ГРАНУЛАЛАНГАН КРЕМНИЙ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАРИНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК ВА ТЕРМОЭЛЕКТРИК ХОССАЛАРИ

Сохибова Зарнигорхон Муталибжон қизи
Андижон давлат техника институти, физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
ORCID: 0009-0007-2581-0906
Тел.: +998-91-612-27-00

Аннотация: Ушбу мақолада гранулаланган кремний асосли яримўтказгичларнинг ноелекторфизик ва термоелектрик хоссалари, яримўтказгичлар электроникасидаги аҳамияти, уларнинг хусусиятларини ҳарорат, киришмалар концентрацияси ҳамда бошқа ташқи омилларга боғлиқлиги таҳлил қилинди. Ҳозирги замон электроникаси, микроелектроникаси ва наноелектроникасида яримўтказгич материалларни аҳамияти ҳамда ўзининг ноёб хоссалари ўрганилди.

Калит сўзлар: қаттиқ жисм, зона назарияси, солиштирма электр ўтказувчанлик, гетероструктуралар, наноструктуралар, электроника, фотоволтаика, микроэлектроника, термоэлектроника.

Аннотация: В данной статье анализируются неэлектрофизические и термоэлектрические свойства гранулированных полупроводников на основе кремния, их значение в полупроводниковой электронике, зависимость их свойств от температуры, концентрации примесей и других внешних факторов. Изучается значение полупроводниковых материалов в современной электронике, микроэлектронике и наноэлектронике, а также их уникальные свойства.

Ключевые слова: твердое тело, теория зон, удельная электропроводность, гетероструктуры, наноструктуры, электроника, фотовольтаика, микроэлектроника, термоэлектроника.

Annotation: This article analyzes the non-electrophysical and thermoelectric properties of granular silicon-based semiconductors, their importance in semiconductor electronics, the dependence of their properties on temperature, impurity concentration, and other external factors. The importance of semiconductor materials in modern electronics, microelectronics, and nanoelectronics and their unique properties are studied.

Key words: solid state, zone theory, specific electrical conductivity, heterostructures, nanostructures, electronics, photovoltaics, microelectronics, thermoelectronics.

Кириш.

Замонавий электроника қурилмалари яримўтказгичли материаллардан тайёрланади. Яримўтказгичлар кристалл, аморф ва суюқ

ISSN 3030-3907

бўлади. Одатда яримўтказгичларга солиштирма электр ўтказувчанлиги с металлар ва диелектриклар оралиғида бўлган ярим ўтказгичлар киради (уларнинг номи ҳам шундан келиб чиққан). Хона температурасида уларнинг солиштирма электр ўтказувчанлиги 10^{-8} дан 10^{5} гача См/м ни ташкил этади. Яримўтказгичларнинг асосий хусусияти шундаки, температура ортган сари уларнинг солиштирма электр ўтказучанлиги ҳам ортиб боради, металларда эса камаяди. Ярим ўтказгичларнинг электр ўтказувчанлиги ёруғлик билан нурлантириш ва ҳатто жуда кичик киритма миқдорига боғлиқ. Яримўтказгичларнинг хоссалари қаттиқ жисм зона назарияси билан тушунтирилади.

Яримўтказгичлар - бу ташқи энергетик таъсирлар натижасида тақиқланган зона кенглигини энгиб ўтиш хусусиятига эга бўлган, нисбатан тор таъқиқланган зона кенглигига эга бўлган моддалар.

Зона назарияси нуқтаи назаридан материалларни диелектрик ва ярим ўтказгичларга ажратиш фақат шартли равишдадир. Чунки бу назария ҳеч қандай физик хусусиятлар билан асосланмайди, улардаги фарқ тақиқланган зона кенглигида бўлиб, ярим ўтказгич деб ҳисобланадиган қаттиқ жисмларда 3 эВ дан ошмайди.

Ўтказгичлар (металлар) - бу электронлар билан тўлган зонаси эркин энергетик сатҳ зонасига ёпишган ёки кирган материаллардир. Бунинг натижасида улардаги эркин бўлиб ўтказгичга берилган кучсиз кучланиш таъсирида ҳам тўлган зона сатҳидан эркин зонанинг тўлмаган сатҳларига ўтиш мумкин. Металл ўтказгичларда ўтказиш ҳолати нормал, электр майдон кучи таъсирида эркин югуриш узунлигида электр оладиган энергияси 10^{-8} - 10^{4} эВ бўлади. Ярим ўтказгич ва диелектрикларда энергия қўзғатилган бўлиб, таъқиқланган зонани энгиб ўтиш учун ташқаридан энергия сарфлаш талаб қилинади.

Абсолют нол температурада (0 К) яримўтказгичнинг валент зонасидаги барча сатҳлар электронлар билан тўлган, ўтказувчанлик зонасидаги сатҳлар эса электронлардан холи бўлади.Яримўтказгичли асбобларнинг кўп қисми киритмали яримўтказичлар асосида яратилади. Электр ўтказувчанлиги киритма атомлари ионизацияси натижасида ҳосил бўладиган заряд ташувчилар билан асосланган яримўтказгичлар - киритмали яримўътказгичлар дейилади.

Тадқиқот методлари. Замонавий яримўтказгичлар физикаси, авваламбор, яримўтказгичли гетероструктуралар ва наноструктуралар физикаси бўлиб, хажмий яримўтказгичларда имконсиз бўлган бир қатор янги физик ҳодисаларнинг, яъни классик ва квант Холл эффектларининг яратилиши фаннинг янада ривожланишига асос бўлди. Наноструктураларда

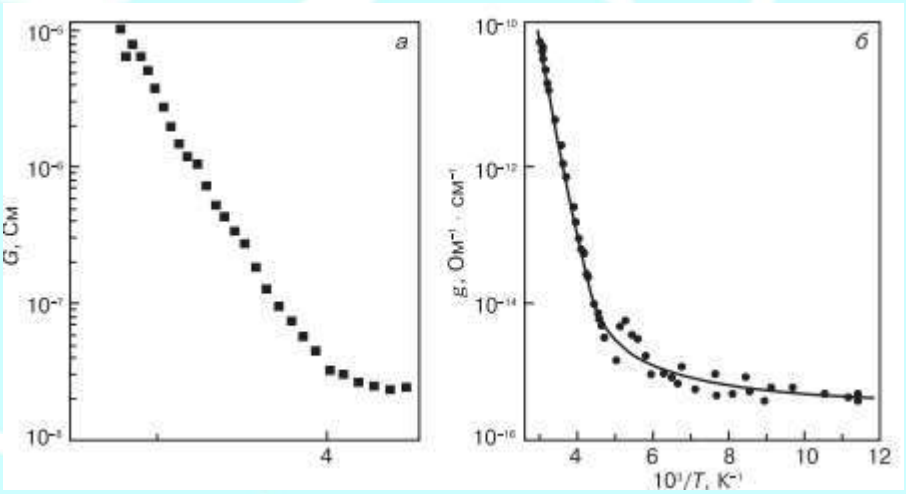
ISSN 3030-3907

эркин заряд ташувчиларнинг ҳаракати бир ёки бир неча йўналишда чекланган бўлиб, бу ўлчамларни квантлаш таъсирига олиб келади, бу эса ўз навбатида заряд ташувчилар, фононлар ва бошқа квазизарраларнинг энергия спектрларини кескин ўзгартиради. Спекторни қайта ташкил этиш тузилмаларнинг оптик ва электрик хусусиятларига сезиларли таъсир кўрсатади, шунингдек янги физик ҳодисаларни пайдо бўлишига сабаб бўлади [1]. Наноструктураларнинг муҳим устунлиги – бу нанообектларнинг геометрик ўлчамлари ва тузилишини ўзгартириш орқали тизим хусусиятларини бошқариш қобилиятидир. Гетероўтишлар наноструктураларда муҳим аҳамият касб этади, чунки кичик ўлчамдаги тузилмаларда сирт майдони ички ҳажмга нисбатан катта бўлади. Энг илғор яримўтказгичли наноструктуралар молекуляр – нур эпитаксияси ва газ фазали епитаксия орқали металлорганик бирикмалардан олинади [2].

Бизга маълумки яримўтказгичларга ўзининг хоссаларига кўра диэлектриклар ва ўтказгичлар ўртасидаги ўринни эгаллайдиган моддалар ва элементлар киради. Модданинг яримўтказгичлар синфига мансублигининг расмий белгиси хона хароратида $\sigma=10^{-1}...10^{4}\ (Ом\cdot см)^{-1}$ ораликда жойлашган электр ўтказувчанлигига эгалигидадир. Яримўтказгичларнинг ўзига хос хусусияти уларнинг электр ўтказувчанлигининг ташқи омилларга кучли боғлиқлигидир: ҳарорат, киришмалар концентрацияси, ёруғлик ҳаракати ва ионлаштирувчи нурланиш таъсири ва бошқалар. Яримўтказгичлар технологиясида кремний (Si), германий (Ge), селен (Se), шунингдек яримўтказгич бирикмалари галлий арсенид (GaAs), кремний карбид (SiC) ва бошқалар энг кўп қўлланилади [3]. Кремний нафақат электроника учун, балки фотоволтаика, микроэлектроника ва термоэлектроника соҳалари учун ҳам асосий материал ҳисобланади. Ҳозирги вақтга келиб барча қуёш панелларининг 90 % дан ортиғи кристал кремнийдан тайёрланмоқда. Нанотехнологияларнинг ривожланиши, шунингдек наноматериалларнинг температура ўзгариши жараёнида намоён бўлувчи ноёб, ўзига хос хусусиятлари илмий тадқиқотчиларда яримўтказгичли гранулаларга, хусусан, ер қобиғида кенг учраши ҳамда олиниш технологиясининг арзонлиги туфайли кремний гранулаларига бўлган қизиқишни ортирди. Грануланган яримўтказгичли кремнийнинг электрофизик ва термоэлектрик хоссалари ҳамда заряд кўчиш жараёнлари кенг ўрганила бошланди [4]. Ғовакли кремний ҳам бир қатор ўзига ҳос хусусиятлари туфайли наноструктурали материаллар олишда катта қизиқиш уйғотмоқда. Ғовакли кремний олишнинг анъанавий усули электрокимёвий зарб қилиш усули ҳисобланиб, саноатда бу усулда ғовакли конструкциялар олиш бироз қийинчиликларга эга бўлганлиги туфайли кимёвий усулда арзонроқ ва

ISSN 3030-3907

соддароқ ишлов бериш усулларини тадқиқ қилиш долзарбдир. [5] Ишда ғовакли кремний қатламларини ҳар томонлама ўрганиш усули амалга оширилган, унинг сирт морфологияси, кимёвий таркиби, оптик (фотолюминесценция, узатиш ва акс эттириш спектрлари) ва электрофизик (ўтказувчанликнинг ҳароратга боғлиқлиги, спектрал ёруғлик сезгирлиги) хусусиятлари таҳлил қилинган (1.2-расм). Диэлектрик матрицада (SiO_2) наноўлчамдаги кремний кристалларининг (nc-Si) кўринадиган ва инфрақизилга (ИҚ) яқин соҳада кучли ёруқлик чиқариш қобилияти оптоэлектроникада кремнийдан фойдаланиш учун янги имкониятларни очиб берди. Хона ҳароратида аморф кремний нанокристалларининг фотолюминисеция (ФЛ) спектрлари иккита чизиқ билан тасвирланади: кам энергияли ва юқори энергияли [6]. Шу каби хусусиятлари ва афзалликлари туфайли илм – фан учун наноўлчамли кремний гранулаларини тадқиқ этиш долзарб масалалардан бирига айланиб бормоқда. Унинг электрофизик ва термоэлектрик хоссаларини ўрганиш долзарб ҳисобланади.



1.2-расм. Ғовакли (а) ва аморф (б) кремний ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги.

Натижалар. Наноматериалларнинг ўтказувчанлик хусусиятини тавсифлаш одатда таъсир назарияси ва эффектив муҳит назарияси доирасида амалга оширилади [7]. Ушбу ёндашув грануланинг классик ўлчовлари учун амал қилади. Металлардан фарқли равишда, яримўтказгичларнинг солиштирма электр ўтказувчанлиги (σ) ҳарорат ортиши билан ортади:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left[-E_A/(kT)\right] \qquad (1.1)$$

Бу ерда E_A – ўтказувчанлик энергияси; σ_0 – коеффициент.

(1.1) ифода яримўтказгичларда электронларнинг атомлар билан боғланиш энергияси E_A тартибида бўлишини англатади. Ҳарорат ортгани сари иссиқлик ҳаракати туфайли электрон боғлари узилади, натижада уларнинг баъзилари экспонента кўрсаткичига $[-E_A/(kT)]$ мутаносиб ҳолда эркин заряд ташувчиларга айланади [7].

ISSN 3030-3907

Бутун дунёда илм – фан ҳамда техника ривожида нанотехнологияларга, шу жумладан наноматериалларга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Қўплаб материаллар каби кремнийда ҳам ўлчами маълум наноўлчамларгача кичрайган сари хоссаларида кескин ўзгариш кузатилди. Масалан, нанокремнийни ультрабинафша нурини юта олиши ва шу билан бир вақтда кўринувчи қўёш нурига шаффоф бўла олиш қобилияти уни қўёш нурининг кенг спектрини электр энергияга айлантириш йўлида истиқболли материал қилиб кўрсатмоқда.

Яримўтказгичлар физикасидан маълумки, донадорликлараро чегара соҳалардаги киришма атомлар ва нуқсонлар заряд ташувчилар учун локаллашган тузоқларни ҳосил қилади. Бу тузоқлар донадорликлараро чегара соҳаларида тўсиқ эффектини ҳосил қилади. Локаллашган тузоқларда заряд ташувчилар ушланиши ва қайта озод бўлиши потенциал тўсиқ баландлиги (φ) нинг, бу эса, ўз навбатида, электрўтказувчанлик (σ)нинг ўзгаришига олиб келади. Электрўтказувчанлик (σ) учун Сетто моделига асосан, қуйидаги ифодани ёзиш мумкин [8]:

$$\sigma = \frac{q\langle a\rangle A^* T}{k} exp\left(-{}^{q\varphi}/_{kT}\right) \qquad (1.2)$$

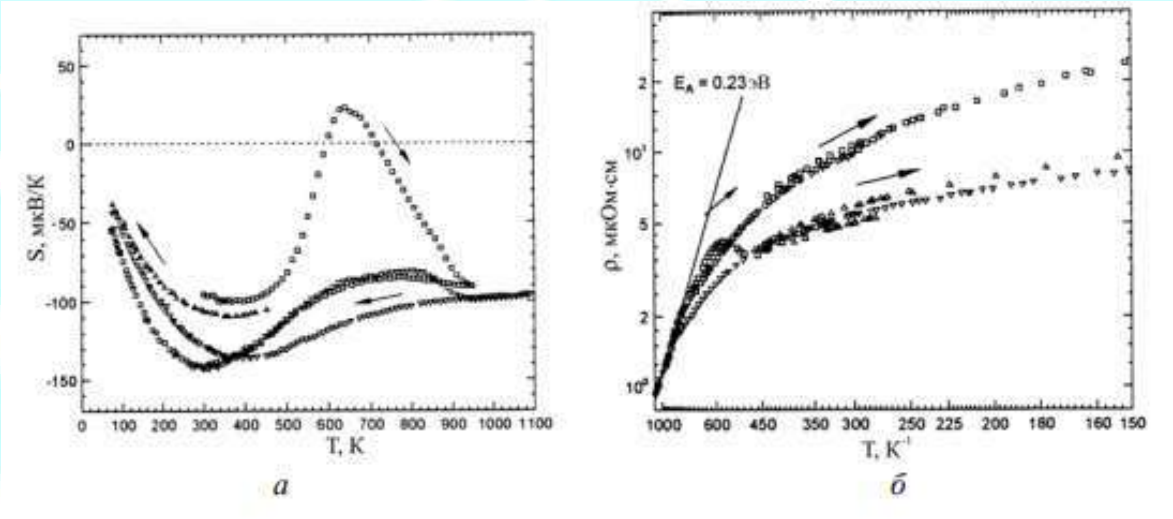
бу ерда, q – электрон заряди, $\langle a\rangle$ - донадорлик ўлчами, A^* – Ричардсоннинг эффективлик доимийси, T – температура, k – Больцман доимийси, φ – донадорликлараро чегара соҳадаги потенциал тўсиқ баландлиги.

Потенциал тўсиқ баландлиги (φ) локаллашган тузоқларда ушланаётган зарядлар миқдори (Q_i) га боғлиқ бўлиб, бу боғлиқликни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\varphi = \frac{Q_i^2}{\delta\varepsilon\varepsilon_o q N_G} \qquad (1.3)$$

ифодада ε - муҳитнинг нисбий диэлектрик сингдирувчанлиги, ε_o - вакуумнинг абсолют диэлектрик сингдирувчанлиги, N_G – электрик жиҳатдан фаол бўлган легирланган киришмалар концентрацияси [9].

ISSN 3030-3907



1.3-расм. SOS асосли 60 нм қалинликдаги ReSi1,75 эпитакциал плёнканинг Зеебек коэффициенти (а) ва қаршилиги (б). Ўлчовлар учта ҳарорат циклида амалга оширилган: Δ - 450 К гача, □ - 950 К гача, ∇ - 100 К гача.

Дунё энергиясининг тахминан 90 % ини қазиб олинадиган ёқилғини иссиқлик манбаи сифатида ишлатадиган иссиқлик двигателлари ишлаб чиқаради, натижада атроф – муҳитга 15 терават иссиқлик сарф бўлади. Термоэлектрик модуллар ушбу паст сифатли чиқинди иссиқликни бир қисмини электр энергияга айлантириши мумкин. Уларнинг самарадорлиги Зеебек коэффициенти, солиштирма электр қаршилиги, иссиқлик ўтказувчанлиги ва мутлоқ (абсолут) ҳароратнинг функцияси ҳисобланган материал компонентларининг термоэлектрик асиллиги (добротности) *ZT* қўрсаикичига боғлиқ. Сўнги ўн йилликда *ZT* нинг параметрлари ўзаро боғлиқ бўлганлиги туфайли унинг қийматини *ZT>1* дан ошириш қийин бўлди. Ҳозирги вақтда нанотузилмали материалларда *ZT>1* дан ошириш мумкин бўлсада, ишлатилган материалларни (*Bi, Te, Pb, Sb ва Ag)* тажриба - синовлардаги ўлчамларини ўлчашда кўп қийинчиликларга дуч келинмоқда [10]. Амалда қўлланилаётган кўпгина термоэлектрик материаллар учун ZT қиймати бирдан ошмасада, мавжуд ҳисоб китобларга қўра рутений (Ru_2Si_3) ва рений ($ReSi_{1,75}$) силикатлари учун ZT ни қийматини ушбу чегарадан ошириш мумкин [10] (1.3-расм). Буларни ҳисобга олган ҳолда наноўлчамли грануллганган яримўтказгичларнинг, хусусан кремнийнинг термоэлектрик хоссаларини ўрганиш долзарб хисобланади.

Хулоса. Грануллганган кремнийнинг термоэлектрик хусусиятларини эксперимантал – назарий ўрганиш бўйича ҳам кўплаб илмий тадқиқот ишлари олиб борилган бўлиб, асосан намуналарнинг қуйидаги термоэлектрик параметрлар чуқур тадқиқ қилинган: α_{eff} – коеффициент, яъни намунанинг термоэлектрик хусусиятини таснифловчи Зеебек коеффициент; σ_{eff} – электр ўтказувчанлик; χ_{eff} – иссиқлик ўтказувчанлик; материалнинг

ISSN 3030-3907

асиллиги Z_{eff} – бу кенг ҳарорат оралиғи ва гранула ўлчамига боғлиқ бўлган энг муҳим термоэлектрик характеристикани аниқлашга имкон берувчи катталик ҳисобланади. Ушбу катталикларнинг температурага боғлиқлигини ўрганиш борасида ҳам кўплаб тадқиқотлар амалга оширилган, хусусан [11] ишда темир ва рутенийли яримўтказгич силикатларининг термоэлектрик хусусиятларининг 4,2÷1070 *K* температура оралиғида ўзгариши ўрганилган бўлиб, яримўтказгичли силикатлардан термоэлектрик соҳада амалий фойдаланиш бўйича тавсиялар берилган. [11] ишда грануллланган кремнийнинг термоэлектрик хусусиятлари ўрганилган бўлиб, объект сифатида кремний микрокристалидан фойдаланилган бўлиб, унинг технологияси 10 – 100 мкм ўлчамли гранулалар олиш имконини беради. Кўп фазали гранулалардан иборат гетероген яримўтказгичли муҳитнинг моделлари яратилган бўлиб, гранулалар тўпламининг ўрта самарадорлик модели (ЎСМ) яратилган. Унга кўра ҳар бир гранулалар фазаси ўзига хос ўтказувчанлик, иссиқлик ўтказувчанлик, Зеебек коэффициенти ва термоэлектрик асиллиги билан ажралиб туради, шунингдек уларнинг гранулалар тўпламлари хусусиятларининг ассиметрия даражасига қараб қийматлари таҳлил қилинади. Одатда турли материаллар учун иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти тажриба – синов усулида аниқланиб, ҳозирда бир қатор усуллари мавжуд бўлиб, уларнинг аксарияти маълум бир моддадаги иссиқлик оқими ва ҳарорат градиентини ўлчашга асосланган.

Хулоса қилиб айтганда наноўлчамли грануллланган яримўтказгичларнинг электрофизик ва термоэлектрик хоссалари модданинг асосий физик кўрсаткичлари бўлиб, уларнинг зичлигига боғлиқдир [87; 97 б]. Умуман олганда, электр ўтказувчанлик ва иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти ҳароратга, босимга ва модданинг ҳолатига, ўлчамига боғлиқ катталиклар бўлиб, уларни тадқиқ қилиш янги турдаги термоэлектрик материаллар олиш ва ҳозирда мавжудларининг самарадорлигини оширишда асос бўлиб хизмат қилади.

АДАБИЁТЛАР

1. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Верещак В.Г. Плазмохимические методы получения порошкообразных веществ и их свойства. // Всесоюзный журнал химического общества им. Д.И.Менделеева. №(2), Т.36. 1991. - С. 166-170

2. Н.С.Аверкиев, Л.Ивченко, А.Тарасенко. Полупроводники. Большая российская энциклопедия. 2004. – С. 1782-1786.

3. А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазиизопериодическим переходом. Ташкент, “Фан” Академии наук Республики Узбекистан, 2005. - С. 252.

ISSN 3030-3907

4. Т.Ю. Белик. Особенности пористого кремния, полученного химическим травлением. IX Международная конференция и VIII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2012» Санкт-Петербург, 2012. – С. 278.
5. W.D.A.M. de Boer, D. Timmerman, K. Dohnalova, I.N. Yassievich, H. Zhang, W.J. Buma, T. Gregorkiewicz. Red spectral shift and enhanced quantum efficiently in photon-free photoluminescence from silicon nanocrystals. Nature Nanotechnology, 2010. – P. 878-883.
6. Wang S.-H., Lee C.-W., Chiou A., Wei P.-K. Size-dependent endocytosis of gold nanoparticles studied by three-dimensional mapping of plasmonic scattering images. — J. Nanobiotechnology. Vol. 8, 2010. – P. 33-39
7. В.А. Гольдаде. Материалы электронной техники. М-во образования РБ, Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им Ф. Скорины, 2014. – С. 152
8. S. Zaynabidinov, Z.M.Soxibova, M. Nosirov. A method for determining the thermal conductivity of granulated silicon in which alkali metal atoms are included. // The Way of Science International scientific journal, 2022. № 3 (97), (Global Impact Factor 0.543, Австралия). - P. 15-17
9. Allon I. Hochbaum, Renkun Chen, Raul Diaz Delgado, Wenjie Liang, Erik C. Garnett, Mark Najarian, Arun Majumdar, Peidong Yang. Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires. *Nature*. Vol. 451, 2008. – P.163–167.
10. А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазиизопериодическим переходом. Ташкент, “Фан” Академии наук Республики Узбекистан, 2005. - С. 252.
11. Л.И. Иваненко. Термоэлектрические свойства полупроводниковых силицидов. Доклады бгуир. №2, 2005. - С. 90-101.

ISSN 3030-3907