

热场发射电子枪在电子束光刻机中的应用研究*

郝晓亮,赵英伟,孙虎,王秀海,曹健,马培圣,任泽生

(中国电子科技集团公司第十三研究所,河北石家庄 050051)

摘要:介绍了电子枪的分类与特点,重点介绍了热场发射电子枪的原理、结构、特点及在电子束光刻机中的应用。阐述了电子束光刻机束流与电子枪提取极电流之间关系,并分析了热场发射电子枪各个参数对提取极电流的影响。研究了热场发射电子枪的调校对电子束光刻工艺的影响,并通过实验得出束斑与束流的关系。最后通过调整电子枪参数,制备了不同的光刻图形,满足了不同的光刻工艺要求,验证了分析的结论。

关键词:热场发射电子枪;电子束束流;电子束束斑;电子束光刻机

中图分类号:TN405

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.212245

中文引用格式:郝晓亮,赵英伟,孙虎,等.热场发射电子枪在电子束光刻机中的应用研究[J].电子技术应用,2022,48(4):44-47,52.

英文引用格式:Hao Xiaoliang,Zhao Yingwei,Sun Hu,et al. Research on the application of thermal field emission gun in electron beam lithography[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 44-47, 52.

Research on the application of thermal field emission gun in electron beam lithography

Hao Xiaoliang, Zhao Yingwei, Sun Hu, Wang Xiuhai, Cao Jian, Ma Peisheng, Ren Zesheng

(The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The classification and characteristics of electron gun are introduced, with emphasis on the principle, structure and characteristics of thermal field emission gun and its application in electron beam lithography machine. The relationship between the beam current of the electron beam lithography machine and the extractor current of the electron gun is described, and the influence of the parameters of the thermal field emission gun on the extractor current is analyzed. The influence of the adjustment of the thermal field emission gun on the electron beam lithography process is studied, and the relationship between the beam spot and the beam current is obtained through experiments. Finally, by adjusting the parameters of the electron gun, different lithography patterns are prepared to meet the requirements of different lithography processes, and the conclusions of the analysis are verified.

Key words: thermal field emission(TFE)gun; electron beam current; electron beam spot; electron beam lithography machine

0 引言

光刻工艺是半导体加工领域的核心工艺,光刻工艺的水平体现了半导体工艺的发展水平。光刻机作为光刻工艺的关键加工设备,发挥着至关重要的作用。

电子束光刻是利用电子束在涂有感光胶的晶片上直接描绘图形的技术^[1],它的优点是分辨率高,焦深比较深,图形容容易修改;缺点是生产效率低。电子束光刻机主要应用在掩膜版的制造领域和芯片的纳米级的加工领域,特别是近年来二、三代半导体的发展为电子束光刻机提供了更广阔的应用前景;另外由于变光栅在光波导和激光器领域内的广泛应用,电子束光刻机成为了此领域必备的加工设备。

电子束光刻机主要包含真空系统、运动控制系统、电子控制系统、电子光学系统,其中电子光学系统是核

心部分,它的性能好坏直接影响着设备的性能指标。

电子光学系统主要部件包括电子枪、对中系统、束、光阑、电子透镜、偏转线圈、消像散器和背散射电子探测器等,其功能是产生电子束,将电子束加速,并聚焦成极小的电子束束斑,打在需要曝光的位置^[2]。

电子枪作为电子光学系统的关键部件,对系统的性能指标有重要影响。

1 电子枪的分类和特点

电子枪是能产生定向运动、束流大小和束流密度可控,并具有一定能量的聚焦电子束的部件。电子枪发射的电子束形状,可以是空心或者实心圆截面的微细束,也可以是层流、片状束或线状束。各种电子枪被广泛应用于电真空器件、电子显微镜、电子束光刻机、电子束蒸发台等设备上。

按电子束束流大小划分,束流在微安量级的属于弱流电子枪,束流在毫安到安培量级的属于强流电子枪。

* 基金项目:河北省省级科技计划(20351803D)

通常电子束光刻机的电子枪属于弱流电子枪^[3]。

电子枪按灯丝引出电子的方式可以分为热游离式电子枪和场致发射电子枪^[4]。

1.1 热游离式电子枪

热游离式电子枪(Thermionic Emission Gun)是利用高温使电子获得足够的能量,去克服电子枪的功函数能障而逃离出金属表面。有钨灯丝和六硼化镧(LaB6)灯丝两种类型,钨丝加热温度是2 800 K,六硼化镧加热温度是1 900 K。

1.2 场致发射电子枪

当在真空下的金属表面受到一定强度的电场作用,将产生隧穿效应,会有数量可观的电子发射出来,即场发射现象^[5]。场发射电子是从很尖锐的阴极尖端所发射出来的,因此可以得到极细而又具有高密度的电子束,其亮度可达到热游离电子枪的数百倍,甚至上千倍。

场致发射电子枪(Field Emission Gun)又分为冷场发射电子枪(Cold Field Emission)和热场发射电子枪(Thermal Field Emission)。

1.2.1 冷场发射电子枪

冷场发射电子枪工作温度是300 K,最大的优点是电子束的直径最小,亮度最高,因此影像分辨率最优,能量分布最小。为避免针尖被外来气体吸附而降低场发射电流并使发射电流不稳定,冷场发射式电子枪必须要在 10×10^{-10} Torr的真空度下操作,虽然如此还是需要定时短暂加热针尖至2 500 K(Flashing),以去除所吸附的气体原子。它的缺点是发射的总电流最小,发射电流不稳定。

1.2.2 热场发射电子枪

热场发射电子枪也叫肖特基电子枪(Schottky Emitter),是集场致发射电子枪与热游离电子枪的特点于一体。靠热及尖端表面极强的电场强度两种方式来发射电子。在1 800 K温度下工作^[6],避免了大部分的气体分子吸附在针尖表面。它是在钨单晶上加氧化锆涂层(如图1所示),这样可以使W(100)晶面的功函数从4.5 eV降到2.8 eV,从而大大降低了场发射所需的电场强度^[7],所需

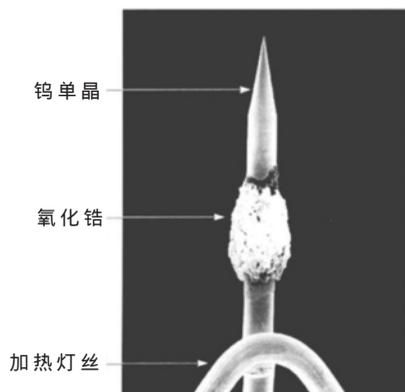


图1 热场发射电子枪灯丝结构图

的真空度为 $10 \times 10^{-8} \sim 10 \times 10^{-9}$ Torr。其发射电流稳定度好,而且发射的总电流也大,电子的能量分布很小,稍逊于冷场发射式电子枪。影像分辨率比冷场发射式稍差。

电子束光刻机要求电子枪灯丝不仅要有非常好的参数性能,更重要的是要有非常好的电流稳定性。冷场发射式电子枪由于电流不稳定,因此虽然各项参数非常出色,但是不适合电子束光刻机。早期的电子束光刻机使用的是热游离式电子枪,随着热场发射式电子枪的发展,现在的电子束光刻机一般使用的是热场发射式电子枪。

2 热场发射电子枪的结构和原理

热场发射电子枪的电子发射通过加热和电场两种方式,但电场起主导作用。主要应用在电子束光刻机、高端扫描电镜等领域。

热场发射电子枪的结构如图2所示:主要包含灯丝(Filament)、抑制极(Suppressor)、提取极(Extractor)、聚焦极(Focus)、阳极(Anode)等。

灯丝:也称阴极,作用是提供电子,通常处于阴极电位(负高压)。

抑制极:作用是抑制电子的发射和发散发射,保证电子的成束发射。

提取极:也称第一阳极,作用是产生强电场,使电子能突破势能壁垒发射出来。

聚焦极:作用是对电子进行初步会聚,使其能量集中,使电子以电子束的形态发出电子枪^[8]。

阳极:也称第二阳极,通常是地电位,作用是将电子枪发出的电子束进行加速。

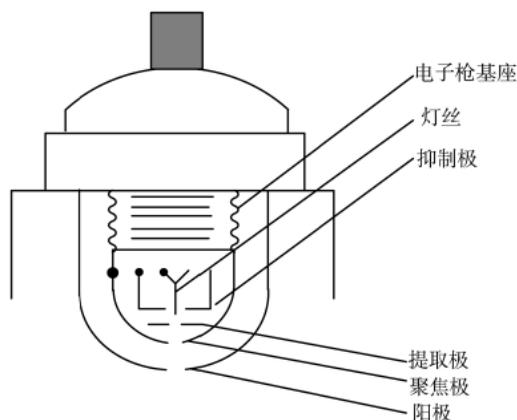


图2 热场发射电子枪的结构图

3 电子枪各参数对电子束光刻机束流的影响分析

3.1 电子束光刻机的束流

电子束光刻机的束流是指从电子枪发射出来的电子束经过电子枪内聚焦极的会聚、对中模块的偏转对中、多级透镜的会聚、光阑的会聚、偏转模块的偏转,最终到达基片上的束流。通常束流的大小是通过安装在工件台上的法拉第杯来检测的。

3.2 提取极电流与束流的关系

提取极电流指的是通过提取极加的电场和灯丝加热激发出来的电子束束流。提取极电流再经过电子光学系统后,最终到达基片表面,此时的束流称为电子束光刻机的束流。提取极电流是电子束束流形成的来源,因此本节后面讨论的电子枪各参数与束流的关系,是与提取极电流的关系。

提取极电流是电子束光刻机的电子枪的一个重要的参数。由于电子束光刻机在进行工艺时要求非常稳定的束流,因此在进行电子枪调校时,需要通过调节使得提取极电流能稳定在某个要求的范围内。一般电子束光刻机要求的范围是100~150 μA,要求的波动率是±1%/h。

提取极电流近似等于电子枪灯丝发出的发射电流。在热场发射的条件下,电子枪灯丝发射电流为 I 为^[9]:

$$I = J_s \frac{q\pi}{\sin(q\pi)} \left(\frac{r}{m}\right)^2 = 1.1978 \times 10^6 T^{\exp\left[0.44 \frac{\sqrt{E}}{T} - \frac{\varphi}{kT}\right]} \times \frac{q\pi}{\sin(q\pi)} \times \left(\frac{r}{m}\right)^2 \quad (1)$$

式(1)中的 r 、 φ 和 k 分别是阴极尖端曲率半径、阴极材料功函数和普朗克常数。 T 为灯丝针尖的温度,单位为 K, E 为针尖表面电场强度,单位 V/m。

$$E = \beta V \quad (2)$$

式中 V 为引出电压。

$$\beta = 3.5 \times 10^9 L^{-0.632} r^{-0.96} \quad (3)$$

式中 L 为灯丝针尖与提取极之间的距离,单位 μm, r 单位为 nm。

式(1)中的 q 为无量纲因子,用于总发射电流中的热发射修正,其定义为:

$$q = 1.656 \times 10^{-4} \left(\frac{E^{3/4}}{T}\right) \quad (4)$$

q 的大小表示隧穿效应电流对总发射电流的贡献的多少。例如当 q 取 0.5 时,就表示热场发射电流的一半来自隧穿效应。

式(1)中的 m 也是一个无量纲因子,用于针尖表面发射面的面积修正,定义为:

$$m = 8.713 \times 10^{-5} (\beta r)^{0.42} \quad (5)$$

3.3 灯丝电流对束流的影响分析

灯丝电流的作用是对灯丝进行加热,它的大小决定了灯丝温度 T 的大小。从式(1)可以得出,温度 T 越高,灯丝发射的电流越大,因此,调节灯丝电流可以控制灯丝的发射电流。热场发射灯丝在出厂时通常有一个灯丝电流的范围值,一般新灯丝的电流需要设置在最低值,如果发射电流不够可以逐渐增加灯丝电流,但是当增大到灯丝出厂时规定的最大电流值,灯丝发射电流依然无法满足要求,说明灯丝的氧化锆已耗尽,需要更换灯丝了。

通过调节灯丝电流能显著影响提取极电流大小。实验表明:灯丝电流对提取极电流的影响是一个缓慢的过

程,当提取极电流不稳定,呈上升或下降趋势时,可以通过增加或减小灯丝电流来使提取极电流稳定。

3.4 提取极电压对束流的影响分析

提取极电压是式(2)中的引出电压,决定了电场强度 E ,是提取极电流的重要的影响因素。在进行电子枪的提取极电流的调节时,加大提取极电压可以有效地增加提取极电流^[10]。

在进行电子枪调校时,如果提取极电流稳定,但是电流不够,可以通过加大电压的方式来提高提取极电流。实验表明:调节提取极电压能迅速改变提取极电流。

3.5 抑制极电压对束流的影响分析

灯丝发射出来的电子是呈发散状的,抑制极是在阴极与提取极之间,通过加比阴极还高的高压,产生电场来抑制电子的发射和发散发射,使得电子能成束发射。

抑制极也称为栅极,电压的大小能直接影响阴极的发射电流及电子轨迹。可以通过增大抑制极电压来降低提取极电流,从而降低束流^[11]。

3.6 聚焦极电压对束流的影响分析

聚焦极在提取极与阳极之间,作用是对从阴极发出的电子束进行初步汇聚,使电子束能成束发射。聚焦极也可以认为是电子枪内的一个静电透镜。

增大聚焦极电压使得电子束的汇聚作用更明显,能增大单位面积上的电子流,因此能增大电子束光刻机的束流,但不会影响提取极电流。

3.7 阴极电压对束流的影响分析

在电子束光刻机中,阴极电压通常为 10~100 kV,作用是给从灯丝发射出来的电子提供加速能量,对提取极电流作用不明显^[12]。加大阴极电压能加大电子束的焦深,对电子束束斑和电子束光刻工艺影响比较大。

4 电子枪调校对电子束光刻工艺的影响分析

电子束光刻的工艺质量与多个因素有关,其中电子束束流、束斑和阴极电压对工艺质量影响很大,通过电子枪的调校可以显著影响这些参数,进而显著影响电子束光刻工艺的质量。

4.1 束流对工艺的影响分析

低束流可以减小空间电荷误差,有利于获得更小的束斑,但同时会增加曝光时间,会使聚焦标记成像亮度降低,使对焦困难。高束流能够提高电子束的曝光速率,降低曝光所需要的时间,如式(6)所示。另外高束流能提高 SEM 图像的亮度,提高搜寻与对准标记的速度。

电子束光刻工艺所需要的时间:

$$T = 10^9 \frac{D \times A}{I_e} \quad (6)$$

式中, A 是曝光面积,单位是 m^2 ; I_e 是电子束束流,单位是 nA; D 为曝光剂量,是在曝光过程中光刻胶单位面积上所接收到的特定波长(或波长范围)的光能或电子能,单位是 C/m^2 。在光刻工艺中,能够得到最佳光刻图形的曝光剂量称为最佳曝光剂量。最佳曝光剂量与光刻胶的

类型及曝光图形的具体结构等因素有关^[13]。

通过式(6)可以看出,曝光时间与电子束的束流呈反比关系。

4.2 束斑对工艺的影响分析

电子束光刻机的束斑大小直接影响了电子束光刻机的分辨率。实验表明:电子束光刻工艺加工的最小特征尺寸一般是所用束斑尺寸的两倍以上。束斑还影响加工后图形的形貌特征,另外大的束斑会导致严重的邻近效应,也影响了电子束光刻的工艺质量。

束斑大小受光阑、电子透镜、消像散器等影响,在其他条件确定的情况下,束斑大小和束流是正相关的。束流越大,束斑越大,反之亦然。经过实验,某型号电子束光刻机在 80 kV 加速电压下,束斑与束流的关系如图 3 所示。

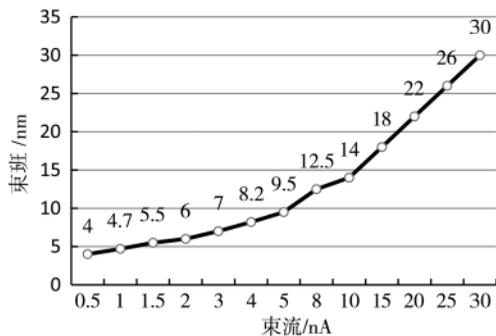


图 3 束斑与束流关系图(某型号电子束光刻机加速电压 80 kV)

在进行电子束工艺时,通常希望较大的束流,可以加快光刻速度,但是在加大束流的同时束斑也会增大,因此在进行电子光路调校时,需要对这两个参数进行平衡调节,为了得到较好的工艺效果,只能降低束流,从而减小束斑尺寸。

在进行光刻机性能描述时,最小束斑尺寸,通常要规定在多大的束流情况下取得。

4.3 阴极电压对工艺的影响分析

阴极电压对电子束起加速作用,阴极电压高,产生的电子束能量高。高能量电子束产生的电子散射小,色差与空间电荷效应抵消,且有利于曝光厚的抗蚀剂层。高能量的电子束产生的前散射电子比较小(如图 4 所示),

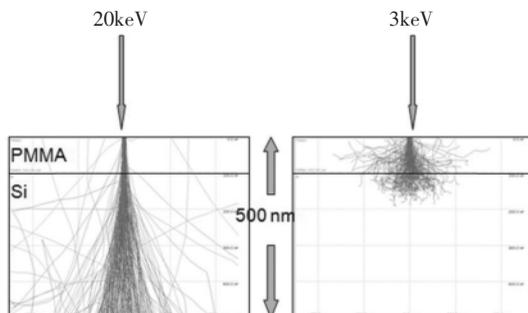


图 4 不同能量电子束的前散射电子分布图

但是会产生大量的背散射电子^[14],也会产生严重的邻近效应,由于电子物理特性的原因,邻近效应无法完全消除^[15],因此在进行工艺时,应根据前散射和背散射电子对工艺的影响程度,设置合适的阴极电压。

5 工艺应用实验结果

通过电子枪各参数对束流的影响分析,束流、束斑对工艺质量的影响分析,以及阴极电压对工艺质量的影响分析研究,掌握了电子枪参数的调校及其对光刻工艺的影响,以此来指导产品工艺加工。

可以根据不同光刻胶类型,不同设计加工要求,经过调校电子光学系统各参数,使电子束能量、束斑和曝光剂量,满足各种光刻工艺的需要。

在本文研究成果指导下,通过优化设备参数,可以获得不同的光刻加工图形,如图 5 和图 6 所示。两张图片是在 FIB(Focus Ion Beam)设备上切开之后的胶口形貌图,图 5 为梯形的胶口形貌,适用于下步为蒸发剥离的工艺;图 6 为垂直的胶口形貌,适用于下步为刻蚀或者腐蚀的工艺,两种图形在光刻工艺中有不同的应用。其中图 5 中胶口形貌的加工一般需要经过复杂的工艺来实现。经过本文的研究,可以通过调整选择电子枪的参数,用电子束光刻工艺直接实现图 5 或图 6 所示胶口形貌的制备。

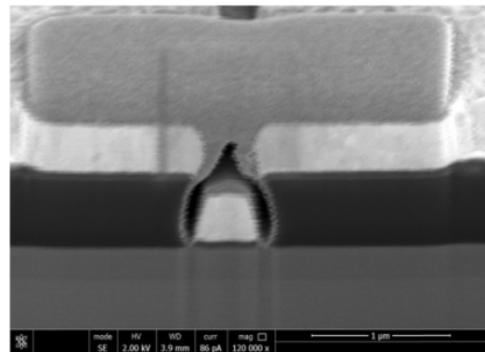


图 5 光刻工艺梯形效果图

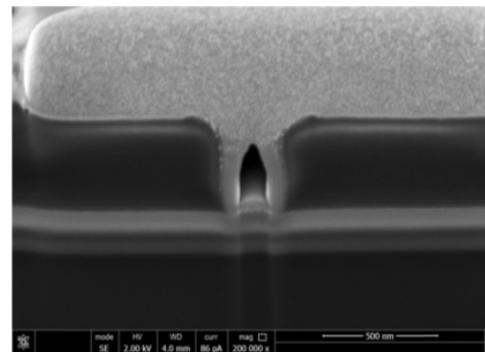


图 6 光刻工艺垂直效果图

6 结论

本文介绍了电子枪灯丝的类型、特点以及应用,详

(下转第 52 页)

- [12] 赵贻玖.稀疏模拟信号压缩采样与重构算法研究[D].成都:电子科技大学,2012.
- [13] CAI T T, WANG L. Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(7): 4680-4688.
- [14] GAO X, WANG X, ZHOU J. A robust orthogonal matching pursuit based on L1 norm[C]//2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2020.
- [15] MISHALI M, ELDAR Y C. Reduce and boost: recovering

arbitrary sets of jointly sparse vectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(10): 4692-4702.

(收稿日期:2021-10-11)

作者简介:

黄振(1989-),男,硕士,实验师,主要研究方向:稀疏信号处理。

柏正尧(1967-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:信号处理、图像处理, E-mail: baizhy@ynu.edu.cn。



扫码下载电子文档

(上接第47页)

介绍了热场发射电子枪的结构、原理、特点和应用。分析了热场发射电子枪各个参数对电子束光刻机束流的影响,进而分析了热场发射电子枪的调校对电子束光刻工艺的影响,并通过工艺实验结果进行验证。热场发射电子枪因其优秀的电子光学性能,稳定的发射电流,目前广泛应用于电子束光刻机、扫描电镜等设备。随着研究的深入,热场发射电子枪的应用会越来越广泛。

参考文献

- [1] 王振宇.电子束曝光技术及其应用综述[J].半导体技术, 2006, 31(6): 418-422.
- [2] 吴文涛.基于NBL电子束曝光系统合轴研究[J].电子工业专用设备, 2016(12): 25-29.
- [3] 顾文琪.电子束曝光微纳加工技术[M].北京:北京工业大学出版社, 2004.
- [4] 胡超.高精度电子束光刻技术在微纳加工中的应用[J].电子与封装, 2017(5): 28-32.
- [5] 元光.场发射理论研究进展[J].真空电子技术, 2012(6): 30-34.
- [6] 陈文雄.电子枪理论的研究的新进展[J].电子显微学报, 2006(12): 455-462.
- [7] 孙亚飞.场发射扫描电子显微镜阴极制备工艺研究[D].上海:上海师范大学, 2013.
- [8] 郝晓亮.电子束直写曝光机的原理与常见问题分析[J].

电子工业专用设备, 2020(3): 48-52.

- [9] ORLOFF J. Hand book of charged particle optics[M]. 2nd Edition. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- [10] 卢姝.电子枪设计的关键技术研究[D].成都:电子科技大学, 2015.
- [11] 董全林.电子枪阳极及栅极对高压直流电源影响[J].设计与研发, 2018(18): 13-15.
- [12] 李兴辉.场致发射阵列阴极电子枪的设计与模型研究[J].液晶与显示, 2002(2): 55-58.
- [13] 郭立萍.步进扫描透镜光刻机中的曝光剂量的控制技术[J].激光杂志, 2004, 25(6): 17-19.
- [14] 刘明.电子束曝光中的邻近效应修正技术[J].微细加工技术, 2000(1): 16-20.
- [15] 赵真玉.电子束光刻邻近效应校正技术研究[D].青岛:中国石油大学, 2011.

(收稿日期:2021-10-20)

作者简介:

郝晓亮(1979-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:电子束光刻机和扫描电镜等。

赵英伟(1971-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:半导体工艺设备。

孙虎(1986-),男,研究生,工程师,主要研究方向:电子束光刻工艺。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所