

一种光波导及其制备方法

优先权申请

本申请要求 2023 年 12 月 29 日提交的中国发明专利申请【申请号：202311846859X】【发明名称：一种光波导及其制备方法】；2023 年 12 月 29 日提交的中国发明专利申请【申请号：2023118490201】【发明名称：一种光波导及其制备方法】的优先权，两项优先权发明专利申请均以引用方式全文并入。

技术领域

本发明涉及一种光波导，尤其涉及一种光波导及其制备方法。

背景技术

在光子回路中，通过各种光切换器件和功率分流器件，可以可控地通过光波导网络对光进行引导。这种器件通常通过控制波导中的光的相位来运行。例如，通过调谐绝缘体上覆硅 (Silicon-On-Insulator, SOI) 波导的相位，微环谐振器和马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometers, MZIs) 可实现光切换功能和功率分流功能。另外，定向耦合器可通过调谐其相对相位在间隔很近的波导之间短暂耦合不同光量的光。相移机构通常基于热光效应或自由载流子色散效应。然而，由于对折射率的弱扰动，对于实现所需相移而言，这种器件中的波导长度相对较长。例如，MZI 在大约 500 μm 可实现所需的 π 相移。微环尺寸小，但其工作带宽受限于谐振条件。另一种方法是在光子回路中使用微机电系统 (Micro-Electromechanical System, MEMS) 开关，其中，可以机械移动各耦合波导以调节耦合效率。然而，与传统的非机械方法相比，该方法切换速度慢 (毫秒量级)，结构不紧凑，并且制造成本和复杂性相对较高。重要的是，上述技术存在不稳定和使用寿命短的问题，即，控制光相位的器件的状态需要维持在恒定的功耗下，微机电系统由于其自身的机械结构使得寿命受限。相变材料 (Phase-Change Materials, PCMs) 具有内在非挥发性，并已被广泛用于光子应用，包括光子存储器件、可重写光盘、滤光器、显示器和光开关。PCMs 可使用标准方法轻易沉积在任意衬底上，并且可在非晶态和晶态之间高速、长期稳定地来回切换。在非晶态和晶态之间切换时，折射率急剧变化。经证实，波导耦合器顶部具有 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) 和 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST) 的紧凑型光开关具有高切换速度 (100ns) 和低功耗。因此，基于 PCM 的光子器件相对传统光子切换方案具有若干优势，并且有望用于开发大规模非易失性可重编程光子路由系统，例如现场可编程耦合器阵列等。

基于此，现有技术提出了一种新的光波导。例如，申请号为 CN202180043314.8 的中国发明专利申请，其通过在光波导上设置了一种非晶态下低吸收损耗 (即消光系数基本上小于 0.1) 且晶态与非晶态间光学系数差异大的相变材料层，且该相变材料层可在至少两个稳定固态：非晶态和晶态之间切换。然而，这种结构的光波导稳定性尚有待提高。

发明内容

本发明的目的在于提供一种光波导及其制备方法，部分地解决或缓解现有技术中的上述不足，该光波导中调制层在非晶态和晶态之间切换时的稳定性更加可靠。

为了解决上述所提到的技术问题，本发明具体采用以下技术方案：本发明的第一方面，在于提供一种光波导，其包括：光波导层，位于所述光波导层上的调制层，所述光波导层和所述调制层之间设置有第一隔离层，所述调制层上覆盖有第一保护层，还包括：围绕在所述第一隔离层和所述调制层周围，且横截面呈倒置 L 字形的第二隔离层，以及围绕在所述第一保护层、所述第二隔离层、所述光波导层周围的第二保护层；其中，所述调制层被包裹在由所述第一保护层、所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成的密闭腔内，且所述调制层为相变材料层或所述调制层包括相变材料层。

在一些实施例中，所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成开口朝向所述第一保护层

的第二凹槽，所述第二凹槽内槽底到顶部开口的高度大于或等于所述调制层的厚度。在一些实施例中，所述第二凹槽为通过区域性刻蚀方法对预先覆盖在所述光波导层上的横截面呈 T 字形或凹字形的所述第二隔离层，以及覆盖在所述光波导层和所述第二隔离层上的所述第二保护层进行刻蚀形成。在一些实施例中，所述相变材料层为通过溅射工艺在所述第一隔离层上溅射相变材料得到；和/或，所述第一保护层通过物理气相沉积或化学气相沉积工艺在所述相变材料层上进行沉积得到。在一些实施例中，所述第一保护层的上表面和所述第二保护层的上表面平齐。在一些实施例中，所述第一隔离层的厚度为 1nm~100nm。在一些实施例中，所述第一隔离层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 1 μm~10 μm。在一些实施例中，所述第一保护层的厚度为 0.1 μm~3 μm。在一些实施例中，所述调制层的厚度为 1nm~1 μm。在一些实施例中，所述调制层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 1 μm~10 μm。在一些实施例中，所述相变材料层是由超晶格材料制成。在一些实施例中，所述相变材料层是由包含锑或硒的硫族化合物形成。在一些实施例中，所述相变材料层包含所述硫族化合物，其中，所述硫族化合物包括 Sb₂Se₃ 或 SbSe、Sb₂S₃ 或 SbS、Ge₂Sb₂Se₄Te。在一些实施例中，所述相变材料层的相变材料包括包含有锗、锑、硒、钒氧化合物的元素组合的化合物或合金或所述化合物的混合物；所述化合物包括：NbO_x、GeTe、GeSb、GaSb、AgInSbTe、InSb、InSbTe、InSe、SbTe、TeGeSbS、AgSbSe、SbSe、GeSbMnSn、AgSbTe、AuSbTe 和 AlSb。在一些实施例中，所述光波导包括金属互连层，所述金属互连层嵌于所述第二保护层；和/或，所述光波导层的横截面呈矩形或凸字形。在一些实施例中，所述第一保护层为 SiO₂、Al₂O₃、ITO 中的任一种或多种制成。在一些实施例中，所述第二保护层为 SiO₂、Al₂O₃、ITO 中的任一种或多种制成。在一些实施例中，所述第一隔离层为 Si₃N₄、TiN 中一种或两种制成。

本发明的第二方面，在于提供一种制备上述光波导的方法，其包括步骤：S1021，在衬底上集成光波导层，形成光波导平台；S1023，在外露于衬底之上的光波导层的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第三厚度的第二停止层和第二厚度的第二氧化层；其中，所述第二停止层位于所述光波导层上方，其横截面呈 T 字形或凹字形，且 T 字形的所述第二停止层中竖直部分的宽度大于所述光波导层的宽度，或凹字形的所述第二停止层的宽度大于所述光波导层的宽度；S1025，通过区域性刻蚀方法进行所述第二停止层和所述第二氧化层的开窗工艺，使得所述第二停止层在所述光波导层上形成第四厚度的第一隔离层，以及围绕在所述第一隔离层周围，且横截面呈倒置 L 形的第二隔离层；其中，所述第四厚度小于所述第三厚度；S1027，采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至所述第一隔离层的表面，以在所述第一隔离层及其周围的所述第二隔离层所形成的窗口内形成预设厚度的相变材料层；所述预设厚度小于或等于所述第三厚度与所述第四厚度之差；S1029，采用第二薄膜沉积工艺将与步骤 S1013 中同样材质的氧化层沉积至相变材料层实现覆盖，得到第六厚度的第一保护层。

本发明的第三方面，在于提供一种光波导，其包括：光波导层，位于所述光波导层上的调制层，所述光波导层和所述调制层之间设置有第一隔离层，且所述调制层上覆盖有第一保护层，还包括：围绕在所述第一隔离层、所述调制层靠近所述第一隔离层的第一区域周围的第二隔离层，以及围绕在所述第一保护层、所述调制层靠近所述第一保护层的第二区域、所述第二隔离层和所述光波导层周围的第二保护层；其中，所述调制层被包裹在由所述第一保护层、所述第二保护层、所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成的密闭腔内，且所述调制层包括相变材料层或所述调制层为相变材料层。

在一些实施例中，所述第一保护层及围绕在所述第一保护层和所述调制层的第二区域周围的所述第二保护层围合形成横截面呈倒置凹字形的第一凹槽；所述第一隔离层及围绕在所述第一隔离层和所述调制层的第一区域周围的所述第二隔离层围合形成横截面呈凹字形的第二凹槽，且所述第一凹槽的开口和所述第二凹槽的开口相对设置，使得所述第一凹槽和所述

第二凹槽围合形成了横截面呈矩形的所述密闭腔。在一些实施例中，所述第一保护层及围绕在所述第一保护层和所述调制层的第二区域周围的所述第二保护层围合形成横截面呈倒置 U 形的第一凹槽；所述第一隔离层及围绕在所述第一隔离层和所述调制层的第一区域周围的所述第二隔离层围合形成横截面呈 U 形的第二凹槽，且同一横截面中，所述第一凹槽相对设置的侧壁之间的间距沿靠近所述光波导层的方向逐渐减小，而所述第二凹槽相对设置的侧壁之间的间距沿远离所述光波导层的方向逐渐增大，且所述第一凹槽的开口和所述第二凹槽的开口相对设置，使得所述第一凹槽的侧壁和所述第二凹槽的侧壁平滑连接，并围合形成了碗状或喇叭状的所述密闭腔。在一些实施例中，所述第一隔离层为通过区域性刻蚀方法对预先覆盖在所述光波导层上的所述第二保护层和所述第二隔离层进行刻蚀形成具有顶部开口的空腔的腔底。在一些实施例中，所述相变材料层为通过溅射工艺在所述第一隔离层上溅射相变材料得到。在一些实施例中，所述第一保护层通过物理气相沉积或化学气相沉积工艺在所述调制层上进行沉积得到。在一些实施例中，所述第一保护层的上表面和所述第二保护层的上表面平齐。在一些实施例中，所述第一隔离层的厚度为 1nm~100nm。在一些实施例中，所述第一隔离层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 。在一些实施例中，所述第一保护层的厚度为 $0.1\mu\text{m}$ ~ $3\mu\text{m}$ 。在一些实施例中，所述调制层的厚度为 1nm~ $1\mu\text{m}$ 。在一些实施例中，所述调制层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 。在一些实施例中，所述相变材料层是由超晶格材料制成。在一些实施例中，所述相变材料层是由包含锑或碲的硫族化合物形成。在一些实施例中，所述相变材料层包含所述硫族化合物，其中，所述硫族化合物包括 Sb_2Se_3 或 SbSe 、 Sb_2S_3 或 SbS 、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$ 。在一些实施例中，所述相变材料层的相变材料包括包含有锑、碲、钒氧化合物的元素组合的化合物或合金或所述化合物的混合物；所述化合物包括： NbOx 、 GeTe 、 GeSb 、 GaSb 、 AgInSbTe 、 InSb 、 InSbTe 、 InSe 、 SbTe 、 TeGeSbS 、 AgSbSe 、 SbSe 、 GeSbMnSn 、 AgSbTe 、 AuSbTe 和 AlSb 。在一些实施例中，所述光波导包括金属互连层，所述金属互连层嵌于所述第二保护层；和/或，所述光波导层的横截面呈矩形或凸字形。在一些实施例中，所述第一保护层 SiO_2 、 Al_2O_3 、 ITO 中的任一种或多种制成。在一些实施例中，所述第二保护层为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 ITO 中的任一种或多种制成。在一些实施例中，所述第一隔离层为 Si_3N_4 、 TiN 中一种或两种制成。在一些实施例中，所述第二隔离层为 Si_3N_4 、 TiN 中一种或两种制成。

本发明的第四方面，在于提供一种制备上述光波导的方法，其包括步骤：S1011，在衬底上集成光波导层，形成光波导平台；S1013，在外露于衬底之上的所述光波导层的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第一厚度的第二停止层和第二厚度的第二氧化层，其中，所述第二停止层位于所述光波导层上方，且所述第二停止层的宽度大于所述光波导层的宽度；S1015，通过区域性刻蚀方法进行所述第二停止层和所述第二氧化层的开窗工艺，使得所述第二停止层在所述光波导层上形成第四厚度的第一隔离层，以及围绕在所述第一隔离层周围的所述第二隔离层，所述第四厚度小于所述第一厚度；S1017，采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至窗口内露出的所述第一隔离层的表面，形成预设厚度的相变材料层；所述预设厚度与所述第四厚度之和大于所述第一厚度；S1019，采用第二薄膜沉积工艺将与步骤 S1013 中同样材质的氧化层沉积至所述相变材料层实现覆盖，得到第六厚度的第一保护层。

本发明的第五方面，在于提供一种制备光波导的方法，其包括步骤：S1021，在衬底上集成光波导层，形成光波导平台；S1023，在外露于衬底之上的光波导层的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第四厚度的第二停止层和第二厚度的第二氧化层；其中，所述第二停止层位于所述光波导层上方，其横截面呈 T 字形或凹字形，且 T 字形的所述第二停止层中竖直部分的宽度大于所述光波导层的宽度，或凹字形的所述第二停止层的宽度大于所述光波导层的宽度；其中，所述第四厚度为 1nm~100nm；S1025，通过区域性刻蚀方法进行所述

第二停止层和所述第二氧化层的开窗工艺,使得所述第二停止层在所述光波导层上形成厚度小于所述第四厚度的第一隔离层,以及围绕在所述第一隔离层周围,且横截面呈倒置L形的第二隔离层;S1027,采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至所述第一隔离层的表面,以在所述第一隔离层及其周围的所述第二隔离层所形成的窗口内形成预设厚度的相变材料层;所述预设厚度小于或等于所述第四厚度与所述第一隔离层的厚度之差;S1029,采用第二薄膜沉积工艺将与步骤S1013中同样材质的氧化层沉积至相变材料层实现覆盖,得到第六厚度的第一保护层。在一些实施例中,所述第四厚度预先通过仿真得到。在一些实施例中,所述第一隔离层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 。在一些实施例中,所述相变材料层的厚度为 $1\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 。在一些实施例中,所述相变材料层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 。

本发明的第六方面,在于提供一种利用上述制备光波导的方法制备得到的光波导,其包括:光波导层,位于所述光波导层上的调制层,所述光波导层和所述调制层之间设置有第一隔离层,所述调制层上覆盖有第一保护层,还包括:围绕在所述第一隔离层和所述调制层周围,且横截面呈倒置L字形的第二隔离层,以及围绕在所述第一保护层、所述第二隔离层、所述光波导层周围的第二保护层;其中,所述调制层被包裹在由所述第一保护层、所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成的密闭腔内,且所述调制层为相变材料层或所述调制层包括相变材料层;其中,所述第一隔离层的厚度小于第四厚度,所述第四厚度为 $1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ 。在一些实施例中,所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成开口朝向所述第一保护层的第二凹槽,所述第二凹槽内槽底到顶部开口的高度大于或等于所述调制层的厚度。

本发明的第七方面,在于提供一种制备光波导的方法,其包括步骤:S1011,在衬底上集成光波导层,形成光波导平台;S1013,在外露于衬底之上的所述光波导层的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第四厚度的第二停止层和第二厚度的第二氧化层,其中,所述第二停止层位于所述光波导层上方,且所述第二停止层的宽度大于所述光波导层的宽度;所述第四厚度为 $1\text{nm}\sim 100\text{nm}$;S1015,通过区域性刻蚀方法进行所述第二停止层和所述第二氧化层的开窗工艺,使得所述第二停止层在所述光波导层上形成厚度小于所述第四厚度的第一隔离层,以及围绕在所述第一隔离层周围的所述第二隔离层;S1017,采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至窗口内露出的所述第一隔离层的表面,形成预设厚度的相变材料层;所述预设厚度与所述第一隔离层的厚度之和大于所述第四厚度;S1019,采用第二薄膜沉积工艺将与步骤S1013中同样材质的氧化层沉积至所述相变材料层实现覆盖,得到第六厚度的第一保护层。

在一些实施例中,所述第一隔离层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 。在一些实施例中,所述相变材料层的厚度为 $1\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$;和/或,所述相变材料层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 。在一些实施例中,所述相变材料层是由超晶格材料制成。在一些实施例中,所述相变材料层是由包含锑或硒的硫族化合物形成,或者所述相变材料层包含所述硫族化合物,其中,所述硫族化合物包括 Sb_2Se_3 或 SbSe 、 Sb_2S_3 或 SbS 、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$ 。在一些实施例中,所述相变材料包括包含有锗、锑、硒、钒氧化合物的元素组合的化合物或合金或所述化合物的混合物;所述化合物包括 NbOx 、 GeTe 、 GeSb 、 GaSb 、 AgInSbTe 、 InSb 、 InSbTe 、 InSe 、 SbTe 、 TeGeSbS 、 AgSbSe 、 SbSe 、 GeSbMnSn 、 AgSbTe 、 AuSbTe 和 AlSb 。在一些实施例中,所述第二氧化层为 SO_2 、 Al_2O_3 、 ITO 中的任一种或多种制成。在一些实施例中,所述第二停止层为 Si_3N_4 、 TiN 中一种或两种制成。

本发明的第八方面,在于提供一种利用上述制备光波导的方法制备得到的光波导,其包括:光波导层,位于所述光波导层上的调制层,所述光波导层和所述调制层之间设置有第一隔离层,且所述调制层上覆盖有第一保护层,还包括:围绕在所述第一隔离层、所述调制层靠近所述第一隔离层的第一区域周围的第二隔离层,以及围绕在所述第一保护层、所述调制

层靠近所述第一保护层的第二区域、所述第二隔离层和所述光波导层周围的第二保护层；其中，所述调制层被包裹在由所述第一保护层、所述第二保护层、所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成的密闭腔内，且所述调制层包括相变材料层或所述调制层为相变材料层；其中，所述第一隔离层的厚度小于第四厚度，所述第四厚度为 1nm~100nm。在一些实施例中，
5 所述第一保护层及围绕在所述第一保护层和所述调制层的第二区域周围的所述第二保护层围合形成横截面呈倒置凹字形的第一凹槽；所述第一隔离层及围绕在所述第一隔离层和所述调制层的第一区域周围的所述第二隔离层围合形成横截面呈凹字形的第二凹槽，且所述第一凹槽的开口和所述第二凹槽的开口相对设置，使得所述第一凹槽和所述第二凹槽围合形成了横截面呈矩形的所述密闭腔。在一些实施例中，所述第一保护层及围绕在所述第一保护层和所述调制层的第二区域周围的所述第二保护层围合形成横截面呈倒置 U 形的第一凹槽；所述第一隔离层及围绕在所述第一隔离层和所述调制层的第一区域周围的所述第二隔离层围合形成横截面呈 U 形的第二凹槽，且同一横截面中，所述第一凹槽相对设置的侧壁之间的间距沿靠近所述波导层的方向逐渐减小，而所述第二凹槽相对设置的侧壁之间的间距沿远离所述波导层的方向逐渐增大，且所述第一凹槽的开口和所述第二凹槽的开口相对设置，使得所述第一
10 凹槽的侧壁和所述第二凹槽的侧壁平滑连接，并围合形成了碗状或喇叭状的所述密闭腔。

有益效果：目前，在成熟可用的商用 SOI 衬底上制备集成基于相变材料的光学器件的主要的方法是：通过先进磁控溅射或热蒸发工艺将多种相变材料直接沉积在光波导层上表面（即采用向上耦合的方式）或者，沉积在波导的上表面和侧壁（相较于向上耦合的方式；同时在光波导层的侧壁也沉积相变材料层，会存在不均匀的问题，从而导致后续光耦合与相变材料
20 调制过程中存在很多不确定因素），相变材料的溅射可以用单一靶材或者多靶材共溅射（可以调节组分和掺杂）来实现。磁控溅射技术为在真空中利用荷能粒子轰击靶表面，使被轰击出的粒子沉积在基片上的技术。利用磁控溅射技术在表面溅射一层相变材料薄膜之后，再溅射一层氧化层用于保护。虽然该方法能够实现相变材料与光波导的异质集成，但还存在以下两方面的问题：

一方面，结构本身的稳定性尚待提高。1、在相变材料之后溅射的氧化层很薄（10nm~30nm），且氧化层紧接着相变材料进行溅射，仅仅是覆盖在相变材料层的上表面无法完全将相变材料包裹住，自然其保护作用较低。2、相变材料在调制（熔化/重结晶）后，尤其是熔化后具有流动性会出现一定距离的移动，也正是由于其表面仅一层较薄的氧化层，因此，其实际上无法控制相变材料在调制之后的变化区域，从而可能会存在材料分离，甚至挥发的问题，进而导致结构中调制层在非晶态和晶态之间切换时存在不稳定的问题。另一方面，较难实现商业化落地（例如，工业化生产），只能用于科研。因为在工业化生产中，芯片中一般还包含位于光波导表面的氧化层以及嵌于该氧化层中的金属互连层。受现有的前后段
30 工艺限制，相变材料并不能直接加入到芯片的制造流程中，也即上述直接在波导层上溅射相变材料层的方法并不能够直接应用于工业化生产中。具体地，现有的芯片制造流程工艺主要分为前段工艺和后段工艺，前段工艺包括晶圆加工、氧化工艺、光刻、刻蚀、沉积和掺杂/离子注入等工艺，而后段工艺主要是形成片上的金属互连层。由于前段工艺技术难点多，操作复杂，为了避免造成污染，相变材料不允许在前段工艺中集成在波导上。后段工艺中的介质层和金属化需要较高的工作温度，在该高温环境下对会影响相变材料集成的稳定性，因此相变材料也不被允许放在金属化之前。也即是说这种结构的光波导工业化生产难度较大。

基于此，本发明提供了一种新结构的光波导，其结构稳定性更高，有利于商业化落地。具体地，为了避免开窗工艺中对光波导层造成损伤，因此，在光波导层和调制层之间设置了第一隔离层，并且，为了更好地包裹该调制层，将该调制层设置在由第一隔离层和第二隔离层围合形成的空腔内，并由第一保护层来覆盖，也即由该第一隔离层、第二隔离层和第一保护层限定了调制层在不同状态切换过程中调制层的移动空间（例如，由第一隔离层和第二隔
40

离层形成了几乎全包裹调制层的包裹层，并由第一保护层来进行覆盖，以限定调制层在不同状态切换过程中调制层的移动空间)，从而保证了调制层的完整性与稳定性，进而减少相变材料不可逆的损伤，延长相变材料的使用寿命。

附图说明

5 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。在所有附图中，类似的元件或部分一般由类似的附图标记标识。附图中，各元件或部分并不一定按照实际的比例绘制。显而易见地，下面描述中的附图是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其它的附图。

- 10 图 1a 为本发明一示例性实施例的光波导的横截面结构示意图；
图 1b 为图 1a 所示光波导的爆炸图；
图 1c 为本发明又一示例性实施例的光波导的横截面结构示意图；
图 1d 为图 1c 所示光波导的爆炸图；
图 1e 为本发明再一示例性实施例的光波导的横截面结构示意图；
15 图 1f 为图 1e 所示光波导的爆炸图；
图 2a 为本发明一示例性实施例的光波导制备方法的流程图；
图 2b 为利用本发明的光波导制备方法制备图 1a 所示结构的光波导的流程图；
图 2c 为利用本发明的光波导制备方法制备图 1c 所示结构的光波导的流程图；
图 3a 至图 3e 为以条形波导层为例按照图 2 所示方法制备光波导的示意图；
20 图 3f 至图 3j 以条形波导层为例按照图 2 所示方法制备光波导的示意图；
图 4 为利用现有集成相变材料方法制备得到的光波导（即对照组）进行循环调制的光功率图；

图 5 为采用图 3a 至图 3e 所示方法得到的光波导（即实验组）进行循环调制的光功率图。

- 25 附图标记标识汇总：01 衬底；02 光波导层；03 相变材料层；031 第二区域，032 第一区域；04 第一隔离层；05 第一保护层；06 第二隔离层；07 第二保护层；5 金属互连层；001 密封腔、0011 第一凹槽、0012 第二凹槽；H0 相变材料层沿 Z 轴方向延伸的高度（或称之为预设厚度）；H1、H3 不同实施例中第二停止层沿 Z 轴方向延伸的高度（或称之为第一厚度、第三厚度）；H2 不同实施例中第二氧化层沿 Z 轴方向延伸的高度（或称之为第二厚度）；H4 第一停止层（或第一隔离层）沿 Z 轴方向延伸的高度（或称之为第四厚度）；H6 第一氧化层沿
30 Z 轴方向延伸的高度（或称之为第六厚度）；h1 第一凹槽槽口的高度；h2 第二凹槽槽口的高度（ $h2>h1$ ）。

具体实施方式

- 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。显然，所描述的实施例是本发明
35 一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。本文中，使用用于表示元件的诸如“模块”、“部件”或“单元”的后缀仅为了有利于本发明的说明，其本身没有特定的意义。因此，“模块”、“部件”或“单元”可以混合地使用。本文中，术语“上”、“下”、“内”、“外”“前”、“后”、“一端”、“另一端”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置
40 或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。此外，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性。本文中，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”、“设置有”、“连接”等，应做广义理解，例如“连接”，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或一体地连接；可以是机械连接，可以

是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言，可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。本文中“和/或”包括任何和所有一个或多个列出的相关项的组合。本文中“多个”意指两个或两个以上，即其包含两个、三个、四个、五个等。在本说明书中使用的，术语“大约”，典型地表示为所述值的 $\pm 5\%$ ，更典型的是所述值的 $\pm 4\%$ ，更典型的是所述值的 $\pm 3\%$ ，更典型的是所述值的 $\pm 2\%$ ，甚至更典型的是所述值的 $\pm 1\%$ ，甚至更典型的是所述值的 $\pm 0.5\%$ 。在本说明书中，某些实施方式可能以一种处于某个范围的格式公开。应该理解，这种“处于某个范围”的描述仅仅是为了方便和简洁，且不应该被解释为对所公开范围的僵化限制。因此，范围的描述应该被认为是已经具体地公开了所有可能的子范围以及在此范围内的独立数字值。例如，范围 1-6 的描述应该被看作已经具体地公开了子范围如从 1 到 3，从 1 到 4，从 1 到 5，从 2 到 4，从 2 到 6，从 3 到 6 等，以及此范围内的单独数字，例如 1，2，3，4，5 和 6。无论该范围的广度如何，均适用以上规则。

本文中“光”是指波长在紫外(UV)到红外(IR)范围内(例如，在 10nm 和 100 μm 之间)的电磁辐射或电磁波，其可以在自由空间中传播，并由波导引导。本文中“稳定状态”意味着在美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)规定的标准温度和压力条件下基本稳定。本文中“光波导层”是指用于在一个或多个维度上将光限制在其表面内或邻近其表面的区域，从而在平行于其轴的传播方向上引导光的任何结构。波导由具有不同折射率的一系列层/区域形成，通常包括内层/区域或芯层/区域。相比周围(外)层/区域或包覆层/区域，内层/区或芯层/区由折射率更高的材料制成。在这种情况下，波导在厚度/增长方向和垂直于厚度/增长方向的横向/宽度方向上将光限制在两个维度上，例如，限制在通道内。芯层/区域和/或所述包覆层/区域可称为主动限制和引导光的引导层。本文中“调制层”是指对光的特性有影响的任何实体。其中，光的特性包括透射，折射，吸收等。在一些实施例中，该光调制层包括由相变材料制成的相变材料层，或者可以由相变材料制成。

本发明提出了一种具有高稳定性，且可实现工业化生产的光波导，其包括：光波导层，以及位于光波导层上的调制层，光波导层和调制层之间设置有助于防止光波导层在开窗工艺中被损伤的第一隔离层，且该调制层上覆盖有第一保护层。其中，该调制层由相变材料制成，或者，包括由相变材料层（为了便于描述，后续实施例中以相变材料层作为调制层为例）。在目前工业生产中的开窗环节中，很难直接完美地开在光波导层上方，也即在开窗过程中完全不损失波导层的基础上，直接在光波导层上溅射或沉积调制层，因此，本文中各示例都采用在光波导层上设置一层隔离层来保护光波导层（例如第一停止层）的同时，包裹调制层。例如，通过预先在光波导层上设置指定厚度的第一停止层和第一氧化层（例如：第一厚度 H1 或第三厚度 H3 的第一停止层，以及第二厚度 H2 的第一氧化层），然后在开窗工艺环节，通过控制开窗工艺的工艺参数从而控制在第一停止层上的刻蚀深度，使得在光波导层上保留指定厚度（例如，第四厚度 H4）的第一停止层，得到第一隔离层，从而避免对光波导造成一定的损伤的同时，包裹调制层，保证其稳定性。

通常来说，向上耦合时，直接在光波导层的上表面设置调制层，这样调制层对光波导中光的渐逝场范围最佳，从而能够调制的光信号功率范围最佳。然而，如前所述，由于现有工艺的限制，使得很难在不损伤光波导层的基础上完美地直接设置调制层，因此，为了避免对光波导层造成损伤，通过在光波导层上设置隔离层来进行保护，但同时，设置隔离层需要考虑调制层对光波导中光的渐逝场的影响，若该隔离层过厚，即使是相同状态相同厚度的调制层能够影响到的渐逝场范围就越小，从而能够调制的光信号功率范围越小；若该隔离层太薄，由于受到现有开窗工艺极限的限制，很难做到太薄。因此，综合考虑调制层对光波导中光的渐逝场范围的影响，以及光波导层的损伤，探寻该隔离层的厚度，从而在不大大降低调制层对光波导层中光的渐逝场范围的前提下，同时又能够对光波导层进行保护。例如，具体厚度

根据实际需求进行仿真来决定。优选地，该光波导层与调制层之间隔离层的厚度 H_4 为 $1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ 。

当然，也可预先直接在光波导层上设置预先设置所需厚度，例如厚度为 H_4 的隔离层，而后续开窗工艺过程中，直接刻蚀掉氧化层，也即刻蚀过程中看到隔离层后即停止刻蚀即可，由于该隔离层具有一定厚度，因此，即使稍微刻蚀掉一些也不会影响光波导，反而减小了隔离层的厚度而有利于调制层对光波导层中光的消逝场的影响。尤其是当受限于现有开窗工艺，无法直接通过刻蚀参数使得该调制层与光波导层之间停止层的厚度更薄（例如，小于 1nm ）时，通过预先将该隔离层沉积到指定厚度（例如，取值范围的最小值： 1nm ）时，通过刻蚀原先设置的氧化层发生轻微的过刻蚀，反而能够进一步减小该隔离层的厚度。为了便于描述光波导各部件之间的位置关系，本文中将以光波导的长度为 Y 轴，高度为 Z 轴，宽度为 X 轴构建三维坐标系，其中，横截面则是指以竖直平面（也即 XZ 平面）剖切该光波导相应区域得到的剖切面。

实施例 1：参见图 1a，为本发明一示例性实施例的光波导结构示意图，具体地，该光波导结构包括：氧化硅衬底 01、光波导层 02，以及位于光波导层 02 上的相变材料层 03，光波导层 02 和相变材料层 03（即调制层）之间设置有第一隔离层 04，且相变材料层 03 上覆盖有第一保护层 05。优选地，该第一隔离层 04 的宽度（即沿 X 轴方向延伸的长度）、光波导层 02 的宽度（即沿 X 轴方向延伸的长度）、相变材料层 03 的宽度（即沿 X 轴方向延伸的长度）相同。

参见图 1a，在衬底 01 上，围绕第一隔离层 04 和相变材料层 03 上靠近第一隔离层 04 的第一区域 032（即该相变材料层 03 与第一隔离层 04 相接触的底部周围的部分侧壁区域）的周围设置有第二隔离层 06，该第二隔离层 06 的第一厚度（即沿 Z 轴方向延伸的长度） H_1 大于第一隔离层 04 的第四厚度 H_4 ，但小于该相变材料层 03 和第一隔离层 04 两者厚度之和（即 H_0 与 H_4 之和），从而使得该第一隔离层 04 和第二隔离层 06 围合形成一个向上包裹（即包裹部件的周围边缘自被包裹部件底部沿其周围侧壁高度方向向上延伸形成包围式侧壁）相变材料层 03 靠近光波导层 02 一侧的第一区域 032 的包裹层；而在第一保护层 05、相变材料层 03 上靠近第一保护层 05 的第二区域 031（即相变材料层 03 与第一保护层 05 相接触的顶部周围的部分侧壁区域）、第二隔离层 06、光波导层 02 周围设置有第二保护层 07，从而使得该第一保护层 05 和对应于上述第二区域的第二保护层 07 围合形成一个向下包裹（即包裹部件的周围边缘自被包裹部件顶部沿其周围侧壁高度方向向下延伸形成包围式侧壁）相变材料层 03 远离光波导层 02 一侧的第二区域 031 的包裹层，也即上述相变材料层 03 被包裹在由第一保护层 05、第二保护层 07、第一隔离层 04 和第二隔离层 06 围合形成的密闭腔 001 内。

在一些实施例中，可预先在光波导层 02 上设置停止层（例如，具有第一厚度 H_1 和第一宽度 L_1 的第二停止层， L_1 大于光波导层 02 的宽度 L_0 ）和氧化层（例如，具有第二厚度 H_2 的第二氧化层），参见图 3b 和图 3g；为了在光波导层 02 上设置该相变材料层 03，可通过区域性刻蚀方法对预先覆盖在光波导层 02 上的氧化层和停止层进行刻蚀形成具有顶部开口的空腔（或者称之为开的窗口），为后续包裹相变材料层 03 做好准备。例如，采用区域性刻蚀法进行开窗，并在光波导层 02 的正上方保留第四厚度 H_4 的停止层，从而使得在空腔或窗口底部与光波导层 02 之间形成了第一停止层，同时，在该第一停止层的周围同时残留有第一厚度 H_1 的第二停止层，也即当后续在该空腔或窗口内溅射或沉积相变材料后，该第一停止层即为相变材料层 03 与光波导层 02 之间的第一隔离层 04。具体地，通过设置区域性刻蚀方法的刻蚀参数，使得该光波导层 02 上残留第四厚度 H_4 （例如， $1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ ）的停止层，得到第一隔离层 04，避免刻蚀过程中或开窗工艺过程中，对光波导层 02 造成损伤，参见图 1b、图 3c 和图 3h。又如，如前所述，在制备光波导时，也可预先直接在光波导层 02 上设置预先设定所需厚度，例如第四厚度 H_4 的隔离层，因此采用区域性刻蚀法进行开窗时，从而在光

波导层 02 的正上方保留了厚度小于第四厚度 H4 的停止层，从而使得在空腔或窗口底部与光波导层 02 之间形成了第一停止层，同时，在该第一停止层的周围同时残留有第四厚度 H4 的第二停止层，也即当后续在该空腔或窗口内溅射或沉积相变材料后，该第一停止层即为相变材料层 03 与光波导层 02 之间的第一隔离层 04。具体地，通过设置区域性刻蚀方法的刻蚀参数，使得该光波导层 02 上残留厚度小于第四厚度 H4（例如，1nm~100nm）的停止层，得到第一隔离层 04，避免刻蚀过程中或开窗工艺过程中，对光波导层 02 造成损伤，参见图 1b、图 3c 和图 3h。也即是说，在另一些实施例中，具有上述密闭腔 001 的光波导结构中，位于相变材料层 03 和光波导层 02 之间的第一隔离层 04 的厚度小于第四厚度 H4。

在一些实施例中，当采用区域性刻蚀方法在氧化层和停止层上开设上述空腔后，可通过溅射或沉积（物理气相沉积或化学气相沉积）等工艺在第一隔离 04 层上设置指定厚度 H0（例如，1nm~1μm）的相变材料层 03，从而得到调制层。当然，为了保护该调制层，还需要在其上方再覆盖一层第六厚度 H6 的第一保护层 05，例如，第一氧化层。为了保证稳定性，避免覆盖在相变材料层 03 上的第一氧化层太薄而导致无法控制相变材料在调制之后的变化区域的情况，优选地，该第一氧化层的第六厚度 H6 为 0.1μm~3μm。更优选地，采用物理气相沉积（PVD）或化学气相沉积（CVD）方法在相变材料层上沉积该第一氧化层。

由于是在原有氧化层和停止层上进行区域性刻蚀得到第一隔离层 04，并将相变材料溅射或沉积在该第一隔离层 04 上，因此，当在相变材料层上再覆盖第六厚度 H6 的第一保护层 05 后，该第一保护层 05（即在相变材料层 03 上重新覆盖的第一氧化层）及围绕在第一保护层 05 周围的第二保护层 07（即原有氧化层被刻蚀后所保留的部分氧化层，例如原有的第二氧化层）围合形成开口朝向相变材料层 03 的第一凹槽 0011；而第一隔离层 04 及围绕在第一隔离层 04 周围的第二隔离层 06（即原有停止层被刻蚀后所保留的部分停止层）围合形成开口朝向相变材料层 03 的第二凹槽 0012，且该第一凹槽 0011 的开口和第二凹槽 0012 的开口相对设置，使得第一凹槽 0011 和第二凹槽 0012 围合形成了一个上述密闭腔 001（即第一凹槽 0011 槽口的高度 h1 和第二凹槽 0012 槽口的高度 h2 之和为该密封腔 001 的高度，其等于或略大于相变材料层的厚度 H0）。优选地，第一凹槽 0011 和第二凹槽 0012 的横截面均呈矩形，也即该密封腔 001 的横截面呈矩形。在一些实施例中，第一保护层 05 的上表面与第二保护层 07 的上表面平齐。当然，在另一些实施例中，该第一保护层 05 的上表面与第二保护层 07 的上表面不平齐；或者，该第一保护层 05 覆盖第二保护层 07 的部分上表面（优选地，空腔顶部开口周围的第二氧化层部分）或全部上表面。在一些实施例中，该光波导层为条形（即其横截面呈矩形），当然，该光波导层也可为脊形波导（即其横截面呈凸字形）。在一些实施例中，上述衬底也可此采用 SOI 衬底，只需要该衬底使得光波导层具有至少 1eV 的光带隙即可。

实施例 2：为了能够更好地保护和包裹相变材料层 03，同时也降低工艺难度，本发明还提供了另一示例性结构的光波导，其包括上述实施例 1 中的各个部件，不同的是，本示例性的光波导中密封腔 001 仅由位于相变材料层 03 顶部的第一氧化层（即第一保护层 05），位于相变材料层 03（即调制层）底部的第一隔离层 04（即第一停止层），以及围绕在相变材料层 03 和第一隔离层 04 周围的第二隔离层 06（即第二停止层）围合形成，参见图 1c 和图 1d；且第二保护层 07 围绕在第一保护层 05、第二隔离层 06 和光波导层 02 周围，形成几乎全包裹式的保护。

在一些实施例中，围绕在该相变材料层 03 和第一隔离层 04 周围的第二隔离层 06 的横截面呈倒置的 L 字形，且该第二隔离层 06 的上表面与相变材料层 03 的上表面平齐或略高于该相变材料层 03 的上表面。

在一些实施例中，制备本示例性结构的光波导时，可预先在光波导层 02 上及其周围设置第二厚度 H2 的第二氧化层和第三厚度 H3 的第二停止层，其中，该第二停止层的顶部沿光波导宽度方向延伸出侧翼，使得该第二停止层的横截面呈 T 字形，且其沿 Z 轴方向延伸的竖

直部分的第一宽度 $L1$ 大于光波导层 02 的宽度 $L0$ ；然后通过区域性刻蚀方法刻蚀该第二氧化层和第二停止层形成具有顶部开口的空腔，具体地，通过设置区域性刻蚀方法的刻蚀参数，使得形成一个用于容纳相变材料层 03 的空腔，也即在第二停止层内形成的第二凹槽 0012（即第一隔离层 04 作为该第二凹槽 0012 的槽底，第二隔离层 06 作为该第二凹槽 0012 的侧壁）
5 作为容纳相变材料层 03 的空腔，且其槽底到顶部开口的高度 $h2$ 等于或略大于密封腔/调制层的预设厚度 $H0$ ，从而使得该调制层的周边和底部均被第二停止层所包裹，进而使得制备得到的光波导稳定性更高，并且加工工艺难度更低。

在另一些实施例中，预先在光波导层 02 上及其周围设置的第二停止层的横截面呈凹字形。具体地，该凹字形包括标准中文字体“凹”字形状；或者非标准中文字体的“凹”字形状，但与中文字体的凹字形相似（例如，其两侧壁有一定的倾斜度，或者侧壁的宽度沿 Z 轴
10 方向有变化，或者，两侧壁顶部边缘沿光波导宽度方向延伸出一定宽度的突出边）。相应地，该第三厚度 $H3$ 是指横截面呈凹字形的第二停止层的侧壁顶部到底部的高度；而凹槽槽底的厚度大于或等于第四厚度。

如前所述，在制备光波导时，也可预先直接在光波导层 02 上设置预先设定所需厚度，
15 即第四厚度 $H4$ 的隔离层。例如，在光波导层 02 上沉积厚度为第四厚度 $H4$ 的第二停止层，而不是设置第三厚度 $H3$ 的第二停止层，并且，在开窗工艺过程中，可对氧化层和该第二氧化层进行过刻蚀，从而在光波导层 02 上残留了厚度小于第四厚度 $H4$ 的第二停止层，也即得到厚度小于第四厚度 $H4$ 的第一隔离层 04。也即是说，在另一些实施例中，制备得到上述结构的光波导时，位于相变材料层 03 和光波导层 02 之间的第一隔离层 04 的厚度小于第四厚度
20 $H4$ 。

实施例 3：上述结构的光波导在开窗工艺中对开窗的大小要求比较严格，并且由于刻蚀得到的空腔侧壁均沿竖直方向延伸（或略微有所倾斜），在溅射相变材料时，可能会存在沉积在其他周边位置的情况，需要额外清除掉这部分相变材料或对周边位置所沉积的相变材料也覆盖同样的第一保护层，从而不仅使得开窗工艺的难度较高，而且操作较为复杂。基于此，
25 本文还提供了再一示例性结构的光波导，其包括上述实施例 1 中的各个部件，不同的是，本示例中相变材料层 03 被包裹在由第一保护层 05、第二保护层 07、第一隔离层 04 和第二隔离层 06 围合形成横截面呈喇叭状或碗状的密闭腔 001 内。

在一些实施例中，参见图 1e 和图 1f，该第一保护层 05 及围绕在第一保护层 05 和相变材料层 03 远离光波导层 02 的第二区域周围的第二保护层 06 围合形成横截面呈倒置 U 形的
30 第一凹槽 0011；第一隔离层 04 及围绕在第一隔离层 04 和相变材料层 03 靠近光波导层 02 的第一区域周围的第二隔离层 06 围合形成横截面呈 U 形的第二凹槽 0012，且同一横截面中，第一凹槽 0011 相对设置的侧壁之间的间距沿靠近光波导层 02 的方向（或沿竖直方向向下的方向）逐渐减小，而第二凹槽 0012 相对设置的侧壁之间的间距沿远离光波导层 02 的方向（或沿竖直方向向上的方向）逐渐增大，且第一凹槽 0011 的开口和第二凹槽 0012 的开口相对设置，
35 使得第一凹槽 0011 的侧壁和第二凹槽 0012 的侧壁平滑连接，并围合形成了密闭腔 001。

在一些实施例中，如前所述可预先在光波导层 02 上设置停止层和氧化层，然后通过区域性刻蚀方法进行刻蚀形成具有顶部开口的碗状或喇叭空腔。一方面，由于该空腔的顶部开口较大，也即扩大了后续溅射相变材料溅射的覆盖区域，倾斜的窗口侧壁也使得相变材料能够更容易进入窗口中并沉积到窗口底部，降低了溅射工艺的难度；另一方面，由于顶部开口
40 较大，且周围侧壁具有一定倾斜度或弧度，即非垂直刻蚀，相较于实施例 1 或实施例 2 中光波导结构的刻蚀工艺，其难度较低。

如前所述，在制备光波导时，也可预先直接在光波导层 02 上设置预先设定所需厚度，例如第四厚度 $H4$ 的隔离层。例如，在光波导层 02 上沉积厚度为第四厚度 $H4$ 的第二停止层，然后在开窗工艺过程中，对氧化层和第二停止层进行过刻蚀，从而在光波导层 02 上残留了厚

度小于 H4 的第二停止层，也即得到厚度小于第四厚度 H4 的第一隔离层 04。也即是说，在另一些实施例中，上述具有横截面呈喇叭状或碗状的密闭腔 001 的光波导结构中，位于相变材料层 03 和光波导层 02 之间的第一隔离层 04 的厚度小于第四厚度 H4。

实施例 4：光波导制备方法。参见图 2a，为本发明一示例性实施例的光波导制备方法的流程图，具体地，该方法包括步骤：S101，在衬底上集成光波导层 02，形成光波导平台。在一些实施例中，该步骤 S101 采用通常的脉冲激光沉积技术（PLD）完成，例如中国专利 CN1487636A 所揭示的工艺方法，在此不再赘述。参见图 3a，以条形波导为例，在衬底 01 上集成光波导层 02，形成具有光波导平台的光芯片。在一些实施例中，该衬底为氮化硅衬底或 SOI 衬底；而该光波导层 02 具有至少 1eV 的光带隙。优选地，光波导层 02 的材质选自：硅、氮化硅、氮化镓、砷化镓、氮化铝、氧化镁和金刚石（多晶或单晶）。

S103，在外露于衬底之上的光波导层 02 的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第二停止层和第二氧化层，其中，该第二停止层位于光波导层 02 上方，且其宽度大于该光波导层 02 的宽度。在一些实施例中，在外露于衬底之上的光波导层 02 的外表面依次覆盖形成第二停止层和较厚的第二氧化层。其中，第二停止层的作用是在光波导层 02 上方设置一层用于隔离氧化层干法刻蚀工艺的隔离层，在进行氧化层干法刻蚀时，刻蚀到第二停止层后干法刻蚀会停止反应，从而实现对第二氧化层刻蚀而不影响光波导层本身的效果；同时也形成对调制层的包裹作用，提高调制层在非晶态和晶态之间切换时的稳定性。而其中较厚的第二氧化层的作用是保护波导以及金属互连层，同时起到使硅与金属互连层以及金属互连层之间相互绝缘的作用。在一些实施例中，该第二氧化层的材质为氧化硅（ SiO_2 ），氧化铝（ Al_2O_3 ）或 ITO 的其中一种。优选地，第二氧化层的材质为氧化硅（ SiO_2 ）。第二停止层的材质为氮化硅（ Si_3N_4 ）、氮化钛（TiN）的其中一种或多种。优选地，第二停止层的材质为氮化硅（ Si_3N_4 ）。在一些实施例中，该第二停止层和第二氧化层都采用基本的覆膜工艺，其包括有很多种，包括真空蒸发、离子束溅射、磁控溅射、化学气相沉积 CVD 等。这种覆膜工艺的具体工艺参数的在不同的硅光流片厂都有一定的差异，是较为常见的现有技术，在此不再赘述。需要说明的是，在第二氧化层进行沉积时，会采用常规的物理气相沉积（PVD）或化学气相沉积（CVD）工艺同时将金属互连层 5 沉积嵌于其中，且金属互连层 5 与光波导层 02 之间以通孔连接。

参见图 2b 和图 3b，以条形波导为例，在外露于衬底 01 之上的光波导层 02 的外表面依次覆盖形成具有第一厚度 H1 的第二停止层和具有第二厚度 H2 的第二氧化层（即 S1013），为了对相变材料层 03 形成包裹（例如，部分包裹和几乎全包裹），第二停止层的宽度大于光波导层 02 的宽度，从而使得后续开窗工艺可在该第二停止层上形成一个凹槽，该凹槽中位于相变材料层 03 和光波导层 02 之间的槽底即为第一隔离层 04，而围绕在该第一隔离层 04 周围的凹槽壁即为第二隔离层 06。

参见图 2c，在另一些实施例中，为了保证相变材料层 03 几乎被第二停止层所包裹，例如相变材料层 03 的上表面与第二停止层的上表面几乎平齐，从而在相变材料层 03 的周边都残留第二停止层，可在外露于衬底 01 之上的光波导层 02 的外表面先覆盖形成第二氧化层和横截面呈 T 字形的第二停止层（即 S1023），其中，T 字形中竖直部分的宽度 L1 大于光波导层 02 的宽度 L0，从而保证后续刻蚀过程中，刻蚀到第二停止层时，可在相变材料层 03 的周围和底部都保留部分第二停止层，其中位于光波导层 02 与相变材料层 03 之间的部分即为第一隔离层 04（其厚度为 H4）。当然，在另一些实施例中也在外露于衬底 01 之上的光波导层 02 的外表面先覆盖形成第二氧化层和横截面呈十字形的第二停止层，且该十字形的宽度大于光波导层 02 的宽度，从而保证后续刻蚀过程中，刻蚀到第二停止层时，可在相变材料层 03 的周围和底部都保留部分第二停止层，其中，位于光波导层 02 与相变材料层 03 之间的部分即为第一隔离层 04（其厚度为 H4）。

如前所述，可预先直接在光波导层 02 上设置预先设置所需厚度为第四厚度 H4 的第一隔

离层 04, 因此, 在另一些实施例中, 该步骤 S103 中, 也可在外露于衬底 01 之上的光波导层 02 的外表面依次覆盖形成具有第四厚度 H4 (即 1nm~100nm) 的第二停止层和具有第二厚度 H2 的第二氧化层。然后通过开窗工艺可在该第二停止层上形成一个凹槽, 该凹槽中位于相变材料层 03 和光波导层 02 之间的槽底即为第一隔离层 04, 而围绕在该第一隔离层 04 周围的凹槽壁即为第二隔离层 06。

5 S105, 通过区域性刻蚀方法进行第二停止层和第二氧化层的开窗工艺, 使得在光波导层 02 上残留一层第二停止层。在一些实施例中, 通过区域性刻蚀方法进行第二停止层和第二氧化层的开窗工艺, 露出被覆盖在光波导层 02 上的部分第二停止层。目前常规的区域性刻蚀开窗工艺为干法刻蚀+湿法刻蚀结合或干法刻蚀+干法刻蚀的方式, 通过干法刻蚀进行刻蚀时需要开窗部分的第二氧化层, 刻蚀到第二停止层截至, 通过干法刻蚀或湿法刻蚀需要开窗部分的第二停止层至光波导层上方, 具体参数不同硅光流片厂都有一定的差异, 但主要视氧化层工艺、停止层工艺、干法刻蚀工艺、湿法刻蚀工艺而定, 也是较为常见的现有技术, 在此不再赘述。在一些实施例中, 该 S105 中, 需要注意的是: 区域性刻蚀开窗工艺必须避让金属互连层 5 和通孔, 即不可将金属互连层 5 和通孔裸露在窗口中且金属互连层和通孔需要与开窗工艺所刻蚀区域有一定距离, 具体距离大小依据不同硅光流片厂自身工艺水平确定。如前所述, 由于现有工业化生产中刻蚀工艺的局限, 开窗工艺很难直接完美地开在光波导层 02 上方, 即: 在对光波导层 02 不造成任何损伤的前提下, 没有多余的停止层和/或氧化层残留在光波导层 02 上。因此, 本方法中预先在步骤 S103 中, 通过预先在光波导层 02 上设置第一厚度 H1 或第三 H3 的第二停止层, 以及第二厚度 H2 的第二氧化层, 然后通过区域性刻蚀开窗工艺在第二氧化层和第二停止层上进行开窗, 并在光波导层 02 上保留第四厚度 H4 的第二停止层, 也即在开窗区域, 并不是将光波导层 02 上的第二停止层完全刻蚀掉, 而是在第二停止层上刻蚀出一个凹槽 (参见图 2b 中 S1015 或图 2c 中 S1025)。

另一方面, 如前所述, 考虑到停止层对相变材料层 03 对光波导层 02 中光的渐变场范围的影响, 优选地, 形成的该第一隔离层 04 的第四厚度 H4 为 1nm~100nm。

25 如前所述, 由于预先在光波导层 02 沉积了预设的指定厚度, 即第四厚度 H4 的第二停止层, 因此, 在开窗工艺中, 可直接刻蚀掉第二氧化层, 且在刻蚀过程中看到该第二停止层后即停止刻蚀即可, 从而使得在该光波导层 02 上保留了第四厚度 H4 的第二停止层, 也即第一隔离层 04。当然, 也可进行过刻蚀, 则在光波导层 02 上残留了厚度小于第四厚度 H4 的第二停止层, 也即第一隔离层 04 的厚度小于第四厚度 H4。

30 在一些实施例中, 开窗工艺中露出第二停止层的面积 (即第一隔离层 04 的面积) 由需要镀附的相变材料的面积而定。优选地, 露出的第二停止层的面积与相变材料层 03 的面积相同。

参见图 3c, 以条形波导为例, 通过区域性刻蚀方法进行第二停止层和第二氧化层的开窗工艺, 露出被覆盖在光波导层 02 上的第四厚度 H4 ($H4 < H1$) 的部分第二停止层, 也即第一隔离层 04; 且该第一隔离层 04 的面积与后续将要设置的相变材料层 03 的面积相同。

35 要保证露出的部分第二停止层, 也即第一隔离层 04 的面积与相变材料层 03 的面积相同, 或者差别不大, 其对刻蚀工艺的控制参数要求非常精确, 也即加工难度较高, 并且对后续的溅射工艺要求也较高。有鉴于此, 在步骤 S105 或 S1015 中进行刻蚀时, 并不是按照上述 1:1 (或接近 1:1) 的面积来进行开窗, 而是刻蚀出一个碗状或喇叭状的空腔 (或窗口), 然后在其内溅射相变材料, 最后再沉积第六厚度 H6 的第一氧化层, 得到第一保护层 05, 从而得到图 1e 所示结构的光波导。

S107, 采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至该窗口内露出的第二停止层的表面, 形成相变材料薄膜。在一些实施例中, 采用第一溅射工艺将相变材料溅射至该窗口内露出的第二停止层的上表面, 形成相变材料薄膜 (也即相变材料层 03)。在一

些实施例中, 该相变材料可以为包含锑或碲的硫族化合物形成或包含硫族化合物, 如碲化锑 (Sb_2Se_3 或 SbSe)、硫化锑 (Sb_2S_3 或 SbS)、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$ (GSST)。或者, 相变材料可以包括或由选自 GeSbTe 、 VO_x 的元素组合的化合物或合金组成; NbO_x 、 GeTe 、 GeSb 、 GaSb 、 AgInSbTe 、 InSb 、 InSbTe 、 InSe 、 SbTe 、 TeGeSbS 、 AgSbSe 、 SbSe 、 GeSbMnSn 、 AgSbTe 、 AuSbTe 和 AlSb 。

5 当然, 该相变材料也可以包括上述化合物的混合物, 或者, 该相变材料可以是超晶。在一些实施例中, 上述第一薄膜沉积工艺为磁控溅射工艺, 其具体流程为: 将经过步骤 S105 中的光芯片放入真空腔后, 开始将真空腔抽真空, 达到 1×10^{-6} Torr 的真空度后, 通入氩气, 并继续抽真空, 保持工艺真空度低于 3.5×10^{-3} Torr; 开启磁控溅射 RF 电源, 功率控制在 10W-100W, 控制形成的相变材料薄膜在 $1\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ 之间。

10 参见图 3d, 以条形波导为例, 直接在空腔内溅射相变材料, 得到厚度为 $1\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ 的相变材料层 03。在一些实施例中, 在窗口内沉积预设厚度 H_0 的相变材料层 03, 使得该预设厚度 H_0 和第四厚度 H_4 之和大于第一厚度 H_1 , 从而使得第二停止层上刻蚀出的凹槽包裹调制层底部和靠近光波导层 02 的第一区域 032 (参见图 2b 中 S1017, 以及图 1a、图 1b 和图 1e、图 1f), 也即刻蚀后的第二停止层形成一个包裹部分调制层的包裹层。

15 在另一些实施例中, 在窗口内沉积预设厚度 H_0 的相变材料层 03, 使得该预设厚度 H_0 小于或等于第三厚度 H_3 与第四厚度 H_4 之差, 从而使得第二停止层上刻蚀出的凹槽包裹调制层底部及其所有侧壁 (参见图 2c 中 S1027, 以及图 1c 和图 1d), 也即刻蚀后的第二停止层形成一个 (除了调制层顶部表面未包裹外) 几乎全包裹调制层的包裹层。

在另一些实施例中, 如前所述, 由于通过开窗工艺在厚度为 H_4 的第二停止层上进行过
20 刻蚀, 因此在窗口内沉积预设厚度 H_0 的相变材料层 03, 使得该预设厚度 H_0 和第一隔离层厚度之和大于第四厚度 H_4 时, 使得第二停止层上刻蚀出的凹槽包裹调制层底部和靠近光波导层 02 的第一区域 032 (参见图 2b 中 S1017, 以及图 1a、图 1b 和图 1e、图 1f), 也即刻蚀后的第二停止层形成一个包裹部分调制层的包裹层。当然, 若该预设厚度 H_0 小于或等于第四厚度 H_4 与第一隔离层厚度之差, 从而使得第二停止层上刻蚀出的凹槽包裹调制层底部及其所有侧壁 (参见图 2c 中 S1027, 以及图 1c 和图 1d), 也即刻蚀后的第二停止层形成一个 (除了
25 了调制层顶部表面未包裹外) 几乎全包裹调制层的包裹层。

S109, 采用第二薄膜沉积工艺将与步骤 S103 中同样材质的氧化层沉积至相变材料层 03 上实现覆盖, 实现相变材料与光波导平台的异质集成, 从而得到光波导。在一些实施例中, 第二薄膜沉积工艺将与步骤 S103 中同样材质的氧化层沉积至相变材料层 03 上从而实现覆盖,
30 进而实现相变材料与光波导平台的异质集成, 得到本发明示例性的光波导。优选地, 该第二薄膜沉积工艺为物理气相沉积 (PVD) 或化学气相沉积 (CVD) 工艺。在一些实施例中, 利用物理气相沉积 (PVD) 在相变材料层 03 上沉积氧化层的具体流程包括: 将经过步骤 S107 的光芯片放入真空腔后, 开始将真空腔抽真空, 达到 1×10^{-6} Torr 的真空度后, 通入氩气, 并继续抽真空, 保持工艺真空度低于 3.5×10^{-3} Torr, 开启磁控溅射 RF 电源, 功率控制在
35 10W-200W, 控制形成的氧化层薄膜的厚度在 $0.1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 之间。

在另一些实施例中, 利用化学气相沉积 (CVD) 在相变材料层上沉积氧化层的具体流程包括: 将经过步骤 S107 的光芯片放入真空腔后, 开始将真空腔抽真空, 达到 1×10^{-6} Torr 的真空度后, 加热衬底到 $150^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$, 通入 N_2 、 SiH_4 、 N_2O 气体, 保持沉积压力在 0.2Torr-2.0Torr, 开启 RF 电源, 功率控制在 20W-150W, 控制形成的氧化层薄膜的厚度在 $0.1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 之间。
40 参见图 3e, 以条形波导为例, 通过第二薄膜沉积工艺将与步骤 S103 中同样材质的氧化层沉积至相变材料层 03 上得到厚度为 H_6 的第一保护层 05, 进而实现相变材料与光波导平台的异质集成。

实施例 5: 稳定性试验。通常, 利用电压脉冲可使波导上的相变材料层 03 在晶态与非晶态之间发生可逆相变, 其中, 相变材料层 03 处于晶态时通过波导的光功率较低, 而相变材料

层 03 处于非晶态时通过光波导的光功率较高，因此，可利用透过含相变材料的光波导的光功率来表示相变材料层的稳定性。

下面以现有常规的集成相变材料方法制备的光波导为对照组，而以本文中上述实施例 1 的光波导作为实验组，通过对对照组和实验组的光波导中相变材料层做熔化和结晶的循环调制，并分别获取两组光波导在循环调制中的光功率，得到各自的循环调制光功率图，参见图 4（对照组）和图 5（实验组）。具体地，循环调制过程中，两组光波导中的相变材料层 03 的材料相同，且厚度相同（均为 30nm），相同调制器调制参数：相变材料层 03 熔化（从晶态变化到非晶态）的脉冲电压 9V，持续时间 200ns；结晶（从非晶态变化到晶态）的脉冲电压 3V，持续时间 1 μ s。

对照组：参见图 4，在现有集成相变材料方法下，对集成在光波导上的相变材料层 03 进行熔化-结晶的循环调制，在相变材料层 03 重新熔化或重新结晶后光功率并不能保持在相同的水平，并且在循环调制过程中其光功率波动较大（即，循环调制过程中，两种状态下的光功率偏移各自的均值线：晶态下的光功率均值线 S1 和非晶态下的光功率均值线 S2 较远），说明在调制过程中相变材料自身发生了性质上的改变，从而导致不能对相变材料的状态进行稳定的调制。

实验组：参见图 5，上述实施例 1 所示的光波导中相变材料层 03 在熔化-结晶的循环调制过程中，其重新熔化或重新结晶后光功率保持在相同的水平，并且在循环调制过程中其光功率波动很小（即，循环调制过程中，两种状态下的光功率几乎与各自的均值线：晶态下的光功率均值线 S3 和非晶态下的光功率均值线 S4 重合，或偏差很小），说明相变材料在循环调制过程中表现稳定，在现有结构下能够对相变材料的状态进行稳定的调制。

本文中的 L 字形、T 字形、凹字形等采用文字（如中文或英文等等）形状描述词包括该文字在各种字体形式下的形状，也包括非标准文字形状的结构，例如，L 字形的顶部可以有横向延伸的突出短边（相较于底部较短），只需要其大致结构看起来为相应文字形状即可。同理，本文中采用几何形状描述的各种结构，其包括标准的几何形状，也包括非标准几何形状（或称之为相似或相近形状）。例如本文中的矩形包括几何形状中的标准矩形，也可以是非标准的近似矩形。例如，由于工艺限制等等因素使得由第一凹槽与第二凹槽侧壁对接形成的密封腔的侧壁有微量倾斜，或者第一凹槽和第二凹槽侧壁对接时有微量偏差，但整体结构上看仍然接近矩形。

需要说明的是，在本文中，术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含，从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者装置不仅包括那些要素，而且还包括没有明确列出的其他要素，或者是还包括为这种过程、方法、物品或者装置所固有的要素。在没有更多限制的情况下，由语句“包括一个……”限定的要素，并不排除在包括该要素的过程、方法、物品或者装置中还存在另外的相同要素。

上面结合附图对本发明的实施例进行了描述，但是本发明并不局限于上述的具体实施方式，上述的具体实施方式仅仅是示意性的，而不是限制性的，本领域的普通技术人员在本发明的启示下，在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下，还可做出很多形式，这些均属于本发明的保护之内。

权 利 要 求 书

1. 一种光波导, 其特征在于, 包括: 光波导层, 位于所述光波导层上的调制层, 所述光波导层和所述调制层之间设置有第一隔离层, 所述调制层上覆盖有第一保护层, 还包括: 围绕在所述第一隔离层和所述调制层周围, 且横截面呈倒置 L 字形的第二隔离层, 以及围绕在
5 所述第一保护层、所述第二隔离层、所述光波导层周围的第二保护层; 其中, 所述调制层被包裹在由所述第一保护层、所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成的密闭腔内, 且所述调制层为相变材料层或所述调制层包括相变材料层。

2. 根据权利要求 1 所述的光波导, 其特征在于, 所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成开口朝向所述第一保护层的第二凹槽, 所述第二凹槽内槽底到顶部开口的高度大于或
10 等于所述调制层的厚度。

3. 根据权利要求 2 所述的光波导, 其特征在于, 所述第二凹槽为通过区域性刻蚀方法对预先覆盖在所述光波导层上的横截面呈 T 字形或凹字形的所述第二隔离层, 以及覆盖在所述光波导层和所述第二隔离层上的所述第二保护层进行刻蚀形成。

4. 根据权利要求 1 至 3 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述相变材料层为通过溅射工艺在所述第一隔离层上溅射相变材料得到; 和/或, 所述第一保护层通过物理气相沉积或化学气相沉积工艺在所述相变材料层上进行沉积得到。
15

5. 根据权利要求 1 至 3 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述第一保护层的上表面和所述第二保护层的上表面平齐。

6. 根据权利要求 1 至 3 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述第一隔离层的厚度为
20 1nm~100nm; 和/或, 所述第一隔离层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$; 和/或, 所述第一保护层的厚度为 $0.1\mu\text{m}$ ~ $3\mu\text{m}$; 和/或, 所述调制层的厚度为 1nm~ $1\mu\text{m}$; 和/或, 所述调制层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 。

7. 根据权利要求 1 至 3 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述相变材料层是由超晶格材料制成; 或者, 所述相变材料层是由包含锑或碲的硫族化合物形成; 或者, 所述相变材料层包含硫族化合物, 其中, 所述硫族化合物包括 Sb_2Se_3 或 SbSe 、 Sb_2S_3 或 SbS 、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$; 或者, 所述相变材料层的相变材料包括包含有锗、锑、碲、钒氧化合物的元素组合的化合物或合金或所述化合物的混合物; 所述化合物包括: NbO_x 、 GeTe 、 GeSb 、 GaSb 、 AgInSbTe 、 InSb 、 InSbTe 、 InSe 、 SbTe 、 TeGeSbS 、 AgSbSe 、 SbSe 、 GeSbMnSn 、 AgSbTe 、 AuSbTe 和 AlSb 。
25

8. 根据权利要求 1 至 3 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述光波导包括金属互连层, 所述金属互连层嵌于所述第二保护层; 和/或, 所述光波导层的横截面呈矩形或凸字形。
30

9. 根据权利要求 1 至 3 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述第一保护层为 SiO_2 、 Al_2O_3 、ITO 中的任一种或多种制成; 和/或, 所述第二保护层为 SiO_2 、 Al_2O_3 、ITO 中的任一种或多种制成; 和/或, 所述第一隔离层为 Si_3N_4 、 TiN 中一种或两种制成; 和/或, 所述第二
35 隔离层为 Si_3N_4 、 TiN 中一种或两种制成。

10. 一种制备权利要求 1 至 9 中任一所述的光波导的方法, 其特征在于, 包括步骤:

S1021, 在衬底上集成光波导层, 形成光波导平台;

S1023, 在外露于衬底之上的光波导层的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第三厚度的第二停止层和第二厚度的第二氧化层; 其中, 所述第二停止层位于所述光波导层上方, 其横截面呈 T 字形或凹字形, 且 T 字形的所述第二停止层中竖直部分的宽度大于所述
40 光波导层的宽度, 或凹字形的所述第二停止层的宽度大于所述光波导层的宽度;

S1025, 通过区域性刻蚀方法进行所述第二停止层和所述第二氧化层的开窗工艺, 使得所述第二停止层在所述光波导层上形成第四厚度的第一隔离层, 以及围绕在所述第一隔离层周围, 且横截面呈倒置 L 形的第二隔离层; 其中, 所述第四厚度小于所述第三厚度;

S1027, 采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至所述第一隔离层的表面, 以在所述第一隔离层及其周围的所述第二隔离层所形成的窗口内形成预设厚度的相变材料层; 所述预设厚度小于或等于所述第三厚度与所述第四厚度之差;

5 S1029, 采用第二薄膜沉积工艺将与步骤 S1013 中同样材质的氧化层沉积至相变材料层实现覆盖, 得到第六厚度的第一保护层。

11. 一种光波导, 其特征在于, 包括: 光波导层, 位于所述光波导层上的调制层, 所述光波导层和所述调制层之间设置有第一隔离层, 且所述调制层上覆盖有第一保护层, 还包括: 围绕在所述第一隔离层、所述调制层靠近所述第一隔离层的第一区域周围的第二隔离层, 以及围绕在所述第一保护层、所述调制层靠近所述第一保护层的第二区域、所述第二隔离层和所述光波导层周围的第二保护层; 其中, 所述调制层被包裹在由所述第一保护层、所述第二保护层、所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成的密闭腔内, 且所述调制层包括相变材料层或所述调制层为相变材料层。

12. 根据权利要求 11 所述的光波导, 其特征在于, 所述第一保护层及围绕在所述第一保护层和所述调制层的第二区域周围的所述第二保护层围合形成横截面呈倒置四字形的第一凹槽; 所述第一隔离层及围绕在所述第一隔离层和所述调制层的第一区域周围的所述第二隔离层围合形成横截面呈四字形的第二凹槽, 且所述第一凹槽的开口和所述第二凹槽的开口相对设置, 使得所述第一凹槽和所述第二凹槽围合形成了横截面呈矩形的所述密闭腔。

13. 根据权利要求 11 所述的光波导, 其特征在于, 所述第一保护层及围绕在所述第一保护层和所述调制层的第二区域周围的所述第二保护层围合形成横截面呈倒置 U 形的第一凹槽; 所述第一隔离层及围绕在所述第一隔离层和所述调制层的第一区域周围的所述第二隔离层围合形成横截面呈 U 形的第二凹槽, 且同一横截面中, 所述第一凹槽相对设置的侧壁之间的间距沿靠近所述光波导层的方向逐渐减小, 而所述第二凹槽相对设置的侧壁之间的间距沿远离所述光波导层的方向逐渐增大, 且所述第一凹槽的开口和所述第二凹槽的开口相对设置, 使得所述第一凹槽的侧壁和所述第二凹槽的侧壁平滑连接, 并围合形成了碗状或喇叭状的所述密闭腔。

14. 根据权利要求 11 至 13 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述第一隔离层为通过区域性刻蚀方法对预先覆盖在所述光波导层上的所述第二保护层和所述第二隔离层进行刻蚀形成具有顶部开口的空腔的腔底; 和/或, 所述相变材料层为通过溅射工艺在所述第一隔离层上溅射相变材料得到; 和/或, 所述第一保护层通过物理气相沉积或化学气相沉积工艺在所述调制层上进行沉积得到。

15. 根据权利要求 11 至 13 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述第一保护层的上表面和所述第二保护层的上表面平齐。

16. 根据权利要求 11 至 13 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述第一隔离层的厚度为 1nm~100nm; 和/或, 所述第一隔离层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 1 μm~10 μm; 和/或, 所述第一保护层的厚度为 0.1 μm~3 μm; 和/或, 所述调制层的厚度为 1nm~1 μm; 和/或, 所述调制层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 1 μm~10 μm。

17. 根据权利要求 11 至 13 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述相变材料层是由超晶格材料制成; 或者, 所述相变材料层是由包含锑或硒的硫族化合物形成, 或者, 所述相变材料层包含所述硫族化合物, 其中, 所述硫族化合物包括 Sb₂Se₃ 或 SbSe、Sb₂S₃ 或 SbS、Ge₂Sb₂Se₄Te; 或者, 所述相变材料层的相变材料包括包含有锗、锑、硒、钋氧化化合物的元素组合的化合物或合金或所述化合物的混合物; 所述化合物包括: NbOx、GeTe、GeSb、GaSb、AgInSbTe、InSb、InSbTe、InSe、SbTe、TeGeSbS、AgSbSe、SbSe、GeSbMnSn、AgSbTe、AuSbTe 和 AlSb。

18. 根据权利要求 11 至 13 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述光波导包括金属互

连层, 所述金属互连层嵌于所述第二保护层; 和/或, 所述光波导层的横截面呈矩形或凸字形。

19. 根据权利要求 11 至 13 中任一所述的光波导, 其特征在于, 所述第一保护层 SiO_2 、 Al_2O_3 、ITO 中的任一种或多种制成; 和/或, 所述第二保护层为 SiO_2 、 Al_2O_3 、ITO 中的任一种或多种制成; 和/或, 所述第一隔离层为 Si_3N_4 、TiN 中一种或两种制成; 和/或, 所述第二隔离层为 Si_3N_4 、TiN 中一种或两种制成。

20. 一种制备权利要求 12 所述的光波导的方法, 其特征在于, 包括步骤:

S1011, 在衬底上集成光波导层, 形成光波导平台;

S1013, 在外露于衬底之上的所述光波导层的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第一厚度的第二停止层和第二厚度的第二氧化层, 其中, 所述第二停止层位于所述光波导层上方, 且所述第二停止层的宽度大于所述光波导层的宽度;

S1015, 通过区域性刻蚀方法进行所述第二停止层和所述第二氧化层的开窗工艺, 使得所述第二停止层在所述光波导层上形成第四厚度的第一隔离层, 以及围绕在所述第一隔离层周围的所述第二隔离层, 所述第四厚度小于所述第一厚度;

S1017, 采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至窗口内露出的所述第一隔离层的表面, 形成预设厚度的相变材料层; 所述预设厚度与所述第四厚度之和大于所述第一厚度;

S1019, 采用第二薄膜沉积工艺将与步骤 S1013 中同样材质的氧化层沉积至所述相变材料层实现覆盖, 得到第六厚度的第一保护层。

21. 一种制备光波导的方法, 其特征在于, 包括步骤:

S1021, 在衬底上集成光波导层, 形成光波导平台;

S1023, 在外露于衬底之上的光波导层的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第四厚度的第二停止层和第二厚度的第二氧化层; 其中, 所述第二停止层位于所述光波导层上方, 其横截面呈 T 字形或凹字形, 且 T 字形的所述第二停止层中竖直部分的宽度大于所述光波导层的宽度, 或凹字形的所述第二停止层的宽度大于所述光波导层的宽度; 其中, 所述第四厚度为 1nm~100nm;

S1025, 通过区域性刻蚀方法进行所述第二停止层和所述第二氧化层的开窗工艺, 使得所述第二停止层在所述光波导层上形成厚度小于所述第四厚度的第一隔离层, 以及围绕在所述第一隔离层周围, 且横截面呈倒置 L 形的第二隔离层;

S1027, 采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至所述第一隔离层的表面, 以在所述第一隔离层及其周围的所述第二隔离层所形成的窗口内形成预设厚度的相变材料层; 所述预设厚度小于或等于所述第四厚度与所述第一隔离层的厚度之差;

S1029, 采用第二薄膜沉积工艺将与步骤 S1013 中同样材质的氧化层沉积至相变材料层实现覆盖, 得到第六厚度的第一保护层。

22. 根据权利要求 21 所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述第四厚度 H4 预先通过仿真得到。

23. 根据权利要求 21 所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述第一隔离层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 。

24. 根据权利要求 21 所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述相变材料层的厚度为 1nm~ $1\mu\text{m}$; 和/或, 所述相变材料层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 。

25. 根据权利要求 21 至 24 中任一所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述相变材料层是由超晶格材料制成。

26. 根据权利要求 21 至 24 中任一所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述相变材料层是由包含锑或硒的硫族化合物形成, 或者所述相变材料层包含所述硫族化合物, 其

中, 所述硫族化合物包括 Sb_2Se_3 或 SbSe 、 Sb_2S_3 或 SbS 、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$ 。

27. 根据权利要求 21 至 24 中任一所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述相变材料包括包含有锗、锑、硒、钋氧化合物的元素组合的化合物或合金或所述化合物的混合物; 所述化合物包括 NbO_x 、 GeTe 、 GeSb 、 GaSb 、 AgInSbTe 、 InSb 、 InSbTe 、 InSe 、 SbTe 、 TeGeSbS 、 AgSbSe 、 SbSe 、 GeSbMnSn 、 AgSbTe 、 AuSbTe 和 AlSb 。

28. 根据权利要求 21 至 24 中任一所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述第二停止层为 Si_3N_4 、 TiN 中一种或两种制成。

29. 一种根据权利要求 21 至 28 中任一所述的制备光波导的方法制备得到的光波导, 其特征在于, 包括: 光波导层, 位于所述光波导层上的调制层, 所述光波导层和所述调制层之间设置有第一隔离层, 所述调制层上覆盖有第一保护层, 还包括: 围绕在所述第一隔离层和所述调制层周围, 且横截面呈倒置 L 字形的第二隔离层, 以及围绕在所述第一保护层、所述第二隔离层、所述光波导层周围的第二保护层; 其中, 所述调制层被包裹在由所述第一保护层、所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成的密闭腔内, 且所述调制层为相变材料层或所述调制层包括相变材料层; 其中, 所述第一隔离层的厚度小于第四厚度, 所述第四厚度为 1nm~100nm。

30. 根据权利要求 29 所述的光波导, 其特征在于, 所述第一隔离层和所述第二隔离层围合形成开口朝向所述第一保护层的第二凹槽, 所述第二凹槽内槽底到顶部开口的高度大于或等于所述调制层的厚度。

31. 一种制备光波导的方法, 其特征在于, 包括步骤:

S1011, 在衬底上集成光波导层, 形成光波导平台;

S1013, 在外露于衬底之上的所述光波导层的外表面通过物理气相沉积或化学气相沉积形成第四厚度的第二停止层和第二厚度的第二氧化层, 其中, 所述第二停止层位于所述光波导层上方, 且所述第二停止层的宽度大于所述光波导层的宽度; 所述第四厚度为 1nm~100nm;

S1015, 通过区域性刻蚀方法进行所述第二停止层和所述第二氧化层的开窗工艺, 使得所述第二停止层在所述光波导层上形成厚度小于所述第四厚度的第一隔离层, 以及围绕在所述第一隔离层周围的所述第二隔离层;

S1017, 采用第一薄膜沉积工艺将相变材料通过物理气相沉积方法沉积至窗口内露出的所述第一隔离层的表面, 形成预设厚度的相变材料层; 所述预设厚度与所述第一隔离层的厚度之和大于所述第四厚度;

S1019, 采用第二薄膜沉积工艺将与步骤 S1013 中同样材质的氧化层沉积至所述相变材料层实现覆盖, 得到第六厚度的第一保护层。

32. 根据权利要求 31 所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述第一隔离层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 。

33. 根据权利要求 31 所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述相变材料层的厚度为 1nm~ $1\mu\text{m}$; 和/或, 所述相变材料层沿所述光波导长度方向延伸的长度为 $1\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ 。

34. 根据权利要求 31 至 33 中任一所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述相变材料层是由超晶格材料制成。

35. 根据权利要求 31 至 33 中任一所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述相变材料层是由包含锑或硒的硫族化合物形成, 或者所述相变材料层包含所述硫族化合物, 其中, 所述硫族化合物包括 Sb_2Se_3 或 SbSe 、 Sb_2S_3 或 SbS 、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$ 。

36. 根据权利要求 31 至 33 中任一所述的一种制备光波导的方法, 其特征在于, 所述相变材料包括包含有锗、锑、硒、钋氧化合物的元素组合的化合物或合金或所述化合物的混合物; 所述化合物包括 NbO_x 、 GeTe 、 GeSb 、 GaSb 、 AgInSbTe 、 InSb 、 InSbTe 、 InSe 、 SbTe 、 TeGeSbS 、 AgSbSe 、 SbSe 、 GeSbMnSn 、 AgSbTe 、 AuSbTe 和 AlSb 。

37.根据权利要求 31 至 33 中任一所述的一种制备光波导的方法,其特征在于,所述第二氧化层为 SO_2 、 Al_2O_3 、ITO 中的任一种或多种制成。

38.根据权利要求 31 至 33 中任一所述的一种制备光波导的方法,其特征在于,所述第二停止层为 Si_3N_4 、TiN 中一种或两种制成。

5 39.一种根据权利要求 31 至 38 中任一所述制备光波导的方法制备得到的光波导,其特征在于,包括:光波导层,位于所述光波导层上的调制层,所述光波导层和所述调制层之间设置有第一隔离层,且所述调制层上覆盖有第一保护层,还包括:围绕在所述第一隔离层、
10 所述调制层靠近所述第一隔离层的第一区域周围的第二隔离层,以及围绕在所述第一保护层、
所述调制层靠近所述第一保护层的第二区域、所述第二隔离层和所述光波导层周围的第二保
15 护层;其中,所述调制层被包裹在由所述第一保护层、所述第二保护层、所述第一隔离层和
所述第二隔离层围合形成的密闭腔内,且所述调制层包括相变材料层或所述调制层为相变材
料层;其中,所述第一隔离层的厚度小于第四厚度,所述第四厚度为 1nm~100nm。

40.根据权利要求 39 所述的光波导,其特征在于,所述第一保护层及围绕在所述第一保
护层和所述调制层的第二区域周围的所述第二保护层围合形成横截面呈倒置凹字形的第一
15 凹槽;所述第一隔离层及围绕在所述第一隔离层和所述调制层的第一区域周围的所述第二隔
离层围合形成横截面呈凹字形的第二凹槽,且所述第一凹槽的开口和所述第二凹槽的开口相
对设置,使得所述第一凹槽和所述第二凹槽围合形成了横截面呈矩形的所述密闭腔;或者,
20 所述第一保护层及围绕在所述第一保护层和所述调制层的第二区域周围的所述第二保
护层围合形成横截面呈倒置 U 形的第一凹槽;所述第一隔离层及围绕在所述第一隔离层和所
述调制层的第一区域周围的所述第二隔离层围合形成横截面呈 U 形的第二凹槽,且同一横截
面中,所述第一凹槽相对设置的侧壁之间的间距沿靠近所述波导层的方向逐渐减小,而所述
第二凹槽相对设置的侧壁之间的间距沿远离所述波导层的方向逐渐增大,且所述第一凹槽的
开口和所述第二凹槽的开口相对设置,使得所述第一凹槽的侧壁和所述第二凹槽的侧壁平滑
连接,并围合形成了碗状或喇叭状的所述密闭腔。