采用微纳孔提升近红外光学效率的CMOS图像传感器：顶面微孔与底面微孔

E.Ponizovskaya Devine[1,2] IEEE会员，Ahasan Ahamad[2] IEEE会员，Ahmed Mayet[2]IEEE会员，Amita Rawat IEEE会员，Aly E Elrefai... ...mada[1] IEEE高级会员，Shih-Yuan Wang[1] 终身会士，*IEEE*，M Saif Islam[2] IEEE会士

摘要— 我们研究了能够提高可见光和红外波段 CMOS 图像像素光学效率的纳米及微结构。我们考察了像素底部与顶部微孔

索引词—CMOS图像传感器

I. 引言

S针对智能手机、汽车、安防、机器人以及增强现实/虚拟现实设备应用中红外（IR）摄像头对兼容互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺的高灵敏度需求，已提出多种解决方案 [1]–[5],，尤其是涉及用于捕光的微/纳结构的器件方案 [6-11]。近期研究表明，每个像素采用一个孔洞可获得更高的光学效率 [6]。研究还表明，微结构表面会增加像素间的串扰，而像素之间的深沟槽可降低串扰 [12]。采用锗-on-硅结构且带有微孔的像素，可将红外工作波长范围扩展至更长波长 [8]。其中一种方案是在像素底部设置孔洞。另一种方案则采用小型纳米孔，构成一个尺寸经过优化、以实现红外波段最佳光学效率的大孔。对于复合孔，我们选择了具有高度旋转对称性的六边形纳米孔排列。这使得能够在复合圆柱形孔中构造光子晶体。此类复合孔的性质取决于较大尺度孔洞的形状，以及小孔的晶格特性。

我们考虑一种像素尺寸为 1.12×1.12 μm² 的绝缘体上硅（SOI）衬底。我们使用有限时域差分（FDTD） [13,14] Lumerical 仿真，展示像素底部的纳米微结构对光学效率的影响。我们已经证明，底部的微结构能够产生与纳米结构化表面相似的效果。这包括通过深沟槽隔离（DTI） [12,13] 减少倒金字塔结构造成的串扰这一结果。先前的仿真仅研究了垂直入射的情况。然而，光线以一定角度入射时，由于其与 DTI 的夹角增大，可能会产生更高的串扰。我们还使用实际数值孔径（NA）进行了仿真，该孔径以一定角度收集光线，导致相邻像素之间发生 ±10 度的交换（串扰）。我们已证明，DTI 可将串扰控制在与未采用纳米结构像素的平面器件相当的范围内。

II. 设计与光学仿真

在仿真中，我们考虑将硅背照式传感器叠置在带有低噪声结构[6], [7]的信号处理电路芯片上。光学仿真不包括金属触点。触点会产生少量光学损耗，使结果降低几个百分点。像素阵列如图1所示。每个像素宽1.12 μm，由位于SiO_2上的硅层构成。硅层厚度为3 μm。

埋置的SiO_2层通过反射入射电磁波，降低薄吸收层的透射率。每个像素顶部均设有一个半径为1 μm的微透镜，并配有滤光片。微透镜的折射率为1.5，厚度为500nm，这是图像传感器设计中常用的参数。我们使用常见的彩色滤光片参数 [14]对拜耳阵列中的像素（图1c）进行建模。滤光片后的透射率如图所示。

1b. 在三维仿真设置中，颜料滤光片使用与 900nm 厚度相关的透射率[14]。金字塔结构横截面的视图如图 1d 所示。

我们计算光学效率（OE），它表示每个像素的有源层对光的吸收，相关描述见[6] 以及进入该体积的坡印廷通量实部之间的差值（），

E H= ( ) Re^{in}P ×

[1] W&WSens Device Inc[2]. 加州大学戴维斯分校 联系邮箱：eponizovskayadevine@ucdavis.edu

XXXX-XXXX © XXXX IEEE。允许个人使用，但重新出版/再分发须获得 IEEE 许可。更多信息请见 http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html。

以及离开像素的坡印廷通量（ ），通过时域有限差分法进行模拟：

$$OE = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{inc}} \quad (2)$$

其中，P_{inc} 是根据上文在透镜和滤光片上方计算得到的入射光坡印廷矢量。本研究假设量子效率与光学效率 [6] 成正比。

另一方面，量子效率（QE）是器件光电流相对于光强的归一化值；由于复合及其他损耗，其值低于光学效率（OE）。尽管如此，较高的光学效率会带来较高的量子效率，而优化光捕获质量也能提高量子效率。由滤光片透射率决定的蓝色、红色和绿色滤光片的最大光学效率分别为 光学效率$_{Blue}$ = 75%（440 nm）、光学效率$_{Green}$ = 80%（550 nm）和 光学效率$_{Red}$ = 80%（650 nm）；这些滤光片在近红外区域是透明的（图 1b）。硅在红外波段的光学吸收非常弱，因此需要采用光捕获策略来增强吸收，从而提高光学效率。

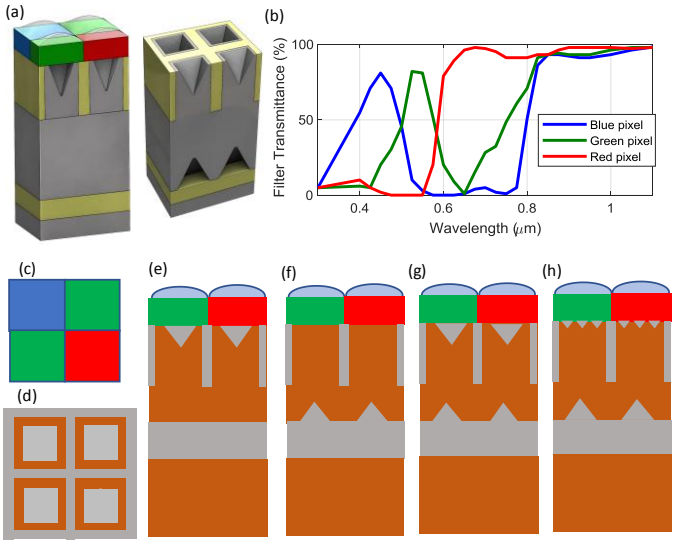

图 1。 像素示意图：a）图像传感器的三维视图，右侧为透镜和滤光片，中部为带有孔的区域，并详细展示顶部和底部；b）滤光片透射率；c）拜耳图案的俯视图；d）穿过底部孔状金字塔结构的横截面；e）顶部孔状金字塔结构的侧视图；f）底部孔状金字塔结构及底面的侧视图；g）顶部和底部孔的侧视图；h）底部具有单个 900×900nm 金字塔形孔、顶部具有小型金字塔阵列的像素侧视图。

为提高光学效率，我们在每个像素的中心设置一个金字塔形孔，如侧视图 Fig.1 (d-h) 所示。微孔分别位于滤光片后方的顶部（Fig.1e）、SiO_2 层上方的底部（Fig.1f），以及顶部和底部（Fig.1g）。孔的边长为 900nm，该尺寸可使红外光电探测器获得良好的量子效率。我们还考虑了底部设置单个金字塔结构、顶部设置小型金字塔阵列的设计 (Fig.1h)。顶部阵列由边长为 200×200nm^2 的金字塔结构组成，金字塔结构中心之间的距离为 250nm'。每个像素边缘处设有沟槽，宽度为 150 nm，深度为 2μm，以减少串扰。金字塔形孔的深度由制造工艺决定，该工艺保持 侧壁之间的角度

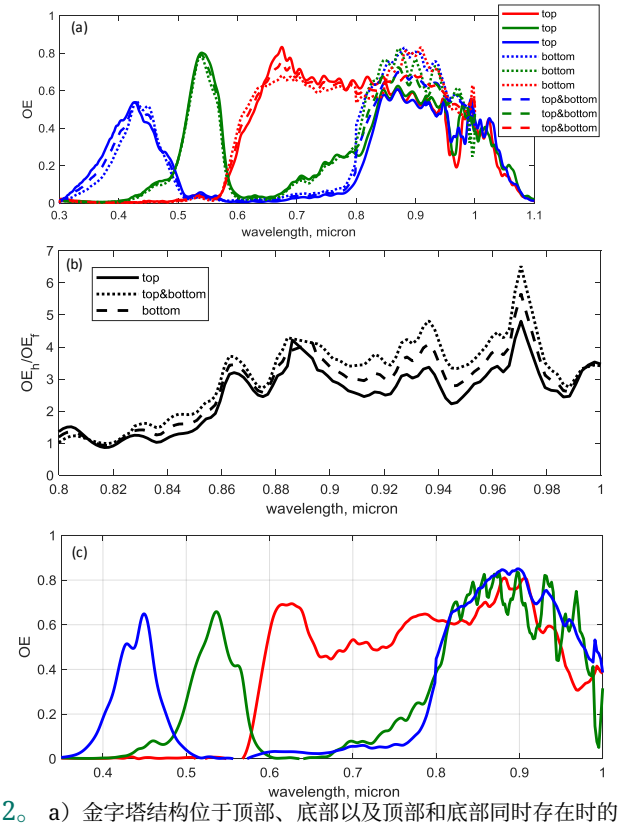

图 2。 a）金字塔结构位于顶部、底部以及顶部和底部同时存在时的光学效率；b）红外波长下微纳孔导致的光学效率提升，其中光学效率按蓝色、绿色和红色像素的平均值计算；c）底部具有 900×900nm 金字塔结构、顶部具有小型金字塔阵列 200×200nm，且中心间距为 250nm 时的光学效率。

且底面的角度为 54.74°，即单晶硅 (111) 晶面与 (100) 晶

硅在 [9,6] 800-1000nm 波长范围内的吸收，而对于锗，波长范围可扩展至 1700nm [8]。该研究 [6], [7] 表明，每个像素设置一个微孔可更有效地提高量子效率。最佳微孔尺寸与小尺寸像素相当。采用带有硅-硅 $_2$ 界面的深沟槽结构作为阻挡电子扩散的屏障，并通过反射光来防止串扰。该微结构将法向入射光重新导向与表面平面平行的横向方向，有助于提高吸收并减少反射。我们使用 Lumerical 软件提供的时域有限差分法，对由拜耳阵列组成的元胞（图 1）进行麦克斯韦旋度方程的数值求解。我们在*XY* 平面采用布洛赫边界条件，并在垂直于表面的法线方向（*Z*）采用完全匹配层（PML）。

将纳米微结构传感器的仿真结果与垂直照明下平面图像传感器的仿真结果进行了比较。图2a展示了像素顶部和底部均具有边长为900纳米的金字塔形孔时的结果。

结果表明，对于某些波长，顶部的金字塔结构可以替换为底部的金字塔结构，且效果相同甚至更好。图 2b 显示了带孔像素与平坦像素的光学效率之比，体现了微孔结构带来的增强效果。像素材料的吸收率越低，增强效果越明显。图 2b 中的光学效率表示红色、绿色和蓝色像素的平均增强效果，因为对于波长长于 800 nm 的光，所有滤光片的透射率几乎相同。

仿真表明，红外波段的光学效率可提高 3 倍。光陷阱机制与顶部的孔洞类似。光在像素中的微孔处发生散射。如 [9] 所示，我们可以看到，这些孔洞会产生被限制在像素中的横向模式。不同之处在于，微结构表面的反射更少。通过在硅顶部涂覆抗反射层，可以抵消这一影响。顶部和底部的孔洞也可以起到相同的作用。顶部的小型金字塔阵列可以减少反射。我们研究了将顶部的小型孔阵列与底部的单个金字塔 $900\times900\text{nm}^2$ 结合的可能性。图 2c 展示了顶部小型金字塔阵列的结果：阵列尺寸为 $200\times200\text{nm}^2$，方形晶格中相邻金字塔间距为 250 nm。红外波段的光学效率与顶部和底部均采用单个金字塔时一样好。不过，在绿色和红色波段略低。原因是抗反射层和小型金字塔阵列针对不同波长进行了优化。基于相同原因

对于顶部的单孔，蓝色部分的光学效率略低于小金字塔阵列。尽管底部的孔有望提升光学效率，但我们也承认，这种设计会增加器件制造的复杂性。然而，随着各种晶圆键合方法以及包括 3D 集成在内的 SmartCut™ 工艺不断发展，所提出的底部开孔器件可以方便地制造出来。

III. 复合孔

为便于制造，我们可以使用复合孔来替代单个微孔。具体而言，我们用一簇填充二氧化硅的纳米孔（图 3a-c）替代单孔。如前所述，效果最佳的孔是边长为 800–900 nm 的微孔。对于长波长，我们可以考虑采用小孔，以满足复合材料有效介电常数的麦克斯韦-加内特近似条件。在波长远大于纳米孔尺寸的近似条件下，介电常数为

$$\epsilon = \epsilon_{Si} f + \epsilon_{SiO_2}(1-f)$$

其中 f 为硅所占的比例。当复合孔与硅的折射率反差较低时与 SiO_2 填料相比，我们预计复合孔的影响较小。我们将复合孔建模为由纳米孔组成、填充 SiO_2 的簇。我们改变孔的尺寸、孔间距和孔深。

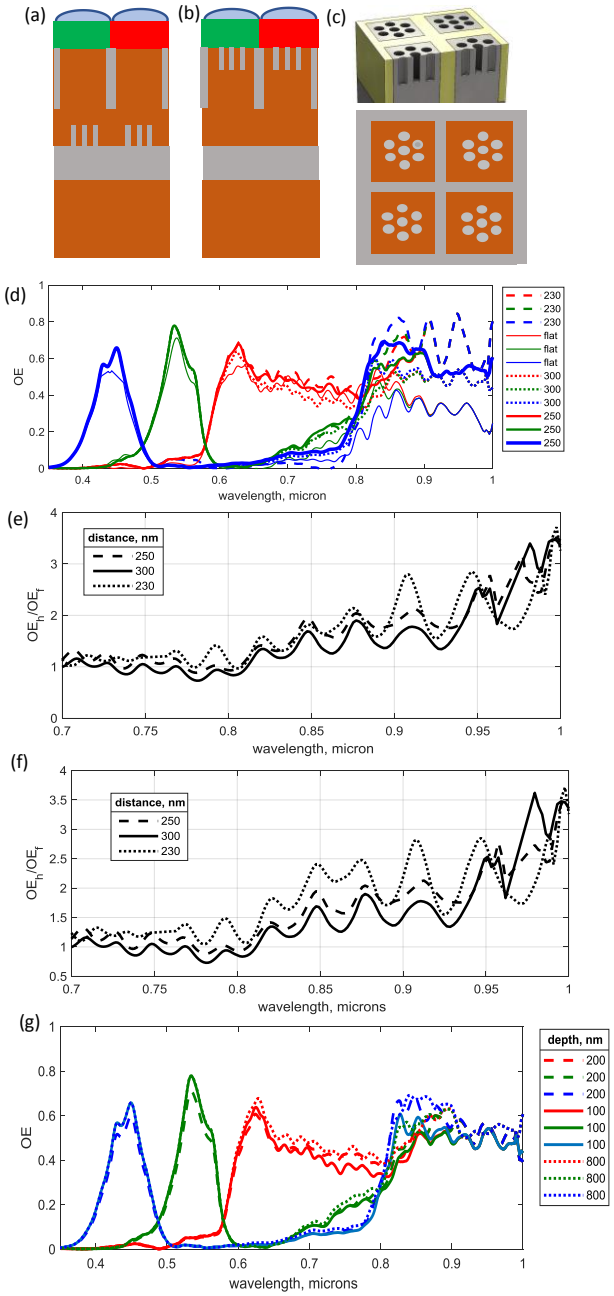

图 3。 a）复合孔顶部的侧视图；b）复合孔底部的侧视图；c）复合孔的三维图像及穿过填充硅的复合孔的横截面$_2$；d）位于底部的不同尺寸复合孔的光学效率：虚线 d=200nm a=250nm，实线 d=200nm a=300nm，点线 d=200nm a=230nm，深度为 200nm；（e）位于底部的复合孔在红外波段的光学效率提升，纳米孔深度为 200nm、直径为 200nm，纳米孔间距分别为 230nm（点线）、250nm（虚线）和 300nm（实线）。（f）位于顶部的复合孔在红外波段的光学效率提升，纳米孔深度为 200nm、直径为 200nm，纳米孔间距分别为 230nm（点线）、250nm（虚线）和 300nm（实线）。g）d=200nm、a =250nm 时的复合孔，深度从 100nm 变化至 800nm

排列在晶格中的纳米孔可以支持共振波长。这种效应可在光子晶体中观察到。较小的纳米孔晶格会在较短波长范围内产生共振。然而，由于制造目的，该研究聚焦于直径接近 200nm 的纳米孔。直径尺寸受到制造工艺的限制。晶格无序会破坏这些共振；然而，对于 200nm 的孔径以及复合结构中仅有少量纳米孔的情况，无序的影响并不显著。纳米孔的深度从 50nm 变化到 1μm。

根据麦克斯韦-加内特近似，当纳米孔直径为 200 nm、孔中心间距在 230 至 300 nm 之间变化时，复合孔的有效介电常数在 2.1 至 2.7 之间变化。较高的介电常数反差能够实现更好的横向模式耦合，因此，当纳米孔中心间距为 230 nm（对应的有效介电常数为 2.1）时，能够获得更好的吸收效果。

使用 Lumerical 进行的时域有限差分仿真结果如图 3 所示。平面器件的光学效率如图 3a 中的细实线所示。像素几何结构如图 3a–c 所示。底部具有复合孔的侧视图如图 3a 所示，顶部视图如图 3b 所示，穿过孔的横截面如图 3c 所示。由于像素尺寸为 1.12×1.12 μm^2，且纳米孔的直径至少仅为 200nm，因此复合孔仅由 7 个按照六角晶格排列的纳米孔组成。

光学效率如图3d所示。时域有限差分仿真表明，间距为230、250和300nm时，无论孔位于顶部还是底部，在红外波段产生的光学效率增强都非常相似，且间距越小，增强越明显。由于硅的吸收较弱，平面器件的光学效率也较低，因此增强效果还会随波长增加而增强。从图3d可以看出，平面器件的光学效率下降速度快于纳米结构像素。我们还观察到，可见光范围内的光学效率略有提升。复合孔针对红外波段的最大增强效果进行了优化。然而，六角纳米孔可在可见光范围内产生导模共振，从而有效增强可见光范围内的响应。将结果与图2中带二氧化硅的孔洞900×900 nm^2 进行比较，可以看到，复合孔在蓝光和绿光波段的增强效果更明显，但在红光和红外波段则较弱。在红光和红外波段，麦克斯韦-加内特近似是

表 I 串扰 串扰：法向入射与10度入射及透镜汇聚光线的比较，透镜的数值孔径=0.26b/r b/g g/r g/b r/g r/b

146	20	56	57	85	34	法向，宽/高
31	14	14	59	36	31	透镜，宽/高
22	11	11	12	32	18	10度，宽/高
32	15	15	60	38	32	透镜，平面
146	24	61	63	89	39	法向，平面

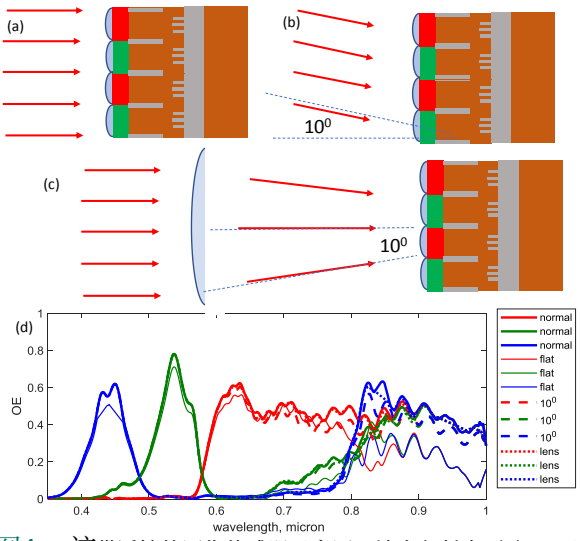

图4。 该带透镜的图像传感器示意图：法向入射光（a）、以10度角入射（b）、透镜收集10度锥角内的光（c）；法向入射光的光学效率（实线），与以10度角入射的光（虚线）以及透镜收集的光（NA=0.26，点线）进行比较。细线表示带透镜的平面器件（d）。

成立的，且有效磁导率高于二氧化硅，因此增强效果较弱。实心二氧化硅孔洞的尺寸与针对光电探测器 [15]优化的尺寸相同。六角晶格中的无序可能会破坏导模共振，从而降低光学效率，但其性能仍应至少与每像素一个金字塔的结构相当。图3e和f展示了顶部和底部复合孔在红外波段的增强效果。图中使用的是蓝色、绿色和红色像素的平均光学效率。

研究了纳米孔深度的影响（见图3g）。结果发现，当孔深超过200nm时，光学效率对深度并不敏感。孔深小于100nm时，光学效率接近平面器件的光学效率。长孔产生的光学效率并不显著高于深约200nm的复合孔。

IV. 光锥仿真

在相机等应用配置中，像素阵列可能接收到在角度范围 θ，内汇聚的入射光，如图4所示。通常，光线在约10度的角度范围 θ 内汇聚。我们仿真了在一定角度范围内汇聚光线的透镜，并将其与法向入射以及以10度角入射的平面波进行比较。我们使用了硅像素阵列，

在底部设置单个每像素复合孔，并将其与带透镜和不带透镜的平面器件以及法向入射平面波进行比较。该透镜以 10 度锥角收集光线，其数值孔径（NA）为$n\ sin\ \theta$，并假设 $n=1,5$，则 NA 值为 0.26。在像素阵列上方，将透镜模拟为球面，折射率为 n=1.5，曲率半径与焦距之比 R/f 为 = 0.174。这对应于以不同角度收集光线，可知

增加串扰。图 4 展示了角度依赖关系。确实，串扰会随角度增大而增加。由于光线不是垂直入射，它与 DTI 可能形成更大的夹角，从而产生更高的串扰。我们计算了串扰指数：像素 j 在像素 i 中的指数，是像素 i 指定波长附近 ±10 nm 范围内的光学效率积分，除以像素 j 的相同光学效率积分 [6]。指数值越高，串扰越小。串扰结果汇总于表 1。

正如预期，透镜的串扰略高于法向入射时的串扰，但低于 10 度平面波入射时的串扰。平面器件以及带孔和 DTI 的器件，其串扰处于同一量级。

正如预期，法向入射时的串扰最低。不过，10 度入射或具有 10 度锥角的透镜并不会使串扰超出典型值 [6]。

图 4d 展示了法向入射时（图 4a）、以 10^0 入射的平面波（图 4b）以及在 10 度锥角范围内汇聚光线的透镜（图 4c）的光学效率（OE），并与 10 度入射时的平面器件进行了比较。入射角对光学效率的影响较小。不过，与平面器件相比，光学效率仍有显著提升，尤其是在红外波段。

V. 结论

我们模拟了 CMOS 图像像素的纳米微孔光学效率增强结构的多种配置，并对尺寸进行了优化。结果表明，像素底部的微孔在具备相应优势的同时，增强效果甚至更好。单孔也可以替换为代表一簇纳米孔的复合孔，其增强效果相比单个实心孔略有下降。不过，它仍能提供优于均匀分布纳米孔的光学效率。

致谢

本研究部分得到了 S. P. Wang and S. Y. Wang Partnership（加利福尼亚州洛斯阿尔托斯）的支持。

参考文献

[1] C.-F. Han、J.-M. Chiou 和 J.-F. Lin，“通过仿真研究深沟槽隔离和倒金字塔阵列结构对 CMOS 图像传感器中光电二极管光学效率的提升作用”，《传感器》，第20卷，3062，2020年11月，第 页。[2] I. Oshiyama、S. Yokogawa、H. Ikeda、Y. Ebiko、T. Hirano、S. Saito、T. Oinoue、Y. Hagimoto 和 H. Iwamoto，“背照式图像传感器的近红外灵敏度增强”“采用金字塔表面衍射结构的互补金属氧化物半导体图像传感器”，载于《2017年 IEEE 国际电子器件会议（IEDM）》，第 16–4 页，IEEE，2017年。[3] S. Yokogawa、I. Oshiyama、H. Ikeda、Y. Ebiko、T. Hirano、S. Saito、T. Oinoue、Y. Hagimoto 和 H. Iwamoto，《采用衍射光俘获像素的 CMOS 图像传感器红外灵敏度增强》，《Scientific Reports》，第 7 卷，第 1 期，第 1–9 页，2017年。[4] R. Fontaine，《智能手机成像器的最新进展》，载于《国际图像传感器研讨会》，第 R01 页，2019年。[5] J. Ahn、C.-R. Moon、B. Kim、K. Lee、Y. Kim、M. Lim、W. Lee、H. Park、K. Moon、J. Yoo 等，《面向 1.0 μm 像素缩小的先进图像传感器技术》，载于《2008 IEEE 国际电子器件会议》，第 1–4 页，IEEE，2008年。[6] E. P. Devine、W. Qarony、A. Ahamed、A. S. Mayet、S. Ghandiparsi、C. Bartolo-Perez、A. F. Elrefaie、T. Yamada、S.-Y. Wang 和 M. S. Islam，《近红外增强光学灵敏度的 CMOS 图像传感器：每个像素一个微孔》，《IEEE 传感器期刊》，第 21 卷，第 9 期，第 10556–10562 页，2021年。[7] E. P. Devine、A. Ahamed、A. S. Mayet、S. Ghandiparsi、C. BartoloPerez、L. McPhillips、A. F. Elrefaie、T. Yamada、S.-Y. Wang 和 M. S. Islam，《采用每像素单个光子俘获孔以增强近红外灵敏度的 CMOS 图像传感器优化》，arXiv 预印本 arXiv:2110.00206，2021年。[8] Ekaterina Ponizovskaya-Devine、Ahmed S. Mayet、Amita Rawat、Ahasan Ahamed、Shih-Yuan Wang、Aly F. Elrefaie、Toshishige Yamada、M. Saif Islam，采用每像素单个微孔、灵敏度增强至 1700 nm 的薄型锗硅互补金属氧化物半导体图像传感器，《纳米光子学杂志》，17(1)，016012（2023），doi: 10.1117/1.JNP.17.016012。[9] Y. Gao、H. Cansizoglu、K. G. Polat、S. Ghandiparsi、A. Kaya、H. H. Mamtaz、A. S. Mayet、Y. Wang、X. Zhang、T. Yamada 等，《光子俘获微结构实现高速、高效率硅光电二极管》，《自然光子学》，第 11 卷，第 5 期，第 301–308 页，2017年。[10] H Cansizoglu 等，《面向通信的高速、高效率硅光电二极管新范式——第一部分：通过低维结构增强光子与材料的相互作用》，《IEEE 电子器件汇刊》，2017年。[11] H Cansizoglu 等，《面向通信的高速、高效率硅光电二极管新范式——第二部分：低维结构的器件与 VLSI 集成挑战》，《IEEE 电子器件汇刊》，2017年。[12] B. J. Park、J. Jung、C.-R. Moon、S. H. Hwang、Y. W. Lee、D. W. Kim、K. H. Paik、J. R. Yoo、D. H. Lee 和 K. Kim，《1.7 μm 像素间距有源像素传感器中用于抑制串扰的深沟槽隔离》，《日本应用物理学杂志》，第 46 卷，第 4S 期，第 2454 页，2007年。[13] “高性能光子学仿真软件——Lumerical。” https://www.lumerical.com/（访问日期：2020年11月22日）。[14] A. Taflove、S. C. Hagness 和 M. Piket-May，《计算电磁学：时域有限差分法》，《电气工程手册》，第 3 卷，第 629–670 页，2005年。[15] 《在光子俘获超快硅光电探测器中实现吸收最大化》，C Bartolo-Perez、W Qarony、S Ghandiparsi、AS Mayet……，《先进光子学研究》，2021年。



Ekaterina Ponizovskaya Devine 于1999年在俄罗斯莫斯科的莫斯科物理技术学院（国立大学）获得理学硕士和博士学位。 她曾在美国加利福尼亚州山景城的美国国家航空航天局艾姆斯中心工作，当时她是

参与预测性维护和自动化的优化及基于物理的模型研究。她目前就职于美国加利福尼亚州洛斯阿尔托斯的 W&WSens Device, Inc.，专注于光子学和光电探测器。



Amita Rawat 获印度理工学院巴特那分校电气工程技术学士学位，并获印度理工学院孟买分校电气工程系微电子学博士学位，研究方向为逻辑器件变异性建模和器件制造。她曾在比利时微电子研究中心鲁汶分部从事先进逻辑晶体管的紧凑模型研究。目前，她在加州大学戴维斯分校担任博士后研究员，从事光电子器件建模、仿真和制造。



Ahasan Ahamed是加州大学戴维斯分校电气与电子工程系二年级博士研究生。他于2018年获得孟加拉国工程技术大学理学学士学位。目前，他正致力于光子俘获型光电二极管的光谱响应工程研究，以推动芯片级光谱仪的发展。他的研究工作还包括为高光谱成像设计超高速光电二极管和单光子雪崩二极管。



Ahmed S. (Surrati) Mayet 获得了塔伊夫大学物理学理学学士学位，**该校位于沙特阿拉伯麦地那，并获得了** 加州大学戴维斯分校电气与计算机工程硕士学位。他于2017年开始在该校电气与计算机工程系攻读博士学位。他的研究重点是开发用于光通信系统的高速、高效率光电探测器。



Toshishige Yamada（于日本东京大学获得物理学理学学士和理学硕士学位，并于亚利桑那州立大学获得电气工程博士学位。随后，他在斯坦福大学从事应用物理学博士后研究，之后加入美国国家航空航天局艾姆斯研究中心和圣克拉拉大学。他目前是加州大学圣克鲁兹分校的兼职教授，研究先进半导体材料与器件的理论和仿真。）



Aly F. Elrefaie 获得 (M'83–SM'86–F'04– LF'19) 于1976年获得埃及开罗艾因夏姆斯大学电气工程理学学士（荣誉）学位，并分别于1980年和1983年获得美国纽约布鲁克林纽约大学电气工程理学硕士和博士学位。

自2014年以来，他一直担任 W&Wsens Devices, Inc. 的首席科学家，工作地点为美国加利福尼亚州洛斯阿尔托斯，研究纳米光通信技术



Shih-Yuan (SY) Wang 1969年获加州大学伯克利分校工程物理理学学士学位；1977年获加州大学伯克利分校电气工程与计算机科学博士学位。在惠普实验室，SY从事多模垂直腔面发射激光器和高速III-V族光电二极管的研发，这两者后来都成为成功的产品。SY目前任职于位于加利福尼亚州洛斯阿尔托斯的 W&WSens Devices, Inc.，致力于研发与CMOS工艺兼容的硅光电二极管，用于CMOS图像传感器、光互连和激光雷达应用



M. Saif Islam (SM'15) 于1994年获得土耳其中东技术大学安卡拉校区的物理学理学学士学位，1996年获得安卡拉比尔肯特大学的物理学理学硕士学位，并于2001年获得美国加利福尼亚州洛杉矶加州大学洛杉矶分校的电气工程博士学位。

他于2004年加入美国加利福尼亚州的加州大学戴维斯分校，目前担任 教授。