



2007–2013 m. Žmogiškųjų išteklių plėtros veiksnių programos 2 prioriteto „Mokymasis visą gyvenimą“ VP1-2.2-ŠMM-09-V priemonės „Studijų programų plėtra Nacionalinėse kompleksinėse programose“

Projektas

„I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Projekto numeris VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-005

PUSLAIDININKIO INTEGRINIO FOTOLAIDŽIO TYRIMAS

Praktinio užsiėmimo konspektas
magistrantūros programos
„Saulės elementų ir modulių inžinerija“
studentams

Parengė
doc., dr. D. Jasaitis
prof., dr. A. Jukna
dr. V. Valuntaitė

Vilnius 2012

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Darbo tikslu šiame darbe yra gauti fotosrovės priklausomybę nuo apšviestumo bei apskaičiuoti integralinį ir savitąjį fotovaržos jautrius.

Apšvietus medžiagą, joje gali vykti įvairūs reiškiniai. Vienas tokių reiškinų yra medžiagos varžos kitimas veikiant šviesai, t. y. fotolaidumas.

Reiškinys, kai apšvietus puslaidininkį arba dielektriką, jo laidumas padidėja vadinamas vidiniu fotoefektu.

Dėl absorbuotų šviesos kvantų energijos elektronai iš valentinės juostos pereina į laidumo juostą. Priemaišiniuose puslaidininkiuose elektronai gali pereiti iš valentinės juostos į priemaišų (akceptorinius) lygmenis arba iš priemaišų (donorinių) lygmenų į laidumo juostą. Dėl šių perėjimų padidėja laisvų krūvininkų skaičius (elektronų arba skylių), o tuo pačiu ir elektrinis laidumas. Fotoefekto sukeltas laidumas vadinamas fotolaidumu.

Elektromagnetinio sužadinimo metu visą fotono energiją sugeria elektronas todėl, skirtingai nuo šiluminio sužadinimo, kuris yra statistinio pobūdžio ir vyksta esant bet kokiai temperatūrai $T > 0$, fotoninis sužadinimas vyks tik tada, kai fotono energija $h\nu \geq \Delta E_{pr}$ (priemaišinis fotolaidumas) ir $h\nu \geq \Delta E_0$ (savasis fotolaidumas). Perteklinė fotono energija pereina į laidumo juostos elektrono kinetinę energiją, kurios jis netenka susidūrimo su atomais metu. Mažiausias fotono, sukeliančio vidinį fotoefektą, dažnis vadinamas fotolaidumo raudonąja riba.

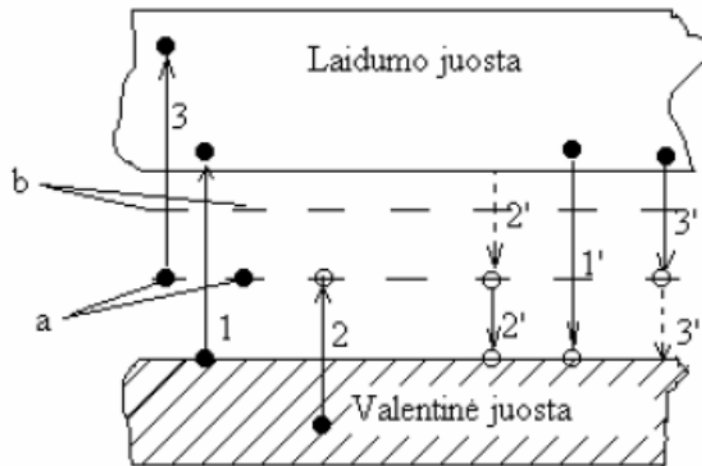
Iš principo elektrinio laidumo padidėjimą apšviečiant galima būtų paaiškinti ir krūvininkų judrumo padidėjimu, ir koncentracijos padidėjimu. Tačiau bandymais buvo tiesiogiai įrodyta, kad visais atvejais didėja koncentracija, o judrumas šviesinių ir tamsinių krūvininkų išlieka tas pats.

Yra trys būdai padidinti krūvininkų koncentraciją veikiant šviesai:

1) šviesos kvantai išmuša elektronus iš valentinės juostos ir perkelia į laidumo juostą (1 pav. 1); tuo pačiu metu didėja ir elektronų, ir skylių skaičius;

2) elektronai išmušami iš valentinės juostos ir patenka į laisvus priemaišinius lygmenis; tuomet didėja skylinis laidumas (2 pav. 2);

3) elektronas iš priemaišinių lygmenų patenka į laidumo juostą ir didėja elektrinis laidumas (3 pav. 3).



1 pav. Krūvininkų generacijos ir rekombinacijos galimų kelių schema: 1– generacija didinanti elektroninį ir skylinį laidumą; 2– generacija didinanti skylinį laidumą; 3– generacija didinanti elektroninį laidumą; 1' – tiesioginė (tarpjuostinė) rekombinacija; 2' ir 3' – rekombinacija per priemaišinius centrus: 2' – elektronas iš priemaišinio centro leidžiasi į valentinę juostą, o į atsilaisvinusią vietą patenka elektronas iš laidumo juostos; 3' – tas pats vyksta atvirkštine tvarka; a – energijos lygmenys, atitinkantys nesužadintą elektrono būseną priemaišiniame centre; b – energijos lygmenys, atitinkantys sužadintą elektrono būseną priemaišiniame centre.

Kiekvieno fotokrūvininko istoriją galime suskaidyti į keturis pagrindinius periodus:

a) gimimas (generacija);

b) laikas, per kurį fotokrūvininkas smūgių metu netenka perteklinės energijos ir pereina į šiluminę pusiausvirą su gardele. Šis laikas 100 – 1000 kartų viršija „tamprios“ relaksacijos laiką, bet paprastai daug eilių mažesnis, nei gyvavimo laikas;

c) pats ilgiausias fotokrūvininko periodas, kuriame jis susimaišęs su tamsiniais krūvininkais ir niekuo nesiskirdamas nuo jų (išskyrus kilmę) dalyvauja visuose pernešimo reiškiniuose vienodai su jais. Šis periodas gali būti pertraukinėjamas trumpesniais ar ilgesniais prilipimo periodais, kas mažins efektinį judrumą ir difuzijos koeficientą.

Reikia pabrėžti, kad visame šiame periode krūvininkų koncentracija viršija pusiausvirą ir rekombinacija viršija šiluminę generaciją. Todėl, kai šviesos (ar kitu būdu sukelta) generacija baigsis, krūvininkų koncentracija pradės mažėti.

d) Paskutinis ir vos ne svarbiausias momentas – fotokrūvininko „mirtis“, tai yra rekombinacija. Rekombinacija apriboja ir tuo pačiu nustato fotokrūvininkų gyvavimo laiką.

Krūvininkų rekombinacija gali vykti dviem skirtingais keliais (1 pav.): tiesioginė (tarpjuostinė) rekombinacija (1') ir rekombinacija per priemaišų centrus (2' ir 3'). 2' atveju pirma elektronas iš priemaišinio centro patenka į valentinę juostą (šis procesas vadinamas *skylutės pagavimu*), o po to į atsilaisvinusį priemaišiniame centre lygmenį patenka elektronas iš laidumo juostos; 3' atveju pirmiausia pagaunamas elektronas, o po to – skylutė .

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Krūvininkam rekombinuojant turi galioti energijos ir impulso tvermės dėsniai. Šiluminės generacijos atveju elektronai gauna energiją ir impulsą iš fonono ar kito laisvo elektrono, turinčio pakankamą kinetinę energiją (ši generacija vadinama smūgine), šviesos atveju – iš fotono. Dažnai pagrindinis vaidmuo tenka kombinuotiems procesams, kuriuose didžiąją energijos dalį elektronas gauna iš fotono, o impulso dalį – iš fonono. Krūvininkams rekombinuojant taip pat yra keletas energijos pasiskirstymo būdų.

Spindulinė rekombinacija – kada energija ir impulsas, išsilaisvinę rekombinuojant elektronui ir skylutei, išspinduliuojami šviesa. Tačiau skaičiavimai ir bandymai rodo, kad tokio proceso tikimybė didelė palyginus retais atvejais – pakankamai grynuose kristaluose ir net šiomis sąlygomis ne visuose kristaluose. Spindulinė rekombinacija atsiranda liuminescenciniuose kristaluose; su ja susijęs lazerio veikimas.

Nespindulinė rekombinacija – analogiškas procesas (elektronas betarpiškai patenka į valentinę juostą), skirtumas tas, kad išlaisvinta energija išsiskiria kaip šiluma (fononai). Tačiau ir šio proceso tikimybė maža. Esmė ta, kad vieno fonono energija neviršija kelių šimtųjų elektronvolto dalių. Jei draustinės juostos plotis vieno elektronvolto eilės ir visa energija išsiskirtų šiluma, tai reikštų, kad vienu metu atsirado keletas dešimčių fononų. Toks procesas mažai tikėtinas, kaip ir kelių dešimčių dalelių susidūrimas viename taške.

Tiesioginiai šuoliai svarbūs medžiagose su siaura draustine juosta.

Daugeliu atvejų svarbiausia yra rekombinacija per priemaišų centrus. Tai reiškia, kad laisvas elektronas pirma pagaunamas priemaišinių centrų, o po to patenka į valentinę juostą. Ši rekombinacija, lyginat su betarpiška rekombinacija, yra labiau tikėtina dėl šių priežasčių:

1. Šiuo atveju energija daloma į dvi dalis, ir kiekviename elementariame akte ji mažesnė nei tiesioginiuose perėjimuose, vadinasi, vienu metu susidaro mažiau fononų. Todėl rekombinacijai efektyviausi centrai, kurie yra arčiausiai draustinės juostos vidurio.

2. Priemaišinis centras gali pasiimti dalį ar visą elektrono (ar skylutės) energiją arba impulsą.

Šio proceso dvi stadijos – elektrono ir skylutės pagavimas – gali būti skirtingų tikimybių.

Jei priemaišiniai centrai yra arčiau laidumo juostos, tai elektrono pagavimas labiau tikėtinas, ir elektronas ilgai „lauks“ savo partnerio. Šiluminė fliktuacija gali jį užkelti atgal į laidumo juostą ir tik po daugelio procesų pasikartojimo, pagaliau, nusileis į valentinę juostą.

Tais atvejais, kai grįžimas į laidumo juostą labiau tikėtinas, negu rekombinacija, atitinkami lygmenys vadinami *elektronų (arba skylučių) prilipimo lygmenimis*. Krūvininko pagavimo tikimybė priklauso ir nuo priemaišinio atomo krūvio. Neutraliai priemaišai esant tokioms pačioms sąlygoms,

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

šios tikimybės vienodos. Teigiamam jonui labiau tikėtinas elektrono pagavimas, neigiamam – skylutės.

Kadangi krūvinė būseną ir priemaišinių centrų užpildymo laipsnis priklauso nuo Fermi lygmens padėties, o vadinasi, ir nuo temperatūros, tai šie faktai taip pat veikia elektronų ir skylių gyvavimo laiką.

Esant dideliame šviesos intensyvumui, skirtingų lygmenų užpildymo laipsnis, o taip pat ir krūvininkų rekombinacijos tikimybė pradeda priklausyti nuo sugertų kvantų kiekio, t. y. nuo intensyvumo ir laiko.

Gerai legiruotame puslaidininkyje, taip pat esant dideliame apšviestumui, lemiamas vaidmuo atitenka taip vadinamai smūginei rekombinacijai. Smūginės rekombinacijos metu išlaisvinta energija perduodama kitam (laisvam) elektronui.

Pagrindinės fotovaržų charakteristikos yra voltamperinės, šviesinės ir spektrinės.

Voltamperinė charakteristika išreiškia fotosrovės I_f (esant pastoviam šviesos srautui ϕ) arba tamsinės srovės I_t priklausomybę nuo įtampos U . Daugumai fotovaržų ši priklausomybė praktiškai tiesinė (fotosrovė $I_f = I_s - I_t$, čia I_s – šviesinė srovė, tekanti apšvietus fotovaržą, I_t – tamsinė srovė).

Šviesinė charakteristika išreiškia fotosrovės I_f priklausomybę nuo krintančio į fotovaržą pastovios spektrinės sudėties šviesos srauto ϕ , esant pastoviai įtampai U .

Spektrinė charakteristika išreiškia fotovaržos jautrio priklausomybę nuo krintančios šviesos bangos ilgio, esant pastoviam šviesos srautui ϕ ir įtampai U .

Pagrindiniai fotovaržų parametrai yra jautris (savitasis, integralinis, spektrinis), tamsinė varža bei varžos kitimo kartotinumai.

Integraliniu fotovaržos jautriu K vadinamas dydis, skaitmeniškai lygus fotosrovei I_f , kuri susidaro krintant šviesos srauto ϕ vienetui statmenai fotovaržos paviršiui, sudarius tam tikrą įtampą:

$$K = \frac{I_f}{\phi} = \frac{I_f}{ES}, \quad (1)$$

čia E – fotovaržos apšviestumas, S – paviršiaus plotas ($E = \frac{\phi}{S}$).

Integralinis fotovaržos jautris priklauso nuo darbinės įtampos ir šiek tiek nuo apšviestumo. Savituoju jautriu vadinamas integralinio jautrio ir darbinės įtampos santykis:

$$\gamma = \frac{K}{U}. \quad (2)$$

Tamsinė varža R_t – tai neapšviestos fotovaržos varža, kai temperatūra $t = 20$ °C.

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Varžos kitimo kartotinumai $-R_t / R_{\xi}$ (R_{ξ} – apšviestos fotovaržos varža, kai apšviestumas $E=200 \text{ lx}$).

Spektrinis jautris charakterizuoja fotosrovę, kuri susidaro apšvietus fotovaržą monochromatine šviesa.

Darbo priemonės šiame darbe yra fotovarža, srovės šaltinis, mikroampermetras, voltmetras, liniuotė, liuksmetras.

Išmatuojama fotosrovės priklausomybė nuo apšviestumo. Matavimai atliekami trims fotovaržos darbinės įtampos didumams. Apšviestumas keičiamas, keičiant šviesos šaltinio nuotolį nuo fotovaržos. Esant tiems patiems atstumams liuksmetru išmatuojami apšviestumo didumai. Nubrėžiami fotosrovės priklausomybės nuo apšviestumo grafikai $i = f(E)$ prie skirtingų įtampų U_i . Apskaičiuojami integralinės fotovaržos jautriai ir nubrėžiamos priklausomybės $k = f(E)$ prie skirtingų įtampų U_i . Apskaičiuojamas savitasis fotovaržos jautris visoms trimis darbinėmis įtampoms.

Rekomenduojamos temos ir klausimai diskusijoms:

1. Energinės juostos kietuosiuose kūnuose;
2. Kietųjų kūnų skirstymas į laidininkus, puslaidininkius, ir dielektrikus juostinės teorijos požiūriu;
3. Savasis, elektroninis ir skylinis puslaidininkių laidumai. Jų aiškinimas;
4. Puslaidininkių varžos priklausomybė nuo apšviestumo (vidinis fotoefektas).

Literatūra:

1. A. Bogdanovičius. Fizikos pagrindai inžinerijoje. II dalis: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2010, 326 p.
2. B. Martinėnas. Fizika: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2008, 384 p.
3. R. A. Bendorius. Elektromagnetizmas. Šiuolaikinės fizikos pradmenys: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2009, 133 p.
4. A. Juodviršis, M. Mikalkevičius, S. Vengris. Puslaidininkių fizikos pagrindai. Vilnius: Mokslas. 1985, 352 p.
5. A. Tamašauskas, J. Vosylius, I. Požela. Fizika. 4 t. Vilnius: Mokslas. 1995, 176 p.