

1. Paweł J. KOWALCZYK¹, 2. Paweł KRUKOWSKI¹, 3. Dorota A. KOWALCZYK¹,
4. Katarzyna PABIANEK¹, 5. Iaroslav LUTSYK¹, 6. Maciej ROGALA¹, 7. Paweł DĄBROWSKI¹,
8. Adam BUSIAKIEWICZ¹, 9. Michał PISKORSKI¹, 10. Witold KOZŁOWSKI¹, 11. Beata ŁUSZCZYŃSKA²,
12. Ruslana UDOVYTSKA², 13. Jarosław JUNG², 14. Jacek ULAŃSKI², 15. Jacek BARANOWSKI³,
16. Simon A. BROWN⁴, 17. Guang BIAN⁵

Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego (1), Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Molekularnej (2), Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki (3), University of Canterbury, Department of Physics and Astronomy (4), University of Missouri, Department of Physics and Astronomy (5)

ORCID. 1. 0000-0001-6310-4366, 2. 0000-0002-1368-6908, 3. 0000-0002-5171-5490, 4. 0000-0002-8724-4395, 5. 0000-0003-1213-9969, 6. 0000-0002-7898-5087, 7. 0000-0002-9298-7046, 8. 0000-0003-1866-1387, 9. 0000-0003-0479-164X, 10. 0000-0003-0479-164X, 11. 0000-0002-4274-4222, 13. 0000-0001-6081-5605, 14. 0000-0003-1834-8470, 16. 0000-0002-6041-4331, 17. 0000-0001-7055-2319

doi:10.15199/48.2022.02.26

Elastyczne ogniwa fotowoltaiczne na bazie materiałów dwuwymiarowych i ich hybryd

Streszczenie. Elektrody w elastycznych ogniwach fotowoltaicznych wymagają zastosowania materiałów charakteryzujących się przezroczystością, przewodnością i elastycznością. Wszystkie te cechy wydaje się spełniać grafen, w oparciu o który udało nam się skonstruować anodę. Pokazujemy, że zwiększenie pracy wyjścia grafenu możliwe było dzięki dodatkowej warstwie tlenków molibdenu lub renu oraz że pojedyncza warstwa krystaliczna MoO_{3-x} może podnieść pracę wyjścia grafenu dzięki czemu istnieje realna szansa na jego zastosowanie w elektronice.

Abstract. The electrodes used for flexible photovoltaic cells require materials that are transparent, conductive and flexible. All these features seem to be met by graphene, on the basis of which we were able to construct the anode. Here we show that increase of the graphene work function is possible using an additional layer of molybdenum or rhenium oxides. Moreover, we show that a single crystalline layer of MoO_{3-x} can increase the work function of the graphene. In consequence there is a real chance for practical applications of graphene in electronics. (**Flexible photovoltaic cells based on two-dimensional materials and their hybrids.**)

Słowa kluczowe: elastyczna elektronika, grafen, praca wyjścia, tlenki metali przejściowych.

Keywords: flexible electronics, graphene, work function, transition metal oxides.

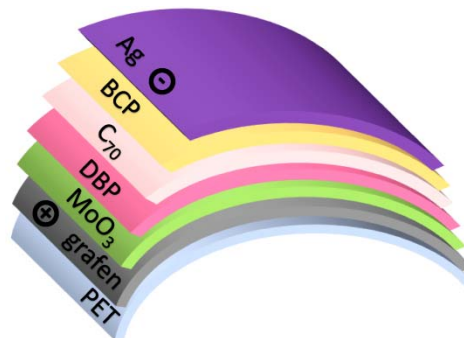
Wstęp

Budowa ogniw fotowoltaicznych w oparciu o materiały dwuwymiarowe (2D) może wydawać się być bardzo odległą przyszłością. Jednak najnowsze badania prowadzone w nanoskali pokazują, że istnieje możliwość konstrukcji układów fotowoltaicznych działających w oparciu o materiały 2D [1]. W tym przełomowym doniesieniu T. Akamatsu wraz ze współpracownikami pokazał, że układ hybrydowy dwóch materiałów 2D: fosforenu oraz WSe_2 generuje fotoprąd. Wciąż nie zbadane są możliwości wykorzystania innych układów hybrydowych opartych np. o bizmuten czy antymonen znajdujące się w tej samej grupie układu okresowego co fosforen [2,3].

Bez wątpliwości ciekawe wydaje się wykorzystanie w zastosowaniach fotowoltaicznych grafenu (materiału 2D oficjalnie odkrytego w 2004 roku) i dwuwymiarowych materiałów hybrydowych, w których jednym ze składników jest grafen [4]. Zastosowanie grafenu jako elektrody powinno zapewnić jej stosunkowo małą rezystancję, dużą przezroczystość i elastyczność. Niestety dużym problemem w zastosowaniach grafenu jest jego stosunkowo niewielka praca wyjścia (4,2 – 4,5 eV). Aby możliwe było praktyczne wykorzystanie grafenu należy bądź zwiększyć pracę wyjścia i wtedy grafen mógłby pracować jako anoda bądź zmniejszyć ją i użyć go jako katody.

W naszych eksperymentach mających na celu modyfikację elektrody grafenowej skupiliśmy się na tlenkach metali przejściowych takich jak tlenek molibdenu oraz tlenek renu. Odkryliśmy, że możemy zwiększać pracę wyjścia grafenu poprzez termiczne naporowanie tlenku molibdenu [5] oraz tlenku renu [6]. Dodatkowo zaobserwowaliśmy, że poprzez odpowiedni dobór jakości podłoża oraz warunków wzrostu jesteśmy w stanie kontrolować morfologię hodowanych warstw. W szczególności możemy wytworzyć warstwy o charakterze granularem i wtedy aby uzyskać dobre dopasowanie pracy wyjścia należy pokryć podłożę warstwą o grubości około 3 –

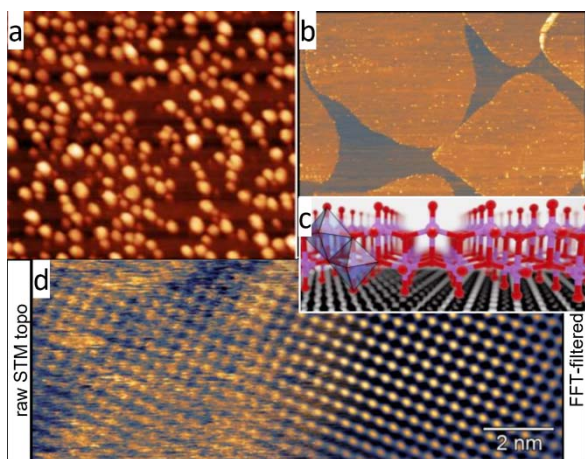
10 nm. Natomiast ten sam efekt (powiększenia pracy wyjścia) można osiągnąć z warstwą o grubości poniżej 1 nm pod warunkiem, że jest ona krystaliczna. Pokazaliśmy to na przykładzie tlenku molibdenu, który udało nam się wyhodować w postaci pojedynczej warstwy [5]. Proces wzrostu przeprowadzony został na graficie (jako materiale van der Waals'a o bardzo wysokiej jakości powierzchni charakteryzującej się małą ilością defektów) oraz grafenie. Badania nasze pokazały, że już warstwa o grubości 0,7 nm powoduje wzrost pracy wyjścia do poziomu 5,7 eV w obu wyhodowanych zestawach próbek. Co więcej przeprowadziliśmy szereg eksperymentów mających na celu powiększenie wartości pracy wyjścia i okazało się, że nieznaczna obróbka termiczna próbki pozwala na zwiększenie tej wartości do poziomu 6,5 eV.



Rys.1. Schematyczny model organicznego i elastycznego fotoogniwa.

Spodziewamy się podobnych zależności dla warstw bazujących na tlenku renu [6]. W naszych badaniach użyliśmy zarówno ReO_3 jak i Re_2O_7 do nanoszenia termicznego w próżni. Jednak jak do tej pory w eksperymentach prowadzonych z tlenkiem renu wykorzystujemy podłoża o charakterze przemysłowym, które nie zapewniają długiej drogi swobodnej dyfundujących

klasterów a tym samym wzrost ma charakter granularny. Tym samym musimy otrzymać grubsze warstwy o pokryciu >3 nm aby otrzymać odpowiednią wartość pracy wyjścia przekraczającą 5,5 eV. Niestety wadą ReO_3 jest jego mała stabilność termiczna w próżni co wymusza niską temperaturę parowania a co za tym idzie zmniejsza się szybkość sublimacji i w konsekwencji wydłuża czas wzrostu warstw. Co więcej w trakcie parowania wytwarzają się różne fazy co powoduje, że proces wzrostu z punktu widzenia chemicznego jest trudny w kontroli. Potencjalnym rozwiązaniem tego problemu jest wykorzystanie Re_2O_7 , który również charakteryzuje się wysoką pracą wyjścia. Ponadto tlenek ten w trakcie procesu parowania zachowuje się dużo bardziej stabilnie a szybkość sublimacji jest znacznie większa w porównaniu do ReO_3 . Obecnie prowadzimy bardzo intensywne badania z wykorzystaniem tego materiału jako warstwy modyfikującej pracę wyjścia elektrody grafenowej.



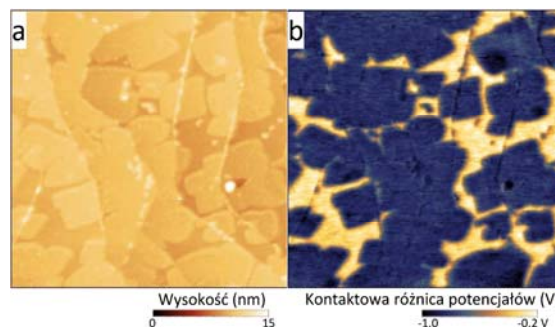
Rys.2. (a), (b) Obrazy STM tlenku molibdenu naniesionego na grafen z miedzi oraz na grafit. Wymiar poprzeczny to 1 μm . (c) Model kulowy tlenku molibdenu w układzie van der Waals'a z grafenem. (d) Obraz STM z atomową zdolnością rozdzielczą zarejestrowany na pojedynczej warstwie MoO_{3-x} na graficie.

Wyniki

Powszechnie wiadomo, że fotoogniwo skonstruowane w konfiguracji standardowej zbudowane jest z szeregu warstw aktywnych, których struktura elektronowa musi być do siebie odpowiednio dopasowana [7]. Ponadto w standardowej konfiguracji typowo wykorzystywany jest tlenek indowo-cynowy (ITO - Indium Tin Oxide) jako przezroczysta elektroda (anoda). Jednakże działanie urządzenia jest możliwe tylko wtedy, kiedy praca wyjścia ITO jest znacznie zwiększona z wartości około 4,7 eV do wartości >5 eV. Jednak ITO mimo swoich licznych zalet jest niestety kruche w związku z tym nie jest dobrym materiałem do zastosowań w elektronice elastycznej [8]. Jak pokazano schematycznie na rysunku 1 anoda może zostać wykonana nie tylko z ITO ale także w oparciu o grafen, który wydaje się znacznie lepszym materiałem do zastosowań w elektronice elastycznej. Niestety również i w tym przypadku praca wyjścia elektrody grafenowej musi zostać dopasowana aby możliwa była praca urządzenia. Okazało się, że można tego dokonać w analogiczny sposób jak w przypadku ITO czyli poprzez zastosowanie tlenków metali przejściowych takich jak tlenek molibdenu [5] oraz renu [6].

Nasze badania pokazały, że kluczowym parametrem determinującym charakter wzrostu warstw na grafenie jest jakość samego podłoża. Na rysunku 2a pokazano obraz otrzymany przy użyciu mikroskopu sił atomowych (AFM - Atomic Force Microscope) próbki grafenowej pokrytej tlenkiem molibdenu, na którym widać, że charakter wzrostu

jest granularny. Na skutek obecności gęstej sieci defektów klasterzy tlenku molibdenu osiadające na powierzchni w procesie termicznego wzrostu mają ograniczoną drogę swobodnej dyfuzji i następuje agregacja materiału w postaci klasterów pokrywających całą powierzchnię. Okazuje się jednak, że przy dokładniej takich samych warunkach wzrostu, ale z wykorzystaniem podłoża o małej ilości defektów a tym samym gwarantującego długą drogę swobodną dyfundujących cząstek morfologia wytworzonej próbki wygląda całkowicie inaczej. Na rysunku 2b pokazano obraz otrzymany za pomocą skaningowego mikroskopu tunelowego (STM - Scanning Tunneling Microscope) wskazujący na obecność pojedynczej warstwy MoO_{3-x} o porządkowych rozmiarach liczonych w setkach nanometrów (mikrometrów przy ciągłej warstwie). Próbka ta wyhodowana została na graficie jako materiale podobnym do grafenu, ale o znacznie lepszej jakości. Na obrazie tym (rys. 2b) widać wzrost tylko jednej pojedynczej warstwy bez formowania się kolejnych warstw na powierzchni. Oznacza to, że klasterzy tlenku lądujące na powierzchni pierwszej warstwy swobodnie dyfundują w kierunku krawędzi. Tym samym wyspy MoO_{3-x} ulegają rozrostowi w poprzek aż do pełnego pokrycia powierzchni. Dopiero gdy nastąpi niemalże całkowite pokrycie podłoża rozpoczyna się wzrost drugiej i kolejnych warstw MoO_{3-x} [5].



Rys.3. (a) Obraz AFM $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ pokazujący warstwy tlenku molibdenu na grafenie. (b) Obraz KPFM rejestrowany razem z (a) i pokazujący kontaktową różnicę potencjałów między grafenem a platkami MoO_{3-x} .

Struktura krystaliczna MoO_3 pokazana została na rysunku 2c i charakteryzuje się obecnością dwóch warstw atomów Mo otoczonych atomami O, które tworzą charakterystyczne oktaedry z centralnym atomem Mo i atomami O w narożach (rys. 2c). MoO_3 jest materiałem warstwowym a warstwy między sobą związane są słabymi siłami van der Waals'a.

Na rysunku 2d pokazujemy obraz STM z wyraźnie widoczną strukturą atomową wytworzonej warstwy MoO_{3-x} . Obecność struktury atomowej świadczy o wysokiej jakości wytworzonych warstw bez defektów strukturalnych. Wniosek ten jest dodatkowo potwierdzony przez brak wzrostu drugiej warstwy tlenku w początkowej fazie nukleacji, w której klasterzy tlenku osiadające na powierzchni dyfundują do krawędzi. Oznacza to brak centrów wzrostu na powierzchni monowarstwy i pośrednio wskazuje na jej wysoką krystaliczność.

Nasze badania jasno pokazały, że charakter wzrostu MoO_{3-x} silnie zależy od jakości podłoża więc zdecydowaliśmy się wykorzystać grafen o znacznie lepszej jakości niż ten uzyskiwany z miedzi. Do tego celu wykorzystaliśmy grafen hodowany na SiC charakteryzujący się stosunkowo małą ilością defektów. Wykorzystanie tego typu grafenu jako podłoża pozwoliło na uzyskanie takiego samego charakteru wzrostu jak dla podłoża grafitowych. Zilustrowane to zostało na rysunku 3a, gdzie pokazano obraz AFM, który jasno wskazuje na wzrost pojedynczej

warstwy MoO_{3-x} . W szczególności, w tym eksperymencie udało nam się wytworzyć syntetyczną hybrydę dwóch materiałów 2D [4].

Wraz z obrazowaniem topografii powierzchni w naszych eksperymentach rejestrowaliśmy również kontaktową różnicę potencjałów z wykorzystaniem mikroskopii sił z sondą Kelvina (KPFM - Kelvin Probe Force Microscopy). Wynik takiego obrazowania pokazany został na rysunku 3b, gdzie widać różnicę potencjałów (wprost proporcjonalną do różnicy w pracach wyjścia) pomiędzy grafenem a tlenkiem molibdenu (obszary jasne i ciemne na rysunku 3b). Pierwsze pomiary wykonane na tych układach hybrydowych pokazały, że praca wyjścia dla tlenu może osiągać wartości na poziomie 3 – 10 nm do grubości 0,7 nm. Nasze pomiary wykonane na bliźniaczym układzie z grafitem jako podłożem wskazują, że przy odpowiednim przygotowaniu próbki różnica w pracach wyjścia może sięgać nawet 2 eV (a tym samym praca wyjścia tlenu dochodzi do 6,5 eV). Daje to realną szansę na zmniejszenie grubości pokrycia tlenkami z obecnych 3 – 10 nm do grubości poniżej 1 nm. Należy tu podkreślić, że ten eksperyment pokazał możliwość wytwarzania układów hybrydowych van der Waals'a w oparciu o grafen i tlenek molibdenu a tym samym powiększył rodzinę syntetycznych heterostruktur materiałów 2D o własnościach funkcjonalnych [4].

Nasze badania związane z modyfikacją pracy wyjścia elektrody transparentnej przy użyciu tlenków metali przejściowych pozwoliły nam na zbudowanie działającej organicznej diody elektroluminescencyjnej (OLED - Organic Light Emitting Diode) z elektrodą grafenową. Eksperymenty te rozpoczęliśmy od konstrukcji OLED działającego w oparciu o zmodyfikowaną elektrodę z ITO. Natomiast na początku tego roku (zgodnie ze stanem naszej wiedzy) jako pierwszymu zespołowi w Polsce udało nam się zbudować efektywne układy świecące z zmodyfikowaną elektrodą grafenową. Należy tu podkreślić, że w całej serii powyższych eksperymentów wykorzystaliśmy tlenek renu jako materiał modyfikujący pracę wyjścia elektrod grafenowych oraz tych wykonanych z ITO.

Opisane powyżej prace eksperymentalne związane były ściśle z modyfikacją grafenu pracującego jako anoda. W niektórych naszych eksperymentach udało nam się również obniżyć pracę wyjścia grafenu do wartości <4 eV co daje nadzieję na zastosowanie tego materiału również jako katody w urządzeniach elektronicznych dla fotowoltaiki. Możliwe wydaje się również posiadanie w jednym urządzeniu dwóch elektrod przezroczystych co może prowadzić do realizacji przezroczystych paneli fotowoltaicznych bądź przezroczystych wyświetlaczy.

Nie ulega jednak wątpliwości, że praktyczne i przemysłowe zastosowania grafenu jako elektrody w urządzeniach elektronicznych wydaje się możliwe dopiero w przyszłości. Główną przeszkodą jest obecnie brak taniego grafenu o dobrej jakości, przewodności oraz małej ilości defektów. Do zastosowań aplikacyjnych nie bez znaczenia są również rozmiary warstw grafenowych, które powinny być jak największe. Gdy tylko zostanie osiągnięty przełom w produkcji taniego grafenu o wystarczająco dobrej jakości wydaje się, że ścieżka do wytwarzania ogniw fotowoltaicznych jest jasna i klarowna.

Podsumowanie

W podsumowaniu chcielibyśmy podkreślić, że wytworzenie ogniw fotowoltaicznych w oparciu o zmodyfikowany tlenkiem metalu przejściowego grafen pracujący jako elektroda transparentna wydaje się w pełni możliwe. Nasze prace pokazały, że można osiągnąć odpowiedni poziom dopasowania elektrody grafenowej do

warstwy transportującej dziury poprzez termiczne naniesienie tlenków zarówno molibdenu jaki i renu. Co więcej pokazaliśmy, że przy odpowiednio dobrej jakości podłożach grafenowych możliwa jest redukcja grubości warstwy tlenu molibdenu do rozmiarów pojedynczej warstwy. Bez wątplenia będzie to miało znaczący wpływ na transparentność takiej warstwy w porównaniu z warstwami o grubości 3 – 10 nm jakie używane są obecnie. Niestety, wciąż wyzwaniem jest opracowanie technologii produkcji taniego grafenu o dużych rozmiarach i pozbawionego defektów strukturalnych. Gdy ten problem zostanie rozwiązany wytwarzanie elastycznych ogniw fotowoltaicznych w skali przemysłowej stanie się możliwe.

Autorzy dziękują Narodowemu Centrum Nauki za finansowe wsparcie w szczególności projektom: 2016/21/B/ST5/00984, 2018/31/B/ST3/02450, 2020/37/B/ST5/03929. Specjalne podziękowania dla pana Patryka Pitranka studenta WFILS UŁ za przygotowanie modelu kulowego z rysunku 2c. Podziękowania dla firmy BeeGraphene za dostarczenie testowych próbek grafenu.

Autorzy: dr hab. Paweł J. Kowalczyk, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: pawel.kowalczyk@uni.lodz.pl; dr Paweł Krukowski, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90236 Łódź, E-mail: pawel.krukowski@uni.lodz.pl; mgr inż. Dorota A. Kowalczyk, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: dorota.kowalczyk@uni.lodz.pl; mgr inż. Katarzyna Pabianek, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: katarzyna.pabianek@uni.lodz.pl; mgr Jaroslav Lutsyk, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: jaroslav.lutsyk@uni.lodz.pl; dr Maciej Rogala, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: maciej.rogala@uni.lodz.pl; dr Paweł Dąbrowski, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: pawel.dabrowski@uni.lodz.pl; dr hab. Adam Busiakiewicz, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: adam.busiakiewicz@uni.lodz.pl; mgr Inż. Michał Piskorski, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: michal.piskorski@uni.lodz.pl; dr hab. Witold Kozłowski, Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: witold.kozlowski@uni.lodz.pl; dr hab. Beata Łuszczzyńska, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Molekularnej, Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, E-mail: beata.luszczynska@p.lodz.pl; dr Ruslana Udovyt'ska, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Molekularnej, Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, E-mail: ruslana.udovyt'ska@p.lodz.pl; dr hab. Jarosław Jung, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Molekularnej, Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, E-mail: jaroslaw.jung@p.lodz.pl; prof. dr hab. Jacek Ulański, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Molekularnej, Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, E-mail: Jacek.ulanski@p.lodz.pl; prof. Dr hab. Jacek Baranowski, Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: jacek.baranowski@imif.lukasiewicz.gov.pl; prof. Simon A. Brown, The MacDiarmid Institute for Advanced Materials and Nanotechnology, Department of Physics and Astronomy, University of Canterbury, Private Bag 4800, 8140 Christchurch, New Zealand, E-mail: simon.brown@canterbury.ac.nz; prof. Guang Bian, Department of Physics and Astronomy, University of Missouri, Columbia, MO, 65211, USA, E-mail: bianq@missouri.edu.

LITERATURA

- [1] T. Akamatsu, T. Ideue, L. Zhou, Y. Dong, S. Kitamura, M. Yoshii, D. Yang, M. Onga, Y. Nakagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Laurienzo, J. Huang, Z. Ye, T. Morimoto, H. Yuan, Y. Iwasa, A van der Waals interface that creates in-plane polarization and a spontaneous photovoltaic effect, *Science* 372 (2021) 68–72
- [2] P.J. Kowalczyk, S.A. Brown, T. Maerkl, Q. Lu, C.-K. Chiu, Y.

- Liu, S.A. Yang, X. Wang, I. Zasada, F. Genuzio, T.O. Mendelcs, A. Locatelli, T.-C. Chiang, G. Bian, Realization of Symmetry Enforced Two-Dimensional Dirac Fermions in Nonsymmorphic α -Bismuthene, *ACS Nano*. 14 (2020) 1888–1894
- [3] T. Maerkl, P.J. Kowalczyk, M. Le Ster, I.V. Mahajan, H. Pirie, Z. Ahmed, G. Bian, X. Wang, T.-C. Chiang, S.A. Brown, Engineering multiple topological phases in nanoscale Van der Waals heterostructures: realisation of α -antimonene, *2D Mater.* 5 (2017) 11002
- [4] A.K. Geim, I. V. Grigorieva, Van der Waals heterostructures, *Nature*. 499 (2013) 419–425
- [5] D.A. Kowalczyk, M. Rogala, K. Szalowski, W. Kozłowski, I. Lutsyk, M. Piskorski, P. Krukowski, P. Dabrowski, D. Belić, M. Cichomski, Z. Klusek, P.J. Kowalczyk, Local electronic structure of stable monolayers of α -MoO_{3-x} grown on graphite substrate, *2D Mater.* 8 (2021) 25005
- [6] P. Krukowski, D.A. Kowalczyk, M. Piskorski, P. Dabrowski, M. Rogala, P. Caban, P. Ciepielewski, J. Jung, J.M. Baranowski, J. Ulanski, Z. Klusek, Work Function Tunability of Graphene with Thermally Evaporated Rhenium Heptoxide for Transparent Electrode Applications, *Adv. Eng. Mater.* 22 (2019) 1900955
- [7] G. Sherafatipour, J. Benduhn, B.R. Patil, M. Ahmadpour, D. Spoltore, H.-G. Rubahn, K. Vandewal, M. Madsen, Degradation pathways in standard and inverted DBP-C70 based organic solar cells, *Sci. Rep.* 9 (2019) 4024
- [8] Q. Dong, Y. Hara, K.T. Vrouwenvelder, K.T. Shin, J.A. Compiano, M. Saif, R. Lopez, Superflexibility of ITO Electrodes via Submicron Patterning, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 10 (2018) 10339–10346