材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.017

ITO 薄膜的近零介电常数波长的调控研究

周江昊，陈溢杭*

（华南师范大学 物理与电信工程学院，广州 510006）

摘　要： 近年来，氧化铟锡（ITO）薄膜因其可实现介电常数近零（Epsilon-Near-Zero，ENZ）且易于调制的特性，已经成为非线性光学和微纳光学等领域的研究热点。文章先使用射频磁控溅射法在硅基底上制备 ITO 薄膜，再通过椭圆偏振光谱仪测试并拟合其光学参数，探究了本底真空度、溅射功率、溅射气压、衬底温度和膜厚等因素对 ITO 薄膜 ENZ 波长的调节机制。通过优化工艺，使 ITO 薄膜最短 ENZ 波长蓝移至 1 094.4 nm，突破了以往文献报道的极限。该研究将 ITO 薄膜的 ENZ 波长延伸至近红外短波区域，有望实现微纳光电器件相关领域向短波方向的应用拓展。

关键词： ITO 薄膜；介电常数近零；磁控溅射；载流子浓度；工艺优化

中图分类号： O472.8　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0390－05

Research on the Control of the ENZ Wavelength of ITO Films

ZHOU Jianghao，CHEN Yihang

（College of Physics and Telecommunication Engin.，South China Normal University，Guangzhou 510006，CHN）

Abstract： ITO films have become a research hotspot in the fields of nonlinear optics and micro-nano optics because of its ability to achieve epsilon-near-zero and easy modulation. In this paper，ITO films were prepared on silicon substrates with the RF magnetron sputtering method. Then the optical parameters are tested and fitted by ellipsometer，which explore the adjustment mechanism of the ENZ wavelength of ITO thin films by factors such as background vacuum，sputtering power，sputtering pressure，substrate temperature and film thickness. And by optimizing the process，the shortest ENZ wavelength of the ITO film is blue-shifted to 1 094.4 nm，breaking the limit of previous reports. This research extends the ENZ wavelength of ITO films to the near-infrared short-wave region，and will realize the application expansion of micro-nano optoelectronic devices in the short-wave direction.

Key words： ITO films；ENZ；magnetron sputtering；carrier concentration；process optimization

0　引言

基于对透明光电材料的需求，针对透明导电氧化物（TCO），例如氧化铟锡（ITO）和掺杂铝的氧化锌（AZO），各领域已开展了一系列研究[1-3]。其中，ITO 薄膜因具有良导电性、低光学损耗和强折射率调制等优异的光电性能，已被广泛应用于光伏、显示器和集成光电器件等领域[4-11]。近年来，一种在特定波段呈现介电常数消失特性的新型材料，即介电常数近零（ENZ）材料，引起了广泛的关注。研究发现，ITO 薄膜可在近、中红外波段表现出 ENZ 特性，且其 ENZ 波长可以通过多种方式进行调制，以适应器件工作波长的需求。

ITO 在具备良好的光电性质的同时，也表现出

收稿日期：2021－03－02.

基金项目：广东省自然科学基金项目（2015A030311018，2017A030313035）；广州市科技计划项目（2019050001）.

* 通信作者：陈溢杭

ENZ 波长可调的性质，这引起了非线性光学领域的注意。自 2016 年起，Boyd 等针对 ITO 薄膜的 ENZ 特性进行了相关研究，成果相继发表在 Science，Nature Photonics 等期刊上[4-6]。这进一步激发了微纳光学和非线性光学相关领域的研究兴趣。此外，研究已经证明 ENZ 波长在很大程度上取决于 ITO 薄膜的载流子浓度。故可以通过对 ITO 薄膜载流子浓度的调控来实现对 ENZ 波长的调节，比如通过施加外部电场[12]，调整薄膜的制备工艺[10,13-17]，对薄膜表面进行激光损伤[18]等。然而目前 ENZ 波长最短仅达 1 200 nm[10,16-17]，这局限了 ITO 薄膜 ENZ 特性的短波应用。为了拓展其短波应用，我们设计了系统的实验对此进行研究。

本文将介绍 ITO 的电子来源和 Drude 模型，并阐述 ITO 薄膜的制备及测试流程。通过对照实验系统地探究射频磁控溅射的主要工艺参数对 ENZ 波长的调控机制，再结合测试结果优化工艺使 ENZ 波长蓝移。经过对比优化，确定了最佳的工艺条件：本底真空度为 3×10^{-5} Pa，射频溅射功率为 60 W，溅射气压为 2.9×10^{-2} Pa，工作气体为纯 Ar 气，气流量为 20 cm^3/min，衬底温度为 700 ℃。在经过 9 min 51 s 的溅射后制备出厚度为 38 nm 的 ITO 薄膜，获得了最短 ENZ 波长为 1 094.4 nm 的样品。

1　原理及实验

ITO 薄膜作为一种简并半导体，其光电性能十分依赖于工艺和制程[13-14]。工艺条件的变化会影响 ITO 薄膜的均匀性和晶相，从而导致其电阻率和载流子浓度产生差异。在 ITO 中，自由电子的主要来源有两种。一种由 Sn^{4+} 掺入 In^{3+} 形成的 n 型掺杂提供，另一种随着氧空位产生，见式(1)[10]。

$$O_0 \longrightarrow V_0^{2-} + 2e^- + \frac{1}{2}O_2(g) \tag{1}$$

因为实验采用标准靶材(In_2O_3 与 SnO_2 的质量比为 9∶1)，所以无需考虑靶材掺杂比例对自由电子数的影响，故载流子浓度主要由氧空位数目决定。相关研究表明，混合氧气制备[10]或在氧气中高温退火[16]，会使氧空位被氧分子填补，造成载流子浓度下降，进而导致 ENZ 波长红移。

之所以有这种变化规律，是因为载流子浓度下降会使介电常数发生改变。ITO 属于 n 型半导体，具有类似金属的性质。可使用金属中自由电子的 Drude 模型来描述其介电性质，如式(2)所示：

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\Gamma} = \varepsilon_{Re} + i\varepsilon_{Im} \tag{2}$$

其中，ε 表示材料的复介电常数，ε_{Re} 和 ε_{Im} 分别表示其实部和虚部，ε_∞ 为高频介电常数，ω_p 为等离子体频率，ω 是入射光角频率，Γ 是阻尼频率。ENZ 又称介电常数实部近零消失，当在一定入射光频率下使 $\varepsilon_{Re}=0$，即称该波长为此材料的 ENZ 波长(λ_{ENZ})，整理后可表示如下：

$$\lambda_{ENZ} = \frac{2\pi c}{\omega} = 2\pi c\sqrt{\frac{\varepsilon_\infty}{\omega_p^2 - \varepsilon_\infty\Gamma^2}} \tag{3}$$

其中，$\omega_p^2 = \frac{n_e^2}{\varepsilon_0 m_e^*}$，$\Gamma = \frac{e}{\mu m_e^*}$，$c$ 为真空光速，n_e 是材料的载流子浓度，e 为电子电荷量，m_e^* 是有效电子质量，μ 为载流子迁移率。由式(3)可知，材料的 λ_{ENZ} 由 ε_∞，ω_p 和 Γ 三部分决定。而 ε_∞ 的变化不明显，Γ 又比 ω_p 小 1～2 个数量级，所以 λ_{ENZ} 主要受 ω_p 调控。且由上式可知，ω_p 受 n_e 和 m_e^* 的影响，但一般情况下 m_e^* 随工艺变化较小，为方便讨论常令其为定值，并不是主要影响因素。这就印证了 λ_{ENZ} 的调节主要是通过调控 n_e 来实现，并在一定范围内，ω_p 随着 n_e 升高而增大，λ_{ENZ} 呈现蓝移的趋势。因此设法有效提高载流子浓度是 λ_{ENZ} 突破限制的关键。

除增加电子来源外，薄膜的电阻率、表面粗糙度和缺陷等因素也影响电子浓度，所以提升薄膜质量同样有助于突破 λ_{ENZ} 下限。为了综合两方面的效果，可通过真空高温后退火的方式[17]，既能产生更多氧空位使电子来源增多，又能降低缺陷损耗。制备 ITO 薄膜的各主要溅射工艺便需要进行系统性优化，即需采用纯 Ar 气，也要注意避免氧气在高温下与样品的接触，以致于载流子浓度提升效果不理想。

根据上述原理，设计对照实验进行对比优化，探究本底真空度、溅射功率、溅射气压、衬底温度和制程等因素对 λ_{ENZ} 的影响机制。实验流程如下：

首先将硅片切割成 1 cm×1 cm 的方片，依次使用无水乙醇和丙酮超声清洗 0.5 h 后，再浸入浓硫酸和双氧水 3∶1 的混合溶液浸泡 3 h。取出后多次使用去离子水和无水乙醇超声清洗 15 min，清洗完成即放入真空干燥箱干燥待用。接着使用 PATOR ATTO10 型磁控溅射镀膜机在硅基底上射频溅射制备 ITO 薄膜，工艺条件除变量外保持一致。然后在 ME-L Muller 矩阵椭圆偏振光谱仪上测试样品

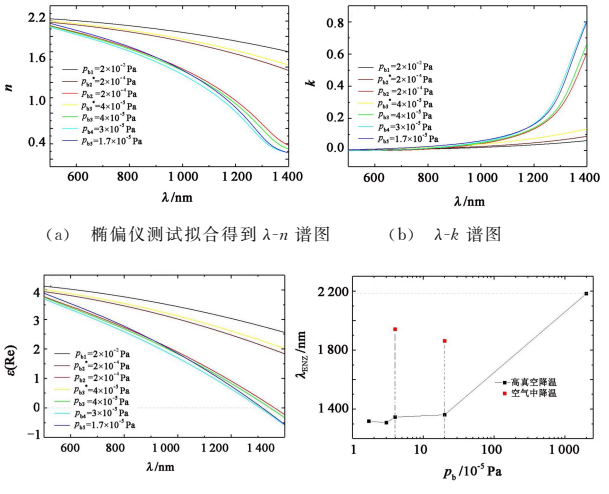
的光电特性，并代入 Drude 模型拟合出介电常数曲线以确定 λ_{ENZ}。同条件下重复多组，且采用多点测试取均值的方式降低偶然性。

2 实验结果及分析

将上述各变量的测试结果数据进行分组讨论，n 和 k 分别为复折射率 N 的实部和虚部。在拟合模型方面，因为 λ_{ENZ} 基本处于近红外波段，不会像高频时出现内部自由电子发生禁带跃迁引起介电常数振荡的现象，所以仅靠 Drude 模型足以描述其介电性质，无需添加 Lorentz 等模型进行修正。为排除模型选择问题，也将 Drude 模型的拟合结果与 Lorentz-Drude 模型和 GenOsc 模型（Tauc-Lorentz＋Drude＋Gaussian）的拟合结果进行了比较，结果显示 λ_{ENZ} 的差值在 3 nm 以内。另外经实验对比，气流量差异导致的 λ_{ENZ} 变化不明显，故本文一致保持为 20 cm^3/min。

2.1 本底真空度 p_b 和高温开腔对 λ_{ENZ} 的影响

本对照组以本底真空度 p_b 为变量，分别抽至 2×10^{-2}，2×10^{-4}，4×10^{-5}，3×10^{-5} 和 1.7×10^{-5} Pa 的本底真空后进行制备，其余工艺条件：射频溅射功率为 100 W，溅射气压为 2.9×10^{-2} Pa，衬底温度为 600 ℃，膜厚约为 100 nm。其中“*”号代表未等待样品冷却便放气开腔的样品组，即空气会在较高温下接触薄膜。测试结果如图 1 所示。



(a) 椭偏仪测试拟合得到 λ-n 谱图　(b) λ-k 谱图

(c) 各组对应的 ε(Re)谱图　(d) 本底真空度对 λ_{ENZ} 的影响

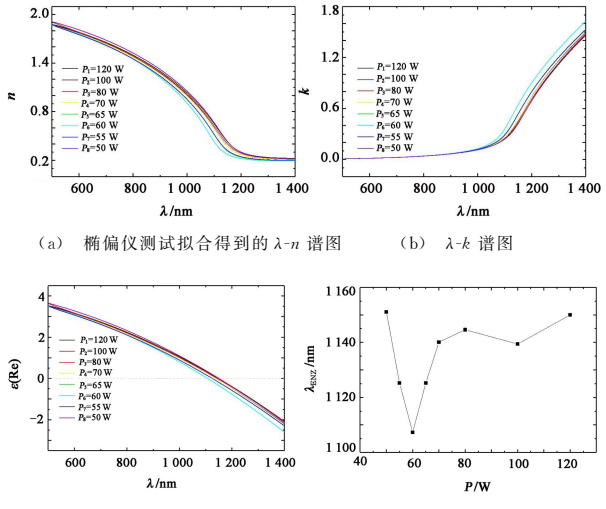
图 1 本底真空度 p_b 对 λ_{ENZ} 的影响

本底真空度 p_b 影响空气在腔室内的残余含量，而残存的氧气在高温情况下会填补氧空位，使载流子浓度提升效果不理想。从图 1(d)可知，抽真空时间很短，仅在低 p_b 下制备的 p_{b1} 组，其 λ_{ENZ} 接近 2 200 nm，且 λ_{ENZ} 随着 p_b 的提高出现蓝移。而当 p_b 抽至小于 3×10^{-5} Pa 后，λ_{ENZ} 变化不大，甚至略有红移。这是因为 ITO 薄膜在高度缺氧时 Sn^{4+} 的掺杂效率和载流子迁移率均会下降[19]，电子来源减少且 Γ 提升导致 λ_{ENZ} 发生红移，这与 2.4 节中衬底温度达到极高时的规律对应。由于抽至更高的本底真空耗时翻倍，也无蓝移效果，故后续实验组都采用 3×10^{-5} Pa 的本底真空度。

另外带“*”的 p^*_{b2} 和 p^*_{b3} 组在溅射结束后的开腔过程与对照组不同。样品会在较高温时与氧气接触，使氧空位数目急剧减少。从图 1 可知，它们各自与相同 p_b 条件的 p_{b2} 和 p_{b3} 组相比，λ_{ENZ} 会增大不少。虽然 λ_{ENZ} 也小于 p_{b1} 组，可蓝移效果有限。所以要使 λ_{ENZ} 向近红外短波区域移动，有必要在高温过程后保持高真空等待样品冷却。

2.2 射频溅射功率 P 对 λ_{ENZ} 的影响

本对照组以射频溅射功率 P 为变量，分别以图 2 图例中的溅射功率制备样品，其余工艺条件如下：本底真空度为 3×10^{-5} Pa，溅射气压为 2.9×10^{-2} Pa，衬底温度为 800 ℃，膜厚约为 40 nm。测试结果如图 2 所示。



(a) 椭偏仪测试拟合得到的 λ-n 谱图　(b) λ-k 谱图

(c) 各组对应的 ε(Re)谱图　(d) 溅射功率对 λ_{ENZ} 的影响

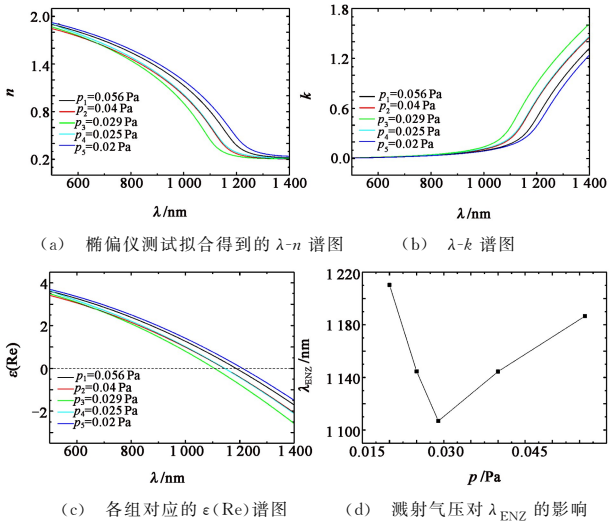
图 2 溅射功率 P 对 λ_{ENZ} 的影响

溅射功率 P 与加速电场强度，即 Ar^+ 离子的轰击能量正相关。提高轰击能量会使溅射原子到达基底的表面能上升，同时溅射出的原子团粒径也会增大，致使膜层较粗糙，令电阻率和损耗上升。但表面能过低也不利于溅射原子在基底上进行结晶迁移成膜，会使薄膜晶格缺陷增多且电子散射增强，即导致

薄膜电阻率增大。因此需要选取合适的功率，图 2(d)的变化趋势也与此符合。可以明显看出，当溅射功率为 60 W 时能得到最小的 λ_{ENZ}，而增大或减小功率，λ_{ENZ} 都会使之上升。故采用 60 W 使 λ_{ENZ} 尽可能蓝移。另一方面，在较小的功率下溅射速率会更慢，这也有利于控制膜层均匀性和厚度一致。

2.3　溅射气压 p 对 λ_{ENZ} 的影响

本对照组以溅射气压 p 为变量，分别在 5.6×10^{-2}，4×10^{-2}，2.9×10^{-2}，2.5×10^{-2} 和 2×10^{-2} Pa 的腔室气压下进行溅射制备，其余工艺条件如下：本底真空度为 3×10^{-5} Pa，射频溅射功率为 60 W，衬底温度为 800 ℃，膜厚约为 42 nm。测试结果如图 3 所示。



(a)　椭偏仪测试拟合得到的 λ-n 谱图　　(b)　λ-k 谱图

(c)　各组对应的 ε(Re)谱图　　(d)　溅射气压对 λ_{ENZ} 的影响

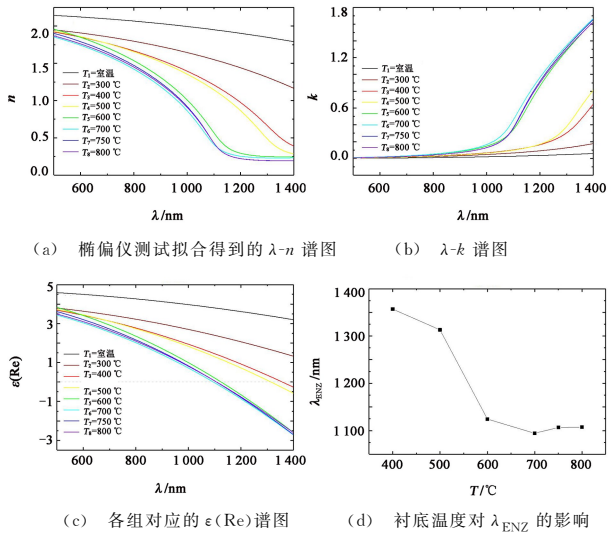
图 3　溅射气压 p 对 λ_{ENZ} 的影响

溅射气压 p 影响腔室内的气体密度，在不考虑电离率的情况下(均为电离饱和状态)，溅射气压对 λ_{ENZ} 的影响和功率类似。Ar^+ 离子加速轰击向靶材的过程，以及原子溅射到基底的过程，都会与环境气体分子发生碰撞散射，使能量衰减。越密集的气体环境会导致越大的能量衰减，进而使溅射速率下降，相反同理。且仅阈值内的溅射气压才能稳定维持辉光电离，所以也需要设定合适的值。从图 3 可以清晰地看到，溅射气压为 2.9×10^{-2} Pa 的 p_3 组 λ_{ENZ} 最小，所以其余实验组都会采用此气压进行溅射。同时 p_3 对于本仪器的真空指示计是变化敏感点，即在溅射过程中能明显观察到气压改变，可及时调整压力控制仪使溅射气压保持在原设定值。

2.4　衬底温度 T 对 λ_{ENZ} 的影响

本对照组以衬底温度 T 为变量，分别以图 4 中图例所示衬底温度进行溅射，其余工艺参数如下：本底真空度为 3×10^{-5} Pa，射频溅射功率为 60 W，溅射气压为 2.9×10^{-2} Pa，膜厚为 38 nm。测试结果如图 4 所示。

衬底温度 T 是指在溅射过程中，给固定基底的基片台所施加的温度。如原理部分所述，高温既能使薄膜产生更多的氧空位以提高载流子浓度，又能使晶相重新排列变得更加整齐，降低薄膜的缺陷和粗糙度，进而令电阻率和损耗得到改善。如图 4(c)所示，随着 T 提高至 400 ℃，λ_{ENZ} 已蓝移至可见区域边缘。继续提升至 700 ℃时 λ_{ENZ} 蓝移效果最好，但之后反而略有红移。原因也如 2.1 部分本底组解释，在极高温下薄膜会高度缺氧，载流子浓度提升到达边际效应，此前所忽略的 μ 和 m_e^* 的影响反而会占据主导因素。所以结果显示最佳 T 为 700 ℃。



(a)　椭偏仪测试拟合得到的 λ-n 谱图　　(b)　λ-k 谱图

(c)　各组对应的 ε(Re)谱图　　(d)　衬底温度对 λ_{ENZ} 的影响

图 4　衬底温度 T 对 λ_{ENZ} 的影响

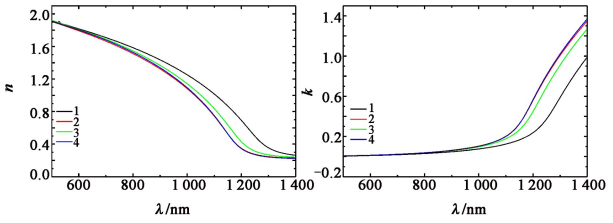
2.5　腔温退火和厚度 d 对 λ_{ENZ} 的影响

本组展示的是其他加热方式和厚度 d 对 λ_{ENZ} 的影响。第 1 组为基本对照组，第 2 组在第 1 组的基础上以 600 ℃衬底温度和 300 ℃的腔体温度后退火 1 h，第 3 和 4 组为在第 1 组基础上分别在溅射时施加 200 和 300 ℃的腔温。其余工艺条件相同，如下：本底真空度为 4×10^{-5} Pa，射频溅射功率为 100 W，溅射气压为 2.9×10^{-2} Pa，衬底温度为 600 ℃，1～4 号样品膜厚都约为 41 nm。对比结果如图 5(a)～(c)所示。

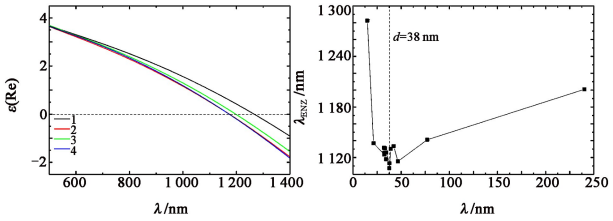
图 5(d)表示在不同溅射时间下，厚度 d 对 λ_{ENZ} 的影响，工艺条件：本底真空度为 3×10^{-5} Pa，射频溅射功率为 60 W，溅射气压为 2.9×10^{-2} Pa，衬底温度为 800 ℃。

从图 5(a)～(c)可以看出高腔温及高温退火都能使 λ_{ENZ} 发生明显的蓝移。同时第 2 组与第 4 组的效果基本一致，推测其中氧空位数目提升的主要因素为 300 ℃腔温，且仅保持较短时间(第 4 组仅在溅射时保持 5 min 300 ℃腔温)就有显著的蓝移效果。而对于第 3 组 200 ℃腔温，蓝移效果就较逊色，可相比第 1 组未施加腔温还是有明显作用。

从图 5(d)可以看出，随着膜厚下降，λ_{ENZ} 明显蓝移，在 38 nm 左右到达极限，继续减薄会发生红移。这是由于电阻率随膜厚变化，当薄膜极薄时，膜间电阻会上升，致使载流子浓度下降。而薄膜较厚时，透过基底传导的衬底温度在膜层内形成不均匀的温度梯度[10]，使电阻率分布不均，温度提升效果有限。为了使 λ_{ENZ} 尽可能减小，显然膜厚为 38 nm 时最佳。



(a) 椭偏仪测试拟合得到的 λ-n 谱图　　(b) λ-k 谱图



(c) 各组对应的 ε(Re)谱图　　(d) 厚度对 λ_{ENZ} 的影响

图 5　腔温退火和厚度 d 对 λ_{ENZ} 的影响

3　结　论

本文针对射频磁控溅射制备硅基底 ITO 薄膜进行了系统性的对照研究，探究了本底真空度、溅射功率、溅射气压、衬底温度和膜厚等因素对 λ_{ENZ} 的调控机制。通过调控镀膜工艺，可定制 ITO 薄膜的 λ_{ENZ}，用以针对性地设计和制作在特定波长工作的微纳光电器件。测试结果显示，在溅射过程中施加高衬底温度，结合优化薄膜质量的制备方法，相比于参考文献中 750 ℃后快速热退火的制作方式，能够更加有效地提升 λ_{ENZ} 的蓝移效果。成功突破了 ITO 薄膜 ENZ 特性的短波应用限制，将之拓展至 1 094.4 nm。该方法能简易地制作出具有较短 λ_{ENZ} 的 ITO 薄膜，其能够在更短波长下激发一些特殊光学模式，同时也拓展了飞秒激光激发非线性光学增强的波长范围，可实现微纳光学和非线性光学相关领域向短波方向的应用拓展。

参考文献：

[1] Ma Z, Li Z, Liu K, et al. Indium-tin-oxide for high-performance electro-optic modulation [J]. Nanophotonics, 2015, 4(2): 198-213.

[2] Wood M G, Campione S, Parameswaran S, et al. Gigahertz speed operation of epsilon-near-zero silicon photonic modulators[J]. Optica, 2018, 5(3): 233-236.

[3] Kinsey N, DeVault C, Kim J, et al. Epsilon-near-zero Al-doped ZnO for ultrafast switching at telecom wavelengths[J]. Optica, 2015, 2(7): 616-622.

[4] Reshef O, De Leon I, Alam M Z, et al. Nonlinear optical effects in epsilon-near-zero media [J]. Nature Reviews Materials, 2019, 4(8): 535-551.

[5] Alam M Z, De Leon I, Boyd R W. Large optical nonlinearity of indium tin oxide in its epsilon-near-zero region[J]. Science, 2016, 352(6287): 795-797.

[6] Alam M Z, Schulz S A, Upham J, et al. Large optical nonlinearity of nanoantennas coupled to an epsilon-near-zero material[J]. Nature Photonics, 2018, 12(2): 79-83.

[7] Meng Z, Cao H, Wu X. New design strategy for broadband perfect absorber by coupling effects between metamaterial and epsilon-near-zero mode[J]. Optical Materials, 2019, 96: 109347.

[8] Jiang W, Miao J, Li T. Silicon mode-selective switch via horizontal metal-oxide-semiconductor capacitor incorporated with ENZ-ITO[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-12.

[9] Swillam M A, Zaki A O, Kirah K, et al. On chip optical modulator using epsilon-near-zero hybrid plasmonic platform [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-9.

[10] Gui Y, Miscuglio M, Ma Z, et al. Towards integrated metatronics: a holistic approach on precise optical and electrical properties of indium tin oxide [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-10.

[11] Zhang Z, Liu J, Hao Q, et al. Sensitive saturable absorber and optical switch of epsilon-near-zero medium [J]. Appl. Phys. Express, 2019, 12(6): 065504.

[12] Feigenbaum E, Diest K, Atwater H A. Unity-order index change in transparent conducting oxides at visible frequencies [J]. Nano Letters, 2010, 10(6): 2111-2116.

[13] Meng L, Dos Santos M P. Properties of indium tin oxide films prepared by RF reactive magnetron sputtering at different substrate temperature[J]. Thin Solid Films, 1998, 322(1/2): 56-62.

[14] Ray S, Banerjee R, Basu N, et al. Properties of tin doped indium oxide thin films prepared by magnetron sputtering [J]. J. of Appl. Phys., 1983, 54(6): 3497-3501.

(下转第 423 页)

供电系统的供电压差约为 12 mV，充电速度优化 32%。工艺兼容性的增强以及性能的提升，拓展了寄生供电系统的应用方向，可用于多种高要求的信号采集以及实时监控等场景。

此外该系统可以在不增加接口的情况下，在充电过程中增加三次启动功耗，以模糊芯片的功耗与时间信息的关联性，增加了芯片抵抗侧信道攻击的能力。

参考文献：

[1] 苏　镇，郭　赣. 关于通过单总线供电的研究[J]. 通信电源技术，2004，21(4)：28-30.
Su Zhen，Guo Gan. Research on power supply through single bus[J]. Telecom. Power Technol.，2004，21(4)：28-30.

[2] 朱　熙，郭　赣. 航天器温度数字测量系统的多机通信[J]. 航天器环境工程，2011(5)：477-481.
Zhu Xi，Guo Gan. Multi-computer communication of spacecraft digital temperature measurement system [J]. Spacecraft Environment Engineering，2011(5)：477-481.

[3] Koziore，Jiri. Temperature measurement in boreholes by programmable logic controler B&-R and temperature sensors 1-WIRE[C]// IEEE Inter. Conf. on Programmable Devices and Embedded Systems，2012，45(7)：382-387.

[4] 唐为义，王艳霞，刘　蕾. 便携式多点温度采集系统[J]. 仪表技术与传感器，2007(11)：50-51，54.
Tang Weiyi，Wang Yanxia，Liu Lei. Portable multipoint temperature acquisition system[J]. Instrument Technique and Sensor，2007(11)：50-51，54.

[5] Cusey J P. Portable electronic module having EEPROM memory，systems and processes：USA，5679944[P]. 1994-11-18.

[6] 王峻松，朱潇挺，任腾龙，等. 一种改进的寄生供电串行通信总线及其收发器[J]. 微电子学，2007，37(6)：882-886.
Wang Junsong，Zhu Xiaoting，Ren Tenglong，et al. A new parasite powered serial bus and its transceiver [J]. Microelectronics，2007，37(6)：882-886.

[7] 王峻松，朱潇挺，任腾龙，等. 一种提高 1-WIRE 寄生供电容量的方法[J]. 微电子学与计算机，2008，25(1)：112-115.
Wang Junsong，Zhu Xiaoting，Ren Tenglong，et al. A method to improve parasitic power supply capacity of 1-WIRE[J]. Microelectronics &. Computer，2008，25(1)：112-115.

[8] 隋斌雁. 一种温度传感器的寄生供电系统上拉供电电路：中国，201220682365.3[P]. 2012-12-12.
Sui Binyan. A pull up power supply circuit of parasitic power supply for temperature sensor：CHINA，201220682365.3[P]. 2012-12-12.

[9] 房淼淼. 一种高性能的寄生供电方法[J]. 现代电子技术，2014(19)：66-68.
Fang Miaomiao. A method of improving parasite power supply capability of 1-WIRE[J]. Modern Electronics Technique，2014(19)：66-68.

作者简介：

高　鹤(1992－)，男，硕士研究生，主要从事身份认证芯片设计技术方向研究工作；

宿晓慧(1986－)，女，博士，助理研究员，主要从事高可靠芯片设计技术方向的研究工作。

(上接第 394 页)

[15] Xian S，Nie L，Qin J，et al. Effect of oxygen stoichiometry on the structure，optical and epsilon-near-zero properties of indium tin oxide films[J]. Opt. Express，2019，27(20)：28618-28628.

[16] Wang H，Dai X，Du K，et al. Tuning epsilon-near-zero wavelength of indium tin oxide film via annealing[J]. J. of Phys. D：Appl. Phys.，2020，53(22)：225108.

[17] Wang Y，Capretti A，Dal Negro L. Wide tuning of the optical and structural properties of alternative plasmonic materials[J]. Optical Materials Express，2015，5(11)：2415-2430.

[18] Hong R，Yan T，Tao C，et al. Laser induced the tunable permittivity of epsilon-near-zero induced in indium tin oxide thin films[J]. Optical Materials，2020，107：110137.

[19] Terzini E，Thilakan P，Minarini C. Properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering at elevated substrate temperature[J]. Materials Science and Engineering B，2000，77(1)：110-114.

作者简介：

周江昊(1994－)，男，2017 年毕业于厦门大学物理学专业，硕士研究生，主要研究方向为微纳光学和非线性光学；

陈溢杭(1979－)，男，博士，教授，主要从事光子晶体、微纳光学的研究。