КРЕМНИЙДА АТОМЛАР ДИФФУЗИЯСИНИНГ АЙРИМ ХУСУСИЯТЛАРИ

С.ЗАЙНОБИДИНОВ, Ш.ЙЎЛЧИЕВ, Д.ҚОДИРОВ, Б.МУСАЕВ

Статья посвящена анализу процессов диффузии атомов 3d-элементов в кремнии. Приводятся основные диффузионнные параметры этих элементов, и на основе сравнительного анализа показаны закономерности соответствий между особенностями атомов и их диффузионными параметрами. Даны качественные объяснения физических эффектов, наблюдаемых в легированном кремнии.

In this article discusses the problems of diffusion processes of 3d- elements in silicon and main diffusive parameters of these elements are given. On the basis of the comparative analysis regularities of rations between features of atoms and their diffusive parameters are shown. Qualitative explanations to the physical effects observed in alloyed silicon are offered.

Инсоният тараққиётининг ҳозирги даври микроэлектроника ва электрон асбобларсиз тасаввур этиб бўлмайдиган поғонага келди. Жамият фаолиятининг барча жабҳаларига электрон асбобларнинг кириб бориши микроэлектрониканинг асосини ташкил этувчи яримўтказгич моддаларнинг янги турларини топиш, мавжудларининг функционал имкониятларини кенгайтириш, янги асбоблар яратиш технологияларини ишлаб чиқишни тақозо этмоқда.

Моддаларнинг электрофизик ҳусусиятларини ўзгартириш, планар технологиялар ёрдамида микроэлектрон асбоблар ва интеграл схемалар олиш учун ғоят зарур бўлган жараёнлардан бири – моддаларга атомлар диффузиясидир. Бу соҳада Дж.Маннинг [1], Дж.П.Старк [2], Б.И.Болтакс [3], Т.Ж.Джафаров [4], М.К.Боходирхонов [5] кабиларнинг олиб борган изланишлари туфайли қаттиқ жисмларда, ҳусусан, яримўтказгичларда атомлар диффузиясининг асосий қонуниятлари, айрим элементлар атомлари диффузиясининг алоҳида хусусиятлари, диффузия усули билан олинган қаттиқ эритмалардаги янги эффектларнинг пайдо бўлиш шароитлари ва уларнинг моҳияти кўрсатиб берилди. Тадқиқот натижаларининг таҳлили шуни кўрсатадики, бундай технологик усул ёрдамида яримўтказгич моддаларнинг электро-ўтказувчанлигини кенг миқёсда бошқариш, уларнинг электрофизик ва фотоэлектрик ҳусусиятларини ташқи таъсирларга ўта сезгир ёки аксинча, чидамлилигини ошириш имкониятлари борлиги ҳамда, “тез” ҳаракатланувчи атомларни яримўтказгич кристали панжараларига олдин белгиланган миқдорда жойлаштириш натижасида янги физик эффектлар хосил қилиш мумкинлиги аниқланди.

Дастлаб n-турдаги кремнийга аксептор характерли, чуқур энергетик сатҳлар берувчи (Ni, Co, Zn ва бошқа) киришма атомларни юқори температурали диффузия ёрдамида киритиш орқали унинг солиштирма қаршилигини $\sim 10^5$ Ом.см (яъни ҳусусий яримўтказгич солиштирма қаршилиги)гача ўзгартириш мумкинлиги ва бундай компенсирланган кремнийда аввалдан кўрилмаган инфрақизил ва температуравий сўниш, фотохотира ва электромагнит тебранишлар ҳосил қилиш мумкинлиги кўрсатилди.

Бундан ташқари, интеграл схемалар яратиш технологик тизимларида диффузия кристалнинг керакли топонимикаларини ҳосил қилишда беқиёс усул бўлиб хизмат қилмоқда.

Шу билан бир вақтда, тадқиқот натижаларининг кўрсатишга, яримўтказгичларни киришма атомлари билан легирлаш кўп босқичли ва жуда аниқ қийматли жараёнлардан иборат бўлгани учун аввалдан белгиланган аниқ параметрларга эришиш ғоят мураккаб эканлиги эътироф этилмоқда.

Шу муносабат билан яримўтказгичларда атомлар диффузиясининг назарий асосларини таҳлил этиш асосида, кристалларда атомлар миграцияси қонуниятларининг, легирланган яримўтказгичда мавжуд бўлган хусусий нуқсонларнинг киришмавий атомлар билан ўзаро таъсирлашуви механизмларини миқдорий жиҳатдан баҳолаш тадқиқотчилар учун зарур масала бўлиб қолмоқда.

Кремний монокристалида киришмаларнинг фазовий тақсимоти унинг электрофизик хусусиятларини шакллантиришда асосий роль ўйнайди. Шунинг учун кремнийдаги ва умуман барча яримўтказгичлардаги киришмалар диффузиясини ўрганиш шу кунгача яримўтказгичлар физикасининг долзарб муаммоларидан бири бўлиб қолмоқда.

Бу ерда кремний монокристалида 3d-ўтиш элементларининг диффузия параметрларини ҳисоблаш ҳақида сўз боради. Маълумки, бу элементлар кремнийда асосан тугунлар ораси бўйича диффузияланиб, Si тақиқланган соҳасида чуқур энергетик сатҳлар ҳосил қилади, яхши эрувчан ва диффузия коэффициентлари юқори бўлиб, температурага

$$D=D_0 \exp(-E/kT), \quad (1)$$

кўринишда боғланган, бу ерда D_0 – экспонента олди кўпайтмаси, E-диффузияни фаолланиш энергияси.

Кремнийда 3d-элементлар диффузияси кўп муаллифлар томонидан тадқиқ қилинган, лекин улар томонидан аниқланган диффузия коэффициентларининг қийматлари бир-биридан кескин фарқ қилади. 1-жадвалда бу элементлар учун электрон конфигурациялари, D_0 ва E катталиклар ҳамда уларнинг орбитал радиуслари (R) ва атом массаларининг (M) қийматлари, уларнинг умумий (N) ва электрофаол (N э.а.) атомлар зичлиги, ҳамда сатҳларининг характери (Д-донор, А-аксептор) келтирилган.

Кремнийда 3d-элементларининг асосий диффузион параметрлари

1-жадвал.

Параметрлар	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
	$3d^145^2$	$3d^345^2$	$3d^345^1$	$3d^545^1$	$3d^545^2$	$3d^645^2$	$3d^745^2$	$3d^845^2$	$3d^{10}45^1$	$3d^145^1$
R, Å	1,57	1,48	1,40	1,24	1,28	1,23	1,18	1,14	1,13	1,06

M, г/моль	46	48	50	52	55	56	59	59	64	65
D $см^2/с$	10^{-7}	10^{-10}	10^{-7}	$4\cdot10^{-6}$	$8\cdot10^{-6}$	10^{-5}	10^{-5}	$4\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-5}$
D_0 $см^2/с$	10^{-5}	$2\cdot10^{-5}$	10^{-3}	10^{-5}	$2,6\cdot10^{-1}$	$6,2\cdot10^{-3}$	$8,5\cdot10^{-4}$	$2,3\cdot10^{3}$	$4\cdot10^{-2}$	10^{-1}
E, эВ	1,3	1,5	1,4	1,0	1,5	0,66	0,5	0,47	1,0	1,5
$N_{мах}см^{-3}$	10^{16}	10^{16}	10^{15}	10^{17}	$2\cdot10^{16}$	$2\cdot10^{15}$	10^{16}	$7\cdot10^{17}$	$2\cdot10^{18}$	$2\cdot10^{6}$
Nэ.а $см^{-3}$	10^{14}	10^{14}	10^{16}	$2\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{15}$	$2\cdot10^{15}$	$2\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{14}$	10^{16}
Сатҳ характери	D	D	D	D	D	D	D,A	A	A,D	A

Жадвалдан кўринишича, кремнийда сиртқи электрон қобиқлари кам тўлдирилган киришма атомлари учун кўпроқ донорли характердаги сатҳлар, кучли тўлдирилган электрон қобиқли атомлар учун аксепторли сатҳлар кузатилмоқда. D_0 нинг электрон қобиқларнинг тўлдирилиши билан мутаносиблиги сезилмайди. Бунинг сабаби ҳамма холатларда ҳам D_0 бир хил усул ва аниқлик билан ўлчанмаганлиги бўлиши мумкин. Диффузиянинг фаолланиш энергияси E эса донор сатҳлар учун 3d – қобиқнинг тўла бориши билан камайиши, аксептор сатҳлар учун эса, аксинча, ортиб бориши кузатилади. Киришма атомларининг кремнийдаги характери ҳам 3d – электрон қобиқларининг тўлдирилиш даражасига боғлиқ экан, яъни бу қобиқни электронлар билан камроқ тўлдирилганда, донорлик, кўпроқ тўлдирилганда, аксепторлик характерига эга бўлмоқда. Агар чуқур энергетик сатҳли атомлар кристалл панжаранинг тугунлари аро жойлашса – донорлик ва тугунларда, асосан, аксепторлик хоссаларини намоён этишини эътиборга олсак ва 3d – ўтиш элементлари атомлари, асосан. тугунлараро диффузияланади деб ҳисобласак, 3d – электрон қобиқнинг тўлиб бориши билан бу атомлар кўпроқ кристалл панжара тугунларига жойлашиб олади ва бу жараён кристалда вакансиялар сони билан чекланганлиги туфайли, умумий атомларнинг бир қисмигина тугунларга жойлашиш имкониятига эга.

Шунинг учун бу атомларни диффузияланиш коэффициентлари D нисбатан катта, ΔE ва киритилган атомлари сони N_{max} бироз кичик эканлигини кўрамиз.

Жадвал таҳлили яна шуни кўрсатадики, кремнийга киритилган 3d – элементлари атомларининг 0,05÷1% гача (Zn бундан истисно) қисмигина электроактив ҳолатларда, яъни кристалдаги атомлар билан электрон алмашишларда иштирок этади. Бундай ҳолатнинг яққол мисоли бўлган Ni, Co, Cu атомлари учун ўтказилган тадқиқотларнинг кўрсатишича, улар кремний кристалларига диффузия усули билан киритилганда, ўзига хос микро- ва нанобирикмалар ҳосил қилиши кўрсатилди. Бундай тузилмаларнинг ҳосил бўлиш механизмларини, таркибий тузилиши ва яримўтказгичларнинг электрофизик ҳусусиятларига таъсирларини ўрганиш наноматериалшунослик соҳасида ғоят зарур маълумотлар банкини яратишга олиб келди [6].

Бу маълумотларнинг асосини киришма атомларининг яримўтказгич кристалларидаги диффузияланиши ташкил этишини эътироф этган ҳолда, айрим мулоҳазаларни кўриб чиқайлик.

Эксперимент натижаларини назарий таҳлил этиш D_0 ва E коэффициентларни

$$D_0=A_1+B_1x+C_1/x, \quad (2)$$

$$E=ln(A_2x^2+B_2x+C_2), \quad (3)$$

кўринишларда ифодалаш мумкинлигини кўрсатади, бу ерда $x=r/M$.

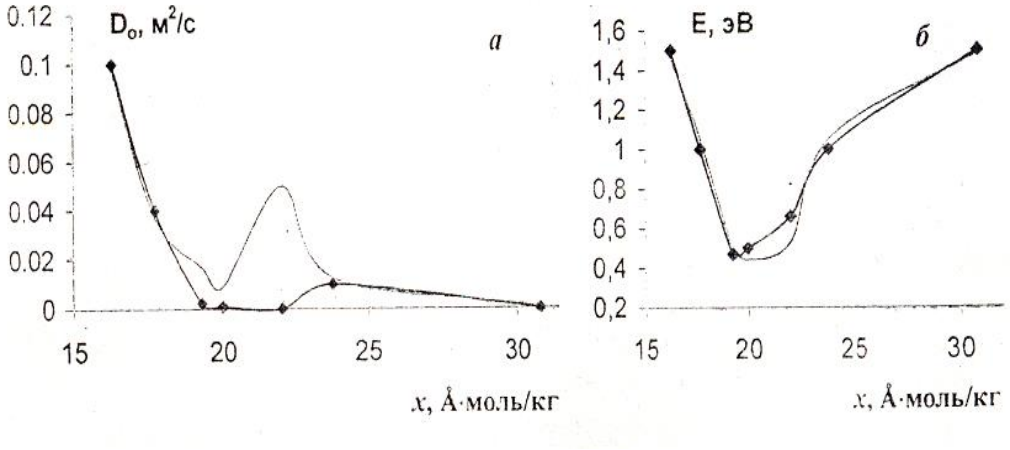
Энг кичик квадратлар усули ёрдамида аниқланган A, B, C коэффициентларнинг ҳамда ҳисоблаш аниқлигини кўрсатувчи χ^2 нинг қийматлари 2-жадвалда келтирилган.

2-жадвал

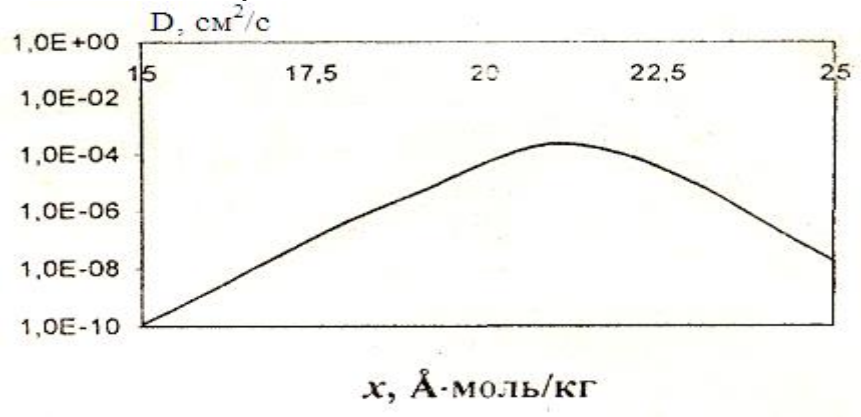
A_1	B_1	C_1	χ^2	A_2	B_2	C_2	χ^2
-5.8	0.15	55.45	10^{-3}	0.14	-5.98	63.56	10^{-3}

1-расмда D_0 ва E энергиянинг x параметрга боғланишининг назарий ва экспериментал натижалари графиги келтирилган. 1-а расмдан кўриниб турибдики, D_0 коэффициент 2 та экстремумга эга. Улардан биринчиси x=20 (r=1,18 А, M=59 г/моль)даги минимум бўлиб, Co элементига мос келади, иккинчиси эса x=23,8 (r=1,24 А, M=52 г/моль)даги максимум бўлиб, Cr элементига га мос келади.

1-б расмдан E коэффициентнинг x=19,3 (r=1,14 А, M=59 г/моль) да минимумга эга бўлиши ва у Ni элементига мос келиши кўриниб турибди.



1-расм. D_0 (а) ва E (б) ларнинг x=r/M га боғлиқлиги; нуқталар – эксперимент натижалари, узлуксиз чизиқ – ҳисоблаш натижалари.



2-расм. Диффузия коэффициенти D нинг x=r/M га боғлиқлиги.

(1) и (2) ифодаларни (3) формулага қўйсак, кремнийда барча 3d-элементларининг диффузия коэффициентларининг *x* параметрга боғланишини битта формула билан ифодалаш мумкин эканлиги келиб чиқади:

$$D=(A_1+B_1x+C_1/x)\sqrt[kT]{A_2x^2+B_2x+C_2} \quad (4)$$

3d-элементлар учун x параметр ~15÷35 оралиқдаги қийматларнигина қабул қила олади. (4)-ифоданинг бу оралиқдаги дифференциал таҳлили у $x\approx21$ да экстремумга эга бўлиши ва у Со га мос келишини кўрсатади (2-расм).

Шундай қилиб, тажриба натижаларининг таҳлили ва диффузияланувчи атомларининг кристалдаги ҳолатларини ҳамда уларнинг мавжуд нуқсонлар билан ўзаро таъсирлашиш механизмлари ҳақидаги тасаввурларни умумлаштириб, легирланган яримўтказгичларда кузатилаётган янги физик хоссаларини умуман тушунтириш мумкин бўлгани ҳолда уларга аниқ миқдорий баҳо бериш учун бу соҳадаги тадқиқотларни давом эттириш зарур эканлигини кўрсатади.

Адабиётлар:

1.Дж.Маннинг. Кинетика диффузиии атомов в кристаллах.- М.: Мир, 1971
2.Дж.П.Старк. Диффузия в твердых телах.- М.: Энергия, 1980
3.Б.И.Болтакс. Диффузия в полупроводниках.- М.:Физ.мат ГИЗ, 1960
4.Т.Д.Шафаров. Дефекты и диффузия в эпитаксиальных структурах.- Л.: Наука, 1978
5.М.К.Бахадирханов, Б.И.Болтакс и др. Компенсированный кремний.- Л.: Наука, 1972
6.С.Зайнабидинов. Физические основы образования глубоких уровней в кремнии.- Т.: Фан, 1984

Андижон давлат университети,
2012 йил 20 февралда қабул қилинган