

文章编号: 2095-4980(2017)01-0015-06

太赫兹探测器读出电路的单电子晶体管制备

刘永涛^{1,2}, 李欣幸², 张志鹏², 方靖岳³, 秦 华^{2*}, 俞圣雯^{1*}

(1.上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444; 2.中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123; 3.国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 射频单电子晶体管具有高电荷灵敏度和高读出速率的特点, 可用于超导太赫兹单光子探测器产生的微弱电荷信号的读出。采用绝缘体上硅(SOI)材料制备的硅基单电子晶体管具有结构可控、工艺可重复的优点。但是, 目前单电子晶体管的成品率约为 30%, 难以满足探测器阵列化的需求。为进一步提高单电子晶体管成品率, 首先采用电子束零宽度线曝光工艺精确设定单电子晶体管的图形, 其次对感应耦合等离子体刻蚀工艺中的气氛比例进行优化, 实现电子束曝光图形的良好转移。最后通过降低氧化温度进一步保持了图形转移的准确度。单电子晶体管的隧穿势垒宽度得到了良好的控制, 使成品率提高到 90%, 增强了单电子晶体管作为阵列化超导太赫兹单光子探测器读出电路的可行性。

关键词: 零宽度线曝光; 单电子晶体管; 近邻效应; 太赫兹单光子探测器; 隧穿势垒

中图分类号: TN325.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0015

Fabrication of single electron transistors as the readout circuits for terahertz detectors

LIU Yongtao^{1,2}, LI Xinxing², ZHANG Zhipeng², FANG Jingyue³, QIN Hua^{2*}, YU Shengwen^{1*}

(1.School of Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2.Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou Jiangsu 215123, China; 3.National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Radio-Frequency Single-Electron-Transistor(RF-SET) allows for readout of sub-electron-charge with high speed. Hence, a RF-SET could be used as a readout circuit for superconducting terahertz single-photon detector which converts photons into charges. SETs could be fabricated on Silicon on Insulator(SOI) with good controllability and reproducibility. However, the current yield of SETs on SOI (about 30%) is not yet sufficient for realizing a detector array. In order to improve the yield, single-line exposure mode of Electron-Beam Lithography(EBL) is used to precisely define the width of tunneling barriers; and the etching gas in Inductively-Coupled Plasma(ICP) etching is optimized to realize good pattern transfer; oxidation of silicon is performed at a lower temperature to maintain the precision in the definition of SETs. Since the tunneling barriers are precisely controlled, the yield of SETs has been increased to 90%. Such a high yield makes it more practical to implement SETs as readout circuits in detector arrays.

Keywords: Single-line exposure; Single Electron Transistor; proximity-effect; THz single photon detector; tunneling barrier

太赫兹波(频段0.1~10 THz)有着极为丰富的电磁波与物质相互作用的效应, 并包含了宇宙空间50%的空间光子能量, 内含丰富的彗星、行星大气和宇宙背景辐射等信息^[1]。太赫兹单光子探测器^[2](Single Photon Detector, SPD)可极大地提高光谱测量的灵敏度和精确度, 实现对微量物质成分的光谱分析。该类探测器可满足太赫兹干涉仪高灵敏度、高响应速度的器件需求。但太赫兹频段的光子能量小, 难以在常规的半导体中产生光生载流子。

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2016-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11403084; 61401456; 61271157); 中国科学院科研装备研制资助项目(YZ201152); 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ3021)

*通信作者: 秦 华 email:hqin2007@sinano.ac.cn; 俞圣雯 email:yusw@staff.shu.edu.cn

为实现太赫兹单光子探测器,国际上多使用人工量子能级结构克服本征能隙限制^[3]。但以上探测器都需要极为苛刻的材料生长技术,同时存在探测结构面积小,光子捕获率低,工作温度低($<0.1\text{ K}$)的问题。超导体中电子以库伯对的形式存在,将1个库伯对拆散成2个准粒子需要 $2\Delta(T)$ 的能量,超导体能带的概念与半导体能带类似,但其量级(meV)远小于半导体的eV量级,这使得超导材料相比半导体材料更适合用于实现太赫兹波段的光子-电荷转换。基于硅基单电子晶体管作为读出电路的超导太赫兹单光子探测器,使用超导隧道结实现太赫兹光子-电荷转换并使用单电子晶体管实现电荷读出^[4],可实现更低光子能量和更高灵敏度的太赫兹单光子探测。

基于库仑阻塞效应和电子隧穿效应的单电子晶体管(SET)对其邻域的微小电荷变化极其灵敏,可以作为灵敏静电计。对单光子入射在超导探测器中产生的电荷变化进行灵敏的检测具有极高探测灵敏度,并实现对单光子的探测和计数。国际上 Komiyama 研究小组提出了使用基于 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 单电子晶体管^[5]作为读出电路的太赫兹光子探测方案并成功实现太赫兹单光子探测,该方案存在的问题有:通过多角度蒸镀 Al 基纳米栅制备的 SET,工作温度低(一般在 mK),工艺实现复杂,成品率低,无法批量生产。而 SOI 材料具有低功耗、低开启电压、高速、高集成度、可与传统 CMOS 集成电路集成^[6-7]和工艺稳定性好等优点,采用 SOI 材料可进一步提高 SET 的成品率,推动 SET 器件的阵列化与太赫兹单光子探测器的集成。

基于之前的研究工作,已经在 SOI 上可控地制备出在 4.2 K 以上温度工作的单电子晶体管^[8],但是 SET 的成品率只达到 30%,主要原因是形成隧穿势垒的热氧化工艺不可控,限制了成品率的进一步提高。同时,顶层硅掺杂浓度高,氧化产生的表面应力等因素都会影响热氧化工艺的稳定性。器件成品率低的主要原因是以往电子束曝光工艺,近邻效应对 SET 影响比较大,无法在光刻胶上写出整体图形良好并且隧穿势垒宽度均匀分布在 30 nm 附近的 SET,隧穿势垒宽度普遍大于 50 nm ,要通过热氧化近 20 nm 才能形成具有单电子隧穿效应的势垒;同时之前的热氧化温度较高,为 $950\text{ }^\circ\text{C}$,也增大了热氧化的不稳定性。为了降低以上两点对器件成品率的影响,本文通过采用零宽度单线曝光工艺减小近邻效应的影响,成功将 SET 的隧穿势垒的尺寸均匀地控制在 $(30 \pm 5)\text{ nm}$ 附近,不通过热氧化工艺形成电子隧穿势垒,仅氧化 10 nm 进行缺陷修复和表面钝化;同时降低氧化温度,进一步弱化氧化工艺波动性的影响;并通过进一步优化感应耦合等离子刻蚀工艺,将 SET 的成品率提高到 90%。

1 实验

本文选用顶层硅晶向为(100)、埋层氧化硅厚度为 400 nm 的 SOI 材料,通过注氧隔离技术(Separating by Implanting Oxide, SIMOX)制备。经过磷离子注入和氧化减薄后的顶层硅厚度为 60 nm ,室温下的迁移率为 $18.6\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 、电子浓度为 $1.60\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 。SET 器件核心结构的加工流程为:通过电子束光刻(EBL)在光刻胶上写出 SET 的设计图形,再经过感应耦合等离子体(ICP)刻蚀将光刻胶掩膜上的图形转移到顶层硅上,最后通过硅的热氧化工艺形成 SET 隧穿势垒。器件的加工设计流程如图 1 所示,其中电子束光刻、ICP 刻蚀、热氧化工艺是制备 SET 的 3 步关键工艺,因此分别对这 3 步关键工艺进行了研究和优化。

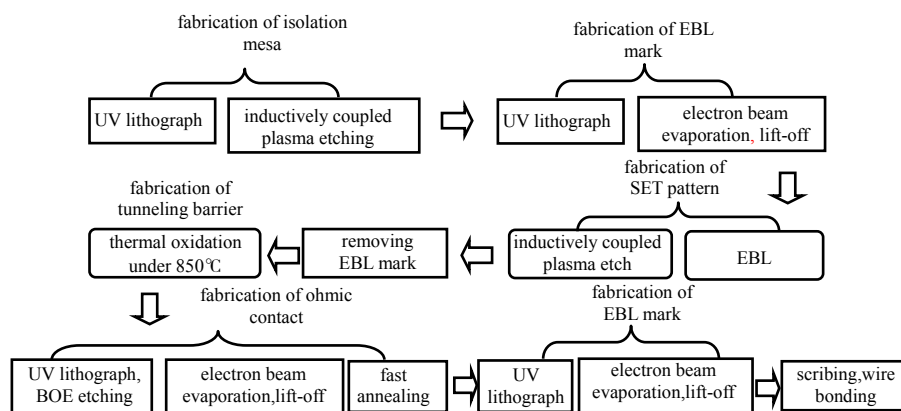


Fig.1 Flow chart of SET fabrication

图 1 单电子晶体管的流程图

1.1 零宽度线曝光工艺的研究

EBL 是 3 步关键工艺的第 1 步,能够在光刻胶上写出大量隧穿势垒尺寸均匀、稳定的 SET(如图 4 中(a)所示)

是提高器件成品率的前提。以往 EBL 面曝光工艺在曝光密集图形或亚 50 nm 范围图形时近邻效应很明显, 会使光刻后图形变形、失真, 严重影响工艺的可控性和稳定性。为了减小近邻效应的影响, 在 SET 核心版图区域, 采用零宽度单线曝光^[9]的设计, 将近邻效应对 SET 隧穿势垒宽度的影响降到最小。本论文使用 JBX-5500 型电子束曝光机, 进行零宽度线曝光工艺的研究, 采用加速电压 50 kV, 束流 100 pA, 曝光步距 4 nm, 选用 PMMA-A2 光刻胶, 2 000 r/min、180 ℃ 前烘 90 s。线曝光工艺版图的设计如图 2 所示。库仑岛的设计长度为 L , 设计宽度为 W , 隧穿势垒设计宽度为 TW (Tunneling-barrier Width)。

曝光显影后 TW 的实际值主要受束斑半径、近邻效应的影响。库仑岛采用单线曝光的设计, 尽可能减小近邻效应对 SET 的隧穿势垒尺寸的影响。为了研究近邻效应对最终曝光后 TW 尺寸的影响, 将设计值 $TW=40\sim 100$ nm, $L=180$ nm, $W=140$ nm 的零线宽单线曝光版图, 在不同曝光剂量下进行曝光, 曝光剂量分别为: 0.12 nC/cm, 0.20 nC/cm, 0.24 nC/cm, 0.32 nC/cm, 0.36 nC/cm。对曝光后样品显影、喷金, 进行扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观测, 并统计不同设计 TW 值曝光后的实际值, 以及在不同曝光剂量下 TW 的设计值和显影后测量值的差值 ΔTW (取绝对值)。

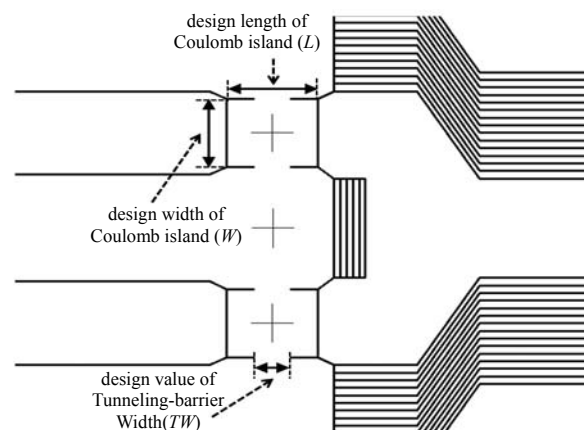


Fig.2 Single-line exposure pattern
图 2 零宽度线曝光版图

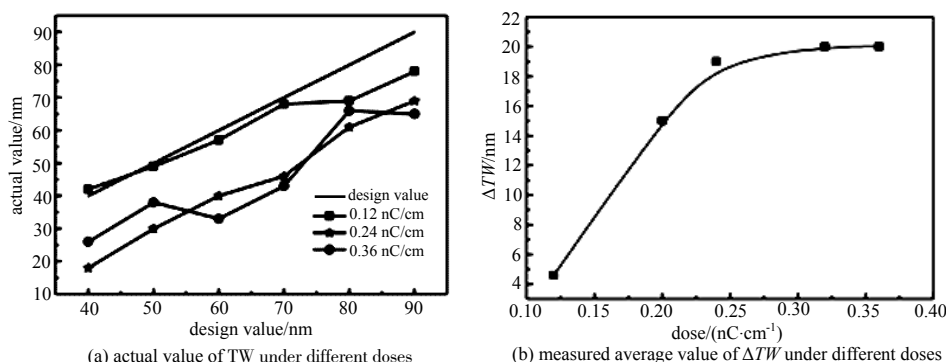


Fig.3 Widths of tunneling barrier and the variation of ΔTW under different doses
图 3 不同线曝光剂量下曝光后 TW 尺寸和 ΔTW 的波动性

如图 3(a)所示(为了方便观察, 只选取典型的 3 种剂量作图), 随着剂量持续增大, TW 实际值偏离 TW 设计值越多, 同时 TW 的波动性也增大。由图 3(b)可知随着曝光剂量的增大, ΔTW 先逐渐增大, 随后趋于饱和, 在这个变化过程中曝光剂量由不足变为饱和。对于同一曝光系统, 相同的工艺条件, ΔTW 的变化主要受近邻效应的影响, 因此零宽度单线曝光版图隧穿势垒处的近邻效应, 也具有随着剂量的增大先增大后趋于饱和的规律。EBL 的最佳曝光剂量必须满足曝光充分、 TW 值稳定的条件, 因此最佳的曝光剂量分布在近邻效应饱和点的附近。通过实验发现 $Dose=0.24$ nC/cm 附近的剂量是比较好的曝光剂量。图 4(a)是 $TW=50$ nm 的 SET 在 0.24 nC/cm 的剂量下曝光后的 SEM 观测结果和设计版图的对比图。图 4(b)是共漏极的一对 SET 的等效电路图, S_1, S_2 和 D 分别表示 2 个 SET 各自的源极和公共的漏极, C_{IS} 和 C_{ID} 表示其中一个 SET 的库仑岛量子点(Quantum Dot, QD)源漏电极间的隧穿结电容, R_{IS} 和 R_{IS} 表示隧穿结电阻, C_{G1} 和 C_{G2} 分别表示 2 个 SET 的库仑岛和栅电极之间的耦合电容, U_{G1}, U_{G2}, U_G 表示栅极电压, U_{DS1} 表示其中一个 SET 的源漏电压。

采用图 2 中零宽度线曝光版图, 0.24 nC/cm 的剂量在 PMMA-A2 光刻胶上写出了隧穿势垒宽度均匀、稳定分布在 (30 ± 5) nm 附近的 SET 图形, 为后续优化 ICP 刻蚀和提高氧化工艺稳定性提供可能。

1.2 感应耦合等离子刻蚀工艺研究

ICP 为第 2 步关键工艺, 为了将 EBL 工艺后光刻胶上符合设计规律、 TW 值均匀的 SET 图形精确可控地转移到 SOI 顶层硅上, 对 ICP 纳米尺寸级别的刻蚀工艺进行研究^[10]。以往采用非 Bosch^[11-12]刻蚀工艺, 虽然能完

成图形转移,但是由于同时通入刻蚀和钝化气体,刻蚀速率偏快,容易造成较大的侧向刻蚀,刻蚀均匀性不好。本实验采用 Bosch 工艺,通过优化刻蚀气体比例,调节刻蚀参数来降低刻蚀速率,实现了 EBL 图形的精确可控转移。对大小为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,完成线曝光工艺获得良好设计图形的实验片进行裂片,获得编号为 I,II,III,IV 的小片。试验片上的 SET 设计尺寸为: $L=220\text{ nm}$, $W=180\text{ nm}$, $TW=80\text{ nm}$ 。I 号实验片只进行喷金、SEM 观测,用来和刻蚀工艺对照,如图 5(a)中所示电子束光刻显影后,TW 的平均值约为 60 nm 。编号 II,III,IV 的实验片采用表 1 所示的刻蚀条件进行 Bosch 刻蚀,刻蚀后采用 Quanta 400FEG 热场发射电镜在 20 kV 加速电压、 200 K 放大倍数下进行形貌观测,刻蚀结果分别如图 5 中(b),(c),(d)所示,对应 TW 的平均值分别约为 75 nm , 61 nm , 40 nm 。气体流量单位:每分钟标准毫升(Standard Cubic Centimeter per Minute, SCCM)。

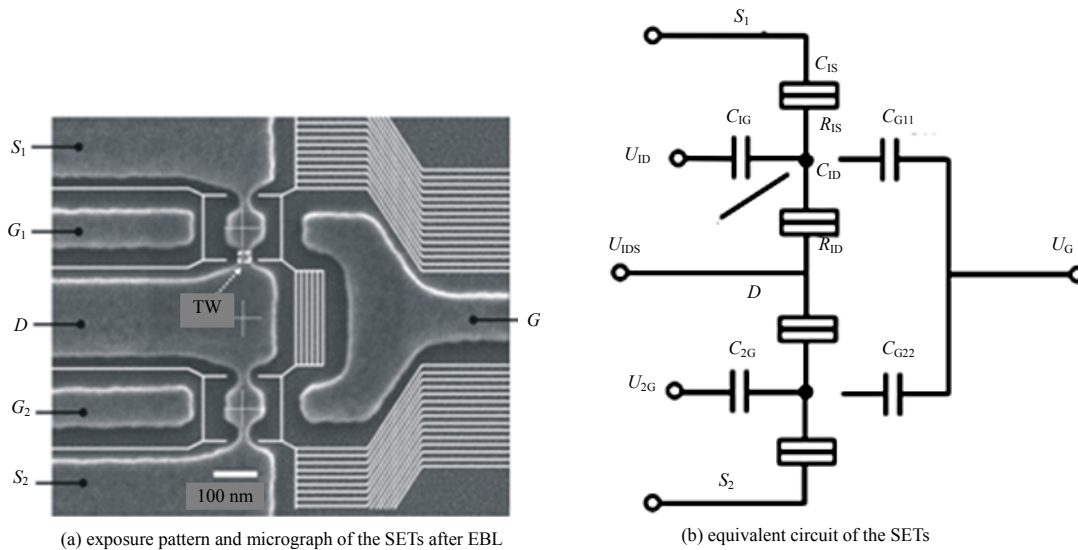


Fig.4 Comparison of the design pattern and the SEM micrograph of SETs,with the design value of $TW=50\text{ nm}$ and the dose of 0.24 nC/cm
图 4 SET 设计图形和 SEM 显微图片对比, TW 的设计尺寸为 50 nm , 曝光剂量为 0.24 nC/cm

表 1 Bosch 工艺的刻蚀工艺参数
Table 1 Etching conditions of Bosch process

number	ICP power/ W	RF power/ W	SF ₆ / SCCM	C ₄ F ₈ / SCCM	pressure/ mTorr	etching time T_1/s	passivation time T_2/s	etching cycle
II	650	25	28	25	10	4	4	19
III	650	25	28	25	10	4	3	17
IV	650	25	28	25	10	4	2	14

II 号样品, $T_1:T_2=4\text{ s}:4\text{ s}$ 的刻蚀条件,刻蚀后 TW 的平均尺寸约为 75 nm ,相比曝光后图 5 中(I)号显影后的 TW 值,这样的刻蚀气氛会使刻蚀后 SET 的 TW 值变大约 15 nm 。III 号样品, $T_1:T_2=4\text{ s}:3\text{ s}$ 的刻蚀条件,刻蚀后 TW 的平均尺寸为 61 nm ,相比(I)号的 TW 值,很好地转移了 EBL 的图形。IV 号样品, $T_1:T_2=4\text{ s}:2\text{ s}$ 的刻蚀条件,刻蚀后的 TW 的平均尺寸为 40 nm ,相比 EBL 后 TW 平均值约为 60 nm ,侧向多刻蚀约为 20 nm 。从图的刻蚀结果分析,考虑测量的相对误差,在刻蚀功率一定的条件下,随着钝化时间的缩短,侧向刻蚀增多。而 III 号实验片的刻蚀条件是能够将 EBL 图形精确转移到顶层硅上的最佳刻蚀条件。

1.3 低温超薄热氧化工艺

所制备的 SET 是顶层硅厚度约 60 nm 的平面型结构器件,由于 Si 氧化生成 SiO_2 ,出现体积的膨胀,

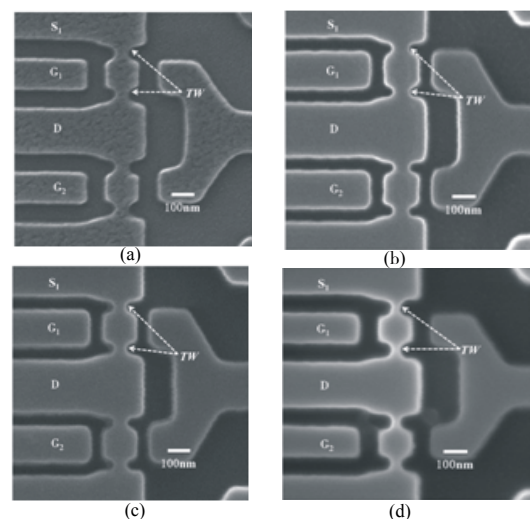


Fig.5 Etching results of Bosch process under different etching conditions
图 5 Bosch 刻蚀工艺的不同刻蚀条件的刻蚀结果

会使热氧化过程伴有应力^[13]，该应力会影响 SET 库仑岛、隧穿势垒区域的氧化速率。同时由于顶层硅的掺杂浓度很高，氧化速率相比普通硅快，造成氧化更难控制，氧化工艺具有波动性。采用上文零宽度线曝光工艺以及最佳的刻蚀条件，能够制备出大量 TW 均匀分布在 30 nm 左右的 SET，不需要热氧化就能形成隧穿势垒，氧化工艺仅用于修复表面缺陷并形成一定的钝化层；通过降低氧化温度来降低氧化速率，进一步减小氧化的波动性。本文选用 CALOGIC 型号的氧化炉，采用比以往 950 °C 更低的 850 °C 进行干氧化工艺，O₂:N₂=2:6 每分钟标准升 (standard liter per minute, slpm)，氧化 25 min，氧化厚度约为 8~10 nm，后续制备欧姆接触、裂片、引线封装对器件进行测试。

1.4 SET 器件的测试

将引线封装好的 SET 器件放在压缩制冷机内降温，在 8.4 K 进行电学性能测试，器件的源极和栅极电压分别由 2 台 YOKOGAWA7651 提供，源极电流由 1 台 ITAHC01211 电流前置放大器放大读出。图 6(a)为测试原理示意图，图 6(b)为源漏电流随源漏偏压及栅压变化的灰度图，可以观察到清晰的库仑振荡和菱形特征结构。经测试，制备的 SET 阵列中超过 90% 的器件可显示出清晰的库仑阻塞效应和单电子隧穿特性。由图 6(b)测试的数据分析，左边 SET 的一个振荡周期内栅压变化 $\Delta U_{1G} \approx 2$ V， C_{1G} 为栅极耦合电容， $\Delta U_{1G} = e/C_{1G}$ ，可得 $C_{1G} = e/\Delta U_{1G} = 0.08$ aF，SET 左右隧穿势垒的电容值为： $C_{1L} = 9.68$ aF， $C_{1R} = 2.8$ aF，SET 的总电容 $C_{\Sigma} = C_{1G} + C_{1L} + C_{1R} = 12.56$ aF，SET 的库仑阻塞能为 E_{1C} 。

$$E_{1C} = e\alpha\Delta U_{1G} = e^2/C_{1\Sigma} \quad (1)$$

$$\alpha = C_{1G}/C_{1\Sigma} = 6.4 \times 10^{-3} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)得到 $E_{1C} = 12.7$ meV (式(1)中 e 为电荷量)。

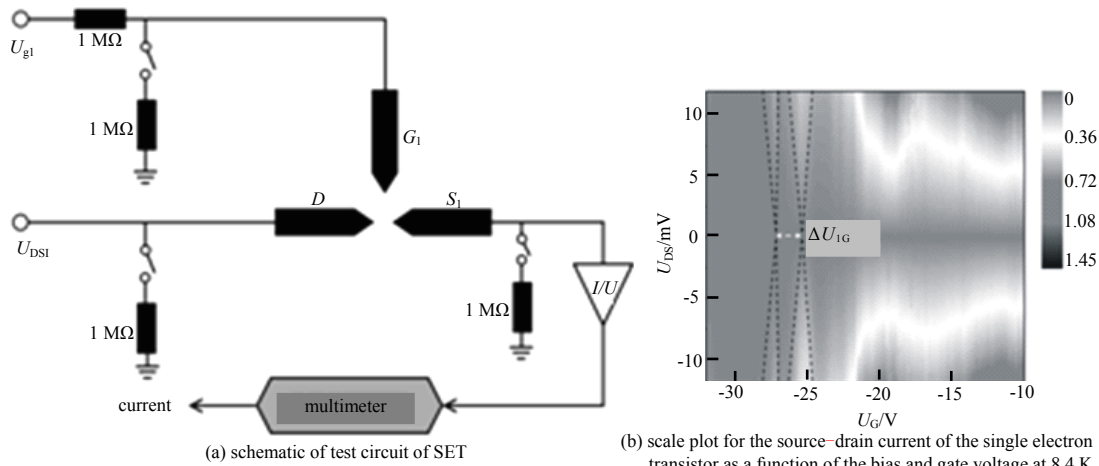


Fig.6 Gate controlled current-voltage ($I_{DS}-U_{DS}$) characteristics of SET

图6 单电子晶体管的栅控电压-电流特性

2 结论

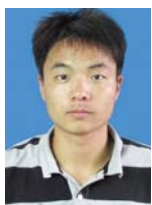
采用电子束零宽度单线曝光工艺，可以很好地减小纳米尺寸曝光工艺中近邻效应对核心结构的影响，通过实验找到了 EBL 最佳的线曝光工艺条件，并成功地在光刻胶上制备大量隧穿势垒宽度均匀值在 30 nm 附近，尺寸均匀、稳定的 SET 图形；优化感应耦合等离子刻蚀工艺，找出稳定转移 EBL 图形的最佳刻蚀工艺条件；最后降低热氧化温度，提高氧化工艺的稳定性，成功制备出成品率高达 90%、具有清晰库仑阻塞和单电子隧穿效应的 SET 阵列器件。提高 SET 的制备工艺的可重复性，实现阵列化 SET 器件的高成品率制备，提高射频单电子晶体管作为超导探测器射频读出电路核心器件的实用性，推动超导太赫兹单光子探测器的芯片化。不足之处，本文中制备的库仑岛尺寸约 140 nm，后续将进行百纳米以内 SET 器件的制备研究。

参考文献:

- [1] THOMAS G Phillips, KEENE Jocelyn. Submillimeter astronomy[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(11): 1662-1678.
- [2] 康峰, 商慧亮, 陈雄, 等. 超导纳米线单光子探测器偏置电源系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(4): 641-646. (KANG Feng, SHANG Huiliang, CHEN Xiong, et al. Design of high-accuracy bias power supply system for SNSPD[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(4): 641-646.)

- [3] KOMIYAMA S O, ASTAFIEV V, ANTONOV T, et al. A single-photon detector in the far-infrared range[J]. Nature, 2010(403):405–407.
- [4] UEDA Takeji, AN Zhenghua, HIRAKAWA Kazuhiko, et al. Charge-sensitive infrared phototransistors: characterization by an all-cryogenic spectrometer[J]. Journal of Applied Physics, 2008(103):093109-1–093109-7.
- [5] SCHOELKOPF R J, WAHLGREEN P, Kozhevnikov A A, et al. The radio-frequency single-electron transistor(RF-SET): a fast and ultra sensitive electrometer[J]. Science, 1998, 280(5367):1238–1241.
- [6] FUJIWARA A, TAKAHASHI Y. Manipulation of elementary charge in a silicon charge-coupled device[J]. Nature, 2001, 410(6828):560–562.
- [7] BLICK R H, HAUG R J, WEIS J, et al. Single electron tunneling through double quantum dot: the artificial molecule[J]. Phys Rev: B, 1996, 53(12):7899–7902.
- [8] 吕利, 孙建东, 李欣幸, 等. 硅基单电子晶体管的可控制备[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(3):133–136. (LYU Li, SUN Jiandong, LI Xinxing, et al. Controllable fabrication of silicon based single electron transistor[J]. Micronanoelectronic Technology, 2013, 50(3):133–136.)
- [9] 赵珉, 刘桂英, 陈宝钦, 等. 电子束零宽度曝光及其应用[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(2):106–111. (ZHAO Min, LIU Guiying, CHEN Baoqin, et al. Electron beam single-line exposure and its application[J]. Micronanoelectronic Technology, 2013, 50(2):106–111.)
- [10] 阳元, 武国英, 郝一龙, 等. 硅基 MEMS 加工技术及其标准工艺研究[J]. 电子学报, 2002, 30(11):1577–1584. (YANG Yuan, WU Guoying, HE Yilong, et al. Study of silicon-based MEMS technology and its standard process[J]. Acta Electronic Sinica, 2002, 30(11):1577–1584.)
- [11] MEINT J, DE Boer, GARDENIERS J G E (Han), et al. Guidelines for etching silicon MEMS structures using fluorine high-density plasmas at cryogenic temperatures[J]. J Microelectromechanical Systems, 2002, 11(4):385–401.
- [12] FRANCOU M, DANIEL J S, PECOUD L. Deep and fast plasma etching for silicon micromachining[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1995, 46(1/2/3):17–21.
- [13] YEN J Y, HWU J H. Stress effect on the kinetics of silicon thermal oxidation[J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 89(5):3027–3032.

作者简介:



刘永涛(1990–), 男, 河南省商丘市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件设计及加工制备.email: ytliu2015@sinano.ac.cn.

方靖岳(1983–), 男, 湖南省湘潭市人, 讲师, 主要研究方向为量子点输运特性.

李欣幸(1985–), 男, 江苏省苏州市人, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹系统集成、射频单电子晶体管扫描示波系统、太赫兹扫描成像等系统的开发.

张志鹏(1981–), 男, 湖北省黄冈市人, 助理研究员, 主要研究方向为半导体器件.

秦 华(1972–), 男, 江苏省常州市人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为半导体器件、微纳光机电集成技术.email: hqin2007@sinano.ac.cn.

俞圣雯(1973–), 女, 江苏省苏州市人, 副教授, 主要研究方向为智能薄膜的设计与组装、智能耦合响应机制.email: yusw@staff.shu.edu.cn.