

利用數值模擬預測表面電漿慢光波導作為光開關之應用

Prediction of surface plasmon slow light waveguide as an optical switch by numerical simulation

蕭楷霖¹和黃宗鈺^{1,*}

Kai-Lin Hsiao and Tsung-Yu Huang

明志科技大學材料工程系

摘要

表面電漿子是一個沿著金屬和介電質表面傳遞的表面波，其操作頻率大致座落於紅外光至可見光區段。藉由電子和光子交互作用所形成的電漿子，我們可以把入射電磁波侷限於一個小於繞射極限的厚度中。在此研究中，我們設計了一個由介電質(二氧化鈮)/金屬(銀)和介電質(矽基板)三層結構所組成的漸進式表面電漿慢光波導，並藉由金屬線陣列作為耦合器，將自由光子耦合形成表面電漿波於波導中傳遞。當表面電漿在慢光波導中傳遞時，會激發古斯漢欣效應，使得表面電漿波在波導不同區域有正的和負的能量流，使得其等效傳遞速度為零。更甚者，我們可以利用溫度來調整二氧化鈮的介電常數，來達到表面電漿子的儲存與釋放，達到光開關的功能。

關鍵詞：表面電漿子、古斯漢欣效應、慢光和光開關。

Abstract

Surface plasmon polariton is a surface wave that propagates along the interface between metal and a dielectric, and its operating frequency is approximately at the regime of infrared and visible. With such a plasmon from the interaction between electrons and photons, the incident electromagnetic waves could be confined within a thickness smaller than the diffraction limit. In this work, we designed a tapered surface plasmon based slow light waveguide, composed of dielectric (VO_2)/ metal (silver)/ dielectric (a silicon substrate) and a line groove array was inscribed on the silver as a coupler between electromagnetic waves and surface plasmon. With the excitation of Goos-Hänchen effect, the slow light waveguide could support positive and negative power flows, resulting in an effective propagation velocity of zero. Furthermore, we could manipulate the dielectric constant of VO_2 by temperature to achieve the bi-stable states, i.e., the storage and release of surface plasmons and then the functionality of an optical switch.

Keyword: surface plasmon, Goos-Hänchen effect, slow light and optical switch

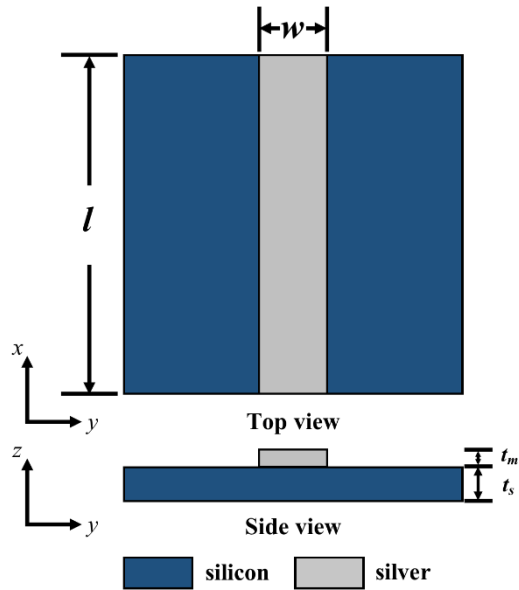
一、前言

超材料是一種由次波長單位晶胞進行重複排列所得到的人造材料。相比於自然材料，其具有像是負的導磁係數[1-3]、低頻金屬電漿頻率[4]以及負的折射係數[5-8]等特殊且自然界材料所沒有的光學性質。而這些特殊的材料性質，使得超材料也被應用於隱形斗篷[9-12]、光學感測器[13-16]、慢光效應[17-20]以及吸收體[16,21-24]等不同應用中。在超材料諸多的嶄新應用中，慢光現象由於可讓光速減緩甚至讓光速趨近於零的能力，現今早已被視為那些劃時代應用的其中之一[25-28]。慢光效應主要發生於一個波導結構不同材料的界面處。該波導的核心層(core)由負折射係數材料所組成，而其兩側批覆層(cladding)材料則為正折射係數材料；反之亦然，慢光效應亦可發生於使用正折射係數作為核心材料而負折射係數作為覆面層的波導中。而在這兩種的波導中，我們都可以觀察到所謂的負的古斯-漢欣效應，也就是在波導不同層的材料中，我們可以觀察到分別為正或負的能量流。在特定頻率和波導厚度的情況下，這些在覆面層正的能量流的總和剛好會等於在核心層負的能量流的值，使得在該處等效能量流為零。而在這情況下，入射電磁波等效的傳遞距離為零，而該入射電磁波等同於被侷限在該波導中。如果我們建構一個厚度為漸進式縮減的負折射係數波導，同時該核心層的負折射係數材料可以在寬頻下皆有響應，在這種情況下，我們甚至可以達成所謂的『彩虹侷限』效應(trapped rainbow effect)[28,29]，也就是將多個不同頻率的光侷限在波導中的不同厚度下，就好像是彩虹各個不同顏色的座落在空間不同位置一樣。在過去有不同的研究學者利用不同的超材料來達成所謂的慢光波導，像是斜向負折射係數材料[19]或是介電質超材料於微波波段達成慢光波導[20]，亦有利用漸進式介電質波導來達成彩虹侷限效應[30]。此外，Qiaoqiang Gan 研究團隊用由金屬和介電質交錯排列所形成的雙曲超材料(hyperbolic metamaterials)來建構一個漸進式的慢光波導並達成彩虹侷限效應[31]。除此之外，Shalaev 研究團隊也利用在透鏡表面鍍上金屬並放在同樣鍍有金屬的基板上來建構一個金屬/空氣/金屬的三層波導結構，藉此來達成彩虹侷限的效應。除此之外，作者亦在實驗中證明只需要單一負

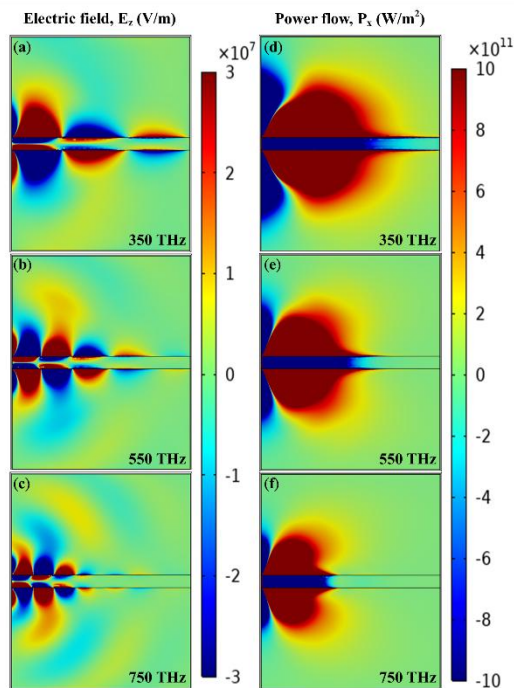
的光學性質(也就是負的導電係數)即可達成負的古斯漢欣效應[29]。然而目前的慢光效應大多著重於自由光子的侷限，但是由於作為慢光波導的負折射係數材料大多為共振結構，使得很難達成寬頻的負折射係數。除此之外，目前的慢光波導也大多採用被動元件的設計，使得我們無法達到在光的儲存與釋放狀態中自由的切換。因此，在這研究工作中，我們首先預計使用銀來建構一個表面電漿慢光波導，進行表面波的侷限。緊接著，我們將在表面電漿波導的基礎上加入主動材料二氧化釩[32-34]，利用其受溫度所控制的相變化改變波導的折射係數，進而達到表面電漿波的儲存與釋放[35]。

二、模擬設定

為了驗證上述表面電漿慢光波導的可行性，我們使用三維有限元素分析法來建構異質慢光波導的模型。如圖一所示，該慢光波導主要利用微影製程在矽基板上製備一個厚度 $t_m = 60$ 奈米(nm)、長度 $l = 1000$ nm，寬度 $w = 100$ nm 的銀慢光波導，其批覆層為空氣。在模擬中，我們預計的操作頻率坐落於300至750 兆赫茲 (THz) 附近，屬於可見光波段。在此頻段區域下，矽基板的介電常數為 $18.47 + i \times 0.63$ 、銀薄膜的介電常數則是 $-9.56 + i \times 0.31$ 以及空氣的介電常數則為1。在模擬中，表面電漿慢光波導沿 x 方向於起始端銀金屬面的邊界條件為埠(port)。其發射埠的能量為1 W，且其波向量為 $k_x = 1.4k_0, k_y = \sqrt{k_0^2 - (1.4k_0)^2} = i \times 0.98k_0$ ，來創造一個可以在金屬和介電質介面傳遞的表面電漿波。其餘的邊界則設定為散射邊界條件(scattering boundary conditions)。



圖一、銀表面電漿慢光波導的示意圖。其主要是在矽基板上利用微影製程製備出一個厚度 $t_m = 60 \text{ nm}$ 、長度 $l = 1000 \text{ nm}$ 以及寬度 $w = 100 \text{ nm}$ 的銀金屬長條。

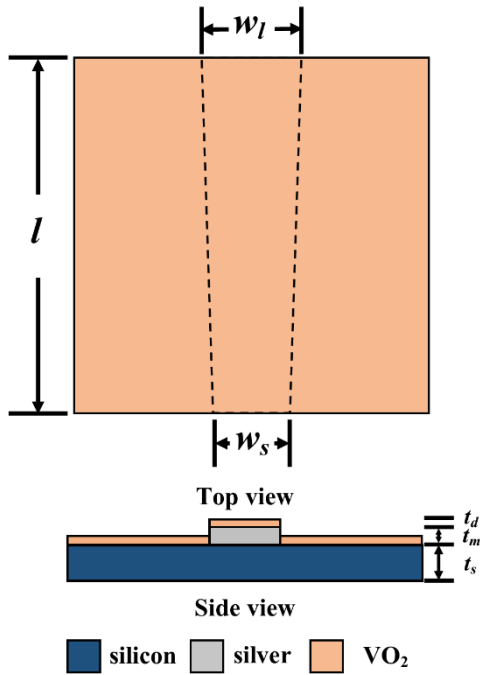


圖二、銀表面電漿慢光波導在(a) 350、(b) 550和(c)750 THz 下 z -方向電場的分佈圖。從圖中可以看出銀表面電漿慢光波導支援彩虹侷限效應，不同波長的表面電漿波會被侷限在波導不同的位置中。銀表面電漿慢光波導在(d) 350、(e) 550和(f)750 THz 下 x -方向時間平均能量流的分佈圖。此處，我們可以觀察到時間平均能量流在銀長條和空氣層中分別為負值以及正值，產生能量渦流，使得表面電漿波無法持續向前傳遞。

遞。

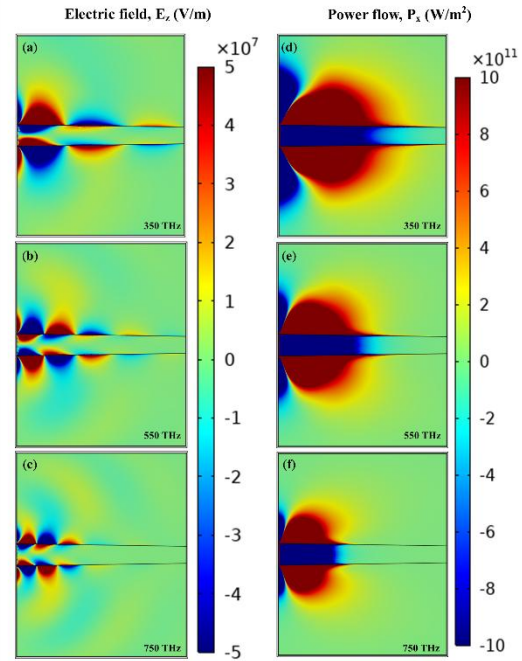
圖二(a-c)記錄了分別在350、550和750 THz 下銀慢光波導在 z -方向的電場分佈。從圖中我們可以看出，我們成功地激發表面電漿波於金屬和空氣的介面中傳遞。除此之外，在空氣和金屬中的電場方向剛好呈現180度的相位差，這也是銀慢光波導支援表面電漿波的證據之一。此外，我們可以看到不同頻段的表面電漿波會停留在波導的不同位置，展現出彩虹侷限的效應，這可以歸功於銀金屬在可見光波段皆可以具有負的介電常數，使得在全頻段皆可以支援負的古斯漢欣效應。更進一步，從圖二(d-f)，我們更可以看出能量流明顯停在波導中的不同位置，再度確認了彩虹侷限效應可以在銀表面電漿慢光波導中觀察到。

而當我們利用等寬度的銀表面電漿慢光波導證實了其具有侷限不同頻段的人射表面電漿波之後，為了將慢光波導設計成一個光開關或著光邏輯閘，我們更新了慢光波導，使之成為漸進式銀表面電漿慢光波導。除此之外，我們更將披覆層從空氣改為二氧化鈦，以期能夠利用溫度來控制表面電漿的儲存與釋放。同時，我們利用電子束蒸鍍機台製備出來的二氧化鈦，經過橢偏儀量測後，其在20 °C 和60 °C 條件下，其介電常數分別為 $2.7 + i \times 1.2$ 和 $1.5 + i \times 0.8$ 。為此，我們需要小心謹慎地設計漸進式銀慢光波導入射面初始寬度以及接受面終止寬度，以期當該波導操在做兩個不同溫度下時，可以達到表面電漿波的儲存與釋放。在模擬中，如圖三所示，漸進式銀表面慢光波導同樣是在矽基板上，利用微影製程製備一個銀厚度 $t_m = 60 \text{ nm}$ 、長度 $l = 1000 \text{ nm}$ 、入射面初始寬度 $w_i = 100 \text{ nm}$ 和接受面終止寬度 $w_s = 80 \text{ nm}$ 。最後，再利用電子束蒸鍍系統鍍上一層連續且厚度 $t_d = 50 \text{ nm}$ 的二氧化鈦薄膜作為披覆層，並藉此達到慢光波導的儲存與釋放。



圖三、漸進式銀表面慢光波導同樣是在矽基板上，利用微影製程製備一個銀厚度 $t_m = 60 \text{ nm}$ 、長度 $l = 1000 \text{ nm}$ 、入射面初始寬度 $w_l = 100 \text{ nm}$ 和接受面終止寬度 $w_s = 80 \text{ nm}$ 。最後，再利用電子束蒸鍍系統鍍上一層連續且厚度 $t_d = 50 \text{ nm}$ 的二氧化釩薄膜作為披覆層，並藉此達到慢光波導的儲存與釋放。

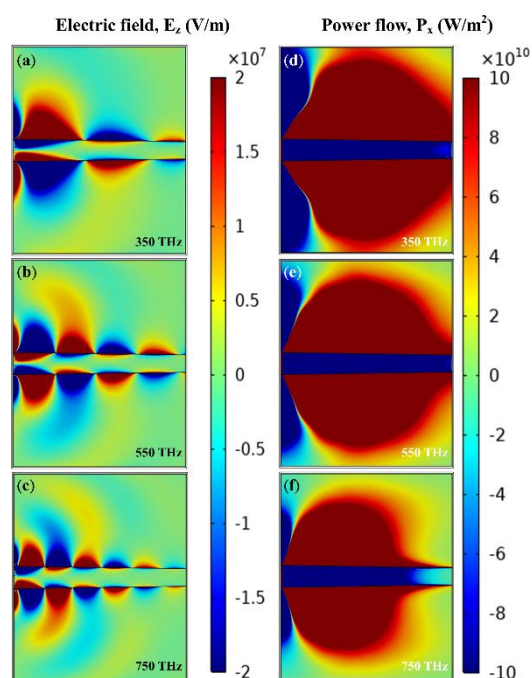
如圖四所示，當二氧化釩在 20°C 時，整體漸進式銀慢光波導處於儲存狀態。即便是在最低頻率 350 THz 的入射表面電漿仍無法從左側傳遞至右側。而隨著頻率增加，其臨界厚度也隨之增加，使得表面電漿波停留在波導較為左側的位置。而在圖四(d-f)，我們更可清楚地看出能量流接停留在波導的特定位置中，無法傳遞至接受面。因此，我們可以將表面電漿波侷限在波導內，實現光開關中關的狀態。



圖四、當元件處於低溫 (20°C) 時，銀表面電漿慢光波導在(a) 350 、(b) 550 和(c) 750 THz 下 z -方向電場的分布圖。從圖中可以看出銀表面電漿慢光波導處於儲存狀態，不同波長的表面電漿波會被侷限在波導不同的位置中。銀表面電漿慢光波導在(d) 350 、(e) 550 和(f) 750 THz 下 x -方向時間平均能量流的分布圖。由能量流分布我們可以更明顯的看出表面電漿波的儲存。

然而，當我們將元件的溫度提高至 60°C ，此時二氧化釩的介電常數下降，使得漸進式銀慢光波導在各頻段的臨界厚度減少，使得表面電漿波有機會從激發面傳遞至接受面。如圖五(a-c)所示，在三個頻段中，表面電漿波似乎都可以從左側傳遞至右側，達到表面電漿波的釋放。然而，我們可以從圖五(d-f)中我們可以看出只有 350 和 550 THz 的表面電漿波可以傳遞到右側，達到表面電漿波的釋放；而在 750 THz 的表面電漿波則仍侷限於波導中。隨然在 750 THz 的電漿波無法傳遞至右側。這有可能源於在較高頻段，因其波數較大，使得其感受到之二氧化釩的損耗較大，使得原先可以傳遞至接收面的表面電漿波因損耗而無法穿越。不過，這也賦予漸進式慢光波導一個新的特性。從不同頻段的不同表現，我們可以藉由改變披覆層的介電常數，使得特定頻率的表面電漿波可以被釋放，而其他頻率則維持被儲存的狀態。這一特性，使得原先作為光開關的慢光波導，有極大的潛力可以應用於光邏輯閘中，且甚至可以達到多

進位的邏輯閘。



圖五、當元件處於高溫(60 °C)時，銀表面電漿慢光波導在(a) 350、(b) 550和(c)750 THz 下 z-方向電場的分布圖。從圖中可以看出銀表面電漿慢光波導處於釋放狀態，不同波長的表面電漿波可以傳遞至接收端，達到訊號的傳遞。銀表面電漿慢光波導在(d) 350、(e) 550和(f)750 THz 下 x-方向時間平均能量流的分布圖。由能量流分布我們可以更明顯的看出在350和550THz 表面電漿波的釋放。然而，750THz 的表面電漿波無法抵達接收端。但這賦予了表面電漿慢光波導達到多進位邏輯閘的可能性。

三、結論

在此研究中，我們提出一個銀表面電漿波導，並引入相變化材料二氧化鈮來達到表面電漿波的儲存與釋放。首先我們使用有限元素法來證實在矽基板上利用微影製程製備出來的銀長條結構可以與空氣披覆層形成銀慢光波導，並藉由古斯漢欣效應來達到表面電漿波的侷限。緊接著，我們在模擬中導入二氧化鈮，其在其在 20 °C 和 60 °C 條件下，其介電常數分別為 $2.7 + i \times 1.2$ 和 $1.5 + i \times 0.8$ 。在低溫情況下，漸進式銀慢光波導呈現儲存狀態，在三個頻段的表面電漿波皆被侷限於波導內。反之，當處在高溫情況下，漸進式銀慢光波導呈現釋放狀態，在三個頻段的表面電漿波中，較為低頻的兩個表

面電漿波會被侷限於波導內。然而，位於 750 THz 的表面電漿波仍無法傳遞至最右側，達到釋放的效果。而這種現象使得所提出的漸進式慢光波導有機會成為光的邏輯閘，甚至為多進位的邏輯閘。

四、參考文獻

1. T. J. Yen, "Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials," *Science* **303**(5663), 1494–1496 (2004).
2. A. Salandrino and N. Engheta, "Negative effective permeability and left-handed materials at optical frequencies," *Optics Express* **14**(4), 1557–1567 (2006).
3. C.-H. Chen, C.-W. Yu, and Y.-J. Jen, "Deposited metamaterial thin film with negative refractive index and permeability in the visible regime," *Optics Letters* **36**(6), 1014–1016 (2011).
4. J. Pendry, A. Holden, W. Stewart, and I. Youngs, "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures," *Physical Review Letters* **76**(25), 4773–4776 (1996).
5. Y.-J. Lai, C.-K. Chen, and T.-J. Yen, "Creating negative refractive identity via single-dielectric resonators," *Optics Express* **17**(15), 12960–12970 (2009).
6. R. A. Shelby, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction," *Science* **292**(5514), 77–79 (2001).
7. D. R. Smith, "Metamaterials and Negative Refractive Index," *Science* **305**(5685), 788–792 (2004).
8. V. M. Shalaev, W. Cai, U. K. Chettiar, H.-K. Yuan, A. K. Sarychev, V. P. Drachev, and A. V. Kildishev, "Negative index of refraction in optical metamaterials," *Optics Letters* **30**(24), 3356–3358 (2005).
9. J.-H. Lin, T.-J. Yen, and T.-Y. Huang, "Design of annulus-based dielectric metamaterial cloak with properties of illusion optics," *J Opt-uk* **22**(8), 085101 (2020).
10. T.-Y. Huang, J.-H. Lin, T. Lee, and T.-J. Yen, "Experimentally approaching to reciprocal cloaks via annulus-dielectric-metamaterials," *J. Opt.* **21**(8), 08LT01 (2019).
11. P.-Y. Chen, J. Soric, and A. Alù, "Invisibility and Cloaking Based on Scattering Cancellation," *Advanced Materials* **24**(44), OP281–OP304 (2012).
12. R. Fleury, F. Monticone, and A. Alù, "Invisibility and Cloaking: Origins, Present, and Future Perspectives," *Physical Review Applied* **4**(3), 037001–20 (2015).
13. Y. Lee, S.-J. Kim, H. Park, and B. Lee, "Metamaterials and Metasurfaces for Sensor Applications," *Sensors* **17**(8), 1726 (2017).
14. C.-T. Lin, T.-J. Yen, and T.-Y. Huang, "PVC Detection through a Hybrid SEIRA Substrate and Refractive Index Sensor Based on Metamaterial Perfect Absorbers," *Coatings* **11**(7), 789 (2021).

15. H.-S. Lee, Y.-P. Kuang, C.-Y. Lu, T.-J. Yen, and T.-Y. Huang, "Broadband surface enhanced infrared absorption with multiple Fano resonance by metallic oblique-wire-bundle metamaterial absorbers," *Sci. Rep.* **14**(1), 27328 (2024).
16. X.-X. Wu, C.-Y. Lu, and T.-Y. Huang, "Creating hot spots within air for better sensitivity through design of oblique-wire-bundle metamaterial perfect absorbers," *Sci Rep-uk* **12**(1), 3557 (2022).
17. S. Xiao, Q. He, X. Huang, S. Tang, and L. Zhou, "Enhancement of light-matter interactions in slow-wave metasurfaces," *Physical Review B* **85**(8), (2012).
18. L. Zhu, F.-Y. Meng, J.-H. Fu, Q. Wu, and J. Hua, "Multi-band slow light metamaterial," *Optics Express* **20**(4), 4494–4502 (2012).
19. T.-Y. Huang, T.-C. Yang, and T.-J. Yen, "Slowing light by exciting the fundamental degeneracy oscillatory mode in a negative refractive waveguide," *Applied Physics Letters* **102**(11), 111102 (2013).
20. T.-Y. Huang, Y.-C. Lai, and T.-J. Yen, "Slowing light by activating an oscillatory mode in a negative refractive waveguide composed of all dielectric metamaterials," *Applied Physics Express* **9**(1), 012003 (2016).
21. C.-Y. Lu, C.-C. Chung, T.-J. Yen, and T.-Y. Huang, "Achieving broad absorption band and high incident angles by stochastically-distributed oblique-flat-sheet metamaterial perfect absorbers," *Sci Rep-uk* **11**(1), 18713 (2021).
22. P. Rufangura and C. Sabah, "Dual-band perfect metamaterial absorber for solar cell applications," *Vacuum* **120**, 68–74 (2015).
23. S. Katsumata, T. Isegawa, T. Okamoto, and W. Kubo, "Effect of Metamaterial Perfect Absorber on Device Performance of PCPDTBT:PC71BM Solar Cell," *Phys Status Solidi* **217**(1), 1900910 (2020).
24. T.-Y. Huang, C.-W. Tseng, T.-T. Yeh, T.-T. Yeh, C.-W. Luo, T. Akalin, and T.-J. Yen, "Experimental realization of ultrathin, double-sided metamaterial perfect absorber at terahertz gap through stochastic design process," *Scientific Reports* **5**, 18605 (2015).
25. K. L. Tsakmakidis, T. W. Pickering, J. M. Hamm, A. F. Page, and O. Hess, "Completely Stopped and Dispersionless Light in Plasmonic Waveguides," *Physical Review Letters* **112**(16), 167401 (2014).
26. K. L. Tsakmakidis, A. Klaedtke, D. P. Aryal, C. Jamois, and O. Hess, "Single-mode operation in the slow-light regime using oscillatory waves in generalized left-handed heterostructures," *Applied Physics Letters* **89**(20), 201103 (2006).
27. K. L. Tsakmakidis, C. Hermann, A. Klaedtke, C. Jamois, and O. Hess, "Surface plasmon polaritons in generalized slab heterostructures with negative permittivity and permeability," *Physical Review B* **73**(8), 085104 (2006).
28. K. L. Tsakmakidis, A. D. Boardman, and O. Hess, "'Trapped rainbow' storage of light in metamaterials," *Nature* **450**(7168), 397–401 (2007).
29. V. N. Smolyaninova, I. I. Smolyaninov, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, "Experimental observation of the trapped rainbow," *Applied Physics Letters* **96**(21), 211121 (2010).
30. T.-Y. Huang and T.-J. Yen, "Experimental demonstration of broadband light trapping by exciting surface modes of an all-dielectric taper," *Scientific Reports* **9**(1), 3538 (2019).
31. H. Hu, D. Ji, X. Zeng, K. Liu, and Q. Gan, "Rainbow Trapping in Hyperbolic Metamaterial Waveguide," *Scientific Reports* **3**, (2013).
32. G. Stefanovich, A. Pergament, and D. Stefanovich, "Electrical switching and Mott transition in VO₂," *Journal of Physics: Condensed Matter* **12**(41), 8837–8845 (2000).
33. M. M. Qazilbash, M. Brehm, B.-G. Chae, P.-C. Ho, G. O. Andreev, B.-J. Kim, S. J. Yun, A. V. Balatsky, M. B. Maple, and F. Keilmann, "Mott transition in VO₂ revealed by infrared spectroscopy and nano-imaging," *Science* **318**(5857), 1750–1753 (2007).
34. C. Wan, Z. Zhang, D. Woolf, C. M. Hessel, J. Rensberg, J. M. Hensley, Y. Xiao, A. Shahsafi, J. Salman, S. Richter, Y. Sun, M. M. Qazilbash, R. Schmidt-Grund, C. Ronning, S. Ramanathan, and M. A. Kats, "On the Optical Properties of Thin-Film Vanadium Dioxide from the Visible to the Far Infrared," *Ann. Phys.* **531**(10), 1900188 (2019).
35. Y. Chen, J. Gu, X. C. Xie, and W. Zhang, "Trapping and releasing light by mechanical implementation in metamaterial waveguides," *JOSA A* **28**(2), 272–277 (2011).