University of Groningen

Spin transport in graphene - hexagonal boron nitride van der Waals heterostructures

Gurram, Mallikarjuna

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2018

Link to publication in University of Groningen/UMCG research database

Citation for published version (APA):
Gurram, M. (2018). *Spin transport in graphene - hexagonal boron nitride van der Waals heterostructures*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen.

Copyright
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the “Taverne” license. More information can be found on the University of Groningen website: https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment.

Take-down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): http://www.rug.nl/research/portal. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Download date: 12-10-2024

సారాంశం

గత శతాబ్దం యొక్క రెండవ భాగంలో, ట్రాన్సిస్టర్ ఆవిష్కరణ నుండి కంప్యూటర్లు మరియు స్మార్ట్ ఫోన్లలో శక్తివంతమైన మైక్రోప్రాసెసర్ చిప్స్ వరకు, డిజిటల్ ఎలక్ట్రానిక్స్ వైపు మైక్రో ఎలెక్ట్రానిక్స్ టెక్నాలజీ ఒక విప్లవాన్ని చూసింది. ఈ పరికరాలలోని ఎలక్ట్రానిక్ సర్క్యూట్లు బైనరీ అంకెలు లేదా బిట్స్, 0 మరియు 1 గా డేటాను వ్యక్తం చేస్తాయి. అనేకమైన లాజిక్ పరికరాలను ప్రతి చిప్ లోను ప్యాక్ చేయడం ద్వారా ఇప్పుడు ఎలక్ట్రానిక్ పరికరాలు మన జేబులో సరిపోయేలా సూక్ష్మీకరించబడ్డాయి. ఈ సాంకేతిక పరిజ్ఞానం ఒక బిలియన్-డాలర్ పరిశ్రమను గత సంవత్సరాలలో సృష్టించింది. ప్రస్తుతం, 2017 నాటికి, ఒక బిట్ పరిమాణం అణువుల పరిమాణానికి, అనగా 1 నానోమీటరుకి చేరటం వలన, మనం మూర్ యొక్క చట్టం ముగింపుకి చేరాము. అలాంటి కాంపాక్ట్ పరికరాల్లో, పవర్ చెదిరిపోవటం అనేది ఇప్పుడు ఒక సవాలు.

మైక్రోఎలెక్ట్రానిక్ పరికరాలలో ప్రస్తుత సవాళ్లైన పవర్ దుర్వినియోగం మరియు పరిమాణపు తగ్గింపు వంటి వాటిని అధిగమించడానికి, పరిశోధకులు ఎలక్ట్రాన్ యొక్క అదనపు అంతర్గత లక్షణం అయిన స్పిన్ అనే సంపూర్ణ క్వాంటం మెకానికల్ లక్షణాన్ని గురించి పరిశోధించటం జరిగింది. ఒక ఎలక్ట్రాన్ యొక్క స్పిన్ అనేది తిరిగే బొంగరం లేదా దిక్సూచి సూది యొక్క దిశాత్మక ప్రవర్తనను పోలి ఉంటుంది. బొంగరం లేదా దిక్సూచి సూది అనేది సవ్యదిశలో లేదా అపసవ్యదిశలో తిరిగిన విధంగా, ఎలక్ట్రాన్ యొక్క స్పిన్ అనేది కూడా అయస్కాంత క్షేత్రానికి సంబంధించి అప్-స్పిన్ మరియు డౌన్-స్పిన్ దిశలుగా కలిగి ఉంటుంది. ఎలక్ట్రాన్ యొక్క ఛార్జ్ కన్నా స్పిన్ యొక్క ప్రయోజనం ఏమిటంటే, శక్తిని కోల్పోకుండా ఒక ఎలక్ట్రాన్ యొక్క స్పిన్ ని బాహ్య అయస్కాంత క్షేత్రం ద్వారా సమాచారాన్ని నియంత్రించగలగవచ్చు. "స్పిన్ట్రానిక్స్" అని పిలవబడే ఈ కొత్త రంగ పరిశోధన యొక్క మొట్టమొదటి పరికరములు ఇప్పటికే ఉద్భవించి వాణిజ్యపరంగా ఉపయోగంలో ఉన్నాయి. ఉదాహరణకు, ఎలక్ట్రాన్ స్పిన్ల యొక్క లక్షణాలు ఇప్పటికే రోజువారీ ఎలక్ట్రానిక్ పరికరాలైన మన హార్డ్ డిస్క్ డ్రైవ్లలోని మాగ్నెటిక్ సెన్సార్లు మరియు మాగ్నెటిక్ రాండమ్ యాక్సెస్ మెమరీలలో ఉపయోగించబడుతున్నాయి.

అంతేకాకుండా, తరువాతి తరం స్పిన్ట్రానిక్ పరికరాల పరిమాణాన్ని తగ్గించడంలోని సవాళ్లను అధిగమించడానికి, పరిశోధకులు కొత్త రకాలైన మెటీరియల్స్ ను అన్వేషిస్తున్నారు. ఈ మెటీరియల్స్ సుదూర మార్గం మరియు సుదీర్ఘకాలం కోసం స్పిన్ల కదలికను నిర్వహించగలవు. ఈ శతాబ్దపు ప్రారంభంలో కనుగొనబడిన కార్బన్ పరమాణువుల యొక్క ఒక-అణువు మందపాటి రెండు-డైమెన్షన్ల పొర గ్రాఫీన్ అనే మెటీరియల్ యొక్క మంచి స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్టేషన్ పొడవు మరియు సుదీర్ఘ స్పిన్ సడలింపు సమయాల అంచనా కారణంగా స్పిన్ట్రానిక్స్ ఉపయోగాలకు అనుకూలంగా గ్రాఫీన్ ఎదిగింది. కానీ, ఆచరణపరంగా, గ్రాఫీన్లో స్పిన్ల రవాణా అనేది కొంత సమయం తర్వాత స్పిన్ల నియమరాహిత్యం కారణంగా కష్టం అవుతుంది. ప్రస్తుత పరిశోధకులు గ్రాఫీన్ ఆధారిత స్పిన్ట్రానిక్స్ పరికరాల యొక్క పనితీరుని

తగ్గించే సమస్యలను గుర్తించడం మరియు వాటికి ఎదురయ్యే సవాళ్లను అధిగమించడంపై దృష్టి కేంద్రీకరించారు.

సుమారు దశాబ్దం క్రితం స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్ట్ ని మొదట కనుగొన్నప్పుడు, అది సాపేక్షంగా తక్కువ స్పిన్ సడలింపు సమయం మరియు స్పిన్ విస్తరణ పొడవులను చూపించింది. ఈ రంగంలో తదుపరి ప్రయత్నాలు, గ్రాఫీన్ ఆధారపడిన ఉపరితలం, గ్రాఫీన్ పై ఉన్న మలినాలు మరియు కాంటాక్ట్స్ యొక్క నాణ్యత అనేవి దాని రవాణా లక్షణాలను ప్రభావితం చేయడంలో కీలక పాత్ర పోషిస్తాయని సూచిస్తున్నాయి. ఈ థీసిస్ లో సమర్పించబడిన పరిశోధన పని ఈ సమస్యలను పూర్తిగా కొత్త పరికర జ్యామితిని ఉపయోగించి పరిష్కరించడానికి దోహదపడుతుంది.

ఈ థీసిస్ గ్రాఫీన్ స్పిన్ట్రానిక్స్ కోసం మొదటిసారి ఒక కొత్త పరికరాన్ని రూపొందిస్తుంది. అందులో గ్రాఫీన్ ని పూర్తిగా రెండు షట్కోణ బోరాన్ నైట్రైడ్ (hBN) పొరల మధ్య అమర్చటం ద్వారా సబ్స్ట్రేట్, కాంటాక్ట్స్ ప్రభావం, ఛార్జ్ మరియు స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్ట్ లక్షణాలలో ఇన్హోమోజనిటీ వంటి సవాళ్లను పరిష్కరించడానికి ప్రయత్నిస్తుంది.

గ్రాఫీన్లో స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్ట్ ని పరిమితం చేసే ఒక ముఖ్యమైన కారకం- ఫెర్రోమాగ్నెట్(FM)/టన్నెల్-బారియర్/గ్రాఫీన్ జంక్షన్లు కలిగి ఉన్న ఫెర్రోఅయస్కాంత టన్నెల్ కాంటాక్ట్స్ యొక్క నాణ్యత అని అనేక పరిశోధనలు సూచిస్తున్నాయి. చాప్టర్ 5 లో, మేము సాంప్రదాయ ఆక్సైడ్ బారియర్ కి బదులుగా ఒక పొర hBN టన్నెల్-బారియర్ ని ఉపయోగించి ఈ సమస్యను పరిష్కరించడానికి ప్రయత్నించాము. అదే టన్నెల్-బారియర్ పొర అదనంగా, లిథోగ్రాఫిక్ ప్రక్రియల కారణంగా కలిగే లిథోగ్రాఫిక్ మలినాల నుండి కింద ఉన్న గ్రాఫీన్ ని కాపాడుతుంది.

గ్రాఫీన్ యొక్క వివిధ ప్రాంతాల్లో సేకరించిన ఛార్జ్ కదలిక విలువలు ఒకదానికొకటి దగ్గరగా ఉన్నాయని మా పరికరం చూపించే ఛార్జ్ రవాణా లక్షణాలు సూచిస్తున్నాయి. స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్టేషన్ కొలతలు గ్రాఫీన్ యొక్క వివిధ ప్రాంతాలలో స్థిరమైన, ఇంచుమించు సమానమైన స్పిన్ సడలింపు పారామితులకు కారణమయ్యాయి. అంతేకాకుండా, వాహకం సరిపోని ఎలక్ట్రోడ్లు ఉన్న స్థితిలో, ఒక మోనోలేయర్- hBN- టన్నెల్ బారియర్ తో కప్పబడి ఉన్న 12.5 మైక్రోమీటర్ గ్రాఫీన్ ఛానల్ అంతటా స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్ట్ ను కూడా గమనించాము. ఇది hBN యొక్క పిన్ రంధ్ర రహిత స్వభావాన్ని మరియు గ్రాఫీన్ తో hBN యొక్క క్లీన్ ఇంటర్ఫేస్ ని సూచిస్తుంది.

ఈ ఫలితాలు ఒక శుభ్రమైన వాతావరణంలో గ్రాఫీన్ యొక్క అంతర్గత స్పిన్ రవాణా లక్షణాలను పరిశోధించడానికి ఒక ఉపరితలంగా మరియు ఒక టన్నెల్-బారియర్ వలె hBN ను ఉపయోగించుకోగలిగే సామర్థ్యాన్ని సూచిస్తాయి. కానీ, మోనోలేయర్-hBN బారియర్ కి సంబంధించి, సాపేక్షంగా తక్కువ ఇంటర్ఫేస్-నిరోధక పరిధి RcA ప్రాడక్ట్ కారణంగా, నాన్-ఇన్వేసివ్ స్పిన్ ఇంజెక్షన్ మరియు డిటెక్షన్ కోసం అధిక సంఖ్యలో hBN పొరలను ఉపయోగించాల్సిన అవసరం ఉంది. FM వైపు స్పిన్ల యొక్క తిరుగుప్రవాహాన్ని RcA ప్రాడక్ట్ విలువ పరిగణిస్తుంది. అంతేకాకుండా, hBN పొరల సంఖ్య పెరిగే కొద్దీ, FM/hBN/గ్రాఫీన్ సిస్టం లో పెద్ద స్పిన్ ఇంజెక్షన్ పోలరైజేషన్ ని బయాస్ యొక్క ఫంక్షన్ గా అంచనా వేశారు.

ఫెర్రోమాగ్నెట్/థిన్- hBN/గ్రాఫీన్ సిస్టమ్స్ ని బయాస్ చేయటం ద్వారా విద్యుత్-క్షేత్రాలు, గ్రాఫీన్ యొక్క ఎలెక్ట్రోస్టాటిక్ గేటింగ్, మరియు గ్రాఫీన్లో అయస్కాంత సామీప్య

మార్పిడి విభజనను ప్రేరేపించడం వంటి గొప్ప భౌతిక శాస్త్ర విషయాలను చూపించవచ్చునని ఊహించినప్పటికీ, అది సాహిత్యంలో ఇంతవరకు అన్వేషించబడలేదు. ఇటువంటి విషయాలను అన్వేషించడానికి, 6 వ అధ్యాయంలో, కోబాల్ట్ / బైలేయర్- hBN / గ్రాఫీన్ యొక్క టన్నెలింగ్ కాంటాక్ట్స్ పై పెట్టిన విద్యుత్ క్షేత్రం మీద భేదాత్మక స్పిన్-ఇంజెక్షన్ మరియు డిటెక్షన్ పోలరైజేషన్లు ఏ విధంగా ఆధారపడి ఉంటాయని అధ్యయనం చేశాము. గది ఉష్ణోగ్రతల వద్ద జరిపిన మా స్పిన్-ట్రాన్స్పోర్టేషన్ కొలతలు, ఆశ్చర్యకరంగా ± 100% వరకు పెద్దవైన బయాస్ ప్రేరిత భేదాత్మక స్పిన్-ఇంజెక్షన్ మరియు డిటెక్షన్ పోలరైజేషన్లను, మరియు జీరో బయాస్ కి సమీపంలో పోలరైజేషన్ల యొక్క అపూర్వమైన సైన్ ఇన్వర్షన్ ని బహిర్గతం చేశాయి.

స్పిన్ ఇంజెక్షన్ మరియు డిటెక్షన్ పోలరైజేషన్ యొక్క పెద్ద విలువలను ఉపయోగించి, మేము రెండు-టెర్మినల్ స్పిన్ వాల్వ్ నందు డిఫరెన్షియల్ ఇన్వర్టెడ్ స్పిన్ సిగ్నల్ 800 Ω వరకు మరియు మాగ్నెటోరెసిస్టెన్స్ నిష్పత్తి 2.7% వరకు రికార్డు పరిమాణాన్ని ప్రదర్శించాము. అంతేకాక, చాప్టర్ 8 లో ఇచ్చిన బైలేయర్- hBN టన్నెల్ బార్రియర్ కాంటాక్ట్స్ ని ఉపయోగించి హాన్లే స్పిన్ ప్రిజెషన్ కొలతల ద్వారా రెండు-టెర్మినల్ కొలత జ్యామితిలో స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్ట్ యొక్క స్పష్టమైన ఆధారం కూడా మనం గమనించవచ్చు. ఇది రెండు-టెర్మినల్ హాన్లే సిగ్నల్ యొక్క మొట్టమొదటి ప్రదర్శనే కాక ఈ ఫలితాలు సాంకేతికంగా గ్రాఫీన్ స్పింట్రానిక్ అనువర్తనాలకు చాలా అనువైనవి.

రెండు టెర్మినల్ మాగ్నెటోరెసిస్టన్స్ సిగ్నల్స్ మరింత మెరుగుపరచడానికి మరియు గది ఉష్ణోగ్రత థర్మల్ ఉష్ణ శక్తి, kBT, ని దాటి గ్రాఫీన్ లో స్పిన్-నిల్వ మెరుగుపరచడానికి కూడా మేము ఇక్కడ సలహాలు పొందుపరిచాము. అవి గ్రాఫీన్లో స్పిన్ రవాణా అధ్యయనానికి పూర్తిగా కొత్త దారులని తెరవడానికి దోహదం చేస్తాయి. ఈ ఫలితాలు పూర్తిగా hBN కప్పబడి ఉన్న పర్యావరణంలోని గ్రాఫీన్లో అపూర్వమైన పెద్ద స్పిన్-ఇంజెక్షన్ మరియు డిటెక్షన్ పోలరైజేషన్లను సాధించడానికి బైలేయర్- hBN టన్నెల్ బార్రియర్ల విశేషతను సూచిస్తాయి. అంతేకాకుండా, ఎక్కువ స్పిన్-నిల్వ మరియు అధిక మాగ్నెటోరెసిస్టన్స్ నిష్పత్తి యొక్క నియంత్రిత విలువలతో కూడిన రెండు-టెర్మినల్ స్పిన్-వాల్వ్ ప్రభావం అనేది, ఆచరణాత్మక గ్రాఫీన్ ఆధారిత స్పిన్ ఫీల్డ్-ఎఫెక్ట్ ట్రాన్సిస్టర్లను నిత్య జీవితం లోనికి గ్రహించే దిశలో మరింత దగ్గరగా చేస్తుంది.

ఇప్పటివరకు, మేము విద్యుత్ స్పిన్ ఇంజెక్షన్ మరియు డిటెక్షన్ కోసం ఒక బార్రియర్ లాగా ఎక్స్ఫోలియేటెడ్-hBN ని ఉపయోగించాము. ఈ పదార్థం అధిక నాణ్యతను కలిగి ఉండటమే కాకుండా దీనిని hBN స్ఫటికాల యొక్క పొరలను పలుమార్లు మోనో, ద్వి లేదా త్రై పొరల వరకు తీయడం ద్వారా సులభంగా పొందవచ్చు. అయినప్పటికీ, భవిష్యత్తు-స్థాయి అనువర్తనాల కోసం, భారీ స్థాయిలో కెమికల్ వేపర్ డిపాసిషన్ (CVD) ద్వారా పెంచిన పదార్థాలను ఉత్పత్తి చేయడం ముఖ్యం. దీనికి సంబంధించి, 7 వ అధ్యాయంలో మేము గ్రాఫీన్లో విద్యుత్ స్పిన్ ఇంజెక్షన్ ని అధ్యయనం చేయడానికి CVD చే పొర మీద పొరగా వృద్ధి చెందిన రెండు పొరలు కలిగిన hBN టన్నెల్-బార్రియర్ ని వాడుకున్నాము.

పెద్ద- విస్తీర్ణంలో CVD చే పెరిగిన hBN టన్నెల్-బార్రియర్లు కలిగిన ఫెర్రో అయస్కాంత కాంటాక్ట్స్ గురించి వివరించాము. hBN ఉపరితలంపై హై-మొబిలిటీ గ్రాఫీన్ సుదూర స్పిన్ రవాణాను చూపిస్తుందని కూడా తెలియజేశాము. 7 వ అధ్యాయంలో, ఒక hBN ఉపరితలంపై ఉన్న హై-మొబిలిటీ గ్రాఫీన్ ని సమర్థవంతమైన స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్ట్ కోసం ఒక

పెద్ద-ప్రాంతంలో రెండు-పొరల-CVD-hBN టన్నెల్ బా[్రియర్ తో కలిపే అవకాశం సాధ్యమవుతుందని కూడా నిరూపించాము.

CVD-hBN యొక్క సాంప్రదాయ తేమ బదిలీ ద్వారా గ్రాఫీన్ యొక్క నాణ్యత క్షీణించిన కారణంగా మా పరికరాల్లో తక్కువ కదలిక మరియు చిన్న స్పిన్ రిలాక్సేషన్ సమయాన్ని మేము గమనించాము. రెండు పొరల-CVD-hBN బా[్రియర్ కాంటాక్ట్స్ కి పాజిటివ్ మరియు నెగటివ్ డిఫరెన్షియల్ స్పిన్ పోలరైజేషన్ ని కూడా మేము తెలుసుకున్నాము. అంతేకాకుండా, చాప్టర్ 6 లో వివరించిన ఎక్స్ఫోలియేటెడ్-hBN బా[్రియర్ లాగా కాకుండా, స్పిన్ ధ్రువణీకరణ ± 0.3 V బయాస్ పరిధిలో తన గుర్తును మార్చుకోదు మరియు దాని పరిమాణం పెద్ద నెగటివ్ బయాస్ విలువల వల్ల మాత్రమే పెరుగుతుంది. ఈ లక్షణాలు రెండు-పొరల-CVD-hBN మరియు 6 వ అధ్యాయంలో వివరించిన బైలేయర్-ఎక్స్ఫోలియేటెడ్-hBN టన్నెల్ బా[్రియర్ల మధ్య వ్యత్యాసాన్ని ధ్రువీకరిస్తాయి.

-0.2 V బయాస్ వద్ద రెండు-పొరల-CVD-hBN బా[్రియర్లకు 15% వరకు ఉన్న పెద్ద స్పిన్ పోలరైజేషన్ విలువ, పెద్ద-విస్తీర్ణంలో స్పింట్రానిక్ అనువర్తనాలకు CVD-hBN టన్నెల్ బా[్రియర్లను ఉపయోగించుకునే సామర్థ్యాన్ని సూచిస్తుంది. అంతేకాకుండా, మేము పొందిన ఫలితాలను పరిశీలిస్తే, టన్నెల్ బా[్రియర్ యొక్క మందంతో పాటు, ఇతర పారామీటర్లు అయిన, hBN యొక్క నాణ్యత మరియు దాని రెండు మోనోలేయర్స్ యొక్క సాపేక్ష అమరిక వంటివి, స్పిన్ టన్నలింగ్ లక్షణాలను గుర్తించడంలో ముఖ్యమైన పాత్ర పోషిస్తాయి. ఈ ఫలితాలను ఆధారంగా చేసుకుని, స్పి[్ట్రానిక్స్ కమ్యూనిటీకి ముఖ్యమైన ఒక విషయాన్ని మేముప్రస్తావిస్తున్నాము. అది ఏమిటంటే CVD-hBN టన్నల్ బా[్రియర్ ద్వారా స్పిన్ ఇంజక్షన్ యొక్క ప్రాథమిక స్వభావాన్ని వివరించడం. అంతే కాకుండా దీని మూలంగా భవిష్యత్తు వాణిజ్య అనువర్తనాల కోసం పెద్ద-విస్తీర్ణ CVD-hBNను ఉపయోగించగల అవకాశాల గురించి లోతైన విషయాన్ని మేము తెలుపుతున్నాము.

ముగింపుగా, ఈ థీసిస్ లో తెలియజేసిన ఫలితాలు, గ్రాఫీన్లో స్పిన్ రవాణా మరియు hBN బా[్రియర్ల ద్వారా స్పిన్ ఇంజెక్షన్ యొక్క స్వభావాలని అవగాహన చేసుకోవటానికి వీలయ్యే దిశగా ముఖ్యమైన పురోగతులకు ప్రతీకగా నిలుస్తాయి. గ్రాఫీన్-hBN వాన్ డెర్ వాల్స్ హెటెరో[్స్ట్రక్చర్ల ఆధారంగా, ఆచరణాత్మక స్పి[్ట్రానిక్ పరికరాలు నిజరూపం దాల్చేందుకు ఎదురయ్యే సవాళ్లను అధిగమించడానికి ఈ అవగాహన ఉపయోగపడుతుంది.

గ్రాఫీన్ స్పి[్ట్రానిక్స్ లో పెరుగుతున్న ఆసక్తి నేపథ్యంలో, 8వ అధ్యాయంలో, సమర్థవంతమైన స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్ట్ మరియు సమర్థవంతమైన స్పిన్ ఇంజెక్షన్ మరియు డిటెక్షన్ కోసం అవసరమైన ఒక టన్నెల్ బా[్రియర్ కోసం, సరైన ఉపరితలాన్ని గుర్తించడం అనే కోణంలో, గ్రాఫీన్ స్పి[్ట్రానిక్స్ పరిశోధన దాని యొక్క ప్రస్తుత స్థితిని చేరుకోవడానికి చేసిన పురోగతిని మేము సమీక్షించాము. మేము గ్రాఫీన్-షట్కోణ బోరాన్ నై[్ట్రైడ్ హెటెరో[్స్ట్రక్చర్లలోని స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్టు విషయంలో ఇటీవలి స్టేట్-ఆఫ్-ది-ఆర్ట్ ఆవిష్కరణలను చర్చించటమే కాక గ్రాఫీన్లోని స్పిన్ ట్రాన్స్పోర్ట్ యొక్క నిజమైన శక్తిసామర్థ్యాలను అర్థం చేసుకొనేందుకు ఎదురయ్యే ప్రస్తుత సవాళ్ళను గుర్తించాము. స్పిన్ ఆధారిత పరికర అనువర్తనాలను గుర్తించడానికి మరియు వాటిలోని ఆసక్తికరమైన భౌతికశా[్స్త్ర సూత్రాలను అన్వేషించడం కోసం గ్రాఫీన్ తో హెటెరో[్స్ట్రక్చర్లను రూపొందించడానికి hBN లో అవసరమైన లక్షణాల మీద మేము మా దృక్కోణాలను వివరించాము.