

# Intrinsic Transparent Conductors without Doping

Xi e Zha g,<sup>1</sup> Lij. Zha g,<sup>1</sup> J h D. Pe i ,<sup>2</sup> a d Ae Z ge<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; <sup>2</sup> School of Physics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100084, China

(Received 27 March 2015; published 23 October 2015)

Transparent conductors (TC) combine low resistivity and high optical transparency. We report a new class of TCs based on Ag<sub>3</sub>A<sub>22</sub>O<sub>34</sub>, which is a layered structure with a high degree of transparency and low resistivity. The TCs are composed of Ag<sub>3</sub>A<sub>22</sub>O<sub>34</sub> layers and Ag<sub>2</sub>O layers. The TCs are transparent in the visible and near-infrared regions, and have a low resistivity of 0.01 Ω cm. The TCs are composed of Ag<sub>3</sub>A<sub>22</sub>O<sub>34</sub> layers and Ag<sub>2</sub>O layers. The TCs are transparent in the visible and near-infrared regions, and have a low resistivity of 0.01 Ω cm.

DOI:

10.1103/PhysRevLett.115.167401

specific interest  $\text{Ag}_3\text{A}_{22}\text{O}_{34}$  in the he ag a  
*P63/ c* interest [19] and  $\text{Ba}_3\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  in the ag a  
*P4/ b* interest [20]

e. i. e. a. i. c. b. e. h. a. i. s. The  $\alpha$  i. c.  $\alpha$  e. a. e. h. i. b. a. e. d. c. s. e. e. d. i. c. i. t. h. e. d. i. a. d. e. (Fd-3.)  
 f. c. s. e. [Fig. 3(a)] i. h. DFT e. e. c. f. i. c. f. c. s. e. c. a. c. -  
 a. i. h. i. Fig. 3(b).

The  $\delta$  e. i. e. d. e. i. g. s. i. c. i. e. f. s. h. i. s. t. e. (ITC-2) i. c. d. e. h. e. f. i. g. (i) A  $\alpha$  g. e. d. i. e. c. g. a. b. e. h. e. h. e. e. g. f. i. b. e. i. g. h. t. b. e. e. h. e.  $\delta N_e$  p. h. a. d.  $\delta N_e$  p. h. b. a. d. ( $N_e$  i. h. e. b. e. f. e. c. f. i. h. e. s. i. i. e. c. e.) h. e. i. c. a. i. b. e. e. h. e. d. e. a. f. f. e. c. t. h. e.  $\alpha$  e. c. f. s. i. b. e. i. g. h. t. a. d. a.  $\alpha$  i. d. i. e. c. g. a. T. h. i. s. e. i. e. h. e.  $\delta N_e$  p. h. a. d.  $\delta N_e$  p. h. b. a. d. b. e. h. i. g. h. d. i. e. a. d. e. a.  $\alpha$  a. e. i. a. s. i. f. h. e. B. i. i. z. e. [e.g., a. g. h. e.  $\Gamma$ -

e  $\alpha$  a ed b a  $\alpha$  g e  $\alpha$  g i d [ ee, e.g., Fig. 4(a)],  
 the i  $\alpha$  ba d i ca  $\alpha$  a i i a  $\alpha$  the e  $\alpha$  g i d  
 d e  $\alpha$  affec the  $\alpha$  a  $\alpha$  e c f  $\alpha$  i i b e i g h. (ii) The  
 ca  $\alpha$  i e de i ( ) a d d i  $\alpha$  i f the  $\alpha$  i a fi ed ba d  
 [ ee Fig. 4(a)] eed  $\alpha$  be fficie  $\alpha$  f  $\alpha$  a . a  
 f e e c [25]  $\sim \sqrt{\quad / \quad}$ . (iii) The i ca  $\alpha$  a i i f  
 the e e c  $\alpha$  (h e ) f the  $\alpha$  i a fi ed ba d the  
 ba d ab e (be ) the eed  $\alpha$  be ea a  $\alpha$  t t  
 ad  $\alpha$  e affec  $\alpha$  a  $\alpha$  e c .  
 F i g h e f  $\alpha$  . a ed de i g  $\alpha$  i c i e , e i e c a  
 fe h d ed f  $\alpha$  a ide i ICSD [18], i g f  $\alpha$   
 ea - c e  $\alpha$  e id a a e ce j j  $\frac{1}{4}$  l ( ch a Ag<sub>3</sub>A<sub>22</sub>O<sub>34</sub>  
 ha i g  $\frac{1}{4}$  l ) i h ca  $\alpha$  i e de i . We eadi  
 ide if ca dida e ITC-3 a  $\alpha$  i a : Ag<sub>3</sub>A<sub>22</sub>O<sub>34</sub> a d  
 Ba<sub>3</sub>Nb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>. Thei h e d a ic abi i i de  $\alpha$  a ed  
 i the S e e a Ma  $\alpha$  i a [21], Sec. I. Ba<sub>3</sub>Nb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> i

ffici ai, eadi g... he... ia... ed  
 f... e... ff... a... a... ia, ... ch... a... he... b... c...  
 ... d... ha... ... f... ee... ca... i... i... h... e... f... i... c... d... i... g...  
 ... hie... ai... ai... i... g... a... a... ec... s... edic... ed... i... hi... t... d...  
 A... ida... ce... f... de... ib... a... e... d... i... g... [c... a... e... Fig. 1(a) ... i... h...  
 1(b)] ... a... cic... c... e... f... c... f... a... defec... a... d... c... d... h...  
 i... if... he... a... fac... i... g... ech... i... e... c... a... ed... f... c...  
 e... e... ha... e... hea... , a... d... fe... e... i... ib... i... d... i... g...  
 I... deed, a... s... e... e... ded... each... f... he... ef... c... i... ai... ie, i...  
 a... a... e... i... h... abi... i... a... d... g... abi... i... cac... ai... (e... e... -  
 ified b... Fig. S1 i... he... S... e... e... a... Ma... xia [21], hich...  
 i... c... de... Ref. [32-35]) a... g... i... he... xi... e... a... q... i... f...  
 ... ch... e... ... igh... e... be... he... a... l... acce... a... ed... di... c... e...  
 ff... c... i... a... a... xia.

This... f... a... s... ed... b... the... U.S. De... e... f... f...  
 E... g... , Office... f... Scie... ce, Ba... ic... E... g... Scie... ce, Ma... xia  
 Scie... ce... a... d... E... gi... ee... i... g... Di... i... de... G... a... N... DE-  
 FG02-13ER46959... C.U. We... ha... Li... i... g... Y... a... d...  
 Gia... ca... T... i... a... chi... f... he... f... di... c... i... . This...  
 ... ed... e... s... ce... f... he... Nai... a... E... g... Re... ea... ch... Scie... tific...  
 C... . i... g... Ce... e... , hich... i... s... ed... b... the... Office... f...  
 Scie... ce... f... he... U.S. De... e... f... E... g... de... C... f... ac...  
 N... DE-AC02-05CH11231.

\*Corresponding author.

ae.z.g@cs.ad.edu

Preprint address: Center for Advanced Energy-Ignition, Jilin University, Changchun 130012, China.

[1] D.S. Gilmer, H. H... , and D.C. Pai... ,  
 ... (S... i... g... Scie... ce & B... i... e...  
 Media, New York, 2010).  
 [2] A.V.M... h... a... , ... (AVA... ade... i... e... -  
 a... g... G... b... H... & C... . KG, Saarbrücken, 2011).  
 [3] K. W... a... , S. H... a... a... a... , and T. H... ada, E... ec... tica... a... d... i... ca...  
 s... e... i... e... f... u... ed... - Z... O... Si... he... e... J... c... i... , J... . J...  
 A... . Ph... . **10**, 1732 (1971).  
 [4] I. H... a... b... e... g... , A. H... j... s... b... e... g... , and C.G. G... a... i... t... , High...  
 ... ai... i... f... a... a... e... hea... s... ef... ec... s... f... eac... i... e... e... a... s... a... d...  
 i... di... i... i... ide, A... . Ph... . Le... . **40**, 362 (1982).  
 [5] H. K... a... a... z... e... , M. Y... a... a... , H. H... d... , M. K... s... i... a... , H...  
 Y... a... gi... , and H. H... , P... e... e... ec... tica... c... d... c... i... i...  
 f... a... a... e... t... hi... fi... f... C... A... O... 2, Na... . e... (L... d... ) **389**, 939  
 (1997).  
 [6] K. H... a... a... hi... , S. M... a... i... hi... , T. K... a... i... a... , M. H... i... a... , and H...  
 H... , Ligh... t... i... d... ced... c... e... i... f... a... i... . ai... g... e... f... ac...  
 t... s... ide... i... a... e... i... e... t... e... ec... t... ic... c... d... c... i... s... , Na... . e...  
 (L... d... ) **419**, 462 (2002).  
 [7] G.V. Nai... , J. Ki... , and A.B... a... e... a... , O... ide... a... d... i... f... ide...  
 a... a... e... ai... e... a... ic... a... xia... i... the... i... ca... s... a... ge, O... t...  
 Ma... x... . E... . e... **1**, 1090 (2011).  
 [8] H. Mi... z... g... chi... , T. K... a... i... a... , S. M... a... i... hi... , and H. H... , A...  
 g... a... a... e... f... a... a... e... t... c... d... c... i... e... ide, Na... . C... . . **2**,  
 470 (2011).  
 [9] A. K... d... , H. Y... a... gi... , H. H... , and H. K... a... a... z... e... ,  
 S... C... O... 2: A... -e... c... d... c... i... e... ide... i... h... ide... ba... d...  
 ga... , A... . Ph... . Le... . **73**, 220 (1998).

[10] ... Kia... a... d... A. Z... g... e... , O... r... i... g... i... n... f... C... e... i... e... ce... f... C... -  
 d... c... i... i... a... d... T... a... a... e... c... i... S... O... 2, Ph... . Re... . Le... . **88**,  
 095501 (2002).  
 [11] T.R. Pa... de... , A. Za... a... e... , S. La... , M. d'A... e... z... ac... , and A...  
 Z... g... e... , D... i... g... s... e... a... d... d... i... g... s... t... t... e... i... A... 2B... O... 4...  
 i... e... ide, Ad... . F... c... . Ma... x... . **21**, 4493 (2011).  
 [12] G. Ha... i... e... , A. Mig... i... , G. Ced... e... , G.-M. Rig... a... e... e... , and X...  
 G... z... e... , Ide... tific... ai... a... d... de... ig... s... i... c... i... e... f... h... e...  
 effec... i... e... a... -e... f... a... a... e... t... c... d... c... i... g... ide, Na... .  
 C... . . **4**, 2292 (2013).  
 [13] E.D. Pai... ,  
 (Acade... ic... P... e... , B... , 1998).  
 [14] K.S. Ki... , Y. Zha... , H. Ja... g... , S.Y. Lee... , J.M. Ki... , K.S...  
 Ki... , J.-H. Ah... , P. Ki... , J.-Y. Ch... i... , and B.H. H... g... , La... ge...  
 ca... e... a... u... g... h... f... g... a... he... e... fi... f... s... e... ch... ab... e...  
 f... a... a... e... t... e... ec... t... de... , Na... . e... (L... d... ) **457**, 706 (2009).  
 [15] T. Oh... a... a... , J. O... b... , T. S... z... i... , H. K... i... ga... h... i... a... , M...  
 O... hi... a... , and T. Hi... gi... , A... -T... e... f... a... a... e... t... c... d... c... i... g...  
 ide: Nb12O29, J... Ph... ac... Che... H... (2011) **153**, 4624 (2011) / P... ec... t... ic... f... 1Tj/55  
 [16] J... a... de... G... e... , P. Si... e... i... , and A. P... a... , T... a... a... e... t...  
 c... d... c... i... g... i... e... a... i... e... e... l... s... , Na... . Le... . **12**, 3138  
 (2012).  
 [17] X. Me... g... , D. Li... , X. Dai... , H. Pa... , X. We... , L. Z... , and G...  
 Qi... , N... e... t... ab... e... h... a... d... f... a... a... e... t... c... d... c... i... s... i... TiO... 2-TiC...  
 e... : De... ig... a... xia... f... . a... ch, Sci... . Re... . **4**, 7503  
 (2014).  
 [18] I... s... ga... ic... C... a... S... f... c... s... e... Da... aba... e... , Fachi... f... s... ai... z... e... -  
 s... . K... a... s... he... , Ge... a... , (2006).  
 [19] W.A. E... g... a... d... , A.J. Jac... b... , and B.C. T... fie... d... , S... f... c... s... a...  
 die... f... high... -t... i... chi... e... i... c... e... a... i... e... di...  
 a... d... i... e... be... a... a... i... a... , S... id... S... a... e... I... ic... **6**, 21 (1982).  
 [20] B. He... e... , S.A. S... hi... e... , T. Sie... g... i... , A.T. Fi... s... , and J.V...  
 Wa... z... c... a... , S... f... c... s... e... a... d... s... e... i... e... f... s... ed... ced... ba... i...  
 i... bi... . ide... i... g... e... a... b... ai... ed... f... b... a... e... f... e... ,  
 Che... . Ma... x... . **3**, 528 (1991).  
 [21] See... S... 9(c)(0(f))TNb12O29,

- [29] J. Mahajan and D.G. Schaefer, On the interface — a  $\mathbb{Z}^d$  tiling of  $\mathbb{R}^d$ , *Science* **327**, 1607 (2010).
- [30] K. Lee, S.W. Kim, Y. Tada, S. Maehashi, and H. Hoshino, Dimerization of a  $\mathbb{Z}^d$ -tiling of  $\mathbb{R}^d$ , *Nature (London)* **494**, 336 (2013).
- [31] A. Freese and A. Zinger, The interface between  $\mathbb{Z}^d$ -tilings of  $\mathbb{R}^d$  and  $\mathbb{Z}^d$ -tilings of  $\mathbb{R}^d$ , *Nature (London)* **402**, 60 (1999).
- [32] V. Szeles, S. Latafzadeh, X. Zhang, and A. Zinger, Crystallographic tilings of  $\mathbb{R}^d$  and their applications in medicine, *Philosophical Magazine Letters*: Fluids and Soft Matter, **85**, 115104 (2012).
- [33] R. Galet, X. Zhang, L. He, L. Yi, Y. Li, T.O.L. Soderberg, D. Chou, K.R. Pedersen, and A. Zinger,