

Streszczenie

Chalkogenki bizmutu zostały dobrze zbadane zarówno pod względem doskonałych właściwości termoelektrycznych [1], jak i topologicznie chronionych stanów powierzchni [2]. Stany te są najbardziej istotne, gdy stosunek przewodnictwa powierzchniowego do przewodnictwa objętościowego jest wysoki. Dzieje się tak przy dużym stosunku powierzchni do objętości. Dlatego szczególnie interesujące są nanostruktury chalkogenków bizmutu [3]. Ponadto propozycje teoretyczne sugerują, że określone geometrie nanostruktur mogą w użyteczny sposób poprawić właściwości tych materiałów, np. perforowanie struktury Bi_2Se_3 może znacznie poprawić jej wartość termoelektryczną [4, 5]; przewody Bi_2Se_3 mogą być używane jako wydajne połączenia w obwodach zintegrowanych [6]; heterostruktury chalkogenków bizmutu z nadprzewodnikiem mogą pozwolić na kontrolę fermionów Majorany i innych zjawisk topologicznych, potencjalnie pomagając w rozwoju obliczeń kwantowych [7, 8, 9]. Zmiana grubości nanostruktur może również pozwolić na sterowanie parametrami transportu elektronowego [10, 11]. Wdrożenie tych pomysłów jest jednak wyzwaniem, ponieważ większość metod wzrostu nie pozwala na wytworzenie nanostruktur o kontrolowanych rozmiarach i kształtach w ramach tego samego procesu. Ogranicza to możliwość budowania urządzeń według dokładnych specyfikacji, a ponadto ogranicza przyszłą skalowalność urządzeń. Jednym ze sposobów przezwyciężenia tych problemów jest zastosowanie metod wytwarzania materiału i wytrawiania nanostruktur o precyzyjnych kształtach i rozmiarach. Istnieje wiele takich procesów wytrawiania, a jedną z metod pozwalających na uzyskanie rozmiarów obiektów poniżej 10 nm jest cięcie materiału za pomocą skupionej wiązki jonów (FIB), wykorzystując wiązkę przyspieszonych naładowanych atomów do selektywnego usuwania materiału z próbki.

W pracy doktorskiej skupiono się na zastosowaniu frezowania zogniskowaną wiązką jonów Ga^+ , jak również zastosowaniu nowatorskiego podejścia, wykorzystującego jony Xe^+ . Frezowanie FIB wykorzystuje jony Ga^+ do rozpylania materiału docelowego i może być używane zarówno do formowania kształtu [12, 13] jak również wprowadzania defektów [12, 14]. FIB okazało się obiecujące w produkcji urządzeń na bazie chalkogenków bizmutu, które zachowują swoje stany powierzchniowe [15, 16]. Wyniki badań transportu elektronowego w niskich temperaturach wskazały jednak, że wytworzone nanodrutki nie składają się całkowicie z Bi_2Se_3 , oraz że struktura krystaliczna została częściowo zmieniona przez FIB [15]. Chociaż wyniki te nie zachęcają do wykorzystania FIB jako metody wytwarzania nano-urządzeń, nie uwzględniają one w pełni możliwych zmian w strukturze materiału. Dlatego, aby lepiej zrozumieć wpływ modyfikacji FIB na strukturę atomową i elektronową chalkogenków bizmutu, w niniejszej pracy doktorskiej wykorzystano niezależne metody badawcze, aby przeanalizować zmiany materiału pod wpływem trawienia wysokoenergetycznymi jonami. Praca łączy metody wytwarzania urządzeń (takie jak litografia optyczna, litografia elektronowa i FIB), metody analityczne (skaningową mikroskopię elektronową, transmisyjną mikroskopię elektronową, spektroskopię absorpcji promieniowania rentgenowskiego i transport elektronowy w ultra-niskich temperaturach), jak również podejście teoretyczne oparte na teorii funkcjonału gęstości.

- 1 G. L. Sun, L. L. Li, X. Y. Qin, D. Li, T. H. Zou, H. X. Xin, B. J. Ren, J. Zhang, Y. Y. Li, and X. J. Li, *Applied Physics Letters* 106 (5) (2015).
- 2 Hongliang Shi, David Parker, Mao-Hua Du, and David J. Singh, *Physical Review Applied* 3 (1) (2015).
- 3 Ho Sun Shin, Bancel Hamdou, Heiko Reith, Hermann Osterhage, Johannes Gooth, Christine Damm, Bernd Rellinghaus, Eckhard Pippel, and Kornelius Nielsch, *Nanoscale* 8 (28), 13552 (2016).
- 4 O. A. Tretiakov, Ar Abanov, and Jairo Sinova, *Applied Physics Letters* 99 (11) (2011).
- 5 O. A. Tretiakov, Ar Abanov, and Jairo Sinova, *Journal of Applied Physics* 111 (7) (2012).
- 6 Timothy M. Philip, Mark R. Hirsbrunner, Moon Jip Park, and Matthew J. Gilbert, *IEEE Electron Device Letters* 38 (1), 138 (2017).
- 7 Roni Ilan, Jens H. Bardarson, H. S. Sim, and Joel E. Moore, *New Journal of Physics* 16 (5) (2014).
- 8 Liang Fu and C. L. Kane, *Physical Review Letters* 100 (9) (2008).
- 9 Chetan Nayak, Steven H. Simon, Ady Stern, Michael Freedman, and Sankar Das Sarma, *Reviews of Modern Physics* 80 (3), 1083 (2008).
- 10 Sung Min Kang, Sung-Soo Ha, Wan-Gil Jung, Mansoo Park, Hyon-Seok Song, Bong-Joong Kim, and Jung-Il Hong, *AIP Advances* 6 (2) (2016).
- 11 Vincent Sacksteder, Tomi Ohtsuki, and Koji Kobayashi, *Physical Review Applied* 3 (6) (2015).
- 12 Naoya Fukui, Rei Hobaru, Toru Hirahara, Shuji Hasegawa, Yutaka Miyatake, Hiroyuki Mizuno, Toru Sasaki, and Toshihiko Nagamura, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* 12 (0), 423 (2014).
- 13 Alka Sharma, Biplab Bhattacharyya, A. K. Srivastava, T. D. Senguttuvan, and Sudhir Husale, *Scientific Reports* 6 (1) (2016).
- 14 P. A. Sharma, A. L. Lima Sharma, M. Hekmaty, K. Hattar, V. Stavila, R. Goeke, K. Erickson, D. L. Medlin, M. Brahlé, N. Koirala, and S. Oh, *Applied Physics Letters* 105 (24) (2014).
- 15 Biplab Bhattacharyya, Alka Sharma, V. P. S. Awana, A. K. Srivastava, T. D. Senguttuvan, and Sudhir Husale, *Journal of Physics: Condensed Matter* 29 (11) (2017).
- 16 Biplab Bhattacharyya, Alka Sharma, V. P. S. Awana, T. D. Senguttuvan, and Sudhir Husale, *Journal of Physics: Condensed Matter* 29 (7) (2017).

