高带宽的石墨烯辅助超紧凑型偏振分束器和旋转器

摘要：

硅与周围覆层之间的高折射率对比使绝缘体上硅器件具有高度偏振依赖性。然而，非常需要许多应用来解决硅光子学中的偏振依赖性问题。在这里，提出了一种新型的超紧凑型偏振分束器和旋转器（PSR），该结构由绝缘体上硅平台上的不对称定向耦合器构成，该耦合器由肋硅波导和石墨烯嵌入肋硅波导（GERSW）组成，并且调查。通过调整石墨烯的化学势，利用GERSW的TE模式有效折射率的大调制，可以在宽光谱带上很好地满足相位匹配条件。呈现的结果表明，对于耦合长度为11.1μm的7层石墨烯嵌入式PSR，可以在1516至1602 nm的较宽带宽上实现较高的TM到TE转换效率（> -0.5 dB） 。

引言：

基于绝缘体上硅（SOI）的集成光子器件因其与成熟的互补金属氧化物半导体兼容技术的兼容性而吸引人。尽管硅与周围包层之间的高折射率对比度具有构造具有紧凑占位面积的光子器件的优势，但不可避免地对处理偏振依赖性提出了重大挑战。为了解决这个问题，由偏振分束器和旋转器组成的偏振分集电路是非常理想的2、3、4、5、6。偏振分束器可以将一个具有两个正交偏振态的输入光束有效地分成两个偏振态不同的输出光束3,5，而偏振分束器可以将输入光束的偏振旋转90°4。对于许多应用，在其余的光路中，只能引导特定的偏振态。因此，非常需要开发一种偏振管理装置，该装置能够将两个偏振态之一旋转到正交态，使得在其余的光路中仅需要处理一个偏振态。近来，已经强烈建议一种类型的偏振分束器和旋转器（PSR）技术来实现该目的。利用该技术，使用定向耦合器将输入光束的一个偏振态转换为正交偏振态。同时，因为在定向耦合器7、8、9、10、11、12的区域中没有耦合发生，所以输入光束的正交偏振状态几乎不受影响并通过输入波导输出。其中，使用由两个对称性破损的波导构成的非对称定向耦合器（ADC）的PSR引起了很多研究关注[8,12]。但是，该方案最明显的缺点是它只能在有限的带宽内运行，因为ADC的相位匹配条件必须精确满足。尽管已经采取了有希望的步骤来利用锥形9、10和锥形蚀刻的7,11 ADC来扩大操作带宽，但它通常伴随着相对较大的占位面积，这与SOI平台上的高密度集成背道而驰。

石墨烯是排列成六边形晶格的二维碳原子单层，由于其独特的光学和电学性质，近年来引起了极大的关注。由于石墨烯通过偏置电压和化学掺杂而具有大而灵活的可调谐性，因此石墨烯正在成为吸引人们关注的材料，用于开发高效的光电器件，包括电吸收调制器13、14、15、16和电折射调制器17。最近的一项研究表明，当石墨烯参与介电波导时，石墨烯将对不同极化状态的硅波导的模态特性产生不同的影响，从而提供了强大的能力来解决强极化依赖性5、18、19、20。

在本文中，我们提出并使用石墨烯嵌入的硅肋ADC数值演示了一种新型PSR。当石墨烯水平嵌入肋硅波导（RSW）中时，通过偏置电压调整石墨烯的化学势，TE模式的有效折射率（ERI）会发生显着变化。因此，通过适当地选择石墨烯的化学势的变化范围，可以在宽的光谱带上满足ADC的相位匹配条件，因此可以显着地扩大PSR的工作带宽。

结果与讨论：

石墨烯嵌入的肋硅波导（GERSW）如图1（a）所示。硅层和二氧化硅层的相对介电常数分别为12.04和2.0921，并且在“方法”部分提供了石墨烯层的光学性质。石墨烯多层的化学势对TE模式的模态特性的影响要比TM模式的化学势更强[如图1（b）和（c）所示]。例如，TE模式的Re（n）在1450 nm处的最大值和最小值之间的差异为0.057，而TM模式的Re（n）仅为0.024。在感兴趣的波长范围内，由于石墨烯的电导率在μc = 0.4 eV22附近发生急剧变化，因此TE和TM模式的模态特征均呈现出尖峰。应该注意的是，图1（b）中的峰值处的TE模式的传播损耗与图1（c）中以星号表示的Im（n）值相对应，远大于选择TE模式时，选择一个稍大的μc。

考虑到这些要点，我们建议构建一个由GERSW和RSW组成的PSR，如图2所示。在ADC区域中，两个波导之间的间隙间隔（w间隙）保持不变，而S形弯曲波导连接到GERSW。金属1和金属2充当两个电极。 TE模式的模态场在RSW的中心最强。因此，为了增加对TE模式的模态特性的影响，必须将石墨烯层插入RSW的中心以最大化石墨烯-光的相互作用。此外，如果使用更多的石墨烯层，TE模式的模态特性会受到更大的影响[18,22]。在我们的工作中，我们选择了奇数个石墨烯层来说明PSR的性能。我们强调，偶数个石墨烯层也适用于PSR的设计，并且预期所得的PSR表现出相似的性能。我们已经注意到了一系列关于利用偶数个石墨烯层在硅平台上构造各种基于石墨烯的光电器件的研究，包括硅波导调制器14、23和偏振器18。奇数个石墨烯层延伸以接触金属1，其余层接触金属2。未掺杂的非晶硅的利用确保了在与金属电极23接触的石墨烯层之间形成电容器效应。因此，可以通过施加在这两个金属电极上的偏置电压来控制石墨烯层的化学势。石墨烯的化学势μc可以通过|𝑢𝑐| = ℏ𝑣𝐹𝜋𝜀𝑑𝜀0 |𝑉𝑔-𝑉𝐷𝑖𝑟𝑎𝑐| /（ℎ𝑑𝑒）by通过施加在石墨烯the上的栅极电压来调节。 ‾‾‾‾‾‾‾‾‾√ 22，其中𝑣𝐹≈1×106 m / s是费米速度，| 𝑉𝑔−𝑉𝐷𝑖𝑟𝑎𝑐 |因为𝑉𝐷𝑖𝑟𝑎𝑐接近零，所以它将是施加的栅极电压； 𝜀0和𝜀𝑑分别是空气的介电常数和硅的相对介电常数； ℎ𝑑和𝑒分别是相邻石墨烯层之间的硅层的厚度和电子电荷。在设计两个金属电极时，应在硅波导和电极之间保持一定距离，以有效消除电极对模态轮廓的影响13,18。对于PSR的制造，我们首先可以为RSW和两个金属电极准备两个荫罩。通过适当安排两个掩模的顺序，选择沉积方法，并至少从铜箔上转移石墨烯层（通过聚焦离子束在不使用掩模的情况下通过聚焦离子束蚀刻成“ L”形），至少可以提供所提供的PSR原则上，可能是捏造的。为了能够在两个正交的基本模式之间进行有效的转换，需要相位匹配条件。考虑到通过调节石墨烯的化学势，可以使GERSW中TE模式的模态特性比TM模式具有更大的变化范围，因此采用GERSW中的TE模式和RSW中的TM模式来满足相位匹配条件。在这种情况下，由于可以在宽频谱带内满足相位匹配条件，因此可以实现最大的工作带宽。此外，我们采用肋形波导来增加波导截面中的垂直不对称性，这有助于在基本TE模式和TM模式之间进行模式转换。通过优化两个肋形波导的宽度和耦合长度（L），可以将来自RSW的输入TM模式有效地转换为GERSW中的TE模式，并从交叉端口输出，而输入TE模式则不受影响，并且通过端口直接输出。

接下来，我们考虑设计的PSR在λ= 1550 nm时的性能。为了找到满足相位匹配条件的GERSW（wg）的最佳宽度，已对GERSW中基本TE模式的ERI作为wg的函数进行了数值计算[如图3（a）所示] ]。考虑到TE模式的Re（n）值大致位于调整范围的中间，因此将石墨烯的初始化学势设置为0.5 eV（见图1），这有助于简化操作的可调整性PSR的频率。在我们的工作中，将间隙间距w gap选择为150 nm，以制造出具有可接受的制造难度的紧凑型定向耦合器。可以通过使用较小的间隙间距来进一步减小与装置尺寸相关的耦合长度，但是以明显增加的制造难度为代价。在设计中，GERSW中硅层的总厚度设置为恒定值210 nm。 GERSW的高度h 2随着石墨烯数量的增加而增加。为了使两个波导具有相同的高度，RSW的高度h 2相应增加。 GERSW中TE模式的结果ERI [图。图3（a）]和RSW [此处未显示]中的TM模式分别随着石墨烯数量的增加而减少和增强。对于GERSW，如果使用更多的石墨烯层，则会导致TE模式的模态特性发生较大变化。然而，如果涉及更多的石墨烯层，则石墨烯数量对模态特性的影响将被减弱，使得顶部和底部的石墨烯层趋于具有更少的与模态场的相互作用。因此，为简单起见，我们认为石墨烯层的数量小于7。对于不同的石墨烯数量，必须优化GERSW的宽度（w g0，w g1，w g3，w g5和w g7），以满足GERSW中的TE模式与RSW中的TM模式之间的相位匹配条件[图。 3（a）]。为了研究所设计的PSR的传播特性，已采用带有软件Lumerical MODE Solutions的三维特征模式扩展（EME）方法进行了仿真。之后，针对这五种情况优化耦合长度以获得最大转换效率[见图3（b）中的L 0，L 1，L 3，L 5和L 7]。如图3（c）所示，通过优化GERSW的宽度（w g7）和耦合长度（L 7），从RSW输入的TM被转换为GERSW中的TE模式，并从GERSW有效地输出。交叉端口，而启动的TE模式几乎不受GERSW的影响，而是直接从直通端口输出。因为在GERSW中TM模式的模态特性会因在μc = 0.5 eV附近使用不同数量的石墨烯层而受到微不足道的影响[图10。 [3（d）]，TM输入的PSR的波长依赖性几乎没有变化[图3（d）]。 3（e）]。应该注意的是，取回的耦合长度不可避免地必须偏离理论长度，这导致在1550 nm处不会出现最大转换效率。

考虑到可以通过偏置电压来调节石墨烯的化学势，我们进一步研究了μc对PSR性能的影响。首先，以具有七层嵌入式石墨烯的PSR为例进行研究。所有结构参数均与上述情况相同，在RSW中发射的TM模式可以在λ= 1550 nm时有效地转换为GERSW中的TE模式。对于TE模式输入，RSW中的TE模式与GERSW中的TE和TM模式之间明显的相位不匹配可防止光从RSW传输到GERSW [图10]。 4（a）]。换句话说，从RSW启动的TE模式将直接从直通端口输出，而与GERSW的交互很少。从图4（a）中可以看出，减小（增大）工作波长将使GERSW中TE模式的ERI小于（较大）RSW中TM模式的ERI。因此，对于λ<1550 nm的情况，转换效率的变化趋势随μc的变化而变化[不足。 4（b）]和λand> 1550 nm [图。 4（c）]。在λ<1550 nm（> 1550 nm）的情况下，可以通过调节石墨烯的化学势来提高（降低）GERSW中TE模式的ERI，使相匹配条件得到满足。因此，可以有效地扩展PSR的操作带宽。在λ＜＜ 1550nm的情况下，通过将μc从三角形标记位置调整到星形标记位置，可以使GERSW中的TE模式的ERI与RSW中的TM模式的ERI接近。但是，显着增加的传播损耗[见图1（b）]将抑制TE模式的传输。因此，在三角形标记位置处，在交叉端口处实现了转换后的TE模式的最大透射率。 4（b）]。在λ> 1550 nm的情况下[图[4（c）]，当λc = <1570和1590 nm时，当μc <0.8 eV时，可以实现最大透射率；在我们的例子中，λμ= 1610、1630和1650 nm时，最大透射率出现在μc = 0.8 eV处。 。可以高度期望的是，如果使用更高的石墨烯载流子密度以及更大的化学势，则可以进一步提高透射率。因此，为了在交叉端口上实现TE模式的最大传输，必须正确选择GERSW中TE模式的ERI和传播损耗。

图4（d）中描绘了μc的最佳值与波长的关系，以及μc与versus的关系。在这里，我们强调所需的𝑉𝑔与μc在0.4-0.8 eV范围内相关，低于11.7 V，这与基于石墨烯的SOI调制器中的comparable13、14、22、23相当。图4（e）和（f）表明，在μc优化之后，与在μc = 0.5 eV时相比，PSR的器件性能有了显着改善。在此，对于TE模式输入，将直通端口A2处的TE-TE转换效率（CE TE-TE）和交叉端口B2处的串扰（XT TE）定义为𝐶𝐸𝑇𝐸-𝐶𝐸𝑇𝐸= 10log [𝑃（ 𝑜𝑢𝑡）𝐴2𝑇𝐸/（𝑃（𝑖𝑛）𝐴1𝑇𝐸）]和𝑋𝑇𝑇𝐸= 10log [𝑃（𝑜𝑢𝑡）𝐵2𝑇𝐸/（𝑃（𝑜𝑢𝑡）𝐴2𝑇𝐸）]。对于TM模式输入，将交叉端口B2处的转换效率（CE TM-TE）和通过端口A2处的串扰定义为𝐶𝐸𝑇𝑀-𝑇𝐸= 10log [𝑃（𝑜𝑢𝑡）𝐵2𝑇𝐸/（𝑃（𝑖𝑛）） 𝐴1𝑇𝑀）]和𝑋𝑇𝑇𝑀= 10log [𝑃（𝑜𝑢𝑡）𝐴2𝑇𝑀/（𝑃（𝑜𝑢𝑡）𝐵2𝑇𝐸）]。如图4（e）和（f）所示，在优化PSR的化学势后，CE TM-TE的带宽（> -0.5 dB）已从58 nm（1533–1591 nm）扩展到86 nm （1516–1602 nm），而串扰XT TE和XT TM在感兴趣的波长范围内有了显着改善。无论使用哪种石墨烯的化学势，CE TE-TE在整个研究的谱带上均保持小于-0.02 dB，这可以归因于以下事实：由于TE模式通过ADC的影响很小。明显的相位不匹配。

我们进一步研究了石墨烯数量对设计的PSR带宽扩展的影响。如图5（a）所示，更多的石墨烯层导致PSR的带宽更宽。这是因为当涉及更多的石墨烯层时，ERI具有更大的可调谐性18。应当注意，TE模式的电场在波导的中心处最强。结果，中间的石墨烯层对ERI的变化贡献最大，而上下两侧的石墨烯层对ERI的影响较小。这就是为什么操作带宽的增长率随着石墨烯数量的增加而降低的原因[表1]。此外，我们研究了每两个相邻石墨烯层之间的间隙距离对PSR性能的影响[图2]。 5（b）]。对于每两个相邻的石墨烯层（10、20和30？nm）之间的三个不同的间隙距离，所得的器件性能几乎保持不变，这表明该设计对于制造变化非常可靠。

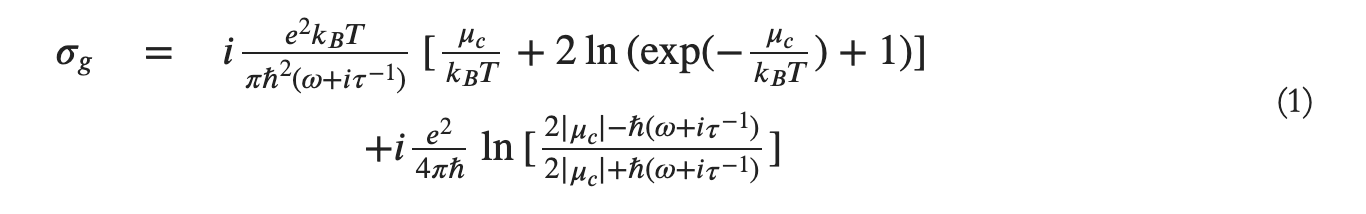
表2总结了来自最新文献和当前基于石墨烯的PSR的几种基于ADC的PSR的带宽。因为定向耦合器需要固有的相位匹配条件，所以对于基于ADC的PSR24,25而言，它的使用带宽明显受限。最近提出了基于锥形ADC的PSR来克服这一限制7，并且带宽被扩展为基于ADC的PSR的5倍24,25，但这是以相对较大的占用空间为代价的。一方面，对于当前的基于石墨烯的PSR，操作带宽可以是Refs24,25中的四倍，而其长度却比基于锥形ADC的PSR7的长度小几倍。我们在这里的结果可能会提供一种有前途的方法，以构建具有超紧凑尺寸的宽带高效PSR。我们注意到最近对混合（de）多路复用器的研究，该研究通过将模式，偏振和波长结合在一起以增加在硅平台上的传输能力26，其中偏振分集电路由偏振分束器（PBS）和偏振旋转组成（PR）用于解决偏振相关性问题，因此阵列波导光栅（AWG）仅保留TE模式。至少原则上，将PBS和PR结合使用的这种功能至少可以通过建议的PSR来实现，该PSR具有更大的工作带宽，这是9通道AWG所需的带宽，带宽为9×3.2 nm（28.8 nm）。此外，表2列出了有关在1550nm处嵌入7层石墨烯的PSR性能的更多细节，包括插入损耗和消光比。与基于锥形蚀刻的定向耦合器的PSR的仿真结果相比，我们的建议的目标是可比较的插入损耗，并显着减小器件长度。

最后，值得强调的是，启动TM模式时，可以通过调节石墨烯的化学势来调节交叉口处TE模式的透射率，而直通口处的透射率几乎保持不变[请参见蓝线 在图6中]。 此外，当启动TE模式时，石墨烯的化学势对TE模式在交叉端口和通过端口的传输的影响可以忽略不计[参见图6中的红线]。 交叉端口处TM模式的可变分光比功率可能在SOI平台上的信号处理中具有各种有趣的应用。 最后，值得强调的是，基于石墨烯的PSR可能对制造误差非常鲁棒，因为石墨烯提供了波导模式有效折射率可调性的额外尺寸，这为构建可行的PSR而无需重新设计提供了可能性。 优化和重新制造设备结构。

总结：

已经提出了超紧凑型PSR，并通过利用由RSW和GERSW组成的ADC进行了数值模拟。 可以通过调节石墨烯的化学势来显着改变GERSW的ERI的ERI。 结果，可以在宽频谱带上很好地满足RSW中的TM模式和GERSW中的TE模式之间的相位匹配条件。 PSR嵌入了七层石墨烯，耦合长度为11.1μm，间隙间隔为150nm，可在较宽的带宽（1516–1602160nm）内实现较高的TM到TE转换效率（> -0.5 dB）。 总体而言，这种设计的PSR具有强大的能力来解决1550 nm处的偏振相关性问题，包括TE到TE的直通损耗（> -0.01 dB），TM到TE的偏振转换损耗（> -0.26 dB）， 通过端口的消光比（> 14 dB）。

方法：

假设存在exp（-iωt）时间依赖性，则可以使用久保公式27用表面电导率（σg）表征石墨烯的光学响应，该电导率与化学势（μc）有关：

其中e是电子电荷，k B是玻尔兹曼常数，T是温度（= 300 K），ℏ是还原的普朗克常数，ω是角率，τ是动量弛豫（τ= 0.5 ps） 。 由于在高质量的悬浮石墨烯28中已通过实验验证了100000 cm2V-1s-1的电子迁移率，这导致τ> 1.5 ps，因此此处τ= 0.5 ps的选择相当保守。 在此，将石墨烯片视为各向异性材料29。 石墨烯的平面外介电常数εg，⊥等于石墨（2.5）。 石墨烯的面内介电常数εg，∥可检索为30。



其中η0（≈377Ω）和k 0分别是空气中的阻抗和波矢，d g（= 0.34 nm）是石墨烯的厚度。 该方程已被广泛用于表征石墨烯的光学性质，并在理论和实验上评估基于石墨烯的光电器件的电光学性质[22,31]。

在FDTD仿真中，已使用足够小的硅和石墨烯网格来确保仿真精度。 四个网格用于表示相邻石墨烯层和每片石墨烯之间的硅层厚度。 为了精确地恢复设备性能，在我们的建模中测试了不同数量的网格，并且当前结果表明，如果使用更精细的网格，仿真日期不会改变。 在计算窗口的边界处使用了完全匹配的吸收层的边界条件。

References：

1. Bogaerts, W. *et al*. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology. *J. Lightwave Technol.* **23**, 401–412 (2005).

1. Fukuda, H. *et al*. Silicon photonic circuit with polarization diversity. *Opt. Express* **16**, 4872–4880 (2008).
2. Watts, M. R., Haus, H. A. & Ippen, E. P. Integrated mode-evolution-based polarization splitter. *Opt. Lett.* **30**, 967–969 (2005).
3. Watts, M. R. & Haus, H. A. Integrated mode-evolution-based polarization rotators. *Opt. Lett.* **30**, 138–140 (2005).
4. Zhang, T., Yin, X., Chen, L. & Li, X. Ultra-compact polarization beam splitter utilizing a graphene-based asymmetrical directional   
   coupler. *Opt. Lett.* **41**, 356–359 (2016).
5. Dai, D. & Bowers, J. E. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires. *Opt. Express* **19**,   
   10940–10949 (2011).
6. Xiong, Y. *et al*. Fabrication tolerant and broadband polarization splitter and rotator based on a taper-etched directional coupler. *Opt.*   
   *Express* **22**, 17458–17465 (2014).
7. Wang, J. *et al*. Design of a SiO2 top-cladding and compact polarization splitter-rotator based on a rib directional coupler. *Opt.*   
   *Express* **22**, 4137–4143 (2014).
8. Ding, Y., Liu, L., Peucheret, C. & Ou, H. Fabrication tolerant polarization splitter and rotator based on a tapered directional coupler.   
   *Opt. Express* **20**, 20021–20027 (2012).
9. Socci, L., Sorianello, V. & Romagnoli, M. 300 nm bandwidth adiabatic SOI polarization splitter-rotators exploiting continuous   
   symmetry breaking. *Opt. Express* **23**, 19261–19271 (2015).
10. Guan, H., Fang, Q., Lo, G.-Q. & Bergman, K. High-efficiency biwavelength polarization splitter-rotator on the SOI platform. *IEEE*   
    *Photon. Technol. Lett.* **27**, 518–521 (2015).
11. Liu, L., Ding, Y., Yvind, K. & Hvam, J. M. Efficient and compact TE-TM polarization converter built on silicon-on-insulator platform   
    with a simple fabrication process. *Opt. Lett.* **36**, 1059–1061 (2011).
12. Liu, M. *et al*. A graphene-based broadband optical modulator. *Nature* **474**, 64–67 (2011).
13. Liu, M., Yin, X. & Zhang, X. Double-layer graphene optical modulator. *Nano Lett.* **12**, 1482–1485 (2012).
14. Lu, Z. & Zhao, W. Nanoscale electro-optic modulators based on graphene-slot waveguides. *J. Opt. Soc. Am. B* **29**, 1490–1496 (2012).
15. Ding, Y. *et al*. Effective electro-optical modulation with high extinction ratio by a graphene-silicon microring resonator. *Nano Lett.*   
    **15**, 4393 (2015).
16. Xu, C., Jin, Y., Yang, L., Yang, J. & Jiang, X. Characteristics of electro-refractive modulating based on Graphene-Oxide-Silicon   
    waveguide. *Opt. Express* **20**, 22398–22405 (2012).
17. Yin, X., Zhang, T., Chen, L. & Li, X. Ultra-compact TE-pass polarizer with graphene multilayer embedded in a silicon slot   
    waveguide. *Opt. Lett.* **40**, 1733–1736 (2015).
18. De Oliveira, R. E. P. & De Matos, C. J. S. Graphene based waveguide polarizers: in-depth physical analysis and relevant parameters.   
    *Sci. Rep.* **5**, 16949 (2015).
19. Kovacevic, G. & Yamashita, S. Waveguide design parameters impact on absorption in graphene coated silicon photonic integrated   
    circuits. *Opt. Express* **24**, 3584–3591 (2016).
20. Palik, E. *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic, 1991).
21. Ye, S. *et al*. Electro-absorption optical modulator using dual-graphene-on-graphene configuration. *Opt. Express* **22**, 26173–26180   
    (2014).
22. Hao, R. *et al*. Ultra-compact optical modulator by graphene induced electro-refraction effect. *Appl. Phys. Lett.* **103**, 061116 (2013).
23. Guan, H. *et al*. CMOS-compatible highly efficient polarization splitter and rotator based on a double-etched directional coupler. *Opt.*   
    *Express* **22**, 2489–2496 (2014).
24. Liu, L., Ding, Y., Yvind, K. & Hvam, J. M. Silicon-on-insulator polarization splitting and rotating device for polarization diversity   
    circuits. *Opt. Express* **19**, 12646–12651 (2011).
25. Chen, S., Shi, Y., He, S. & Dai, D. Compact monolithically-integrated hybrid (de) multiplexer based on silicon-on-insulator   
    nanowires for PDM-WDM systems. *Opt. Express* **23**, 12840–12849 (2015).
26. Chen, P. Y. & Alù, A. Atomically thin surface cloak using graphene monolayers. *ACS Nano* **5**, 5855–5863 (2011).
27. Bolotin, K. I. *et al*. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Commun.* **146**, 351–355 (2008).
28. Hao, R. *et al*. Recent developments in graphene-based optical modulators. *Front. Optoelectron.* **7**, 277–292 (2014).
29. Vakil, A. & Engheta, N. Transformation optics using graphene. *Science* **332**, 1291–1294 (2011).
30. Cakmakyapan, S., Caglayan, H. & Ozbay, E. Coupling enhancement of split ring resonators on graphene. *Carbon* **80**, 351–355   
    (2014).