

制作深亚微米 T 型栅的 X 射线光刻技术

谢常青¹⁾ 陈大鹏 李兵 王德强 叶甜春

(中国科学院微电子中心 北京 100029)

彭良强 伊福廷 韩勇 张菊芳

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 T 型栅结构已经广泛应用于赝配高电子迁移晶体管(PHEMT)的制作中去,因为这种结构可以有效地减少由于栅寄生电阻而引起的晶体管噪声。X 射线光刻具有工艺宽容度大、成品率高、景深大、曝光视场大、成本低等诸多优点,更为重要的是,其技术已经比较成熟,它是最好的制作深亚微米 T 型栅技术手段。本文首先简要介绍我们自行研发的 X 射线掩模工艺,并对模糊对光刻胶表面的光强分布的影响进行了分析,最后对制作深亚微米 T 型栅的三层胶方法和在北京同步辐射装置上取得的 75nm T 型栅图形结果进行了介绍。

关键词 X 射线光刻 X 射线掩模 深亚微米 T 型栅 模糊

1 引言

随着高频高速化合物半导体集成电路的迅速发展,GaAs 器件的生产开始对制造技术提出与硅基超大规模集成电路(Ultra-Large Integrated Circuits ULIC)不同的要求。以光刻技术为例,目前 ULIC 的规模达到数百万乃至上亿个元器件,特征尺寸 0.25—0.13 μm ,片径 8—12in,批量巨大、每条生产线的光刻尺寸与设计规则相对稳定,每一代技术和产品都对制造设备提出新的要求因而设备更新速度极快。而 GaAs 电路则明显不同,其电路规模则小几个数量级、片径 4—6in、由于品种多批量小,一条 GaAs 生产线需要一种能够兼容从 0.1—0.5 μm 工艺的光刻技术,工艺跨度很大。同时,由于 GaAs 电路制造采用的图形加工工艺过程与 Si 基 ULSI 几乎完全相反(GaAs 采用剥离工艺制作图形而 Si 采用刻蚀技术),因而对光刻的焦深、图形剖面等技术性能提出了比 Si 集成电路要高得多的要求。

一直以来,应用于高频毫米波器件的深亚微米 T 型栅图形,通常采用高分辨率电子束直写光刻或者电子束直写/光学混合光刻来获得^[1],众所周知,电子束直写光刻分辨率很高,产出效率却非常低,所

以,普遍的做法是用电子束光刻进行器件先期的研究工作和光刻掩模的制作。1999 年,美国 JMAR/SAL 公司推出 0.13 μm 标准 GaAs 生产专用 X 射线光刻设备 XRS2000,配备点光源产量可达到 20 片/h(4in 圆片),同年美国军用电子供应商 Sanders 公司(洛克希德-马丁集团的一个子公司)将该机投入生产线,从而使得 X 射线光刻成为国际上率先替代电子束直写进入生产的下一代光刻技术。一般认为,X 射线光刻技术取代电子束直写制作深亚微米 T 型栅有许多优点,主要表现在:1)原有的电子束直写光刻已经难以满足批量生产和成本控制的要求,而一台点光源 X 射线光刻机的生产效率超过 7 台电子束直写机;2)相对而言,毫米波器件品种多,工艺跨度大,需要一种能够兼容从 0.1—0.5 μm 工艺的光刻技术。而 X 射线光刻在这一方面具有无可比拟的优势;3)X 射线的光刻图形剖面陡直,易于剥离。

本文首先简要介绍我们自行研发的 X 射线掩模工艺,并对模糊对光刻胶表面的光强分布的影响进行了分析,最后对制作深亚微米 T 型栅的三层胶方法和在北京同步辐射装置上取得的结果进行了介绍。

1) E-mail: xraylith@public.bta.net.cn

2 深亚微米 X 射线掩模制备技术

掩模技术一向被公认为是 X 射线光刻技术的一个最关键技术和主要的技术难题^[2,3]。X 射线光刻掩模是由一片支撑薄膜和附着在薄膜上的 X 射线吸收体的图形组成。在选用薄膜材料时,需要综合考虑材料的抗辐射性、强度、可见光透过率及薄膜应力等因素。本研究中所使用的 X 射线光刻掩模采用我们自行制作的 Au/Cr/氮化硅多层低应力薄膜结构掩模体系,其中作为掩模支撑薄膜的氮化硅薄膜厚度为 2 μm ,采用二氯二氢硅和氨气的配方高温低压化学汽相沉积获得。

X 射线光刻的优点之一是可以进行自复制,复制采用 SAL601 化学放大胶,首先在氮化硅薄膜基片上 200 $^{\circ}\text{C}$ 蒸发 20nm 厚的 Au/Cr,再甩上 600nm 的 SAL601 化学放大胶,用电子束光刻制作的“母版”在氮化硅薄膜基片上进行 X 射线曝光,采用 CD26 显影液显影 4min,然后去底胶,采用电镀制作吸收体图形。整个掩模的图形加工均在薄膜基片上进行,为此我们开发了一整套薄膜基片加工工艺规范。

无论对于深亚微米光学光刻还是下一代光刻 (NGL) 技术,都存在掩模形变的问题。一般认为,掩模形变的尺度应该小于光刻分辨率的 20%,对于应用于 0.13 μm 微波、毫米波的 GaAs 器件与电路制造的 X 射线掩模,其掩模形变尺寸应控制在 30nm,其中由于引入外在负载而引起的形变尺寸应控制在 10nm 以下。为此需要引入一种 3-2-1 动态的 X 射线掩模夹具或者采用紫外胶固化的方法^[4]。至于内在因素形变,需要在 X 射线掩模的每一步制作环节上严格控制工艺条件。目前我们正在采用有限元技术对整个 X 射线掩模制作工艺环节、掩模夹具、X 射线曝光热形变等因素所引起的掩模形变进行研究。

3 深亚微米 X 射线光刻系统的设计及优化

毫无疑问,凡是光子束光刻都或多或少存在光的衍射问题,因此如何最大限度地减少 X 射线光刻中由于衍射效应而引起的泊松斑对深亚微米 X 射线光刻至关重要,在实际的 X 射线光刻系统中,同步辐射 X 光的尺寸、广谱波长、光刻胶中的光电子效应和振动等诸多因素都会影响最终的 X 射线光刻图形形成质量,比如光刻胶吸收 X 射线后会

产生一定能量的光电子,而具有一定能量的光电子经过多次碰撞损失能量后才会停止,从而会使光刻胶内的调制传输函数小于光刻胶表面的调制传输函数。类似于电子束光刻中的模糊因子,X 射线光刻中通常引入模糊因子来表征上述诸多因素的综合效应。模糊因子的具体测量方法可以参考文献[5]。图 1 表示的是在北京同步辐射装置 3B1A 光刻束线对上于不同的模糊数量对最终的光刻胶表面光强分布的影响。其中 X 射线掩模结构为 $\text{Si}_3\text{N}_4(2\mu\text{m})/\text{Au}(450\text{nm})$,掩模图形为孤立线,X 射线掩模与硅片表面的距离为 18 μm ,线宽为 0.15 μm ,光刻胶表面的光强分布为模糊分别为 10nm,30nm,50nm。通过降低反射镜的表面粗糙度、采用分子量更大的光刻胶 ZEP520A、采用浓度更稀的显影液、更好地控制振动等优化措施,我们可以很好地把我们的 X 射线光刻系统模糊因子控制在 30nm 左右,使我们的 X 射线光刻系统充分满足深亚微米 X 射线光刻的要求。

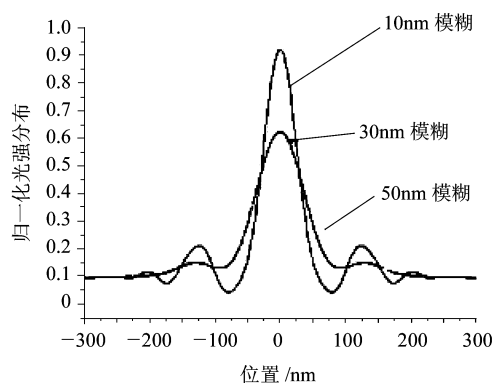


图 1 不同的模糊对 X 射线光刻胶表面光强分布的影响

4 深亚微米 T 型栅工艺

X 射线光刻的优点是焦深大、波长短,可以制作很高高宽比的图形结构,且图形边缘极为陡直,这对于 GaAs 器件制作中的剥离工艺来说是极为有利的。由于要将不同线宽的图形重叠在一起,T 型栅一般需要采用多层胶工艺制作,我们提出了 ZEP520A/PMMA-MAA/PMMA 三层胶的方法来制作深亚微米 T 型栅。ZEP520 光刻胶具有分辨率高、灵敏度好、CD 控制比较容易等诸多优点,我们采用的三层胶方法实质上是一种单次曝光自对准 T 型栅工艺,在曝光后采用分步显影工艺,先用甲基异丁基酮/异丙醇对顶层的 PMMA-MAA 和 PMMA 胶进行

显影,再用对二甲苯对底层 ZEP520A 光刻胶进行显影,必须指出的是,尽管采用这种三层胶方法可以获得性能非常好的深亚微米 T 型栅图形,但是用于显影底层 ZEP520A 光刻胶的显影液对二甲苯对人体是具有轻微毒性的. 图 2 表示的是我们采用三层胶工艺在 BSRF 3B1A 光刻束线上获得的 75nm T 型栅图形,图 3 表示的是 Ti/Au 金属蒸发、剥离后获得的 120nm T 型栅结构,我们正在将这种工艺方法应用于高频低噪声 PHEMT 的制作中去.

5 结束语

多方应用需求(尤其是通讯和军用电子系统的需求)使化合物半导体器件、电路频率不断的向高频方向拓展, X 射线光刻技术以其高分辨率、高产量、大焦深等诸多优点而在毫米波电路制造中具有很好的应用前景. 在国外,它已经进入 GaAs 的生产线,国内的 X 射线光刻工作者也一直在努力,不断地在完善这项技术,预计在不久的将来, X 射线光刻技术将能为国内的微波毫米波电路研制单位提供高质量的深亚微米 T 型栅制作服务.

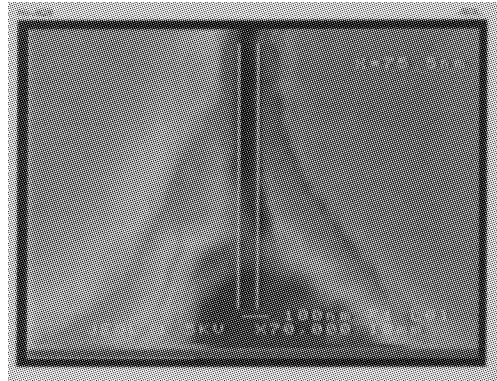


图 2 采用三层胶工艺获得的 75nm T 型栅图形



图 3 Ti/Au 金属蒸发、剥离后获得的 120nm T 型栅结构

参考文献 (References)

- 1 Chen Y, MacIntyre D, Thoms S. *Microelectronic Engineering*, 2001, **57—58**: 939
- 2 Scott Hector. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1997, **B15**(6):2517
- 3 Silverman J P. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1995, **B15**(6):2117
- 4 Chen A C. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998, **B16**(6):3485
- 5 Yongduck Seo, Ohyun Kim. *Jpn. J. Appl. Phys., Part. 1*, 2000, **12B**:6942

X-Ray Lithography Technology for the Fabrication of Deep-Submicron T-Shaped Gate

XIE Cheng-Qing^{1;1)} CHEN Da-Peng¹ LI Bing¹ WANG De-Qiang¹ YE Tian-Chun¹
PENG Liang-Qiang² YI Fu-Ting² HAN Yong² ZHANNING Ju-Fang²

¹(Microelectronics R&D Center, CAS, Beijing 100029, China)

²(Synchrotron Radiation Laboratory, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract Because of its validity in reducing transistor noise due to gate parasitic resistance, T-shaped structure has been applied for the fabrication of Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor (PHEMT) device widely, X-ray lithography is the best way to fabricate deep-submicron T-shaped structure, because it has many advantages, such as large process latitude, high throughput, extremely long depth of focus, large exposure field sizes, low cost, and so on, and the more important thing is that X-ray lithography technology is relatively mature. In this paper, the home-made X-ray mask process is introduced first, and the influence of blur to the light intensity distribution on the surface of X-ray resist is analyzed, the three layer resist method which is used for the fabrication of deep-submicron T-shaped structure and the 75nm T-shaped structure result which was achieved in BSRF 3B1A beamline are presented lastly.

Key words X-ray lithography, X-ray mask, deep-submicron T-shaped gate, Blur

1) E-mail: xraylith@public.bta.net.cn