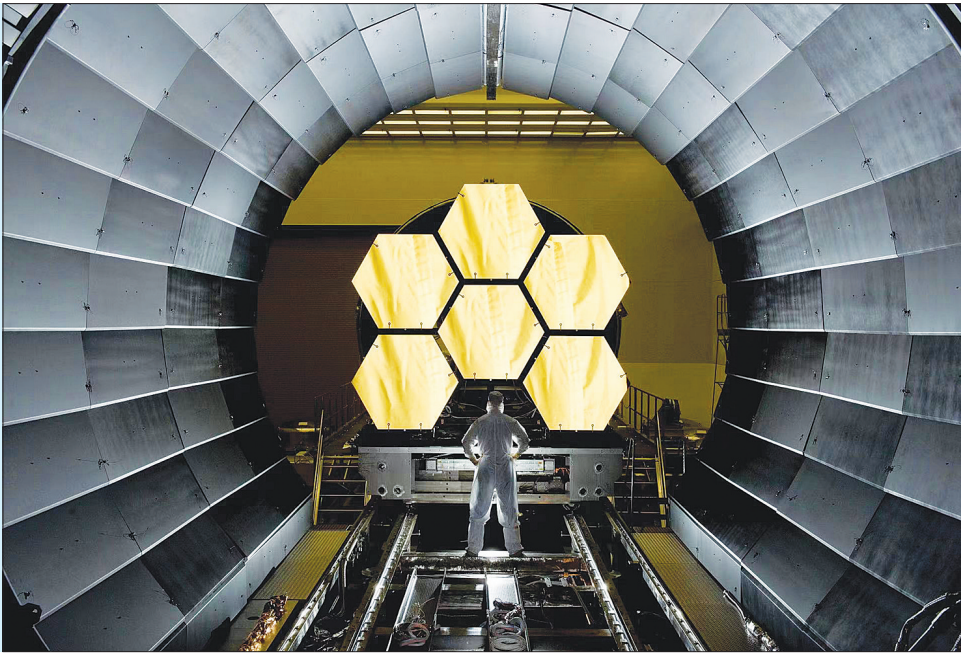


芯片里的金属

本报记者 张依依

金属材料在芯片工艺的演进中发挥着重要作用。在先进制程的尺寸不断缩小的过程中,贵金属及其合金材料在实现小线宽、低电阻率、高黏附性等方面扮演着关键角色。进入21世纪后,芯片材料共增加了约40余种元素,其中约90%都是贵金属和过渡金属材料。

贵金属是芯片先进工艺的推手之一,英特尔新近引入了金属锑和钕做金属接触,让电容更小,突破了硅的限制。此前,英特尔在10nm工艺节点的部分互连层上率先导入钴材料,达到了5~10倍的电子迁移率改善,将通路电阻降低了两倍。



英特尔在互联材料的探索之路上并不孤单。应用材料是最早投入以钴作为导线材料,取代传统铜和钨的半导体技术大厂之一;格罗方德在7nm制程工艺中同样用钴代替了钨。目前,三星和台积电等也在积极研发新型互联材料。预计在不远的将来,钴合金、钕和锑等新一代互联材料有望闪亮登场,为先进工艺芯片搭建桥梁。

“芯片城市”里的道路如何互联

“如果把一枚芯片比作一座城市,那么晶体管是其核心区,负责信息的运算,互连层就相当于城市的道路负责信息与外界的交通。”在接受《中国电子报》记者采访时,镁光资深工程师盛海峰博士如此形象地比喻。

盛海峰认为,摩尔定律下,当核心区的晶体管越来越小、密度越来越大时,道路就会越来越窄、越来越密。当核心区的密度大到一定程度时,道路的运输能力,即互连层的RC延迟,就成为整个芯片速度提升和功耗降低的瓶颈。在此情况下,互连层的金属材料需要通过升级换代,来为晶体管核心区的“道路”提速。

摩尔定律的延续与互联材料的演进息息相关。清华大学研究员王琛作为技术负责人,曾先后任职于英特尔和芯片设备制造商泛林半导体,对高端芯片材料和先进芯片制造及架构有深入研究。王琛向《中国电子报》记者解释,互联材料其实就是前端晶体管层与后端外部电路层之间电信号互联传递的导线。

量子效应的增强是互联材料面临的一大挑战。王琛向记者表示,当前晶体管在多个几何维度进入亚10nm尺度,材料的量子效应开始显著,晶体管继续微缩就会遇到材料、工艺和器件结构的挑战。作为连接前端晶体管层和最外层的封装植球层的核心,中端和后端的互联材料微缩也面临量子效应增强的挑战。

接种新冠疫苗
保护自己
保护家人



中宣部宣教局 国家卫生健康委员会宣传司 中国疾病预防控制中心 中国健康教育中心

公益广告

了铜。但是,因为铜不能用干法蚀刻,所以后端互联问题迟迟无法解决。

为寻找灵感,一位IBM工程师来到了素有“人间花园”之称的大马士革。机缘巧合下,他看到了一位在偏僻角落从事金属镶嵌工作的匠人。

在观摩匠人镶嵌工艺时,工程师的脑海中不断浮现这样的场景:雕刻类似蚀刻,镶嵌与沉积相似。他突然意识到,铜虽然不能被蚀刻,但可以沉积。与大马士革工艺类似,工程师可以先在介电层上蚀刻金属导线用的图膜,然后再填充金属,以实现多层金属互连,无需进行金属层蚀刻。就这样,这位工程师顺利解决了铜互联技术问题,并将这项工艺命名为大马士革工艺。

时代在进步,线宽在缩小。2018年,应用材料等公司又用钴作为导线材料,在部分领域取代传统的铜、钨线。

谈及铝、铜、钴导线的代际变化,盛海峰向记者表示,铜取代铝是因为它导电性更好,可以降低RC延迟中的电阻。在很多逻辑芯片中,铜全面取代铝,也就是将所有互连层都升级为铜。但钴对铜的取代有所不同。钴只是在互连层很窄的时候才对铜有导电性的优势,所以钴只是在金属0层(M0)和金属1层(M1)取代铜,其他互连层还是会继续用铜。

从钴到钕、锑

英特尔率先在10nm工艺节点的部分互连层上导入钴材料,实现了5~10倍的电子迁移率改善,将通路电阻降低了两倍;应用材料是最早投入以钴作为导线材料,取代传统铜和钨的半导体大厂之一;格罗方德在7nm制作工艺中同样用钴代替了钨。

如何保证在20nm甚至更小的尺度,将电阻率维持在较低水平,是互联材料研发的核心。王琛表示,钴的引入虽然带来了不少良率和可靠性上的问题,但在互联材料领域是一个大跨越,突破了现有的铜材料体系,整体对10nm芯片性能有一定提升。

更重要的是,钴的引入为后期更小的节点工艺做好了技术储备,预计对7nm后节点性能的提升将更为显著。

互联材料正在朝着超薄低电阻率、无阻挡层、低延迟方向演进。目前,三星和台积电等都在积极研发新型互联材料。王琛表示,在不远的将来,钴合金、钕和锑等新一代互联材料也有望登场。

同时,无扩散阻挡层的互联线,甚至在晶体管层下预埋互联电轨,也都是解决互联材料挑战的方向。

引入新金属材料助力先进制程

贵金属材料在芯片工艺的演进过程中发挥着重要作用。半导体行业专家池宪念向《中国电子报》记者表示,半导体芯片不断朝着体积小、速度快、功耗低的趋势发展,要求接触点的接触电阻低,较宽温度范围内的热稳定好、附着好,对横向均匀、扩散层薄等也提出更高要求。

因此,在先进制程尺寸不断缩小的过程中,贵金属及其合金材料在实现小线宽、低电阻率、高黏附性、接触电阻低等方面扮演着关键角色。

在芯片工艺制程不断提升的过程中,晶体管面临的主要挑战是抑制短沟道效应。盛海峰表示,现阶段,FinFET工艺最多延伸至3nm。在3nm及以下节点,GAAFET工艺是主要方向。GAAFET主要使用传统材料,最大的挑战是工艺精度控制。

面对这一挑战,新金属材料的引入较为关键。盛海峰对记者说,三星使用了镧掺杂来提升Vt(门槛电压)。而对于互连层来说,新材料的引入除了有互连层金属钴,还有互连层金属和互连层绝缘层之间的屏障层。屏障层的作用是黏合互连金属和绝缘层,以及提升互连层的电子迁移可靠性。钽和钕都是屏障层里已经使用和正在探索的新元素。

当前,全球2nm芯片制程之战的号角已经吹响。2011年,22nm节点引入了Fin-FET工艺取代平面型晶体管;全新的GAA和CFET等工艺则有望在3nm节点左右逐步引入。

这些过程将涉及大量的掺杂控制、应变控制等材料问题。王琛向记者表示,在亚1nm节点,相关材料的挑战越发凸显,材料量子效应将发挥显著作用。届时,硅基材料的量子效应调控、材料的原子级加工、器件的单电子波动问题,将深刻挑战现有材料体系和制造工艺。新的材料体系,例如层状半导体、新原理器件和新加工工艺的引入势在必行。

“据悉,二维半导体材料因尺寸较小,有望帮助突破2纳米先进制程。”南京大学电子科学与工程学院教授万青对《中国电子报》记者说。

新增芯片材料九成是金属

贵金属具有优异的导电、稳定和导热性能,是半导体行业的关键核心材料。进入21世纪之后,芯片材料共增加了约40余

种元素,其中约90%都是贵金属和过渡金属材料,可见金属材料在芯片领域应用的重要性。

应用于芯片制造领域的金属材料拥有更高“门槛”。池宪念以互联材料中的金属为例告诉记者,芯片级金属材料要考虑接触电阻、纳米级别的黏合度等因素,所以铜、钴等金属要在做成高纯度靶材或者合金靶材之后,才能用在芯片制造环节。目前,德国贺利氏、美国霍尼韦尔国际股份有限公司、日本东曹株式会社主要生产芯片级的铜和钴。

受俄乌局势影响,钯金成为了目前最火的贵金属之一。俄罗斯的钯金产量约占全球总量的40%,钯金出口量占比达到35%。钯金可用于传感器等半导体元器件中,也是芯片封装环节的重要原料之一。

有研亿金新材料有限公司副总经理何金江对《中国电子报》记者表示,钯及银钯合金等是制备MLCC电容器、谐振器的重要材料;在半导体后道的封装环节,钯合金及镀钯丝主要用作电子封装的引线键合,用来替代金丝;此外,钯可以用于元器件精密连接的钯合金焊料。基于钯的特性,新的材料和应用也在开发中。

贵金属材料在芯片领域主要有四方面应用。王琛向《中国电子报》记者表示,第一是互联材料。比如早期的铝到铜,到Al-Cu合金和钨,以及在研的最新的钴、钕等。

第二是金属栅极材料。自从2007年英特尔在45nm节点引入高介电-金属栅晶体管结构,钽、氮化钽、氮化钛、氮铝钽(TiAlN)等材料体系得到了广泛应用,金属硅化物接触也经历了从钛、钴和镍到金属硅化物体系的演进。

第三是金属阻挡层黏附层材料,比如钛/氮化钛、钽/氮化钽等常用于芯片制造和先进封装中的阻挡层黏附层材料。

第四是后端封装用金属材料,包括传统的铅基合金和无铅锡、锡、银、铜基合金等。另外,后期基板互联等也涉及大量金属材料。其中,芯片前端纳米底层互联金属、金属栅极材料、阻挡黏附层材料等,均是金属材料研发的前沿。因此,如何在小尺度保持高电导率、低电迁移率、薄膜均匀结晶性、高热扩散性、工艺可集成性等特性,成为芯片金属材料的研究重点和下一代高性能芯片的材料瓶颈。

金属涨价对芯片冲击较小

集成电路领域重要的贵金属主要包括

金、银和铂金。当前,俄乌局势的变化对全球铝、镍、钼金、钨金等有色金属和贵金属供应造成冲击,让相关产品的价格有所上涨,贵金属市场频繁出现波动。由于半导体产业链整体具有一定的封闭性,前期受新冠肺炎疫情冲击,整个产业链供应链问题得到一定凸显。很多业内人士都担心,贵金属市场的波动很可能会进一步扰动芯片产业链供应链的稳定性。

贵金属是重要的半导体材料之一,其价格的波动会对芯片制造的成本产生一定影响。池宪念对《中国电子报》记者表示,随着贵金属价格的波动,芯片制造的成本也会产生变化。比如,在贵金属供应链不稳定的情况下,贵金属的采购价格会随之上涨,导致芯片的成品价格也会同步上涨。

不过,由于贵金属在芯片中的应用比重较小,实际需求量也很小,万青认为,贵金属价格的波动对芯片产业的影响不太大。

以钯金为例,钯金价格的上涨会导致半导体行业的成本有所增加,但考虑到单个半导体产品对钯金的需求量较少,钯金涨价对原材料库存水位较高的企业影响很小。另外,以钯金为代表的贵金属可以寻找其他贵金属作为替代,所以不太可能面临断供这样的严重问题。

在王琛看来,贵金属市场波动对半导体产业链的影响需要从短期和长期这两个角度来看。王琛向记者表示,芯片的总体成本在于制造成本,而制造成本主要源自工艺成本。贵金属在芯片制造中不可或缺,如果国际上的不稳定因素不断增加,某一种关键金属材料的短缺将在短期内持续冲击芯片价格。但由于贵金属在芯片行业的总体材料用量占比和成本占比较低,所以短期内贵金属价格的波动对芯片产业链影响有限。

而从长远角度来看,后疫情时代以及俄乌局势的持续变化,可能会带来一些潜在的不稳定因素。王琛认为,芯片的长供应链特性也决定了其自身的脆弱性。因复杂国际形势导致的不稳定因素,可能会让芯片相关产业链受到进一步考验,比如影响芯片行业中材料、设备和设计产业链的布局与整合,对整体产业优化方面的布局与突破造成不利影响。

新冠肺炎疫情等各种因素的叠加,让半导体供应链处于整体上较为不稳定的状态。盛海峰向《中国电子报》记者表示,俄乌局势对半导体供应链肯定会有影响,但这种影响可能不仅仅局限于贵金属。比如,乌克兰是氖气的主要供应地,俄乌局势的复杂变化可能会影响氖气供应。