

# 预调制多陪集采样系统\*

黄振, 柏正尧

(云南大学 信息学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 目前, 压缩采样系统主要有随机解调器、调制宽带转换器和多陪集采样3种, 其中, 多陪集采样的系统框架简单、重构成功率高, 但用硬件实现时面临两个难题, 一是低速模数转换器(ADC)的输入模拟带宽存在上限, 二是难以实现各通道上的精准时延。借鉴调制宽带转换器在采样前先对输入信号进行预调制的思想, 将预调制与多陪集采样结合, 提出了预调制多陪集采样系统。采样前, 在采样系统各通道上, 由随机序列发生器产生周期单脉冲序列, 对输入信号进行频谱调制以降低采样前信号的模拟带宽; 然后, 调制信号由低速ADC进行采样, 且各通道上的低速ADC与随机序列发生器共用同一个控制时钟; 最后, 采用多信号分类算法(MUSIC)算法近乎无失真地重构出输入信号。仿真实验结果表明, 当以15%的奈奎斯特采样速率对输入信号进行压缩采样时, 重构信号的均方误差仅为 $10^{-5}$ 量级。这验证了该采样系统的可行性, 有效解决了多陪集采样系统的两个难题。

**关键词:** 压缩感知; 多陪集采样; 预调制; MUSIC算法; 调制宽带转换器

中图分类号: TN911

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212221

中文引用格式: 黄振, 柏正尧. 预调制多陪集采样系统[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 48–52.

英文引用格式: Huang Zhen, Bai Zhengyao. Pre-modulated multi-coset sampling system[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 48–52.

## Pre-modulated multi-coset sampling system

Huang Zhen, Bai Zhengyao

(School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** At present, the compressed sampling system mainly includes three sampling system: random demodulator, modulated wideband converter and multi-coset sampling, among them, the system framework of multi-coset sampling is simple and has a high reconstruction success rate. But, the multi-coset sampling faces two difficulties in hardware implementation, one is that there is an upper limit on the input analog bandwidth of the low-speed analog-to-digital converter(ADC), and the other is it's difficult to achieve precise delays on each channel. This paper draws on the ideal of modulated wideband converter which the input signal is pre-modulated before sampling, proposes the pre-modulated multi-coset sampling system which combines pre-modulation with multi-coset sampling. Before sampling, the generate periodic single-pulse sequences is generated by a random sequence generator in each channel of the sampling system, and the input signal is spectrally modulated to reduce the analog bandwidth of the signal before sampling. Then, the modulated signal is sampled by the low-speed ADC, and each channel of low-speed ADC and random sequence generator share a same control clock. Finally, the multiple signal classification algorithm(MUSIC) is used to reconstruct the input signal without distortion. The simulation results show that the mean square error of the reconstructed signal is at the order of  $10^{-5}$  when the input signal is compressed and sampled at 15% Nyquist sampling rate. This verifies the feasibility of the sampling system in this paper, and the sampling system effectively overcome the two problems of the multi-coset sampling system.

**Key words:** compressed sensing; multi-coset sampling; pre-modulated; MUSIC algorithm; modulated wideband converter

## 0 引言

随着信息技术的不断飞速发展, 学者在研究信号处理的前沿领域取得了卓越成就, 随着对前沿信息技术探知的增加, 虽然科技人员已研制出高性能的ADC, 但现有最高采样速率的ADC仍无法满足学者们对更高频率的信号频谱及信号特征的研究, 且采样速率超过1GHz

的商用ADC价格非常昂贵<sup>[1]</sup>。针对具有稀疏特性的信号, 提出的压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论<sup>[2-4]</sup>缓解了ADC采样速率的压力, 实现对信号的采样和压缩同步进行, 并删除了冗余信息, 降低了数据运算量, 缓解了硬件压力, 然后再由重构算法实现从低维的压缩数据中重构出输入信号。

目前, 信号处理中的压缩采样系统<sup>[5-6]</sup>主要有随机解调器(Random Demodulator, RD)<sup>[7]</sup>、多陪集采样(Multi-

\* 基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金(U1231122)

Coset Sampling, MCS)<sup>[1,6-8]</sup>和调制宽带转换器(Modulated Wideband Converter, MWC)<sup>[1,6-7,9]</sup><sup>[3]</sup>种采样系统。RD 是单通道多音频模型的欠采样, 对输入信号模型比较敏感, 当信号是非线谱信号时, 重构误差和重构计算量均较大, 因此无法普遍适用于所有的宽带信号<sup>[1]</sup>。MWC 采样系统是多通道均匀亚奈奎斯特采样, 随着采样系统通道数的增加, 使得产生各通道上非相关伪随机序列的难度成几何倍数地增加, 同时伪随机序列的跳变速率不小于奈奎斯特采样速率。MCS 是多通道周期非均匀亚奈奎斯特采样, 通过调整各通道上的时延实现频域内不同权值的频谱裁剪, 在硬件实现时各通道上的时延器很难产生理论中的理想时延, 同时 MCS 在接收信号前未先进行低通滤波, 导致 ADC 的接收输入模拟带宽必须不小于输入信号的模拟带宽。

本文借鉴 MWC 在对输入信号采样前先进行频谱调制来降低待采样信号模拟带宽的思想, 结合 MCS 通过控制各通道上的时延来实现频谱裁剪的思想, 提出了预调制多陪集采样系统。通过仿真实验, 该系统有效克服了 MCS 中低速 ADC 最大接收输入模拟带宽问题和难以产生精准时延问题, 同时克服了 MWC 随着通道数的增加而带来的各通道上产生非相关伪随机序列的难度。

## 1 多通道采样系统

### 1.1 MCS

MCS 是一个多通道周期非均匀采样系统, 每个通道上由时延器和低速 ADC 组成, 其采样框架如图 1 所示。

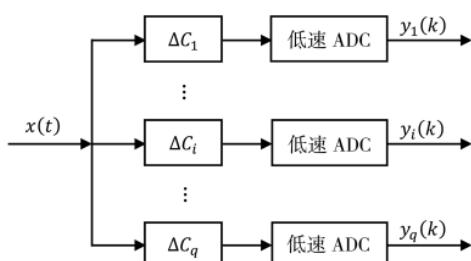


图 1 多陪集采样框架

MCS 通过调整时延  $\Delta C_i$  控制各通道上低速 ADC 采样起始时刻, 实现时间交替采样; 并通过控制通道数  $q$  和低速 ADC 采样周期对输入信号进行多通道并行交替压缩采样, 频域内实现对信号  $x(t)$  的频谱进行裁剪, 然后采用 MUSIC 算法<sup>[10-11]</sup>对输入信号进行重构。

MCS 在低速 ADC 采样前没有对信号进行滤波过程, 因 ADC 的输入模拟带宽要不小于输入信号最高频率的两倍, 导致 MCS 不能处理高频、特高频信号; 同时, 硬件实现时因电子器件非理论中的完美器件, 导致难以按理论中的要求产生各通道上的精准时延。

### 1.2 MWC

MWC 是一个多通道周期均匀采样系统, 各通道上由伪随机序列发生器、乘法器、低通滤波器和低速 ADC

组成。其中, 伪随机序列的一个周期内有  $M$  个  $\pm 1$  的矩形脉冲信号, 实现对输入信号进行离散化和频谱调制。在 MWC 各通道上的低通滤波器的作用是对调制后的信号进行滤波, 同时低速滤波器带有积分器<sup>[9, 12]</sup>的作用, 实现对  $M$  个离散化样本点进行积分。然后, 由低速 ADC 采样后输出压缩信号, 再采用以正交匹配追踪(Orthogonal Match Pursuit, OMP)<sup>[13-14]</sup>为代表的贪婪算法重构出输入信号。

MWC 各通道上通过采用周期伪随机序列对输入信号进行调制, 并在各通道上实现不同权值的频谱混叠, 为了能从压缩数据中重构出输入信号, 需要各通道上的伪随机序列之间具有非相关性, 这就导致随着通道数的增加, 生成各通道上的非相关伪随机序列难度成倍增加。

## 2 预调制多陪集采样系统

### 2.1 基本思路

MSC 在硬件实现时因低速 ADC 的电子元器件存在最大输入模拟带宽问题, 导致被采样的输入信号带宽要小于其模拟带宽, 但实际输入信号带宽均大于 ADC 的最大输入模拟带宽。针对该问题, 本文借鉴 MWC 在采样前先进行频谱调制来降低采样前信号带宽的思想, 提出预调制多陪集采样系统。该系统在 MCS 系统框架的各通道上添加混频器和低通滤波器, 在频域对输入信号进行频谱调制后, 由低通滤波器滤除多余频谱信息, 从而使待采样信号带宽小于低速 ADC 最大输入模拟带宽。

MCS 的本质是从奈奎斯特采样序列中选择出一些周期性的特定采样点<sup>[1,5]</sup>, 通过控制各通道上的不同时延和低速 ADC 采样周期来实现频域内对输入信号的频谱进行裁剪, 从而实现每个通道上低速率采样。而 MWC 通过各通道上伪随机序列之间的非相关性, 实现各通道上在频域内的频谱混叠权值不同, 并将信号恢复问题转化为多测量向量(Multiple Measurement Vector, MMV)<sup>[15]</sup>求解问题。在本文提出的预调制多陪集采样系统中的混频信号不同于 MWC 的伪随机序列, 而是幅值为 1、周期是奈奎斯特采样周期整数倍的单脉冲序列的调制信号, 其作用是在各通道上周期性的对输入信号的特定位置点进行离散化, 与 MCS 采样本质相同。同时, 混频信号在混频时对输入信号进行了频谱调制, 然后由 ADC 进行低速采样输出压缩数据, 且各通道上的随机序列和低速 ADC 共用同一控制时钟, 实现对输入信号进行同步压缩采样。

### 2.2 系统框架及分析

预调制多陪集采样系统是多通道周期采样系统, 每个通道均由混频器、低通滤波器和低速 ADC 组成, 如图 2 所示。

假设输入信号  $x(t)$  为稀疏多频带信号, 且为频域内带限信号, 奈奎斯特采样频率为  $W$ , 输入信号带宽为  $W/2$ ;  $x(t)$  由  $N$  个子频带组成, 且带宽  $B$  均远小于输入信号带

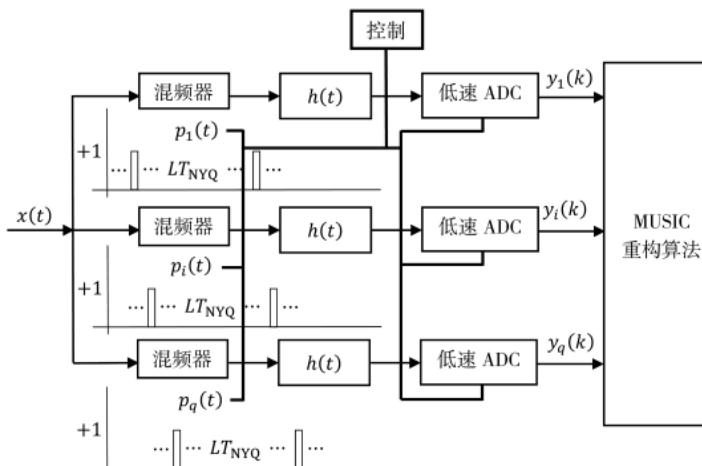


图 2 预调制多陪集采样系统

宽； $T_{\text{NYQ}}$  为奈奎斯特采样周期 ( $T_{\text{NYQ}}=1/W$ )， $p_i$  为第  $i$  通道上随机序列的起始时刻，则周期单脉冲序列信号  $p_i(t)$  在  $t=(kL+p_i)T_{\text{NYQ}}$  时刻对输入信号进行离散化，且  $1 < i < q$ ， $k=0, 1, 2, \dots, LT_{\text{NYQ}}$  为随机序列发生器和低速 ADC 的周期， $q$  为通道数。

输入信号经过周期单脉冲序列信号离散化后为  $x(kL/W+p_i/W)$ ，因低通滤波器在时域内具有积分器的作用，因此低通滤波器在时域的作用是把  $x(t)$  在  $t=(kL+p_i)T_{\text{NYQ}}$  的幅值累加至  $(k+1)LT_{\text{NYQ}}$  时刻，且低速 ADC 采样时刻为  $(k+1)LT_{\text{NYQ}}$ 。则第  $i$  通道上的输出信号的表达式为：

$$y_i(k)=x(kL/W+p_i/W) \quad (1)$$

计算  $y_i(k)$  的离散时间傅里叶变换(DTFT)，将  $\omega$  范围设定为  $[-\pi W/L, \pi W/L]$ ，并令  $Q=\lfloor(L+1)/2\rfloor$ ，可得：

$$e^{-j\frac{p_i}{W}\omega} Y_i(e^{j\omega\frac{L}{W}}) = \frac{W}{L} \sum_{m=-Q+1}^Q e^{-j\frac{2\pi}{L}p_i m} X(\omega - 2\pi\frac{W}{L}m) \quad (2)$$

其中， $i=1, \dots, q$ 。对于预调制多陪集采样系统，式(2)可用向量矩阵表达式简写为：

$$Z(\omega)=\Phi S(\omega) \quad (3)$$

其中， $Z$  为  $q \times 1$  向量， $S$  为  $L \times 1$  向量， $\Phi$  为  $q \times L$  矩阵，它们的元素分别为：

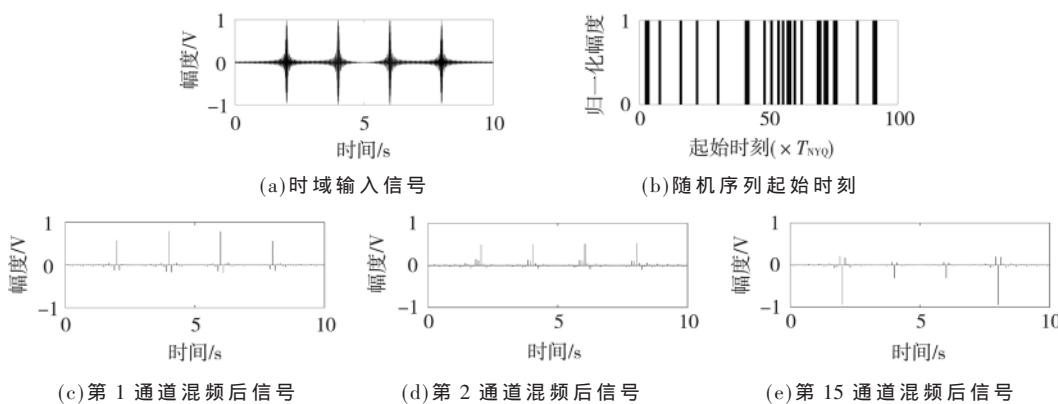


图 3 混频信号

$$z_i = e^{-j\frac{p_i}{W}\omega} Y_i(e^{j\omega\frac{L}{W}}) \quad (4)$$

$$\Phi_{i,i} = \frac{W}{L} e^{-j\frac{2\pi}{L}p_i m_i} \quad (5)$$

$$s_i = X(\omega - 2\pi\frac{W}{L}m_i) \quad (6)$$

其中， $i=1, \dots, q$ ； $l=1, \dots, L$ ； $m_i = -Q + l$ 。

### 3 仿真实验分析

在仿真实验中，稀疏多频带信号参数为：子频带数  $N$  为 4，带宽  $B$  均为 15 Hz，中心载频为 -350 Hz、-100 Hz、100 Hz 和 350 Hz，总占频带宽为 1 000 Hz(即奈奎斯特采样频率  $f_{\text{NYQ}}$ )；输入信号的信噪比为 45 dB，时域观测长度为

10 s，子频带时延分别为 2 s、4 s、6 s 和 8 s。预调制多陪集采样系统的参数设置为：通道数  $q=15$  ( $q \geq 2N$ )， $L=100$  (即随机序列和 ADC 采样的周期为  $100T_{\text{NYQ}}$ )；各通道上的随机序列的起始时刻为随机产生(小于  $L$ )，为奈奎斯特周期采样的整数倍，且互不相同，如图 3(b)所示。

图 3(a)是输入稀疏多频带信号的时域波形图，图 3(c)~图 3(e)分别是第 1、2、15 通道上输入信号与随机序列经混频器后输出的时域波形图，对应的随机序列时延为奈奎斯特采样周期的 92、41、3 倍。随机序列的周期远大于奈奎斯特采样周期，在各通道上经混频器对输入信号进行频谱调制后，经由低通滤波器滤波和低速 ADC 采样后输出压缩采样数据，该过程与 MCS 本质相同，之后采用 MUSIC 算法从压缩采样数据中重构出输入信号。

图 4(a)是采用 MUSIC 算法计算出压缩矩阵的特征谱，图 4(b)是 MUSIC 算法识别出来的有用信息(含有频谱)的频谱切片。图 5(a)~图 5(c)分别为无噪的输入信号、有噪的输入信号和重构出的信号，图 5(d)~图 5(f)分别为对应的时域信号波形图。

预调制多陪集采样系统的核心是在各通道上通过随机序列发生器产生不同起始时刻的周期单脉冲调制信号，以实现频域内的频谱调制和时域内亚奈奎斯特采

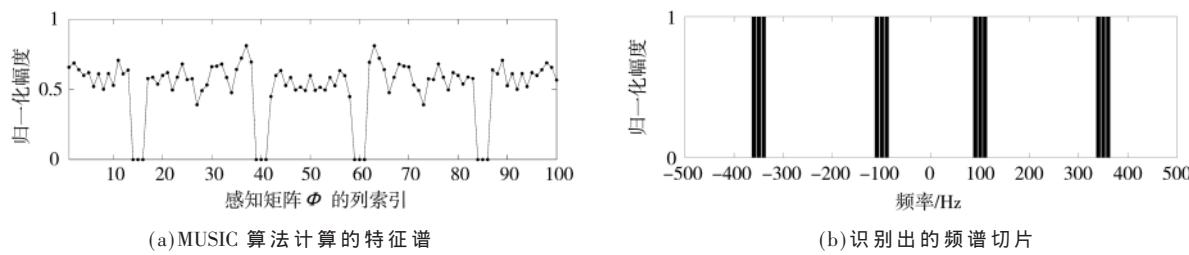


图 4 MUSIC 算法识别出的频谱片段

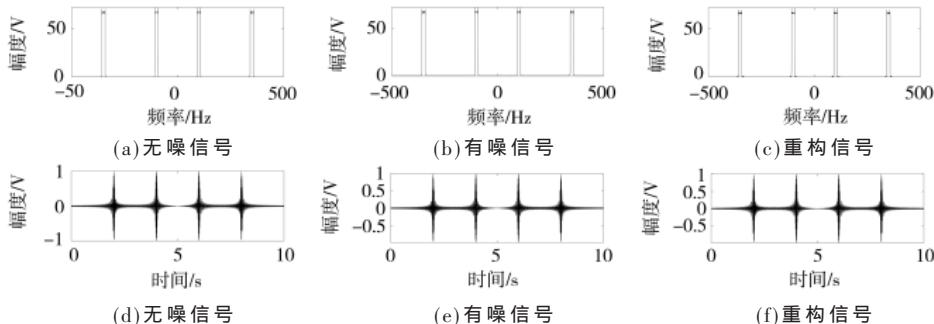


图 5 重构信号与输入信号的对比

样,因此在仿真实验中各通道上随机序列的起始时刻为随机产生,分别为奈奎斯特采样周期的 92、41、75、42、56、72、60、63、58、73、30、48、76、69、3 倍。因各通道上随机序列的时延不同,使得各通道上的压缩采样数据对应的频谱混叠权值不同,实现该采样系统对输入信号的频谱裁剪,经 MUSIC 算法对压缩感知矩阵进行计算,识别出频域内含有频谱的频谱片段,从而实现信号的重构,在仿真实验中信号重构的均方误差在  $10^{-5}$  量级。同时,该采样系统有 15 个通道,各通道上的  $L$  均为 100,因此,各通道上的采样速率为  $W/L=10$  Hz,采样系统总采样速率为  $qW/L=150$  Hz,采样速率是奈奎斯特采样速率的 0.15 倍。

#### 4 结论

本文通过对 MWC 和 MCS 采样系统进行了分析,提出了预调制多陪集采样系统,通过仿真实验,验证了该采样系统的可行性,在实现低速率采样和完美重构出输入信号的同时,有效克服了 MCS 各通道上低速 ADC 最大输入模拟带宽上限问题和难以产生精准时延问题,同时克服了 MWC 非相关伪随机序列发生器的困难。在实际工程应用中,针对稀疏多频带信号的频带带宽、频谱波形、奈奎斯特带宽等特征,需进一步设计预调制多陪集采样系统的通道数、随机序列周期以及 ADC 采样周期等重要参数。下一步工作将针对实际应用中的稀疏多频带信号,设计预调制多陪集采样系统,硬件实现该采样系统并进行实测,力争推进本文研究成果的实际应用。

#### 参考文献

- [1] 王朋.宽带压缩感知接收机关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2020.
- [2] DONOHO D L.Compressed sensing[J].IEEE Transactions on Information Theory ,2006 ,52(4): 1289–1306.
- [3] CANDES E J , ROMBERG J , TAO T .Robust uncertainty principles :exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J].IEEE Transactions on Information Theory ,2006 ,52(2): 489–509.
- [4] 杨恩苹.非平稳信号压缩采样与重构算法研究[D].成都:电子科技大学,2018.
- [5] LI X , WANG H , LUO H .A compressed sampling receiver based on modulated wideband converter and a parameter estimation algorithm for fractional bandlimited LFM signals[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing ,2021 ,40(2): 918–957.
- [6] 张瑜.基于亚奈奎斯特采样的射电天文信号功率谱密度估计[D].昆明:云南大学,2018.
- [7] 刘长剑.基于亚奈奎斯特采样的宽带信号频谱感知技术研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [8] 董宁斐.稀疏宽带信号压缩采样与重构技术研究[D].南京:南京理工大学,2018.
- [9] MISHALI M , ELDAR Y C .From theory to practice : sub-Nyquist sampling of sparse wideband analog signals[J].IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing ,2010 ,4(2): 375–391.
- [10] PAL P , VAIDYANATHAN P P .Coprime sampling and the MUSIC algorithm[C]//2011 Digital Signal Processing and Signal Processing Education Meeting(DSP/SPE).IEEE ,2011: 289–294.
- [11] 赵知劲,张鹏,尚俊娜,等.基于 MUSIC 算法的宽带频谱感知[J].计算机工程,2012 ,38(13): 83–85.

- [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)

细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] 卢妍.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研究[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