CHEMICAL VAPOR DEPOSITION : PROCESS AND APPLICATION

Agil Aditya Dinata^{*1}, Abel Maaruf Rosyadi², Syukri Hamid², Rahadian Zainul²

¹Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Indonesia

²Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Indonesia

³Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Indonesia

⁴Physical Chemistry Laboratory, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*E-mail : agiladityadinata@gmail.com, maarufrosyadi@gmail.com
Syukrihamid58@yahoo.co.id, rahadianzmsiphd@yahoo.com

Abstrak. *Chemical Vapor Deposition* merupakan metode deposisi yang digunakan untuk menghasilkan bahan padat berkualitas tinggi dan berkinerja tinggi yang biasanya dibawah vakum. Tujuan review ini adalah untuk mengetahui proses dan teknik dari Chemical Vapor Deposition. Prinsip kerja dari *Chemical Vapor Deposition* yaitu proses pengendapan senyawa/ unsur terjadi akibat reaksi dekomposisi kimia akibat aktivasi termal di seputar komponean yang dilapisi. Beberapa material yang dihasilkan dengan menggunakan metode *Chemical Vapor Deposition* ini adalah berlian sintesis, *thin film coating*, lapisan emas dengan ketebalan yang tipis.

Keywords: *vapor deposition , prinsip, proses.*

1. Pendahuluan

Dalam pembuatan material terdapat beberapa metode yang dapat digunakan, salah satunya adalah dengan metode Chemical Vapor Deposition. Metode Chemical Vapor Deposition banyak digunakan dalam pembuatan *thin film coating* dan baru-baru ini menghasilkan berlian sintetis. Chemical Vapor Deposition merupakan proses pengendapan senyawa atau unsur terjadi akibat reaksi dekomposisi kimia akibat adanya aktivasi termal di seputar komponen yang dilapisi(53-57). Pada proses *Chemical Vapor Deposition*, substrat diletakkan di depan pada satu atau lebih prekursor yang bereaksi pada permukaan substrat untuk menghasilkan deposit yang diinginkan, kemudian dikeluarkan oleh aliran gas melalui reaksi ruangan. *Chemical Vapor Deposition* telah lama berkembang, seperti literature yang telah kami dapatakan yaitu dari tahun 2000-2018, sudah banyak sekali yang dihasilkan oleh *Chemical Vapor Deposition*.(61-67)

2. Metode

Pada proses *Chemical Vapor Deposition* dapat menghasilkan kualitas dan kinerja yang tinggi dibandingkan dengan metode lain. Proses *Chemical Vapor Deposition* berlangsung dalam beberapa tahapan yang dapat dilihat pada *fishbone* di bawah ini.

Bagan 1. FishBone Chemical Vapor Deposition

Bagan 2. Road maps Chemical Vapor Deposition

Keterangan :

- 2005 Superhydrophobic Fabrics Produced by Electrospinning and Chemical Vapor Deposition
- 2006 ZnO light-emitting diode grown by plasma-assisted metal organic chemical vapor deposition
- 2007 Rational Synthesis of p-Type Zinc Oxide Nanowire Arrays Using Simple Chemical Vapor Deposition
- 2008 Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition
- 2009 Synthesis, Transfer, and Devices of Single- and Few-Layer Graphene by Chemical Vapor Deposition
- 2011 Large-Area Graphene Single Crystals Grown by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition of Methane on Copper
- 2012 Synthesis of Large Area MoS₂ Atomic Layers with Chemical Vapor Deposition
- 2013 Controlled Synthesis of Highly Crystalline MoS₂ Flakes by Chemical Vapor Deposition
- 2014 Role of the Seeding Promoter in MoS₂ Growth by Chemical Vapor Deposition
- 2015 Ultrathin SnSe₂ Flakes Grown by Chemical Vapor Deposition for High-Performance Photodetector
- 2016 Synthesis of Graphene Films on Copper Foils by Chemical Vapor Deposition
- 2018 Synthesizing 1T-1H Two-Phase Mo_{1-x}W_xS₂ Monolayers by Chemical Vapor Deposition

3. Hasil dan Pembahasan

Deposisi uap kimia (CVD) adalah teknologi pengolahan material yang banyak digunakan. Kebanyakan aplikasinya melibatkan penerapan lapisan tipis-film padat ke permukaan, tetapi juga digunakan untuk memproduksi bahan curah dengan kemurnian tinggi dan bubuk, serta fabrikasi komposit melalui teknik infiltrasi(19-21).

Saat ini, CVD adalah alat dasar manufaktur yang digunakan dalam segala hal mulai dari kacamata hitam hingga tas keripik kentang dan sangat penting untuk memproduksi beberapa perangkat elektronik saat ini. CVD merupakan teknik pada pemurnian dan ekspansi konstan, mendorong penelitian material ke arah baru, seperti produksi lembaran skala besar graphene, atau pengembangan sel surya yang bisa "dicetak" ke selembar kertas atau plastik(13; 14; 31; 69).

Pada tahun 2005, CVD memproduksi kain superhidrofobik(47). Suatu metode serbaguna yang menghasilkan kain superhydrophobic dengan menggabungkan electrospinning dan diprakarsai oleh deposisi uap kimia (CVD). Poli (caprolactone) (PCL) adalah electrospun pertama dan kemudian dilapisi dengan lapisan tipis hidrofobik terpolimerisasi perfluoroalkyl ethyl methacrylate (PPFEMA) oleh iCVD. Permukaan hierarkis kekasaran yang melekat pada tikar PCL electrospun dan energi bebas permukaan yang sangat rendah lapisan pelapis yang diperoleh oleh iCVD menghasilkan superhidrofobisitas yang stabil.

Pada tahun 2006, *ZnO light-emitting diode*(52) yang dikembangkan oleh deposisi uap kimia organik dengan bantuan logam plasma. Sebuah terobosan dalam pembuatan ZnO light-emitting diode oleh metal deposisi uap kimia organik. Dengan menggunakan plasma NO, apat menumbuhkan tipe-P ZnO tipis film pada substrat ZnO n-jenis massal

Pada tahun 2007, CVD digunakan dalam mensintesis Rasional P-Type Zinc Oxide Nanowire Arrays(59). untuk pertama kalinya, sintesis dari P-type ZnO NWs berkualitas tinggi menggunakan metode deposisi uap kimia sederhana, di mana fosfor pentoksida telah digunakan sebagai sumber dopan.

Pada tahun 2008, CVD digunakan pada lapisan film graphene(70) yang sedikit dengan substrat yang berubah-ubah. Dalam pekerjaannya yang menyajikan teknik biaya rendah dan terukur, melalui tekanan ambien deposisi uap kimia (CVD) pada film Ni polikristalin, untuk membuat film yang luas (~ cm²) dari graphene satu ke beberapa lapisan dan untuk mentransfer film ke substrat nonspesifik.

Pada tahun 2009, CVD digunakan dalam sintesis, transfer, dan perangkat Single- and Few-Layer Graphene(68). Kemajuan nanoelectronics berbasis graphene telah terhambat karena kesulitan dalam

menghasilkan graphene satu atau beberapa layer di area yang luas. Dengan menggunakan CVD, dapat hemat biaya untuk menyiapkan graphene menggunakan CVD berbasis metana pada film nikel disimpan di atas wafer Si / SiO₂ yang lengkap.

Pada tahun 2011, *Large-Area Graphene Single Crystals Grown by Low-Pressure*(48) yang dikembangkan oleh CVD dari metana dan copper. Kristal tunggal graphene dengan dimensi hingga 0,5 mm pada sisi dikembangkan oleh deposisi uap kimia pada tempat tembaga-foil menggunakan metana sebagai prekursor. Analisis mikroskop elektron berenergi rendah menunjukkan bahwa domain graphene besar memiliki orientasi kristalografi tunggal, dengan domain sesekali memiliki dua orientasi.

Pada tahun 2012, CVD digunakan dalam mensintesis *Large Area MoS₂* lapisan atom(49). *Large Area MoS₂* lapisan atom disintesis pada substrat SiO₂ oleh deposisi uap kimia menggunakan bubuk MoO₃ dan S sebagai reaktan. Pengukuran optik, mikroskopik dan listrik menunjukkan bahwa proses sintesis mengarah pada pertumbuhan monolayer MoS₂. Gambar TEM memverifikasi bahwa lembaran MoS₂ yang disintesis sangat kristalin.

Pada tahun 2013, CVD digunakan dalam mensintesis *Highly Crystalline MoS₂ Flakes*(58). Sintesis yang dikendalikan dari lapisan atom MoS₂ yang sangat kristalin tetap menjadi tantangan. mensintesis serpihan MoS₂ dalam bentuk rhomboid dengan jumlah lapisan yang dikontrol oleh lapisan sulfurisasi mikrokristal MoO₂. Serpihan MoS₂ yang diperoleh menunjukkan tinggi kristalinitas dengan ukuran domain kristal ~10 µm, secara signifikan lebih besar dari ukuran butir MoS₂ tumbuh dengan metode lain.

Pada tahun 2014, CVD digunakan dalam promotor penyemaian dalam Pertumbuhan MoS₂(46). Memanfaatkan berbagai molekul aromatik sebagai penyemaian promotor, monolayer MoS₂ yang besar, sangat kristalin, dan seragam dicapai dengan deposisi uap kimia (CVD) pada suhu pertumbuhan yang relatif rendah (650 ° C).

Pada tahun 2015, CVD mengembangkan ultrathin SnSe₂ Flakes(51) untuk photodetector berperforma tinggi. Ultrathin tunggal berkualitas tinggi SnSe₂ serpihan kristal tunggal disintesis di bawah atmosfer-tekanan deposisi uap kimia untuk pertama kalinya. Fotodetektor berkinerja tinggi berdasarkan serpihan SnSe₂ menunjukkan photoresponsivity tinggi $1,1 \times 10^3 \text{ AW}^{-1}$, EQE tinggi $2,61 \times 105\%$, dan detektif luar biasa dari $1,01 \times 10^{10}$ Jones, digabungkan dengan waktu yang naik dan peluruhan cepat masing-masing 14,5 dan 8,1 ms.

Pada tahun 2016, CVD digunakan dalam mensintesis Graphene Films on Copper Foils(45). graphene telah berkembang pesat sebagai salah satu baham yang paling menjanjikan bagi kehidupan manusia. Pengembangan metodologi sintesis produksi yang layak untuk persiapan berbagai jenis graphene membentuk dasar untuk penyelidikan dan aplikasi. Graphene dapat digunakan dalam bentuk bubuk mikroflake atau area besarfilm tipis. Serbuk graphene disiapkan oleh pengelupasan grafit atau reduksi graphene oxide, sementara film graphene dipersiapkan terutama oleh uap kimia.

Pada tahun 2018, CVD digunakan dalam mensintesis 1T-1H Two-Phase Mo_{1-x}W_xS₂ Monolayers(50). 1T – 1H antarmuka logam-semikonduktor dalam dua-dimensi (2D) transisi-logam Dichalcogenides (TMDs) memainkan peran penting dalam memanfaatkan celah pita TMDs untuk aplikasi di perangkat elektronik. Meskipun struktur dua fase 1T – 1H telah diamati pada nanosheet 2D yang terkelupas dan TMD yang diolah secara kimia atau fisik, tidak bisa pada prinsipnya dicapai dalam monolayers TMD berskala besar yang ditanam oleh deposisi uap kimia (CVD), yang merupakan metode fabrikasi untuk aplikasi perangkat elektronik, karena sifat metastabil dari fase 1T. Pertumbuhan CVD dari 1T-1H dua fase monolayers TMD dengan mengendalikan strain dan komposisi paduan termal. Ditemukan bahwa strain termal di dalam pesawat yang timbul dari perbedaan dalam koefisien ekspansi termal antara monolayer TMD dan substrat dapat mendorong transisi 1H ke 1T selama pendinginan setelah pertumbuhan CVD. Selain itu, batas butir dalam kristal 2D bertindak sebagai situs nukleasi fase 1T dan gangguan regangan kisi dari paduan jelas meningkatkan pembentukan fase 1T metastabil. Pekerjaan ini memiliki implikasi penting dalam menyesuaikan struktur dan sifat CVD yang dikembangkan 2D TMD oleh rekayasa fase.

Seiring berkembangnya teknologi metode CVD dapat digunakan dalam pembuatan berlian sintesis(60; 71; 72).

Deposisi uap kimia (CVD) mengacu pada pembentukan film padat non-volatil pada substrat dari reaksi reaktan kimia fase uap yang mengandung konstituen yang tepat. Ruang reaksi digunakan untuk proses ini, di mana gas-gas reaktan diperkenalkan untuk menguraikan dan bereaksi dengan substrat untuk membentuk film(73-75).

Pertumbuhan CVD terjadi ketika gas atau uap (prekursor) dimasukkan ke dalam reaktor suhu rendah di mana *wafer* disusun baik secara vertikal maupun horizontal. Gas bergerak melalui sistem dan mendistribusikan secara merata di seluruh permukaan *wafer*. Saat prekursor ini bergerak melalui reaktor, *wafer* mulai menyerapnya ke permukaannya(76; 77).

Setelah prekursor didistribusikan secara merata di seluruh sistem, reaksi kimia dimulai di sepanjang permukaan substrat. Reaksi kimia ini dimulai sebagai pulau, dan seiring proses berlanjut, pulau-pulau tumbuh dan bergabung untuk menciptakan film yang diinginkan. Reaksi kimia menciptakan biproduk pada permukaan *wafer*, yang berdifusi melintasi lapisan batas dan mengalir keluar dari reaktor, meninggalkan hanya *wafer* dengan lapisan film yang disimpan(13; 14; 31; 69).

Dalam inkarnasi yang paling sederhana, CVD melibatkan aliran gas atau gas prekursor ke dalam bilik yang mengandung satu atau lebih benda yang dipanaskan untuk dilapisi. Reaksi kimia terjadi pada permukaan panas, menghasilkan pengendapan lapisan film tipis di permukaan. Ini disertai dengan produksi produk sampingan kimia yang menghabiskan ruang bersama gas prekursor yang tidak bereaksi(64; 78-80). Seperti yang diharapkan dengan berbagai macam material yang disimpan dan berbagai macam aplikasi, ada banyak jenis CVD. Itu dilakukan di reaktor hot-wall dan reaktor dinding dingin, pada tekanan total sub-torr tekanan di atas atmosfer, dengan dan tanpa gas pembawa, dan pada suhu biasanya berkisar antara 200-1600°C. Ada juga berbagai proses CVD yang ditingkatkan, yang melibatkan penggunaan plasma, ion, foton, laser, filamen panas, atau reaksi pembakaran meningkatkan tingkat deposisi / deposisi pada suhu yang lebih rendah. Ada banyak turunan terminologi CVD, seperti deposisi uap kimia logam-organik (MOCVD), deposisi uap kimia organo-metalik (OMCVD), yang kadang digunakan untuk mencatat kelas molekul yang digunakan dalam proses deposisi. Beberapa praktisi memilih membedakan deposisi film epitaxial dari deposisi film polikristalin atau amorf, jadi mereka memperkenalkan berbagai istilah yang termasuk “Epitaxy” dalam akronim. Dua lagi jenis umum adalah fase uap organologam epitaxy (OMVPE) 7 dan fase uap metalorganik epitaksi (MOVPE) yang sering digunakan dalam epitaksi semikonduktor senyawa(4; 5; 41; 81; 82).

CVD memiliki sejumlah keunggulan sebagai metode untuk menyimpan film tipis. Salah satu keunggulan utama adalah film-film CVD umumnya cukup konformal, yaitu filmnya memiliki ketebalan di dinding samping fitur sebanding dengan ketebalan di bagian atas. Ini berarti film dapat diterapkan secara terperinci yaitu potongan berbentuk, termasuk bagian dalam dan bagian bawah fitur, dan rasio aspek-tinggi lubang dan fitur lainnya dapat terisi penuh. Sebaliknya, teknik deposisi uap fisik (PVD), seperti sputtering atau penguapan, umumnya membutuhkan garis-of-sight antara permukaan yang akan dilapisi dan sumbernya. Keuntungan CVD lainnya yaitu selain luas berbagai material yang bisa disimpan, mereka dapat disimpan dengan kemurnian sangat tinggi. Ini hasil dari kemudahan relatif yang kotoran dibuang dari prekursor gas menggunakan teknik distilasi. Keunggulan lainnya termasuk tingkat deposisi yang relatif tinggi, dan fakta bahwa CVD sering kali tidak membutuhkan setinggi vakum sebagai proses PVD(83-85).

Salah satu keuntungan besar dari pengolahan CVD adalah dapat menciptakan lapisan dengan ketebalan yang seragam bahkan dalam bentuk yang kompleks. Misalnya, CVD dapat digunakan untuk menyatukan tabung karbon nanotube silinder kecil dari karbon murni yang jauh lebih ramping daripada rambut seperti untuk memodifikasi sifat mekanik mereka dan membuat mereka bereaksi secara kimia terhadap zat tertentu(86-89).

CVD juga memiliki sejumlah kerugian. Salah satu kelemahan utama terletak pada sifat-sifat prekursor. Idealnya itu prekursor harus mudah berubah di dekat ruangan suhu. Ini bukan angka sepele

elemen dalam tabel periodik, meskipun penggunaan prekursor logam-organik telah mereda. Prekursor CVD juga bisa sangat beracun (Ni (CO)), eksplosif, atau korosif (SiCl₂). Produk sampingan dari reaksi CVD bisa juga berbahaya (CO, atau HF). Beberapa prekursor ini, terutama prekursor logam-organik, juga bisa sangat mahal. Kerugian utama lainnya adalah kenyataan bahwa film-film tersebut biasanya disimpan pada suhu tinggi. Ini memberi batasan pada jenis media yang bisa dilapisi. Lebih penting lagi, mengarah kepada menekankan pada film yang disimpan pada bahan dengan koefisien ekspansi termal yang berbeda, yang dapat menyebabkan ketidakstabilan mekanik di film yang disimpan.

A. Proses Chemical Vapor Deposisi

a. Pengendapan uap polimer dan substrat

Pengendapan uap polimer telah membuka pintu ke berbagai bahan yang akan sulit, dan dalam beberapa kasus dan tidak mungkin, untuk diproduksi dengan cara lain. Sebagai contoh, banyak polimer yang bermanfaat, seperti bahan penumpahan air untuk melindungi komponen industri atau implan biologis, dibuat dari prekursor yang tidak dapat larut, sehingga tidak dapat diproduksi menggunakan metode berbasis solusi konvensional(90-93). Pekerjaan Gleason pada CVD berbasis polimer dimulai pada 1990-an, ketika dia melakukan eksperimen dengan Teflon, senyawa klorin dan fluor. Pekerjaan itu mengarah ke bidang yang sekarang berkembang rinci dalam buku baru yang diedit Gleason, berjudul "CVD Polymers: Fabrikasi Permukaan dan Perangkat Organik"(74; 75; 94).

Pada saat itu, pemikiran satu-satunya adalah cara untuk membuat CVD bekerja dengan bahan polimer adalah dengan menggunakan plasma, sebuah gas bermuatan listrik untuk memulai reaksi. Gleason mencoba melakukan percobaan untuk membuktikan ini, dimulai dengan menjalankan eksperimen kontrol tanpa plasma untuk menunjukkan betapa pentingnya membuat proses bekerja. Sebaliknya, eksperimen yang kontrolnya bekerja dengan baik tanpa plasma sama sekali, membuktikan bahwa untuk banyak polimer langkah ini tidak diperlukan(32; 71; 95-97).

Tetapi peralatan yang digunakan Gleason memungkinkan temperatur gas dikontrol secara terpisah dari suhu substrat; memiliki pendingin substrat ternyata menjadi kunci. Dia melanjutkan untuk menunjukkan proses bebas plasma dengan lebih dari 70 polimer yang berbeda, membuka bidang penelitian baru(98-101). Proses ini membutuhkan banyak penyetalan, tetapi pada dasarnya merupakan serangkaian langkah sederhana: bahan yang akan dilapisi ditempatkan di dalam ruang vakum yang menentukan ukuran maksimum objek yang dapat dilapisi. Kemudian, bahan pelapis dipanaskan, atau tekanan di sekitarnya dikurangi sampai bahan menguap, baik di dalam ruang vakum atau di daerah yang berdekatan dari mana uap dapat diperkenalkan(102-106). Di sana, bahan yang ditangguhkan mulai mengendap ke bahan substrat dan membentuk lapisan yang seragam. Menyesuaikan suhu dan durasi proses memungkinkan untuk mengontrol ketebalan lapisan.

Dengan logam atau senyawa logam, seperti yang digunakan dalam industri semikonduktor, atau lapisan keperakan di dalam kantong makanan ringan, endapan logam uap yang dipanaskan pada substrat yang lebih dingin. Dalam proses polimer, itu sedikit lebih kompleks: Dua atau lebih senyawa prekursor yang berbeda, yang disebut monomer, dimasukkan ke dalam bilik, di mana mereka bereaksi untuk membentuk polimer ketika mereka mendepositkan pada permukaan(1; 36; 107; 108).

Proses CVD dasar terdiri dari langkah - langkah berikut(63; 64; 109-111):

- 1) campuran gas reaktan yang telah ditentukan dan gas inert penguapan diperkenalkan pada laju alir yang ditentukan ke dalam ruang reaksi;
- 2) spesies gas pindah ke substrat;
- 3) reaktan teradsorpsi pada permukaan substrat;
- 4) reaktan mengalami reaksi kimia dengan substrat untuk membentuk film; dan
- 5) produk samping gas dari reaksi yang diserap dan dievakuasi dari ruang reaksi.

Sistem CVD khas terdiri dari bagian-bagian berikut(78; 97; 112; 113):

- 1) sumber dan jalur umpan untuk gas;
- 2) pengendali aliran massa untuk mengukur gas ke dalam sistem;
- 3) ruang reaksi atau reaktor;
- 4) sistem untuk memanaskan wafer di mana film akan disimpan; dan
- 5) sensor suhu.

Ada banyak cara untuk menggambarkan atau mengklasifikasikan reaktor CVD. Misalnya, reaktor dikatakan '*hot-wall*' jika menggunakan sistem pemanas yang memanaskan tidak hanya wafer, tetapi juga dinding reaktor itu sendiri, contohnya adalah pemanasan berseri-seri dari koil yang dipanaskan dengan resistansi. Reaktor '*Cold-wall*' menggunakan sistem pemanas yang meminimalkan pemanasnya dinding reaktor sementara wafer sedang memanaskan, contohnya adalah pemanasan melalui lampu IR di dalam reaktor. Dalam reaktor dinding-panas, film disimpan di dinding dengan cara yang sama seperti yang disimpan pada wafer, sehingga jenis reaktor ini memerlukan pembersihan dinding yang sering(114-116). Cara lain untuk mengklasifikasikan reaktor CVD adalah dengan mendasarkannya pada kisaran tekanan operasinya. Tekanan atmosfer CVD (APCVD) reaktor beroperasi pada tekanan atmosfer, dan oleh karena itu yang paling sederhana dalam desain. Tekanan rendah CVD (LPCVD) reaktor beroperasi pada vakum sedang (30-250 Pa) dan suhu yang lebih tinggi dari reaktor APCVD. Reaktor Plasma Enhanced CVD (PECVD) juga beroperasi di bawah tekanan rendah, tetapi tidak sepenuhnya bergantung pada energi panas untuk mempercepat proses reaksi. Mereka juga mentransfer energi ke gas reaktan dengan menggunakan pancaran cahaya yang diinduksi oleh RF(117-119).

Debit pijar yang digunakan oleh reaktor PECVD dibuat dengan menerapkan medan RF ke gas bertekanan rendah, menciptakan elektron bebas di dalam daerah pembuangan. Elektron cukup diberi energi oleh medan listrik bahwa disosiasi fase gas dan ionisasi gas-gas reaktan terjadi ketika elektron bebas bertabrakan dengan mereka. Spesies energetik kemudian diserap di permukaan film, di mana mereka terkena ion dan pembombardiran elektron, penataan ulang, reaksi dengan spesies lain, pembentukan ikatan baru, dan pembentukan dan pertumbuhan film(120-125).

b. Pirolisis Prekursor

Graphene CVD dibuat dalam dua langkah, pirolisis prekursor dari bahan untuk membentuk karbon, dan pembentukan struktur karbon graphene menggunakan atom karbon dipisahkan. Tahap pertama, pirolisis ke atom karbon yang dipisahkan, harus dilakukan pada permukaan substrat untuk mencegah pengendapan gugusan karbon (jelaga) selama fase gas. Masalah dengan ini adalah bahwa dekomposisi prekursor pirolitik membutuhkan tingkat panas yang ekstrim, dan oleh karena itu katalis logam harus digunakan untuk mengurangi suhu reaksi(18; 126-129).

Tahap kedua menciptakan struktur karbon dari atom karbon yang dipisahkan, juga membutuhkan tingkat panas yang sangat tinggi (lebih dari 2500 derajat Celcius tanpa katalis), jadi katalis sangat penting pada tahap ini untuk mengurangi suhu yang diperlukan untuk reaksi terhadap terjadi pada sekitar 1000 derajat Celcius. Masalah dengan menggunakan katalis adalah bahwa Anda secara efektif memasukkan lebih banyak senyawa ke dalam ruang reaksi, yang akan memiliki efek pada reaksi di dalam ruangan. Salah satu contoh dari efek ini adalah cara atom karbon larut ke dalam substrat tertentu seperti Nikel selama fase pendinginan(130-132).

Apa artinya semua ini adalah bahwa sangat penting bahwa proses CVD sangat ketat terkoordinasi, dan bahwa kontrol ditempatkan pada setiap tahap proses untuk memastikan bahwa reaksi terjadi secara efektif, dan bahwa kualitas graphene yang dihasilkan adalah dari yang tertinggi yang bisa dicapai(133-136).

B. Aplikasi Chemical Vapor Deposition

Salah satu contoh awal dari Aplikasi CVD dengan skala besar adalah proses karbonil untuk pemurnian nikel, seperti yang dikembangkan oleh Mond, Langer, dan Quincke pada tahun 1890. Banyak contoh aplikasi yaitu melibatkan pemurnian atau pemurnian logam dan sejumlah terbatas bukan logam dengan proses karbonil atau halida (89; 137-139). Aplikasi lainnya melibatkan deposisi pelapis untuk ketahanan aus dan korosi, dan pembuatan bentuk struktural dan komponen. Sebagian besar pekerjaan paling awal, hingga pertengahan 1960-an, ditinjau dalam buku oleh Powell, Oxley, dan Blocher. Banyak volume tinggi aplikasi, seperti pemurnian dan produksi bubuk dan pigmen, jelas masih penting secara ekonomi, tetapi sebagian besar baru-baru ini CVD R & D upaya ini ditujukan untuk film tipis endapan. Ada banyak sekali R & D yang sedang berlangsung mengenai CVD film tipis yang digunakan terutama untuk sifat mekanik atau kimia (86; 140; 141).

CVD telah menjadi teknologi pengaktifan yang penting di Indonesia mikroelektronika berbasis silikon; bahkan digunakan pada tahap awal selama pemurnian dan pemurnian silikon unsur. Bergantung kepada perangkat, proses CVD digunakan untuk menyetero film tipis semikonduktor aktif bahan (misalnya didoping Si), konduktif interkoneksi (misalnya tungsten), atau isolasi dielektrik (misalnya SiO₂). Revolusi komunikasi juga bergantung pada beragam teknologi CVD. Beberapa komponen mirip dengan yang digunakan dalam silikon mikroelektronika, tetapi banyak yang unik, melibatkan heterostruktur kompleks epitaxial SiGe atau Senyawa semikonduktor (misalnya, AlGaAs) paduan yang diperlukan untuk menghasilkan frekuensi tinggi (1-100 GHz) pengoperasian perangkat. Komunikasi revolusi juga bergantung pada optoelektronik komponen, seperti laser dioda solid state (perangkat heterostruktur kompleks lain), dan perangkat ini sering ditanam oleh CVD. Bahkan kabel serat optik yang mengirim optik komponen dari jaringan komunikasi diproduksi menggunakan teknik CVD untuk dicapai profil indeks bias yang diinginkan. Bahan optoelektronik yang ditanam oleh CVD yaitu pada industri komunikasi. Salah satu contohnya adalah untuk penerangan solid state menggunakan dioda pemancar cahaya (LED) (32; 33; 142-144). Baru-baru ini, Nichia Chemical adalah perusahaan pertama untuk mengkomersialkan kecerahan biru tinggi dan LED hijau berdasarkan nitrida kelompok-III paduan, misalnya InGaN, yang ditanam di atas substrat menggunakan teknologi CVD. Perusahaan ini juga memperkenalkan warna biru pertama dioda laser, berdasarkan bahan yang sama dan teknologi yang sama. Selain segudang pencahayaan dan aplikasi signage menggunakan LED berwarna, ada minat yang tumbuh dalam menghasilkan yang solid nyatakan sumber cahaya putih untuk menggantikan pijar dan mungkin bahkan sumber fluoresensi. Sumber cahaya putih dapat dicapai dari menggabungkan LED dari panjang gelombang yang berbeda, atau dengan memompa fosfor dengan LED ultraviolet (130; 145-148).

Teknologi menarik lainnya memanfaatkan CVD adalah produksi mikroelektromekanik struktur, atau MEMS. Banyak dari MEMS teknologi berasal dari silikon teknologi mikroelektronika, jadi tidak mengejutkan bahwa CVD memainkan peran penting (149; 150). Perangkat MEMS dibuat dari film silikon polikristalin (polisilikon) disimpan pada wafer silikon, dengan perantara pengorbanan lapisan SiO₂, yang kemudian dihapus oleh etsa kimia. Sebuah contoh perangkat seperti itu, roda gigi yang berdiameter ~ 50-200 mikron. Kedua polisilikon dan oksida disimpan menggunakan CVD atau PECVD. Langkah-langkah CVD menentukan struktur perangkat yang tegak lurus terhadap substrat silikon, sementara banyak litografi dan langkah etsa menentukan struktur di yang lain dua dimensi (3; 151-156). CVD kadang-kadang digunakan untuk menerapkan pelapis untuk mengurangi gesekan setelah 3-D struktur dibuat. Mengintegrasikan perangkat MEMS dengan silikon perangkat mikroelektronik pada chip yang sama.

Bidang nanoteknologi telah dihasilkan banyak minat baru, dan penelitian terfokus program telah dimulai hampir semua negara industri dalam lima tahun terakhir. Di tahun 2000 AS meluncurkan National Nano- Inisiatif teknologi, dengan rencana untuk hampir dua kali lipat upaya R & D berskala nano (21; 130; 148; 157-160). Nano-teknologi adalah topik yang sangat beragam, tetapi beberapa contoh terbaik dari R & D nanoscale yang ada daerah heterostruktur epitaxial untuk laser dioda dan LED yang dikembangkan oleh CVD. Banyak dari perangkat ini mengandung dua dimensi (2-D) Sumur kuantum atau superlattices terdiri dari lapisan epitaxial tegang yang tebal 1-10 nm. Contoh. Selain sumur kuantum,

struktur laser seperti permukaan rongga vertikal memancarkan laser (VCSEL) berisi tumpukan cermin terdiri dari sejumlah besar lapisan dengan bahan semikonduktor yang Tebal biasanya 50-100 nm(161-164). Ketebalan setiap lapisan seringkali harus dikontrol dengan presisi yang lebih baik dari 1 nm. Meskipun persyaratan ini perangkat dapat tumbuh secara rutin dengan relatif hasil tinggi dalam OMVPE tersetel dan terkalibrasi reactor(62; 113; 165; 166). Teknik CVD terkait itu secara otomatis menghasilkan kontrol subnanometer dikenal sebagai lapisan atom epitaxy (ALE). Perluasan 2-D quantum baik R & D melibatkan generasi kabel kuantum (1-D) dan titik-titik kuantum (0-D). Quantum dots adalah sering dianggap sebagai atom buatan, di mana efek kurungan kuantum secara signifikan mengganggu sifat elektronik massal yang umum dari materi(6; 167-169). Salah satu metode pertumbuhan kuantum titik melibatkan penyetoran satu materi pada yang lain dengan ketidakcocokan kisi besar(170-172).

Aplikasi lainnya yaitu InAs on GaAs (100) oleh CVD. Disebabkan oleh sifat antarmuka yang sangat tegang layer, InAs secara spontan membentuk pulau di Skala 10-nm dengan ukuran distribusi yang relatif sempit(13; 14; 31; 69). Elektronik dan optik properti dari titik-titik kuantum InAs adalah secara dramatis berbeda dari InAs massal, memungkinkan untuk fabrikasi perangkat baru. Selain banyak elektronik dan aplikasi optoelektronik yang disebutkan di atas, aplikasi baru CVD juga digunakan untuk menghasilkan komponen makroskopik (10 cm sebagai lawan 1 nm). Salah satu contoh yang menarik adalah produksi ruang dorong Ir / Re untuk cairan motor roket. Untuk struktur ini lapisan CVD rumen yang tebal diaplikasikan pada pengorbanan molibdenum mandrel, yang nantinya dihapus dengan etsa. Contoh lain adalah produksi bahan optik inframerah berskala besar (ZnSe dan / atau ZnS hingga beberapa kaki)(173-175).³²

Pemrosesan CVD suhu tinggi telah berkembang, dengan potensi besar untuk aplikasi komersial. Sebagai contoh, kelompok peneliti John Hart, seorang profesor teknik mesin, telah membangun sistem pemrosesan roll-to-roll menggunakan CVD untuk membuat lembaran graphene, bahan dengan aplikasi potensial mulai dari layar besar hingga penyaringan air(120-122). sistem. Kelompok Hart dan lain-lain telah menggunakan CVD untuk menghasilkan array besar nanotube karbon, bahan dengan potensi sebagai elektroda baru untuk baterai atau sel bahan bakar(176; 177).

Deposisi uap kimia digunakan dalam banyak proses fabrikasi semikonduktor wafer, termasuk produksi film tipis amorf dan polikristalin (seperti silikon polikristalin), pengendapan SiO₂ (CVD SiO₂) dan silikon nitrida, dan pertumbuhan kristal tunggal silikon lapisan epitaxial(173-175).

Pelapis CVD digunakan dalam banyak aplikasi manufaktur sebagai lapisan tahan aus: penggilingan karbida dan sisipan balik, komponen aus, beberapa alat pemroses plastik, dll. Namun, aplikasi yang paling umum untuk pelapisan CVD adalah untuk alat pembentuk logam. Lapisan CVD memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap jenis aus dan menyakitkan yang biasanya terlihat selama banyak aplikasi pembentuk logam(150; 178-180).

Dalam aplikasi pembentuk logam tegangan tinggi, di mana toleransi alat dan izin substrat, proses pelapisan CVD suhu tinggi akan berkinerja lebih baik daripada proses "dingin" seperti PVD, krom padat-tipis (TDC), nitridasi, dll. Ikatan kimia / metalurgi yang hasil dari proses pelapisan CVD menciptakan karakteristik adhesi yang tidak dapat diduplikasi dengan proses "dingin". Adhesi yang ditingkatkan ini melindungi peralatan pembentuk dari gesekan gesekan yang diakibatkan oleh tekanan geser yang berat yang dihasilkan dalam aplikasi pembentuk logam berat(130; 148; 161; 162; 181).

C. Reaksi Chemical Vapor Deposisi

Selama proses deposisi uap kimia, gas-gas reaktan tidak hanya bereaksi dengan bahan substrat di permukaan wafer (atau sangat dekat dengannya), tetapi juga dalam fase gas di atmosfer reaktor. Reaksi yang terjadi di permukaan substrat dikenal sebagai reaksi heterogen, dan secara selektif terjadi pada permukaan wafer yang dipanaskan di mana mereka menciptakan film berkualitas baik(96; 97; 167; 182-185).

Reaksi yang terjadi dalam fase gas dikenal sebagai reaksi homogen . Reaksi homogen membentuk agregat fase gas dari material deposit, yang menempel ke permukaan dengan buruk dan pada saat yang sama membentuk film dengan kerapatan rendah dengan banyak cacat. Singkatnya, reaksi heterogen jauh lebih diinginkan daripada reaksi homogen selama deposisi uap kimia(61; 168; 169; 186; 187).

Deposisi uap kimia (CVD) adalah proses yang dikendalikan atmosfer yang dilakukan pada suhu tinggi (~ 1925 ° F) dalam reaktor CVD. Selama proses ini, lapisan film tipis terbentuk sebagai hasil reaksi antara berbagai fase gas dan permukaan substrat yang dipanaskan dalam reaktor CVD. Karena gas yang berbeda diangkut melalui reaktor, lapisan pelapis yang berbeda dibentuk pada substrat perkakas(123-125; 188).Misalnya, TiN terbentuk sebagai hasil reaksi kimia berikut:

Titanium carbide (TiC) dibentuk sebagai hasil reaksi kimia berikut:

Produk akhir dari reaksi ini adalah lapisan keras, tahan aus yang menunjukkan ikatan kimia dan metalurgi ke substrat(189-200).

4. Kesimpulan

Berdasarkan literatur dapat disimpulkan bahwa proses chemical vapor deposition merupakan metode deposisi yang digunakan untuk menghasilkan bahan padat berkualitas tinggi dan berkinerja tinggi yang biasanya dibawah vakum. Metode sol gel akan menghasilkan suatu material berupa berlian sintesis, thin film coating, lapisan emas dengan ketebalan yang tipis. Deposisi uap kimia (CVD) mengacu pada pembentukan film padat non-volatil pada substrat dari reaksi reaktan kimia fase uap yang mengandung konstituen yang tepat. Adapun aplikasi CVD antara lain digunakan untuk menghasilkan nanoscale, nanotubs, crystal, berlian, film lapisan tipis.(146; 147)

5. Referensi

1. Post P, Wurlitzer L, Maus-Friedrichs W, Weber AP. 2018. Characterization and Applications of Nanoparticles Modified in-Flight with Silica or Silica-Organic Coatings. *Nanomaterials* 8
2. Pour GB, Aval LF, Eslami S. 2018. Sensitive Capacitive-type Hydrogen Sensor Based on Ni Thin Film in Different Hydrogen Concentrations. *Current nanoscience* 14:136-42
3. Qi Y, Deng B, Guo X, Chen S, Gao J, et al. 2018. Switching Vertical to Horizontal Graphene Growth Using Faraday Cage-Assisted PECVD Approach for High-Performance Transparent Heating Device. *Advanced materials* 30
4. Qian Y, Kang DJ. 2018. Large-Area High-Quality AB-Stacked Bilayer Graphene on h-BN/Pt Foil by Chemical Vapor Deposition. *ACS applied materials & interfaces* 10:29069-75
5. Qin J, Wang C, Wang Y, Lu R, Zheng L, et al. 2018. Synthesis and growth mechanism of carbon nanotubes growing on carbon fiber surfaces with improved tensile strength. *Nanotechnology* 29:395602
6. Chen W, Xiao P, Chen H, Zhang H, Zhang Q, Chen Y. 2018. Polymeric Graphene Bulk Materials with a 3D Cross-Linked Monolithic Graphene Network. *Advanced materials*:e1802403
7. Perrotta A, Christian P, Jones AOF, Muralter F, Coclite AM. 2018. Growth Regimes of Poly(perfluorodecyl acrylate) Thin Films by Initiated Chemical Vapor Deposition. *Macromolecules* 51:5694-703

8. Petroski K, Poges S, Monteleone C, Grady J, Bhatt R, Suib SL. 2018. Rapid Chemical Vapor Infiltration of Silicon Carbide Minicomposites at Atmospheric Pressure. *ACS applied materials & interfaces* 10:4986-92
9. Piquemal-Banci M, Galceran R, Godel F, Caneva S, Martin MB, et al. 2018. Insulator-to-Metallic Spin-Filtering in 2D-Magnetic Tunnel Junctions Based on Hexagonal Boron Nitride. *ACS nano* 12:4712-8
10. Zhang M, Guo Z, Zhao L, Yang S, Zhao L. 2018. The Effect of Buffer Types on the In_{0.82}Ga_{0.18}As Epitaxial Layer Grown on an InP (100) Substrate. *Materials* 11
11. Zhang S, Liu J, Ruiz KH, Tu R, Yang M, et al. 2018. Morphological Evolution of Vertically Standing Molybdenum Disulfide Nanosheets by Chemical Vapor Deposition. *Materials* 11
12. Zhang X, Choudhury TH, Chubarov M, Xiang Y, Jariwala B, et al. 2018. Diffusion-Controlled Epitaxy of Large Area Coalesced WSe₂ Monolayers on Sapphire. *Nano letters* 18:1049-56
13. Yang P, Zou X, Zhang Z, Hong M, Shi J, et al. 2018. Batch production of 6-inch uniform monolayer molybdenum disulfide catalyzed by sodium in glass. *Nature communications* 9:979
14. Yang X, Du W, Ji X, Zhang X, Yang T. 2018. Defect-free InAsSb nanowire arrays on Si substrates grown by selective-area metal-organic chemical vapor deposition. *Nanotechnology* 29:405601
15. Ye R, James DK, Tour JM. 2018. Laser-Induced Graphene. *Accounts of chemical research* 51:1609-20
16. Jiang S, Hou PX, Chen ML, Wang BW, Sun DM, et al. 2018. Ultrahigh-performance transparent conductive films of carbon-welded isolated single-wall carbon nanotubes. *Science advances* 4:eap9264
17. Komane PP, Kumar P, Marimuthu T, Toit LCD, Kondiah PPD, et al. 2018. Dexamethasone-Loaded, PEGylated, Vertically Aligned, Multiwalled Carbon Nanotubes for Potential Ischemic Stroke Intervention. *Molecules* 23
18. Krishna VM, Somanathan T, Manikandan E, Tadi KK, Uvarajan S. 2018. Neurotransmitter Dopamine Enhanced Sensing Detection Using Fibre-Like Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition Technique. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 18:5380-9
19. Ahmet IY, Hill MS, Raithby PR, Johnson AL. 2018. Tin guanidinato complexes: oxidative control of Sn, SnS, SnSe and SnTe thin film deposition. *Dalton transactions* 47:5031-48
20. Bitencourt SB, Dos Santos DM, da Silva EVF, Barao VAR, Rangel EC, et al. 2018. Characterisation of a new plasma-enhanced film to improve shear bond strength between zirconia and veneering ceramic. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 92:196-205
21. Black A, Urbanos FJ, Osorio MR, Miranda R, Vazquez de Parga AL, Granados D. 2018. Encapsulating Chemically Doped Graphene via Atomic Layer Deposition. *ACS applied materials & interfaces* 10:8190-6
22. Uchida Y, Nakandakari S, Kawahara K, Yamasaki S, Mitsuhashi M, Ago H. 2018. Controlled Growth of Large-Area Uniform Multilayer Hexagonal Boron Nitride as an Effective 2D Substrate. *ACS nano*
23. Vangala S, Siegel G, Prusnick T, Snure M. 2018. Wafer scale BN on sapphire substrates for improved graphene transport. *Scientific reports* 8:8842
24. Vos R, Rolin C, Rip J, Conard T, Steylaerts T, et al. 2018. Chemical Vapor Deposition of Azidoalkylsilane Monolayer Films. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 34:1400-9
25. Wu Y, Li F, Chen W, Xiang Q, Ma Y, et al. 2018. Coupling Interface Constructions of MoS₂ /Fe₅ Ni₄ S₈ Heterostructures for Efficient Electrochemical Water Splitting. *Advanced materials*:e1803151
26. Xie H, Gu Y, Mu H. 2018. Photocatalytic Performance of 3D Ni/Graphene/ZnO Composites Fabricated by Hydrothermal Processing. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 18:4822-33
27. Xing X, Wang H, Xiao G, Yang S, Shu X. 2018. Assessment of titanium metallization thin film deposited on alumina substrate: Microstructure and nano-indentation. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 80:235-45
28. Wang X, Sheng Y, Chang RJ, Lee JK, Zhou Y, et al. 2018. Chemical Vapor Deposition Growth of Two-Dimensional Monolayer Gallium Sulfide Crystals Using Hydrogen Reduction of Ga₂S₃. *ACS omega* 3:7897-903
29. Wang Z, Shen Y, Ito Y, Zhang Y, Du J, et al. 2018. Synthesizing 1T-1H Two-Phase Mo_{1-x}W_xS₂ Monolayers by Chemical Vapor Deposition. *ACS nano* 12:1571-9
30. Wu H, Zhou X, Li J, Li X, Li B, et al. 2018. Ultrathin Molybdenum Dioxide Nanosheets as Uniform and Reusable Surface-Enhanced Raman Spectroscopy Substrates with High Sensitivity. *Small*:e1802276

31. Yang ZD, Yang XY, Liu T, Chang ZW, Yin YB, et al. 2018. In Situ CVD Derived Co-N-C Composite as Highly Efficient Cathode for Flexible Li-O₂ Batteries. *Small*:e1800590
32. Chiappe D, Ludwig J, Leonhardt A, El Kazzi S, Nalin Mehta A, et al. 2018. Layer-controlled epitaxy of 2D semiconductors: bridging nanoscale phenomena to wafer-scale uniformity. *Nanotechnology* 29:425602
33. Chin HT, Lee JJ, Hofmann M, Hsieh YP. 2018. Impact of growth rate on graphene lattice-defect formation within a single crystalline domain. *Scientific reports* 8:4046
34. Cho S, Jung I, Jang HJ, Liu L, Park S. 2018. Bimetallic junction mediated synthesis of multilayer graphene edges towards ultrahigh capacity for lithium ion batteries. *Nanoscale* 10:5214-20
35. Dechamps S, Nguyen VH, Charlier JC. 2018. Ab initio quantum transport in polycrystalline graphene. *Nanoscale* 10:7759-68
36. Munoz-Sandoval E, Fajardo-Diaz JL, Sanchez-Salas R, Cortes-Lopez AJ, Lopez-Urias F. 2018. Two Sprayer CVD Synthesis of Nitrogen-doped Carbon Sponge-type Nanomaterials. *Scientific reports* 8:2983
37. Murthy AA, Li Y, Palacios E, Li Q, Hao S, et al. 2018. Optically Active 1D MoS₂ Nanobelts. *ACS applied materials & interfaces* 10:6799-804
38. Liu J, Ye J, Li Z, Otake KI, Liao Y, et al. 2018. Beyond the Active Site: Tuning the Activity and Selectivity of a Metal-Organic Framework-Supported Ni Catalyst for Ethylene Dimerization. *Journal of the American Chemical Society* 140:11174-8
39. Majewski GP, Rodan K, Fields K, Falla TJ. 2018. Characterization of bound water in skin hydrators prepared with and without a 3D3P interpenetrating polymer network. *Skin research and technology : official journal of International Society for Bioengineering and the Skin*
40. Malkin AD, Ye SH, Lee EJ, Yang X, Zhu Y, et al. 2018. Development of zwitterionic sulfobetaine block copolymer conjugation strategies for reduced platelet deposition in respiratory assist devices. *Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials*
41. Rahman R, Klesko JP, Dangerfield A, Mattson EC, Chabal YJ. 2018. Selective Growth of Interface Layers from Reactions of Sc(MeCp)₂(Me₂pz) with Oxide Substrates. *ACS applied materials & interfaces*
42. Salzmann P, Perrotta A, Coclite AM. 2018. Different Response Kinetics to Temperature and Water Vapor of Acrylamide Polymers Obtained by Initiated Chemical Vapor Deposition. *ACS applied materials & interfaces* 10:6636-45
43. Sojoudi H, Arabnejad H, Raiyan A, Shirazi SA, McKinley GH, Gleason KK. 2018. Scalable and durable polymeric icephobic and hydrate-phobic coatings. *Soft matter* 14:3443-54
44. Su L, Smith PM, Anand P, Reeja-Jayan B. 2018. Surface Engineering of a LiMn₂O₄ Electrode Using Nanoscale Polymer Thin Films via Chemical Vapor Deposition Polymerization. *ACS applied materials & interfaces* 10:27063-73
45. X Li LC, RS Ruoff. 2016. Synthesis of Graphene Films on Copper Foils by Chemical Vapor Deposition.
46. X Ling YL, Y Lin, W Fang, L Yu. 2014. Role of the Seeding Promoter in MoS₂ Growth by Chemical Vapor Deposition.
47. M Ma YM, M Gupta, KK Gleason. 2005. Superhydrophobic fabrics produced by electrospinning and chemical vapor deposition.
48. X Li CM, A Venugopal. 2011. Large-area graphene single crystals grown by low-pressure chemical vapor deposition of methane on copper.
49. YH Lee XZ, W Zhang, MT Chang. 2012. Synthesis of Large-Area MoS₂ Atomic Layers with Chemical Vapor Deposition.
50. Z Wang YS, Y Ito, Y Zhang, J Du, T Fujita. 2018. Synthesizing 1T-1H Two-Phase Mo_{1-x}W_xS₂ Monolayers by Chemical Vapor Deposition.
51. X Zhou LG, W Tian, Q Zhang, S Jin, H Li. 2015. Ultrathin SnSe₂ Flakes Grown by Chemical Vapor Deposition for High-Performance Photodetectors.
52. WZ Xu ZY, YJ Zeng, LP Zhu, BH Zhao. 2006. ZnO light-emitting diode grown by plasma-assisted metal organic chemical vapor deposition.
53. Zhao L, Shang Q, Gao Y, Shi J, Liu Z, et al. 2018. High-Temperature Continuous-Wave Pumped Lasing from Large-Area Monolayer Semiconductors Grown by Chemical Vapor Deposition. *ACS nano*

54. Zheng Q, Zhou W, Peng Y, Yin Y, Zhong M, et al. 2018. Surface polarons and optical micro-cavity modulated broad range multi-modes emission of Te-doped CdS nanowires. *Nanotechnology*
55. Zhou Q, Su S, Hu D, Lin L, Yan Z, et al. 2018. Ultra-thin MoS₂ coated Ag@Si nanosphere arrays as efficient and stable photocathode for solar-driven hydrogen production. *Nanotechnology*
56. Zhou Q, Su S, Hu D, Lin L, Yan Z, et al. 2018. Ultrathin MoS₂-coated Ag@Si nanosphere arrays as an efficient and stable photocathode for solar-driven hydrogen production. *Nanotechnology* 29:105402
57. Zhou Y, Tan H, Sheng Y, Fan Y, Xu W, Warner JH. 2018. Utilizing Interlayer Excitons in Bilayer WS₂ for Increased Photovoltaic Response in Ultrathin Graphene Vertical Cross-Bar Photodetecting Tunneling Transistors. *ACS nano* 12:4669-77
58. X Wang HF, Y Wu, L Jiao. 2013. Controlled Synthesis of Highly Crystalline MoS₂ Flakes by Chemical Vapor Deposition.
59. B Xiang PW, X Zhang, SA Dayeh, DPR Aplin. 2007. Rational synthesis of p-type zinc oxide nanowire arrays using simple chemical vapor deposition.
60. Cayzac W, Pomorski M, Blazevic A, Canaud B, Deslandes D, et al. 2018. CVD diamond detector with interdigitated electrode pattern for time-of-flight energy-loss measurements of low-energy ion bunches. *The Review of scientific instruments* 89:053301
61. Dong R, Zhang T, Feng X. 2018. Interface-Assisted Synthesis of 2D Materials: Trend and Challenges. *Chemical reviews* 118:6189-235
62. Dou W, Benamara M, Mosleh A, Margetis J, Grant P, et al. 2018. Investigation of GeSn Strain Relaxation and Spontaneous Composition Gradient for Low-Defect and High-Sn Alloy Growth. *Scientific reports* 8:5640
63. Fan X, Wagner S, Schadlich P, Speck F, Kataria S, et al. 2018. Direct observation of grain boundaries in graphene through vapor hydrofluoric acid (VHF) exposure. *Science advances* 4:eaar5170
64. Fang X, Wei P, Wang L, Wang X, Chen B, et al. 2018. Transforming Monolayer Transition-Metal Dichalcogenide Nanosheets into One-Dimensional Nanoscrolls with High Photosensitivity. *ACS applied materials & interfaces* 10:13011-8
65. Manawi YM, Ihsanullah, Samara A, Al-Ansari T, Atieh MA. 2018. A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. *Materials* 11
66. Manuel JM, Jimenez JJ, Morales FM, Lacroix B, Santos AJ, et al. 2018. Engineering of III-Nitride Semiconductors on Low Temperature Co-fired Ceramics. *Scientific reports* 8:6879
67. Martella C, Mennucci C, Lamperti A, Cappelluti E, de Mongeot FB, Molle A. 2018. Designer Shape Anisotropy on Transition-Metal-Dichalcogenide Nanosheets. *Advanced materials* 30
68. LG De Arco YZ, A Kumar. 2009. Synthesis, transfer, and devices of single-and few-layer graphene by chemical vapor deposition.
69. Yang ZX, Yin Y, Sun J, Bian L, Han N, et al. 2018. Chalcogen passivation: an in-situ method to manipulate the morphology and electrical property of GaAs nanowires. *Scientific reports* 8:6928
70. A Reina XJ, J Ho, D Nezich, H Son, V Bulovic. 2008. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition.
71. Cheng Z, Bougher T, Bai T, Wang SY, Li C, et al. 2018. Probing Growth-Induced Anisotropic Thermal Transport in High-Quality CVD Diamond Membranes by Multifrequency and Multiple-Spot-Size Time-Domain Thermorefectance. *ACS applied materials & interfaces* 10:4808-15
72. Gebbie MA, Ishiwata H, McQuade PJ, Petrak V, Taylor A, et al. 2018. Experimental measurement of the diamond nucleation landscape reveals classical and nonclassical features. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115:8284-9
73. Rani R, Panda K, Kumar N, Titovich KA, Ivanovich KV, et al. 2018. Tribological Properties of Ultrananocrystalline Diamond Films: Mechanochemical Transformation of Sliding Interfaces. *Scientific reports* 8:283
74. Rydygier M, Jastrzab M, Krzempek D, Nowak T, Grzanka L, et al. 2018. RADIOTHERAPY PROTON BEAM PROFILOMETRY WITH scCVD DIAMOND DETECTOR IN SINGLE PARTICLE MODE. *Radiation protection dosimetry* 180:282-5
75. Sankaran KJ, Ficek M, Kunuku S, Panda K, Yeh CJ, et al. 2018. Self-organized multi-layered graphene-boron-doped diamond hybrid nanowalls for high-performance electron emission devices. *Nanoscale* 10:1345-55

76. Yang B, Molina E, Kim J, Barroso D, Lohmann M, et al. 2018. Effect of Distance on Photoluminescence Quenching and Proximity-Induced Spin-Orbit Coupling in Graphene/WSe₂ Heterostructures. *Nano letters* 18:3580-5
77. Yang L, Mao Y, Jansz J. 2018. Chinese Urban Hui Muslims' Access to and Evaluation of Cardiovascular Diseases-Related Health Information from Different Sources. *International journal of environmental research and public health* 15
78. Ershov KS, Kochubei SA, Kiselev VG, Baklanov AV. 2018. Decomposition Pathways of Titanium Isopropoxide Ti(O(i)Pr)₄: New Insights from UV-Photodissociation Experiments and Quantum Chemical Calculations. *The journal of physical chemistry. A* 122:1064-70
79. Filatova EA, Hausmann D, Elliott SD. 2018. Understanding the Mechanism of SiC Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) and Developing Routes toward SiC Atomic Layer Deposition (ALD) with Density Functional Theory. *ACS applied materials & interfaces* 10:15216-25
80. Gao Z, Ji Q, Shen PC, Han Y, Leong WS, et al. 2018. In-situ Generated Volatile Precursor for CVD Growth of a Semimetallic 2D Dichalcogenide. *ACS applied materials & interfaces*
81. Qiu L, Dong JC, Ding F. 2018. Selective growth of two-dimensional phosphorene on catalyst surface. *Nanoscale* 10:2255-9
82. Qiu Z, Li P, Li Z, Yang J. 2018. Atomistic Simulations of Graphene Growth: From Kinetics to Mechanism. *Accounts of chemical research* 51:728-35
83. Alayan HM, Alsaadi MA, Das R, Abo-Hamad A, Ibrahim RK, et al. 2018. The formation of hybrid carbon nanomaterial by chemical vapor deposition: an efficient adsorbent for enhanced removal of methylene blue from aqueous solution. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 77:1714-23
84. Algarni Z, Singh A, Philipose U. 2018. Synthesis of Amorphous InSb Nanowires and a Study of the Effects of Laser Radiation and Thermal Annealing on Nanowire Crystallinity. *Nanomaterials* 8
85. Ali Z, Richey NE, Bock DC, Abboud KA, Akhtar J, et al. 2018. N,N-Disubstituted-N'-acylthioureas as modular ligands for deposition of transition metal sulfides. *Dalton transactions* 47:2719-26
86. Lim YF, Priyadarshi K, Bussolotti F, Gogoi PK, Cui X, et al. 2018. Modification of Vapor Phase Concentrations in MoS₂ Growth Using a NiO Foam Barrier. *ACS nano* 12:1339-49
87. Lin YC, Jariwala B, Bersch BM, Xu K, Nie Y, et al. 2018. Realizing Large-Scale, Electronic-Grade Two-Dimensional Semiconductors. *ACS nano* 12:965-75
88. Martin AA, Depond PJ. 2018. Formation mechanisms of boron oxide films fabricated by large-area electron beam-induced deposition of trimethyl borate. *Beilstein journal of nanotechnology* 9:1282-7
89. Mochalov L, Dorosz D, Kudryashov M, Nezhdanov A, Usanov D, et al. 2018. Infrared and Raman spectroscopy study of AsS chalcogenide films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 193:258-63
90. Wang S, Ji X, Ao Y, Yu J. 2018. Vertically Aligned N-Doped Diamond/Graphite Hybrid Nanosheets Epitaxially Grown on B-Doped Diamond Films as Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction in an Alkaline Medium. *ACS applied materials & interfaces* 10:29866-75
91. Wang S, Ji X, Ao Y, Yu J. 2018. Substrate-orientation dependent epitaxial growth of highly ordered diamond nanosheet arrays by chemical vapor deposition. *Nanoscale* 10:2812-9
92. Wang T, Handschuh-Wang S, Huang L, Zhang L, Jiang X, et al. 2018. Controlling Directional Liquid Motion on Micro- and Nanocrystalline Diamond/beta-SiC Composite Gradient Films. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 34:1419-28
93. Xiang J, Pang S, Xie L, Gao F, Hu X, et al. 2018. Mechanism-Based FE Simulation of Tool Wear in Diamond Drilling of SiCp/Al Composites. *Materials* 11
94. Tchouaso MT, Kasiwattanawut H, Prelas MA. 2018. Energy response of diamond sensor to beta radiation. *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine* 139:66-9
95. Duncombe TA, Raad M, Bowen BP, Singh AK, Northen TR. 2018. Insulator Nanostructure Desorption Ionization Mass Spectrometry. *Analytical chemistry* 90:9657-61
96. Durkan C. 2018. Periodic ripples on thermally-annealed graphene on Cu (110)-reconstruction or moire pattern? *Nanotechnology* 29:455705

97. E S, Li C, Li T, Geng R, Li Q, et al. 2018. Ammonium-tungstate-promoted growth of boron nitride nanotubes. *Nanotechnology* 29:195604
98. Giese A, Schipporeit S, Buck V, Wohrl N. 2018. Synthesis of carbon nanowalls from a single-source metal-organic precursor. *Beilstein journal of nanotechnology* 9:1895-905
99. Halbig CE, Martin O, Hauke F, Eigler S, Hirsch A. 2018. Oxo-Functionalized Graphene: A Versatile Precursor for Alkylated Graphene Sheets by Reductive Functionalization. *Chemistry*
100. Hong Y, Choi IA, Seo WS. 2018. Au nanoparticle@hollow mesoporous carbon with FeCo/graphitic shell nanoparticles as a magnetically recyclable yolk-shell nanocatalyst for catalytic reduction of nitroaromatics. *Scientific reports* 8:7469
101. Imam M, Hoglund C, Schmidt S, Hall-Wilton R, Birch J, Pedersen H. 2018. Plasma CVD of hydrogenated boron-carbon thin films from triethylboron. *The Journal of chemical physics* 148:034701
102. Journot T, Bouchiat V, Gayral B, Dijon J, Hyot B. 2018. Self-Assembled UV Photodetector Made by Direct Epitaxial GaN Growth on Graphene. *ACS applied materials & interfaces* 10:18857-62
103. Junge Puring K, Zywitzki D, Taffa DH, Rogalla D, Winter M, et al. 2018. Rational Development of Cobalt beta-Ketoiminate Complexes: Alternative Precursors for Vapor-Phase Deposition of Spinel Cobalt Oxide Photoelectrodes. *Inorganic chemistry* 57:5133-44
104. Khan MD, Aamir M, Sohail M, Sher M, Baig N, et al. 2018. Bis(selenobenzoato)dibutyltin(IV) as a single source precursor for the synthesis of SnSe nanosheets and their photo-electrochemical study for water splitting. *Dalton transactions* 47:5465-73
105. Kim EH, Lim MH, Lah MS, Koo SM. 2018. Synthesis and characterization of heteroleptic titanium MOCVD precursors for TiO₂ thin films. *Dalton transactions* 47:2415-21
106. Kim H, Ren D, Farrell AC, Huffaker DL. 2018. Catalyst-free selective-area epitaxy of GaAs nanowires by metal-organic chemical vapor deposition using triethylgallium. *Nanotechnology* 29:085601
107. Oyelade A, Yost AJ, Benker N, Dong B, Knight S, et al. 2018. Composition-dependent charge transport in boron carbides alloyed with aromatics: PECVD aniline/orthocarborane films. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*
108. Park JM, Jang SJ, Lee SI, Lee WJ. 2018. Novel Cyclosilazane-Type Silicon Precursor and Two-Step Plasma for Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride. *ACS applied materials & interfaces* 10:9155-63
109. Feng H, Jia Y, Shen D, Zhou Y, Chen T, et al. 2018. The effect of chemical vapor deposition temperature on the performance of binder-free sewage sludge-derived anodes in microbial fuel cells. *The Science of the total environment* 635:45-52
110. Farhanian D, De Crescenzo G, Tavares JR. 2018. Large-Scale Encapsulation of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles via Syngas Photo-Initiated Chemical Vapor Deposition. *Scientific reports* 8:12223
111. Fabbiani M, Pazzi M, Vincenti M, Tabacch G, Fois E, Martra G. 2018. Does the Abiotic Formation of Oligopeptides on TiO₂ Nanoparticles Require Special Catalytic Sites? Apparently Not. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 18:5854-7
112. Ellsworth AA, Walker AV. 2018. Effect of Ethanolamines on the Electroless Deposition of Copper on Functionalized Organic Surfaces. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 34:4142-9
113. Du L, Yang L, Hu Z, Zhang J, Huang C, et al. 2018. Thickness-controlled direct growth of nanographene and nanographite film on non-catalytic substrates. *Nanotechnology* 29:215711
114. Zeng M, Fu L. 2018. Controllable Fabrication of Graphene and Related Two-Dimensional Materials on Liquid Metals via Chemical Vapor Deposition. *Accounts of chemical research*
115. Zemlyanov DY, Jespersen M, Zakharov DN, Hu J, Paul R, et al. 2018. Versatile technique for assessing thickness of 2D layered materials by XPS. *Nanotechnology* 29:115705
116. Yu SH, Chua DHC. 2018. Toward High-Performance and Low-Cost Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalysts: Nanostructuring Cobalt Phosphide (CoP) Particles on Carbon Fiber Paper. *ACS applied materials & interfaces* 10:14777-85
117. Yao H, Liu L, Wang Z, Li H, Chen L, et al. 2018. Significant photoluminescence enhancement in WS₂ monolayers through Na₂S treatment. *Nanoscale* 10:6105-12
118. Yao Z, Liu J, Xu K, Chow EKC, Zhu W. 2018. Material Synthesis and Device Aspects of Monolayer Tungsten Diselenide. *Scientific reports* 8:5221

119. Yao Z, Xia X, Zhou CA, Zhong Y, Wang Y, et al. 2018. Smart Construction of Integrated CNTs/Li₄Ti₅O₁₂ Core/Shell Arrays with Superior High-Rate Performance for Application in Lithium-Ion Batteries. *Advanced science* 5:1700786
120. M Mawardi DD, R Zainul. 2018. Characterization of PCC Cement by Addition of Napa Soil from Subdistrict Sarilamak 50 Kota District as Alternative Additional Material for Semen Padang. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 335:012034
121. Mawardi Anwar EM, Soleh Kosela, Widayanti Wibowo, Rahadian Zainul. 2015. Study of Pb(II) Biosorption from Aqueous Solution Using Immobilized Spirogyra Subsalsa Biomass. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 7:715-22
122. R Zainul BO, I Dewata, J Efendi. 2018. Thermal and Surface Evaluation on The Process of Forming a Cu₂O/CuO Semiconductor Photocatalyst on a Thin Copper Plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 335:012039
123. Rahadian Zainul AA, Hermansyah Aziz, Syukri Arief, Syukri, Edison Munaf. 2015. Design of Photovoltaic Cell with Copper Oxide Electrode by using Indoor Lights. *Research Journal of Pharmaceutical Biological and Chemical Science* 6:353-61
124. Rahadian Zainul AA, Hermansyah Aziz, Syukri Arief, Syukri Darajat. 2015. Modifikasi dan Karakteristik I-V Sel Fotovoltaik Cu₂O/Cu-Gel Na₂SO₄ Melalui Illuminasi Lampu Neon. *EKSAKTA Berkala Ilmiah Bidang MIPA* 2:50
125. Rahadian Zainul AA, Hermansyah Aziz, Syukri Arief, Syukri Darajat. 2015. Disain Geometri Reaktor Fotosel Cahaya Ruang. *Jurnal Riset Kimia* 8:131
126. Kim SJ, Kwon O, Kim DW, Kim J, Jung HT. 2018. Influence of graphene thickness and grain boundaries on MoS₂ wrinkle nanostructures. *Physical chemistry chemical physics : PCCP* 20:17000-8
127. Kim SJ, Shin DH, Choi YS, Rho H, Park M, et al. 2018. Ultrastrong Graphene-Copper Core-Shell Wires for High-Performance Electrical Cables. *ACS nano* 12:2803-8
128. Kim YC, Nguyen VT, Lee S, Park JY, Ahn YH. 2018. Evaluation of Transport Parameters in MoS₂/Graphene Junction Devices Fabricated by Chemical Vapor Deposition. *ACS applied materials & interfaces* 10:5771-8
129. Kovalska E, Pavlov I, Deminskyi P, Baldycheva A, Ilday FO, Kocabas C. 2018. NLL-Assisted Multilayer Graphene Patterning. *ACS omega* 3:1546-54
130. Barreca D, Bigiani L, Monai M, Carraro G, Gasparotto A, et al. 2018. Supported Mn₃O₄ Nanosystems for Hydrogen Production through Ethanol Photoreforming. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 34:4568-74
131. Barry ST, Teplyakov AV, Zaera F. 2018. The Chemistry of Inorganic Precursors during the Chemical Deposition of Films on Solid Surfaces. *Accounts of chemical research* 51:800-9
132. Bautista-Gomez J, Forzano AV, Austin JM, Collinson MM, Higgins DA. 2018. Vapor-Phase Plotting of Organosilane Chemical Gradients. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 34:9665-72
133. Kwon YH, Kumar S, Bae J, Seo Y. 2018. CVD-graphene for low equivalent series resistance in rGO/CVD-graphene/Ni-based supercapacitors. *Nanotechnology* 29:195404
134. Leardini F, Flores E, Galvis EA, Ferrer IJ, Ares JR, et al. 2018. Chemical vapor deposition growth of boron-carbon-nitrogen layers from methylamine borane thermolysis products. *Nanotechnology* 29:025603
135. Lee E, Lee SG, Lee HC, Jo M, Yoo MS, Cho K. 2018. Direct Growth of Highly Stable Patterned Graphene on Dielectric Insulators using a Surface-Adhered Solid Carbon Source. *Advanced materials* 30:e1706569
136. Lee HC, Bong H, Yoo MS, Jo M, Cho K. 2018. Copper-Vapor-Assisted Growth and Defect-Healing of Graphene on Copper Surfaces. *Small* 14:e1801181
137. Mochalov L, Dorosz D, Nezhdanov A, Kudryashov M, Zelentsov S, et al. 2018. Investigation of the composition-structure-property relationship of As_xTe_{100-x} films prepared by plasma deposition. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 191:211-6
138. Mi Y, Liu Z, Shang Q, Niu X, Shi J, et al. 2018. Fabry-Perot Oscillation and Room Temperature Lasing in Perovskite Cube-Corner Pyramid Cavities. *Small* 14

139. Megalini L, Suran Brunelli ST, Charles WO, Taylor A, Isaac B, et al. 2018. Strain-Compensated InGaAsP Superlattices for Defect Reduction of InP Grown on Exact-Oriented (001) Patterned Si Substrates by Metal Organic Chemical Vapor Deposition. *Materials* 11
140. Liao Y, Jiang H, Wei N, Laiho P, Zhang Q, et al. 2018. Direct Synthesis of Colorful Single-Walled Carbon Nanotube Thin Films. *Journal of the American Chemical Society* 140:9797-800
141. Li Z, E R, Lu C, Prakoso AB, Foldyna M, et al. 2018. Optical Study and Experimental Realization of Nanostructured Back Reflectors with Reduced Parasitic Losses for Silicon Thin Film Solar Cells. *Nanomaterials* 8
142. Chen Y, Huang S, Ji X, Adepalli K, Yin K, et al. 2018. Tuning Electronic Structure of Single Layer MoS₂ through Defect and Interface Engineering. *ACS nano* 12:2569-79
143. Chen Z, Zhang X, Dou Z, Wei T, Liu Z, et al. 2018. High-Brightness Blue Light-Emitting Diodes Enabled by a Directly Grown Graphene Buffer Layer. *Advanced materials* 30:e1801608
144. Cho DH, Lee WJ, Wi JH, Han WS, Yun SJ, et al. 2018. Enhanced sulfurization reaction of molybdenum using a thermal cracker for forming two-dimensional MoS₂ layers. *Physical chemistry chemical physics : PCCP* 20:16193-201
145. Bahariqushchi R, Raciti R, Kasapoglu AE, Gur E, Sezen M, et al. 2018. Stress evolution of Ge nanocrystals in dielectric matrices. *Nanotechnology* 29:185704
146. Baig N, Saleh TA. 2018. Electrodes modified with 3D graphene composites: a review on methods for preparation, properties and sensing applications. *Mikrochimica acta* 185:283
147. Baker PA, Catledge SA, Harris SB, Ham KJ, Chen WC, et al. 2018. Computational Predictions and Microwave Plasma Synthesis of Superhard Boron-Carbon Materials. *Materials* 11
148. Bang K, Chee SS, Kim K, Son M, Jang H, et al. 2018. Effect of ribbon width on electrical transport properties of graphene nanoribbons. *Nano convergence* 5:7
149. Tian B, Li HF, Yang H, Song DL, Bai XW, Zhao YL. 2018. A MEMS SOI-based piezoresistive fluid flow sensor. *The Review of scientific instruments* 89:025001
150. Xiang R, Maruyama S. 2018. Revisiting behaviour of monometallic catalysts in chemical vapour deposition synthesis of single-walled carbon nanotubes. *Royal Society open science* 5:180345
151. Wu CH, Chang KM, Chen YM, Huang BW, Zhang YX, Wang SJ. 2018. Using KrF ELA to Improve Gate-Stacked LaAlO₃/ZrO₂ Indium Gallium Zinc Oxide Thin-Film Transistors with Novel Atmospheric Pressure Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition Technique. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 18:1917-21
152. Wong MS, Hwang D, Alhassan AI, Lee C, Ley R, et al. 2018. High efficiency of III-nitride micro-light-emitting diodes by sidewall passivation using atomic layer deposition. *Optics express* 26:21324-31
153. Wang Y, Liu H, Shen W. 2018. A Convenient and Effective Method to Deposit Low-Defect-Density nc-Si:H Thin Film by PECVD. *Nanoscale research letters* 13:234
154. Wang X, Li Q, Zhang L, Hu Z, Yu L, et al. 2018. Caging Nb₂O₅ Nanowires in PECVD-Derived Graphene Capsules toward Bendable Sodium-Ion Hybrid Supercapacitors. *Advanced materials* 30:e1800963
155. Wang X, Li C, Chi Y, Piao M, Chu J, et al. 2018. Effect of Graphene Nanowall Size on the Interfacial Strength of Carbon Fiber Reinforced Composites. *Nanomaterials* 8
156. Song P, Chen C, Qu J, Ou P, Dastjerdi MHT, et al. 2018. Rolled-up SiO₂/SiN_x microtubes with an enhanced quality factor for sensitive solvent sensing. *Nanotechnology* 29:415501
157. Baysal M, Bilge K, Yildizhan MM, Yorulmaz Y, Oncel C, et al. 2018. Catalytic synthesis of boron nitride nanotubes at low temperatures. *Nanoscale* 10:4658-62
158. Bekduz B, Beckmann Y, Mischke J, Twellmann J, Mertin W, Bacher G. 2018. Graphene growth through a recrystallization process in plasma enhanced chemical vapor deposition. *Nanotechnology* 29:455603
159. Bellus MZ, Mahjouri-Samani M, Lane SD, Oyedele AD, Li X, et al. 2018. Photocarrier Transfer across Monolayer MoS₂-MoSe₂ Lateral Heterojunctions. *ACS nano* 12:7086-92
160. Braeuninger-Weimer P, Funke S, Wang R, Thiesen P, Tasche D, et al. 2018. Fast, Noncontact, Wafer-Scale, Atomic Layer Resolved Imaging of Two-Dimensional Materials by Ellipsometric Contrast Micrography. *ACS nano* 12:8555-63

161. Bu F, Chen W, Gu J, Agboola PO, Al-Khalli NF, et al. 2018. Microwave-assisted CVD-like synthesis of dispersed monolayer/few-layer N-doped graphene encapsulated metal nanocrystals for efficient electrocatalytic oxygen evolution. *Chemical science* 9:7009-16
162. Bukhtiar A, BingSuo Z. 2018. The Preparation and Optical Properties of Ni(II) and Mn(II) Doped in ZnTe Nanobelt/Nanorod by Using Chemical Vapor Deposition. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 18:4700-13
163. Cai L, Shearer MJ, Zhao Y, Hu Z, Wang F, et al. 2018. Chemically Derived Kirigami of WSe₂. *Journal of the American Chemical Society* 140:10980-7
164. Chang HC, Tu CL, Lin KI, Pu J, Takenobu T, et al. 2018. Synthesis of Large-Area InSe Monolayers by Chemical Vapor Deposition. *Small*:e1802351
165. Drieschner S, Seckendorff MV, Corro ED, Wohlketter J, Blaschke BM, et al. 2018. Uniformly coated highly porous graphene/MnO₂ foams for flexible asymmetric supercapacitors. *Nanotechnology* 29:225402
166. Duan Y, Rani S, Newberg JT, Teplyakov AV. 2018. Investigation of the influence of oxygen plasma on supported silver nanoparticles. *Journal of vacuum science & technology. A, Vacuum, surfaces, and films : an official journal of the American Vacuum Society* 36:01B101
167. Chen J, Zhao X, Grinblat G, Chen Z, Tan SJR, et al. 2018. Homoepitaxial Growth of Large-Scale Highly Organized Transition Metal Dichalcogenide Patterns. *Advanced materials* 30
168. Chen L, Han J, Ito Y, Fujita T, Huang G, et al. 2018. Heavily Doped and Highly Conductive Hierarchical Nanoporous Graphene for Electrochemical Hydrogen Production. *Angewandte Chemie*
169. Chen M, Li Z, Li W, Shan C, Li W, et al. 2018. Large-scale synthesis of single-crystalline self-standing SnSe₂ nanoplate arrays for wearable gas sensors. *Nanotechnology* 29:455501
170. Kwak J, Kim SY, Jo Y, Kim NY, Kim SY, et al. 2018. Unraveling the Water Impermeability Discrepancy in CVD-Grown Graphene. *Advanced materials* 30:e1800022
171. Kumar R, Welle A, Becker F, Kopyeva I, Lahann J. 2018. Substrate-Independent Micropatterning of Polymer Brushes Based on Photolytic Deactivation of Chemical Vapor Deposition Based Surface-Initiated Atom-Transfer Radical Polymerization Initiator Films. *ACS applied materials & interfaces*
172. Kuk S, Nam HK, Wang Z, Hwang DJ. 2018. Effect of Laser Beam Dimension on Laser-Assisted Chemical Vapor Deposition of Silicon Nitride Thin Films. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 18:7085-9
173. Ma T, Bai J, Wang Q, Li C. 2018. The novel synthesis of a continuous tube with laminated g-C₃N₄ nanosheets for enhancing photocatalytic activity and oxygen evolution reaction performance. *Dalton transactions* 47:10240-8
174. Ma X, Gao D. 2018. High Capacitive Storage Performance of Sulfur and Nitrogen Codoped Mesoporous Graphene. *ChemSusChem* 11:1048-55
175. Ma X, Kumar P, Mittal N, Khlyustova A, Daoutidis P, et al. 2018. Zeolitic imidazolate framework membranes made by ligand-induced permselectivation. *Science* 361:1008-11
176. Arif Yasthopi Rahadian Zainul AA, Hermansyah Aziz, Syukri Arief, Syukri. 2015. Photoelectrosplitting Water for Hydrogen Production Using Illumination with Indoor Lights. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 7:57-67
177. Desy Kurniawati IL, Salmariza Sy Harmiwati, Zulkarnain Chaidir, Edison Munaf, Rahmiana Zein, Hermansyah Aziz, Rahadian Zainul. 2015. Biosorption of Pb (II) from Aqueous Solutions Using Column Method by Lengkeng (Euphoria logan lour) Seed and Shell. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 7:872-7
178. Way AJ, Jacobberger RM, Arnold MS. 2018. Seed-Initiated Anisotropic Growth of Unidirectional Armchair Graphene Nanoribbon Arrays on Germanium. *Nano letters* 18:898-906
179. Wei J, Zhang Q, Zhao L, Nie Z, Hao L. 2018. Microwave Absorption Properties of Uniform Ultra-Long SiC Nanowires. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 18:1224-31
180. Wen F, Tutuc E. 2018. Enhanced Electron Mobility in Nonplanar Tensile Strained Si Epitaxially Grown on SixGe_{1-x} Nanowires. *Nano letters* 18:94-100
181. Braun E, Lee Y, Moosavi SM, Barthel S, Mercado R, et al. 2018. Generating carbon schwarzites via zeolite-templating. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115:E8116-E24

182. Chang RJ, Tan H, Wang X, Porter B, Chen T, et al. 2018. High-Performance All 2D-Layered Tin Disulfide: Graphene Photodetecting Transistors with Thickness-Controlled Interface Dynamics. *ACS applied materials & interfaces* 10:13002-10
183. Chee SW, Kammler M, Graham J, Gignac L, Reuter MC, et al. 2018. Directed Self-Assembly of Ge Quantum Dots Using Focused Si(2+) Ion Beam Patterning. *Scientific reports* 8:9361
184. Chen CC, Wang FH, Chang SC, Yang CF. 2018. Using Oxygen Plasma Pretreatment to Enhance the Properties of F-Doped ZnO Films Prepared on Polyimide Substrates. *Materials* 11
185. E S, Wu L, Li C, Zhu Z, Long X, et al. 2018. Growth of boron nitride nanotubes from magnesium diboride catalysts. *Nanoscale* 10:13895-901
186. Aneni EC, Osondu CU, De La Cruz J, Martin SS, Blaha MJ, et al. 2018. Lipoprotein Sub-Fractions by Ion-Mobility Analysis and Its Association with Subclinical Coronary Atherosclerosis in High-Risk Individuals. *Journal of atherosclerosis and thrombosis*
187. Apte A, Kochat V, Rajak P, Krishnamoorthy A, Manimunda P, et al. 2018. Structural Phase Transformation in Strained Monolayer MoWSe₂ Alloy. *ACS nano* 12:3468-76
188. Zainul R. 2015. Disain dan Modifikasi Kolektor dan Reflektor Cahaya pada Panel Sel Surya Al/Cu₂O-Gel Na₂SO₄. *Research Report*
189. M., Yani, S. R., & Zainul, R. (2017, September 4). Aktivasi Tanah Napa dan Pengaruhnya Terhadap Adsorpsi Ion Timbal (II)/ Pb²⁺. <https://doi.org/10.31227/osf.io/ps523>
190. Zainul, R., Oktavia, B., Dewata, I., & efendi, j. (2017, February 4). Studi Dinamika Molekular dan Kinetika Reaksi pada Pembelahan Molekul Air untuk Produksi Gas Hidrogen. <https://doi.org/10.31227/osf.io/876s3>
191. Zainul, R., & Dewata, I. (2015, December 29). Determination of pH-BOD-COD and degradation in batang arau watersheds at Padang city. <https://doi.org/10.31227/osf.io/efdzt>
192. H., Sanjaya, H., & Zainul, R. (2016, August 30). Synthesis and Electrical Properties of ZnO-ITO and Al-ITO thin Film by Spin Coating Technique Through Sol Gel Process. <https://doi.org/10.31227/osf.io/unrt4>
193. Zainul, R. (2016, September 24). Determination of the half-life and the quantum yield of ZnO semiconductor photocatalyst in humic acid. <https://doi.org/10.31227/osf.io/e8a9x>
194. Zainul, R. (2016, December 18). Design and Modification of Copper Oxide Electrodes for Improving Conversion Coefficient Indoors Lights (PV-Cell) Photocells. <https://doi.org/10.31227/osf.io/pgn84>
195. Zainul, R., Alif, A., Aziz, H., Arief, S., & s. (2015, October 22). Photoelectrospitting Water Mechanism at Carbon Electrode Surface using Indoor lights. <https://doi.org/10.31227/osf.io/vcxq8>
196. H., Sanjaya, H., & Zainul, R. (2016, August 30). Synthesis and Electrical Properties of ZnO-ITO and Al-ITO thin Film by Spin Coating Technique Through Sol Gel Process. <https://doi.org/10.31227/osf.io/unrt4>
197. Anhar, A., Sumarmin, R., & Zainul, R. (2016, August 30). Measurement of Glycemic Index of West Sumatera Local Rice Genotypes for Healthy Food Selection. <https://doi.org/10.31227/osf.io/tgy8h>
198. M., Sanjaya, H., & Zainul, R. (2015, December 30). Characterization of napa soil and adsorption of Pb (II) from aqueous solutions using on column method. <https://doi.org/10.31227/osf.io/t8fh9>
199. chaidir, z., Fadjria, N., A., & Zainul, R. (2016, December 5). ISOLATION AND MOLECULAR IDENTIFICATION OF FRESHWATER MICROALGAE IN MANINJAU LAKE WEST SUMATERA. <https://doi.org/10.31227/osf.io/nbcuf>
200. Chaidir, Z., Zainul, R., Nurakhbari, D., & Salim, M. (2016, September 24). Optimization of Spirulina Platensis Culture for Antioxidant Production. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/FD6E4>
201. Liza, Y. M., Yasin, R. C., Maidani, S. S., & Zainul, R. (2018, October 9). SOL GEL : PRINCIPLE AND TECHNIQUE (A REVIEW). Retrieved from osf.io/dnp8r
202. Febriani, S. S., Yolanda, T., Arianti, V. A., & Zainul, R. (2018, October 12). A Review Solid Stated : Principles and Methode. Retrieved from osf.io/b9qzv

203. P, Oki M, Laura G A, Apri Y M S, and Rahadian Zainul. 2018. "A Review Grinding : Teknik Dan Prinsip Dasar Pada Pengolahan Material." OSF. October 12. doi:10.17605/OSF.IO/4RY96.