



 SIO GRAFEN

# Konferensrapport från Graphene 2017

Barcelona

Johan Ek Weis

2017-04-21

Med stöd från:



STRATEGISKA  
INNOVATIONS-  
PROGRAM

## **Sammanfattning**

- Grafenutvecklingen går ungefär som förväntat. Det går framåt men det tar tid för nya material att etablera sig.
- Fler och fler produkter kommer ut på marknaden och det finns även mycket kvar för akademien att utforska.
- Många grafenproducenter ökar sin produktion och tillgången på pellets/granulat med grafen ökar. Detta både underlättar produktionen och minskar eventuella hälsorisker.
- Det poängterades att det är viktigt med samarbeten.
- Kvaliteten på grafenet är viktig. Det behöver inte vara den allra högsta kvaliteten för alla tillämpningar, men det är viktigt att veta vad man har. Det är därmed väsentligt med karakterisering av grafenet.

**Innehåll:**

Introduktion .....	4
Grafenproduktion .....	6
Kemisk ångdeponering (CVD) .....	7
Flagor .....	9
Membran och filter .....	11
Kompositer .....	12
Elektronik .....	13
Flexibla skärmar/elektronik osv .....	15
Spinntronic .....	17
Energi .....	17
2D material till rymden? .....	18
Blandade diskussioner kring vad som behövs för att grafenområdet ska fortsätta utvecklas ..	19

## Introduktion

Konferensen *Graphene 2017* ingår i en av de största konferensserierna i Europa med fokus på grafen. Den andra är *Graphene Week-serien* som anordnas av Graphene Flagship. Båda serierna utgår från akademikers/forskares synvinkel, men *Graphene 2017* är mer fokuserad mot tillämpningar/produkter och företag. Under konferensen var två parallella spår med presentationer i sammanlagt 3 heldagar var helt dedikerade åt ett industriellt forum och över 55 organisationer hade utställningar. Detta är en klar ökning jämfört med förra året då det industriella forumet pågick i en dag och omkring 40 organisationer hade utställningar.

916 personer från 48 olika länder hade anmält sig och det var ungefär 250 muntliga presentationer och cirka 400 posterpresentationer. Det var upp till sju parallella spår under konferensen. Kommentarer och lärdomar nedan är därför inte heltäckande, utan representerar de delar som besöktes. Två av talarna kom från Sverige (Saroj Dash från Chalmers och Ivan Shteplyuk från Linköpings universitet), 3 posters presenterades av Valentina Cantatore från Chalmers, Yuanyuan Han från Uppsala universitet, Volodymyr Vlad Khranovskyy från Linköpings universitet och Venkata Raghu Mokkaapati från Chalmers.

En nackdel med konferensen är den korta tiden som är avsatt för posterpresentationer. Det gör att det kan vara svårt att hinna diskutera med posterpresentatörerna. I övrigt fungerade det mesta bra.

Schema, deltagarlista och lite övrig information finns på konferensens hemsida:

<http://www.grapheneconf.com/2017/index.php>

Stämningen på konferensen var god med många bra diskussioner och stora förhoppningar för framtiden. Vi alla märkte av saknaden av Mildred Dresselhaus, oftast kallad Millie eller ”the queen of carbon”, som tyvärr gick bort en dryg månad innan konferensen, vid 86 års ålder. Millie var en stor förebild och hon gjorde många framstående bidrag till utvecklingen av nanoteknologi baserad på kolmaterial (fullerener, kolnanorör och grafen).

Vikten av samarbeten mellan olika företag, institut och universitet påpekades flera gånger och vikten av samarbeten mellan personer från olika bakgrund. Park från Samsung berättade att hans grupp har en ganska jämn fördelning av fysiker, kemister, materialvetare, elektronikingenjörer och kemiingenjörer.

Ghaffarzadeh (IDTechEx) poängterade att även om det rapporterats många fantastiska egenskaper hos grafen så spelar dessa faktiskt ingen som helst roll, utan det är egenskaperna i slutprodukten som är viktiga. Även om det inte finns någon "killer application" ännu, är han övertygad om att grafen kommer slå igenom eftersom det finns en så stor och bred potential med väldigt många tillämpningar som närmar sig marknaden. Han är inte orolig över att reproducerbarheten är en utmaning i dagsläget, utan tycker att detta är förväntat för ett nytt material. Det kommer lösas, priserna kommer att gå ner och marknaden kommer att växa oavsett om en "killer application" dyker upp eller inte.

Ferrari (University of Cambridge) tycker att utvecklingen går precis som förväntat. Graphene Flagship tog fram en roadmap för omkring 3 år sedan och det har visat sig att utvecklingen följer roadmappen väldigt bra. Han poängterade igen att utveckling tar tid. Det tog 30 år från det att kolfiber först visades i en demonstrator i en bil tills en produkt kom ut på marknaden. Han tror att grafentillämpningar inom 5G är en potentiell "killer application".

Park från Samsung framhöll att det brukar ta en ny teknologi omkring 20 år att gå från labbet till kommersiella produkter. Det diskuterades även när nollpunkten i en sådan tidsberäkning börjar. Är det från 2004 när arbetet som senare gav Nobelpriset gjordes, från 2009 när CVD-processen utvecklades för grafen eller från 2014 när grafenflagor började massproduceras?

Borek-Donten (Stat Peel AG) berättade om vikten av kontroll av exponeringen av nanomaterial, inklusive grafen. Rekommenderade gränsvärden för exponering av nanomaterial är idag baserade på vad som går att mäta och inte på toxikologi. Det finns idag inga genomarbetade rekommendationer för grafen, men mer data kommer. De arbetar på att utveckla en produkt för att mäta mängden grafen i luften på arbetsplatser som använder grafen.

## Grafenproduktion

Grafen tillverkas i många olika former och kvaliteter. Den absolut bästa kvaliteten går än så länge endast att tillverka i väldigt små volymer och till förhållandevis hög kostnad, medan de billigaste grafenflagorna inte har en alls lika hög kvalitet. De olika produkterna är lämpade för olika marknader och det skulle mycket väl kunna bli så att det är grafen med låg kvalitet (som vissa inte ens skulle kalla för grafen) som kommer ha den största effekten på samhället.

Ligi från GNEXT drog en parallell till bilindustrin där den absolut bästa kvaliteten återfinns i konceptbilar, som knappt används utan mest visas upp på mässor. Sen kommer sportbilar som finns på vägarna men i små volymer, detta motsvarar CVD grafen menade han. Grafenflagor motsvaras av små enkla bilar som de flesta äger. Den globala marknaden för dessa bilar är betydligt större än den för sport- eller konceptbilar. Situationen skulle kunna bli likadan för grafenflagor, CVD-grafen och ”perfekt” grafen. Ligi sa också att trots att de fokuserar på grafenflagor så är det enligt honom endast CVD-grafen som är riktig grafen.

Zurutuza från Graphenea berättade att de precis uppgraderat sina lokaler med ett renrum, ett system för CVD-tillverkning i 8-tumsskala och kan nu producera GO i omkring 1 ton/år. De planerar att uppgradera detta ytterligare den närmaste tiden till en kapacitet på 150 ton GO per år. De uppger att priserna samtidigt sjunker snabbt. Fram tills 2014 var kostnaden för GO 89 €/g. 2016 uppgraderade de sina maskiner och kunde sänka priserna till 19 €/g. Nu är kostnaden nere i omkring 2 €/g för att minska till omkring 0,15 €/g inom ett par år. Motsvarande siffror för CVD-grafen var 310 \$/cm<sup>2</sup> fram till 2012, sedan började de kunna producera fyrtumswafers och kunde sänka priserna till 5 \$/cm<sup>2</sup>. Med uppgraderingen till åttatumswaferskan priserna sänkas till under 0,8 \$/cm<sup>2</sup> och de uppger att de planerar att producera 12-tumswafers vilket kommer sänka priserna till under 0,25 \$/cm<sup>2</sup>.

Bonaccorso (Istituto Italiano di Tecnologia) och Gonzales (GrapheneTech) definierade kvalitet som reproducerbarhet. GNEXT bryr sig inte om hur många lager de producerar och så vidare, utan fokuserar på att alltid få identiska egenskaper (till exempel ytresistans).

Det har teoretiskt visats att det finns över 2000 olika 2D-material. Det har arbetats allra mest med grafen, medan andra vanliga 2D-material är hBN och MoS<sub>2</sub>. Andra mer exotiska enlagersmaterial som undersöks inkluderar NbSe<sub>2</sub>, InSe, FeSe och ”fosforen”.

Andre Geim berättade att de till och med har studerat 2D-egenskaperna av ”ingenting”. De tog alltså bort ett grafenlager från grafit och studerade hålrummet. Strukturen användes främst för att studera nanofluidik, hur gaser och vatten beter sig i så små hålrum.

### **Kemisk ångdeponering (CVD)**

Tekniken att tillverka grafen med kemisk ångdeponering (CVD) används mycket inom akademien. Förståelsen och kontrollen förbättras kontinuerligt, både i termer av kvalitet och för massproduktion. Det är viktigt att maximera kornstorleken för att maximera grafenets egenskaper och minimera antalet defekter. En viktig faktor i detta är att begränsa antalet korn som bildas på kopparfolien, så att de som bildas kan växa sig stora istället för att det bildas många små korn. Kopparfolien måste därför förbehandlas för att ta bort kolkontamination från ytan som annars leder till ökad nukleation av grafenkorn. Syre hjälper också till att ta bort kontamination från kopparn. Ytan bör poleras för att göra ytan så jämn som möjligt. Det har tidigare visats att väldigt stora grafenkorn kan växas på till exempel germanium och nu visades nästan lika stora även på koppar (vilket är den vanligaste metallen för grafitillverkning med CVD). 4 mm stora korn uppgavs ta omkring 8 timmar att tillverka och att sammanfoga dem till en heltäckande film tar ännu längre tid. Det diskuterades att det inte behövs göras större korn för de flesta tillämpningarna eftersom komponenterna är så små jämfört med kornen. Risken att korngränsen hamnar i en komponent är så små att det är viktigare att minimera tillverkningstiden och därmed kostnaden. En reduktion av risken för korngräns i en vanlig komponent från 0,8 % till 0,3 % innebär en ökad tillverkningstid på 15 timmar, vilket blir väldigt dyrt (Braeuninger, University of Cambridge ).

Ett problem med 2D-material är att kopplingen till substratet bara beror på Van der Waals bindningar. Dessa är svaga och det finns därmed en risk att 2D-materialet släpper från ytan på grund av att vatten kommer in mellan lagren. Huyghebaert från IMEC berättade därför om vikten att minimera alla våta steg i tillverkningen och att det är väldigt viktigt att kapsla in (oftast i h-BN) 2D-materialen så snabbt som möjligt. De upptäckte även att risken är mindre för små areor av 2D-material och rekommenderar därför att man mönstrar grafenet direkt innan andra processteg tas. Han berättade att de är tveksamma till att använda kopparfolie för tillverkning av grafen eftersom folien alltid kommer att vara ojämn. Han tror mer på att växa tunna lager av koppar på till exempel safir för att sedan tillverka grafen på detta.

Graphene Square uppgav att de kan producera CVD-grafen med en bredd på 200 mm i en takt på 500 mm/min. En viktig del i tillverkningen av CVD-grafen är överföringen från metallen till slutprodukten. I tidiga försök inom akademien etsades metallen bort, men nu utvecklas flera torra tekniker där metallen även kan återanvändas. Oftast överförs grafenet från metallen till en polymer eller tejp som ett mellansteg innan det appliceras på slutprodukten. Polymeren kan sedan avlägsnas med ett lösningsmedel. Nyare, torra tekniker använder istället tejper där polymeren avlägsnas med UV-strålning, värme eller tryck/kontakt (Hong, Seoul National University och Graphene square).

Shi (Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences) berättade om deras massproduktion av CVD-grafen. De har massproducerat grafen sedan 2013 och håller nu på att bygga den 3:e generationens utrustning. Det kommer bli en 40 meter lång maskin som gör allt från råvara till grafen överförd på olika material. Deras fokus ligger på tillverkning av genomskinliga, flexibla och ledande filmer med olika specifika tillämpningar. De uppger specifikationer såsom en ytresistans under  $200 \Omega/\square$ , över 97 % transmittans, böjradie på under 10 mm, god kemisk stabilitet och en standardstorlek på 300 mm x 300 mm med möjlighet till produktion i rulle-till-rulle-format. De berättade att ett av deras problem är att de inte vet vad de ska göra av allt grafen de producerar. Användare vet inte hur de kan använda det eller vad de kan göra med materialet.

Det går även att tillverka h-BN och MoS<sub>2</sub> med kemisk ångdeponering. Utvecklingen har inte kommit alls lika långt som för grafen, men Chang (Oxford Materials) berättade om deras framsteg. Strupinski (Institute of Electronic Materials Technology) berättade om deras utveckling av tillverkning av h-BN. De tror att det tar 1-2 år innan tekniken är kommersiell. Det är en fundamental utmaning att tillverka stora kristaller av h-BN, men tekniken kan möjliggöra vissa tillämpningar. Det poängterades att det är viktigt att definiera specifikationer för att kunna diskutera specifika tillämpningar.

Giesbers från Philips berättade att de undviker att överföra grafen från ett material till ett annat (som är standardprocedur vid grafentillverkning med CVD) eftersom det finns flera utmaningar med själva överföringen. Några av nackdelarna med överföringen är att vidhäftningsförmågan inte är helt känd, reproducerbarheten behöver förbättras, det kan bildas rynkor och det är en tidskrävande process. De utvecklar därför en metod att växa grafenet direkt där de vill applicera materialet. Detta kommer med flera andra komplikationer, utav



vilka de har löst en del och arbetar vidare på andra. De har fått lovande resultat och tror sig kunna ha membranprodukter på marknaden inom 3 år, MEMS inom 5 år, fotodetektion inom 7 år och plasmonics inom 10 år. Park från Samsung berättade senare att de också har utmaningar med sin överföringsprocess, eftersom det alltid finns ett fåtal partiklar kvar, vilket inte är kompatibelt med CMOS-teknologin.

## **Flagor**

Den stora skillnaden mellan vätskebaserad grafentillverkning, en med mixer och en med ultraljud, är enligt Torrisi (Cambridge Graphene Centre) att mixern kan ge större flagor (1-5  $\mu\text{m}$  jämfört med omkring  $\frac{1}{2}$   $\mu\text{m}$ ) men har betydligt lägre andel enlagergrafen (< 1 % jämfört med omkring 30 %). Detta kan förbättras genom olika separationssteg efter själva produktionssteget). De har nu utvecklat en annan tillverkningsmetod baserad på mikrofluidisk exfoliering av grafen. Metoden ger betydligt bättre utbyte per vikt och koncentration än ovan nämnda metoder.

Det diskuterades en hel del om att kvaliteten på kommersiell grafen (främst grafenflagor) behöver förbättras. Flera forskare berättade att de får bättre kvalitet om de tillverkar själva. En studie har undersökt storleken och tjockleken av grafenflagor från omkring 60 olika leverantörer av kommersiellt grafen från Europa, Kina och USA. De var väldigt försiktiga med att inte uppge några namn, men de berättade att bara ett utav de undersökta företagen levererade grafen med färre än fem lager. Ett antal företag levererade grafen med omkring tio lager, medan många produkter var betydligt tjockare än så. Många av de undersökta företagen uppgav alltså att de sålde betydligt tunnare grafen än vad de egentligen levererade. Frånvaron av kvalitet uppgavs vara en av de viktigaste anledningarna till att utvecklingen av grafenbaserade produkter inte går snabbare (Castro-Neto, NUS).

Palermo (CNR-ISOF) beskrev tekniken de utvecklat för att mäta den laterala storleken på grafenflagor genom en automatiserad analysmetod. De placerade grafenflagor slumpmässigt på en plan kiselyta och mätte med svepelektronmikroskopi (SEM), atomkraftsmikroskopi (AFM) och fluorescensmikroskopi. Ett datorprogram analyserade sedan den laterala storleken på grafenflagorna. Den stora fördelen med deras teknik är att den eliminerar en potentiellt subjektiv mänsklig analys, vilket de tror skulle kunna vara en av anledningarna till att kvaliteten på all köpt grafen inte alltid är vad som uppges av producenten. Nackdelen är att tekniken inte säger något om tjockleken på grafenet.

Palermo drog även paralleller till utvecklingen av polymerteknologi. I början var väldigt lite känt om storleken och strukturen på polymererna. Sedan förstod man hur det fungerade och nu går det att köpa väldigt väldefinierade polymerer. Han tror att situationen kan vara liknande för grafen.

Böhm från Talga Advanced Materials berättade att det inte alltid är viktigt att arbeta med grafen bestående av endast ett lager. Det viktiga är vilka egenskaper man får ut och att det inte alltid nödvändigtvis är bäst med ett lager.

Flera grafentillverkare har börjat producera granulat med grafen i olika polymerer och grafen dispergerat i epoxi. Villaro berättade om ett samarbete mellan Avanzare och Interquimica där de utvecklar och undersöker flera kompositmaterial med grafen. Hon berättade att perkolationströskeln ofta är väldigt låg och att kompatibiliteten mellan grafenet och polymermatrisen är väldigt viktig. Hon jämförde med kolnanorör och berättade att viskositeten ökar betydligt mer med nanorören än med grafen.

Merino från Grupo Antolin redogjorde för hur de tillverkar GO och rGO från deras egenproducerade kolnanofiber (inte att förväxlas med vanlig kolfiber). Han berättade att de mestadels säljer halvfabrikat med fokus på hårdplaster och inte pulver eller suspensioner av grafen. De deltar i ett större projekt som undersöker hälsoriskerna med nanomaterial (Nanoreg2) och har fått lovande resultat.

Flera företag visade att de kan producera grafenflagor och flera av dem arbetar mot att börja producera och sälja masterbatches.

Lee från Standard Graphene berättade att de massproducerar grafen (GO och rGO) med en kapacitet på 1,1 ton per fabrik. De planerar att börja sälja grafen-kolfiber-prepregs i maj 2017. De avser också att introducera en lättviktscykel i juni/juli och är redo för massproduktion av ett vattenfilter.

Ett flertal företag tillverkar andra 2D-material än grafen i vätskefas. Casiraghi (University of Manchester) visade att de har tagit fram tryckbara bläck av olika 2D-material (upp till 7 lager av WS<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub>, BN, grafen, Bi<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> och SnS). Det hölls flera presentationer om flera andra 2D-material utöver grafen, men de flesta är fortfarande på forskningsstadiet (MoS<sub>2</sub> och h-BN är mest moget efter grafen).

## Membran och filter

Grafen är ett väldigt bra barriärmaterial där inte ens helium tar sig igenom ett grafenskikt. Detta kan användas för att göra olika sorters filter, till exempel genom att göra hål av en kontrollerad storlek vilka endast släpper igenom partiklar som är mindre än hålet. Ett alternativ är att göra en sandwich-struktur där separationen mellan grafenlagren definierar vad som släpps igenom. Det har visats att detta kan användas för att göra väldigt effektiva vattenfilter. Både Geim (University of Manchester) och Castro-Neto (NUS) nämnde att problemet snarast är att filtren kan bli för bra så att inga salter går igenom, vilka behövs för dricksvatten. Su (University of Manchester) beskrev hur de kontrollerar separationen mellan grafenlagren för att kunna släppa igenom specifika salter beroende på deras storlek. De visade en bra kontroll på separationer mellan 6,4 Å och 13,5 Å, vilket leder till att de kan kontrollera hur snabbt olika salter går igenom filtret med flera storleksordningar. Vattenpermeationen påverkades bara marginellt.

Korrosion är ett stort och dyrt problem idag. Det togs upp att korrosion kostar 300 miljarder dollar per år enbart i USA. Skydden mot korrosion kan delas in i aktiva och passiva tillvägagångssätt. Ett passivt skydd innebär ett barriärlager som hindrar att oxidationsmedel kommer till metallytan. I ett aktivt skydd bildas ett passiveringsskikt som förhindrar att någon utav halvcellsreaktionerna kan ske. Det har visats att grafen både kan fungera som ett passivt och ett aktivt skydd mot korrosion. Ytterligare fördelar med grafen är att skydden kan göras flexibla, genomskinliga och mekaniskt starka. Som ett exempel visades att Tiffany & Co har applicerat grafen på några av sina smycken för att förhindra oxidering och missfärgning, vilket även leder till ökad glans (Hong, Seoul National University och Graphene square). Även Böhm från Talga Advanced Materials berättade om möjligheterna med grafen som skydd mot korrosion.

Grafenfärg utvecklas även för att förhindra korrosion på fartyg. Här är det också viktigt att minimera bakterietillväxten (Castro-Neto, NUS. Det finns även ett liknande [projekt inom SIO Grafen](#)). Castro-Neto försöker även minimera bakterietillväxten på tandimplantat av titan och har fått lovande resultat mot att reducera streptococcus mutans och enterococcus faecalis tillväxten.

Flera utav dagens skärmar är baserade på OLED-teknologi. Det är väldigt viktigt att ingen fukt kommer in i dessa skärmar. Kravet på barriären jämfördes med en droppe vatten på en fotbollsplan. Eftersom grafen har fantastiska barriäregenskaper arbetas det därför mycket med att skapa olika inkapslingslösningar med grafen. Fokus ligger på grafen tillverkat med kemisk ångdeponering eftersom tekniken kan ge stora sammanhängande ytor, men även flagor av grafen undersöks (Hong, Seoul National University och Graphene square).

## **Kompositer**

Lambertini från Centro Ricerche Fiat diskuterade fördelar med grafen i bilindustrin och beskrev många potentiella tillämpningar. De har många idéer – framförallt för att reducera vikten – och de har gjort en demonstrator av en panel till ett säte inom [PolyGraph-projektet](#). Han efterlyste samarbeten som en avgörande del för att ta nya material från låga till höga TRL-nivåer (Technology Readiness Level, teknisk mognadsgrad) och från olika nischer till en bred marknad.

Grafen är ett idealt material för tillämpningar inom flygindustrin tack vare materialets låga vikt och multifunktionalitet. Genom att addera grafen i kompositer tillsammans med kolfiber kan man till exempel förbättra de mekaniska egenskaperna, reducera vikten, förbättra barriärer för att minska vattenupptaget och förhindra spridning av potentiell eld, förbättra ytan för avisning och göra självrengörande ytor, öka ledningsförmågan för EMI sköldning och blixtskydd samt tillverka sensorer som känner av om kompositen börjar försämrans. Gude från FIDAMC (Foundation for the Research, Development and Application of Composite Materials) berättade att de har dispergerat grafen i epoxi. De har sett en ökning av den elektriska ledningsförmågan med över 60 % i planet och över 170 % i z-led med 0,5 % grafen. Den termiska ledningsförmågan ökade med omkring 40 % vid samma koncentration grafen och vattenupptaget minskade med 6 %. De berättade dock att det inte är trivialt hur grafen optimalt blandas i kompositen. De har framförallt problem vid högre koncentrationer och får klart bättre resultat vid manuell tillverkning än i automatiserade processer.

En tillämpning med grafen är att tillverka elektriskt ledande plast. Plasten används främst för elektrostatisk urladdning, i explosiva atmosfärer och för elektromagnetiskt skydd. Den globala marknaden för elektriskt ledande plast var 2,2 miljarder dollar år 2012 och förväntas växa till 3,4 miljarder dollar år 2017. Det produceras omkring 500 000 ton kimrök per år som

füllmedel till dessa plaster. Allt detta visar att det finns stor potential för grafen att ta en stor marknadsdel inom elektriskt ledande plast (Monti, Proplast).

Nine (the University of Adelaide) beskrev hur grafen kan användas för bättre brandskydd både som additiv inuti kompositer och som ytbeläggning.

Ozkan (University of California Riverside) visade en svamp baserad på grafen som kan suga upp vätskor med upp till flera gånger sin egen vikt. De uppgav att den största fördelen jämfört med andra produkter var att deras svamp är billigare än konkurrenternas.

Det behövs mer kunskap om hur man kan återanvända grafen. Det finns en del studier, men relativt få än. Ligi från GNEXT säger att eftersom det är så låg andel grafen i kompositer borde det gå bra. De har testat att återanvända grafen från olika filmer som additiv i kompositer. De ser en förbättring av kompositen, men inte en lika stor förbättring som med ny grafen.

Galiotis (FORTH) diskuterade kopplingen mellan grafen och polymermatrisen. Han visade att grafenflagorna behöver vara större än de flesta kommersiella flagorna för att optimalt överföra kraften mellan polymermatrisen och grafenet. Dagens storlek fungerar dock bra för att höja den elektriska och termiska ledningsförmågan.

Nestle (BASF) berättade att de undersöker grafendopade limmer som alternativ för lödning istället för traditionella metaller.

## **Elektronik**

Elektronik baserad på kisel har utvecklats med enorma resurser under många år och fantastiska resultat uppnås. I dagens elektronik används teknologi med precision på omkring 10 nm, vilket möjliggör bland annat snabba processorer och snabb kommunikation, enorm lagringsförmåga vilket gör att sensorer och kameror finns nästan överallt. En nackdel med kiselteknologin är dock att sensorerna inte fungerar för i de infraröda våglängderna. InGaAs detektorer fungerar i det infraröda spektrumet men inte för synligt ljus. En tillämpning som kan fungera över hela detta breda spektrum är en kombination med kvantprickar och grafen. En prototyp av en kamera med 100 000 pixlar (99,8 % funktionella) har tillverkats som fungerar över hela spektrumet 300-2000 nm med 50 fps. Detta möjliggör till exempel

tillämpningar för att kunna se genom dimma, inom säkerhet och matinspektion. Detektorn kunde även integreras i kiselteknologi (CMOS kompatibel), vilket är väldigt viktigt för vidareutveckling och potentiella produkter (Goossens, ICFO).

Seol berättade att Samsung utvecklar en teknik för att använda grafen liknande som en fotoresist används inom fotolitografi idag. Grafenet har potential att hjälpa till med fortsatt nedskalning av komponentstorleken i CMOS-teknologi. De har uppnått en selektivitet av 20:1 för SiO<sub>2</sub>:grafen.

Grafen har kombinerats med 2D MoS<sub>2</sub> och hBN för att göra ett minne. Detta har en extremt hög on/off ratio på över 10<sup>9</sup>. Eftersom flexibla 2D material användes istället för tjocka stela material, som till exempel oxider, kan minnet sträckas över 19 % och kan därmed potentiellt användas i mjuk elektronik (Lee, Sungkyunkwan University).

En teknik har utvecklats för att göra ett väldigt poröst grafenliknande material genom att använda en enkel laser, till exempel en som används i en vanlig DVD-skrivare. Metoden tillverkar ett grafenmaterial med många defekter vilket kan användas för att tillverka superkondensatorer. En prestanda på 265 F/g och 4,82 mF/cm har erhållits. Prototyper har tillverkats och ett företag (Nanotech energy) har startats för att ta tillvara på tekniken (Kaner, University of California).

Silvernanostrådar har kombinerats med transistorer av 2D MoS<sub>2</sub> och WS<sub>2</sub> för att göra komponenter för optoelektronik. Man har gjort prototyper av flera viktiga komponenter såsom för våglängdsmultiplexing, elektrisk modulering och fotodetektering (Lee, Sungkyunkwan University).

Grafen har använts för att tillverka en likriktare tillsammans med en antenn som kan användas som en extremt känslig THz-detektor. Grafenet täcktes med bornitrid varvid en mobilitet på 200 000 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> och responsivitet på 23 000 mV/mW uppnåddes. Den brusekvivalenta effekten (cirka 1 pWHZ<sup>-1/2</sup>) var jämförbar med vad som erhålls med supraledande bolometrar trots att den fungerar vid rumstemperatur (Auton, The University of Manchester).

Castro-Neto (NUS) berättade om ett samarbete de haft med en designskola där de tagit fram ett koncept för att göra ledande tejp med grafen. Tejpen skulle kunna användas istället för

vanliga kablar i hemmet. Istället för trassel med sladdar överallt skulle man alltså ha en grafentejp tryckt på väggen.

2D-material är ultimata för sensortillämpningar eftersom de endast består av yta. Det har tidigare visats att grafen kan användas för att tillverka extremt känsliga sensorer, men nackdelen är att grafenet inte är selektivt. På grund av detta funktionaliseras grafenet ofta med andra molekyler för att få specifik selektivitet. Det finns dock andra 2D-material som är selektiva för olika påverkan. Campbell (Naval Research Laboratory) undersöker enkellager av  $\text{MoS}_2$  eftersom det är känsligt för molekyler som är starka elektrondonatorer. De är fortfarande inte helt selektiva, men eftersom alla starka elektrondonatorer är farliga så kan de göra en sensor som varnar för farliga material även om de inte kan säga exakt vad som detekterats.

Shtepliuk från Linköpings Universitet berättade om deras sensorer baserade på grafen från kiselkarbid. De har lovande resultat för detektion av bly som kan möjliggöra en ny pålitlig metod för att utveckla portabla sensorer som ger resultat i realtid. Grafen kan även användas för att göra biosensorer och Ahopelto från VTT redogjorde för deras utveckling.

Grafen har använts för att ta fram en standard för elektrisk resistans för användning i kryostatsystem. Denna kommer till marknaden under 2018 (Falko, the University of Manchester).

Hydrodynamiken av hur elektroner rör sig i grafen undersöks. Geim et al. har funnit att elektronerna rör sig över 100 gånger mer visköst än honung.

### **Flexibla skärmar/elektronik med mera**

Det har arbetats mycket för att ta fram flexibla skärmar av grafen. Grafenet är tänkt att ersätta indiumtennoxid (ITO) som är det genomskinliga och elektrisk ledande (men även spröda material) som används idag. Det finns andra alternativa nya potentiella lösningar, till exempel nätverk av metall eller silvertrådar. Metallen ger bättre ledningsförmåga, men grafenet har bättre mekaniska egenskaper. Priset på ITO har sjunkit den senaste tiden och det är därför svårt att konkurrera ut dagens teknologi. Det finns några prototyper, till exempel visade ETRI upp en display (370 mm x 470 mm) och Graphene Square visade Hanwha Techwins mobiltelefon, där grafen ersatt ITO med liknande prestanda. Den stora fördelen med grafen är att med grafen kan elektroniken även göras flexibel, vilket inte är möjligt med ITO.

Genom att exfoliera grafit till grafenflagor och sedan sätta ihop flagorna i ett slumpmässigt nätverk, kan flexibelt grafenpapper produceras. Sådant grafenpapper finns i olika versioner på marknaden idag hos olika leverantörer. Detta grafenpapper kan vara en bra elektrisk ledare vilket har använts till att producera Near Field Communication (NFC)-antennor. För att visa på prestandan har sådana antenner framgångsrikt integrerats i redan existerande teknologi utan ytterligare förändringar i varken hårdvara eller mjukvara. Fördelen med grafen är att antennerna kan göras flexibla, vilket visades i ett flertal prototyper. Grafenet kombinerades med olika polymerer som PVC, PET, kapton, OCA och silke i olika tillämpningar och flexibla prototyper som visitkort, ”smart cards”, smarta posters, taggar, nycklar/passerkort med mera visades upp (Scidà National Research Council, ISOF).

Olika tillämpningar har olika krav på ledningsförmågan i genomskinliga, flexibla och ledande filmer. Till exempel behöver pekskärmar en ytresistans på maximalt omkring  $200 \Omega/\square$ , OLEDs  $50 \Omega/\square$  och solceller  $10 \Omega/\square$ . Det som ligger närmast i tiden och som har störst fokus för Shi (Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences) är därmed olika flexibla pekskärmar. De har utvecklat teknologin och producerat ett antal produkter de senaste åren. De nämnde samarbeten med olika telefontillverkare och att de tillverkat omkring 50 000 telefoner med grafen istället för ITO. Dessa var dock fortfarande inte flexibla utan det var ett rakt byte av material. De har likafullt visat att deras flexibla pekskärmar fortfarande fungerar efter 40 000 böjcykler med en böjdiameter på 3 cm. De har även tillverkat flera flexibla prototyper såsom bärbart elektroniskt papper, transparent tangentbord och flexibla ljuskällor. De har även gjort en fungerande prototyp av en böjbar telefon. Det finns olika metoder för att reducera ytresistansen ytterligare. Det är svårt att nå avsevärt lägre med ren grafen, men med kemisk doping, nanotrådar eller metallpartiklar kan nivåer kring  $10 \Omega/\square$  uppnås.

LG Display satsar på grafen för flera tillämpningar för flexibla OLEDs. De nämnde transparenta elektroder, inkapsling, ljuskällor och olika multifunktionella ytor.

Cho från Etri påstår att 4 lager av grafen är optimalt för tillämpning i OLEDs för att minimera ytresistansen ( $65 \Omega/\square$  jämfört med  $220 \Omega/\square$  för deras enlagergrafen) med bibehållen transmittans (84 %).



Ahn (Yonsei University) visade upp flera prototyper de tillverkat med grafen och/eller MoS<sub>2</sub> i pekskärmar. De visade bland annat prov på multi-touch respons, sträckbara sensorer och tryck-känsliga (3D) sensorer. Han hade även en telefon där grafen ersatt ITO med bra resultat, dock utan extra funktioner (som till exempel flexibilitet).

## **Spinntronik**

Utvecklingen av spinntronik går snabbt framåt. Det har visats att det går att skapa, manipulera och detektera spinnpolarisationen i halvledare, och spinntransistorer har tillverkats (Dash, Chalmers). Olika 2D-material har unika egenskaper som är viktiga inom spinntroniken. Till exempel har grafen låg ”spin-orbit coupling” och är utmärkt för transport av spinn, h-BN har ett stort bandgap och är idealt som tunnelbarriär för spinn medan MoS<sub>2</sub> har hög ”spin-orbit coupling” och är bra för manipulering av spinnen. Genom att kombinera MoS<sub>2</sub> och grafen har man nu visat att det går att kontrollera spinnpolarisationen och livslängden helt med elektriska metoder. En spinntransistor (spin-FET) har tillverkats där skapandet, transporten och kontrollen av spinnpolariseringen helt kan kontrolleras med elektriska metoder och som fungerar i rumstemperatur. Denna kontroll möjliggör studier av exotiska fenomen och lägger grunden till framtida komponenter.

## **Energi**

Det finns många fördelar med grafen i energilagringstillämpningar. Till exempel leder grafen elektricitet bra, har väldigt stor yta, är flexibelt och transparent, är enkelt att funktionalisera och det är möjligt att tillverka membran, ytbeläggningar och andra 3D-strukturer. Chen (Chinese Academy of Science) beskrev hur grafen har använts för att förbättra Li-jonbatterier, LiS-batterier och för att göra flexibla batterier. Han demonstrerade ett flexibelt grafenbaserat Li-batteri helt utan metallisk kollektor, utan bindemedel och additiv med en kapacitet på 137 mAh/g och som kunde laddas på 6 minuter.

Det diskuterades att grafen möjliggör alternativ till Li-jonbatterier. Till exempel har lovande resultat uppnåtts med grafen i Na-jonbatterier (Pontiroli, Università degli Studi di Parma).

Prototyper av flexibla superkondensatorer har tillverkats baserade på grafenbläck. Nagar (ICN2) uppger en maximal kapacitans på 555 F/g. De uppnådde 60 Wh/kg vid en belastning på 5 000 W/kg.

Romero (ICN2) beskrev hur grafen kan användas för att göra hybrider mellan batterier och superkondensatorer för att få det bästa av båda. De funktionaliserar GO och rGO med olika oorganiska polymerer eller molekyler vilka adderar funktionalitet och ger en högre energitäthet.

Grafen har använts för att göra solceller med perovskiter. En effektivitet på 12,6 % uppnåddes på en stor yta (50 cm<sup>2</sup>) (Agresti, University of Rome Tor Vergata).

## **2D material till rymden?**

Castro-Neto berättade om ett NASA-projekt som handlar om att skicka sonder till Alpha-Centauri som är den närmaste stjärnan utanför vårt solsystem. Tanken är att tillverka extremt små rymdskepp som bara väger omkring ett gram och accelerera upp dem i väldigt höga farter med hjälp av lasrar. Man har stakat ut hur elektroniken, inklusive navigation, kommunikation och kameror kan tillverkas för att väga omkring 0,2 gram år 2030 (i dagsläget omkring det dubbla). Den andra delen av rymdskeppet skulle bestå av ett 4x4 m<sup>2</sup> och <300 atomer tjockt segel som väger under ett gram. Lasrar skulle skjuta på dessa segel för att ge rymdfarkosten höga farter. Seglen skulle behöva bli 150 gånger lättare år 2030 än vad de kan göras idag. Med allt detta beräknas det att man kan nå 20 % av ljusets hastighet, vilket innebär att det skulle ta omkring 20 år att nå Alpha-Centauri. Med 2D-material skulle seglen kunna göras lättare och elektroniken skulle kunna integreras i seglen. Det beräknas att detta skulle kunna öka hastigheten till 70 % av ljusets hastighet och därmed tiden till Alpha-Centauri till endast sex år. Några första experiment har gjorts med guld deponerat på grafen vilket ger en reflektivitet på 90 % vid en tjocklek av 1 nm. Experimenten gjordes endast i liten skala, men ett 20 m<sup>2</sup> segel skulle väga under ett halvt gram (Castro-Neto, NUS).

Detta kan tyckas vara science fiction men på sätt och vis är det likt Apollo-programmen med mål att resa till månen under 1960-talet. Dessa skapade en stor mängd patent och tillämpningar inom många områden. 2D-material i rymden skulle kunna ge en liknande skjuts in i framtiden i dag!

## **Blandade diskussioner kring vad som behövs för att grafenområdet ska fortsätta utvecklas**

- Grafen har stor potential att minimera påverkan på miljön eftersom grafenet är kemiskt inert och inte innehåller några metaller, men det behövs betydligt mer forskning.
- Det är ett problem att många har en utdaterad bild av prisnivån på grafen, både flagor och CVD-grafen. Det är billigare än vad många tror och priserna fortsätter att sjunka.
- Det behövs en heltäckande analys av hela grafens livscykel. Några studier har gjorts av Arvidsson et al, men det behövs betydligt mer.
- Det diskuterades att ur ett säkerhetsperspektiv är det en stor fördel att arbeta med vätskor och master batches istället för med pulver.
- Pris/prestanda behöver optimeras och definieras.
- En del riktmärken och jämförelser blir missvisande på grund av okunskap om kvaliteten på konkurrerande material. Till exempel gör man i vissa fall jämförelser med den billigaste formen av kimrök, istället för kimrök med bra ledningsförmåga. Det behövs också göras fler och mer relevanta jämförelser med andra nya material.
- Det finns ett stort behov av standarder och utveckling av tydlig terminologi. En försvårande faktor är mångfalden av 2D-material. En person från ett större företag hade upplevt motsträvighet hos företagets ledning, vilket grundades i att de egentligen pratade om helt olika material men använde för snarlika termer.
- Det diskuterades att det behövs klassificering av grafen beroende på tillverkningsprocess (gasfas jämfört med vätskefas), på kemi (ren grafen, GO eller rGO) och funktionalisering.
- Det saknas specifikationer över storleken på flagor och antalet lager i vätskeexfolierade material, men det är oklart hur man bäst karakteriserar detta.
- Det behövs specifikationer av grafen i andra material (till exempel i olika plaster) och hur man ska handskas med beroendet på tillverkningsprocessen.

- Det behövs en heltäckande syn på lösningar istället för fokus på enstaka egenskaper.
- Det borde vara ett större fokus på ökad förståelse av synergien hos multifunktionaliteten hos grafen och matrisen istället för bara fokus på att grafen kan förbättra matrisen.
- Det behövs enkla procedurer för kvalitetskontroll.
- Reproducerbarheten behöver förbättras. Paralleller drags till kiselteknologi där man kan förutsäga egenskaperna extremt väl, vilket inte är möjligt med grafen ännu.

Det finns alltså mycket kvar att göra med grafen och potentialen för många tillämpningar är stor. Nestle från BASF sammanfattade läget för grafenområdet som:

”A curved road rather than a seafare, but worth exploring!”