



## «МАТЕРИАЛТАНУ ЖӘНЕ ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯСЫ» РАДИАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ

### Лекция № 2

#### Иондаушы сәулелердің түрлері. Радиациялық ақаулар. Экситондар

Радиациялық ақаулар – сәулелену нәтижесінде пайда болатын кристалдық құрылым ақаулары. Қатты денеге берілген энергия атомдар арасындағы байланысты бұзып, атомдардың орын ауыстыруына әкеп соғады, оның нәтижесінде бірінші ретті радиациялық ақаулар: Френкел жұптары (вакансия немесе түйінаралық) пайда болады.

Иондаушы сәулелер деп қатты денемен әсерлесе отырып атомдардың ионизация<sup>1</sup> процесін туғызатын сәулеленуді айтамыз. Жалпы сәулеленудің келесі түрлері болады: ультракүлгін, рентген, гамма, электрон ағыны, ауыр зарядталған бөлшектер, нейтрондар, космостық сәулелену. Қысқаша сәулеленудің түрлеріне тоқталайық.

Ультракүлгін сәулеленуі спектрдің қысқа аумағындағы электромагниттік толқын квантының ағыны болып табылады. Ол көрінетін жарықтың күлгін шекарасы мен рентген сәулесінің арасында жатыр. Квант энергиясы төменгі жағында атомдардың ионизациясы болады, мұндағы сәулелену энергиясы бірнеше электрон вольт, ал жоғары энергиялы бірнеше мыңдаған болады. Жоғары энергиялық ультракүлгін сәулелену мен рентген сәулелерін алу жолдарымен ғана ажыратуға болады. Ультракүлгін сәулесінің көзі болып қыздырылған дене, газдық разряд плазмасы, синхротон, лазерлер және ккейбір қозған күйдегі қатты денелер табылады.

Рентгендік сәулелену электрондардың жоғарғы қабаттан төменгі қабатқа өту нәтижесінде пайда болады. Рентген сәулелерінің көзі ретінде электрондармен үдетілген металдық орталарды пайдаланады. Жалпы рентген сәулесін рентген түтікшесінде алады. Рентген сәулесінің қатты денемен әсерлесуі кезінде ионизация және атомның қозуы болады. Алайда ультракүлгін сәулелерден айырмашылығы ол тек валентті электрондарды ғана емес ішкі электрондарды да ұшырып шығара алады. Рентген сәулелерінің қатты денеге ену қалыңдығы квант энергиясына байланысты бірнеше миллиметрден ондаған сантиметрге өзгереді.

Гамма сәулесі ядроның ыдырауы немесе элементар бөлшектердің ядромен әсерлесуі кезінде пайда болатын, спектр бойынша энергиясы жоғары электромагниттік толқын. Затпен әсерлесуі рентген сәулесіне ұқсас, алайда гамма сәулесіне заттың атомдарына энергиясын бере алады, ядролық реакциялар туғызады. Рентген сәулелерімен салыстырғанда қатты денеге ену қалыңдығы жоғары.

Электрондар қатты денемен әсерлесе отырып рентген және гамма сәулесінің пайда болуына себепші болады, сонымен қатар ионизация процесін туғызады. Ұшып келе жатқан жоғары энергиялы электрондар кинетикалық энергиясын атом ядросына беріп, атомды орнынан ығыстыруы мүмкін. Электрондардың энергиясының көп бөлігі (99% аса)



## «МАТЕРИАЛТАНУ ЖӘНЕ ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯСЫ» РАДИАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ

электрондық жүйеге беріледі, тек аз жағдайларда энергияның жарты бөлігі атомның орын ығыстыруына жұмсалады. Ұшып келе жатқан электрондар өз энергиясын ядроға және атом электрондарына электростатикалық әсерлесу арқылы береді. Қатты денеде электрондардың тығыздығы жоғары болғандықтан электрондардың затқа ену қалыңдығы аз.

Ауыр зарядталған бөлшектер ағыны (протондар, альфа бөлшектер, ядроның бөліну жарқыншақтары). Зарядталған ауыр бөлшектерінің затпен әсерлесуі электрондардың әсерлесуіне ұқсас. Зарядталған ауыр бөлшектер энергиясының көп бөлігі қозған электрондардың пайда болуына жұмсалады. Энергияның бір процентінен азы атомның орын ығыстыруына жұмсалады.

Нейтрондар затпен әсерлесе отырып, энергиясын қозуға және электрондармен магниттік әсерлесу арқылы ионизацияға жұмсайды. Мұндай әсерлесу қимасы (сечения взаимодействия) электростатикалық әсерлесуге қарағанда аз, сондықтан нейтрондардың затқа ену қалыңдығы жоғары. Нейтрондардың ядромен әсерлесу ықтималдығы жоғары, сондықтан затпен әсерлесе отырып, ядролық реакцияға және атомның ығысуына себепші болады.

Космостық сәулелену жер атмосферасының шекарасында протондардан (90%), альфа бөлшектерден (7%), ауыр ядролардан (~1%), электрондар мен позитрондар, (~1%), ультракүлгін және гамма сәулесінен тұрады. Сәулеленудің көп бөлігі жер атмосферасында жұтылады, сондықтан жерде көбіне екінші ретті сәулелену болады. Екінші ретті сәулеленуде жұмсақ бөлігі – позитрондар мен электрондардан және қатты бөлігі – мюондар ағынынан тұрады. Космостық сәулелену жоғарылығы сәулелену түрлерінен қуаты бойынша аз, алайда ол ылғы әсер етеді.

### РАДИАЦИЯЛЫҚ АҚАУЛАР

Радиациялық ақаулар – сәулелену нәтижесінде пайда болатын кристалдық құрылым ақаулары. Жалпы радиация нәтижесінде пайда болатын ақауларды келесі түрлерге бөлуге болады:

#### Электрондық ақаулар:

- Зонадағы электрондар мен кемтіктер (еркін және зоналық электрондар мен кемтіктер) энергия мен заряд тасымалдайды;
- Кристалл арқылы қозғала отырып экситондар (бір-бірімен байланысқан электрон кемтік жұптар) энергия тасымалдайды;
- Зонаралық ауысу қозу кезінде электрон – кемтік жұптары пайда болады, олар екіге бөлініп бір бірімен кездескенде рекомбинацияланады;



## «МАТЕРИАЛТАНУ ЖӘНЕ ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯСЫ» РАДИАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ

### Нүктелік ақаулар:

- Вакансия – ионның (атомның) кристал түйінінде болмауы. Вакансияның заряды кеткен ионның зарядына тең және қарама қарсы болады;
- Түйінаралық ион (атом) кристалда түйінаралық кеңістікте орын алады;
- Френкель бойынша ақаулар – түйінарасындағы екі жұп нүктелік ақау – вакансия и түйінаралық ион (атом);
- Шоттки бойынша ақау – ионды кристалдағы заряды қарама қарсы екі вакансиялар, екі жұп нүктелік ақаулар;
- Вакансиялар мен атомдардың (иондар) агрегаты – кәуек түзетін көптеген вакансиялардың жиынтығы, атомдар (иондар) жиынтығы; Оның фазасы басқа болуы мүмкін, мысалы ионды кристалдағы металлдың микроқоспасы;
- Күрделі араласқан ақаулар, олардың кристалдық тор ақауларының жиынтығы болып табылады, сонымен қатар кристалға арнайы енгізілген қоспа атомдары немесе иондары болуы мүмкін;

### Сызықтық және кеңістіктік (пространственные) ақаулар:

- Дислокациялар: сызықтық немесе жарты жазықтықтар (полуплоскости), жазықтықтардың бір біріне қатысты майысуы жатады;
- Кристалдардың шекарасы мен түңіндері;

### Нүктелік ақаулардың келесі классификациясы болады:

Құрылымы бойынша: өздік (құрылымға тек идеала кристалдың ақаулары кіреді), қоспалы ( құрылымға торға арнайы енгізген иондар, атомдар, агрегаттар кіреді) және комбинерленген (құрылымына өздік және қоспалы болады);

Заряды бойынша: электрондық (орналасу орнына қатысты теріс заряд болса) және кемтіктік (орналасу орнына қатысты оң заряд болса) болып бөлінеді;

Ата тегі (происхождение) бойынша: бірінші ретті (радиацияның бірінші акті әсерінен пайда болған ақаулар) және екінші ретті (бірінші ретті ақаулардың бір бірімен әсерлесу нәтижесінде пайда болған ақаулар);

Радиация нәтижесінде пайда болатын ақаулардың түрлері:

Қазіргі уақытта сілтілік галоидты және сілтілік жердік металдарда зертелінген радиациялық ақаулардың келесі түрлері белгілі:

- Кристалл атомдарының ионизация процесі кезінде пайда болатын электронды-кемтік жұптары. Олар заряд тасымалдай отырып, бір бірімен байланысқан немесе байланыспаған болуы мүмкін;

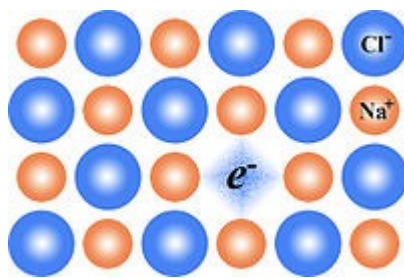


## «МАТЕРИАЛТАНУ ЖӘНЕ ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯСЫ» РАДИАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ

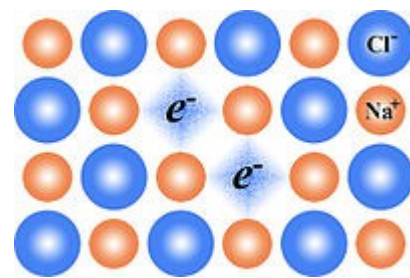
- Жоғары қозғалтқыштық қасиеті бар және суммарлы заряды нейтраль электрон кемтік жұбы –экситон;
- F – центр, анионды вакансия мен қармап алған электроннан тұрады. Вакансия екіге бөлінеді: анионды және катионды: егер вакансия орнында оң ион орналасса

Оларды жалпы бояу центрі (центры окраски) деп атайды. Ең алғаш рет бояу центрін сілтілік галоидты кристалдарды зерттей отырып, 193 ж неміс физигі Р. В. Поль зерттеген болатын. Алынған центрлерді  $\underline{\text{F}}$  – центр (неміс тілінен *Farbe* — түс, бояу және *Zentrum* — центр) деп атаған. Зерттеулер нәтижеінде F – центр электрон қармап алған галогеннің теріс ионының вакансиясынан тұратыны белгілі болды. F – центр келесі түрде түзеледі: кристалды (кристалда сол метал атомдарына құралған) сілтілік металдың буында қыздырғанда метал атомдары кристалға еніп, артық атомдар болады, соған байланысты кристалда галоген иондарының дефициті болады. былайша айтқанда анионды вакансиялар пайда болады. Кристалға енген атом валентті электронын жоғалтады, ол электрон кристалда қыдырып жүріп анионды вакансиялармен қармалануы сүскін, осылайша F – центрлер пайда болады. F – центрді алудың екінші жолы иондаушы сәулеленумен атқылау. Электрондар кристалдың өткізгіш зонасына еніп, біртіндеп анионды вакансиялармен қармаланады. Егер әсер ететін фотондар немесе басқа бөлшектердің энергиясы өте жоғары болса, олар бірнеше ақаулар туғызады: соның ішінде вакансиялар, нәтижесінде кристалда F – центр саны жоғарлайды.

Суретте галоген вакансиясының орнына қармаланған электронды, яғни экситонды көруге болады.



F центр



F<sup>2</sup> центр

### Экситондар. Ванье - Мотта және Френкель экситондары

Экситондар – диэлектриктерде және жартылайөткізгіштердегі электрондық козу болып табылатын квазибөлшек. Латын тілінен аударғанда excite -`қоздырамын` дегенді білдіреді. Кристалдағы электрон мен кемтік бір –бірімен кулондық байланыса отырып, жұп түзеді- экситон. Байланысуына байланысты экситондардың екі түрі болады: *Френкель экситондары* – байланысу радиусы кіші (атомаралық қашықтықтан аспайды) байланысқан



## «МАТЕРИАЛТАНУ ЖӘНЕ ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯСЫ» РАДИАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ

экситондар және *Ванье-Мотта* экситондары – байланысу радиусы үлкен (бірнеше атомаралық қашықтық) еркін экситондар.

Френкель экситоны үшін –  $a_3 < a_0$  ;

Ватье –Мотта экситоны үшін –  $a_3 > a_0$  ;

$a_3$  – экситон радиусы,  $a_0$  – тор тұрақтысы

Еркін экситондарын сутегі тектес электрон мен кемтіктің байланысы ретінде қарастыруға болады, сондық олардың байланыс энергиясы бордың сутегі атомы үшін арналған формулаларымен көрсетіледі. Электронның эффективті массасы еркін электрон массасынан өзгеше болатыны ескере отырып, сонымен қатар электрон мен кемтіктің кулондық байланыс энергиясы кристалда кристалдың диэлектрлік өтімділігімен әлсірейтіндігін ескере отырып формуланы көрсетуге болады:

$$E_n = - \frac{m_r e^4}{8 \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \hbar)^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$m_r$  – электрон мен кемтік массалары;  $\epsilon_r$  - кристалдың диэлектрлік өтімділігі; n- экситонның бас саны;

$$r = \frac{m_0}{m_r} \frac{1}{\epsilon_r} a_B$$

$a_B$  – сутегінің атомының бор радиусы;

Экситондардың толық энергиясы:

$$E(k) = E_g + E_n + \frac{\hbar^2 k^2}{2 \cdot M} = E_g - \frac{m_r e^4}{8 \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \hbar)^2} \cdot \frac{1}{n^2} + \frac{\hbar^2 k^2}{2 \cdot M}$$

Экситондарды түзуге арналған минималды энергия экситонды тыйым салу зонасы деп аталады.  $E_{E^*} = E_g - E_{E^*}$

Төмендегі суреттен көріп отырғандай экситондардың куйден оптикалық ауысу үшін энергияның және квазимпульстің сақталу заңы орындалу керек:

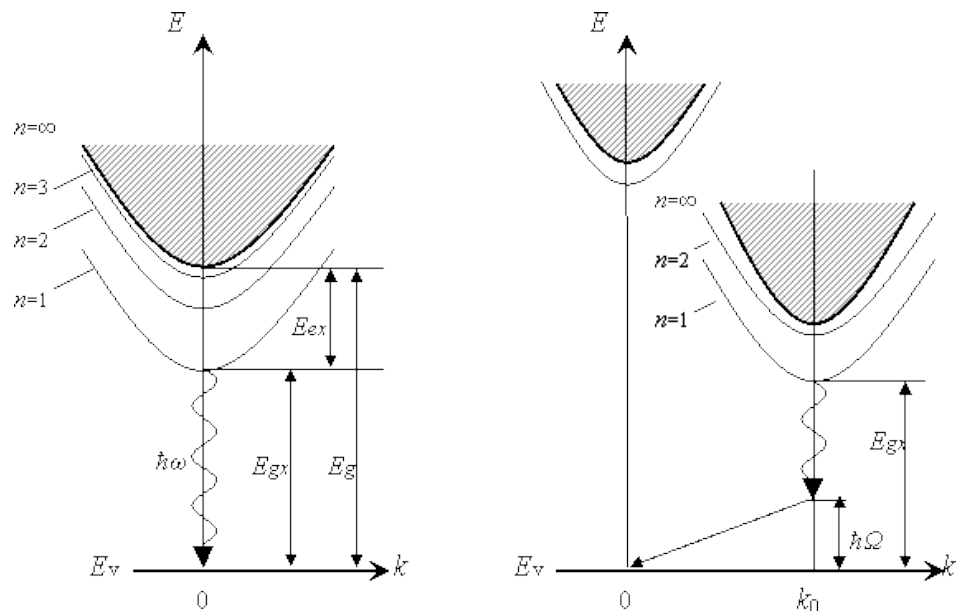
$$\hbar \omega = \frac{\hbar^2 k^2}{2 \cdot M} + E_g + E_n$$

$$\hbar k_{\text{фот}} = \hbar k$$



## «МАТЕРИАЛТАНУ ЖӘНЕ ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯСЫ» РАДИАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ

Фотонның квазимпульсі электрон мен кемтіктің квазимпульсынан әлдеқайда аз болғандықтан, оптикалық ауысулар  $k=0$  күйде ғана бола алады.



Байланыс экситондары изоэлектронды қармақшаларда (ловушки) болады. Изоэлектронды қоспа дегеніміз кристал атомдары мен қоспа атомдары кестенің бір тобында орналасқан элементтердің атомдарынан тұратын қоспа. Қоспаның атомы кристал торының электрондарының потенциалдық энергиясын өзгертіп потенциалдық шұңқыр түзеді, осы шұңқырға электрон мен кемтіктер қармаланады.