

俞捷：融汇芯光 点亮未来

从射频到光的道路



移动通信、集成互联、智能绿色，这些当今生活中已然习惯的便利，无不得益于射频通信技术的发展与广泛应用；5G 研发、基站建设、商业应用、工业互联，这些重要产业发展布局无不直指射频通信行业的未来发展方向。射频通信作为现代通信领域的重要组成部分，从最初的萌发到今天的壮大离不开无数科研工作者的探索与尝试，其中就有为射频硅基片上电感集成与建模技术做出重要贡献的香港科技大学电子与计算机工程系教授俞捷。

1992 年，俞捷在德克萨斯大学奥斯汀分校取得电气和计算机工程学士学位，并得到最高荣誉毕业。随后，他进入斯坦福大学，分别在 1994 年和 1998 年获得电气工程硕士及博士学位。博士期间，他从事硅芯片上电感器的集成技术和建模的研究。硅芯片上电感器是包括手机、机顶盒以及光通信收发器等高频率高数据率通信系统的核心器件。他的研究成果得到了业界很大的认可，基于该成果发表的论文现已被引用超过 1200 次，以这篇论文为基础的发明也被授予了美国专利。

2003 年，在产业界历练了 5 年之后，俞

捷进入了卡内基梅隆大学，从助理教授做起，直到 2010 年成为终身正教授。这个时候，距俞捷 16 岁漂洋过海来到美国，已经过去了 20 多年。而就在取得终身正教授资格的当口，俞捷却选择辞去职务全职回国，加入香港科技大学。有朋友对俞捷的回国表示不解，但对国内科研事业的长期关注，让俞捷坚信：回国可以做出更大的成果！

而俞捷另一个出乎大家意料的决定，就是对研究方向的选择：出身射频通信，又具有业界丰富的射频研究经历，回到香港科技大学后继续从事射频集成电路研究似乎理所应当，但是俞捷选择了另一条通信领域技术：光通信。“我们实验室关于光在通信方面的研究，目前分为两个方面：光纤通信和可见光通信。”光纤通信依靠光纤这一低损耗、高带宽、抗干扰能力强的传输介质来传递高速数据，以满足日益增长的大规模数据中心通信速率要求。而之所以从事光纤通信方向的研究，实际上是俞捷对于之前射频通信技术向高速有线通信领域的转化。看准了移动互联网浪潮和网络娱乐的迅猛发展和对高速数据通信网络的巨大需求，光纤通信将成为未开应对巨大数据处理负荷和通信带宽需求的支撑技术，俞捷指出“如何实现高速低功耗低成本光通信网络是构建此类巨型数据中心的难点及关键。俞捷进一步解释道：“在过去的几年中，我致力于研究基于标准 CMOS 工艺的全集成光接收器，而这也已经成为了领域内的一个非常重要的研究方向。

而另一方面，俞捷说：“可见光通信则是一个新的研究方向。”对可见光通信的研究发端于可见光室内定位和导航。现今基于射频信号的室内定位技术，如 WI FI、蓝牙

等，由于受到干扰和衰减的影响，往往精度有限，可见光通信表现出的独特视距链路使信号被限制在照明区域，从而可以达到更高的定位精度。基于可见光的通信技术使用 LED 灯来产生无法用肉眼看到，但可以通过光传感器（如智能手机的摄像）检测到的信号来进行定位和通信。“飞利浦、通用电气、高通等大公司都在对可见光开展研究，从 2014 年开始陆陆续续地有一些公开的报道，今年比较全面一点，开始有方案了。”在俞捷看来，这些公司对可见光通信的研究就像一个信号，恰恰证明了这一技术可以在市场上立足，那么接下来要解决的就是技术上的难题了。

探索光中的无形通信

无线光通信（OWC）有望在第五代无线通信系统（5G）中发挥重要作用，以实现更高的数据速率、更大的网络容量、更低的延迟和更高的能效。而可见光通信（VLC）属于 OWC 技术的一种，它利用可见光作为通信介质，具有可自由使用的频谱、高带宽容量以及高安全性，并且不会产生电磁干扰。随着各种先进显示器作为消费电子产品不可或缺的一部分而得到快速普及，利用显示器来同步传输 VLC 信息具有诱人的前景。“试想一下，当你去商场逛街，你的手机可以随时感应你的具体位置，为你推荐商品，还可以展示物品的所有颜色、尺码，那么你在线下购物也可以拥有线上购物的效率和便捷。”俞捷兴奋地说道，“再假设你在博物馆里看展览，随着你的走动，你的手机可以随时为你提供你所在位置的展品信息。到那时，手机就像个人助理，能够随时为你服务。”在这种系统中，显示器能同时进行显示和 VLC 信息传输，而 VLC 信号只能由专门的器件进行探测，不会在人眼中产生视觉效果，

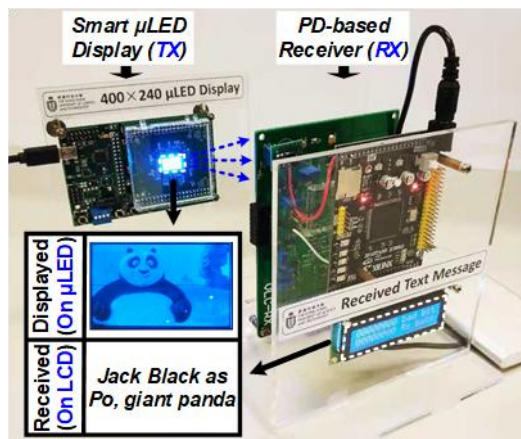
因此这种利用可见光的通信对人眼并不可见。

可见光的光源极其多样，可以照明的光理论上都可以用来同时进行通信，而对光源



智能 μ LED 显示器照片

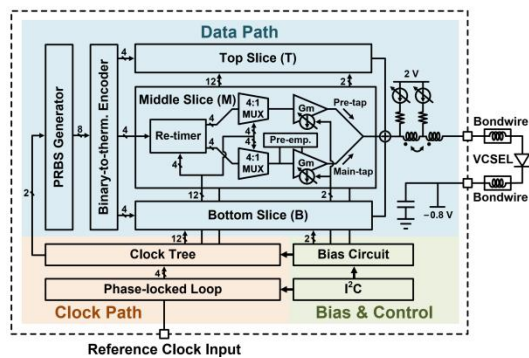
的选择主要取决于消费电子产品的附带功能属性。最近，无机微 LED（ μ LED）显示器因在分辨率、亮度、能效和可靠性等方面的卓越性能而在智能手机、智能手表和透明显示器等许多应用中显示出巨大潜力。因此， μ LED 显示器也能通过采用 VLC 技术变成可支持不同设备间通信的智能显示器。



基于光探测器的智能 μ LED 显示-VLC 系统

在 2018 年，俞捷团队开发了一种智能 μ LED 显示系统，支持将 VLC 作为用于配备了 μ LED 显示器的便携式设备间的近场通信（NFC）技术。在发射端，VLC 调制器集成在分辨率为 400×240 、像素尺寸为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$

的氮化镓 (GaN) μ LED 显示器中, 可同时实现显示和 VLC 功能。接收端有两种不同的配置, 包括基于光电二极管 (PD) 的和基于智能手机相机的接收器。实验结果表明, 基于 PD 的系统可以在超过 10 cm 的距离上实现 2 Mb/s 的比特率和 550 kb/s 的最大通信速率, 但它对角度偏差比较敏感。与此不同, 基于智能手机相机的系统能以 16.6 kb/s 的比特率传输短信息, 并且能在 5 cm 的距离处实现 5 kb/s 最大通信速率。不仅如此, 基于相机的系统受角度偏差的影响相对较小。在未来的研究中可以通过优化显示驱动器和 μ LED 阵列以实现更高的通信速率。此外, 由于实际应用需要更大的 μ LED 显示器, 因此数据率和通信距离也将会进一步提高。

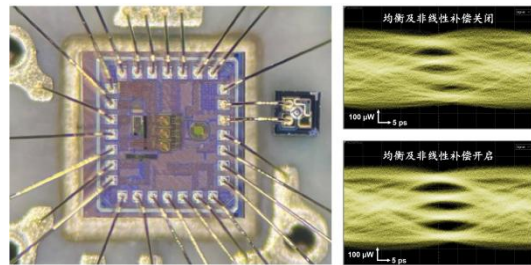


VCSEL 发射机芯片的架构

除可见光通信, 俞捷团队亦专注于光纤通信芯片领域的研究。为了达到大规模数据中心所需的数据传输速率和通信距离要求, 传统光收发机芯片主要由昂贵的高性能半导体工艺如硅锗 (SiGe) 或砷化镓 (GaAs) 制造。然而, 在摩尔定律的推动下, 低成本 CMOS 工艺的性能功耗比已经在过去几十年内取得了飞速发展。因此, 基于 CMOS 工艺的新一代光收发机开始逐步取代昂贵的硅锗/砷化镓材料光收发机进一步推动高速光通信网络的普及。

在 2020 年, 面向数据中心内的光互连

通信场景, 俞捷团队针对垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 提出了一种四脉冲幅度调制信号 (PAM-4) 发射机芯片。相较电吸收调制激光器 (EML) 和直接调制激光器 (DML) 等, VCSEL 具备低成本、低功耗的优势。然而, 当使用 PAM-4 信号驱动 VCSEL 以获取相较不归零信号更高的通信吞吐量时, VCSEL 的非线性特性将恶化生成的光信号的质量。此外, VCSEL 对信号上升及下降跳变沿的非对称响应将进一步恶化光信号质量、缩短最优采样时间。

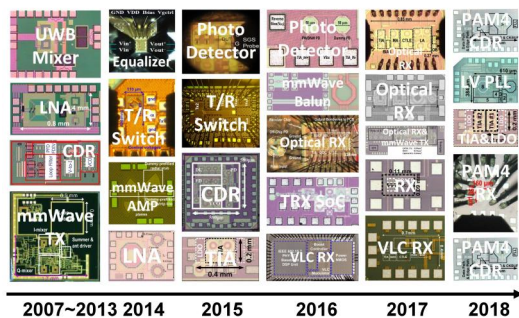


VCSEL 发射机芯片的显微图和测试结果

为解决 VCSEL 的两个非理想效应, 俞捷团队提出的 PAM-4 VCSEL 发射机芯片集成了非线性补偿和非对称均衡功能。芯片采用基于温度计码的架构, 并集成一个 2 抽头前馈均衡器 (FFE), 因而能够独立控制顶层/中间层/底层 (T/M/B) 数据切片的增益及均衡强度, 从而完全补偿 VCSEL 的非线性。不仅如此, 芯片还集成了一种内置于连续时间线性均衡器 (CTLE) 的非对称预加重电路, 以消除由 VCSEL 非对称上升/下降响应特性造成的光信号眼图歪斜的问题, 亦可进一步提升发射机的带宽。光测试结果表明, 在 56-Gb/s PAM-4 的速率下, 本工作提出的分段式非线性补偿技术将 PAM-4 平均子眼高度/宽度和电平失配比分别提升了 14%/12% 和 38%, 非对称均衡技术将水平子眼歪斜降低了 63%。芯片能够支持高达 56 Gb/s 的通信速率, 功耗仅 115 mW。该芯片

的成功研发,对我国高端光通信芯片行业的发展和通信基础设施的建设提供了重要的参考意义。

科研与生活: 尽心工作, 尽兴休闲



俞捷团队近年设计的芯片概览

2010年加入香港科技大学后,俞捷创办了“港科大—高通联合创新和研究实验室”。目前,俞捷团队共有十二名在读硕士生和博士生,多年来,团队专注于可见光通信芯片、光纤通信芯片、毫米波通信芯片等集成电路领域前沿技术的研究。



2019年香港科技大学芯片设计中心年度研讨会

为促进与学术界和工业界的交流和合作,俞捷团队定期邀请海内外集成电路领域专家举办学术讲座。2019年8月,团队组织了香港科技大学芯片设计中心年度研讨会,邀请了台湾大学的李致毅教授、南方科技大学的余浩教授、日本东京大学的 Makoto Ikeda 教授和美国德克萨斯州大学奥斯汀分校的孙楠教授等集成电路设计领域的著名学者,就高速光收发机芯片、人工智能芯片、

先进传感接口芯片和模拟-数字转换芯片等研究领域的技术热点和发展方向展开广泛的交流和讨论。



俞捷团队在香港清水湾郊野公园

如何平衡科研与生活的关系,以合理分配宝贵的在校时间,是每名研究生加入团队的第一课。“工作要尽心,休闲更要尽兴”是俞捷对这一问题的回答和一以贯之的生活宗旨。科研工作之余,俞捷鼓励实验室同学积极参与体育活动,强健体魄。健康的身体是全面发展的基础保障。俞捷经常与同学们一起进行篮球、健身训练。此外,实验室在每年的夏季和冬季会举行户外远足活动,强身健体之余,探索香港独特的城市景观和山海风光,帮助来自内地、海外的同学们更好地融入香港包罗万象的文化氛围。

20多年来,俞捷在半导体芯片行业和大学科研方面都取得了出类拔萃的成就。他说:“工程的价值在于解决一个值得解决的问题,而不应该因为外界因素去做一些没有意义的科研。我始终坚持,科研应在保证知识的原创性的基础上,真正面向产业界的需求。”他是极少数可以把学术研究真正面向产业需求,并且同时能达到创新又有实在成果的教授。对于俞捷来说,潜行躬耕20余载,唯初心一刻不能或忘。