arXiv:2603.04213v1 [physics.optics] 4 Mar 2026

由半导体激光器和布拉格反射波导构成的单片光子对源设计

THOMAS TENZLER,[1,*] JAN-PHILIPPKOESTER,[1] HANS WENZEL,[1] THORSTEN PASSOW,[2] QUANKUI YANG,[2] MARKO HAERTELT,[2] 和 ANDREA KNIGGE[1]

[1]费迪南德-布劳恩研究所 *(FBH)*，德国柏林[2]弗劳恩霍夫应用固体物理研究所 *(IAF)*，德国弗赖堡[*]*thomas.tenzler@fbh-berlin.de*

摘要： 我们提出了一种单片电驱动光子对源，其基于非线性砷化铝镓布拉格反射波导及其上方堆叠的激光结构。通过引入横向锥形结构，激射波导的基模可垂直耦合至布拉格反射波导的高阶模（布拉格模），从而通过II型自发参量下转换过程产生光子对。数值模拟表明，两种模式之间的耦合效率可达28%。将布拉格模与两个1550 nm基模进行相位匹配后，对于长度为2 mm的器件，在布拉格模功率为1 mW的假设下，光子对产生率为$1.7 \cdot 10^8$ 对/s。由于这种垂直耦合结构中的布拉格反射波导无需掺杂，因此可避免自由载流子吸收损耗和寄生发光。

1. 引言

光子对源对于量子密钥分发 [1]等基于量子的加密方案至关重要。这些关联光子对提供了一种物理上安全的信息加密方法。此外，当工作在通常用于电信的波长时，它们还能受益于已建成的基础设施。在小型化背景下，基于砷化铝镓的电驱动布拉格反射波导（BRW）激光器是实现这一目的的有前景候选器件。该器件产生约775 nm的激光光，随后通过称为自发参量下转换（SPDC）的过程将其转换为约1550 nm的关联光子对 [2–5]。这提供了一种紧凑且易于使用的关联光子对源，随后可用于涉及纠缠光子对的加密方案。然而，实现此类器件需要在BRW中引入有源区以及适当的掺杂分布。由此产生的自由载流子吸收损耗将降低光子对输出。载流子注入会导致寄生发光，并降低符合偶然比（CAR） [5]。自发参量下转换过程所需的相位匹配要求在同时获得高激光效率和高非线性效率方面做出折中。

我们提出了一种替代方案，将波导在空间上分为有源段和无源段，并针对各自的特定用途进行优化，即产生激光光或实现自发参量下转换。随后，为了整合波导的激光和自发参量下转换功能，我们引入了横向锥形结构，以实现有源和无源波导模式之间的高效垂直耦合 [6]。除了波导耦合外，这种通过横向锥形结构实现的集成方式，也已被证明可用作光纤耦合二极管激光器的模斑转换器 [7]。

在非线性过程的背景下，这种由有源区和无源区构成的结构此前已在理论上作为一种基于砷化铝镓的光学参量振荡器候选方案得到研究。其中，非线性波导由带包层的砷化镓芯层构成，并在

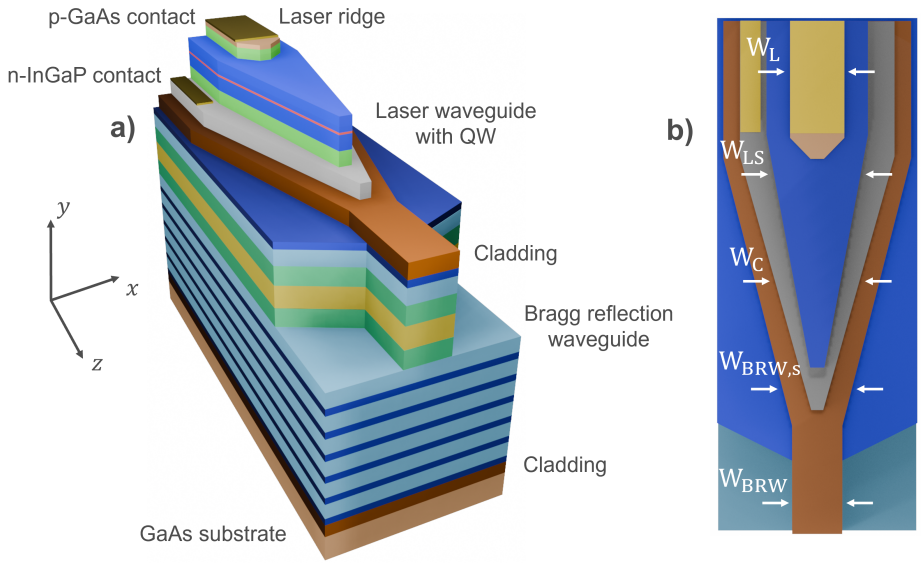


图1. a) 基于砷化铝镓的锥形堆叠波导激光器三维示意图。b) 图1a所示三维示意图的俯视图。波导及锥形结构中的相关宽度由 W标示。

约 975 nm 处实现相位匹配 [6]。由于要在约 1550 nm 处产生频率简并的光子对，需要在 775 nm 处激光，而 GaAs 在该波长下不透明，因此我们提出一种基于非对称布拉格反射波导的新型非线性波导。该波导可使 TE偏振高阶垂直波导模式与 1550 nm 处两个正交偏振基模之间实现相位匹配。激光波导的磷化铟镓 n 型接触和砷化镓p型接触均可从器件顶部接入，这与参考文献 [8]中报道的技术类似。

此外，底部布拉格反射波导中既不需要引入有源区，也不需要设置掺杂分布，从而减轻了自由载流子吸收光子对所造成的损耗。最近展示的砷化镓基光子集成电路平台（见参考文献 [9]）则并非如此。在该平台中，通过选择性量子阱去除和两步外延实现了有源和无源波导。相比之下，本文提出的堆叠波导方案仅需单步生长，因为激光和光子对产生功能通过横向锥形结构实现垂直耦合而集成在一起。

本文结构安排如下：第2节介绍垂直结构的设计及其模式。第3节阐述锥形结构的工作原理，并计算其耦合效率。第4节讨论无源布拉格反射波导的非线性特性。第5节总结全文。

2. 激光结构设计

堆叠波导方案能够分别优化波导中的有源段和无源段。如图1所示，该结构由底部布拉格反射波导和堆叠在其顶部的 775 nm 激光结构组成。电流注入通过结构顶部的 p型接触与激光波导和 BRW 之间的 n型接触实现。

未掺杂 BRW 的层堆叠由砷化镓衬底、$Al_{0.85}Ga_{0.15}As$ 包层、六对铝含量交替变化的布拉格反射器层 $Al_{0.25}Ga_{0.75}As/Al_{0.61}Ga_{0.39}As$ 、包围 $Al_{0.43}Ga_{0.57}As$ 芯层的两层 $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ 匹配层，以及其后的一

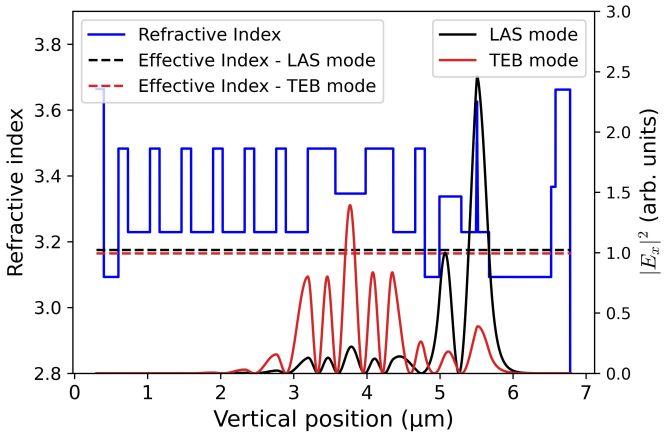


图 2. 折射率（蓝色）以及 LAS（黑色实线）和 TEB（红色实线）模式的强度垂直分布。两种模式对应的有效折射率以虚线表示。

对布拉格反射镜 $Al_{0.61}Ga_{0.39}As/Al_{0.25}Ga_{0.75}$ 和 $Al_{0.85}Ga_{0.15}As$ 包层组成。顶部激光波导的层堆叠由 n 型掺杂 InGaP 接触层、n-$Al_{0.61}Ga_{0.39}As$ 波导层、一个 InGaAsP 有源区、p-$Al_{0.61}Ga_{0.39}As$ 波导层、p-$Al_{0.85}Ga_{0.15}As$ 包层和 p-GaAs 帽层组成。

多个横向锥形结构可使导模在上部激光波导与底部布拉格反射波导之间耦合。因此，该器件随后可作为激光器运行，为二阶非线性过程提供泵浦光。激光运行所需的光学反馈可通过例如参考文献 [3] 所示的分布式布拉格反射器（DBR）结构来实现。就耦合而言，只要锥形角足够小，避免模式转换为不需要的（通常为高阶）模式，绝热锥形结构便能够以低损耗将一个波导中的模式耦合至另一个波导中的模式。两种不同波导模式之间的耦合效率遵循表达式 [10]

$$T_{ij} \propto \int dz\, A(z) e^{i(k_i - k_j)z} \tag{1}$$

其中耦合系数 $A(z)$ 取决于波导模式i与 j之间的模态重叠，以及由有效折射率$n_{\mathrm{eff},\,i}$和 $n_{\mathrm{eff},\,j}$决定的传播常数 $k_i = 2\pi n_{\mathrm{eff},\,i}/\lambda_0$和$k_j = 2\pi n_{\mathrm{eff},\,j}/\lambda_0$。因此，要实现高效耦合，除模态重叠非零外，还需要匹配各模式的有效折射率。

该垂直结构在 775 nm 处支持多种模式。其中最相关的是上部激光波导中的基模 TE 偏振激光模式（LAS 模）和底部布拉格反射波导中的 TE 偏振布拉格模式（TEB 模式）。通过一维模拟得到的这两种模式的强度分布如图 2 所示。LAS 模的有效折射率（$n_{\mathrm{eff},\,\mathrm{LAS}} = 3$。173）略高于 TEB 模式的有效折射率（$n_{\mathrm{eff},\,\mathrm{TEB}} = 3$。165）。因此，通过对上部激光波导进行锥形处理来降低 LAS 模的有效折射率，可以使 LAS 模和 TEB 模式的有效折射率匹配。还应注意，该垂直结构支持多种导模，例如底部布拉格反射波导的基模（FM 模）以及在底部布拉格反射波导反射层中传播的寄生模式（PAR 模）。这两种模式的有效折射率分别为 $n_{\mathrm{eff},\,\mathrm{FM}} = 3$。428 和 $n_{\mathrm{eff},\,\mathrm{PAR}} = 3$。313，显著高于 TEB 模式的有效折射率；这意味着它们无法与 1550 nm 附近的基模实现相位匹配。由于这些寄生模式的有效折射率显著高于

LAS 模的有效折射率，因此预计不会与 LAS 模发生寄生耦合。

关于根据公式 (1) 实现波导模式之间耦合所必需的模态重叠，需要注意的是，底部布拉格反射波导的垂直结构采用了非对称设计：芯区下方有六对结构，而上方仅有一对。因此，有源区与 BRW 芯区之间“包层”层的厚度较小，导致 TEB 和 LAS 模式泄漏到波导的相应区域，从而确保两种波导模式之间存在模态重叠。

尽管 BRW 采用了这种非对称设计，该波导仍支持 775 nm 处的 TEB 模式，并且该模式可与 1550 nm 处的 TE/TM 偏振基模实现相位匹配。另一方面，LAS 模式与有源区之间的高模态重叠对于激光器性能十分重要。因此，在 n型接触下方引入了一层 $Al_{0.85}Ga_{0.15}As$ 包层，从而增加了激光光与有源区之间的重叠。

为完整起见，我们想指出，如果 BRW 采用对称设计，在 BRW 芯区的上方和下方设置多个反射器对，则无法观察到 LAS 模与 TEB 模式之间的耦合。这是由于布拉格反射器层的工作原理所致：穿过这些反射器层的光会发生相消干涉。由于 LAS 模和 TEB 模式的有效折射率非常相近，LAS 模与 TEB 模式之间的模态重叠消失。

应注意，BRW 与激光波导之间的 n 型接触层由晶格匹配的 n-InGaP 构成，类似于参考文献 [8] ，该材料在 775 nm 下是透明的。这种材料的引入是因为激光有源区与 BRW 芯区之间的所有层都必须在 775 nm 下透明，因为在锥形结构诱导的耦合过程中，光必须穿过所有这些层。否则，使用不透明层会导致显著的吸收损耗，从而损害器件性能。相比之下，由于带隙能量较低，GaAs 不适合作为 n 型接触材料$E_{g,\ \mathrm{GaAs}} = 1$。42eV $< E_{\lambda=775\mathrm{nm}} = 1$。6 eV [11]。

下文将介绍横向锥形结构，并研究 LAS 与 TEB 波导模式之间的耦合效率。

3. 横向锥形结构的耦合效率

表1. 横向锥形结构的宽度 W_i 和纵向延伸长度 z，以及各锥形段的刻蚀深度 d_i。

锥形段	z (μm)	W_L (μm)	W_{LS} (μm)	W_C (μm)	W_{BRW} (μm)
激光脊	0-30	3.0→0.5	7.0→4.5	11.0→8.5	15.0→12.5
激光波导	30-180	-	4.5→0.5	8.5→4.5	12.5→8.5
接触层	180-200	-	-	4.5→0.5	8.5→7.0
BRW	200-220	-	-	-	7.0→5.0
直线型BRW	>220	-	-	-	5.0
	d_L	d_{LS}	d_C	$d_{BRW,s}$	d_{BRW}
刻蚀深度（μm）	0.960	1.489	1.789	1.989	3.591

通过使用软件 FIMMWAVE/FIMMPROP [12], 中实现的本征模展开算法进行二维+z 仿真，可以确定

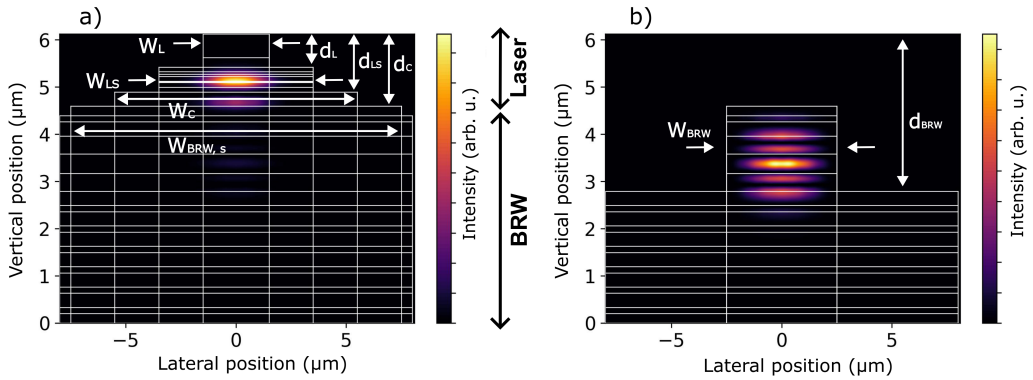


图 3. a) 纵向位置 $z = 0$ 处锥形段后端 LAS 模的强度分布。b) 纵向位置 $z \geq 220$ μm 处锥形段前端 TEB 模式的强度分布。刻蚀深度用 d 表示，横向波导宽度用 W 表示。

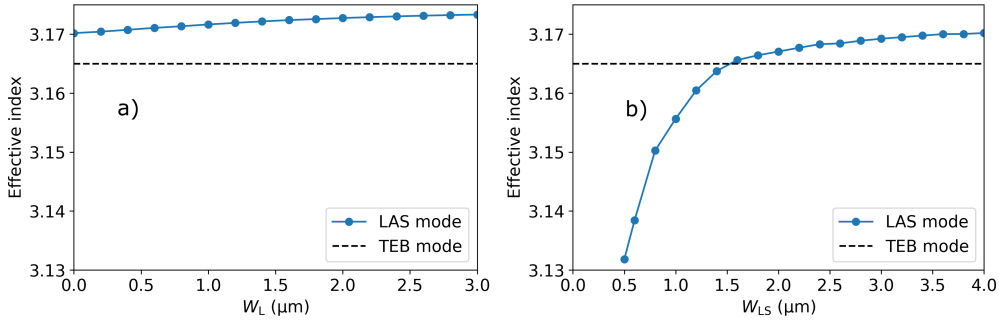


图 4. LAS 模的有效折射率（蓝色）：a) 改变 W_{L}，对应于图 5a 中 0 μm 至 30 μm 的锥形区域；b) 改变 W_{LS}，对应于图 5a 中 30 μm 至 180 μm 的锥形区域。虚线表示 TEB 模式的有效折射率。连接数据点的线用于引导视线。

LAS 模与 TEB 模式之间锥形段的耦合效率。该算法将横向截面内的场展开为局部波导模式的线性组合。在纵向上，锥形段被划分为若干较小且沿纵向均匀的截面；相邻两个截面界面处电场和磁场的过渡条件由此得出透射矩阵和反射矩阵。结合描述纵向传播的矩阵，即可计算出锥形段的总散射矩阵。长度为 L 的锥形段的性能由透射矩阵元 $|T^{0\to L}_{\mathrm{LAS},\ \mathrm{TEB}}|^2$ 确定，该矩阵元表示从锥形段后端（$z = 0$）到前端（$z = L$）之间，耦合自 LAS 模并进入 TEB 模式的功率比例。

各横截面处的矢量波导模式采用FIMMWAVE的复有限差分法（FDM）求解器确定。为加快仿真速度，我们利用结构的横向对称性，因为这可使仿真区域的尺寸减半。为在合理的时间范围内获得结果，我们引入封闭边界条件，具体而言，在结构顶部和底部设置金属壁，并在侧壁上设置磁壁，

即仿真区域。此外，为避免计算边界处的寄生反射，在仿真区域的侧壁和底部引入厚度为0.2 μm的完美匹配层（PML）。网格的空间分辨率在横向为0.1 μm，在垂直方向为0.01 μm。对于这些仿真参数，$z = 0$ 处所得LAS模的分布如图3a所示，BRW-RW中TEB模式的分布如图3b所示。

在对锥形段本身进行 2D+z 仿真之前，可以通过改变结构的脊宽，根据各模式的有效折射率，确定预计会发生 LAS 模与 TEB 模式耦合的感兴趣区域。图4a显示，减小激光脊的宽度（W_{L}）对 LAS 模的有效折射率影响可以忽略不计。只要 LAS 模的有效折射率仍高于 TEB 模式的有效折射率，该区域内的耦合预计可以忽略。另一方面，减小激光波导的宽度（W_{LS}）会使 LAS 模的有效折射率低于 TEB 模式的有效折射率，适用于 $W_{\mathrm{LS}} < 1$。5 μm，见图4b。因此，对激光波导进行锥形化可实现两种模式之间的耦合。

为了实现 LAS 模与 TEB 模式之间的高效耦合，采用了多个横向锥形结构，每个结构的刻蚀深度各不相同。表1列出了每个锥形段的脊宽和长度。为展示结构内的功率分布，图5a给出了坡印廷矢量纵向分量沿横向的积分彩色图，图5b则给出了沿垂直方向的积分彩色图。坡印廷矢量的纵向分量定义为

$$S_z := \frac{1}{2}\Re(E_x H_y^* - E_y^* H_x). \tag{2}$$

该量表示纵向的能量通量，因此，颜色图突出显示了光在整个锥形段中于上方和下方波导模式之间耦合的区域。

在第一个锥形段中，激光波导的 p 型接触层和脊形结构被移除。由于移除激光脊仅会略微降低 LAS 模的有效折射率，如图 4a 所示，因此该区域中的耦合可以忽略不计。因此，选用长度为 30 μm 的锥形段。

锥形段的第二段中，激光波导被移除，这主要促成了耦合过程，因为 LAS 模的有效折射率显著降低，见图 4b。如图 5a 所示，可以观察到以 LAS 模传播的光耦合进入底部布拉格反射波导的波导模式，尤其是在横向锥形结构的尖端附近，约 180 μm 处。为实现接近绝热功率传输的效果，该锥形段选用 150 μm 的长度。随后，采用第三个锥形段移除高掺杂的 n 型接触 InGaP 层。这是因为 InGaP 的高折射率会使相当一部分功率被限制在该层中，从而增加损耗。

需要指出的是，波导并非立即被刻蚀至非线性过程所需的最佳深度。相反，引入了一个额外的锥形段，用于刻蚀 n 型接触 InGaP 层下方的包层，以抑制向高阶横向模式的耦合。在最后一段锥形段中，BRW-RW 被刻蚀至非线性过程所需的最佳脊宽和刻蚀深度。由于在这最后两段中模式之间的耦合并非关注重点，这些锥形段的长度较短，并被选定为 20 μm。此外，为了更真实地模拟实际器件在光刻分辨率方面的制造限制，我们在仿真中将每个锥形段尖端的宽度视为非零（宽度为 0.5 μm）。

对于该结构，我们发现 LAS 模与 TEB 模式之间的耦合效率约为 $|T_{\mathrm{LAS,TEB}}^{0\to\mathrm{L}}|^2 = 28\%$。此外，相反方向的耦合效率

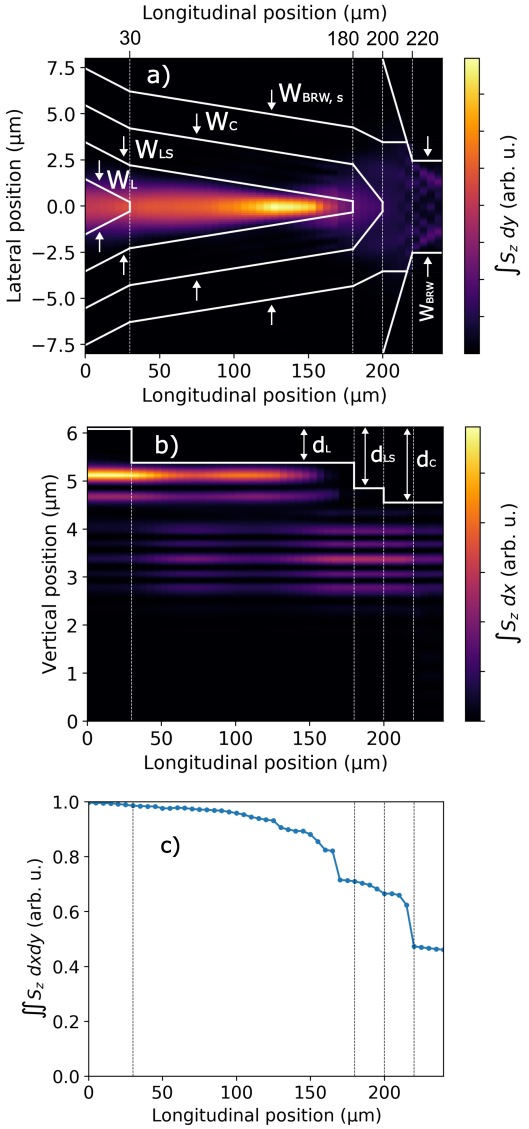


图5. a) 结构的俯视图。色图表示坡印廷矢量纵向分量的垂直积分。b) 结构的侧视图。色图表示坡印廷矢量纵向分量的横向积分。c) 坡印廷矢量纵向分量的横向与垂直积分随纵向位置的变化。a)–c)中的实心水平线和垂直线分别分隔具有不同折射率和刻蚀深度 d的区域。虚线根据表1标出各锥形段的边缘。横向波导宽度由 W表示。

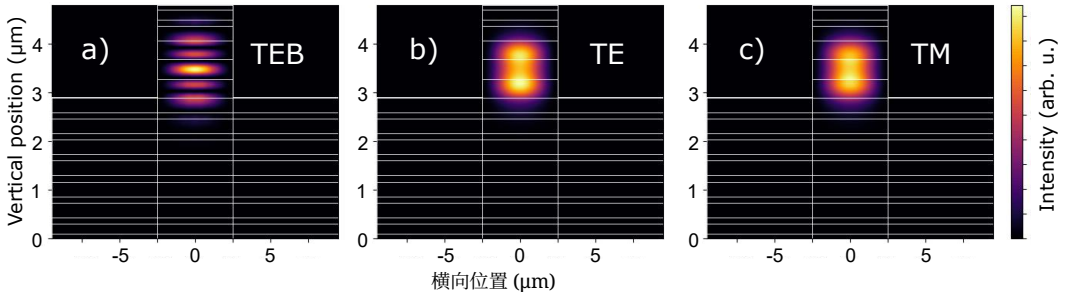


图6. BRW-RW 中 $z > 220\ \mu m$ 处的强度分布彩图：a) 775 nm 处的 TEB 模式；b) 1550 nm 处的 TE 模式；c) 1550 nm 处的 TM 模式。

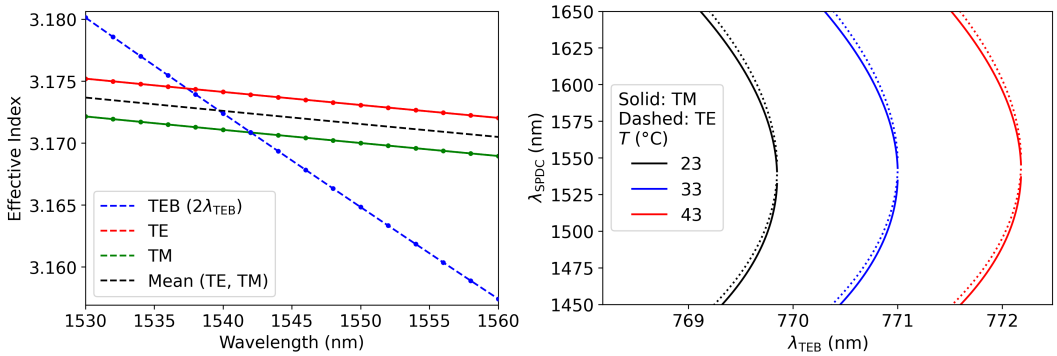


图7. a) BRW-RW 在 $T = 23\,℃$ 时 TEB 模式（蓝色）、TE 模式（红色）和 TM 模式（绿色）的有效折射率色散。b) BRW-RW 在不同温度下二阶非线性过程的相位图。

完全相同，即 $|T^{L\to 0}_{TEB,\ LAS}|^2 = 28\%$。尽管引入了浅刻蚀步骤，仍有约四分之一的功率耦合进入高阶横向波导模式，从而降低了效率。图5c 显示了这一点：经过最后一个锥形段后，总功率随纵向位置变化仍保持在 50%。

下一节将研究通过自发参量下转换过程在 BRW-RW 中产生光子对的情况。

4. BRW-RW 的特性

经过锥形段处理后，底部布拉格反射波导的脊宽为 5 μm，并刻蚀至第二匹配层。该波导在 775 nm 波长下支持 TEB 模式，在 1550 nm 波长下支持基模，其强度分布如图6所示。

通过自发参量下转换过程产生光子对取决于该过程是否满足相位匹配条件。这由 775 nm 附近 TEB 模式的有效折射率色散以及 1550 nm 附近基模的有效折射率色散决定，如图7a)所示。相应的相位图表示相位匹配方程的解

$$n_{\mathrm{eff,TEB}}(\omega_{\mathrm{TEB}})\omega_{\mathrm{TEB}} = n_{\mathrm{eff,TE}}(\omega_{\mathrm{TE}})\omega_{\mathrm{TE}} + n_{\mathrm{eff,TM}}(\omega_{\mathrm{TM}})\omega_{\mathrm{TM}} \tag{3}$$

并如图7b所示）。有效折射率由 FIMMWAVE 中实现的二维全矢量有限差分法本征模求解器确定 [12]，；而折射率模型、其色散以及非线性特性的计算则通过 Python 实现，

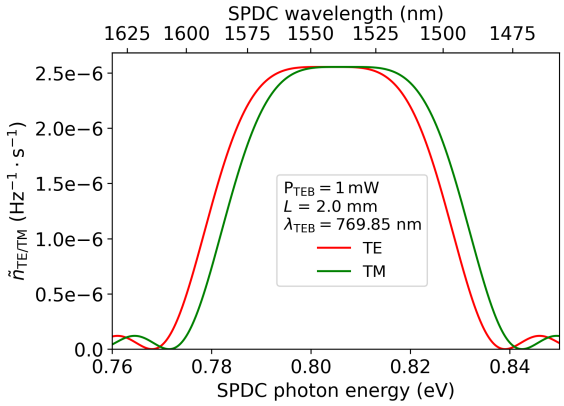


图 8. 假设布拉格模中的功率为 1 mW，长度为 2 mm 的 BRW-RW 对 TE/TM 偏振光进行频率简并自发参量下转换过程时的光谱光子速率 $\tilde{n}_{TE/TM}$。

该 Python 脚本基于参考文献 [2] 中展示的模型。光子对的产生速率由模态重叠和有效非线性决定，如参考文献 [2, 13] 所示。对于我们的结构，我们得到 $d_{eff} = 52\,\text{pm/V}$ 和 $\xi = 0.06\,\mu\text{m}^{-1}$。因此，我们估算，在一段长 2 mm 的 BRW-RW 中，假设输入功率为 1 mW，在频率简并自发参量下转换条件下（$\lambda_{TEB} \approx 770\,\text{nm}$ @23 °C），光子对产生率为 $\dot{N}_{tot} \approx 1.7 \cdot 10^8/\text{s}$。该产生率与参考文献 [14]中所示的其他无源 BRW-RW 相当。

通过温度调节还可以进一步调整相位匹配波长 re，调节幅度为 ≈ 1。2 nm/K，如图 7b 所示。

频率简并自发参量下转换的光子对产生率 $\tilde{n}_{TE/TM}$ [2] 如图 8 所示。在泵浦波长的两倍处 λ_{TEB}，TE-TM 和 TM-TE 光子对的产生率在约 30 nm 的光谱范围内保持恒定。超出这一范围后，TE 和 TM 偏振光子的产生率会出现差异（$\tilde{n}_{TE} \neq \tilde{n}_{TM}$）。其原因是基模的群速度不匹配，如参考文献 [2, 15] 所示。因此，将该器件用作偏振纠缠光子对源时，最佳工作范围为 1525 nm 至 1555 nm；在此范围内产生了大部分光子对，且两种偏振态的产生率相同。

5. 结论

我们通过数值模拟设计并研究了一种堆叠波导结构，其底部为无源布拉格反射波导，顶部为有源激光波导。在这种有源-无源结构方案中，激光波导经过掺杂，而 BRW 保持未掺杂。通过从顶部 p型接触注入空穴、从侧向 n型接触注入电子，在激光波导中产生光。激射模式的功率借助多个横向锥形结构传输至 BRW-RW 的 TE 偏振布拉格模式，为相位匹配的二阶非线性自发参量下转换过程提供泵浦光。对于所研究的结构，我们发现 LAS 模与 TEB 模式之间的耦合效率为 $|T^{0\to L}_{LAS,\ TEB}|^2 = 28\%$。

堆叠波导方案具有多项优势。例如，无需外部光泵浦即可实现自发参量下转换。此外，由于无源 BRW-RW 未掺杂且未加电偏置，因此避免了光子对的自由载流子吸收损耗和寄生发光。根据计算得出的 BRW-RW 特性，确定了频率简并自发参量下转换产生的光子对发射速率为 $\dot{N}_{tot} \approx 1.7 \cdot 10^8/\text{s}$

该结果适用于长度为 2 mm 的 BRW-RW，并假设 TEB 模式下的功率为 1 mW。因此，堆叠波导的光子对产生率与其他工作在相近波长下的无源 BRW-RW 相当。

致谢

我们衷心感谢德国联邦研究、技术与航天部（BMFTR）通过 VOMBAT 项目提供的资助，项目编号为 16KIS1768 和 16KIS1765K。

参考文献

1. J. O'Brien、A. Furusawa 和 J. Vučković，“光子量子技术”，《自然·光子学》**3**, 687–695 (2009). 2. T. Tenzler、J. Koester 和 H. Wenzel，“用于自发参量下转换的表面光栅布拉格反射波导激光器结构的理论研究”，《物理学文摘》**100**, 055105 (2025). 3. T. Tenzler、C. Zink、J. Fricke、等，“基于布拉格反射波导、用于自发参量下转换的可调谐稳波长激光器”，《电子学快报》**61**, e70416 (2025). 4. F. Boitier、A. Orieux、C. Autebert、等，“室温电注入光子对光源”，《物理评论快报》**112**, 183901 (2014). 5. Z. Léger、T. Stirling、M. Iu 和 A. Helmy，“由电池供电二极管激光器产生的确定性可分离偏振纠缠光子”，《npj量子信息》**11**, 128 (2025). 6. A. Gerini、M. Ravaro、C. Théveneau、等，“电注入 InGaAsP/AlGaAs 光学参量振荡器：设计与技术”，《美国光学学会杂志B辑》**38**, B40–B45 (2021). 7. K. Kawano、M. Kohtoku、M. Wada、等，“基于三维光束传播法，在 1.3 μm 波长范围内设计具有横向锥形结构、薄膜芯层和脊形结构的集成光斑尺寸转换器激光二极管（SS-LD）”，《IEEE量子电子学精选主题期刊》**2**, 348–354 (1996). 8. J. Koester、J. Fricke、H. Wenzel、等，“可转印倏逝耦合砷化镓基放大器芯片的设计与制造”，载于欧洲激光与光电子学会议（*2025*年欧洲激光与光电子学会议）和欧洲量子电子学会议（*2025*年欧洲量子电子学会议），（Optica出版集团，2025），第 cb_7_3 页。9. J. Koester、H. Wenzel、J. Fricke、等，“实现单片集成环形谐振器耦合激光器的砷化镓基光子集成电路平台”，《APL光子学》**9**, 106102 (2024). 10. F. Xia、V. Menon 和 S. Forrest，“采用非对称双波导（ATG）技术的光子集成：第一部分——概念与理论”，《IEEE量子电子学精选主题期刊》**11**, 17–29 (2005). 11. J. Piprek，“半导体简介”，载于半导体光电子器件：物理与仿真导论，（爱思唯尔，圣迭戈，加利福尼亚州，2003），第 7 页。12. “https://www.photond.com/products/fimmprop.htm”，。13. P. Abolghasem、J. Han、D. Kang、等，“利用多层芯布拉格反射波导中的二阶光学非线性实现单片光子集成”，《IEEE量子电子学精选主题期刊》**18**, 812–825 (2012). 14. R. Horn、P. Abolghasem、B. Bijlani、等，“单片光子对源”，《物理评论快报》**108**, 153605 (2012). 15. S. Zhukovsky、L. Helt、D. Kang、等，“在芯片上产生最大偏振纠缠光子”，Phys. Rev. A **85**, 013838 (2012).