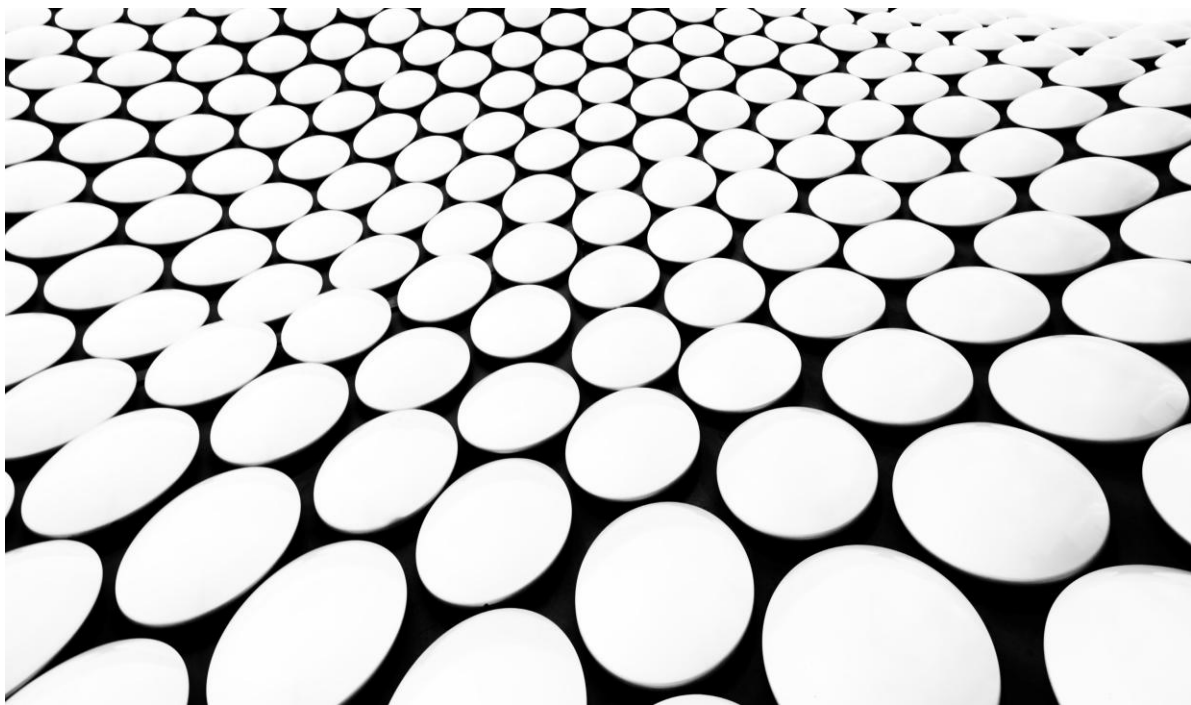


ФУНКЦИОНАЛДЫ МАТЕРИАЛДАР МЕН НАНОҚҰРЫЛЫМДАРДЫ АЛУ ӘДІСТЕРІ ДӘРІС -3

**НАНОҚҰРЫЛЫМДАРДЫ АЛУДЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІ II: АТОМДЫҚ ҚАБАТТЫҚ ТҰНДЫРУ (ALD),
МОЛЕКУЛАЛЫҚ-СӘУЛЕЛІК ЭПИТАКСИЯ (MBE).**



**7M07103 - Материалтану және жаңа материалдар
технологиясы**

5 (1/0/2/2) кредит

Семестр: 1, күз, 2025- 2026 оқу жылы
Дәріскер: қауымдастырылған профессор, х.ғ.к.,
Керимкулова Алмагуль Рыскуловна

Дәрістің мақсаты - нанокұрылымдарды алудың заманауи **физикалық әдістерімен**, атап айтқанда:

Атомдық қабаттық тұндыру (Atomic Layer Deposition, ALD), Молекулалық-сәулелік эпитаксия (Molecular Beam Epitaxy, MBE)

әдістерінің ғылыми негіздерін, даму тарихын, жұмыс принципін және қолданылуын түсіндіру.

Студенттерге бұл технологиялардың ерекшеліктері, артықшылықтары мен практикалық қолданыстары туралы жүйелі білім беру.ы:

Дәрістің құрылымы:

■ **Кіріспе**

– Нанокұрылымдарды алудың физикалық әдістеріне қысқаша шолу.

– ALD және MBE-нің маңызы.

■ **Атомдық қабаттық тұндыру (ALD)**

■ Әдістің шығу тарихы (Кеңес мектебі – Алесковский, Фин мектебі – Т. Сунтола).

■ Негізгі принципі: қабат-қабат өсу механизмі, циклдік процесс.

■ ALD процесінің сатылары:

■ Артықшылықтары: дәл қалыңдықты бақылау, гомогенді үлдір алу.

■ Модификациялары:

■ **Hydrogen radical-enhanced ALD**

■ **Plasma-Enhanced ALD (PEALD)**

■ **Molecular Layer Deposition (MLD)**

■ Қолданылуы (электролюминесцентті дисплейлер, диэлектриктер, қорғаныш қабаттар, т.б.).

■ **Молекулалық-сәулелік эпитаксия (MBE)**

■ Әдістің негізгі принциптері: аса жоғары вакуум, буландыру арқылы қондыру.

■ Қондырғының схемасы (эффузиялық ұяшық, подложка, дифрактометр).

■ Артықшылықтары: атомдық деңгейде қалыңдықты бақылау, тегіс қабаттар алу.

■ Өсу процестері: адсорбция, беткі диффузия, зародыш түзілуі.

■ Қабықша өсуінің механизмдері:

■ Фольмер–Вебер,

■ Франк–Ван дер Мерве,

■ Крастанов–Странский.

■ Қолданылуы: гетерокұрылымдар, жартылай өткізгіш жүйелер.

■ **Қорытынды**

■ **Әдебиеттер тізімі** (негізгі және қосымша дереккөздер көрсетілген).

ADL - АТОМДЫҚ ҚАБАТТЫҚ ТҰНДЫРУ (ATOMIC LAYER DEPOSITION) – АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ

ALD тарихының негіздері

Кеңес мектебі (1952 ж.)

- Молекулалық қабаттау әдісінің (Кеңес Одағында осылай аталған, қазіргі атауы – ALD) алғашқы *теориялық негіздері* академик **В. Б. Алесковскийдің** ғылыми мектебінде (ЛГУ, химиялық термодинамика және кинетика кафедрасы) жасалды.
- 1952 жылы реактивтердің кезектескен әсері арқылы қосылыстардың қабат-қабат өсімін сипаттайтын алғашқы мақалалар жарық көрді.
- КСРО-да бұл әдіс негізінен оксидті және фторидті жұқа қабықшаларды алуға қолданылды.

Фин мектебі (1970-жылдары)

- Шетелде әдістің негізін қалаушы ретінде **Туомо Сунтола** (Финляндия) танылады.
- Оның тобы алғашқы патенттерді алды:
 - **1974 ж.** – Финляндияда жұқа қабықшалық қаптамаларды алу әдісіне патент.
 - **1977 ж.** – АҚШ-та патент (US4058430A “*Thin film growth method*”).
- Suntola бастапқыда *Atomic Layer Epitaxy (ALE)* терминін енгізді, кейіннен ол **Atomic Layer Deposition (ALD)** атауымен орнықты.

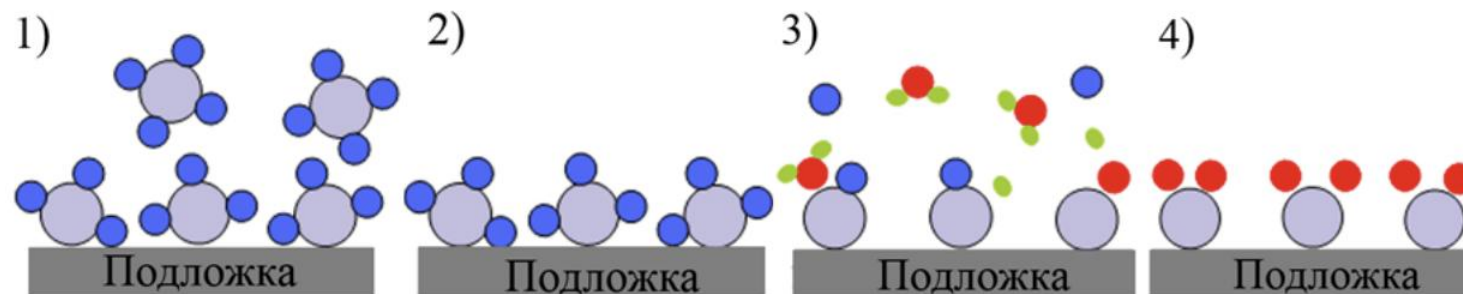
Халықаралық мойындау

- Кеңестік ғалымдардың үлесі кейінірек мойындалды. Мәселен, бұл **R. L. Puurunen**-нің шолу мақаласында көрсетілген:
 - “*A Short History of Atomic Layer Deposition: Tuomo Suntola’s Atomic Layer Epitaxy*”, Chemical Vapor Deposition, 20 (2014): 332–344.
- Бүгінде ALD нанокұрылымды үлдірлерді алудың ең дәл әдістерінің бірі саналады.

Алғашқы коммерциялық қолдану

- ALD алғаш рет өнеркәсіпте электролюминесцентті жалпақ дисплейлерді (ELD) жасау үшін пайдаланылды.
- Негізгі материалдар:
 - поликристалды **ZnS:Mn** құрылымы (сәуле шығаратын қабат),
 - аморфты **Al₂O₃** үлдірлері (диэлектрик және қорғаныш қабат).
- Мұндай дисплейлерді 1980-жылдары Финляндиядағы **Planar Systems** компаниясы шығара бастады.

- Атомдық қабаттық тұндыру (ALD) әдісіАтомдық қабаттық тұндыру әдісі – жұқа қабықшалы жабындарды алу тәсілі. Оның мәні – бейтеңгерімсіз жағдайда жүретін, бастапқы компоненттердің атомдары мен реакциялық топтарының қондырма бетінде бірізді қайтымсыз химиялық реакцияларының өтуінде жатыр.



ALD әдісі – циклдік процесс, әрбір цикл мынадай сатылардан тұрады (3.1-сурет):

- 1.Бірінші прекурсорды реакциялық камераға енгізу** және оның қондырма материалының бос функционалды топтарымен химиялық әрекеттесуі;
- 2.Алғашқы үрлеу** – реактор мен реакциялық камераны инертті газдармен (аргон немесе азот) тазалау. Мақсаты – бірінші прекурсордың артығын және реакцияның жанама өнімдерін кетіру;
- 3.Екінші прекурсорды енгізу** және оның қондырма бетіне қондырылған бірінші прекурсордың моноатомдық қабатымен химиялық әрекеттесуі;
- 4.Қайталама үрлеу** – реактор мен реакциялық камераны инертті газдармен (аргон немесе азот) тазалау. Мақсаты – екінші прекурсордың артығын және реакцияның жанама өнімдерін жою.

- **Атомдық қабаттық тұндыру (ALD) циклының ерекшеліктері**
- Реагенттердің буларын қондырма бетіне жеткізу үшін **аса таза, қоспасыз газ-тасымалдаушы** қолданылады. Ол газ-тасымалдаушы қондырмадағы функционалды топтармен, тасымалданатын заттармен немесе хемосорбция өнімдерімен ешқандай химиялық әрекеттесуге түспеуі тиіс. Мұндай газ-тасымалдаушы ретінде **азот, аргон немесе гелий** пайдаланылады.
- Екінші үрлеу сатысынан кейін ALD циклы толық аяқталған болып есептеледі. Осылайша, қондыру процесі «қабат-қабат» принципіне негізделген. Циклді бірнеше рет қайталау арқылы өсірілетін қабықшаның қажетті қалыңдығына қол жеткізуге болады.
- ALD әдісінің басқа барлық химиялық қондыру тәсілдерінен негізгі ерекшелігі – бастапқы прекурсорлардың химиялық реакцияларының уақыт бойынша толық **бөлінуі**, яғни әр сатыдан кейін міндетті түрде үрлеу жүргізіледі. Бұл ерекшелік прекурсорлардың қондырма бетіне жетпей тұрып газ фазасында өзара қажетсіз «паразиттік» реакцияларға түсуін болдырмайды.

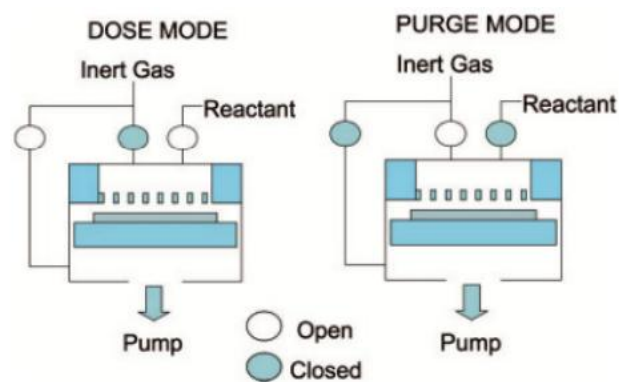


Figure 5. Illustration of purge and dose modes during synchronous modulation of flow and draw. (Adapted from information provided by Sundew Technologies, LLC.)

Сурет ALD процесіндегі екі негізгі режимді көрсетеді: дозалау режимі (Dose Mode) және үрлеу режимі (Purge Mode).

Бұл суретте сутек радикаларымен күшейтілген атомдық қабаттық тұндыру (Hydrogen radical-enhanced ALD) процесінің сызбасы көрсетілген.

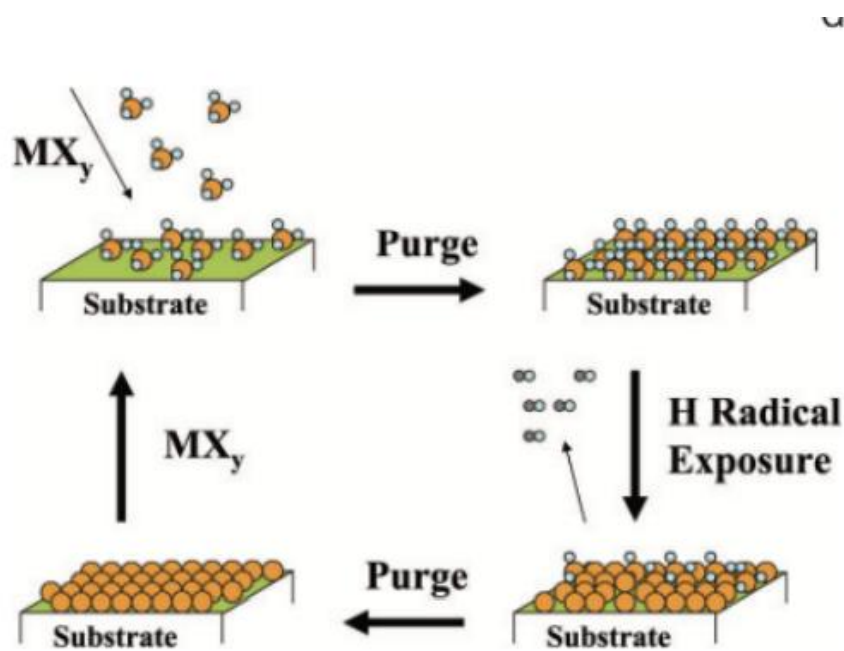


Figure 4. Schematic diagram of hydrogen radical-enhanced ALD using a metal reactant and hydrogen radicals.

- **Алғашқы кезең** – металл прекурсоры (MX_y) субстрат бетіне енгізіледі. Ол субстраттағы белсенді топтармен әрекеттеседі.
- **Үрлеу (Purge)** – артық прекурсор және жанама өнімдер инертті газ арқылы шығарылады.
- **H Radical Exposure (сутек радикаларымен әсер ету)** – сутек радикалары субстрат бетіне түседі және жаңа химиялық реакциялар жүреді.
- **Қайтадан үрлеу (Purge)** – артық сутек радикалары мен реакция өнімдері камерада шығарылады.
- Нәтижесінде – біртекті моноқабат қалыптасады.

Бұл суретте атомдық қабаттық тұндыру (ALD) процесінің өзін-өзі шектейтін беткі химиясына негізделген және А–В бинарлы реакция тізбегімен жүретін сызбасы көрсетілген.

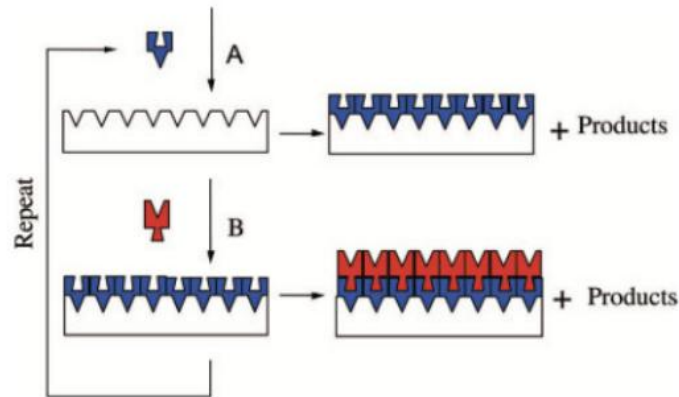


Figure 1. Schematic representation of ALD using self-limiting surface chemistry and an AB binary reaction sequence. (Reprinted with permission from ref 5. Copyright 1996 American Chemical Society.)

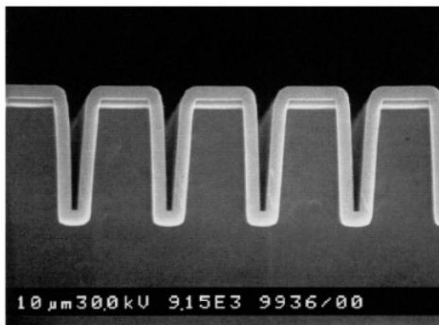


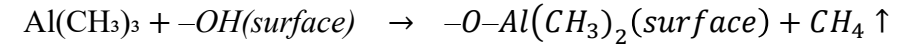
Figure 3. Cross-sectional SEM image of an Al_2O_3 ALD film with a thickness of 300 nm on a Si wafer with a trench structure. (Reprinted with permission from ref 42. Copyright 1999 John Wiley & Sons.)

Бұл суретте Al_2O_3 жұқа қабықшасының қималық SEM бейнесі берілген. Қабықша 300 нм қалыңдықта кремний (Si) ваферінде, ойықты (trench) құрылымда өсірілген.

ALD процесінің толық циклі (Al_2O_3 мысалы)

1-қадам. А прекурсоры – TMA ($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) адсорбциясы

- Алдымен үлгі бетінде $-\text{OH}$ топтары болады (гидроксил топтары).
- TMA молекуласы ($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) осы $-\text{OH}$ топтарымен әрекеттеседі:



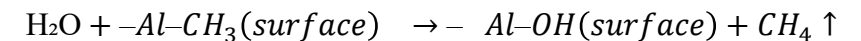
👉 Бетте алюминий атомы байланысады, артық CH_4 газы бөлінеді.

2-қадам. Продувка (инертті газбен, Ar немесе N_2)

- Реактордағы артық TMA молекулалары және түзілуі мүмкін жанама өнімдер (CH_4) газ ағымымен толық шығарылады.

3-қадам. В прекурсоры – H_2O молекуласының реакциясы

- Енді үлгі бетінде $-\text{Al}-\text{CH}_3$ топтары бар.
- H_2O молекуласы келіп, осы $-\text{CH}_3$ топтарымен реакцияға түседі:



👉 Нәтижесінде бетте қайтадан $-\text{OH}$ топтары қалпына келеді.

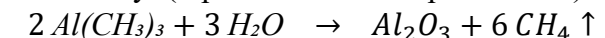
4-қадам. Екінші продувка (инертті газбен)

- Реактордағы артық H_2O молекулалары және бөлінген CH_4 газы сыртқа шығарылады.

Нәтиже

- Бір толық А–В циклі аяқталды.
- Үлгі бетінде қайтадан $-\text{OH}$ топтары пайда болды → процесс қайтадан қайталана алады.
- Әр циклде шамамен **0.1–0.2 нм қалыңдық** қосылады.
- Циклді бірнеше жүз рет қайталау арқылы қалыңдығы ондаған нанометр болатын өте біркелкі **Al_2O_3 пленкасы** алынады.

✦ Жалпы реакция теңдеуі (бір циклдің нетто-реакциясы):



МОЛЕКУЛАЛЫҚ ҚАБАТТЫҚ ТҰНДЫРУ (MLD)

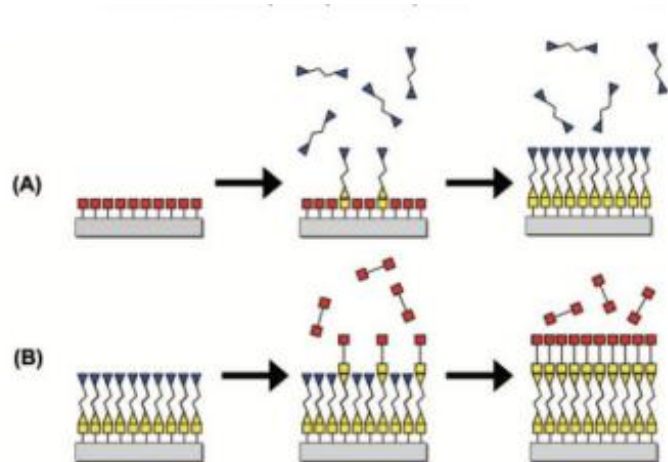


Figure 22. Schematic representation of MLD using self-limiting surface chemistry and an AB binary reaction sequence. (Reprinted with permission from ref 190. Copyright 2007 American Chemical Society.)

Бұл процесс ALD-ке ұқсас, бірақ бейорганикалық қана емес, **гибридті органикалық-бейорганикалық** қабаттарды да алуға мүмкіндік береді.

- Al_2O_3 ALD және ZnO ALD циклдерінің комбинациясы арқылы **құрамды қорытпалар (alloys)** алуға болады.
- Al_2O_3 үлдірлері – **изоляциялық**, ал ZnO үлдірлері – **өткізгіш**.
- Сондықтан $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ қабаттарының қатынасын өзгерте отырып, әртүрлі **электрлік кедергісі бар үлдірлерді** алуға болады.
- Кедергінің мәні:
 - таза Al_2O_3 үшін $\approx 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{см}$,
 - таза ZnO үшін $\approx 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.
- Мұндай қабаттар **радиожиілікті MEMS қосқыштары** үшін зарядты диссипативті жабындар ретінде қолданылады.

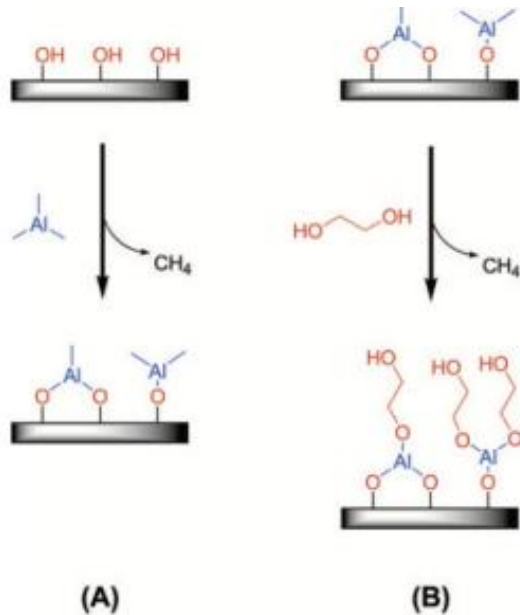


Figure 23. Illustration of surface chemistry for two-step alucone MLD using TMA and EG as reactants. (Reprinted with permission from ref 201. Copyright 2008 American Chemical Society.)

Процесі

•Прекурсорлар:

- TMA ($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) – триметилалюминий,
- EG (ethylene glycol, $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$) – этиленгликоль (диол).

•Реакциялар циклдік жүреді:

- TMA беттегі $-\text{OH}$ топтарымен әрекеттеседі $\rightarrow -\text{Al}-\text{CH}_3$ фрагменттері түзіледі.
- EG молекуласы келіп $-\text{CH}_3$ топтарын алмастырады $\rightarrow -\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$ байланысы арқылы органикалық көпіршелер пайда болады.
- CH_4 газ ретінде бөлінеді.

•Нәтижесінде: $-\text{Al}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{Al}-$ түріндегі полимерлік құрылым қалыптасады.

Гибридті органикалық–бейорганикалық полимерлер

•MLD гибрид полимерлері органикалық прекурсорлар мен бейорганикалық металлорганикалық прекурсорларды біріктіру арқылы алынады.

•Мысал: **alucone MLD** .

•Прекурсорлар:

- TMA ($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) – металлорганикалық прекурсор,
- EG (ethylene glycol, $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$) – органикалық диол.

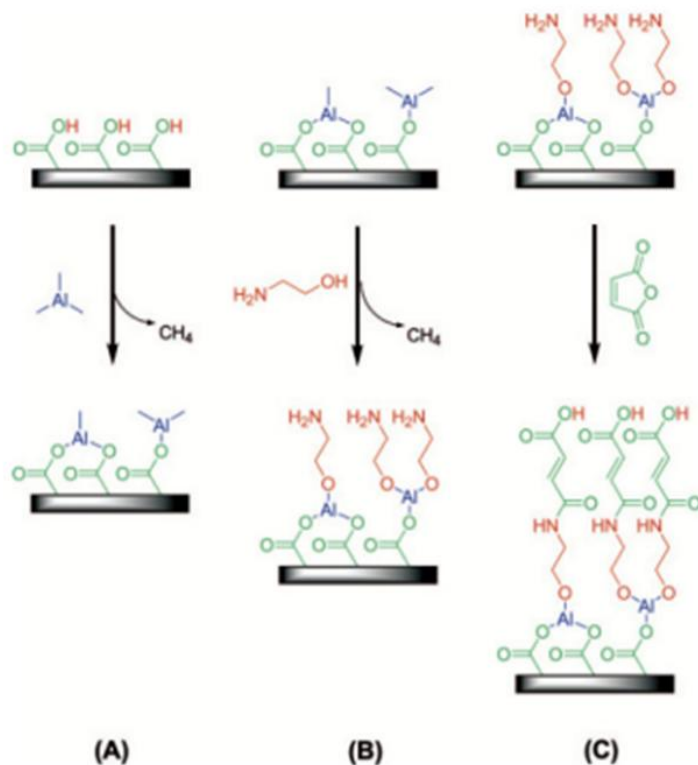


Figure 24. Illustration of surface chemistry for three-step alucone MLD with TMA, EA, and MA as reactants. (Reprinted with permission from ref 193. Copyright 2009 American Chemical Society.)

Бұл суретте үш қадамды alucone MLD (Molecular Layer Deposition) механизмі көрсетілген. Прекурсорлар:

- ТМА ($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) – металлорганикалық прекурсор,
- ЕА (ethylene diamine, $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$) – органикалық диамин,
- МА (maleic anhydride) – көпфункционалды органикалық прекурсор.

(А) Бірінші қадам

- ТМА беттегі ОН топтарымен әрекеттеседі,
- CH_4 бөлінеді,
- бетке Al орталықтары байланысып қалады.

(В) Екінші қадам

- ЕА (этилендиамин) Al орталықтарымен әрекеттесіп, жаңа байланыстар түзеді,
- CH_4 бөлінеді,
- Бетте органикалық көпіршелер пайда болады.

(С) Үшінші қадам

- МА (малеин ангидрид) қосылады,
- ЕА арқылы Al орталықтарына қосылып, кеңейтілген полимерлік құрылым түзіледі.

Суретте плазмамен күшейтілген атомдық қабаттық тұндыру (Plasma-Enhanced ALD, PEALD) жүйесінің сызбасы берілген. Бұл жүйе тантал (Ta) және титан (Ti) қабықшаларын алу үшін қолданылған.

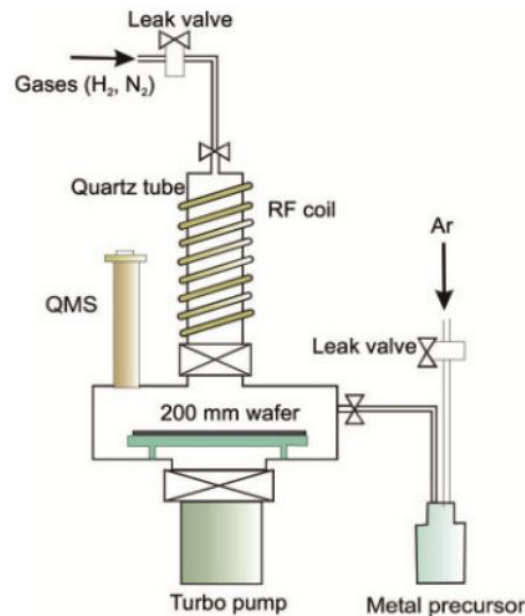
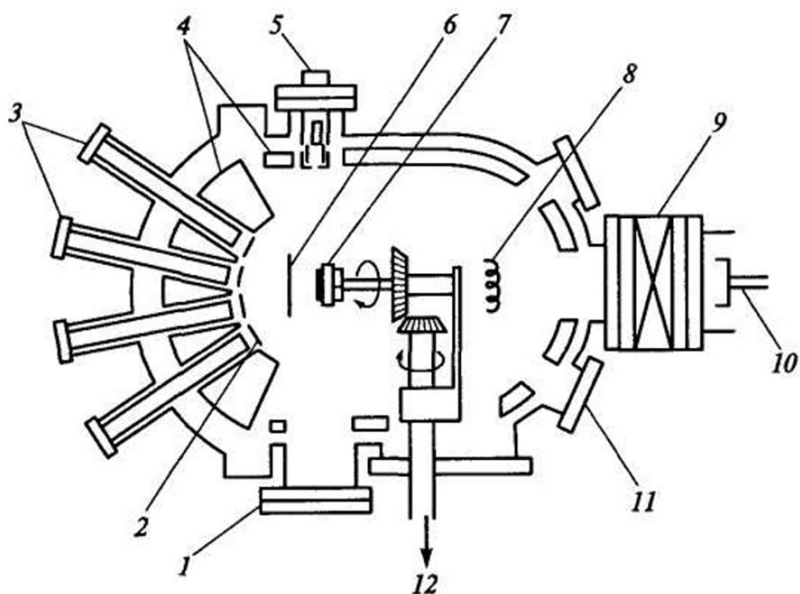


Figure 6. Schematic diagram of a plasma-enhanced ALD system used for Ta ALD and Ti ALD. (Reprinted with permission from ref 51. Copyright 2002 American Institute of Physics.)

- **Gases (H_2 , N_2)** – жұмысшы газдар (сутек, азот).
- **Leak valve** – газ беру клапандары (ағып кетуді шектейтін).
- **Quartz tube** – кварц түтігі.
- **RF coil** – радиожиілікті катушка (плазма генерациясы үшін).
- **QMS** – масс-спектрометр (газ құрамын бақылауға арналған).
- **200 mm wafer** – 200 мм вафер (қондырма).
- **Turbo pump** – турбомолекулалық сорғы.
- **Metal precursor** – металл прекурсоры (мысалы, тантал немесе титан қосылысы).
- **Ar** – аргон (тасымалдаушы немесе плазмаға арналған қосымша газ).

МОЛЕКУЛАЛЫҚ-СӘУЛЕЛІК ЭПИТАКСИЯ (МСЭ)

- Көпқабатты жартылай өткізгіш жүйелерді, гетероқұрылымдар мен қалыңдығы атомдық деңгейде бақыланатын жұқа қабықшаларды алудың ең озық әдісі – молекулалық-сәулелік эпитаксия (МСЭ) әдісі болып табылады. МСЭ әдісінде қабықшаларды қондыру аса жоғары вакуум жағдайында затты буландыру арқылы жүзеге асырылады, осы кезде жұқа реттелген қабаттар қыздырылған монокристаллдық негізде қалыптасады. Жоғары температура атомдардың бет бойымен тез миграциялануына ықпал етеді, нәтижесінде атомдар негізге қатысты қатаң анықталған, бағытталған орындарды иеленеді. 1-суретте гетероқұрылымдарды өсіруге арналған қондырғының типтік сызбасы көрсетілген.



Молекулалық-сәулелік эпитаксия қондырғысының сызбасы (үстінен қарағанда):

- 1 – экран; 2, 3 – сәйкесінше эффузиялық ұяшықтардың жапқыштары мен фланецтері; 4 – экрандар;
5 – дифрактометр; 6 – жапқыш;
7 – айналмалы ұстағыштағы негіз (подложка);
8 – иондық индикатор;
9 – шлюзді клапан;
10 – үлгілерді ауыстыруға арналған вакуумдық шлюз;
11 – бақылау терезесі;
12 – негізді (табаншаны) айналдыруға арналған қозғалтқыш.

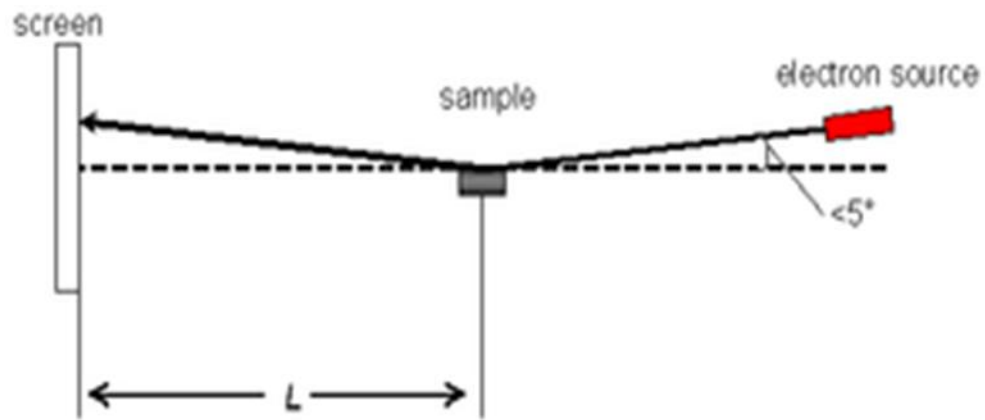
МОЛЕКУЛАЛЫҚ-СӘУЛЕЛІК ЭПИТАКСИЯ (МСЭ)

- **Эффузиялық ұяшық** – қақпағында кішкене тесігі бар қуыс цилиндр, ол жоғары температураға дейін қыздырылады. Қыздыру температурасы **1900 К-ге дейін жетеді**. **Ұяшық алдындағы жапқыш** үлгіде айқын гетерошекаралар түзу үшін сәулені кенеттен өшіріп-қосуға мүмкіндік береді. Бір өсу камерасында **бірнеше буландырғыш орналаса алады**, олардың әрқайсысы бір затты қондыруға арналған. Буланған материал қыздырғыш құрылғысы бар **манипуляторға бекітілген табаншаға** (подложкаға) тұнады. **Өсу камерасында** буландырғыштардан бөлек, қалыптасып жатқан қабықшалардың құрылымын бақылайтын шағылған электрондардың дифрактометрі де орналасады. Қолданылатын көздердің саны мен түрі өсірілетін материалдарға байланысты анықталады. Мысалы, GaAs/AlGaAs құрылымдарын алу үшін үш көз қажет: Ga, Al және As.
- Әдетте қондырғыларда **бірнеше көзді** (көбінесе алтыға дейін) орналастыруға арналған орын қарастырылады. Бұл көздерді затпен толтыру үшін қондырғыны сирек ашуға мүмкіндік береді. **Вакуумдық шлюз** үлгілерді ауыстыру кезінде аса жоғары вакуумды сақтауға жағдай жасайды. **Ал табаншаның** (подложканың) айналуы қондырылған қабаттардың құрамы мен құрылымының біркелкілігін қамтамасыз етеді. Әрбір қабаттың жеке қалыңдығы бірнеше нанометрден микронның үлесіне дейін жетуі мүмкін. **Өсу жылдамдығы зат ағынының бетке түсу шамасына байланысты**. Егер ағын аз болса, өте тегіс қабықшалар және айқын гетерошекаралар түзіледі. Бірақ процесс ұзаққа созылатындықтан, беттің ластану ықтималдығы артып, дайын құрылымда ақаулар пайда болуы мүмкін. Егер ағын тым көп болса, онда монокристалл қабықша емес, поликристаллды немесе аморфты қабат өседі.

- **МСЭ әдісі** (молекулалық-сәулелік эпитаксия) берілген қалыңдықтағы гетероқұрылымдарды, моноатомдық деңгейде тегіс гетерошекаралары бар және қажетті қоспалау (легирлеу) профілімен өсіруге мүмкіндік береді. Эпитаксия процесі үшін атомдық деңгейде тегіс беті бар арнайы мұқият тазартылған негіздер (подложкалар) қажет.
- Жалпы идеясы қарапайым болғанымен, бұл технологияны жүзеге асыру үшін өте күрделі техникалық шешімдер қажет.

Эпитаксия қондырғысына қойылатын негізгі талаптар:

- жұмыс камерасында аса жоғары вакуумды (шамамен 10^{-8} Па) ұстап тұру;
- буландырылатын материалдардың тазалығы **99,999999 %** деңгейінде болуы;
- молекулалық көздің болуы: ол қиын балқитын заттарды (мысалы, металдарды) буландыра алуы және зат ағынының тығыздығын реттеу мүмкіндігіне ие болуы тиіс.



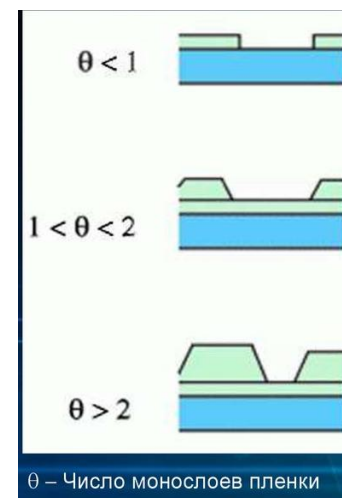
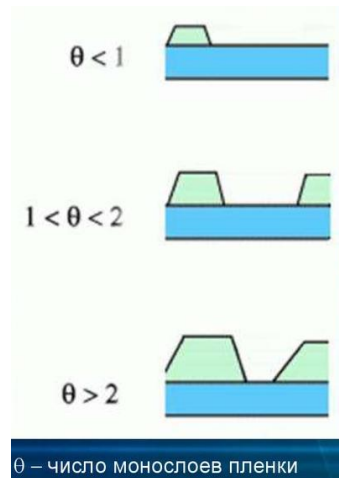
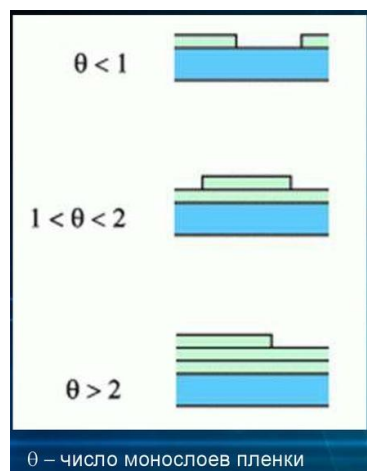
Жылдам электрондардың дифракциясы әдісінің схемасы

Шағылған жылдам электрондардың дифракциясы

(RHEED) өсу процесін бақылауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс арқылы келесі параметрлер қадағаланады:

- **Беттің тазалығы** – шағылған сигналдың жарықтығына қарай анықталады;
- **Үлгінің температурасы** – беттің қайта құрылуына байланысты дифракциялық суреттің өзгеруі арқылы өлшенеді (критикалық температураларда);
- **Негіздің (подложканың) ориентациясы** – дифракциялық суреттегі жолақтардың бағытына сәйкес анықталады;
- **Өсу жылдамдығы** – өсу барысында негізгі рефлексінің осцилляциясы бойынша бақыланады.

- **Гомозпитаксия** (гомозпитаксия) – қабықша мен негіздің (подложканың) материалы бірдей болған жағдай.
Гетерозпитаксия – әртүрлі заттардың үйлесуі кезінде жүзеге асатын процесс.
- **Будың конденсациясынан қабықшалардың өсуі** бірнеше элементарлық процестерден тұрады:
 - адсорбция;
 - беткі диффузия;
 - флуктуациялық түрде дәндердің (зародыштардың) пайда болуы және олардың өсуі.
- Қабықша өсуінің үш механизмі ажыратылады:
 - **Фольмер–Вебер механизмі** – оқшауланған үш өлшемді аралшықтардың түзілуін, олардың өсуін және коалесценциясын (қосылып бірігуін) қарастырады. Соның нәтижесінде **тұтас қабықша қалыптасады (2-сурет)**.
 - **Франк–Ван дер Мерве механизмі** – қабықша өсуі екі өлшемді **дәндердің** түзілуінен басталады және қабаттың моноатомдық қабаттарды біртіндеп жинақтау арқылы өсуімен жүзеге асады (**3-сурет**).
 - **Крастанов–Странский механизміне** (4-сурет) сәйкес, бастапқы кезеңде қабаттың өсуі екі өлшемді тегіс қабаттар түзілуінен басталады, ал кейіннен үш өлшемді аралшықтардың пайда болуына ұласады.



ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- Негізгі:
- 1. Мансұров З.А., Діністанова Б.Қ., Керімқұлова А.Р., Нәжіпқызы М. Нанотехнология негіздері. Оқу құралы. – Алматы: 2013. -244 б.
- 2. Т.А.Шабанова, Г.Қ.Тәжкенова, Р.М.Мансурова Электрондық микроскопия: оқу құралы. – Алматы: Қазақ университеті, 2004.-62 бет.
- 3. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы. – М.ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 456 с.
- 4. Д.Мырзакожа, А.Мырзаходжаева Современные методы исследования: учебное пособие: - Алматы, 2013.-428 с.
- Қосымша:
- 5. Kumar N., Kumbhat S. Essentials in Nanoscience and Nanotechnology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016 P. 470
- 6. Bayda S., Adeel M., Tuccinardi N., Cordani M., Rizzolio F. (2020) The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical-Physical Applications to Nanomedicine. Molecules 25:112-127 doi:10.3390/molecules25010112
- 7. AlJahdaly B.A., Elsadek M.F., Ahmed B.M., Farahat M.F., Taher M.M., Khalil A.M. (2021) Outstanding Graphene Quantum Dots from Carbon Source for Biomedical and Corrosion Inhibition Applications: A Review. Sustainability 13:2127 [https://doi.org/ 10.3390/su13042127](https://doi.org/10.3390/su13042127)
- 8. Acquah S.F.A. Penkova A.V., Markelov D.A., Semisalova A.S., Leonhardt B.E., Magi J.M. (2017) Review-The Beautiful Molecule: 30 Years of C60 and Its Derivatives ECS Journal of Solid State Science and Technology, 6 (6) M3155-M3162
- 9. Wang Zh., Hu T., Liang R., Wei M. (2020) Application of Zero-Dimensional Nanomaterials in Biosensing. Frontiers in Chemistry 8:320 doi: 10.3389/fchem.2020.00320