

# Intrinsic Transparent Conductors without Doping

Xi'e Zha g,<sup>1</sup> Lij. Zha g,<sup>1</sup> J h. D. Pei i,<sup>2</sup> and 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 Normal University, Beijing 100875, China

(Received 27 March 2015; published 23 October 2015)

Transparent conductors (TC) can be realized by a combination of a wide band gap semiconductor and a transparent conductive oxide (TCO). We propose a different idea for TC design — a wide band gap semiconductor and a transparent conductive oxide (TCO) are combined to form a heterostructure. We identify the specific design criteria for the heterostructure. As an example, we study the heterostructure of Ag<sub>3</sub>A<sub>22</sub>O<sub>34</sub>, which is a 3D conductor with a 2D electron gas (EG) layer with high electron density.

DOI:

10.1103/PhysRevLett.115.134701

specifically Ag<sub>3</sub>A<sub>22</sub>O<sub>34</sub> in the he ag a  
P6<sub>3</sub>/c structure [19] and Ba<sub>3</sub>Nb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> in the he ag a  
P4/b structure [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. s. 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. t. g. a. b. e. h. e. h. t. e.  $\alpha$  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. t. g. a. T. h. i. s. e. i. s. 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 i d e 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  $\alpha$  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>. The  $\alpha$  h e d a ic abi i i de  $\alpha$  a ed  
 i the S e e  $\alpha$  a Ma  $\alpha$  i a [21], Sec. I. Ba<sub>3</sub>Nb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> i

fficienza, eadighe leia e ed  
 e ffcia a aia, cha he b c -  
 d ha ffee caie ih e i ic d ig  
 hie ai ai ig a aec edic ed i hi d .  
 A ida ce f de ibe a e d ig [c a e Fig. 1(a) ih  
 1(b)] a cic e e c a defec a d c d h  
 i if he a a fac i g ech i e c a e d c e  
 e e ha e hea , a d fe e i ib i d ig .  
 I deed, a e e e ded ea ch f he e f c i a i e , i  
 a a e ih abi i a d g abi i cac a i (e e -  
 ified b Fig. S1 i he S e e a Ma a [21], hich  
 i c de Ref. [32-35]) a g i he e i e a a i f  
 ch e e i gh e be he a a cce a e d i c e  
 ffcia a aia .

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

\*C e e di g a h e .

a e . z . g e @ c e ad . ed

P e e a d d e : C e g e f a a i e c e a d E gi ee -  
 i g , Ji l U i e i , Cha g ch 130012, Chi a .

- [1] D. S. Gi e , H. H , a d D. C. Pai e ,  
 (S i g e Scie ce & B i e  
 Media, Ne Y e , 2010).
- [2] A. V. M h a , (AVA ade i e -  
 e ag G bH & C . KG, Sa a c e , 2011).
- [3] K. Wa a , S. Ha a a a , a d T. Hada , E ec i ca a d i ca  
 e i e f e d - Z O Si he e J c i , J . J .  
 A . Ph . **10**, 1732 (1971).
- [4] I. Ha b e g , A. H j e b e g , a d C. G. G a i t , High  
 a i f a e h e a e f e c e f e a c i e e a e d  
 i di i ide , A . Ph . Le u . **40**, 362 (1982).
- [5] H. Ka a e , M. Ya a a , H. H d , M. K e i a , H.  
 Ya a gi , a d H. H , P e e e c i ca c d c i i  
 e a a e h i fi f C . A O 2 , Na e (L d ) **389**, 939  
 (1997).
- [6] K. Ha a hi , S. Ma i hi , T. Ka i a , M. H a , a d H.  
 H , Ligh i d ced c e i f a i a i g e f ac -  
 i e i a e i e e e c i c c d c i e , Na e  
 (L d ) **419**, 462 (2002).
- [7] G. V. Nai , J. Ki , a d A. B a e a , O ide a d i f ide  
 a a e a i e a i c a e i a i he i ca e a ge , O t .  
 Ma e . E e **1**, 1090 (2011).
- [8] H. Mi g chi , T. Ka i a , S. Ma i hi , a d H. H , A  
 g e a a e f a e c d c i e ide , Na . C . . . . **2**,  
 470 (2011).
- [9] A. K d , H. Ya a gi , H. H , a d H. Ka a e ,  
 S C 202: A e c d c i e ide i h ide ba d  
 ga , A . Ph . Le u . **73**, 220 (1998).

- [10] . Kia a d A. Z g e , O r i g i f C e i e c e f C -  
 d c i i a d T a a e c i S O 2 , Ph . Re . Le u . **88**,  
 095501 (2002).
- [11] T. R. Pa de , A. Za a e , S. La , M. d' A e z ac , a d A.  
 Z g e , D i g e e a d d i g e i A 2 B O 4  
 i e ide , Ad . F . c . Ma e . **21**, 4493 (2011).
- [12] G. Ha i e , A. Mig i , G. Ced e , G.-M. Rig a e e , a d X.  
 G z e , I de i f i ca i a d d e i g e i c i e f h e  
 effe c i e a e f a e i 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 , a d B. H. H g , La g e  
 ca e a e g h f g a h e e fi f e ch a b e  
 e a e e e c e d e , Na e (L d ) **457**, 706 (2009).
- [15] T. Oh a a , J. O b , T. S z i , H. K i g a h i a , M.  
 O h i a , a d T. Hi g i , A -T e f a e c d c i g  
 ide : Nb12O29 , J. Ph . ac Che . H . (2011) 3534624 / (2011) 3 / P e c i c f 1 T j / 55
- [16] J. a de G e , P. S i e i , a d A. P a a , T a a e  
 c d c i g i e a i e e e , Na Le u . **12**, 3138  
 (2012).
- [17] X. Me g , D. Li , X. Dai , H. Pa , X. We , L. Z , a d G.  
 Qi , N e a b e h a d f a e c d c i e i TiO2-TiC  
 e : De i g a e i a f e a ch , Sci . Re . **4**, 7503  
 (2014).
- [18] I e g a ic G a S e c e Da a b a e , Fachi f e a i z e -  
 e . K a e h e , G e a , (2006).
- [19] W. A. E g a d , A. J. Jac b , a d B. C. T fie d , S e c e a  
 die f high i c i e e i c e a i e di .  
 a d i e b e a a i a , S id S a e I ic **6**, 21 (1982).
- [20] B. He e , S. A. S h i e , T. Sieg l , A. T. Fi e , a d J. V.  
 Wa z c a , S e c e a d e e f e d ced b a i .  
 i bi ide i g e e a b a i ed f e b a e f e e ,  
 Che . Ma e . **3**, 528 (1991).
- [21] See S . 9 ( ) 0 ( f ) T N b 1 2 O 2 9 ,

- [29] J. Mahajan and D.G. Schaefer, On the interface — a  $\mathbb{Z}^2$  tiling of the plane, *Science* **327**, 1607 (2010).
- [30] K. Lee, S.W. Kim, Y. Tada, S. Maehara, and H. Hiraoka, Dimerization of a  $\mathbb{Z}^2$ -dimer tiling of the plane, *Nature (London)* **494**, 336 (2013).
- [31] A. Freese and A. Zinger, The tiling of the plane by rectangles of bounded size, *Nature (London)* **402**, 60 (1999).
- [32] V. Seregin, S. Lathauwer, X. Zhang, and A. Zinger, Crystallographic tilings of the plane by rectangles of bounded size, *Phil. Mag. B* **85**, 115104 (2012).
- [33] R. Galet, X. Zhang, L. He, L. Yi, Y. Li, T.O.L. Soderberg, D. Chahine, K.R. Pedersen, and A. Zinger,