

Дәріс 1. Электронды микроскопия әдісімен материалдардың құрылымын зерттеу.

Дәрістің жоспары:

1. Сканерлеуші электрондық микроскоп, электрон көзі
2. Электрондардың затпен әсерлесуі.
3. Екінші ретті электрондар, Оже электрондар, рентген сәулелері

Микроскоп-бұл ғылыми зерттеулер үшін қолданылатын құрал, бұл кез-келген ғылыми құрал сияқты, алуға арналған зерттеу объектісі туралы ақпарат.



Сурет 1 – СЭМ сұлбасы.

Электрон көзі.

Электрондар көзінің жұмысы эмиссия құбылысына негізделген, яғни электрондардың металдан шығуы жоғары температурада немесе күшті электр өрісінде жүзеге асырылады. Қыздыру кезінде электрондардың шығу құбылысы термоэлектрондық эмиссия деп аталады. Электрондардың шығу құбылысы күшті электр өрісі арқылы болса онда автоэлектрондық (өрістік) деп аталады. Практикада термоэмиссиялы және автоэмиссиялы катодтар қолданылады.

Термоэмиссия құбылысына негізделген катодтан шыққан электрондардағы ток тығыздығы Ричардсон заңдылығымен анықталады.

$$J_0 = AT^2 \exp(-\phi / kT),$$

Мұндағы A – Ричардсон тұрақтысы, ϕ – электрондардың катодтын шығу жұмысы, яғни бұл шама катодтың материалына тәуелді болады, T – катод температурасы.

Бұл өрнектен эмиссия тоғы температураға тәуелді, температура артқан сайын ток тығыздығы да артады. Бірақ, температура артқан сайын материалдың булану жылдамдығы

да артады, бұл катодтың жұмыс істеу ұзақтығыны қысқартады. Негізінде, практикада, катодтың максимал жұмыс устеуі үшін токтың электрон шоғы үшін оңтайлы мәнін анықтап алады.

Автоэмиссияға негізделген катод үшін, ток тығыздығы Фаулер-Нордгейм формуласымен анықталады.

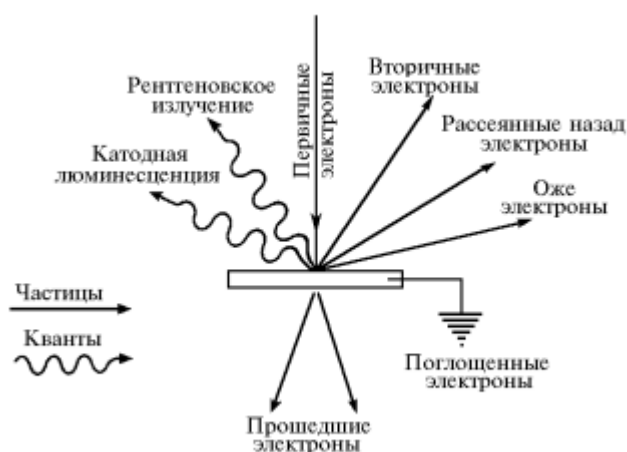
$$j = \frac{e\epsilon^2}{8\pi h\phi} \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2m}}{3he} \cdot \frac{\phi^{3/2}}{\epsilon} \mathcal{A}(y)\right)$$

$$\mathcal{A}(y) \approx 0,95 - 1,03y^2 \quad \text{---} \quad y = e\sqrt{\frac{e\epsilon}{\phi}},$$

Мұндағы: Нордгейм функциясы y аргументінен, ϕ – шығу жұмысы, ϵ – электр өрісінің кернеулігі.

Іс жүзінде термоөрістік катодтар да қолданылады, онда күшті электр өрісін қолданумен бірге бір мезгілде жоғары температураға дейін қыздыру қолданылады.

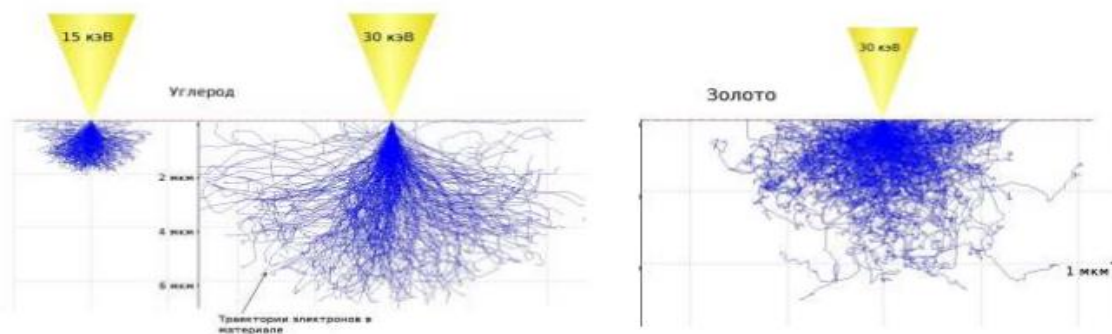
Электрондардың затпен әсерлесуі.



СЭМ катодқа берілетін үдетуші энергияның шамасы 1-30кВ аралығында болады. Сәуледегі электрондардың энергиясы потенциалдар айырымымен анықталады. Бұл потенциалдар айырымы үдетуші кернеу деп аталады. 1кВ кернеумен үдетілген электрондардың потенциалдар айырымы 1кэВ болады.

Үдетілген электрондар зерттеліп отырға үлгімен әсерлескенде зерттелетін үлгіден шығатын бірқатар процестер бар, олар электромагниттік сәулеленудің электрондары немесе кванттары. Катодтан ұшып шыққан электрондардың үлгімен әсерлесу нәтижесінде бірнеше сигналдар түзіледі, сканерлеуші электронды микроскопта тіркелетін негізгі сигналдар екінші ретті электрондар, шағылған электрондар және рентген сәулесі.

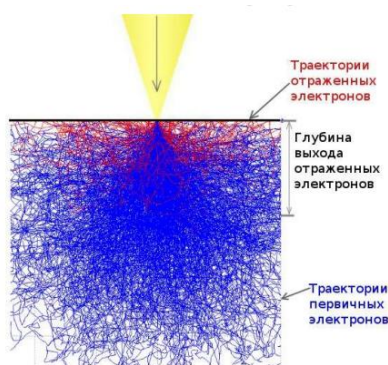
Үдетілген электрон шоғы зерттеліп отырған үлгіде бірнеше микрон тереңдікке енеді де шашырайды.



Сурет 2 – Әр түрлі материалдарда электрондардың шашырауы

Ену тереңдігі бірінші ретті электрондардың энергиясына және материалдың тығыздығына тәуелді болады. Катодтан ұшып шыққан электрондар үлгімен әсерлесіп кері шағылған электрондар (яғни үлгінің атомдарымен электрондарымен соқтығысқан) **шағылған (кері шашыраған) электрондар** деп аталады (BSE - backscattered electrons).

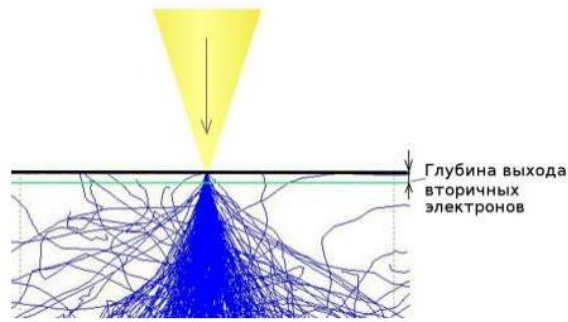
Шағылған электрондар бастапқы электрон шоғының ену тереңдігінің жартысына тең тереңдіктен шығады, үлгінің жазық бетінде электрондардың шығуы көп болады, бұл екінші реттік электрондарға қарағанда нашар ажыратымдылыққа ие, яғни разрешение төмен. Шағылған электрондар саны зерттеліп отырған материалдың атомдық нөмерімен тығыздығына байланысты болады.



Сурет 3 – Шағылған электрондар

Катодтан шыққан электрондар үлгінің электрондарымен әсерлесу нәтижесінде үлгіден шыққан электрондар **екінші ретті электрондар** деп аталады (SE - secondary electrons). Екінші ретті электрондардың (яғни үлгіден шыққан) энергиясы 50эВ төмен болады. Екінші ретті электрондардың энергиясының төмен болуы шығу тереңдігінің аз болында. Электрондар үлгіден шығу үшін шығу жұмысына тең энергетикалық барьерден өту керек, бұл бірнеше электрон-вольтқа тең. Сондықтан да, тереңдік артқан сайын екінші ретті электрондардың шығу ықтималдығы азаяды. Бұл, екінші ретті электрондар тек беткі қабаттан ғана шығады дегенді білдірмейді. Екінші ретті электрондар тек қана бірінші ретті электрондардың әсерінен түзілмейді, сонымен қатар, үлгінің терең қабаттарынан шағылған электрондарды әсерінен де түзіледі. Демек, екінші ретті және кері шағылған электрондардың шығу аймағының көлденең өлшемдері сәйкес келеді.

Екінші ретті электрондар (1-10 нм) аз тереңдіктен шығады.



Сурет 4 – Екінші ретті электрондар

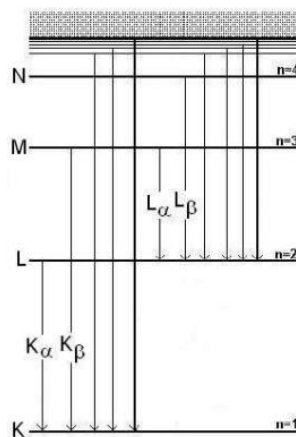
Екінші ретті электрондардың саны электрон шоқтарының бетке түсу бұрышымен анықталады, яғни беттің морфологиясымен.

Рентген сәулесі әсерлесудің барлық аймағынан шығады, сондай ақ, рентген сәулесінің бір бөлігі үлгімен жұтылады. Рентген сәулесінің екі түрі болады, тежелген және сипаттамалы рентген сәулелері.

Рентген сәулелері – үлгіде үдетілген электрондардың күрт тежелуі нәтижесінде шығуы, бұл тежелген рентген сәулесі деп аталады.

Рентген сәулесі, үдетілген электрондардың шоғы заттың атомын қоздыратын болса онда сипаттамалы рентген сәулесі болады, яғни ол әр химиялық элементтің атомдарына ғана тән сипаттамалық энергияға ие.

Сипаттамалық сәулелену спектрі атомның ішкі қабықшаларына ауысуға сәйкес келетін сызықтар жиынтығымен ұсынылған. Ішкі қабықшалар алфавит бойынша латын әріптерімен белгіленеді, К-дан бастап, сәйкес ауысулар ауысу болатын деңгеймен бірдей әріппен белгіленеді. Сонымен қатар, бұл ауысу болатын деңгейдің қаншалықты жоғары екенін білдіретін грек әрпі қосылады – мысалы K_{α} , K_{β} .



Сурет 5 – Сипаттамалы рентген ауысулары

Рентген сәулесінің генерациялану тереңдігі катодтан шыққан электрон шоғының үлгіге ені тереңдігіне байланысты болады. Үздіксіз тежеу спектрі жағдайында қозу электрондардың ену тереңдігінің барлық аймағында жүруі мүмкін. Рентген сәулелерін тіркеу кезінде кескіннің кеңістіктік ажыратымдылығы (пространственное разрешение) сәуле шығару аймағының өлшемдерімен анықталады және бірнеше микронға тең. Генерация аймағының минималды мөлшерін және сипаттамалық сызықтардың фонға қарқындылығының максималды қатынасын алу үшін электронды сәулеленің энергиясы осы материал үшін критикалық энергиядан 2-3 есе көп қолданылады. E_{cr} – критикалық энергия, берілген сәулелену сызығын қоздыру үшін қажетті ішкі қабатты (оболочка) иондау үшін қажетті энергияға тең

Әр түрлі химиялық элементтер үшін сипаттамалы сызықтардың энергия мәндері жақсы белгілі және химиялық байланыстарға қатты тәуелді емес, бұл үлгінің элементтік құрамын сапалы талдауға мүмкіндік береді.

Сипаттамалы сызықтың интенсивтілігі немесе қарқындылығы сәйкес келетін атомдардың концентрациясымен анықталады және үлгінің сапалық талдауына қолданылады.

Оже-электрондар. Бұл эффект 1925 жылы П.Ожемен ашылған. Оже эффектісінің мәні мынада: электрон шоқтарының ішкі электронды қабықшаларды иондауы нәтижесінде қоздырылған атом сәуле шығармай ауысу арқылы негізгі күйге оралуы мүмкін. Қозу энергиясы $E_K - E_{L1}$ басқа электронға берілуі мүмкін, мысалы көрші жатқан L_2 деңгейіндегі электронға. Осы электрон нысаннан немесе үлгіден шығады да Оже электрон ретінде тіркеледі. Бұндай электронның энергиясы:

$$E_K - E_{L1} - E_{L2} - \phi_A$$

Мұндағы ϕ_A – шығу жұмысы.

Валенттік электрондар көбінесе Оже-электронды эмиссияға қатысатындықтан және ішкі деңгейлердің байланыс энергиясы маңызды рөл атқаратындықтан, Оже-электрондардың энергиясы химиялық ортамен анықталады. Байланыс энергиясының әсерінен электронды деңгейлер бірнеше эв-ға ауысуы мүмкін. Сондықтан Оже спектрлерінде Оже электронын шығарған атомның химиялық ортасы туралы ақпарат болады. Оже электрондарын қолданудың тағы бір ерекшелігі бұл электрондардың энергиясы өте аз болады. Мысалы, электрондардың энергиясы 50эВ-2кэВ болса, орташы жүру ұзындығы 0,1-2 нм болады. Осылайша, Оже электрондарының өзара әсерлесу аймағы үлгі бетінің астындағы қалыңдығымен бірнеше атомаралық қашықтықта және зондтың диаметрімен берілген бетінің ауданымен шектеледі. Осылайша, Оже электрондарының негізгі қолдану саласы-үлгі бетіндегі атомдардың күйін зерттеу.

Катодолюминесценция - бұл электрон шоқтарының әсерінен үлгінің кристалдық торын қоздыру кезінде пайда болатын люминесценция. Үдетілген электрондар диэлектриктің немесе жартылай өткізгіштің кристалдық торына түсіп, атомдардың иондануын тудырады, осы тұрғыда екінші ретті электрондар пайда болады, олар өз кезегінде барлық энергияны жұмсамайынша немесе нысанадан шыққанға дейін иондануды тудыруы мүмкін. Түзілген кемтіктер, тор бойымен қозғала отырып, люминесценция орталықтарымен қармалады, онда біраз уақыттан кейін электрондар мен кемтіктердің рекомбинациясы жүреді, нәтижесінде фотондар пайда болады, ал оның спектрі берілген тор үшін фотолюминесценция спектріне ұқсас. Катодолюминесценция спектрі әдетте спектрдің ультракүлгін немесе көрінетін бөлігінде орналасады және рекомбинация орталығының түрін сипаттайды. Катодолюминесценция спектрлерін зерттеу кристалдық тордағы рекомбинация орталықтарының таралуы мен түрін зерттеуге мүмкіндік береді.

Индукцияланған ток (наведенный ток - Ток, возникающий в отключенных и заземленных линиях в результате емкостного и индуктивного взаимодействия с соседними линиями, находящимися под напряжением) – электрон шоқтарымен атқылау нәтижесінде, диэлектриктер мен жартылай өткізгіштердің электр өткізгіштігін арттыру, нәтижесінде электрон шоқтары энергияны жоғалтудың серпімді емес процестеріне байланысты кристалдық торда электронды кемтік жұптары пайда болады. Егер кристалдық торда электрлік белсенді ақаулар болса, олар рекомбинация орталығы ретінде қызмет етеді, ал нысанадан алынған ток өзгереді. Үлгі бетіндегі индукциялық токтың таралу үлгілері үлгідегі электрлік белсенді ақаулардың таралуы туралы ақпаратты қамтиды.

Дәрісті бекіту сұрақтары:

1 Электрон көзінің жұмысы қандай эмиссияға негізделген? Термоэлектрондық эмиссия және автоэлектрондық эмиссия құбылысын түсіндіріңіз.

2 Электрон шоғының үлгімен әсерлесуі кезіндегі түзілетін сигналдарды атаңыз

3 Шағылған электрондар, екінші ретті электрондар және Оже электрондарды түсіндіріңіз.

Әдебиеттер тізімі:

1. Алфимова, М.М. Занимательные нанотехнологии / М.М. Алфимова. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. - 823 с.
2. В.И. Марголин и др. Введение в нанотехнологию / В.И. Марголин и др. - М.: Лань, 2012. - 464 с.
3. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 416 с.