

通向光版 CMOS 之路：悄然席卷全球的硅光子技术

单芯片上融合光电，光布线走向所有产品

为通信网络的进步做出贡献的“光布线及光路”开始在基板中采用。随着电信号方式的高速传输接近极限，光布线及光路作为亟需的替代技术引起关注。索尼在个人电脑上配备英特尔的光接口“Light Peak”，将于 2011 年夏季在欧洲投放市场。而且，该接口还将从 2012 年起在高密度封装要求较高的高性能服务器及手机等产品上得到全面采用。之后，光路的制造成本将大幅下降，光布线有望应用到所有产品上。另外，微处理器的全局布线等也显示出了采用光布线的可能性。而这些趋势的原动力就源于在单芯片上混载光路与电路的硅光子技术的进步。

光布线及光路在各种产品的基板上得到全面采用的时期已近在眼前。目前已有部分产品开始采用（图 1）。

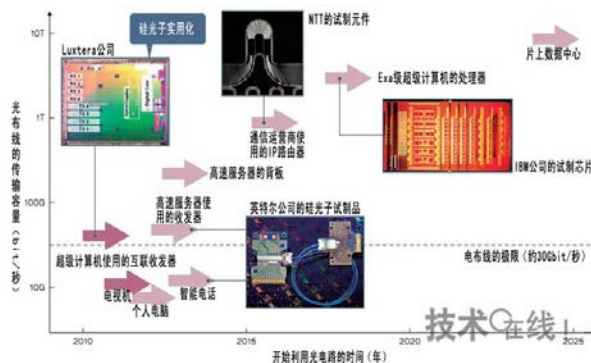


图 1：向普及进发的光配线及光路（点击放大）

2007 年底光电混载的收发器 IC 在全球首次投产，2010 年被东京工业大学的超级计算机“TSUBAME2.0”等采用。2012 年有望应用于智能电话、电视机及通信路由器，2017 年前后有望应用于超级计算机的处理器等。

比如，东京工业大学于 2010 年夏季构筑、并在 2010 年秋季的“TOP500”排名中位列世界第四的超级计算机“TSUBAME2.0”就是其中之一。在这台超级计算机中，单元间进行连接即互联的 7000 条光布线收发器采用了以硅光子技术在单芯片上集成光路和电子电路的 IC。

而且，个人电脑及电视机等家电产品对光布线的配备也已开始。打头阵的是索尼。该公司在个人电脑“VAIO Z”系列中采用了“Light Peak”，将于2011年7月底在欧洲投放市场。Light Peak是英特尔近几年开发的光传输接口。

此外，在手机及智能电话等身边的终端中，内部使用光布线的产品也有望在2012年亮相。

电布线越来越接近极限

布线方式从电布线转变为光布线的可能性不断提高，其原因在于，从耗电、设计自由度、电磁噪声（EMI）及布线空间等方面来看，电布线已越来越接近极限（图2）。也就是说，能够以电布线技术实现的产品内所需数据传输容量已接近极限，结果多种问题日益加重。

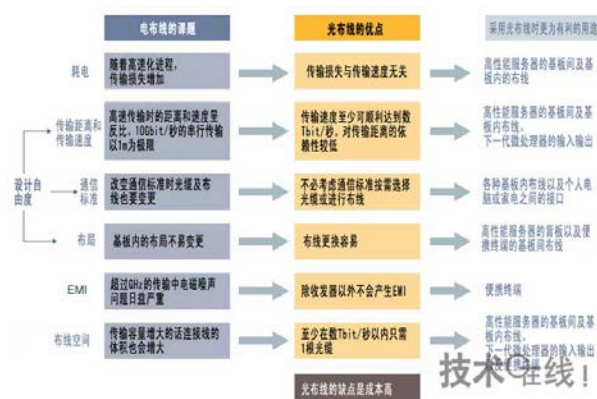


图2：电布线的课题和光布线的优缺点（点击放大）

电布线的课题大多可通过光布线来解决。不过，光布线存在成本高的问题。

电布线的极限是指，提高传输速度时，耗电量会急剧增加，传输距离变得非常短。“以前尽管电布线存在课题，但通过技术开发都能设法突破。然而，传输速度超过20Gbit/秒的话就会面临极限，即便采取对策，成本也会大幅上升。所以需要采用光布线，其背景就在于此”。（日立制作所中央研究所电子研究中心主管研究员辻伸二）。

耗电剧增成发展阻碍

实际上,有几项用途已处于没有光布线及光路的话今后就无望进一步发展的状态。其中,最具代表性例子的就是超级计算机。

在 2011 年 6 月公布的超级计算机“TOP500”排名中,日本理化学研究所的超级计算机“京”以超过 8P (P: 1015) FLOPS*的运算速度,使日本时隔 7 年再次位居世界第一。到 2011 年秋季,京的运算性能极有可能会达到 10P。不过,在全球激烈竞争下,“预计 2015 年将出现 100P 级、2018 年将出现 1000P (Exa) 级的超级计算机”(东京工业大学学术国际信息中心教授松冈聪)。

*FLOPS (floating point number operations per second) = 1 秒内可执行的浮点运算次数的单位。

运算速度达到 Exa 级水平的话,“即便是芯片间的短布线也不能再使用原来的 Cu 布线了,这时就不可避免地要采用将芯片的输入输出全部改换成光信号的技术”(松冈)。随着耗电进一步加剧,如果在已有电布线技术的延长线上制造 Exa 级超级计算机的话,耗电量就会达到 1GW 左右,这相当于一座典型核电站的发电量(图 3)。

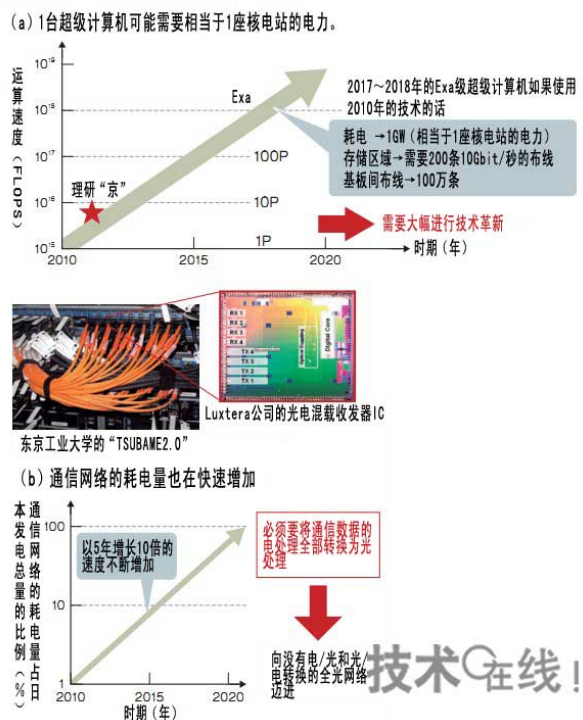


图 3: 在超级计算机及通信网中,耗电量剧增成为首当其冲的课题 (点击放大)

超级计算机向高速化发展的话,2017 年前后的“Exa 级”系统在运用时就有可能需要 1GW 的电力 (a)。而通信网络的数据量照目前的势头扩大下去的话,

2020年其耗电量就会用光目前日本的全部发电能力（b）。为了避免这些情况，只能全面导入光布线及光路等，使耗电量大幅下降。本图由《日经电子》根据采访内容制成。

要想解决这一课题，“必须进行某种技术革新。目前正在研究与芯片间的输入输出有关的手段，比如变更 DRAM 架构以及采用基于硅光子的光传输，等等”（英特尔架构事业部首席技术官兼中央架构与规划部门总经理庞思立（Stephen S. Pawlowski））。光布线的优点在于，与电布线不同，即使提高传输速度，传输线路上的损失也几乎不会增加。

通信网络的耗电量也在加剧

在超级计算机之外也存在耗电量将成为大问题的用途。这就是通信网络。虽然其大部分已在使用光通信，但在实施 IP 数据包路径控制的路由器内部却进行着“光电或电光间的转换”以及“利用电信号进行 IP 数据包处理”。

据 NTT 微系统集成研究所介绍，日本通信网络的路由器耗电量目前占日本总耗电量的约 1%。而且“还在以 5 年增长 10 倍的速度不断增加”（NTT 微系统集成研究所网络装置集成研究部纳米硅技术研究小组特别研究员山田浩治）。照此速度发展下去的话，5 年后就会达到日本总耗电量的 10%，10 年后就会达到 100%，届时日本全部的电力都将被通信网耗尽。

作为解决对策，绝招就是采用光路。“将路由器内部的处理全部转换为光处理的话，单位 bit 的耗电量就会降至 1/100 以下”（山田）。

在封装内配备光收发元件

除了超级计算机及通信网络之外，光布线及光路也开始在基板上配备。比如，高速服务器的背板等使用的 FPGA 就是典型案例。

在这一用途中，芯片间及基板间的数据传输速度已接近 100Gbit/秒，如果是普通 FR4 基板的话，甚至连基板内的布线都会变得很困难（图 4）。

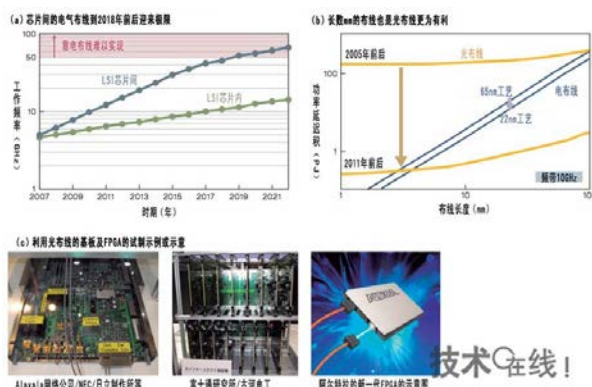


图 4：在基板间及芯片间布线方面，光布线也很有利（点击放大）

LSI 的工作频率，尤其是芯片间的工作频率今后将会急剧上升，到 2018 年前后将达到以电布线难以实现的 50GHz (a)。而另一方面，光布线技术会迅速向低耗电化及低延迟化推进，即使是数 mm 的短距离也将比电布线变得更有利(b)。这样一来，就会为服务器的基板内、基板间以及 FPGA 的输入输出端子等顺利做好采用光布线的准备 (c)。本图根据 ITRS 2007、PETRA、NEC 的资料制成。

而光布线技术不同，收发部的耗电量等近几年在大幅下降。以布线的性能指标“功率延迟积”比较的话，有利于光布线的传输距离的极限从数年前的约 10cm 迅速缩短到了数 mm。这意味着，即使在芯片间布线乃至芯片上的全局布线，光配线也变得更为有利。

美国阿尔特拉(Altera)是首家抓组这一趋势的 FPGA 厂商。该公司计划 2012 年供应通过在封装内配备两组光收发模块用光输入输出数据的 FPGA 产品。将利用光接口实现目前已成为芯片间实际传输极限的 28Gbit/秒的数据传输速度。

智能电话也将在基板中采用光布线

光布线及光路的采用在更贴近身边的电子产品中也得到推进。这些产品就是智能电话等便携终端及电视机等家电。“在智能电话的模块厂商中，有厂商将从 2012 年春季前后开始供应采用我们光布线的产品”（德国 Silicon Line 公司日本区域经理多田敏宏）。

原因之一也是基板上的数据传输速度急剧提高（图 5）。不过，目前智能电话等便携终端的数据传输速度为 6Gbit/秒左右，与信号的电传输极限尚无直接

联系。但重要的是，“高密度封装化的便携终端随着向高速化发展，连接液晶面板与机身的同轴细线的体积不断增加，EMI 也在增大，这些问题日趋严峻”（多田）。而将电布线改为光布线，便可解决这些问题。

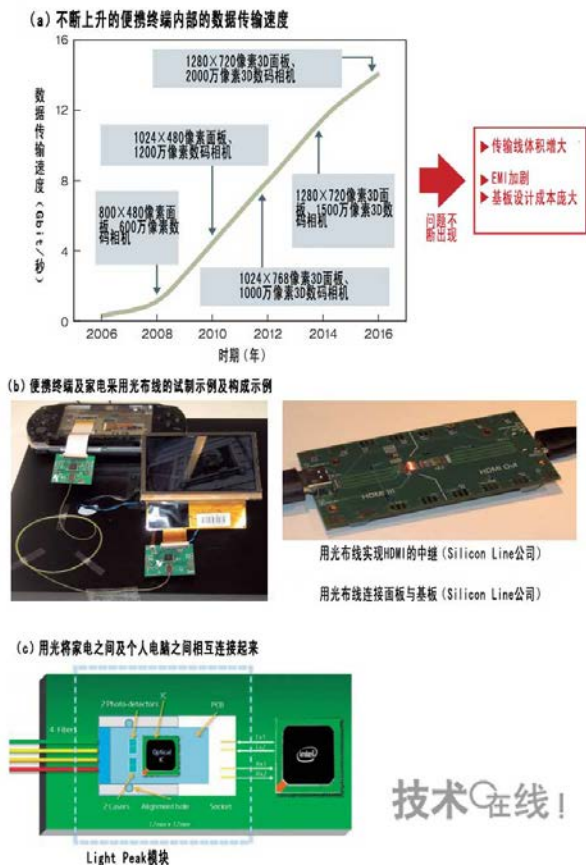


图 5：在智能电话、游戏机及电视机领域，在机壳内或基板上采用光布线的时期也已为时不远（点击放大）

智能电话等便携终端内部的数据传输速度急剧提高，到 2011 年将达到 6Gbit/秒左右 (a)。在这一背景下，厂商对光布线的关注度日益提高 (b)。英特尔将在 2011 年内将“Light Peak”投入产品中 (c)。

英特尔推进的 Light Peak 也设想用细光纤以 10G~100Gbit/秒的传输速度将电视与硬盘录像机以及其他家电连接起来。

通向光版 CMOS 之路硅光子——探索通向光版 CMOS 之路

随着光布线导入的加快，上述课题有望得到稳步解决。以前，构成光路的各元件，比如光收发元件及调制器等，其尺寸要远远大于电路元件，因此光路模块的尺寸巨大。而且，以离散元件为中心，还采用各不相同的材料。其中有很多元

件使用含有砷化镓 (GaAs) 及磷化铟 (InP) 等稀有金属的化合物半导体。此外, 由于光纤及导波路中光通过的芯线直径只有数 μm , 因此组装模块时, 需要以 $1\ \mu\text{m}$ 以下的高精度对齐光轴。这些都会导致制造成本的增加, 最终造成产品价格的上升。

不过, 从 2006 年前后起情况发生大幅变化。利用称为硅光子的硅材料及半导体工艺制造各元件的技术相继被开发了出来 (图 6)。这样, 各元件的尺寸便从 2005 年前后的数 mm~数 cm 减小到了约 1/100, 目前仅为数十 μm ~数百 μm , 实现了小型化 (图 7) 注 1)。

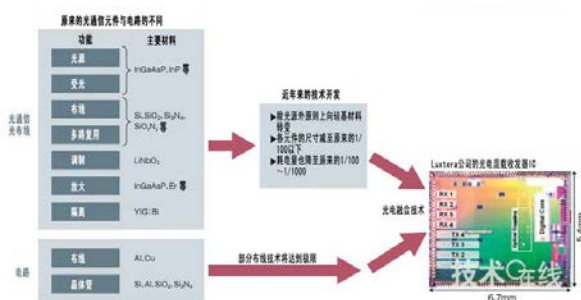


图 6: 光路最终也将向硅整合 (点击放大)

以前用各不相同的材料制造的光路各元件已能够以硅材料为基础来制造。包括电路的全局布线等在内, 用硅基板及 CMOS 技术制造光路的动向逐渐扩大。Luxtera 公司的光电混载收发器 IC 就是以 130nm 工艺的 CMOS 技术制造的。

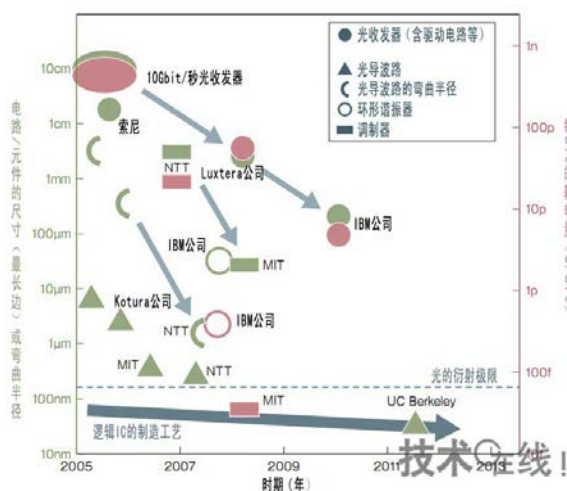


图 7: 光路及光元件的尺寸和耗电量接近电路 (点击放大)

图中列出了近 5 年来光路各元件的小型化和低功耗化趋势。众多元件减小到了 $100\ \mu\text{m}$ 见方左右或以下，仅为数年前的 $1/100$ 以下，实现了与电路的模拟元件相同程序的尺寸。在每 bit 的耗电量方面，有的还降到了数年前的 $1/1000$ 。

注 1) 在小型化的同时，元件构造等也得到了改进，因此光路的耗电量大幅降低。在调制器中，有的甚至使每 bit 的耗电量从数十 pJ/bit 降到了仅为 $1/1000$ 的数 fJ/bit 。

其中，相当于电布线的光导波路实现了与半导体数代前的设计规格相同程度的尺寸。这源于芯线材料由光纤等采用的石英 (SiO_2) 基材变为了硅基材料，芯线直径由此从原来的数 μm 减细到了数百 nm 。如果能够通过硅半导体技术将各种光路集成到 1 块芯片上的话，还可减轻光轴对齐作业负担，使制造成本得以大幅降低。而且最重要的是，为实现在单芯片上与电路的混载带来了可能性。

目前已有在这些方面抢先的产品亮相。美国 Luxtera 公司于 2007 年底制造出了用硅光子技术将光源以外的光路与驱动器及放大器的电路集成在 1 块芯片的、数据传输容量达到 40Gbit/秒 的收发器 IC。2009 年，该 IC 被东京工业大学导入其超级计算机 TSUBAME2.0，用于对单元间进行连接的约 7000 条的光互联。

光布线有望爆发性普及

随着硅光子技术今后的发展，以前因制造成本高而难以导入的光布线有望向所有产品爆发性普及。基板间及芯片间的连接自不必说，处理器的全局布线也将向光布线转换。

硅光子技术的定位已开始大幅变化。原来的光布线及光路以通过光来接替实施电布线无法实现的长距离数据传输的形式实现实用化。也就是说，光布线的实用化将按照通信网络到服务器机壳间的连接，再到基板间及基板内的顺序推进，而硅光子排在最后，一直被认为是仅对高性能处理器的芯片内部进行处理的技术（图 8）。

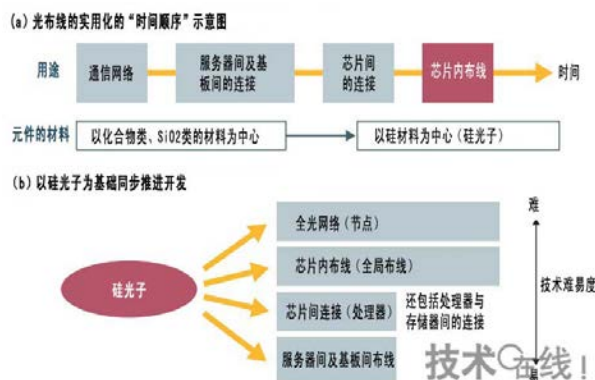


图 8：光布线及光路的开发在所有用途方面迅速推进（点击放大）

原来光布线及光路一直按照各项用途来选择材料（a）。而最近，光布线及光路的开发以硅光子为基础技术，在各用途方面同步推进（b）。

然而，本该排到最后的硅光子技术如今却成为了所有开发的基础技术。开发顺序被打乱，面向各项用途的光布线及光路的开发以硅光子技术为基础同步展开。

在电路中，用途不同的产品均使用晶体管及电容器。而今后光路将不分领域地组合使用功能与电路基本相同的光元件。这样，各光元件的制造成本就会进一步下降。价格下降的话，普及就会进一步推进，而这反过来又会促进新一轮的价格下降。硅光子的进步将使这种良性循环成为可能。

日美欧接连启动国家项目

以基于硅光子技术的 IC 实用化为契机，研发体制也发生了变化。以往的研发总的来说是以学术机构为中心推进的，而如今正在走向以厂商主导的实用化为目标的真正形式。其中尤其要提到的是意在通过硅光子技术使处理器性能得以飞跃性提高的技术开发，在国家支援体制下，日美欧厂商及研究机构展开了激烈竞争。

在日本，由产官学共同参与的“PECST”*项目于 2010 年 3 月启动。在美国，美国华盛顿大学和英特尔 2011 年 2 月启动了“OpSIS”*项目。此前美国政府已于 2008 年 3 月启动“UNIC”*项目。在欧洲，除了 2008 年启动的“HELIOS”*项目之外，目前还有在欧盟支援下开展的约 10 个项目。

*PECST (Photonics-Electronics Convergence System Technology) = 作为日本内阁府最推进的尖端研究开发支援项目 (FIRST) 之一，有由东京大学教授荒川泰彦带领启动的光路与电子电路融合技术的开发项目。除多所大学和产综研之外，还有企业开发组织“PETRA”参加。

*OpSIS (Optoelectronics Systems Integration in Silicon) = 2011年2月由华盛顿大学 (University of Washington) 主导启动的硅光子开发项目。英特尔以项目出资的形式参加。

*UNIC (Ultrapformance Nanophotonic Intrachip Communication Program) = 美国国防部下属的高级研究计划局 (DARPA) 于 2008年3月以向当时的美国太阳计算机系统 (Sun Microsystems, 已被美国甲骨文公司收购) 提供预算 (4430万美元) 的形式启动的硅光子开发项目。为期5年。有Luxtera公司、Kotura公司、美国加州大学圣地亚哥分校 (UCSD)、美国斯坦福大学 (Stanford University) 等参加。

*HELIOS (pHotonics ELectronics functional Integration on CMOS Optoelectronics Systems Integration in Silicon) = 欧盟于2008年启动的“片上兆兆位 (Terabit On-Chip)”技术开发项目。

这些开发项目的目标都是开发被称为“片上兆兆位 (Terabit On-Chip)”、“片上服务器 (Server On-Chip)”及“片上数据中心 (Datacenter On-Chip)”等 LSI 及处理器。正如这些名称一样, 目标是以单芯片实现相当于一台或数十台高性能服务器的性能。目前已有相关技术方案被提出, 比如, 在全局布线等方面利用光布线, 通过波长多路复用技术像高速公路出入口一样从各芯线收集数据传输速度为数十 Gbit/秒的信号, 由此实现最大数 Tbit/秒的大容量传输大容量 (图9)。

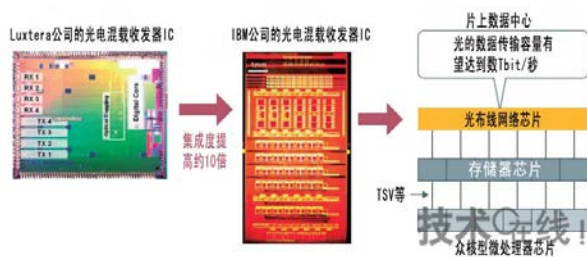


图9: 以实现片上数据中心为目标 (点击放大)

硅光子技术的目标之一是通过将 LSI 的全局布线转换为光布线来大幅提高性能的“片上数据中心”。IBM 有望 2017 年实现这一目标。

目前在开发上领先一步的是 IBM 公司。IBM 于 2006 年启动名为“SNIPER”* 的开发项目, 开始开发与光路的各元件及集成化相关的技术。“已发表论文 50 多篇, 获得的专利也有 30 多项” (IBM 硅集成光子学技术负责人 Yurii A. Vlasov)。目标是为 IBM 力争在 2017~2018 年启动的 Exa 级超级计算机开发处理器。

*SNIPER (Silicon Nanoscale-Integrated Photonic and Electronic Receiver) = IBM 从 2006 年起一直持续推进的硅光子开发项目。

实际上, IBM 已于 2010 年底开发出了高集成度的收发器 IC, 与 Luxtera 公司以 130nm CMOS 工艺开发的光电混载 IC 相比, 集成度约为其 10 倍。光导波路等的设计采用了 65nm 工艺技术。IBM 表示, “目前技术开发已经有了眉目, 通过在 5mm 见方的芯片上集成 50 条 20Gbit/秒的传输通道, 有望实现 1Tbit/秒的数据传输容量” (Vlasov)。

接近标准技术的光接收元件

虽然这些都是硅光子技术, 但目前都还处于开发阶段。由于开发这些技术的厂商及研究机构不同, 因此元件的工作原理、构造及集成方法等也各异(图 10)。要素技术处于分散状况的话, 制造成本的降低效果就有限, 因此很难形成像电路的 CMOS 工艺那样的冲击力。光技术也需要能够将全球研究人员的智慧聚集起来的、像 CMOS 那样的标准技术平台。

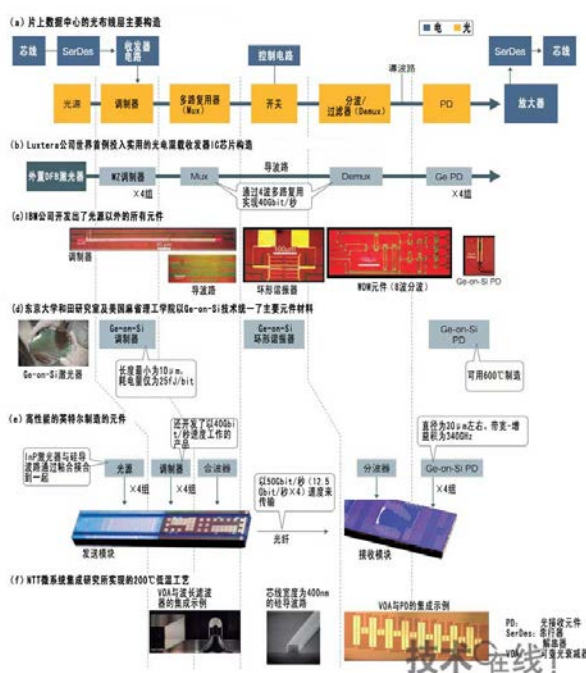


图 10: 各光元件的制造技术各异 (点击放大)

图中列出了片上数据中心的光布线基本构成 (a), 以及各厂商及研究机构的开发状况 (b~f)。即使是相同的硅光子技术, 各元件在材料及构造上也存在多种选择, 而且电路构成也不同。不过, 只有在光接收元件 (PD) 方面, 大部分的厂商采用了 Ge-on-Si 型。摄影: (d) 为美国麻省理工学院, (e) 为英特尔、(f) 为 NTT 微系统集成研究所。

目前来看，有望成为标准技术的是美国麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology, MIT）及东京大学教授和田一实的研究小组开发的 Ge-on-Si 技术。截至目前，利用该技术已开发出了光接收元件（PD）、调制器以及光发射元件。能够以基本相同的材料制造不同功能的元件是确立标准技术时的重要因素。

其中，Ge-on-Si PD 得到其他大部分研究小组的采用，朝着成为硅光子领域的标准技术的方向迈进了一步。

IBM：“外置是合理的做法”

对硅光子而言，实现起来门槛最高的是光发射元件。即使是 Ge-on-Si 技术，制成光发射元件的话也仅停留在注入光后确认有激光振荡现象的阶段。而要想实现实用化，则必须能够用电流来驱动激光器，目前尚未达到可立即使用的阶段。

但这并不是说其他的光发射元件技术就有成为标准技术的实力。其最大原因在于块状硅的能带结构为“间接迁移型”，不能高效发光。

厂商及研究机构的解决方法大致可分为 3 种：①放弃在硅上制作光源的现有做法，通过外置的激光元件向芯片内部导入光；②将利用化合物半导体制造的激光元件与硅芯片贴合；③通过某种手段使硅等直接发光。

*间接迁移型=半导体能带结构分类之一。从能量和波数来看能带的话，导带中能级最低点的波数与价带中能量最高点的波数不同。由于波数与运动量等价，在载流子迁移前后难以满足“运动量守恒定律”，因此很难发光。

采用方法①的是 Luxtera 公司和 IBM 公司等（图 11）。比如，Luxtera 公司的光收发器 IC 在芯片内将 1 个外置激光元件的光分为 4 束，向 4 个解调器供给。IBM 选择该方法的原因在于，“与其他元件相比，激光元件的耗电量最大，可靠性也较低。与 IC 分开设置的话，发生问题时更容易处理，所以是合理的做法”（IBM 的 Vlasov）。

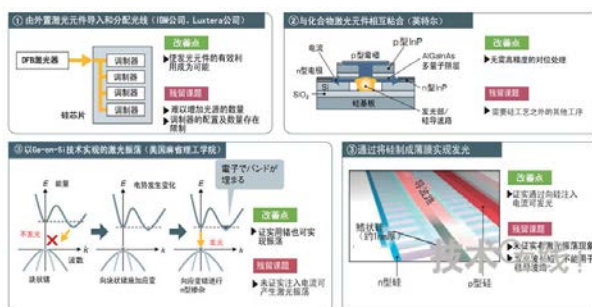


图 11: 对硅芯片上光源的开发进行反复摸索 (点击放大)

为了解决实现硅光子时成为最大障碍的光源课题, 众多厂商及研究机构向各种技术开发发起了挑战。在原来公认因能带结构为间接迁移型而不发光的 Ge 及 Si 方面, 也开发出了通过带隙工程使之发光的技术。

对该方法持否定态度的是英特尔。“设计自由度低, 增加所需光源时无法满足, 因此我们不会使用” (英特尔的庞思立)。

英特尔选择粘合方法

英特尔始终设法在硅上形成发光元件, 持续进行了 6 年多研究。最初发表的是③中的技术。该公司 2005 年 2 月宣布开发出了硅制拉曼激光元件。不过, 该技术是通过射入激励光的光激励来实现振荡, 似乎还未能证实能够通过电流激励来产生振荡。

接着, 英特尔 2006 年 9 月宣布与美国加州大学圣塔芭芭拉分校 (University of California, SantaBarbara, UCSB) 共同开发出了“混合硅激光器” (图 11)。这就是②中提到的技术, 该技术是将 InP 等化合物半导体激光元件与硅光导波路粘合在一起。与其他的粘合技术不同, 将硅导波路用作激光元件的谐振器的一部分, 因此可通过改变硅导波路的设计来决定发光波长。另外也不需要采取以高精度对齐光轴等以往存在课题的处理, 所以还具有可降低制造成本的优点。目前英特尔在硅光子光源中采用的也是该激光器技术。

不过, 在硅芯片上粘合化合物半导体的技术即便在电路的 CMOS 工艺中也几乎没有实用化案例。英特尔也似乎并未将其当作最终解决方案, 目前仍在继续进行多种探索。2010 年 12 月, 英特尔开始向拥有量子点激光器技术的东京大学纳米量子信息电子研究机构实施 3 年共 50 万美元的出资, 在光源方面展开了共同研究。

通过控制带隙来实现发光

在③方面，不仅是英特尔，其他公司也在积极追求这一终极目标。前面提到的美国麻省理工学院利用 Ge-on-Si 技术开发的激光元件也是其中之一(图 11)。块状锗 (Ge) 与硅一样，因能带结构为间接迁移型而无法发光。但美国麻省理工学院发现，对 Ge-on-Si 元件进一步进行 n 型掺杂就会产生激光振荡现象。其原因在于电子“吸收”了不会迁移的导带电势，从而使可迁移的其他电势发挥了作用。但是未能证实可通过电流激励实现发光。

日立制作所从 2006 年起就一直在从事使硅本身发光的研究。这一研究获得成果的话，便可利用硅基材料制造从光接收元件到光发射元件的所有元件，硅光子技术将由此获得巨大发展。

日立制作所证实，将硅制成 1~数 nm 厚的薄膜状，能带结构就会改变，从而实现发光。不过尚未达到激光振荡的水平。“现已证实，采用我们公司于 1989 年开发的鳍型晶体管构造来形成多量子阱，可实现光的放大”（日立制作所通信电子研究部主任研究员菅原俊树）。

通过 MEMS 来补偿波长的变化

对光路而言，调制器的重要性仅次于光接收元件及光发射元件，最近该元件在结构及特性上改善最为显著。按照构造，调制器大致可分为 MZ 型调制器*、环形谐振器及电场吸收型 (EA) 调制器 3 种。这些调制器各有优缺点 (图 12)。Luxtera 公司以及由日本厂商组成的硅光子开发组织“PETRA”*等采用的是实用化案例丰富的 MZ 型调制器。不过，MZ 型调制器用硅来制造的话，尺寸略大，达到 $100\ \mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 。因此，“能够以 $30\ \mu\text{m}$ 左右直径来制造的环形谐振器获得越来越高的人气”（某硅光子技术人员）。

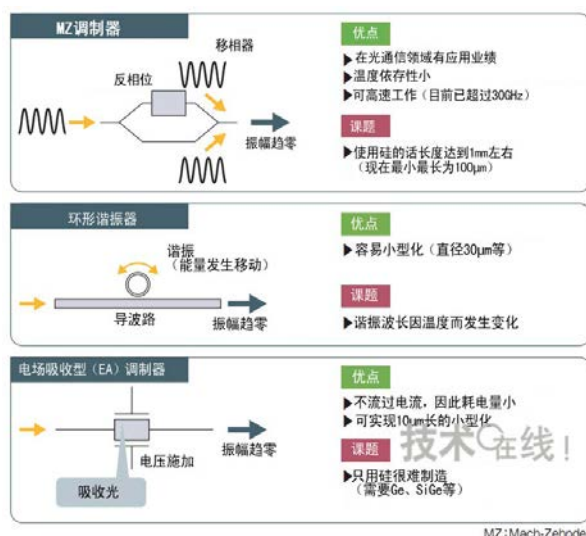


图 12: 按构造的话调制器有 3 种 (点击放大)

本图列出了硅光子利用的 3 种光调制器的优点和课题。以前, 不易小型化但又拥有丰富应用业绩的 MZ 型调制器被大量使用。最近, 对环形谐振器的温度依存性进行补偿的技术成为开发焦点。

*PETRA (Photonics Electronics Technology Research Association) = 技术研究组合光电子融合基础技术研究所。由富士通、日立制作所、三菱电机、NEC、NTT、OKI 于 2009 年 8 月共同成立的光传输技术研发组织。取得成果的话, 还考虑直接作为企业开展业务。

*MZ 型调制器=Mach-Zehnder modulator。该调制器将导波路分成两支, 通过对其中一支的光波进行反相位调制, 在重新汇合时消除振幅。

不过, 环形谐振器也存在课题。这就是容易受周围温度变化的影响。温度有变动的话, 导波路的折射率就会变化, 使光的实效路径长度发生改变。这样一来, 谐振频率 (波长) 也会随之改变, 从而给波长多路复用技术的利用等带来不利影响。

尽管如此, 环形谐振器的人气仍然非常高, 其原因就在于已开始有研究提出对温度依存性进行补偿的技术。比如, 东京大学的和田研究小组提出, 对通过 MEMS 技术制造的悬壁型硅材料进行弯曲时, 其变形会使带隙值发生变化, 可利用这一点来实施补偿。

从小型化的观点来看, EA 调制器也是可供选择的方案之一。不过, 该调制器只用硅的话无法制造, 必须利用需在制造工艺上下工夫的 Ge 等。最近, 在光吸收材料方面, 还出现了利用有助于碳原子形成二维片状的石墨烯的案例。美国加州大学伯克利分校 (University of California, Berkeley) 用石墨烯制造

出了面积非常小,仅为 $25 \mu m^2$ 的 EA 调制器。虽然该调制器目前的工作频率很低,只有 1GHz,但理论上可达到 500GHz。

集成方法也有很大差异

在硅光子领域,将各元件集成在芯片上的工艺也因厂商及研究机构不同而存在很大差异(图 13)。

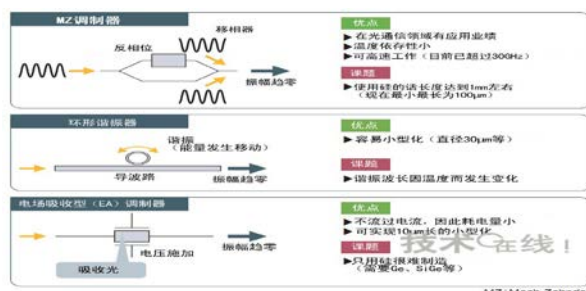


图 13: 光路与电路集成的方法也不同（点击放大）

对电路和光路进行集成的方法大致有 3 种 (a)。IBM 公司及 Luxtera 公司等几乎是同时形成电路和光路,而日本 PETRA 则采用重视材料选择自由度及设计自由度的粘合技术 (b)。本图由《日经电子》根据 PETRA 的资料制成。

IBM 公司及 Luxtera 公司对光发射元件以外的光元件采取与晶体管等同样用 CMOS 前端工艺来制造的方法。另外,英特尔也打算以布线等的 CMOS 后端工艺来制造光元件。

而 PETRA 则按照电路和光路分别制造 IC 芯片,然后粘合起来。虽然 CMOS 工艺和粘合工艺各有优缺点,但以前电路的 CMOS 技术曾通过采用相同工艺来集成各种功能的电路降低了成本,从而超越其他技术,从这一历史来看,光元件的集成方法也很可能会最终向 CMOS 工艺整合。