

- (1976), 621.
- [9] E. Spenke, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 64-11(1981), 11.
- [10] E. Spenke, *Siemens Review*, XLVIII, No. 1(1981),
- [11] 滝口莲一, 电子材料, No. 6(1981), 53
- [12] R. A. Logan et al., *J. Appl. Phys.*, 28-12(1957), 1419.
- [13] W. C. Dash., *J. Appl. Phys.*, 29(1958), 736.
- [14] J. E. Lawrence 著, 方兆强译, 超大规模集成电路电子学: 微结构科学1, 科学出版社, (1986), 330.
- [15] C. P. Chariter, *Soild State Tech.*, No.2(1975), 31
- [16] 山本章, 原子力工业, 25-1(1980), 65.
- [17] 纪振山等, 上海金属(有色分册), 5-3(1984), 31.
- [18] 张伟成, 稀有金属, No. 6(1984), 15
- [19] J. S. Mago, *Scientific American*, 255-4(1986), 59.
- [20] J. A. Morton, *Internation Sci. and Tech.*, 29-5(1964.), 82.

铀氢锆脉冲反应堆及其应用

左辉中 陈 达

(西北核技术研究所, 西安 710024)

简述我国第一座铀氢锆脉冲反应堆。铀氢锆堆由于使用铀氢锆燃料——慢化剂复合元件, 具有很大的、瞬发的负反应性温度系数, 使铀氢锆堆具备显著特点: “固有安全性”和相当高的功率脉冲能力, 在科学技术上获得广泛的应用。

Abstract

We briefly describe the situation of the first pulsed reactor in China. The pulsed reactor has a large prompt negative temperature coefficient of reactivity provided by combination of the uranium-zirconium hydride fuel and the moderator. Therefore, its most outstanding features are “inherent safety” and fairly high pulsed-power capacity. The pulsed reactor is now extensively used in science and technology.

我国自行设计、研制建造的第一座脉冲反应堆(四川成都)于1991年11月中旬通过鉴定。它打破了美国GA公司30多年来对这种堆技术的垄断, 使我国成为世界上能建造这种堆的第二个国家。这是一个巨大的成就。

铀氢锆脉冲堆, 简称TRIGA (Training research and isotope production reactor of general atomic)堆, 前三个字母代表培训、研究、同位素生产, 后两个字母代表美国通用原子公司。它是应用铀氢锆($UZrH_{1.6}$)作为燃料和慢化剂复合元件的一种游泳池式研究堆。它的主要特点是安全性高、经济性好、小型紧凑及应用广泛。因此, 世界上20多个国家和地区从美国GA公司购买建造了60多座, 成为近年来建造最多的一种研究性反应堆。

一、我国第一座脉冲反应堆^[1]

它是一座验证性原型堆, 主要用来完成一系列试验任务, 如摸清该堆型的特性, 校核理论, 验证设计等。该堆采用标准型铀氢锆元件, 外径为37.2mm的薄壁不锈钢包壳, 每根燃料元件装三块铀氢锆芯体, 含铀重量比为8.5%, ^{235}U 丰度为20%, 每根元件含 ^{235}U 共39.4g, 两端各装着石墨, 然后加上端塞, 再焊接密封。燃料元件在堆芯(直径536mm)是按同心圆排列的, 如图1所示。

堆芯外面是石墨反射层和铅屏蔽层。整个堆芯安装在直径2.2m、深7m的不锈钢复面水池内。轻水作冷却剂, 又作屏蔽层。不锈钢水池复面四周是2.5m厚的混凝土屏蔽层。堆上