光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.019

一种用于自由运转 SPAD 的高速淬灭电路设计

李云铎[1,2,3,4]，叶联华[1,2,4]，刘　煦[1,2,4]，黄松垒[1,2]，黄张成[1,2*]，龚海梅[1,2*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083；
3. 上海科技大学，上海 200100；4. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 针对标准 CMOS 工艺的单光子雪崩探测器（Single Photon Avalanche Detector，SPAD），设计了一种可用于自由运转模式的高速淬灭电路。为了实现淬灭电路的功能设计与精准仿真，根据实测的 SPAD 电流-电压曲线拟合得到了电流与电压间的多段式函数解析式，进一步建立了 SPAD 器件的 Verilog-A 行为级模型并与淬灭电路进行集成仿真与验证。淬灭电路采用基于电容感应的主被动淬灭结构，利用可变 MOS 电容的延迟电路实现了关断时间（Hold-off Time）的灵活调节。仿真结果表明，所设计淬灭电路的淬灭时间和恢复时间分别为 1.0 和 1.2 ns，关断时间调节范围为 1.02～3.55 μs，可以满足自由运转 CMOS SPAD 的应用需求。

关键词： SPAD；盖革模式；淬灭电路；自由运转

中图分类号： TN402　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0402－05

A High-Speed Quenching Circuit for Free-Running Single Photon Avalanche Detector

LI Yunduo[1,2,3,4], YE Lianhua[1,2,4], LIU Xu[1,2,4],
HUANG Songlei[1,2], HUANG Zhangcheng[1,2], GONG Haimei[1,2]

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 3. ShanghaiTech University, Shanghai 200100, CHN; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: In this paper, a fast quenching circuit is designed and simulated for free-running CMOS single photon avalanche diode (SPAD). In order to obtain more accurate simulation results, an enhanced SPAD simulation model is compiled using Verilog-A language, and *I-V* characteristic is expressed by three segmented functions. The fast quenching circuit is based on mixed passive-active quenching and capacitive sensing. A timing control circuit composed of the variable MOS capacitor is used to achieve hold-off time regulation. The simulation results show that the quenching time and reset time of the quenching circuit are 1.0 and 1.2 ns, respectively. The hold-off time can be varied in the range of 1.02～3.55 μs, which can meet the requirements of free-running CMOS SPAD detectors.

Key words: single-photon avalanche diode (SPAD); Geiger-mode; quenching circuit; free-running

0　引言

单光子探测在三维成像[1]、空间激光通信[2]以及生物荧光寿命成像[3]等方面都有重要的应用。相比光电倍增管、微通道板等传统的单光子探测器，单光子雪崩探测器（Single Photon Avalanche Detector，SPAD）具有体积小、便于集成、无需在真空下工作以及不易受磁场干扰等优点，已经成为一

收稿日期：2021－03－18.
基金项目：上海市自然科学基金项目(19ZR1465500).
* 通信作者：龚海梅，黄张成

类被广泛应用的单光子探测器件。为了具有单光子的灵敏度，SPAD 的反向偏压大于其自身的雪崩击穿电压。当光子被吸收并在雪崩倍增区内有载流子产生时，它们将会被倍增区内的高电场加速，碰撞晶格产生光生载流子对。这些载流子又会被重新加速产生新的电子-空穴对，使器件的电流迅速上升，若没有外界干预，雪崩电流将会持续存在直至损坏器件[4]。当存在雪崩电流时，探测器对后续到达的光子没有响应。因此，需要淬灭电路快速关闭 SPAD 的雪崩电流，以检测后续到达的光子，SPAD 在一段时间后被重新偏置于盖格模式，开始下一个探测周期。一般将关闭雪崩电流所需时间称为淬灭时间，将 SPAD 重新偏置于盖格模式的时间叫复位时间。完成淬灭到下一次将器件偏置在盖格模式之间的时间被称为“Hold-off 时间”[5]。

一般探测器探测时激光脉冲与面阵控制信号同步。当激光器发出激光脉冲后，SPAD 被淬灭电路偏置在盖格模式，器件收到回波信号并产生雪崩电流，淬灭电路将雪崩电流转换为电压信号传送给后端电路，后端电路对信号进行量化处理。然而对于空间激光通信，由于光子到达时间具有随机性，需要 SPAD 面阵中始终有像元处于工作状态。因此 SPAD 需要在自由运转模式下工作，探测器面阵中的每个像元应互相独立，当某个像元被触发后，通过淬灭电路将雪崩电流快速淬灭，并将光子到达信号传递给后续电路。经过一段 Hold-off 时间后，重新将像元偏置在探测状态。由于后脉冲效应的影响，雪崩过程中的载流子可能会被倍增区中的缺陷捕获。这些载流子的后续释放会导致 SPAD 的再次雪崩，引起后端电路的虚假计数，从而导致暗计数的增加[4]。为了优化探测器性能，可以通过缩短淬灭时间降低雪崩过程中流过器件的电荷量以及增加 SPAD 器件的 Hold-off 时间使被陷阱捕获的载流子完全释放两种方式来减小后脉冲对器件造成的影响。一个设计良好的淬灭电路可以有效地缩短 SPAD 的淬灭时间以减小 SPAD 的后脉冲效应。同时，增加 SPAD 的 Hold-off 时间使其大于平均陷阱寿命，也可以减小后脉冲造成的影响。然而由于工作在 Hold-off 时间内的像素无法探测光信号，导致当前探测器面阵中工作在探测状态下的像元减少，此外探测器的探测环境以及后端读出电路设计也对像元 Hold-off 时间有不同的要求。因此，探测器需要针对不同的工作环境以及器件特性来调整 Hold-off 时间。

本文针对标准 CMOS SPAD 器件，设计了一种用于自由空间异步激光通信的淬灭电路。为了精确仿真淬灭过程中电路的瞬态响应，根据对 SPAD 工作状态和电流特性的研究建立了用于电路仿真的器件模型。采用电容感应的主被动混合淬灭的方式优化淬灭时间，并利用逻辑电路与 MOS 可变电容实现 Hold-off 时间调节。

1　SPAD 器件与仿真模型设计

本文所用的 SPAD 结构如图 1 所示[6]，由于深亚微米 CMOS 工艺较高的掺杂浓度，导致 SPAD 的耗尽区变短，增加了由于隧道效应引起的暗计数。同时工艺中使用的浅沟道隔离还会引入新的陷阱能级，导致 DCR 的进一步恶化。与其他 SPAD 结构相比，得益于深 n 阱较低的掺杂浓度和掺杂浓度与深度成反比的特性，深 n 阱/p 阱 SPAD 具有较宽的耗尽区和较深的结深，从而可以大大降低暗计数[7]，因此本项目中选择该 SPAD 结构。

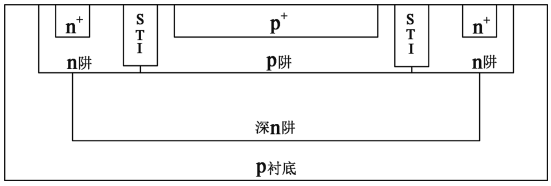


图 1　p 阱/深 n 阱 SPAD 结构图

在一个探测周期内，SPAD 需要淬灭电路调整偏压从而切换多个工作状态。典型的淬灭电路框图如图 2 所示，通过分析淬灭电路的基本框图，根据基尔霍夫电压定律可列：

$$\begin{cases} I_{\mathrm{C}}(V) = I_{\mathrm{SPAD}}(V) + I_{\mathrm{rst}} + I_{\mathrm{Q}} \\ I_{\mathrm{SPAD}}(t) = \dfrac{V_{\mathrm{bias}} - V_{\mathrm{sense}}(t)}{R_{\mathrm{d}}} \\ V_{\mathrm{sense}}(t) = \dfrac{1}{C_{\mathrm{p}}}\displaystyle\int_0^t I_{\mathrm{C}}(\tau)\mathrm{d}\tau \end{cases} \tag{1}$$

其中，I_{C} 为流过寄生电容的电流，I_{SPAD} 为流过 SPAD 的电流，I_{rst} 为流过传感/复位模块的电流，C_{p} 为 SPAD 阳极节点的寄生电容，V_{sense} 为 SPAD 阳极电压，τ 为积分变量，R_{d} 为器件的微分电阻，反映了器件自身的 I-V 特性。观察式(1)可以发现，器件自身的 I-V 特性对接口电路的时域响应非常重要，因此必须对器件的电学模型进行研究。由于在一个探测周期内，SPAD 电流随偏置电压剧烈变化，简单的等效电路难以精确表示器件的电学特性。

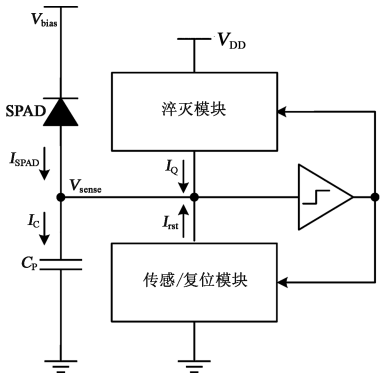
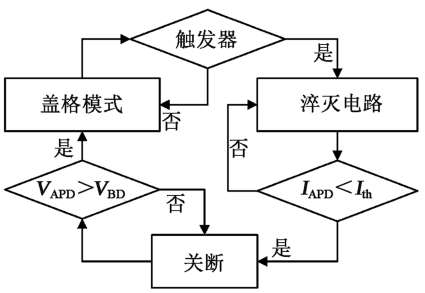


图 2 淬灭电路框图

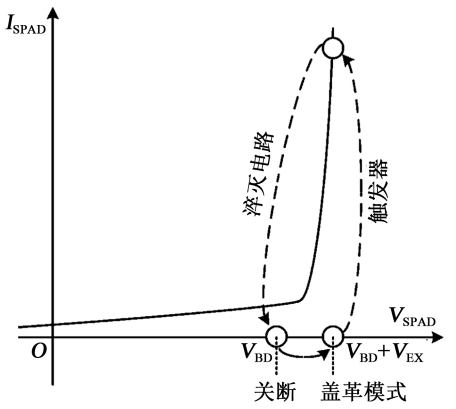
为了精确仿真淬灭电路的时域响应，必须建立 SPAD 的电学仿真模型，求解时域响应的数值解。SPAD 仿真模型不仅需要对 SPAD 的工作状态进行描述，还应包含器件自身的 I-V 特性，以便求解淬灭过程中器件两端电流电压的时域响应。一个探测周期中 SPAD 的转换图如图 3 所示。探测器首先工作在 Hold-off 状态，复位电路通过提高器件两端偏压将 SPAD 偏置在盖格模式。若此时探测器被触发，SPAD 器件进入淬灭状态，器件电流随两端偏置电压的减小而减小，当电流小于阈值 I_{th} 后器件被淬灭[5]。由于 SPAD 器件电流随过偏压变化剧烈，为了准确地表达 SPAD 器件的 I-V 特性，根据如图 4 所示的 SPAD 光电流曲线，将曲线分为三段，分别为 0～14 V，14～15.1 V 和 15.1～16 V，在图 4 中分别用①，②，③表示。假设它们的形式如式(2)所示：

$$\begin{cases} I_{1,SPAD}(V_B) = I_s, & 0 < V_B < 14\ \text{V} \\ I_{2,SPAD}(V_B) = a \cdot e^{b \cdot V_B}, & 14\ \text{V} \leqslant V_B < 15.1\ \text{V} \\ I_{3,SPAD}(V_B) = c \cdot e^{d \cdot V_B} + e \cdot V_B + f, & 15.1\ \text{V} \leqslant V_B < 16\ \text{V} \end{cases} \tag{2}$$

其中，I_s，a，b，c，d，e，f，g 均为常数，V_B 为 SPAD 两端的偏置电压。利用 SPAD 实测的 I-V 曲线和 Matlab 拟合工具可以直接得到 SPAD 模型的 I-V 曲线和表达式系数，分别如图 4 和表 1 所示。



(a) 工作流程图



(b) 状态转换图

图 3 SPAD 工作流程及光电流曲线图

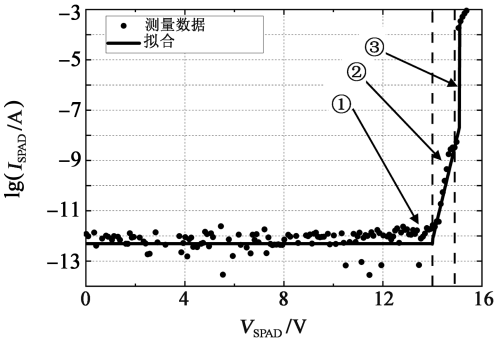


图 4 实测与拟合 SPAD 模型光电流曲线

表 1 SPAD 仿真模型参数

参数	数值
I_s/A	$4.918\,1\times10^{-13}$
a/s	2.089×10^{-70}
b	9.459
c/s	0.234 3
d	−0.241 7
e/s	4.031×10^{-2}
f/A	-6.673×10^{-2}

为了验证模型的功能，本文使用 Spectre 仿真环境，搭建被动淬灭电路，对 CMOS SPAD 被动淬灭电路的时域响应进行了仿真。被动淬灭是结构最简单的一种淬灭电路，它将 SPAD 的一端串连一个大电阻，利用电阻分压使 SPAD 两端电压减小，直至淬灭。一个典型的被动淬灭电路如图 5 所示[5]，其中 V_a 为 −14 V，V_r 为 3.3 V，淬灭电阻 R_Q 为 100 kΩ，SPAD 的寄生电容为 200 fF。SPAD 阴极节点电压电流的时域响应如图 6 所示。其中，Photon 信号电压 V_{photon} 超过 1.5 V 表示光子到达。雪崩开始后，雪崩电流迅速升高到某一峰值，随后雪崩电流随偏置电压的减小而减小，当电流减小到某一阈值 I_{th} 后，由于电流过小雪崩无法维持，器件被淬灭[5]。当 SPAD 被淬灭后，寄生电容 C_p 通过淬灭电阻 R_Q 放

电，SPAD 会被缓慢地重新偏置在盖格模式，由于 SPAD 淬灭往往需要较大的淬灭电阻，因此被动淬灭的复位时间一般较长。由图 6 可以看出，设计的仿真模型可以仿真 SPAD 淬灭过程中器件电压电流的时域响应，满足电路设计对 SPAD 仿真模型的要求。

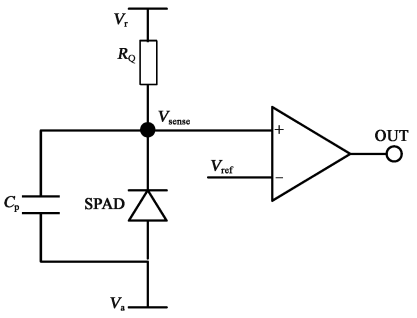


图 5　被动淬灭电路图

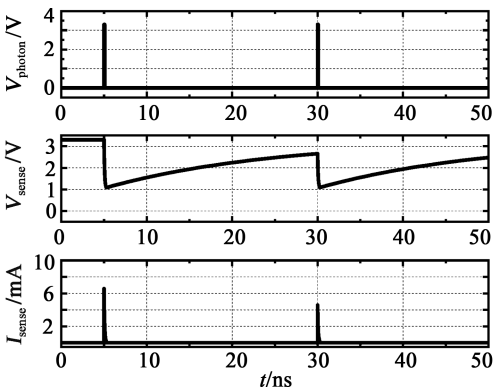


图 6　被动淬灭 SPAD 阳极电压、电流变化曲线

2　自由运转模式淬灭电路设计

本文设计的自由运转模式的淬灭电路如图 7 所示，为了避免被动淬灭电路复位时间较长的缺点，本电路采用电容感应主被动混合淬灭结构，主要由雪崩电流感应与鉴别电路、主动淬灭电路、电平转换电路，以及相关的时序生成电路组成。由外部信号 RESET 控制的 M2 最先开启，SPAD 被偏置在盖格模式。若此时 SPAD 受到激光或噪声触发，雪崩电流流入 SPAD 阳极寄生电容中，V_{sense} 被拉高。当它超过反相器 INV1 的阈值电压后，雪崩信号通过与门 OR2，将主动淬灭管 M4 打开，V_{sense} 电压被快速拉高至高电平，SPAD 被淬灭，淬灭过程中 SPAD 两端电流电压的时域响应如图 8 所示，可以得到电路的淬灭时间为 1.0 ns，复位时间为 1.2 ns。

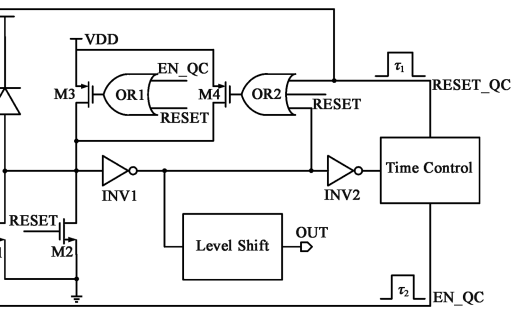
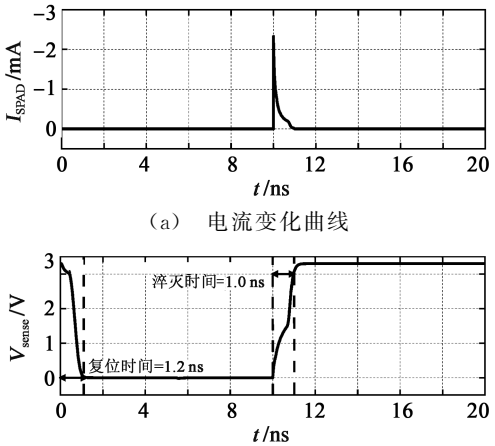


图 7　自由运转主被动淬灭电路



(a)　电流变化曲线

(b)　阳极电压变化曲线

图 8　淬灭和复位过程中 SPAD 的电流、电压时域响应

在 SPAD 被淬灭的同时，雪崩信号通过反相器传递给时序控制模块，时序控制模块的电路如图 9 所示。它的作用是每当 SPAD 被淬灭后生成两个低电平时间，分别为 τ_1 和 τ_2 的 RESET_QC 和 EN_QC 脉冲信号。当 EN_QC 为低电平时，无论 RESET_QC 为高或低电平，M1 关闭，M3 导通，感应节点电压为 V_{DD}，SPAD 处于 hold-off 状态，对光子没有响应。当 EN_QC 为高电平时，若 RESET_QC 为高电平，则 M1 导通。此时 SPAD 工作在复位状态。若 RESET_QC 恢复为低电平，SPAD 进入探测模式，等待光子到达。基于 SPAD 的仿真模型，自由运转淬灭电路关键节点的仿真结果如图 10 所示。其中 EN_QC 为低电平时，SPAD 处于 hold-off 状态。本文利用 MOS 可变电容以及三管反相器控制 Hold-off 时间，利用组合逻辑生成时序脉冲，Hold-off 时间可表示为

$$T_{\text{hold-off}} = \frac{3}{8} \cdot \ln 2 \cdot \frac{(C_{M7} \,//\, C_{M8}) \cdot V_{DD}}{\mu_n C_{ox} \cdot \dfrac{W_{M1}}{L_{M1}} \cdot (V_C - V_{th,M1})^2} \tag{3}$$

其中，C_{M7} 和 C_{M8} 为两个 MOS 可变电容，其电容值受外部信号 S0，S1 控制。W_{M1}/L_{M1}，μ_n，C_{ox}，V_C 和 $V_{th,M1}$ 分别为 M1 管的宽长比、载流子迁移率、栅极氧化层厚度、栅极电压和阈值电压。图 10 为淬灭电路关键节点电压的时域仿真曲线。其中 Photon 信号电

压 V_{photon} 超过 1.5 V 代表光子到达。由图 10 可知，V_{S0} 在 0～3.3 V 的变化过程中，Hold-off 时间从 3.55 μs 变化至 1.02 μs，实现了 Hold-off 时间可调的功能。

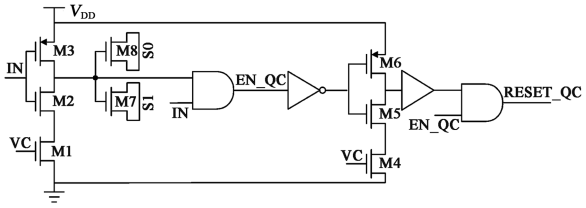


图 9 时序控制模块电路

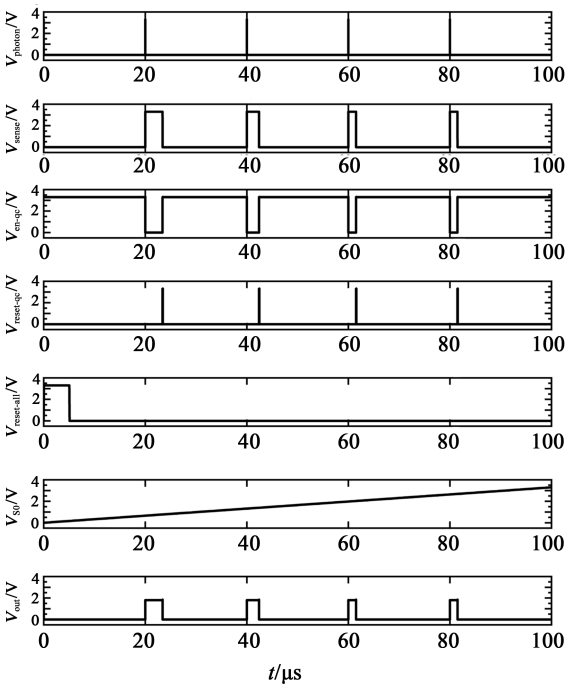


图 10 自由运转淬灭电路关键节点仿真结果

3 结论

本文针对标准 CMOS 工艺的 SPAD 器件，设计了一种可用于自由运转模式 SPAD 的高速淬灭电路。该电路利用反相器和 SPAD 结电容提取雪崩信号，通过主被动混合淬灭的方式减小淬灭时间。针对自由空间激光通信读出电路的需求，利用可变 MOS 电容以及组合电路实现了 Hold-off 时间的灵活调节。研究了基于实测 CMOS SPAD 的电流电压特性曲线，建立了用于电路仿真的 SPAD 电学模型，并基于该模型对电路进行仿真。仿真结果表明，本电路淬灭时间约为 1.0 ns，复位时间约为 1.2 ns，Hold-off 时间调节范围约为 1.02～3.55 μs，可以用于自由运转单光子探测器。

参考文献：

[1] Zhang Chao, Lindner S, Antolovic I M, et al. A 30 frames/s, 252×144 SPAD flash LiDAR with 1 728 dual-clock 48.8 ps TDCs, and pixel-wise integrated histogramming[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2018, 54(4): 1137-1151.

[2] Fisher E, Underwood I, Henderson R. A reconfigurable single photon counting integrating receiver for optical communications[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2013, 48(7): 1638-1650.

[3] Schwartz D E, Charbon E, Shepard K L. A single-photon avalanche diode array for fluorescence lifetime imaging microscopy[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2008, 43(11): 2546-2557.

[4] Cronin D, Morrison A P. Intelligent system for optimal hold-off time selection in an active quench and reset IC[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2007, 13(4): 911-918.

[5] Gallivanoni A, Rech I, Ghioni M. Progress in quenching circuits for single photon avalanche diodes[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2010, 57(6): 3815-3826.

[6] Faramarzpour N, Deen M J, Shirani S, et al. Fully integrated single photon avalanche diode detector in standard CMOS 0.18 μm technology[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2008, 55(3): 760-767.

[7] Richardson J A, Grant L A, Henderson R K. Low dark count single-photon avalanche diode structure compatible with standard nanometer scale CMOS technology [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(14): 1020-1022.

作者简介：

李云铎(1995－)，男，硕士研究生，主要研究方向为专用集成电路芯片设计；

黄张成(1985－)，男，副研究员，主要研究方向为专用集成电路芯片设计及光电探测器组件；

龚海梅(1965－)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事组件低温封装及其抗辐射机理与可靠性技术研究。