Aija Kalniņa

Ar divvērtīgā mangāna joniem aktivēta magnija germanāta materiāla ilgspīdošā luminiscence

Persistent luminiscence of divalent manganese-doped magnesium germanate material

Abstract

In the course of study, 10 different $MgGeO_3$: Mn^{2+} samples with different manganese 2+ ion concentrations were synthesized: 0 mol%, 0.1 mol%, 0.25mol%, 0.5 mol%, 0.75 mol%, 1 mol%, 1.5 mol%, 2 mol%, 5 mol% and 10 mol%.

The samples emit a good luminescence in the red spectrum diapason and can be excited by ultraviolet radiation and X-rays. Samples can shine for up to more than 10 hours after excitation. X-ray diffraction, excitation spectra, luminescence spectra, afterglow spectra, extinction kinetics and thermostimulated luminescence were measured for samples.

The obtained results provide the basis for assessing the processes taking place in the materials and the effect that the concentration of admixture ions has on the luminescence. Perhaps in the future it will be possible to use magnesium germanate in medical diagnostic equipment, yielding a further improved insight into the human body. In this case, the results of the study will be useful for medical application.

Keywords: medicine, luminescence, persistent lumincescence.

levads

Ilgspīdošās luminiscences procesā materiāla emitētais starojums novērojams vēl ilgi pēc ierosmes avota izslēgšanas. Šādi materiāli ar ilgu pēcspīdēšanu ir perspektīvi gan zinātniskiem, gan sadzīviskiem lietojumiem, piemēram, gaismas avotos, bioluminiscentajos marķieros, elektronikā u. c. *[Liu, Lei 2016].* Ir salīdzinoši daudz pētījumu par zaļās un zilās krāsas ilgspīdošiem materiāliem, bet daudz mazāk pieejamu publikāciju par sarkanajā un infrasarkanajā spektra daļā spīdošiem materiāliem. Sarkaniem un infrasarkaniem materiāliem ir potenciāli lietojumi medicīnā *[Smet, Eeckhout, Clerq, Poelman 2015].* Viens no sarkanajā spektra daļā ilgspīdošiem materiāliem ir MgGeO₃:Mn²⁺ *[Katayama, Kayumi, Ueda, Dorenbos, Viana, Tanabe 2017].* Materiālu luminiscences intensitāte ir saistīta ar piejaukumu jonu koncentrāciju *[Ju, Hu, Chen, Wang 2013]*, tāpēc šajā darbā tiek pētīta Mn²⁺ jonu koncentrācijas ietekme uz MgGeO₃:Mn²⁺ materiāla ilgspīdošās luminiscences procesiem.

Veicot šo darbu, tika izvirzīts šāds mērķis:

- Izpētīt ar Mn²⁺ joniem aktivēta MgGeO₃ materiāla luminiscences procesus atkarībā no mangāna koncentrācijas paraugā. Izvirzītie darba uzdevumi mērķa sasniegšanai:
- Sintezēt MgGeO₃ paraugus ar dažādām mangāna jonu koncentrācijām (0 mol%, 0,1 mol%, 0,25 mol%, 0,5 mol%, 0,75 mol%, 1 mol%, 1,5 mol%, 2 mol%, 5 mol% un 10 mol%).
- Veikt XRD un EPR mērījumus.
- Izmērīt luminiscences intensitāti atkarībā no divvērtīga mangāna jonu koncentrācijas.
- Izmērīt paraugu luminiscences spektrus, ierosmes spektrus, pēcspīdēšanas spektrus un dzišanas kinētikas.
- Veikt TSL mērījumus.
- Analizēt iegūtos datus un spriest par ilgspīdošās luminiscences procesiem un divvērtīga mangāna jonu koncentrācijas ietekmi uz tiem MgGeO_z:Mn²⁺ materiālā.

1. Teorētiskais apskats

1.1. Ilgspīdošā luminiscence

Pēc definīcijas luminiscence ir starojums, kuru ķermenis izstaro papildus termiskajam starojumam, un tā pēcspīdēšanas ilgums ievērojami pārsniedz gaismas svārstību periodu 10⁻¹⁵ s. Šo procesu var novērot materiālos ar defektiem vai apzināti pievienotiem aktivatoru joniem [Students 1971]. Luminiscence novērojama elektromagnētisko viļņu spektra ultravioletajā, redzamajā un infrasarkanajā daļā. Lai novērotu luminiscenci, materiālam nepieciešams absorbēt enerģiju, ar kuras palīdzību elektroni nonāk ierosinātā stāvoklī. Elektroniem, nonākot atpakaļ pamatstāvoklī, tiek izstaroti fotoni. Materiāls daļu enerģijas var zaudēt bez izstarojumu pārejās, tādēļ gaismas veidā emitētā enerģija parasti ir mazāka par absorbētā starojuma enerģiju un attiecīgi izstarotā starojuma viļņa garums ir lielāks par ierosmes viļņa garumu [Ronda 2008].

Pēc spīdēšanas ilguma luminiscence tiek iedalīta fosforescencē un fluorescencē, lai gan abi procesi var notikt arī vienlaicīgi. Fluorescence ilgst līdz 10⁻⁵ sekundēm pēc ierosmes avota atslēgšanas, bet fosforescence var turpināties vairākas sekundes vai pat stundas un dienas [Sunta 2015]. Ja fosforescences ilgums mērāms minūtēs vai stundās, procesu var saukt par ilgspīdēšanu [Liepiņa 2014]. Tā kā šajā darbā par luminoforu izvēlēts vairākas stundas spīdošs materiāls, pievērsīsim uzmanību ilgspīdēšanai.

Fosforescējošus materiālus parasti apraksta ar emitēto viļņa garumu, intensitāti un spīdēšanas ilgumu. Izstarotās gaismas viļņa garums atkarīgs no tā, cik tālu cits no cita izvietojas luminiscences centru veidojošie līmeņi. To, kā šie līmeņi izvietosies, nosaka pievienotie aktivatori. Luminiscences intensitāti un ilgumu nosaka ķērājcentru dziļumi un to daudzums. Materiāli ar dziļākiem ķērājcentriem spīd ilgāk, bet luminiscences intensitāte ir vājāka, savukārt materiāliem ar seklākiem ķērājcentriem luminiscences intensitāte ir lielāka, bet spīdēšanas ilgums īsāks *[Wu, Pan, Chen, Liu 2017]*.

1.2. Luminiscenti materiāli

Pirmie pētījumi par ilgspīdošiem materiāliem datējami ar 1602. gadu, kad tika atklāts Boloņas akmens jeb BaSO₄ ar piejaukumiem. Luminiscences pētījumi attīstījās lēni, un reizēm luminiscences intensitātes palielināšanai kā piejaukumus izmantoja radioaktīvus elementus [*Liu, Lei 2016*]. Savu popularitāti ilgspīdošās luminiscences pētījumi ieguva 1996. gadā, kad Matsuzava prezentēja labi spīdošu stroncija aluminātu, kas aktivēts ar eiropija un disprozija joniem. (SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺) [*Smet, Eeckhout, Clerq, Poelman 2015; Matsuzawa, Aoki, Takeuchi, Murayama 1996*]. Šobrīd ilgspīdēšana tiek aktīvi pētīta un ir ļoti liela materiālu dažādība, taču joprojām trūkst pilnīgas skaidrības par ilgi spīdošos materiālos notiekošajiem procesiem [*Liepiņa 2014*].

Pēdējos gados ir palielinājusies interese par germanātiem. Tie ir ķīmiski stabili, nodrošina salīdzinoši efektīvu ilgspīdēšanu, un tos var samērā viegli iegūt zemu temperatūru sintēzē *[Wang, Gou, Xu, Qiu, Yu 2015]*. Parasti matricās kā aktivatorus ievieto retzemju elementu vai pārejas metālu jonus. Aktivatorus pievieno zemās koncentrācijās, dažus mol%, jo, palielinot piejaukumu jonu koncentrāciju, samazinās attālums starp pievienotajiem joniem un palielinās varbūtība, ka notiks enerģijas pārnese starp tiem, kas savukārt palielina bezizstarojuma pārejas varbūtību *[Students 1971]*.

Luminiscējošiem materiāliem ir daudz lietojumu zinātnē un sadzīvē. Luminiscenci var izmantot, lai kāda cita veida starojumu, piemēram, UV vai rentgenstarojumu (R), pārvērstu redzamajā gaismā. Šādu efektu lieto mikroskopijā, fotogrāfijā, displejos un spuldzēs *[Ronda 2008]*.

Sarkanajā un infrasarkanajā spektra daļā (650–1300 nm) spīdošiem materiāliem ir noderīgi lietojumi medicīnā [*Ju, Hu, Chen, Wang 2013*]. Kā viens no perspektīviem sarkanajiem spīdētājiem ir zināms MgGeO₃:Mn²⁺ [Katayama, Kayumi, Ueda, Dorenbos, Viana, Tanabe 2017].

1.3. MgGeO,:Mn²⁺

Šajā darbā no plašo materiālu klāsta izvēlēta magnija germanāta matrica, kas aktivēta ar divvērtīgu mangānu. Magnija germanāts ir komplekss oksīds. Oksīdos materiāla sintēzes procesā var rasties skābekļa vakances, kuras var būt elektronu ķērājcentri [*Li, Gecevicius, Qui 2016*].

Mangāna iespējamās oksidācijas pakāpes ir no +1 līdz +7, luminiscentiem materiāliem izmanto Mn⁴⁺ un Mn²⁺ jonus. Mn²⁺ jons atkarībā no tā ievietošanās matricā var emitēt dažādu redzamās gaismas starojumu *[Li, Gecevicius, Qui 2016]*. Matricas izvēle ietekmē arī spīdēšanas ilgumu, tomēr ir arī citi būtiski faktori, kuriem ir vērā ņemama ietekme uz pēcspīdēšanu, piemēram, piejaukumu koncentrācija.

MgGeO₃:Mn²⁺ materiālu ierosinot ar UV vai rentgenstariem, tas emitē starojumu sarkanajā spektra daļā. Materiālā ir divu veidu defekti: rekombinācijas centri un lādiņu ķērājcentri *[Katayama, Kayumi, Ueda,* Dorenbos, Viana, Tanabe 2017]. Mn²⁺ joni uzvedas kā caurumu ķērājcentri, bet skābekļa vakances kā elektronu ķērājcentri [Takemoto, Iseki 2017]. Par MgGeO₃:Mn²⁺ materiāla luminiscenci atrodamas tikai dažas publikācijas [Katayama, Kayumi, Ueda, Dorenbos, Viana, Tanabe 2017; Katayama, Kayumi, Ueda, Tanabe 2017; Cong, Li, Yue, Zhang, Li, Wang 2009], un nevienā no tām nav publicētu tiešu pētījumu par mangāna jonu koncentrācijas ietekmi.

2. Pētījumā izmantotās metodes

2.1. Paraugu sintēze

Eksperimentam nepieciešamie paraugi iegūti ar cietfāžu sintēzi. GeO₂ (99,9999%), MgCO₃·Mg(OH)₂·3H₂O (99,996%) un MnO₂ (99,997%) attiecīgos daudzumos izmaisīja (CH₃)₂CO šķīdumā, kurš nereaģē ar pārējām izmantotajām vielām. Vielu maisīšana tika veikta marmora piestā, kad viss (CH₃)₂CO iztvaikoja, iegūtie pulveri pārbērti korunda tīģeļos. Pulveri karsēti krāsnī CARBOLITE HTF 1800 divas stundas 1250 °C temperatūrā ar krāsns silšanas ātrumu 10⁰/min. Atkarībā no izvēlētā MnO₂ daudzuma tika iegūti 10 dažādi MgGeO₃:Mn²⁺ paraugi ar Mn²⁺ koncentrācijām: 0 mol%, 0,1 mol%, 0,25 mol%, 0,5 mol%, 0,75 mol%, 1 mol%, 1,5 mol%, 2 mol%, 5 mol% un 10 mol%. Lai paraugus būtu ērtāk izmantot, tie, lietojot hidraulisko spiedi, tika saspiesti tabletēs ar 7–8 tonnu spiedienu un otro reizi izkarsēti. Rezultātā iegūtas 10 dažādas MgGeO₃:Mn²⁺ materiāla tabletes ar atšķirīgām divvērtīga mangāna jonu koncentrācijām.

2.2. Paraugu struktūras mērījumi

Lai pārliecinātos par MgGeO₃:Mn²⁺ paraugu kvalitāti, visiem iegūtajiem paraugiem tika veikti fāžu struktūras mērījumi ar MiniFlex 600 RIGA-KU rentgenstaru difraktometru. Iegūtie mērījumi salīdzināti ar datubāzes ierakstu JCPDS 00-076-1387.

Daļai MgGeO₃:Mn²⁺ paraugu (koncentrācijām: 0,1 mol%, 0,25 mol%, 0,5 mol%, 1 mol%, 2 mol%) tika mērīti elektronu paramagnētiskās rezonanses (EPR) spektri. EPR mērījumi tika veikti istabas temperatūrā ar iekārtu Bruker ELEXSYS-II E500 CW-EPR.

2.3. Spektroskopiskie mērījumi

Lai veiktu MgGeO₃:Mn²⁺ paraugu optisko īpašību analīzi, daļai paraugu tika uzņemti ierosmes spektri, visiem paraugiem mērīti luminiscences spektri, pēcspīdēšanas spektri un dzišanas kinētikas. Luminiscences mehānismu izpratnei visiem paraugiem veikti arī termostimulētās luminiscences mērījumi.

lerosmes spektri tika mērīti UV viļņu diapazonā MgGeO₃:Mn²⁺ paraugiem ar Mn²⁺ jonu koncentrācijām: 0,1 mol%, 0,25 mol%, 0,5 mol%, 1 mol%, 2 mol%. Par ierosmes avotu izmantota deitērija lampa ar 0,5 m Seja-Namioka vakuuma monohromatoru. Ierosmes spektri detektēti ar fotoelektronu daudzkāršotāju H6780-04 un fotonu skaitītāju H8959-01.

Luminiscences emisijas spektru un dzišanas kinētiku mērījumiem visiem paraugiem par ierosmes avotu izmantots cietvielu lāzers NT342/3UV un rentgenstaru lampa Spellman (40 kV, 20 mA). Spektri un dzišanas kinētikas uzņemtas ar CCD kameru Andor DU-401-BV un monohromatoru Andor SR-303i-B. Pirms termostimulētās luminiscences mērījumiem paraugi tika 60 sekundes apstaroti ar rentgena starojumu (VF-50J/s). MgGeO₃:Mn²⁺ paraugi tika sildīti no istabas temperatūras līdz 300 °C ar ātrumu 10 °C minūtē. TSL mērījumi veikti ar iekārtu Lexsyg research TL.

3. Rezultāti un diskusija

3.1. Paraugu struktūras analīze

Lai pārliecinātos par sintezēto paraugu kvalitāti, analizēta paraugu struktūra, izmantojot XRD (sk. 3.1. att.) un EPR (sk. 3.2. att.) mērījumus.

Rentgenstaru difrakcijas mērījumi tiek izmantoti, lai identificētu parauga sastāvu. 3.1. attēlā redzams, ka visiem MgGeO₃:Mn²⁺ paraugiem ir nemainīgas difrakcijas maksimumu atrašanās vietas, kas sakrīt ar izvēlēto datubāzes ierakstu JCPDS 00-076-1387.

Mangāna jonam ir pozitīva valence, tātad tas var iebūvēties vai nu germānija, vai magnija vietā. MgGeO₃:Mn²⁺ materiālā mangāna un magnija jonu valences ir divvērtīgas, bet germānija valence ir četrvērtīga. Arī jonu rādiusi mangānam ar magniju ir līdzīgāki nekā ar germāniju ($r_{ge}^{2+} = 0,39$ Å, $r_{Mg}^{2+} = 0,72$ Å, $r_{Mn}^{2+} = 0,65$ Å) *[Sunta 2015]*. Pateicoties šīm līdzībām, ja MgGeO₃ vielas kristālrežģī magnija vietā iebūvējas mangāns,



3.1. att. MgGeO₃:Mn²⁺ paraugu XRD mērījumi



3.2. att. MgGeO₃:Mn²⁺ paraugu EPR mērījumi

A. Kalniņa. Ar divvērtīgā mangāna joniem aktivēta magnija germanāta .. 107

kristālrežģa struktūra netiek daudz deformēta. 3.1. attēlā paraugiem ar lielām mangāna jonu koncentrācijām joprojām novērojama nemainīga difrakcijas aina, no tā var secināt, ka, visticamāk, MgGeO₃:Mn²⁺ materiālā mangāna joni ievietojas magnija vietā.

Daļai paraugu tika veikti arī EPR mērījumi. 3.2. attēlā EPR mērījumi uzrāda tipisku Mn²⁺ jonu spektru. Tas liecina par to, ka sintēzes procesā Mn⁴⁺ joni reducējušies uz Mn²⁺ joniem. Pat ja materiālā atrodas Mn⁴⁺ joni, tie ir nedetektējamā koncentrācijā. EPR metode neļauj noteikt precīzu Mn²⁺ jonu koncentrāciju, bet ir uzskatāmi redzams, ka paraugiem ar mazāku pievienoto Mn²⁺ jonu daudzumu ir vājāks detektētais signāls.

No XRD un EPR mērījumiem var secināt, ka $MgGeO_3$: Mn^{2+} paraugu sintēze ir izdevusies:

- Paraugu matricu veido MgGeO₃.
- Sintēzes procesā matricā ievietojušies Mn²⁺ piejaukumi, kas, visticamāk, aizstāj Mg²⁺ jonus.

3.2. lerosmes un emisijas spektri

3.3. attēlā redzami ${\rm MgGeO}_{\rm 3}{\rm :}{\rm Mn}^{2+}$ paraugu ierosmes spektri luminiscences starojumam. Ierosmes spektru nosacīti var sadalīt divos



3.3. att. MgGeO₃:Mn²⁺ luminiscences ierosmes spektrs

apgabalos, diapazonā no īsākiem viļņu garumiem līdz 230 nm un no 230 nm līdz 280 nm. Visticamāk, ka īsāko viļņu apgabals saistīts ar elektronu pāreju starp vadītspējas un valences zonu. Tas atbilst arī zinātniskās literatūras avotos atrodamajiem datiem un aizliegtās zonas platumam 5,6 eV [Katayama, Kayumi, Ueda, Dorenbos, Viana, Tanabe 2017].

Pieaugot Mn²⁺ jonu koncentrācijai, relatīvi palielinās ierosmes intensitāte diapazonā no 230 nm līdz 280 nm. Apgabals no 230 nm līdz 280 nm, visticamāk, saistīts ar lādiņu pārneses procesiem MgGeO₃:Mn²⁺ materiālā. Šajā materiālā iespējama lādiņu pāreja no valences zonas augšējiem līmeņiem uz Mn²⁺ un no Mn²⁺ uz vadītspējas zonu. Šādi procesi ir minēti zinātniskajā literatūrā apskatītajās publikācijās *[Katayama, Kayumi, Ueda, Dorenbos, Viana, Tanabe 2017; Katayama, Kayumi, Ueda, Tanabe 2017; Cong, Li, Yue, Zhang, Li, Wang 2009]*. Tālākiem pētījumiem par ierosmes avotiem tiek izmantots UV starojums ar viļņu garumu 260 nm un R starojums.

lerosinot paraugus, tika novērota luminiscence un pēcspīdēšana gaismas spektra sarkanajā un infrasarkanajā daļā. Salīdzinot MgGeO₃:Mn²⁺ paraugus, tika uzņemta izstarotās gaismas intensitāte atkarībā no Mn²⁺ jonu koncentrācijām. Sakarība starp intensitātēm atšķirīgiem paraugiem, ierosinot tos ar diviem dažādiem ierosmes avotiem (UV un R starojumu), parādīta 3.4. attēlā.

3.4. attēlā redzams, ka gan ar UV, gan R starojumu ierosinātiem paraugiem saglabājas luminiscences intensitātes tendences atkarībā no MgGeO₃ materiālam pievienotās Mn²⁺ jonu koncentrācijas. Visintensīvākā luminiscence novērojama paraugiem ar Mn²⁺ 0,5 mol% un 0,75 mol% koncentrācijām. Pie 10 mol% luminiscence vēl ir novērojama, bet tā ir relatīvi vāja. Arī paraugs bez apzināti pievienota mangāna luminiscē spektra sarkanajā daļā, kas liecina par to, ka sintēzē izmantotajās vielās jau ir mangāna joni, bet, tā kā šī koncentrācija ir ļoti maza, salīdzinot ar apzināti pievienoto mangāna koncentrāciju, tas netraucē paraugu izpētei un salīdzināšanai.

Palielinoties piejaukumu jonu koncentrācijai līdz 0,75 mol%, pieaug luminiscences intensitāte, jo materiālā ir vairāk luminiscences centru. Virs 0,75 mol% palielinās enerģijas pārnese starp Mn²⁺ joniem un pieaug bez izstarojuma pārejas varbūtība, kā rezultātā novērojama luminiscences intensitātes samazināšanās *[Smet, Eeckhout, Clerq, Poelman 2015]*. Šādas sakarības novērojamas lielākajā daļā luminiscentu materiālu.



3.4. att. MgGeO₃:Mn²⁺ luminiscences relatīvā intensitāte atkarībā no pievienotā Mn²⁺ jonu daudzuma pie 680 nm, ierosinot paraugus ar UV un R starojumu



3.5. att. MgGeO₃:Mn²⁺ luminiscences emisijas spektrs paraugam ar 0.75 mol% piejaukuma jonu koncentrāciju

Novērotās luminiscences emisijas spektrs starp paraugiem atšķiras tikai ar intensitātēm, tādēļ emisijas spektra izpētei tika apskatīts paraugs ar lielāko luminiscences intensitāti 0,75 mol%.

3.5. attēlā redzamais spektrs uzņemts, ierosinot 0,75 mol% paraugu ar rentgenstariem. MgGeO₃:Mn²⁺ paraugiem novērojams luminiscences starojums vienā platā joslā no 600 līdz 800 nm, kas atbilst sarkanajam un tuvajam IR starojumam. Novērotais luminiscences emisijas spektrs atbilst zinātniskās literatūras avotos pieejamajās publikācijās par MgGeO₃:Mn²⁺ pētījumiem *[Katayama, Kayumi, Ueda, Dorenbos, Viana, Tanabe 2017; Katayama, Kayumi, Ueda, Tanabe 2017; Cong, Li, Yue, Zhang, Li, Wang 2009].*

3.3. Luminiscences dzišanas kinētikas

MgGeO₃:Mn²⁺ paraugiem novērojama ilgspīdēšana istabas temperatūrā. Ilgspīdēšanas pētīšanai analizētas dzišanas kinētikas.



3.6. att. Dzišanas kinētiku mērījumi pēc 10 min ierosmes ar R starojumu

A. Kalniņa. Ar divvērtīgā mangāna joniem aktivēta magnija germanāta ..

3.6. attēlā redzams, ka MgGeO₃:Mn²⁺ paraugu spīdēšanas ilgumu ietekmē Mn²⁺ jonu koncentrācija. Izmantojot R starojuma ierosmes avotu, paraugiem ar zemākām koncentrācijām pēcspīdēšana labi detektējama līdz 10 stundām, bet paraugiem ar 5 mol% un 10 mol% luminiscence novērojama vien dažas minūtes. No apskatītajām dzišanas kinētikām var secināt, ka MgGeO₃:Mn²⁺ materiālā ilgspīdošās luminiscences gaitā vienlaicīgi norisinās dažādi procesi.

3.4. Termostimulētās luminiscences mērījumu rezultāti

3.7. attēlā redzami TSL mērījumi dažādu Mn²⁺ jonu koncentrāciju paraugiem. Starp paraugiem mainās TSL intensitāte ar tādām pašām tendencēm, kuras novērojamas luminiscences emisijas spektra mērījumos. TSL līknēm novērojami 3 iespējamie intensitātes pieauguma maksimumi, kas liecina par to, ka materiālā ir vismaz 3 dažādi lādiņu ķērājcentri. Novērojams, ka starp koncentrācijām būtiski nemainās šo līmeņu novietojums, kas liecina par to, ka Mn²⁺ jonu koncentrācija neietekmē ķērājcentru dziļumu.



3.7. att. MgGeO₃:Mn²⁺ TSL mērījumi

Secinājumi

Izmantojot cietfāžu sintēzes metodi, izdevies iegūt 10 dažādus $MgGeO_3:Mn^{2+}$ paraugus ar Mn^{2+} jonu koncentrācijām: 0 mol%, 0,1 mol%, 0,25 mol%, 0,5 mol%, 0,75 mol%, 1 mol%, 1,5 mol%, 2 mol%, 5 mol% un 10 mol%.

MgGeO₃:Mn²⁺ paraugus iespējams ierosināt gan ar UV, gan R starojumu, un tiem novērojama laikā nemainīga un no ierosmes avota neatkarīga, plata luminiscences josla no 600 līdz 800 nm.

Visintensīvākā luminiscence novērojama paraugiem ar Mn²⁺ jonu koncentrāciju 0,5 mol% un 0,75 mol%, bet visilgāk, līdz pat 10 stundām, detektējama ilgspīdēšana paraugiem ar koncentrācijām no 0,1 mol% līdz 2 mol%.

Pēcspīdēšanas gaitā MgGeO₃:Mn²⁺ materiālā vienlaicīgi norit dažādi kompleksi enerģijas un lādiņu pārneses procesi.

TSL mērījumi uzrāda vismaz 3 dažādus ķērājcentrus, kuri nodrošina efektīvu ilgspīdēšanu MgGeO_z:Mn²⁺ materiālā.

Pētījums tiks turpināts, modificējot izmantoto materiālu un veicot papildu mērījumus. Šobrīd tiek pētīts magnija germanāts, kurš aktivēts ar hromu. Jau ir noskaidrots, ka šis materiāls spīd spektra daļā no 700 līdz 1000 nm un pēc apstarošanas ar rentgenstarojumu turpina luminiscēt vairāk nekā 30 stundas.

- Mērķis: turpināt pētīt ar MgGeO₃ materiāla ilgspīdošās luminiscences procesus un noskaidrot, kā šo materiālu iespējams uzlabot.
- Darba uzdevumi:
 - Padziļināti pētīt zinātnisko literatūru par germanātu luminiscenci.
 - Sintezēt jaunus, modificētus paraugus.
 - Veikt attiecīgos luminiscences mērījumus.
 - Analizēt iegūtos datus un izdarīt attiecīgos secinājumus.

Izmantotā literatūra

 Cong, Y., Li, B., Yue, S., Zhang, L., Li, W., Wang, X. J. (2009). Enhanced Red Phosphorescence in MgGeO₃:Mn²⁺ by Addition of Yb³⁺ Ions. In: *J. Electrochem.* Soc., No. 156, H272–H275.

- 2. Ju, G., Hu, Y., Chen, L., Wang, X. (2013). Concentration quenching of persistent luminescence. In: *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 415.
- Katayama, Y., Kayumi, T., Ueda, J., Dorenbos, P., Viana, B. and Tanabe, S. (2017). The role of Ln³⁺ (Ln = Eu, Yb) in persistent red luminescence in MgGeO₃:Mn²⁺. In: *J. Mater. Chem. C*, Vol. 34, pp. 8893-8900.
- Katayama, Y., Kayumi, T., Ueda, J., Tanabe, S. (2017). Enhanced persistent red luminescence in Mn²⁺ doped (Mg, Zn)GeO₃ by electron trap and conduction band engineering. In: *Opt. Mater. (Amst)*, Vol. 79.
- 5. Li, Y., Gecevicius, M., Qiu, J. (2016). Long persistent phosphors from fundamentals to applications. In: *Chem. Soc. Rev.*, Vol. 2090, p. 45.
- Liepiņa, V. (2014). Luminiscences mehānisma pētījumi SrAl₂O₄:Eu, Dy materiālā. Maģistra darbs. Rīga: Latvijas Universitāte, 51 lpp.
- Liu, Y., Lei, B. (2016). Persistent Luminescent Materials, in Phosphors, Up Conversion Nano Particles, Quantum Dots and Their Applications. Singapore: Springer Singapore, Vol. 214, pp. 167-214.
- Matsuzawa, T., Aoki, Y., Takeuchi, N., Murayama, Y. (1996). A New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺. In: *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, pp. 2670-2673.
- 9. Ronda, C. (2008). *Luminescence From Theory to Aplications*. Weinheim: Wiley-VCH, Vol. 260, 978-3-527-31402-7.
- Smet, P. F., Eeckhout, K. V., Clercq, O., Poelman D. (2015). *Persistent phos-phors.* LumiLab, Department of Solid State Sciences, Ghent University, Ghent, Belgium, Vol. 108.
- 11. Students, O. (1971). Optika. Rīga: Zvaigzne, Vol. 412, 390.-396. lpp.
- Sunta, C. M. (2015). Untaveling Thermoluminescence. Springer, New York Dordrecht London, Vol. 202, 978-81-322-1940-8.
- Takemoto, M., Iseki, T. (2017). Fluorescence and afterglow of Ca₂Sn₂Al₂O₉:Mn²⁺. In: *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 114, pp. 88-93.
- Wang, T., Gou, J., Xu, X., Qiu, J., Yu, X. (2015). Self-activated long persistent luminescence from different trapping centers of calcium germanate. In: *Optics express*, Vol. 23, 10.
- Wu, S., Pan, Z., Chen, R., Liu, X. (2017). Long afterglow phosphorescent materials. Springer, Vol. 160, 978-3-319-60421-3.