光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021072904

# 基于 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺的 25 Gb/s 宽带可变增益放大器

曹庆珊，郑吴家锐，李　硕，何　进*

（武汉大学 物理科学与技术学院，武汉 430072）

**摘　要：** 介绍了一种基于 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺的，可应用于高速通信的 25 Gb/s 可变增益放大器（VGA）。该放大器由核心电路、输出缓冲器和偏置电路组成，核心电路采用改进型 Gilbert 结构，增大了电路的增益动态范围；同时采用电感峰化技术克服大寄生电容来实现宽带特性。后仿真结果表明，该可变增益放大器的最大增益为 20.15 dB，－3 dB 带宽（BW）为 26.8 GHz，可支持高达 25 Gb/s 的数据速率，在 3.3 V 电源电压下的功耗为 26.4 mW，芯片大小为 1 120 μm×1 167 μm。

**关键词：** 可变增益放大器；BiCMOS；改进型 Gilbert 结构；电感峰化；高速通信

**中图分类号：** TN433　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0799－04

## A 25 Gb/s Wideband Variable Gain Amplifier Based on 0.18 μm BiCMOS Process

CAO Qingshan，ZHENGWU Jiarui，LI Shuo，HE Jin

（School of Physics and Technology，Wuhan University，Wuhan 430072，CHN）

**Abstract：** A 25 Gb/s variable-gain amplifier（VGA）based on 0.18 μm SiGe BiCMOS process was introduced for high-speed communications. The proposed VGA consists of a VGA core，an output buffer and a bias circuit. The core circuit of the VGA adopts an improved Gilbert structure to increase the gain dynamic range of the circuit. Meanwhile，the VGA achieves the broadband characteristic by utilizing inductive peaking technique to overcome the large parasitic capacitances. The post-simulation results show that the VGA exhibits a maximum gain of 20.15 dB and a －3 dB bandwidth（BW）of 26.8 GHz，which can support a data rate up to 25 Gb/s. The VGA consumes a power of 26.4 mW from 3.3 V supply voltage and occupied an area of 1 120 μm×1 167 μm.

**Key words：** VGA；BiCMOS；improved Gilbert structure；inductance peaking；high-speed communication

## 0　引言

随着无线通信、光通信技术的持续高速发展，新的通信技术不断出现，通信速率不断提高[1]。与此同时，电路的处理频率不断上升，带宽逐渐增加。在无线通信中，无线电信号受到信号衰减、传输损耗以及环境等复杂因素的影响，接收机所接收到的信号强度并不稳定，通常采用自动增益控制环路（AGC）来调整增益并将稳定的信号传输给基带电路。可变增益放大器（VGA）是 AGC 中实现可变增益的关键模块[2]，其主要作用是改变接收机增益和调节信号动态范围。在通信过程中处理模拟信号时，VGA 可以实现输入信号的放大和衰减，通过改变控制信号，可以调节 VGA 的增益。因此研究 VGA 有助于在无线通信系统中实现稳定的信号传输。

目前，对于可变增益放大器的研究大多都在中低频段[3-7]，对应用于高频的 VGA 研究较少，因此

**收稿日期：**2021－07－29.

**基金项目：**国家自然科学基金项目（61774113，61874079，62074116，81971702）.

* **通信作者：**何　进

研究高频段的 VGA 具有重要意义。本文基于 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺，采用改进型 Gilbert 结构设计了一款应用于高频段的 25 Gb/s 可变增益放大器，介绍了该可变增益放大器的整体架构、版图设计和仿真结果。

## 1 可变增益放大器整体架构

本文提出的可变增益放大器包括核心电路、缓冲输出器和偏置电源，整体结构框架如图 1 所示。$V_C$ 和 $V_{CB}$ 的电压差即 $V_{ctrl}$ 用于控制增益，工作电流由偏置电源提供。核心电路的信号经射极跟随器输出，实现信号的直流电压转换。

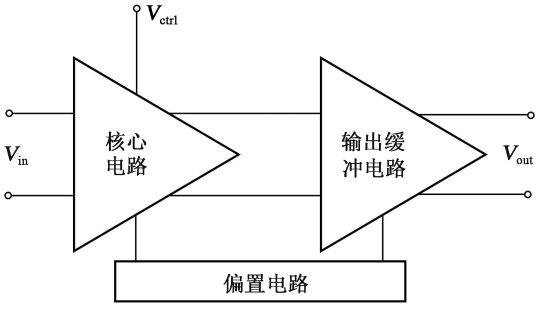



图 1 电路整体结构框图

## 2 可变增益放大器设计

### 2.1 改进型 Gilbert 单元

改进型 Gilbert 单元拓展了整体电路增益的动态范围，提高了电路的线性度[8]，此结构通过改变流经负载的电流大小实现增益变化，实质是通过改变等效跨导来改变增益。如图 2 所示，设计中采用带有射极负反馈电阻的共射放大器，完成输入电压到输入电流的转换。

核心电路分为三部分：放大级、增益控制级和负载。放大级由晶体管 $Q_5$，$Q_6$，电阻 $R_{E1}$，电容 $C_{E1}$ 和电流源组成，输入信号 $V_{in}$ 经过 $Q_5$ 和 $Q_6$ 转化为电流信号，电阻 $R_{E1}$ 和电容 $C_{E1}$ 构成电容简并结构，引入高频零点 $1/\pi R_{E1}C_{E1}$，可以实现增益峰化从而提升电路带宽。工作电流为 $I_{EE1}$，由镜像电流源提供。

第二级是增益控制级，由晶体管 $Q_1 \sim Q_4$ 组成，通过改变电路的等效跨导实现可变增益，控制信号为 $V_C - V_{CB}$。通过改变 $V_C - V_{CB}$ 的大小，可以改变电流在增益控制级各支路的分配比例。需要高增益时，提高 $V_C - V_{CB}$，以使更多的电流流向负载，提高电路增益；需要低增益时，则减小 $V_C - V_{CB}$，减少流向负载的电流，降低电路的增益。流经负载的电流占总电流的比例，即电流分配比，可以大致表示为[9]

$$A = \frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{m2}} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{V_{CB} - V_C}{V_T}\right)} \tag{1}$$

其中，$g_{m1}$ 为 $Q_3$ 和 $Q_4$ 的跨导，$g_{m2}$ 为 $Q_5$ 和 $Q_6$ 的跨导，$V_T = kT/q$ 为晶体管的热电压。从式(1)中可以看出，$(V_{CB} - V_C)$ 越大，VGA 的放大系数越大，增益也就越高。

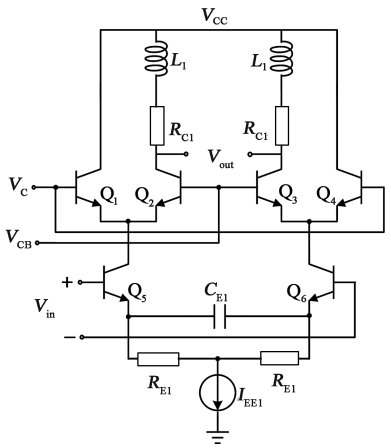



图 2 基于改进型 Gilbert 单元的核心电路

电路的负载为电阻 $R_{C1}$ 和电感 $L_1$，采用了并联电感峰化技术。图 3 为并联电感峰化电路的等效小信号模型示意图。

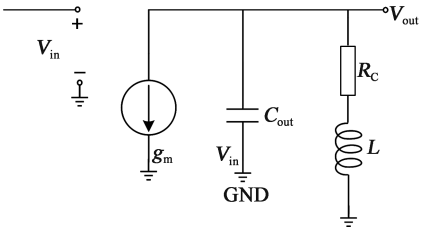



图 3 并联电感峰化电路小信号模型示意图

等效阻抗可以表示为[10-11]

$$Z_T(s) = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{sC_{out}}(R_C + sL) = \frac{R_C + sL}{1 + sR_CC_{out} + s^2LC_{out}} \tag{2}$$

可以看出，通过选取合适的电感与负载电容产生谐振，能够拓展带宽、均衡 VGA 的衰减。

### 2.2 输出缓冲器设计

如图 4 所示，输出缓冲器采用传统的共射极差分结构。$Q_1$ 和 $Q_2$ 晶体管主要作用为驱动大电流，来保证差分输出电压的摆幅。负载电阻 $R_{C2}$ 的阻值为 50 Ω，其作用为阻抗匹配。电流源 $I_{EE2}$ 采用镜像电流源的结构，为差分电路提供大电流来保证并提

高对后端电路的驱动能力。电容 $C_{E2}$ 跨接在差分电路之间，与电阻 $R_{E2}$ 并联引入零点来提高整体电路的带宽。缓冲器提供 0 dB 的增益，这里同样使用电感峰化技术来提高较高频率处的带宽，以均衡 VGA 的衰减。

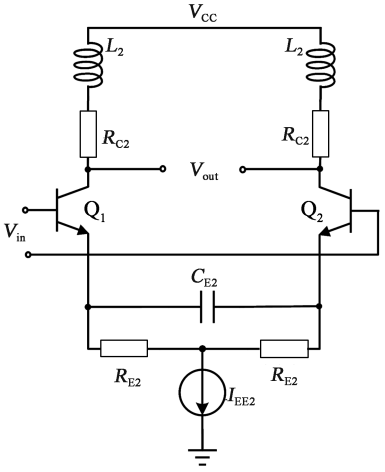



图 4　输出缓冲器电路

### 2.3　偏置电路设计

核心电路和输出缓冲器由镜像偏置电路[12]提供偏置电流，两者采用了相同的结构。图 5 为偏置电路的电路图，晶体管 $Q_1$ 和 $Q_2$ 通过选取合适的参数来提供电路所需电流，核心电路的偏置电流为 10 mA，输出缓冲器的偏置电流镜为 8 mA。

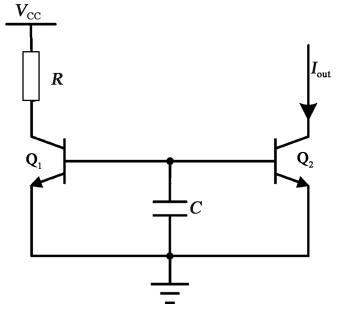



图 5　镜像偏置电路的电路图

## 3　版图设计和仿真结果

本次设计采用 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺，版图如图 6 所示。版图左侧为输入焊盘 In1 和 In2，右侧为输出焊盘 Out1 和 Out2，上下两侧的焊盘为供电电源 $V_{CC}$ 和控制电压 $V_C$，$V_{CB}$。版图中央为电路的主通道，采用完全对称的结构，从左到右依次为核心电路和输出缓冲器。在输出端，为了补偿输出晶体管的电容和焊盘电容引起的退化，通过串联电感来改善高频匹配[13]。设计时，在空余区域铺设大量滤波电容来达到对电源滤波的效果。包括所有焊盘在内，版图尺寸为 1 167 μm×1 120 μm。

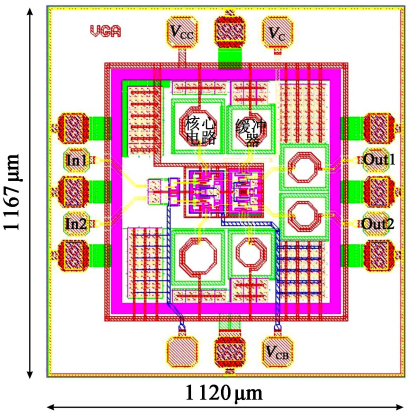



图 6　电路的版图

供电电压 $V_{CC}$ 为 3.3 V，设控制电压差（$V_C-V_{CB}$）为 $V_{ctrl}$。当 $V_{ctrl}=0.25$ V 时，低频增益为 20.15 dB，带宽为 26.9 GHz，仿真结果如图 7 所示。图 8 为在不同控制电压 $V_{ctrl}$ 下电路的幅频特性曲线，$V_{ctrl}$ 从 −0.2 V 变化到 0.3 V，各个控制电压的间隔为 0.05 V，由图可见，在有效控制电压的变化范围内，增益约从 −8.8 dB 变化到 19.9 dB，增益动态范围为 28.7 dB，带宽稳定。这表明该放大器可以满足 25 Gbit/s 速率的光通信需求。

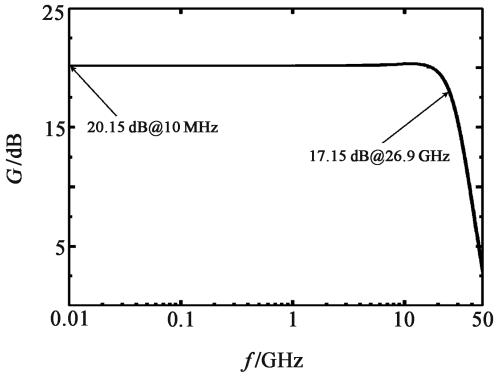



图 7　交流仿真曲线

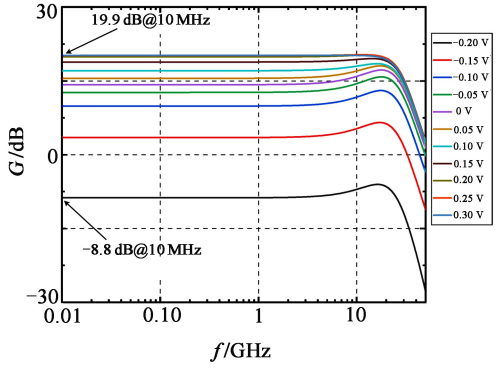
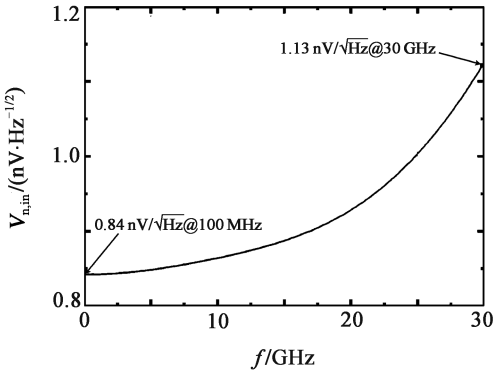
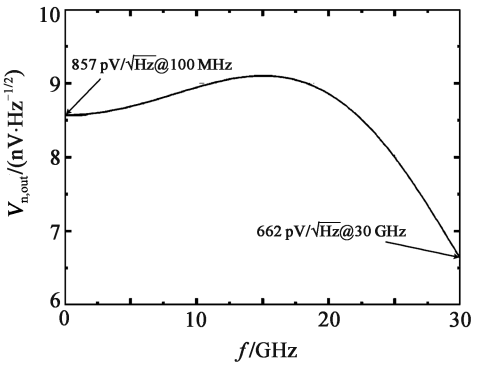



图 8　不同控制电压下的幅频特性曲线

图 9(a)为电路在最大增益时的等效输入噪声仿真曲线，可以看出，在低频处，电路的输入电压噪声为 $V_{n,in}=0.84\ nV/\sqrt{Hz}$；在高频处，电路的输入电压噪声为 $V_{n,in}=1.13\ nV/\sqrt{Hz}$。图 9(b)为在最大增益时的等效电路输出噪声仿真曲线，可以看出，在低频处，电路的输出电压噪声为 $V_{n,out}=857\ nV/\sqrt{Hz}$；在高频处，电路的输出电压噪声为 $V_{n,out}=662\ nV/\sqrt{Hz}$。




(a) 输入噪声曲线




(b) 输出噪声曲线

图 9 输入和输出噪声曲线

瞬态仿真的效果能反映噪声以及码间串扰给电路带来的影响并最终以眼图的形式展现出来。眼图“眼睛”的大小反映码间串扰的强弱，其幅度越大，越端正，则表示码间串扰越小；反之表示码间串扰越大。通常在信号传输时，噪声将叠加在信号上一同传输，如果噪声较大，则观察到眼图的线迹会变得模糊不清。眼图仿真时输入信号为一伪随机信号发生器，其频率为 25 GHz，高低电平分别为 15 和 −15 mV。25 Gbit/s 传输速率下的输出眼图如图 10 所示。通过图 10 可以看出，输出摆幅为 350 mV，且此时的图线清晰度尚可，眼图张开度良好，串扰和抖动均较小，满足设计要求。

该可变增益放大器与其他同类设计的性能比较如表 1 所示，可以看出本设计的各项指标均达到设计要求。

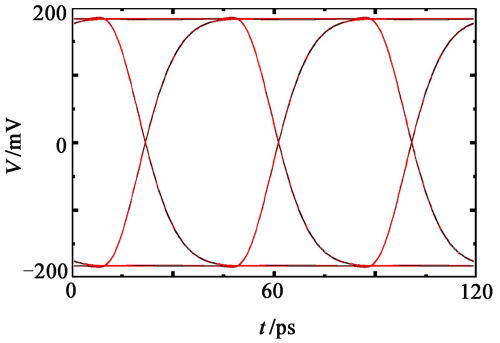



图 10 输出眼图

**表 1 本文与其他文献设计方案的参数对比**

| 参数 | 文献[14] | 文献[15] | 本文 |
|---|---|---|---|
| 工艺制程 | 0.13 μm CMOS | 0.13 μm BiCMOS | 0.18 μm BiCMOS |
| 增益/dB | 40 | 27.97 | 20.15 |
| 速率/(Gbit·s$^{-1}$) | 10 | 25 | 25 |
| 带宽/GHz | 0～5 | 1～25.5 | 0.01～26.9 |
| 输入噪声/Hz | / | / | 1.13 |
| 功耗/mW | 50 | 300 | 26.4 |

## 4 总结

本文设计了一款 25 Gb/s 可变增益放大器，仿真结果表明，该可变增益放大器的最大增益为 20.15 dB，−3 dB 带宽为 26.9 GHz，在 3.3 V 电源电压下的功耗为 26.4 mW，芯片大小为 1 120 μm×1 167 μm。各指标符合设计要求，可以支持高达 25 Gb/s 的数据速率。

**参考文献：**

[1] Lin S H. A 0.18 μm CMOS 2.5 Gbps pre-amplifier with AGC [C]// Proc. of 2011 9th IEEE Inter. Conf. on ASIC, 2011: 1042-1045.

[2] 汤 滟. 高性能可变增益放大器(VGA)设计探讨[J]. 山西电子技术, 2010(4): 89-90.
Tang Y. Discussion on the design of high performance variable gain amplifier (VGA)[J]. Shanxi Electronic Technology, 2010 (4): 89-90.

[3] Thangarasu B K, Ma K, Yeo K S. A 0.029 mm$^2$ 8 Gbit/s current-mode AGC amplifier with reconfigurable closed-loop control in 65 nm CMOS[C]// Proc. of 2017 IEEE MTT-S Inter. Microwave Symp. (IMS), 2017: 107-110.

[4] Liu C, Yan Y, Goh W, et al. A 5 Gb/s automatic gain control amplifier with temperature compensation [J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2012, 47(6): 1323-1333.

(下转第 808 页)

[5] Sun X Y, Zheng L R, Li X N, et al. Origin of strain-induced resonances in flexible terahertz metamaterials [J]. Chin. Phys. B, 2016, 25(5): 057802.

[6] Fan K, Padilla W J. Dynamic electromagnetic metamaterials [J]. Mater. Today, 2015, 18(1): 39-50.

[7] Hashemi M R, Cakmakyapan S, Jarrahi M. Reconfigurable metamaterials for terahertz wave manipulation [J]. Rep. Prog. Phys., 2017, 80(9): 094501.

[8] Nagel M, Richter F, Haring-Bolivar P, et al. A functionalized THz sensor for marker-free DNA analysis[J]. Phys. Med. Biol., 2003, 48(22): 3625.

[9] Kaliteevski M A, Brand S, Garvie-Cook J, et al. Terahertz filter based on refractive properties of metallic photonic crystal [J]. Opt. Express, 2008, 16(10): 7330-7335.

[10] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. Nature, 2006, 444(7119): 597-600.

[11] Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. Science, 2004, 303(5663): 1494-1496.

[12] Miyamaru F, Hattori K, Shiraga K, et al. Highly sensitive terahertz sensing of glycerol-water mixtures with metamaterials [J]. J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, 2014, 35(2): 198-207.

[13] Park S J, Cha S H, Shin G A, et al. Sensing viruses using terahertz nano-gap metamaterials [J]. Biomed. Opt. Express, 2017, 8(8): 3551-3558.

[14] Shawky N, Adnan Taha S A, Altan H, et al. Single-and double-sided sensor applications of metamaterials based on square-ring and diamond resonators for terahertz region[J]. Mod. Phys. Lett., 2017, 31(8): 1750072.

[15] Liu J J, Fan L L, Ku J F, et al. Absorber: a novel terahertz sensor in the application of substance identification[J]. Opt. Quantum Electron., 2016, 48(2): 80.

[16] Driscoll T, Andreev G O, Basov D N, et al. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(6): 062511.

[17] 张克潜. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 298.
Zhang K Q. Electromagnetic Theory for Microwave and Optoelectronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 298.

## 作者简介:

**潘　武**(1966—),男,四川省大英县人,教授,主要从事太赫兹技术、超介质材料及应用研究;

**肖惠云**(1996—),女,湖南省衡阳市人,研究生,研究方向为太赫兹传感器、太赫兹光谱。

(上接第 802 页)

[5] Pan H, Larson L E. A linear-in-dB SiGe HBT wideband high dynamic range RF envelope detector[C]// Proc. of Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2010: 267-270.

[6] Wang I H, Liu S I. A 0.18 μm CMOS 1.25 Gbps automatic-gain-control amplifier [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems Ⅱ, 2008, 55(2): 136-140.

[7] Hui X, Feng J. A 1.25 Gb/s high gain, wide dynamic range pre-amplifier in 0.35 &. #x00BH5; m CMOS[C]// Proc. of Inter. Conf. on Electric Information and Control Engin., 2011: 965-968.

[8] 王自强, 池保勇, 王志华. CMOS 可变增益放大器设计概述[J]. 微电子学, 2005, 35(6): 612-617.
Wang Z Q, Chi B Y, Wang Z H. Overview of CMOS variable gain amplifier design[J]. Microelectronics, 2005, 35(6): 612-617.

[9] Meyer R G, Mack W D. Monolithic AGC loop for a 160 Mb/s transimpedance amplifier[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 1996, 31(9): 1331-1335.

[10] Liao C F, Liu S I. A 40 Gb/s transimpedance-AGC amplifier with 19 dB DR in 90 nm CMOS[C]// Proc. of IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf., 2007: 584-586.

[11] Kim J, Buckwalter J F. Bandwidth enhancement with low group-delay variation for a 40 Gb/s transimpedance amplifier [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems Ⅰ, 2010, 57(8): 1964-1972.

[12] 任美辉, 赵玉梅, 梁原华. 镜像电流源原理及其应用电路[J]. 电测与仪表, 2006, 43(4): 34-36.
Ren M H, Zhao Y M, Liang Y H. The principle of mirror current source and its application circuit [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(4): 34-36.

[13] Saint C, Saint J. IC Mask Design: Essential Layout Techniques[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[14] Ray S, Hella M M. A 10 Gb/s inductorless AGC amplifier with 40 dB linear variable gain control in 0.13 μm CMOS[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2016, 51(2): 440-456.

[15] Pang G, Chen Y, Xiao J, et al. A 25 Gb/s burst mode optical receiver front-end in 0.13 μm BiCMOS technology [C]// Proc. of 2020 IEEE 5th Inter. Conf. on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM), 2020: 77-80.

## 作者简介:

**曹庆珊**(1997—),女,云南人,硕士研究生,主要研究方向为模拟/射频集成电路;

**何　进**(1975—),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向包括射频毫米波集成电路与系统、高速光通信集成电路与系统。