



Ph.D. Tézisfüzet

Spin- és töltésdinamika új, alacsony dimenziós anyagokban

MÁRKUS Bence Gábor

Témavezető:

Simon Ferenc

Fizika Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest
2020

Előzmények

A modern társadalmak működéséhez elengedhetlenné vált az új technológiák kiaknázása. Ezen technológiákat az anyagtudományi alap- és alkalmazott kutatások tették elérhetővé. Egy jó példa erre az alacsony hibakonzentrációjú (egy hiba egymilliárd atomra) szilícium előállítás, mely lehetővé tette a modern félvezetőipari fejlesztéseket, ilyen mód számos eszköz az átlagemberek számára (pl. számítógépek, mobiltelefonok, orvosi diagnosztikai eszközök) is elérhetővé vált. Ezen túl a szilárdtestek alapvető jelenségeinek megértése (pl. az elektronok viselkedése) nem csak tudástárunkat bővítette, de számos új alkalmazáshoz is vezetett, például a szupravezető anyagok terén.

Bár a grafit már az ókor óta ismert, a különböző szén-alapú anyagok még számos ismeretlen újdonságot rejtenek, melynek oka a szén atomok azon különlegessége, hogy számos fajta kémiai kötést képesek létesíteni. Ilyen módon a szén nem csak az élet alapvető feltétele, de sokfajta szilárdtest-fizikai rendszer alapjai is, melyek vizsgálata a jelen dolgozat tárgya.

Az alacsony dimenziós anyagok aranykora a szén "nulla" dimenziós allotrop módosulatának, a C_{60} fullerénnek a felfedezésével kezdődött 1985-ben Kroto és társai munkássága nyomán [1]. Ez az új, a Földön természetes módon nem előforduló módosulat felfedezése hatalmas tudományos figyelmet kapott. Egy molekula, amely 60 szénatomból épül fel nem csak papíron érdekes, de számos további tudományos eredményhez vezetett. Amint kiderült, ezek a molekulák nem csak önállóan léteznek, de stabil szilárdtestbe tudnak rendeződni, valamint képesek polimerkötések kialakítására is. Alkáli fémekkel történő módosítással pedig fémes, vagy akár szupravezető tulajdonsággal (pl. Rb_3C_{60} [2]) is bírhatnak. Napjaink legkevesetgetőbb alkalmazási lehetősége, hogy készíthető belőle olyan kvantumbit, amely egyetlen molekulát tartalmaz [3].

A következő áttörést 1991 hozta el, amikor Iijima felfedezte a többfalú szén nanocsöveket [4]. Mindössze 2 év elteltével, a kutatóknak sikerült egyfalú szén nanocsöveket is előállítaniuk [5, 6]. A fizikai tulajdonságokat tekintve az anyag egydimenziósan viselkedik, melyet a sávszerkezete is tükröz [7] és az optikai spektrumban megfigyelt Van Hove szingularitások is alátámasztanak [8]. Továbbá kvantummos, ballisztikus vezetési tulajdonságok [9–11] és a Luttinger-folyadék fázis jelenléte [12] is az egydimenziós jelleget hangsúlyozza. Egy további említésre méltó jelenség ezen anyagok erősen anizotrop hővezetése [13]. Alkalmazások tekintetében a legígéretesebbek a gáztetektálás [14], hajlítható elektronikai eszközök [15], valamint energiatárolás [16].

A második dimenzióba való továbblépést Geim és Novoselov érte el 2004-ben a grafén felfedezésével [17]. A szén atomok méhsejtrácsba rendeződött variánsa épp annyira érdekes, mint a korábban említettek. A zérus effektív tömegű Dirac-fermion kvázirészecskék Dirac kúpok körüli jelenléte [18] és a szoba hőmérsékleten is megfigyelt kvantum Hall-effektus [19] csak kettő, a számos megfigyelt érdekes fizikai jelenségből. Nemrégiben a topologikus viselkedéssel és egy mágikus szögben elforgatott kétrétegű grafénben felfedezett szupravezetéssel hívta fel a figyelmet [20, 21]. Az alkalmazások széles körét sorolhatjuk, a spintronikától [22–24] és kvantuminformatikától [25] kezdve, az energiatároláson [26, 27] és gyűjtésen át [28], a gázérzékelésen [29] és a rugalmas kijelzőkön [30, 31] keresztül, egészen a fénykibocsátó eszközökig [32]. Továbbá, egy közel-múltbeli tanulmány szerint a hulladék újrahasznosításban is fontos szerephez juthat [33].

Sajnálatos módon, a harmadik dimenzió kilóg a történelmi sorrendből, hiszen a grafit már az ókori görögök idején is ismert volt. A grafit esetén sokan meg vannak győződve, hogy egy teljesen ismert anyag, ám ez korántsem igaz. Erre egy jó példa a g -faktorban és a spinrelaxációs időben megfigyelt, és a hagyományos Elliott–Yafet-elmélettel [34, 35] nem megmagyarázhatóan magas anizotrópia és anomális hőmérsékletfüggés.

Mindezek mellett a korábban említett összes anyagnak komoly hatása volt a szerves kémiára. A különböző, alacsony dimenziós szénalapú anyagok módosítása, interkalációja (adalékolása) és funkcionálizációja kiemelkedő fontosságú. A számos lehetőség közül a lítiummal és nátriummal való adalékolás a leginkább említésre méltó, hiszen a lítiumalapú energiatároló eszközökre való igény az utóbbi években erősen fokozódott. A nátrium alapú akkumulátorok is egyre ígéretesebbnek bizonyulnak [36–40], ráadásul nátrium sokkal nagyobb mennyiségben áll rendelkezésre a Földön.

Ahogy közeledünk a Moore-törvény letöréséhez, egyre több tudós és mérnök kezd el a hagyományos Turing–von Neumann számítógép-architektúra felől a spintronika és a kvantuminformatika felé fordulni. Ezekben az új architektúrákban az elektron töltése helyett annak spinjével (belső impulzusmomentum) történik a bitállapot megváltoztatása. Ennek oka, hogy míg az elektron impulzusa két ütközés között csupán $\tau \sim 10^{-12}$ másodpercig marad meg, addig a spinje sokkal gyengébben hat kölcsön a környezetével. Az így kapott spinrelaxációs idő még nem teljesen ideális esetben is $\tau_s \sim 10^{-8}$ másodperc nagyságrendű, de akár több mikroszekundum is lehet. Egy egyszerű diffúziós modellt felételezve ez 100 μm diffúziós hosszát jelent, mely elegendő egy spintronikai elven működő chip konstrukciójához. Spintronikában hagyományos bináris reprezentá-

ciót használunk, ahol egy bit értéke 0 vagy 1 lehet, de egy spintranzisztorban ("SFET") a spinek beállításával szabályozzuk az átfolyó áram nagyságát. A módszer nagyon hasonló ahhoz, ahogy a modern merevlemezek működnek, azaz az óriás mágneses ellenállás (GMR) elvéhez. Az SFET működése és koncepciója megtalálható a [41] publikációban. Ezzel szemben a kvantuminformatikában összefonódott állapotok valósulnak meg: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, ahol $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ és $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$. Ezen új architektúra új számítási műveleteket és új anyagokat igényel működéséhez. 2020-ban elmondhatjuk, hogy a kvantumkor hajnalán vagyunk, hiszen a Google nemrégiben sikeresen elérte a "kvantum áttörést" egy működőképes 53 kvantumbites chip segítségével [42].

Célkitűzések

Kutatásomat számos nyitott kérdés motiválta. A különböző allotropok alkáli atomokkal való módosulatai további vizsgálatokra szorultak, mint például, milyen töltésdinamika van a Li_4C_{60} szuperionos fullerénben? Mi az elektronikus vezetési tag eredete? Lehetséges-e grafént nagy mennyiségben előállítani elfogadható minőségben? Lehetséges-e az exfoliált grafént alkáli fémekkel interkalálni? Mik lesznek az így kapott anyagok fizikai tulajdonságai? Lehetséges-e Raman spektroszkópia és káliummal való interkalációval meghatározni az anyagban található legnagyobb rétegszámot? Elegendően nagy-e a spinrelaxációs idő ezen anyagokban, hogy spintronikai alkalmazásokba kerüljenek? Hol található a Fermi-energia ezen anyagokban?

Munkám során ezekre a kérdésekre szerettem volna választ adni. Vizsgáltam a szuperionos Li_4C_{60} vezetőképességét a mikrohullámú tartományban. Infravörös spektroszkópia és magas frekvenciás ESR (HF-ESR) mérésekkel kiegészítve arra a következtetésre jutottam, hogy az anyagban mind az elektronok, mind a lítium ionok hozzájárulnak a vezetőképességhez a polimer fázisban. A vezetőképességet 125 K alatt a hibahelyek miatt jelenlévő, alacsony koncentrációjú, alagutazó elektronok dominálják. Ezt a HF-ESR eredmények is alátámasztják. Ezen kívül megfigyeltem a polimerkötések reverzibilis felbomlását 410 K felett.

Továbbfejlesztettem a folyékony ammóniás dópolási módszert, hogy káliummal dópolat egyfalú szénnanocsöveket (SWCNT) állítsak elő. Az így kapott mintákat összehasonlítottuk a gőzfázisú előkészítésben kapott mintákkal. Mindkét fajta mintában jelentős töltésátvitelt figyeltem meg, de az ammóniás módszerrel előállított minta esetén a dópolás teljesebbnek bizonyult Raman-spektroszkópia mérések alapján. ESR mérésekben egy új, úgynevezett Dyson-i jelalakot követő vonalat figyeltem meg, mely a

vezetési elektronok jelenlétére utal és hogy az anyag Fermi-folyadéként viselkedik. Hőmérsékletfüggő mérések segítségével bizonyítottuk, hogy a minták fémesen viselkednek, valamint meghatároztuk az állapotsűrűséget. Ebben a tekintetben az anyag jól modellezi a feszültség alá helyezett grafént. Ezen kívül készítettem *in situ* ellenállásmérést is, mely során az ellenállás folyamatos követésében megfigyelhető a félvezető-fém átalakulás.

Vizsgáltam a három, különböző mechanikai megmunkálással készült folyadék fázisban exfoliált grafén rezgési tulajdonságait. Az így kapott Raman-spektroszkópai eredményeket felhasználva azonosítottam, hogy az ultrahangos készítés biztosítja a legjobb minőséget. Ezt ESR mérések segítségével is igazoltam. Ezt követően *in situ* Raman-spektroszkópiával vizsgáltam a káliummal való érintkezés hatását. Egy kettéhasadt G módot figyeltem meg a köztes lépésekben, míg a végső interkalációs lépésben egy C_z és egy széles Breit–Wigner–Fano (BWF) módot figyeltem meg. Mindkét módus a sikeres interkalációról tanúskodik, valamint az elektronok átvitelét a hatszöges szénrácsra. A G és 2D módusok köztes lépésekben való vizsgálatával felállítottam egy modellt, hogy az anyag milyen lépésekben válik töltötté. Ez alapján javasoltam egy protokollt, melyben kizárólag Raman-spektroszkópia használatával, káliummal való dópolás során hogyan határozható meg a legnagyobb rétegszám egy párrétegű grafén mintában.

Optimizáltam a folyékony ammóniás módszert a párrétegű grafén esetére, hogy lítiummal és nátriummal tudjam dópolni. A készített minták színe jelentősen eltér a kiinduló anyagétól, és a Raman-spektrumok is sikeres töltésátvitelről árulkodnak. Termodinamikai megfontolások segítségével arra jutottam, hogy a nátrium szelektíven csak az egyrétegű grafén szemcséket dópolja. A mintákat ESR méréseknek alávetve megerősítettem az új vezetési elektronok jelenlétét, melyek állapotsűrűségét is meghatároztam a Pauli-szuszeptibilitásukból. További számolásokból azt kaptam, hogy a Fermi-energia mintegy 1 elektronvolttal el van tolódva mindkét anyagban. Az ESR vonalszélességből meghatároztam a spinrelaxációs időt és azt találtam, hogy az nagyságrendileg 10 ns, mely elegendő a spintronikai alkalmazásokhoz.

Új tudományos eredmények

1. Vizsgáltam a Li_4C_{60} szuperionos fullerid elektromos és ionos vezetőképességét. Mikrohullámú ellenállásmérést végeztem egy széles, 40 – 530 kelvines hőmérsékleti tartományban, melyhez egy cseppfolyós héliummal hűtött és egy nitrogénnel hűtött/fűtött mérési el-

rendezést használtam. Megfigyeltem a polimer-monomer fázisátalakulást 410 K-en, valamint megfigyeltem, hogy alacsony hőmérsékleten mind a lítium ionok, mind az elektronok hozzájárulnak a vezetőképességhez. Korábbi eredményekkel egyezően azt tapasztaltam, hogy a lítium-ionok mozgása 125 K-en kifagy. Mindkét töltéshordozófajta meghatározta az aktiválási energiájukat. Nagyterű ESR, ^7Li NMR és kaloriméteres mérések eredményeit felhasználva arra a következtetésre jutottam, hogy az elektronikus vezetési tag a kis mértékben jelenlévő, töltött hibahelyektől származik. Bizonyítottam továbbá, hogy a monomer fázis vezetőképessége jelentősen magasabb, mint a polimerfázisé. Az eredményeket a [T1] jelzésű publikációban közöltük.

2. Folyékony ammóniás módszer segítségével káliummal dópolt egyfalú szénnanocsöveket állítottam elő. Raman-spektroszkópia mérések analízise során azt találtam, hogy a csövek erősen töltötté válnak, fémes viselkedést mutatnak, melyeket a széles Fano-módus jelenlétéből állapítottam meg. Szobahőmérsékletű ESR méréseket végeztem és egy új, a vezetési elektronokhoz tartozó vonalat figyeltem meg. A fémes viselkedés további alátámasztására mikrohullámú ellenállásmérést végeztem a mintákon és megállapítottam, hogy az anyag fémesen viselkedik. A félvezető-fém átalakulást dópolás hastátására *in situ* ellenállásméréssel folyamatosan is nyomon követtem. Az eredményeket a [T2, T3] jelzésű publikációkban közöltük.
3. Különböző mechanikai megmunkálással készített kémiaiilag exfoliált párrétegű grafén mintákat vizsgáltam Raman- és ESR-spektroszkópiával, valamint mikrohullámú ellenállásméréssel. Megfigyeltem, hogy a minták rezgési spektruma számottevően eltér a kiindulási grafit portól. A Raman-spektrumban megfigyeltem a szokásos D, G és 2D módusokat. A G módus nincs felhasadva az anyagokban, viszont a 2D igen. Utóbbiból arra következtettem, hogy az anyag egy- és párrétegű grafént is tartalmaz, melyet AFM mérések is megerősítettek. ESR mérések végzése során azt tapasztaltam, hogy a mintában találhatóak töltéshordozók, melyek g -faktora nagyobb, mint a szabad elektroné, így gyenge lyuk típusú vezető jelleget mutatnak, melyet vélhetően a maradék oldószer okoz. Mikrohullámú ellenállásmérés során arra jutottam, hogy a mikrohullámú veszteséget leginkább a szemcseméret határozza meg. Minden vizsgálati módszert figyelembe véve azt a megállapítást tettem, hogy az ultrahangos megmunkálás eredményezi a

legjobb minőséget. Az eredményeket a [T4] jelzésű publikációban közzeltük.

4. *In situ* interkalációs vizsgálatot végeztem káliummal a párrétegű grafén mintákon és a Raman-spektrum jelentős változását figyeltem meg. Az első lépésekben figyeltem a G-módus felhasadását, valamint a dublett 2D módust. Feljegyeztem a D módus gyors eltűnését dópolás hatására. A teljesen interkalált mintában figyeltem a C_z módust, valamint egy Fano-módust 1505 cm^{-1} -nél. Ezen két módus jelenlétéből arra következtettem, hogy a káliumatomokból kialakult egy rendezett rács, valamint, hogy a párrétegű grafén töltötté vált. Kiszámoltam az elektron-fonon csatolást és azt találtam, hogy a töltésátvitel magasabb, mint a káliummal dópolt grafit esetén. A köztes lépésekben, a G és 2D módus analízise segítségével felállítottam egy modellt, hogy egy többrétegű keverék anyag hogyan interkalálódik. Ezen tapasztalatokat felhasználva javasoltam egy eljárást a legnagyobb rétegszám meghatározására. Az eredményeket a [T5] jelzésű publikációban közzeltük.
5. Alkalmaztam és optimalizáltam a folyékony ammóniás dópolási módszert a párrétegű grafén esetére. Vizsgáltam a lehetséges mellékreakciókat és sikerült ezen utakat felfüggeszteni az előállítás során. Utóbbi az alkáli amidokra és imidekre jellemző Raman- és ESR-spektrumbeli csúcsok hiánya igazolta. A kifejlesztett módszert a [T6] jelzésű publikáció tartalmazza. A módszer segítségével sikeresen állítottam elő lítium és nátriummal interkalált párrétegű grafént. Az interkaláció sikerességét optikai mikroszkóp és Raman-spektroszkópia segítségével igazoltam. A Raman-spektrum alapján megállapítottam, hogy a töltésátvitel számottevő, melyet egy, a G módus helyén lévő Fano-módus jelez. Az spektrumok analízise során meghatároztam az elektron-fonon csatolási állandót, melynek nagysága arányos az átvitt töltés mennyiségével és megállapítottam, hogy ez a LiC_6 grafittal összemérhető. Mivel a grafit nátriummal nem képez stabil rendszert (normál körülmények között), arra a következtetésre jutottam, hogy kizárólag az egyrétegű grafén szemcsék interkalálódnak és a módszer alkalmas annak meghatározására, hogy a mintában található-e egyrétegű grafén. A töltésátviteli ESR mérések segítségével is igazoltam. Hőmérsékletfüggő méréseket végeztem annak érdekében, hogy megmutassam, hogy a vizsgált rendszerekben található Pauli-szuszeptibilitást követő, mobilis elektron. Egy egyszerű modell segítségével megbecsültem az állapotsűrűséget és a Fermi-energia eltolódását mindkét anyagban.

Az utóbbi értékre 1.1 eV-ot találtam, ami nagyobb, mint a LiC_6 -ban megfigyelt érték. Az ESR vonalszélességből kiszámoltam a spinrelaxációs időket és azt találtam, hogy a kapott érték átlagosan egy nagyságrenddel magasabb, mint a grafénen végzett mérések, ezért elmondhatjuk, hogy ezen rendszerek *ultrahosszú* spin relaxációs idővel rendelkeznek. Eredményeim alapján ezen anyagok alkalmazások lehetnek spintronikai vagy energia tárolási alkalmazásokra. Az eredményeket a [T7] jelzésű publikációban közzéltük.

Tudományos közlemények

- [T1] D. Quintavalle, **B. G. Márkus**, A. Jánossy, F. Simon, G. Klupp, M. A. Györi, K. Kamarás, G. Magnani, D. Pontiroli, and M. Riccò, „Electronic and ionic conductivities in superionic Li_4C_{60} ,” *Physical Review B*, vol. **93**, no. 20, p. 205103, 2016.
- [T2] P. Szirmai[†], **B. G. Márkus**[†], B. Dóra, G. Fábián, J. Koltai, V. Zólyomi, J. Kürti, B. Náfrádi, L. Forró, T. Pichler, and F. Simon, „Doped carbon nanotubes as a model system of biased graphene,” *Physical Review B*, vol. **96**, no. 7, p. 075133, 2017, [†]: equal author contribution.
- [T3] **B. G. Márkus**, G. Csősz, O. Sági, B. Gyüre-Garami, V. Lloret, S. Wild, G. Abellán, N. M. Nemes, G. Klupp, K. Kamarás, A. Hirsch, F. Hauke, and F. Simon, „Electronic Properties of Air-Sensitive Nanomaterials Probed with Microwave Impedance Measurements,” *Physica Status Solidi B*, vol. **255**, no. 12, p. 1800250, 2018.
- [T4] **B. G. Márkus**, F. Simon, J. C. Chacón-Torres, S. Reich, P. Szirmai, B. Náfrádi, L. Forró, T. Pichler, P. Vecera, F. Hauke, and A. Hirsch, „Transport, magnetic and vibrational properties of chemically exfoliated few-layer graphene,” *Physica Status Solidi B*, vol. **252**, no. 11, pp. 2438–2443, 2015.
- [T5] P. Szirmai[†], **B. G. Márkus**[†], J. C. Chacón-Torres, P. Eckerlein, K. Edelhalthammer, J. M. Englert, U. Mundloch, A. Hirsch, F. Hauke, B. Náfrádi, L. Forró, C. Kramberger, T. Pichler, and F. Simon, „Characterizing the maximum number of layers in chemically exfoliated graphene,” *Scientific Reports*, vol. **9**, p. 19480, 2019, [†]: equal author contribution.
- [T6] **B. G. Márkus**, P. Szirmai, S. Kollarics, B. Náfrádi, L. Forró, J. C. Chacón-Torres, T. Pichler, and F. Simon, „Improved alkali intercala-

tion of carbonaceous materials in ammonia solution,” *Physica Status Solidi B*, vol. **256**, no. 12, p. 1900324, 2019.

- [T7] **B. G. Márkus**, P. Szirmai, K. Edlthhammer, P. Eckerlein, A. Hirsch, F. Hauke, N. M. Nemes, J. C. Chacón-Torres, B. Náfrádi, L. Forró, T. Pichler, and F. Simon, „Ultralong spin lifetime in light alkali atom doped graphene,” *ACS Nano*, 2020, *közlésre elfogadva, megjelenés alatt*.

Hivatkozások

- [1] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O’Brien, R. F. Cmisc, and R. E. Smalley, „C₆₀: Buckminsterfullerene,” *Nature*, vol. **318**, pp. 162–163, 1985.
- [2] A. Jánossy, O. Chauvet, S. Pekker, J. R. Cooper, and L. Forró, „Conduction electron spin resonance in Rb₃C₆₀,” *Physical Review Letters*, vol. **71**, no. 7, pp. 1091–1094, 1993.
- [3] J. J. L. Morton, A. M. Tyryshkin, A. Ardavan, S. C. Benjamin, K. Porfyrakis, S. A. Lyon, and G. A. D. Briggs, „Bang-bang control of fullerene qubits using ultrafast phase gates,” *Nature Physics*, vol. **2**, pp. 40–43, 2005.
- [4] S. Iijima, „Helical microtubules of graphitic carbon,” *Nature*, vol. **354**, pp. 56–58, 1991.
- [5] S. Iijima and T. Ichihashi, „Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter,” *Nature*, vol. **363**, pp. 603–605, 1993.
- [6] D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. DeVries, G. Gorman, R. Savoy, and R. Beyers, „Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls,” *Nature*, vol. **363**, p. 605, 1993.
- [7] N. Hamada, S. Sawada, and A. Oshiyama, „New one-dimensional conductors: Graphitic microtubules,” *Physical Review Letters*, vol. **68**, no. 10, pp. 1579–1581, 1992.
- [8] H. Kataura, Y. Kumazawa, Y. Maniwa, I. Umezu, S. Suzuki, Y. Ohtsuka, and Y. Achiba, „Optical properties of single-wall carbon nanotubes,” *Synthetic Metals*, vol. **103**, no. 1–3, pp. 2555–2558, 1999.
- [9] S. J. Tans, M. H. Devoret, H. Dai, A. Thess, R. E. Smalley, L. J. Geerligs, and C. Dekker, „Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires,” *Nature*, vol. **386**, pp. 474–477, 1997.
- [10] A. Bezryadin, A. R. M. Verschueren, S. J. Tans, and C. Dekker, „Multiprobe Transport Experiments on Individual Single-Wall Carbon Nanotubes,” *Physical Review Letters*, vol. **80**, pp. 4036–4039, 1998.

- [11] S. J. Tans, A. R. M. Verschueren, and C. Dekker, „Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube,” *Nature*, vol. **393**, pp. 49–52, 1998.
- [12] H. Ishii, H. Kataura, H. Shiozawa, H. Yoshioka, H. Otsubo, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, M. Nakatake, T. Narimura, M. Higashiguchi, K. Shimada, H. Namatame, and M. Taniguchi, „Direct observation of Tomonaga–Luttinger-liquid state in carbon nanotubes at low temperatures,” *Nature*, vol. **426**, pp. 540–544, 2003.
- [13] J. E. Fischer, W. Zhou, J. Vavro, M. C. Llaguno, C. Guthy, and R. Haggenmueller, „Magnetically aligned single wall carbon nanotube films: Preferred orientation and anisotropic transport properties,” *Journal of Applied Physics*, vol. **93**, no. 4, pp. 2157–2163, 2003.
- [14] K. G. Ong, K. Zeng, and C. A. Grimes, „A Wireless, Passive Carbon Nanotube-Based Gas Sensor,” *IEEE Sensors Journal*, vol. **2**, no. 2, pp. 82–88, 2002.
- [15] S. Hong and S. Myung, „A flexible approach to mobility,” *Nature Nanotechnology*, vol. **2**, pp. 207–208, 2007.
- [16] S. W. Lee, N. Yabuuchi, B. M. Gallant, S. Chen, B.-S. Kim, P. T. Hammond, and Y. Shao-Horn, „High-power lithium batteries from functionalized carbon-nanotube electrodes,” *Nature Nanotechnology*, vol. **5**, pp. 531–537, 2010.
- [17] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, „Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films,” *Science*, vol. **306**, no. 5696, pp. 666–669, 2004.
- [18] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, „Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene,” *Nature*, vol. **438**, pp. 197–200, 2005.
- [19] K. S. Novoselov, Z. Jiang, Y. Zhang, S. V. Morozov, H. L. Stormer, U. Zeitler, J. C. Maan, G. S. Boebinger, P. Kim, and A. K. Geim, „Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene,” *Science*, vol. **315**, no. 5817, p. 1379, 2007.
- [20] C. Xu and L. Balents, „Topological Superconductivity in Twisted Multilayer Graphene,” *Physical Review Letters*, vol. **121**, no. 8, p. 087001, 2018.
- [21] B. Dóra, „Topological Superconductivity Could be a Twist Away,” *Physics*, vol. **11**, p. 84, 2018.
- [22] N. Tombros, C. Jozsa, M. Popinciuc, H. T. Jonkman, and B. J. van Wees, „Electronic spin transport and spin precession in single graphene layers at room temperature,” *Nature*, vol. **448**, pp. 571–574, 2007.

- [23] W. Han, K. Pi, K. M. McCreary, Y. Li, J. J. I. Wong, A. G. Swartz, and R. K. Kawakami, „Tunneling Spin Injection into Single Layer Graphene,” *Physical Review Letters*, vol. **105**, no. 16, p. 167202, 2010.
- [24] L. A. Benítez, J. F. Sierra, W. S. Torres, A. Arrighi, F. Bonell, and M. V. C. S. O. Valenzuela, „Strongly anisotropic spin relaxation in graphene–transition metal dichalcogenide heterostructures at room temperature,” *Nature Physics*, vol. **14**, pp. 303–308, 2017.
- [25] B. Trauzettel, D. V. Bulaev, D. Loss, and G. Burkard, „Spin qubits in graphene quantum dots,” *Nature Physics*, vol. **3**, pp. 192–196, 2007.
- [26] C.-T. Chien, P. Hiralal, D.-Y. Wang, I.-S. Huang, C.-C. Chen, C.-W. Chen, and G. A. J. Amaratunga, „Graphene-Based Integrated Photovoltaic Energy Harvesting/Storage Device,” *Small*, vol. **11**, no. 24, pp. 2929–2937, 2015.
- [27] J. Wang, Z. Shen, and M. Yi, „Liquid-exfoliated graphene as highly efficient conductive additives for cathodes in lithium ion batteries,” *Carbon*, vol. **153**, pp. 156–163, 2019.
- [28] C. X. Guo, H. B. Yang, Z. M. Sheng, Z. S. Lu, Q. L. Song, and C. M. Li, „Layered Graphene/Quantum Dots for Photovoltaic Devices,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. **49**, no. 17, pp. 3014–3017, 2010.
- [29] H. Peng, F. Li, Z. Hua, K. Yang, F. Yin, and W. Yuan, „Highly sensitive and selective room-temperature nitrogen dioxide sensors based on porous graphene,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. **275**, pp. 78–85, 2018.
- [30] S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. Xu, J.-S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H. R. Kim, Y. I. Song, Y.-J. Kim, K. S. Kim, B. Özyilmaz, J.-H. Ahn, B. H. Hong, and S. Iijima, „Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes,” *Nature Nanotechnology*, vol. **5**, pp. 574–578, 2010.
- [31] Y. Zhu, Z. Sun, Z. Yan, Z. Jin, and J. M. Tour, „Rational Design of Hybrid Graphene Films for High-Performance Transparent Electrodes,” *ACS Nano*, vol. **5**, no. 8, pp. 6472–6479, 2011.
- [32] T.-H. Han, Y. Lee, M.-R. Choi, S.-H. Woo, S.-H. Bae, B. H. Hong, J.-H. Ahn, and T.-W. Lee, „Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode,” *Nature Photonics*, vol. **6**, pp. 105–110, 2012.
- [33] D. X. Luong, K. V. Bets, W. A. Algozeeb, M. G. Stanford, C. Kittrell, W. Chen, R. V. Salvatierra, M. Ren, E. A. McHugh, P. A. Advincula, Z. Wang, M. Bhatt, H. Guo, V. Mancevski, R. Shahsavari, B. I. Yakobson, and J. M. Tour, „Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis,” *Nature*, vol. **577**, pp. 647–651, 2020.

- [34] R. J. Elliott, „Theory of the Effect of Spin-Orbit Coupling on Magnetic Resonance in Some Semiconductors,” *Physical Review*, vol. **96**, no. 2, pp. 266–279, 1954.
- [35] Y. Yafet, „g-Factors and Spin-Lattice Relaxation of Conduction Electrons,” *Solid State Physics*, vol. **14**, pp. 1–98, 1963.
- [36] G. Wang, X. Shen, J. Yao, and J. Park, „Graphene nanosheets for enhanced lithium storage in lithium ion batteries,” *Carbon*, vol. **47**, pp. 2049–2053, 2013.
- [37] X. Yang, C. Cheng, Y. Wang, L. Qiu, and D. Li, „Liquid-Mediated Dense Integration of Graphene Materials for Compact Capacitive Energy Storage,” *Science*, vol. **341**, no. 6145, pp. 534–537, 2013.
- [38] M. Medarde, M. Mena, J. L. Gavilano, E. Pomjakushina, J. Sugiyama, K. Kamazawa, V. Y. Pomjakushin, D. Sheptyakov, B. Batlogg, H. R. Ott, M. Månsson, and F. Juranyi, „1D to 2D Na⁺ Ion Diffusion Inherently Linked to Structural Transitions in Na_{0.7}CoO₂,” *Physical Review Letters*, vol. **110**, no. 26, p. 266401, 2013.
- [39] P. Barpanda, G. Oyama, S. ichi Nishimura, S.-C. Chung, and A. Yamada, „A 3.8-V earth-abundant sodium battery electrode,” *Nature Communication*, vol. **5**, p. 4358, 2014.
- [40] W. Tian, S. Zhang, C. Huo, D. Zhu, Q. Li, L. Wang, X. Ren, L. Xie, S. Guo, P. K. Chu, H. Zeng, and K. Huo, „Few-Layer Antimonene: Anisotropic Expansion and Reversible Crystalline-Phase Evolution Enable Large-Capacity and Long-Life Na-Ion Batteries,” *ACS Nano*, vol. **12**, no. 2, pp. 1887–1893, 2018.
- [41] I. Žutić, J. Fabian, and S. Das Sarma, „Spintronics: Fundamentals and applications,” *Reviews of Modern Physics*, vol. **76**, no. 2, pp. 323–410, 2004.
- [42] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F. G. S. L. Brandao, D. A. Buell, B. Burkett, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, R. Collins, W. Courtney, A. Dunsworth, E. Farhi, B. Foxen, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, R. Graff, K. Guerin, S. Habegger, M. P. Harrigan, M. J. Hartmann, A. Ho, M. Hoffmann, T. Huang, T. S. Humble, S. V. Isakov, E. Jeffrey, Z. Jiang, D. Kafri, K. Kechedzhi, J. Kelly, P. V. Klimov, S. Knysh, A. Korotkov, F. Kostritsa, D. Landhuis, M. Lindmark, E. Lucero, D. Lyakh, S. Mandrà, J. R. McClean, M. McEwen, A. Megrant, X. Mi, K. Michielsen, M. Mohseni, J. Mutus, O. Naaman, M. Neeley, C. Neill, M. Y. Niu, E. Ostby, A. Petukhov, J. C. Platt, C. Quintana, E. G. Rieffel, P. Roushan, N. C. Rubin, D. Sank, K. J. Satzinger, V. Smelyanskiy, K. J. Sung, M. D. Trevithick, A. Vainsencher, B. Villalonga, T. White, Z. J. Yao, P. Yeh, A. Zalcman, H. Neven, and J. M. Martinis, „Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” *Nature*, vol. **574**, pp. 505–510, 2019.