

白皮书

ViP–集成光电二极管的VCSEL

智能VCSEL解决方案和自混合干涉技术的关键因素

TRUMPF

目录

| | |
|-----------------|----|
| 什么是ViP和SMI? | 4 |
| 稳定偏振的VCSEL | 5 |
| ViP的技术细节 | 5 |
| 自混合干涉技术(简称:SMI) | 8 |
| SMI的应用领域 | 9 |
| 结论与展望 | 13 |

》 如有产品相关咨询，请联系：

TRUMPF Photonic Components GmbH

Lise-Meitner-Straße 13
89081 Ulm

Photonic.components@trumpf.com
作者: Ralph Gudde

摘要

ViP指的是集成光电二极管的VCSEL，它的主要特点是在VCSEL谐振器内嵌入了光电二极管。本白皮书将重点介绍这一特定的VCSEL技术，它可实现稳定偏振光发射和单模工作。此外，还展示了测量光电二极管集成到谐振器中的结果。集成光电二极管的VCSEL(ViP)是通快产品组合的一部分，有超过15年的历史，专为大批量、先进的传感应用而开发。

特别是与自混合干涉(SMI)相结合的测量原理具有很高的灵敏度，几乎不受环境光引起的任何背景噪声的影响，具有很强的吸引力。因此，即使是sub-mW的操作也足以满足大多数应用。在本文中，我们将介绍从微米级高精度到高达250公里/小时高速的各种应用。另一方面，我们还讨论其它的应用领域：空气洁净度检测以及通过SMI技术所实现的近眼显示应用中的手势识别。它卓越的性能将在各个领域得以证明，并将赋予器件新的功能。

什么是ViP和SMI？

ViP(集成光电二极管的VCSEL)的特点在于它在VCSEL谐振器里嵌入了一个光电二极管。单个腔内触点作为VCSEL的阴极和光电二极管的阳极。这款超紧凑型芯片带有两个可单独寻址的台面。此外，强大的生产能力和良好的可靠性使该器件成为大批量产品的理想选择。

利用自混合干涉(SMI)原理，ViP可用于精确测量系统，例如：速度、距离、空气质量测量中的颗粒物浓度检测或是快速眼动。速度测量的干涉精度可满足苛刻的工业应用需求，如高精度的新型非接触式编码器。ViP和SMI的原理使测量几乎不受环境背景光的影响。在强烈的阳光下，已经验证了传感器的这项功

能；在汽车应用中，可以测量高达250公里/小时的对地速度。ViP在低功耗下具有低延迟性，所以，它成为测量快速眼动的理想选择，例如：在VR/AR护目镜应用中。这款微型传感器可以安装在AR/VR护目镜的框架上，用来测量眼部动作。另一个应用示例是超紧凑型空气质量测量器，用来检测PM2.5和超细颗粒。该系统可嵌入可穿戴设备中。它只有火柴头大小，可以进行精确、实时和个性化的测量。

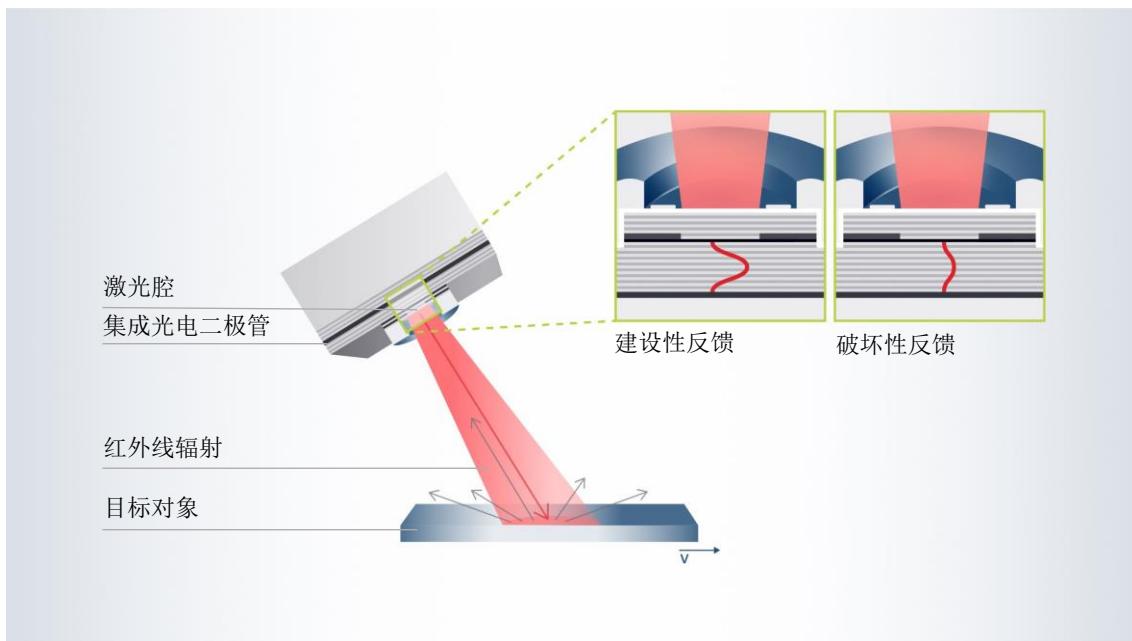


图 1：
介绍了SMI技术的原理和它的关键因素—ViP。

稳定偏振的VCSEL

VCSEL输出的偏振取决于晶体取向、器件中的机械应力和光学各向异性。后者可以通过光栅结构蚀刻到外耦合面来实现稳定。通过粗光栅观察到的衍射和散射来看，亚波长光栅间距的损耗显著降低。这里的光栅间距大约140 nm，蚀刻深度大约70 nm。使用纳米压印光刻技术可以大规模生产这种结构。这种光栅可以在单模或多模VCSEL、单发射器以及阵列上生产。

图2是10 μm孔径的单模VCSEL局部光栅电子显微镜照片。图3是一个小型芯片，其中两个多模发射器并联使用，以放大光功率。晶圆探针对一万多个单模芯片的偏振角进行了测量。结果表明，所有芯片都能实现偏振稳定，对准精度可以在5度以内。值得注意的是，这些单模器件在室温下的斜率效率约为0.9 W/A，而多模VCSEL则达到1 W/A。这接近于

无光栅的性能，并表明了使用亚波长光栅有低损耗的优势。通过这项技术，VCSEL输出可以偏振在一个特定方向上，同时保留所有其他属性。

一直以来，具有稳定偏振方向的VCSEL都被应用于光谱学。偏振光有利于定制光学器件，尤其是与光学元结构相结合。这种光学器件与VCSEL相结合，非常适用于智能手机或AR/VR眼镜中的超紧凑应用。

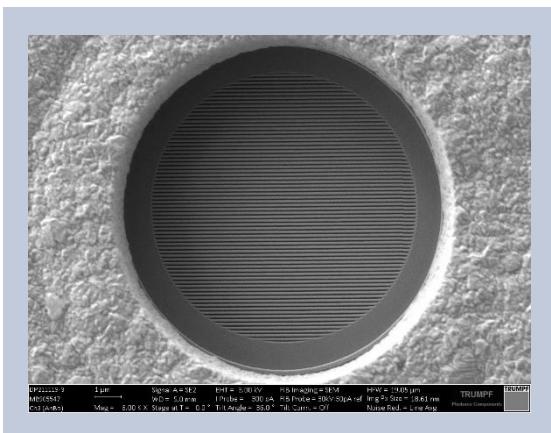


图 2:
扫描电子显微镜(SEM)下的局部光栅照片。



图 3:
带有两个发射器的小型VCSEL芯片，均带有偏振控制。

VIP的技术细节

通快制造ViP器件已经超过15年。该技术已在消费和工业应用中展示出良好的性能，并且多年来也得到了显着改进。下面介绍的所有器件的发射波长都在850 nm左右。

在ViP器件中，光电二极管和腔内触点是谐振器的一部分。

图4说明了将光电二极管垂直集成到VCSEL谐振器中的这一概念。光电二极管取代了有源区下方的一对反射镜，它由非掺杂的砷化镓(GaAs)制成。这不仅展示了光电二极管集成的最大优势：紧凑，而且还有以下几个特别的优势：

- 光电二极管放置在激光辐射驻波模式的波腹周围。因此，它对激光辐射特别敏感并且对自发射或环境光不太敏感。
- VCSEL谐振器是一个非常窄的光学带

芯片的概念和实现

图5显示了非常紧凑的ViP芯片的布局和SEM图像，边长仅为165 μm。该设计将两个独立的VCSEL台面结合在一个(更大的)光电二极管顶部(图中被白色形状所包围)。VCSEL阳极可以单独寻址，阴极共享同一个腔内触点。它可以有两种操作：第一种是两个台面可以交替运行，但只共享一个光电二极管。因为两个光学孔径之间间距小，所以它们可聚焦在

通滤波器，因此环境背景光可以得到数量级的降低。

需要注意的是，单触点既可以作为激光阴极，也可以作为光电二极管阳极。

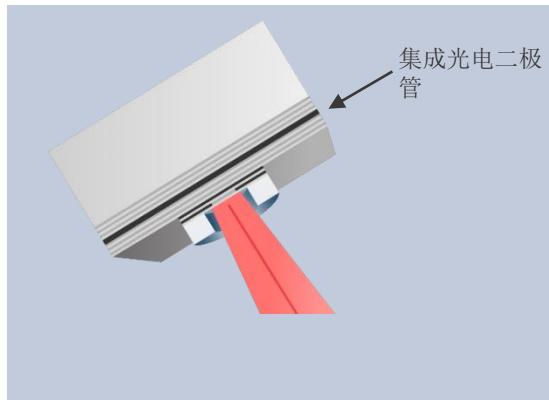


图 4:
ViP的原理。

同一目标上。这有助于建立冗余，从而延长芯片寿命。另一种操作是两个台面都可以专注于不同的目标，并启用独立(交替)测量。

如上所述偏振方向稳定，并在图5中用红色箭头指示。

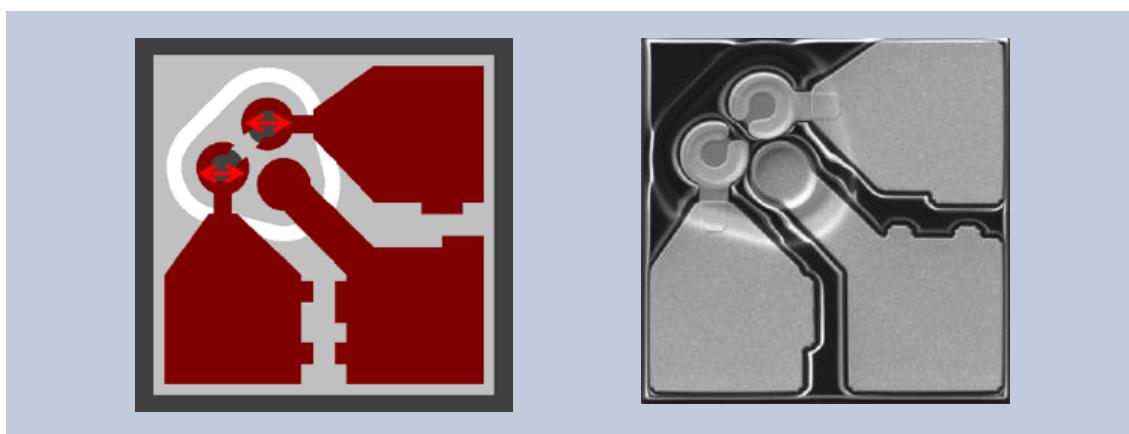


图 5:
ViP布局和SEM图片。
红色箭头表示横向
磁场偏振输出的电
场方向。芯片边长
为165 μm。

图6(左)展示了ViP的光电特性。PD电流是在-1V的光电二极管反向电压下测量的。光电二极管检测激光发射和自发发射(亚阈值)，但自发发射的灵敏度低于激光发射。这表现在激光阈值处光电二极管曲线的扭结中。在没有任何外部光学传感器的情况下，它可轻松测量阈值电流。对于示值电流范围，器件符合激光安全等级1。

图6(右)展示了随电流变化的光谱漂移

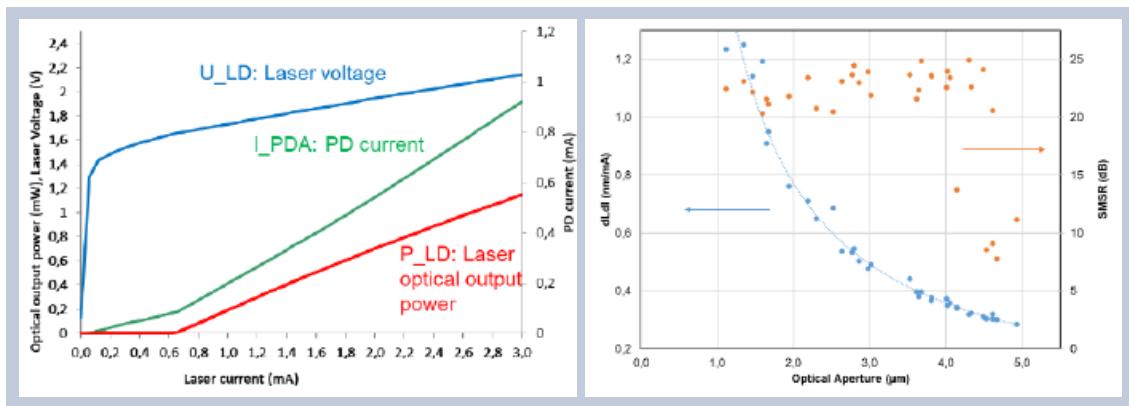


图 6:
左:ViP在连续波工作中的光电特性。
右:随着电流变化的光谱漂移和边模抑制比(SMSR), 在2.4 mA电流下测得的孔径函数。

可靠性测量

图7所示：激光输出功率和光电二极管电流结果与应力时间的对比。在超过4000小时的情况下，这两个数值都稳定在10%以内。事实上，主要的影响是在最初几百小时内会有一个烧伤。之后，衰减变得非常慢，并且在数千小时内ViP表现非常稳定。完整的ViP表现类似

($d\lambda/dI$) 和边模抑制比 (SMSR)，两者都是光学孔径的函数。测试结果可以解释当孔径为4 μm 时，是单模发射；当孔径大于4 μm 时，则变为多模模式。对于SMI应用来说，要求ViP器件为单模，因此孔径小于4 μm 。

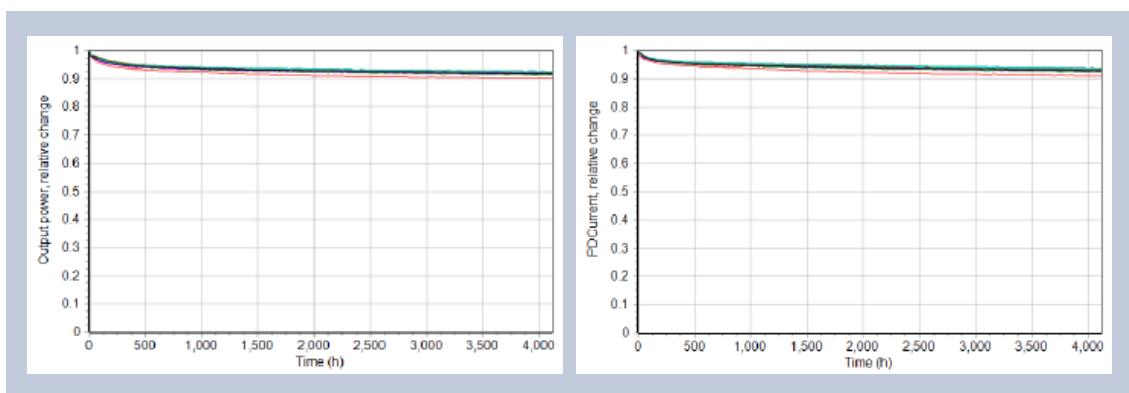


图 7:
应力电流在2 mA、
 $T=65^\circ\text{C}$ 和-1.5 V
PD偏置电压下的可
靠性测试。
左:输出功率衰减
与测试时间的对比。
右:光电二极管电
流衰退与测试时间
对比。

自混合干涉技术(简称:SMI)

自混合干涉(SMI)是指散射或反射的激光重新进入激光腔并与驻波发生干涉。根据反馈的相位,它可以减弱或增强激光振幅,该振幅由光电二极管或激光电压检测。

为了使反馈最大化,激光孔径通过透镜

成像在目标物体上。根据可能的放大率和足够大的数值孔径(NA)来捕获激光发射,透镜可能需要一个合适的尺寸和距离。该方法在明确定义点上效果最好,如果可以接受较低的信噪比(SNR),那它则可以在深度范围内和焦点附近工作。

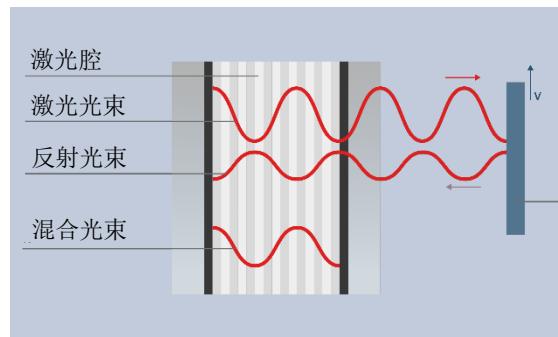
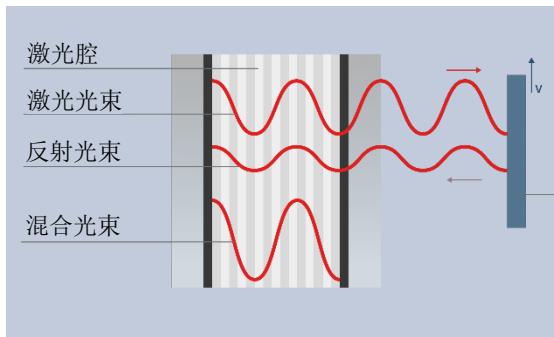


图 8 和 9:
左: 建设性反馈,
激光振幅在激光腔
内得到加强。
右: 破坏性反馈,
激光振幅减弱。

速度测量

如果一个速度为 v 的移动物体把光线散射回去,则反馈辐射的频率会因多普勒效应而漂移。激光振幅用拍频调制,拍频是对目标速度的测量。

图10(左)显示了理想的SMI振幅信号。右图显示了傅里叶变换到频域的信号,它可以识别多普勒频率,从而准确测量速度。

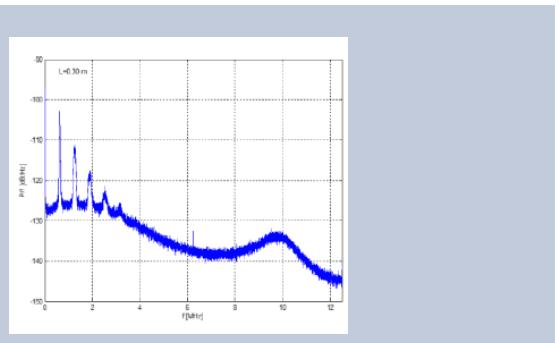
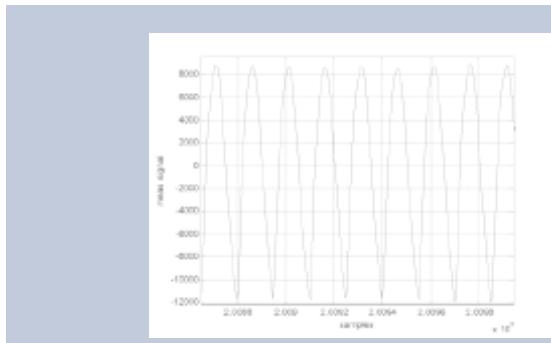


图 10:
左:理想的SMI振幅
信号。
右:中间信号的频
域显示了多普勒峰
值,具有>20dB
SNR和高次谐波。

距离测量

一个简单的技巧有助于测量相应地激光与反射物体之间的距离:用三角函数调制激光电流可以得到一个调制的激光内

部温度,从而得到一个调制的波长。反馈的波长漂移越大,物体距离越远。距离决定拍频。

相较其它传感器，SMI技术具有独特的性能

在宽泛的速度范围内，SMI测量可以达到0.1%水平的卓越准确度($10^{-4} \dots 10^2$ m/s)。这里的SMI可以和实验室仪器一样高下，但体积却要比它们小1000倍且成本更低。通过远程、非接触式测量就可实现这种精度，几乎适用于任何表面。SMI技术对环境光不敏感，并非源于激光传感器本身。值得再次注意的是，SMI激光系统设计保持在人眼安全范围以下。

由于VCSEL的相干长度，SMI传感技术理想的工作范围可达1米。

SMI是一项优秀的技术，我们可以利用它的稳固性、准确性，低功耗和紧凑型等优势来测量速度以及用户输入信号。接下来，我们将介绍一些应用程序，它们运用了SMI的优势并且展示了其出色的结果。

SMI的应用领域

图11展示了按照测量信号分组的一些SMI应用。速度和距离感测的结合可实现多功能的用户界面。高精度激光鼠标已经生产了十余年。和鼠标类似，我们可以设计手指触摸和滚动界面。新型“无质量”麦克风和测振仪也成为了潜

在的应用领域。以下部分给出了四个应用实例：高精度、宽泛的速度范围、微粒测量和眼动追踪。这也说明了该技术的多功能性，并且可以根据特定应用程序的要求调整硬件和算法的可能性。

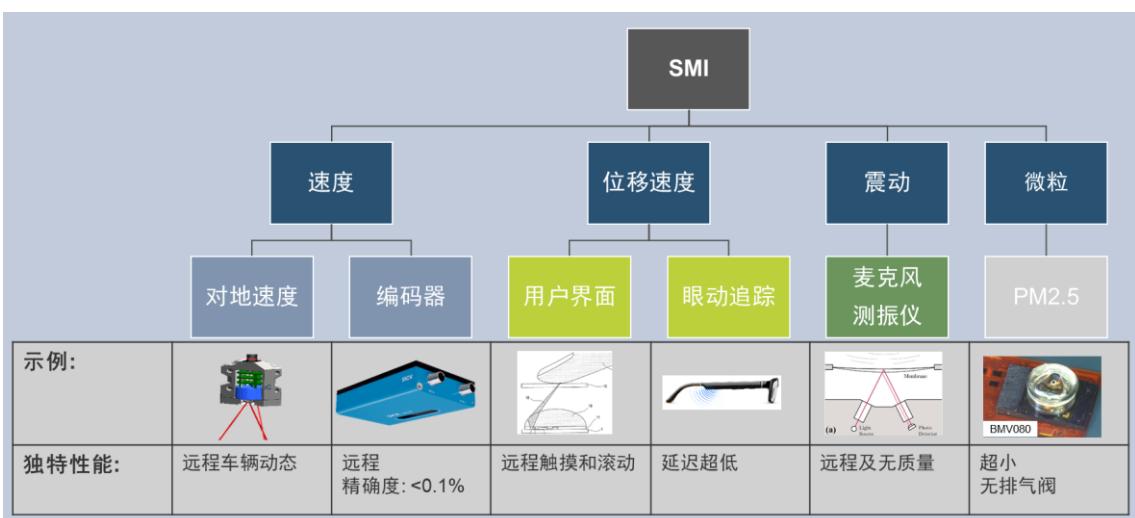


图 11:
SMI 系统的应用前景，包括典型示例及其独特性。

编码器

旋转编码器应用于工业领域，例如：工具或工件的移动测量。然而，精密材料需要的却是非接触式测量。通过上面给出的多普勒频率对来自移动物体的信号的补充解释，该信号也可以描述为调制激光功率的干涉条纹。条纹可以数出来，位移也可以计算。此方法适用于慢速移动，精度非常高。在典型实验中，其精度达到0.1%以上。图12是一个商用编码

器产品，它带有2个ViP且运用了SMI技术。使用两个相反倾角的ViP有助于补偿从未知角度到表面的误差，并减轻散斑的影响。该产品在工业应用中用于非接触式和高度精确的速度和位移测量。它适用于轮胎、纺织品、纸板、食品等各种散射面，工作距离为50毫米，适合任何背景光。



图 12:

左：编码器中配有2个SMI传感器。
中：带有透镜和电路的VCSEL, TO包装。
右：编码器产品SEPTEC, SICK公司出品。

对地速度

汽车应用中的速度测量通常基于轮速测量。如果地下很滑(雪、砾石)或汽车向车轮方向侧滑，则测试将失败。此外，制动控制使用每个车轮的速度来调节制动力，并且需要为转向做很大一部分预留。更好地了解真实的“对地速度”有助于缩短制动距离并在困难驾驶条件下，提高对汽车的控制。

SMI支持远程测量(道路)表面上方的实际速度。它不受雪地上强烈阳光的影响，甚至可以在有雾和喷水(不同速度且易于被过滤)的情况下工作。汽车有两个

运动轴和三个旋转轴，但带有三个独立传感器的SMI系统足以理清所有信息，如果我们用一些简单的边界条件，就可以给出一个真实的对地速度矢量和侧滑角。

在所有测试中，SMI的表现与汽车行业用于研发的最先进商业系统一样优秀。冬季在结冰的湖泊上进行了试驾；在高速公路和赛车中最高时速可达250公里。SMI能够在所有这些条件下工作。这次测试无疑是对SMI做过的最极限的考验。

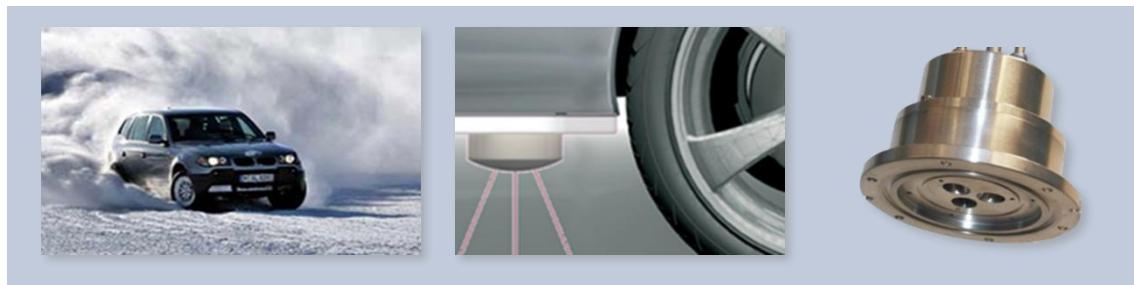


图 13:

测试期间潜在的不安全驾驶情况。汽车下方的3轴SMI系统可实现完美的速度和侧滑角测量。

PM2.5颗粒测试

空气中的颗粒物是导致中风、心脏病和肺癌的严重健康问题的因素。影响最大的是小于 $2.5 \mu\text{m}$ (PM2.5) 的颗粒。虽然每天的新闻中报道了城市的室外平均值，但随着时间的推移，局部或室内值可能会有很大的偏差。个人测量设备可以帮助调整你喜欢的运行时间和路线，或者帮你打开房间的空气净化器。到目前为止，传感器的尺寸对移动设备来说太大了。ViP和SMI可以让传感器轻松集成到消费类产品中，例如：可穿戴设备。传统的颗粒检测器通过内置风扇控制和加强空气流通。大尺寸、对通风孔的需求和通风噪音无法满足消费类产品的需要。博士颗粒物传感器 BMV080 是由 Bosch Sensortec 和通快合作开发。当颗粒物刚好出现在检测点附近时，它就可以测量出颗粒物的速度和浓度。图14就展示了这一原理。

颗粒物传感器BMV080包含三个不同方向的ViP，产生矢量平均速度。传感器模块可以像智能手机显示屏一样置于盖板玻璃下方。外壳上不需要开口，测量焦点在器件外几毫米处(见图15)。

图16展示了BMV080传感器的照片，它集成了三个ViP，ASIC和透镜。单个自由曲面透镜的光线追踪模拟说明了三个光束的聚焦。它的总体积是 $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ ，无疑是世界上最小的颗粒物探测器。

该模块能够抵御光线、水和盖玻片上的划痕。

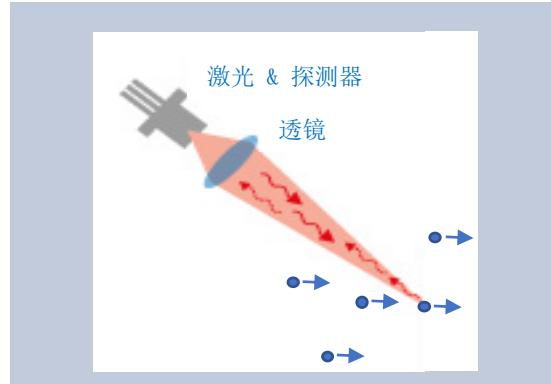


图 14:
SMI信号的原理，正在测量通过激光点的颗粒物。

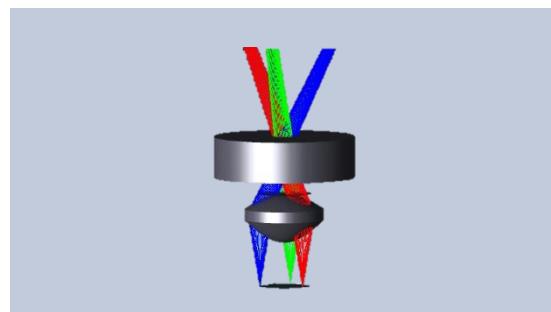


图 15:
光线追踪模拟，透镜成型的三束激光。



图 16:
微型PM2.5模块，它带有三个VCSEL、光学器件和ASIC。(BMV080由Bosch Sensortec生产)。

眼动追踪

眼动追踪速度是一种众所周知的技术，用于分析测试人员在风景或电脑屏幕前的行为/情绪/兴趣。在AR应用程序中，用户正在查看的对象信息有助于改善3D体验并避免视觉不适。此外，它还可以用作用户输入，通过凝视对象或眨眼来触发动作。最近，推出了用于消费类应用的AR护目镜，它所用的传感器具有轻便，紧凑以及价格合理等优势。

通常，眼动追踪基于成像技术。数据速率和信号处理所导致的是，要在低延迟和能耗之间需要做出权衡。特别是在快速扫视时，它有助于直接检测眼动速度。由于多普勒效应，在与激光相互作用点上，SMI技术可以感知眼睛旋转的速度

矢量。使用三角调制技术时，速度读数随三角调制频率更新，该频率通常在5 kHz和50 kHz之间。出于这个原因，SMI自然可以允许非常低的延迟测量(<1ms)。SMI传感原理的另一个优点是：由于ViP与光学器件和ASIC相结合，所以它可实现小型化，提供集成且非常紧凑的解决方案。它属于1类激光，以确保人眼安全。这种解决方案非常适合有限空间的近眼应用。目前正在研究的是多传感器的前景、局限性和优势。在与Bosch Sensortec的密切合作中，实验室已测量了一些自主眼部动作中眼睛的速度和距离(如图17所示)。详细的数据分析表明：SMI和带有ViP的传感器非常适合这种类型的眼部动作识别。

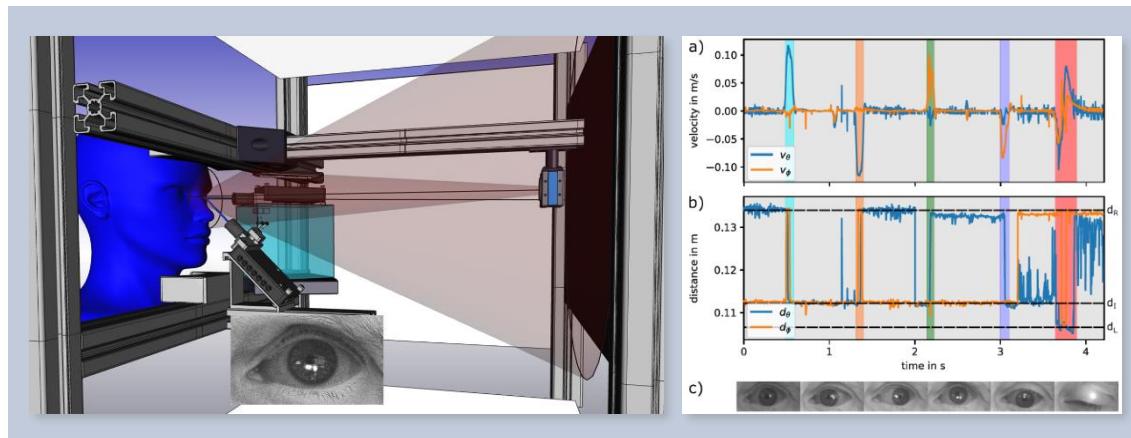


图 17：
左：同时使用SMI
和相机测量眼球运动。
右：自主眼部动作
测量。速度和距离
来源于SMI数据，
图片由摄像头拍摄，
表示了用户的眼部
动作。

结论与展望

带有集成偏振光栅和集成光电二极管的VCSEL在增加了新的功能的同时，也保持了VCSEL原有的紧凑性和稳固性。针对基于SMI的测量，ViP组件已进行了优化，将干涉测量精度与稳固性相结合。微型传感器已经在各种应用中展示出它们的优势：准确性、覆盖低速和高速、对微型颗粒和眼球运动的敏感性。

根据已证实的优势和大批量生产的能力，VIP和SMI的概念是未来消费电子产品的理想选择。在未来的可穿戴设备中将会发现更多的用户交互功能和新的可测量数据。VIP开发的下一步将包括开发新的波长以及将光学器件集成到芯片上。

致谢

在这里，要感谢我们的合作伙伴Sick AG和Bosch Sensorotec GmbH多年来富有成果的合作，并将SMI和ViP带入令人心动的产品中。

更多信息，请联系我们或访问我们的网站：
www.trumpf.com/s/optical-sensing
Photonic.components@trumpf.com



TRUMPF Photonic Components GmbH
Lise-Meitner-Straße 13, 89081 Ulm, Germany
Publ. 202302