



# 基于 BGR 芯片设计的 CMOS 集成电路 教学新范式

曹 胜, 杨立波\*, 高红霞, 岳成平, 唐静雯

(太原学院 智能与自动化系, 太原, 030032)

**摘要:** 针对集成电路专业实验教学中软件使用难度高以及教学模式单一的问题, 结合专业培养方案对课程知识与能力的要求, 提出一种基于 BGR 芯片设计的 CMOS 集成电路教学新范式。该文采用调研分析、调查问卷、理论+实践、系统评估等方法, 培养学生实验技能、设计思想、EDA 方法和分析方法, 从而提高学生在模拟芯片设计方面的实践能力和创新意识。教学实践表明, 该教学模式在集成电路人才培养实践教学取得了良好的教学效果。

**关键词:** 实验教学; 芯片设计; 带隙基准源; CMOS 集成电路

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230256

## New Paradigm for CMOS Integrated Circuits Based on Teaching BGR Chip Design

CAO Sheng, YANG Libo\*, GAO Hongxia, YUE Chengping, TANG Jingwen

(Department of Intelligence and Automation, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** A new paradigm for complementary metal oxide semiconductor (CMOS) integrated circuit teaching based on band gap reference (BGR) chip design is proposed to address the issues of high difficulty in the software usage and single teaching mode in experimental teaching of integrated circuit majors, combined with the requirements of professional training plans for course knowledge and abilities. This study adopts methods such as research analysis, survey questionnaire, theory and practice, and system evaluation to cultivate students' experimental skills, design ideas, electronic design automation (EDA) methods, and analytical methods, thereby improving their practical ability and innovative awareness in the analog chip design. Teaching practice has shown that this teaching mode has achieved good teaching results in the practical teaching of integrated circuit talent cultivation.

**Key words:** experimental teaching; chip design; band gap reference source; CMOS integrated circuit

党的十八大明确提出实施创新驱动发展战略, 国务院关于印发“十三五”国家信息化规划的通知(国发〔2016〕73号)中提出制定详细的核心技术发展清单和规划, 加快科技成果向现实生产力转化, 为 IC 行业的发展打下基础。政策聚焦于高端芯片的研发和制造领域, 推进创新平台的建设。各高校积极推进教育教学创新, 提出一系列具体要求和措施, 以培养具备创新和实践能力的人才。本文旨在推进教学创新, 培养更多创新

人才, 提升科技创新发展水平。

### 1 模拟集成电路实验课程教学现状

随着集成电路的发展, 模拟芯片在许多应用中的地位日益重要。其中, 带隙基准电压源电路是低压差线性稳压器(low dropout liner, LDO)电源管理芯片的一个核心电路, 在 DC-DC、A/D、D/A 等集成电路中都有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。然而, 传统的模拟集成电路设计教学方法已无法满足当

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-10-25

基金项目: 山西省自然青年科学基金(202203021212015); 山西省教育厅教学改革创新项目(J20221195, J20221194, J20231426, J20231428); 山西省高校科技创新计划项目(2022L577)。

作者简介: 曹胜(1997-), 男, 硕士, 助教, 主要从事模拟集成电路设计方面的研究。

\*通信作者: 杨立波(1979-), 男, 硕士, 教授, 主要从事电路设计方面的研究。E-mail: 15626264529@163.com

前电子信息产业对人才的要求, 并且缺乏与产业需求相匹配的实践环节<sup>[3]</sup>, 同时存在以下 4 个方面问题。

#### 1) 缺少实践环节

由于模拟集成电路设计需要进行电路搭建、仿真、布局等多个环节, 而受到实验室设备和场地限制, 缺少实践环节会导致学生对课程内容的理解和掌握不足。

#### 2) 软件工具的使用难度大

现在使用的模拟集成电路设计软件工具 Cadence 复杂度较高, 需要具备一定的 Linux 系统操作编程和电路设计基础, 然而在教学过程中, 学生可能无法熟练掌握软件的使用方法, 进而影响他们的实验效果。

#### 3) 缺乏行业前沿

模拟集成电路设计技术在快速发展和更新, 但高校教师水平参差不齐, 教学内容落后, 导致学生掌握的技术无法与市场需求对接。

#### 4) 教学模式单一

模拟集成电路设计课程多以传统的讲授和实验为主, 缺乏创新教学模式和教学手段, 难以引发学生的兴趣和学习热情。

本文旨在通过基于 BGR 芯片设计的新范式和新理念, 提升学生在 CMOS 集成电路设计教学中的实践能力, 满足产业的需求, 培养适应未来社会发展的高素质人才, 同时推动模拟集成电路教学改革<sup>[4-5]</sup>。新的教学方法不仅传授专业知识, 还融入了思想政治教育, 既促进学生全面发展, 提高学生创新能力<sup>[6]</sup>, 还鼓励学生积极参加各种创新大赛和科研训练, 进一步提升他们的综合素质。

## 2 实践教学目标

### 2.1 研究内容

本实验教学项目基于 BGR 芯片设计, 探索 CMOS 集成电路设计教学的新范式与新理念<sup>[7]</sup>, 以促进教学质效提升, 提高学生模拟电路设计实践和创新能力, 增强他们的就业竞争力, 具体内容包括以下 3 个方面。

#### 1) 教学计划设计

将 BGR 芯片设计实践纳入模拟集成电路设计课程, 通过仿真、布局和验证实验, 提升学生对于模拟集成电路设计的理解和技能<sup>[8]</sup>。

#### 2) 实验环节建设

组建芯片设计教学创新团队, 配备基于 Cadence 软件平台的 BGR 芯片设计仿真软件、实验用芯片及相关器材。同时提供教学辅助平台支持, 学生将在学习过程中掌握以下 3 种关键能力。

##### ① 模拟 IC 芯片设计的流程和方法

学习模拟集成电路设计的流程和方法, 包括电路设计、布局布线、模拟仿真和参数提取等环节, 了解各个环节的技术要求和方法。

##### ② BGR 电路设计的关键技术

研究 BGR 电路设计中的关键技术, 包括启动电路、集成运放、电流镜模块、核心电路等, 掌握各个电路的设计原理和方法<sup>[9]</sup>。

##### ③ BGR 电路参数测试和分析

学习 BGR 电路参数测试和分析的方法, 包括基本的测试方法、测试环境和测试仪器的使用, 掌握 BGR 电路参数测试和分析的技术要点和方法。

#### 3) 实践创新与成果展示

鼓励学生参与 BGR、LDO 芯片设计的实践创新项目, 组织学术交流和成果展示活动, 激发学生的实践创新能力和意识。

## 2.2 研究方法

#### 1) 调研分析法

梳理相关领域的研究文献, 包括教学改革、教学方法、教材等方面, 探讨模拟集成电路芯片设计教学改革的研究现状、存在的问题和改革可行性。

#### 2) 问卷调查法

通过设计问卷了解学生对当前教学方法与效果的反馈和期望, 发现存在的问题和提出改进方向。

#### 3) 教学案例分析法

收集相关课程的教学案例, 分析不同教学环节中的具体实施方案和效果, 结合学生反馈、教师评估等数据, 提出改进教学的可行性建议。

#### 4) 实验教学法

搭建合适的实验平台, 进行实验室实践, 以实现理论和实践相结合, 提高学生的实践能力和创新意识, 并评估不同教学方法对学生实验操作技能和实际能力的影响。

#### 5) 系统评估法

建立教学评价体系, 对改革前后的课程和实

验进行系统评估,并评估改革的效果和成效,同时了解教学改革的可持续性<sup>[10]</sup>。

### 2.3 研究目标

1) 提高学生的实践能力和创新意识,培养具有实际能力和创新意识的人才;

2) 掌握 BGR 芯片电路设计的基本理论和技术方法。研究关键技术,如核心电路、电流镜电路、集成运放、启动电路等,并掌握各个电路的设计原理和方法;

3) 在 Linux 仿真环境下仿真设计 BGR 芯片,通过仿真实验对芯片的性能进行测试和验证,不断改进设计方案,提高芯片性能。

为学生提供实践教学机会,以培养其动手能力和操作技能,推动高等教育的持续发展。

## 3 实践教学过程

### 3.1 设计原理

在带隙基准电路中,可以将具有正温度系数和负温度系数的电压按一定权重相加,生成与温度和电源电压无关的输出电压。设计原理如图1所示,其中 $V_{\text{ref}}$ 代表与温度无关的电压,在调整系数的情况下,可以实现具备零温度系数的效果。双极型晶体管在半导体工艺中被广泛应用,其结构能够提供正负温度系数,并与 CMOS 工艺相兼容<sup>[11]</sup>,因此在产生正负温度系数的应用方面也具有广泛的应用。

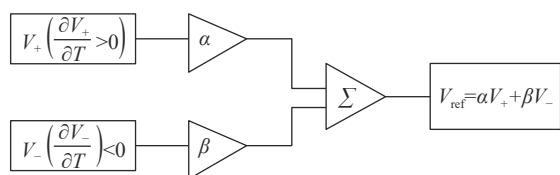


图1 带隙基准源设计核心原理

具体来说,在负温度系数电压下,将一个单极晶体管正向偏置,其 BE 节电压的  $I-V$  特性<sup>[12]</sup> 可以表示为:

$$V_{\text{BE}} = V_{\text{T}} \ln(I_{\text{C}}/I_{\text{S}}) \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{BE}}$  为 BE 节电压,  $V_{\text{T}}$  为硅的温度电压常数,  $I_{\text{C}}$  为集电极电流,  $I_{\text{S}}$  为饱和电流。通过对式(1)的推导,可以得到 BJT 晶体管 BE 节的温度系数,即  $-1.5 \text{ mV/K}$  左右。

在正温度系数电压下,两个同样的晶体管,其 BE 节差值与绝对温度成正比,即:

$$\Delta V_{\text{BE}} = V_{\text{BE1}} - V_{\text{BE2}} = V_{\text{T}} \ln \frac{nI_0}{I_{\text{S1}}} - V_{\text{T}} \ln \frac{I_0}{I_{\text{S2}}} \quad (2)$$

式中: 变化值  $\Delta V_{\text{BE}}$  为两个晶体管 BE 节;  $V_{\text{T}} = \frac{kT}{q}$ ,  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为开氏温度,  $q$  为电子电荷;  $n$  为晶体管集电极电流比值。故正温度系数为:

$$\frac{\partial \Delta V_{\text{BE}}}{\partial T} = \frac{k}{q} \ln n \quad (3)$$

通过合理的配比,可以得到零温度系数的基准电压设计:  $V_{\text{ref}} = \alpha_1 V_{\text{BE}} + \alpha_2 (V_{\text{T}} \ln n)$ 。通过式(1)计算可知室温下负温度系数为  $-1.5 \text{ mV/K}$ , 式(3)得到正温度系数为  $+0.087 \text{ mV/K}$ , 因此通过系数调整可以得到零温度系数输出。

### 3.2 系统及模块设计

针对带隙基准源,系统模块设计如图2所示。其中核心电路是最重要的组成部分,其次是采用电流镜实现电流值的镜像。除此之外,考虑到电路零点问题,还需要设计启动电路。以上是本文第一个基本带隙基准源电路,在第二个设计案例中增加了高增益的集成运放器,以实现两个核心电路两个端口的电压相等,并提高电源抑制比(power supply rejection ratio, PSRR)性能。通过这两个案例让学生更好地掌握 BGR 设计思想和方法。



图2 系统模块设计图

#### 3.2.1 带隙基准源设计一

本小节主要讨论设计一的原理图和版图,如图3所示。设计一模块包括:启动电路、电流镜像和核心电路。

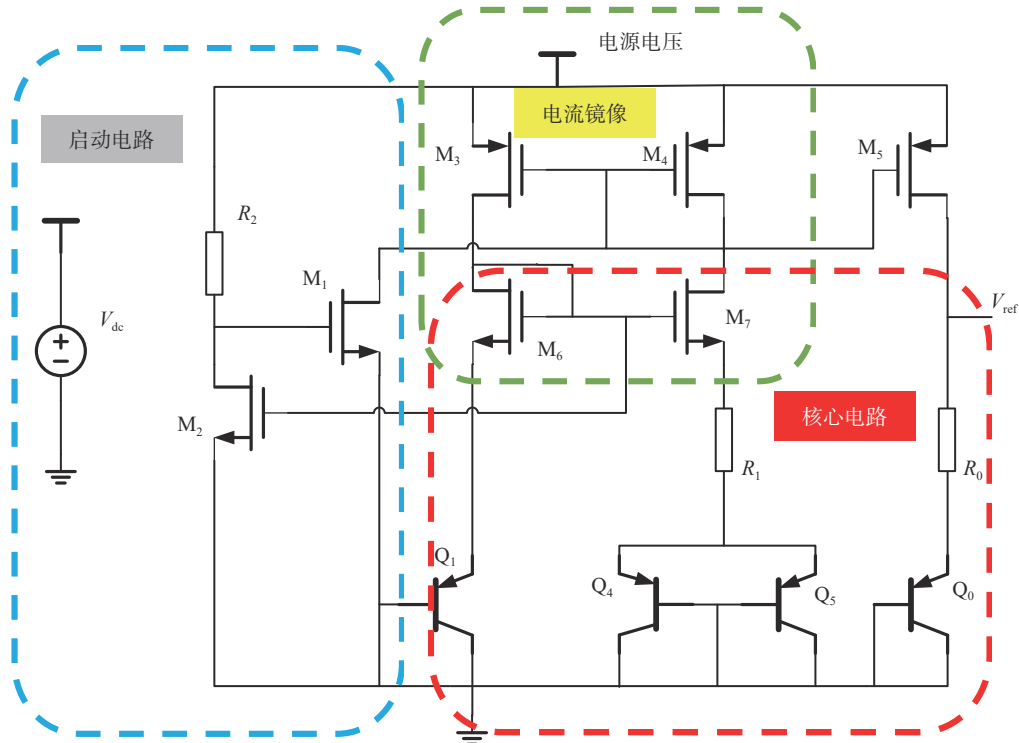
启动电路由 MOS 管 (metal-oxide-semiconductor)  $M_1$ 、 $M_2$  和电阻  $R_2$  组成。 $M_1$  的功能是,当电路开启时,电流镜像电路和核心电路的 MOS 管都处于截止状态,通过  $M_1$  栅极高电压可以实现电流镜像和核心电路的开启。同时,通过  $R_2$  和  $M_2$  实现对电源电压  $V_{\text{DD}}$  的分压,从而实现当核心电路截止时,  $M_1$  截止,  $M_2$  导通开启电路。当电路开启后,由于  $R_2$  大电阻分压,使得  $M_2$  截止。

电流镜像电路包括两组 NMOS (N-channel metal oxide semiconductor) 和 PMOS (P-channel

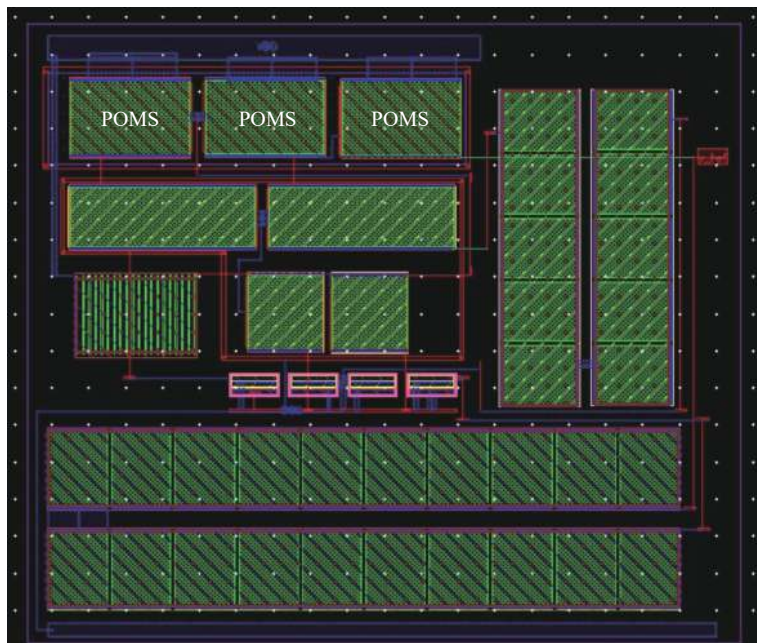
metal oxide semiconductor) 的电流镜, 并增加电阻  $R_1$  实现电流大小的控制。

核心电路包括由  $Q_1$ 、 $Q_4$  和  $Q_5$  构成的正温度系数部分。通过电流大小造成的压差控制在电阻

$R_1$  两侧, 从而形成 PTAT 电流。负温度系数利用二极管的正温度特性实现。通过电流镜像电路将正温度系数电流引入电阻  $R_0$ , 从而使得输出电压  $V_{ref}$  实现零温度系数输出。



(a) 原理图



(b) 版图

图 3 带隙基准源设计一

设计一的仿真结果如图 4 所示。首先是温度特性仿真, 图 4(a) 表示电源输出电压在温度范围

-40~85 °C 内的变化。电压范围为 13 mV, 相对温度系数为 104 ppm/°C, 温度特性相对较好。在瞬

态仿真图4(b)中,电路在100 μs后即可稳定输出,其开启速度相对较快。在交流特性仿真图4(c)中, $Y_0$ 为电源抑制比,带隙基准源的工作带宽为100 Hz~10 MHz,具有一定的电源抑制比。在

1 kHz时,抑制比为-20.46 dB;在4.189 MHz时达到-32.26 dB。在功耗仿真图4(d)中,可以看到电压源输出电流稳定在61.26 μA,因此功耗为0.2 mW。

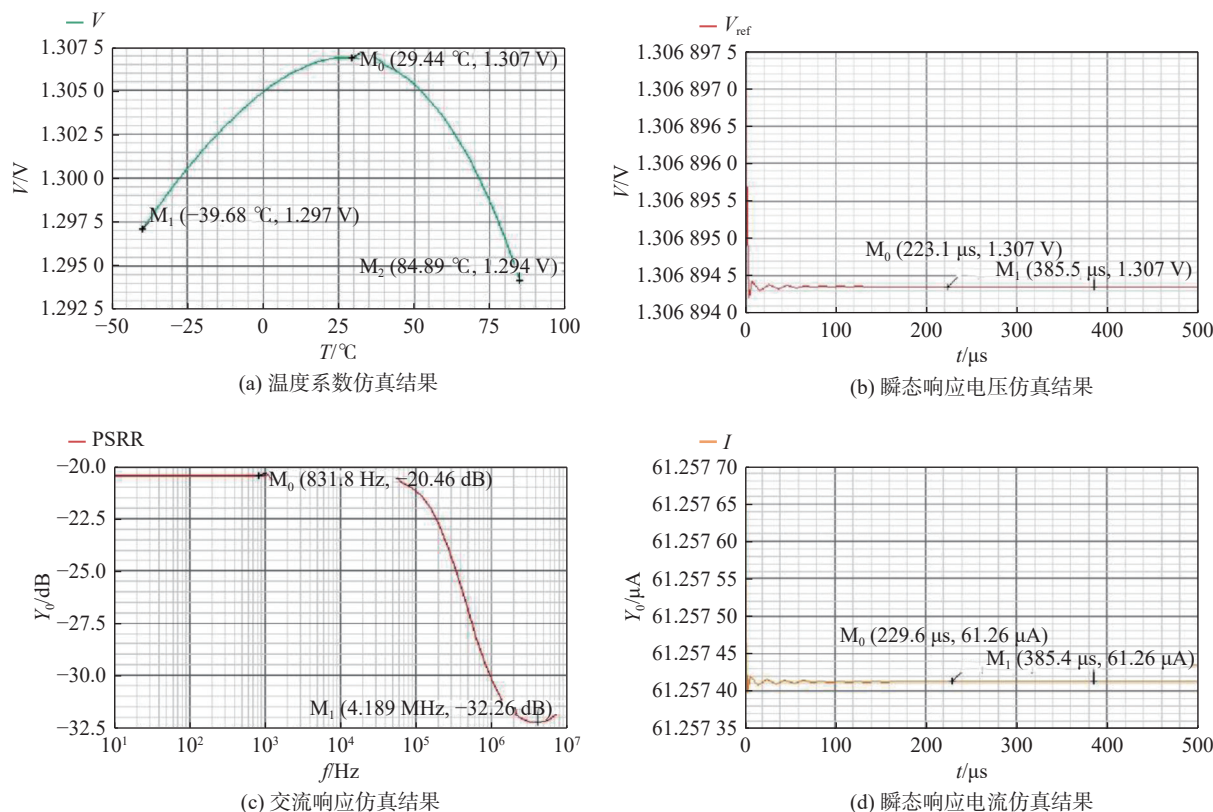


图4 带隙基准源设计一仿真结果

### 3.2.2 带隙基准源设计二

在方案二中,设计需要考虑到电源、零温度系数核心电路、启动模块、集成运算放大器和输出模块<sup>[13]</sup>。首先,使用3.3 V的直流电源;其次,为了实现零温度系数电路,利用二极管的负温度特性和PNP管子的帮助来得到所需的负温度系数部分。同时,为了得到正温度系数部分,采用两个不同电流密度的双极型晶体管并使它们的BE节电压差值与绝对温度成正比。然后需要设计启动模块,以防止电路无法正常工作。接着,我们采用折叠式共源共栅放大器作为运算放大器,并利用PMOS差分对作为输入,以减少闪烁噪声并降低低频噪声。同时,PMOS也能提高电压余度并启动运算放大器。尾电流源使用电流镜以提供精确电流,同时为了提高电路的PSRR,引入了共源共栅结构<sup>[14]</sup>。最后,输出模块通过米勒补偿电容进行输出。通过以上设计,得到了原理图和版图,如图5所示。

基准源输出电压随环境温度在-40~85 °C 间的变化情况如图6(a)所示。最低点为1.209 942 V,最高点为1.210 916 V,相对温度系数为6.44 ppm/°C,说明所设计的带隙基准电压源具有良好的温度特性(temperature characteristic, TC)。计算式为:

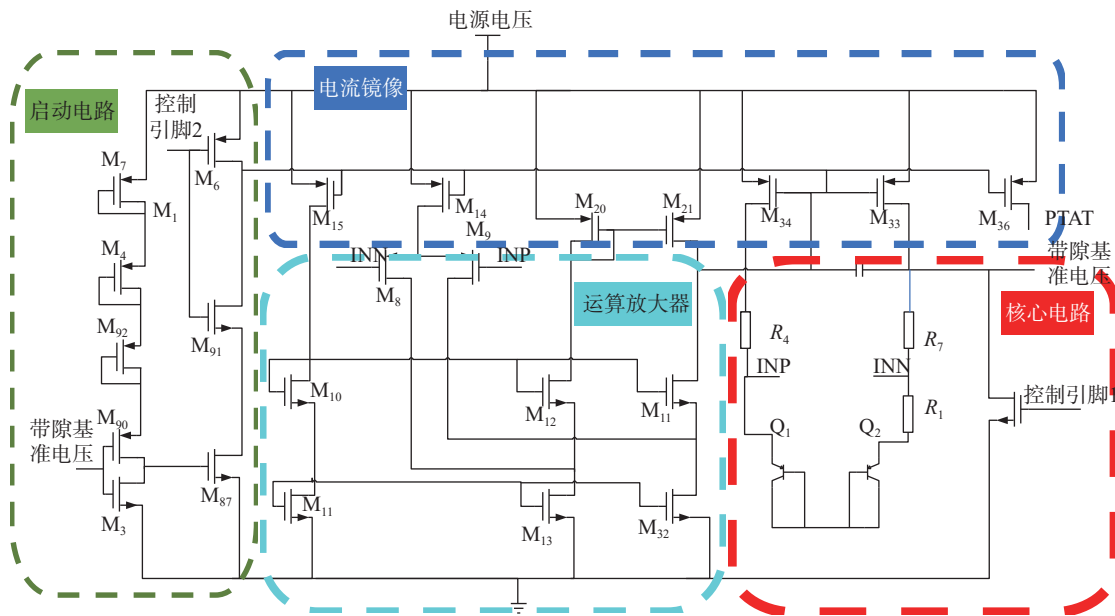
$$TC = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\text{average}(V_{\text{ref}}) \times \Delta T} \times 10^6 \quad (4)$$

瞬态时域仿真结果如图6(b)所示,表明基准源能在一定启动时间后进入稳定状态,并输出1.214 V的值。带隙基准源电源抑制比仿真结果如图6(c)所示。当输入电压中含有1 V的交流信号时,基准源的输出在10 Hz到10 MHz频率范围内,整体抑制效果可以达到-10 dB以下。PSRR在频率为10 Hz时达到-90.25 dB,在963 kHz左右时约为-50.7 dB,而在1.024 MHz时为-18.19 dB。计算式为:

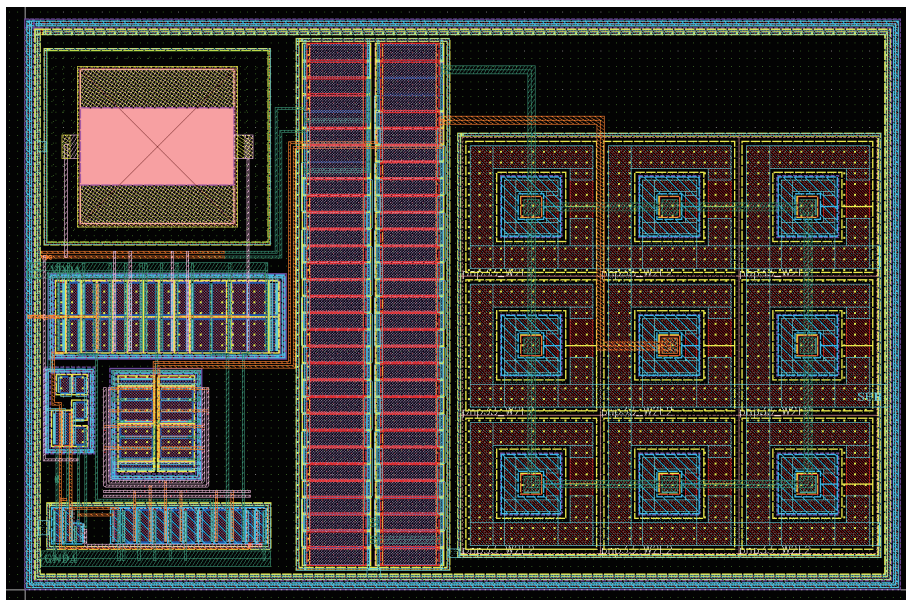
$$PSRR = 20 \lg \frac{\Delta V_{\text{ref}}}{\Delta V_{\text{DD}}} \quad (5)$$

图 6(d)为功耗电流仿真结果,表明基准源在空载情况下的输出电流约为 30  $\mu\text{A}$ ,总功耗约为

0.09 mW 左右。这说明,相对于设计一,设计二的电路功耗更低。



(a) 原理图



(b) 版图

图 5 带隙基准源设计二

### 3.3 设计优点

相较于传统的模拟集成电路实验教学方法,本文提出的基于 BGR 芯片设计的新范式具有明显的优势,其优势可以从以下多个角度进行分析。

#### 1) 实践与理论结合

学生能够将理论与实践相结合,加深对实验原理的理解,提高实际能力和创新意识。

#### 2) 软件工具的运用

引入 Cadence 仿真软件,提供更灵活的设计环境,降低成本和设备限制,增强学生对电路设计工具的熟练度。

#### 3) 基于实际产业需求

教学方法与电子信息产业需求密切相关,帮助学生更好地适应未来工作环境,提高就业竞争力。

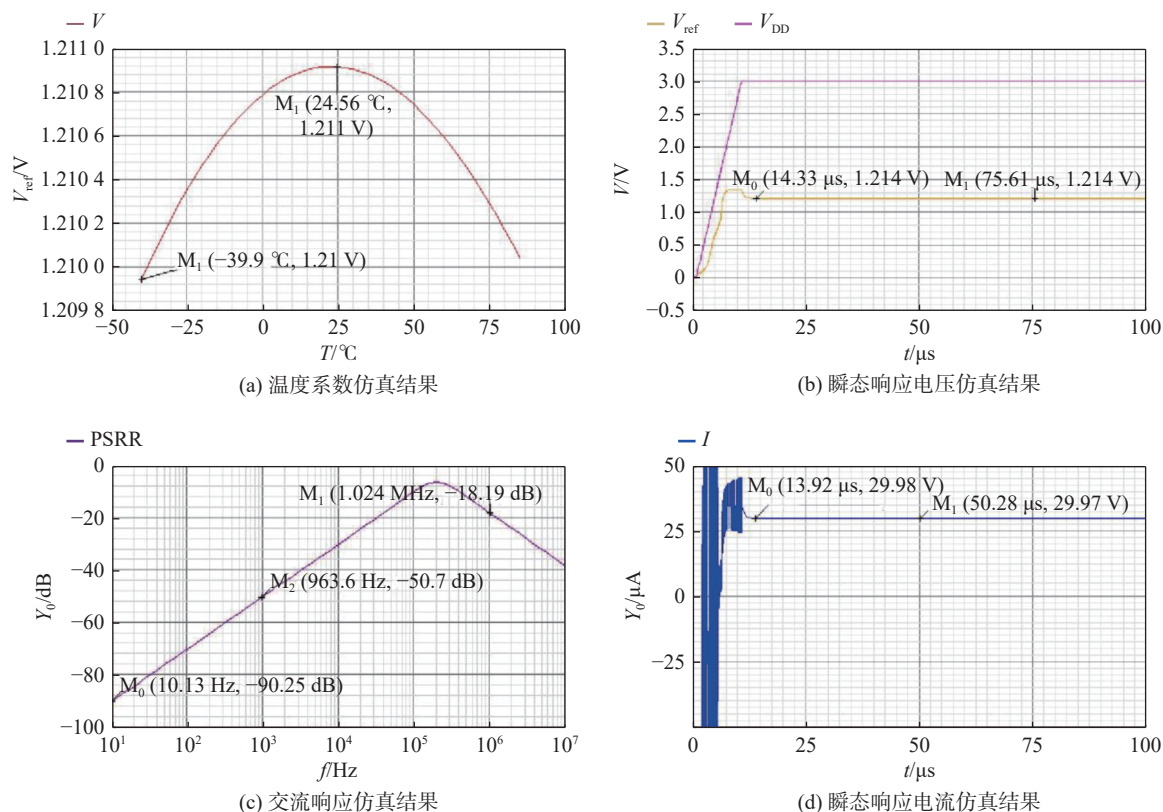


图6 带隙基准源设计二仿真结果

## 4 结束语

本实践项目首先对国内外关于带隙基准源设计的研究现状进行了调研分析。与现有模拟集成电路课程设计教学改革研究<sup>[15-16]</sup>相比,提出了更加详细的教学方案设计和理念,给出具体的实操步骤和仿真结果,以BGR带隙基准源为例,我们提出了两种设计方案,并通过培养学生掌握设计方法和工具,利用Cadence仿真软件提高他们的芯片设计能力。

## 参考文献

- [1] 程铁栋,刘志福,郭建平.一种模数混合型的设计[J].电子元件与材料,2022,41(5):545-550.
- [2] 王宇星.高精度低噪声的低压差线性稳压器设计[J].半导体技术,2020,45(5):345-351.
- [3] 刘慧敏,姜训勇,苏林等.“三维度虚实结合”的集成电路专业实践教学研究[J].实验室研究与探索,2022,41(3):193-197.
- [4] 程思璐,徐江涛,高静,等.新工科背景下集成电路综合性实践课程教学探究[J].实验室科学,2023,26(1):236-240.
- [5] 刘海涛,唐枋,甘平,等.“模拟集成电路”课程实验教学改革与实践[J].教育教学论坛,2022,563(12):67-70.
- [6] 赵利容,施钢,曾珍.以培养和提高学生自主学习和思

考能力为教学目标的实验教学设计[J].实验科学与技术,2022,20(6):60-64.

- [7] 李敏,廖冬梅,翟显,等.基于项目式教学的工程训练课程改革[J].实验科学与技术,2022,20(3):127-131.
- [8] 吴琦,胡注娇,向旭,等.一种用于无线能量传输设备的高电源抑制比设计[J].复旦学报(自然科学版),2019,58(6):719-726.
- [9] 邹锐恒,邝建军,熊进,等.一种快速瞬态响应的低压差线性稳压器设计[J].微电子学,2022,52(6):1009-1015.
- [10] 王志强,左国才,陈新保,等.科研成果转化为课程实验教学资源的研究与实践:以空间分析课堂实验教学改革为例[J].当代教育理论与实践,2019,11(6):108-112.
- [11] RAZAVI B. Design of analog CMOS integrated circuits[M].北京:清华大学出版社有限公司,2005.
- [12] 沈文正.Bi-CMOS技术进展(上)[J].微电子学,1988,18(4):25-35.
- [13] 王熠炜,孙江,叶文霞,等.一种高输入电压高的带隙基准电路设计[J].微电子学,2022,52(4):566-571.
- [14] 王嘉奇,吕高崇,郭裕顺.一种折叠式共源共栅运算放大器的准确设计方法[J].电子科技,2023,36(3):50-54.
- [15] 李蕾,南敬昌,李国金.模拟集成电路设计课程改革研究[J].实验科学与技术,2017,15(1):107-109.
- [16] 李卫,方玉明,郭宇锋,等.集成电路系列课程虚拟仿真实验教学研究[J].实验科学与技术,2017,15(2):74-76.

编辑 张俊