

Аймағанбетов К.П., Тоқмолдин Н.С.*

ЖШС «Физика техникалық институты»,
Қазақстан, Алматы, *e-mail: ntokmoldin@gmail.com

РЕЛАКСАЦИОНДЫ СПЕКТРОСКОПИЯ ӘДІСІМЕН КРЕМНИЛІ ДИОДТЫҢ ТЕРЕҢ ДЕҢГЕЙЛІ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

Жартылай өткізгішті материалдарда кездесетін дефектілер, құрылғының электрлі физикалық сипаттамаларына (өткізгіштік, заряд тасымалдаушылардың өмір сүру уақыты) орасан зор әсер етеді. Тыйым салу аймағында осындай құбылыстардың орналасуын – «терең деңгейлер» деп атайды. Дефектілер болмысына байланысты, өзіндік болуы мүмкін немесе арнайы белгілі бір үлгіні алу барысында, әр түрлі технологиялық факторлардың әсерінен пайда болуы мүмкін. Жартылай өткізгішті құрылғыларда кездесетін терең деңгейлердің параметрлерін (иондалу энергиясы, концентрациясы және ұстап алу көлденең қимасы) зерттеуге арналған бірден бір тиімді әдіс – релаксационды спектроскопия (ағылшынша: «deep level transient spectroscopy (DLTS)») әдісі болып табылады. Релаксационды спектроскопия әдістемесі тосқауылды құрылымды немесе р-п өткелдегі терең деңгейлердің параметрлерін зерттеу үшін қолданылады. Әдістің артықшылығы – оның өте жоғары сезімталдылығы болып саналады. Сонымен қатар, релаксационды спектроскопия әдісінің көмегімен зерттеулер жүргізу барысында, жартылай өткізгіштің энергетикалық тиым салынған аймағын толықтай зерттеуін қамтамасыз етеді. Әдістемені эксперименталды түрде орындау барысында DLS спектрометрдің көмегімен алынған кремнилі КД208А диодтың зерттеу нәтижелері көрсетілді.

Түйін сөздер: DLTS, терең деңгейлер, ұстап алу көлденең қимасы.

Aimaganbetov K.P., Tokmoldin N.S.*

LLP «Physico-Technical Institute»,
Kazakhstan, Almaty, *e-mail: ntokmoldin@gmail.com

Study of deep level parameters in a silicon diode using capacity-based deep level transient spectroscopy

Defects occurring in semiconductor materials have a significant impact on their electrophysical properties (conductivity, lifetime of charge carriers). In the case of energy levels of the defects being located within the band gap of these materials, far from the edges of the valence and conduction bands, they are also known as “deep levels”. Defects appearing within the band gaps of semiconductor materials may be both intrinsic and result from external technological factors. Parameters characterizing deep levels include ionization energy, concentration and cross-section. These parameters may be comprehensively using capacity-based deep level transient spectroscopy («deep level transient spectroscopy» DLTS). The main advantage of this technique is its high sensitivity enabling to study the band gap structure in semiconductor materials. This paper describes the methodology of using deep level transient spectroscopy for the characterization of a KD208A silicon diode with the purpose of identifying and studying deep level characteristics in this device.

Key words: relaxation spectroscopy, deep level, capture cross-section.

Аймағанбетов К.П., Токмолдин Н.С.*

ТОО «Физико-технический институт»,
Казахстан, Алматы, *e-mail: ntokmoldin@gmail.com**Исследование параметров глубоких уровней кремниевого диода методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней**

Дефекты, содержащиеся в полупроводниковых материалах, оказывают значительное влияние на их электрофизические параметры (проводимость, время жизни переносчиков заряда). В случае, если энергетические уровни дефектов расположены в запрещённой зоне указанных материалов, на значительном расстоянии от краев валентной зоны и зоны проводимости, они также известны под названием «глубокие уровни». Дефекты в структуре запрещённой зоны полупроводника могут быть как собственными, так и образовываться под влиянием внешних технологических факторов. Параметрами, которыми можно охарактеризовать глубокие уровни, являются энергия ионизации, концентрация и сечение захвата. Указанные параметры могут достаточно полно исследоваться методом ёмкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней (на английском: «deep level transient spectroscopy» DLTS). Преимуществом данной методики является ее высокая чувствительность, что даёт возможность подробно исследовать структуру запрещённой зоны в полупроводниковых материалах. В настоящей работе описана методика применения релаксационной спектроскопии глубоких уровней к исследованию кремниевого диода КД208А с целью идентификации и изучения характеристик глубоких уровней в данном элементе.

Ключевые слова: релаксационная спектроскопия, глубокий уровень, сечение захвата.

Кіріспе

Технологиялық үрдіспен жасау кезінде, құрылымында пайда болатын ақаулар мен қоспалар, микро және наноэлектронды элементтердің шығыс параметрлерінің тұрақсыздығына әкеліп соғады. Жартылай өткізгіштің немесе кристалдың тыйым салу аймағында энергетикалық түрде шектелген шектелген терең деңгейлерді, құрылымдық дефектілер мен қоспалар құрайды және оларды терең орталығы деп айтады. Олар, құрылыстар мен материалдардың қасиетіне пайдалы немесе пайдасыз болуы мүмкін. Сондықтан, қазіргі таңдағы микро және нано элементтердің құрылымындағы энергетикалық терең деңгейлерді зерттеу, физика саласында үлкен қызығушылықты туындатады.

Барьерлі құрылымды немесе p-n өткелді жартылай өткізгіштің терең деңгейлі параметрлерін зерттеуге арналған бірден бір тиімді әдіс – релаксационды спектроскопия әдісі болып саналады. 1974 жылы Д.В. Лэнг алғашқы болып, релаксационды спектроскопия (DLTS) әдісін ұсынды [1]. Аталынған әдістің жұмыс істеу принципі, жартылай өткізгіштің сиымдылық релаксациясын өлшеуге негізделген және зерттеулер жүргізу барысында температураны өзгерте отырып, жартылай өткізгіштің зарядталған қосылу аймағындағы энергетикалық терең деңгейлерді, импульсті тұрақты кернеумен қоздыру арқылы орындалады [2-10].

Қазіргі таңда, релаксационды спектроскопия әдісінің бірнеше түрлері бар. Оларға зарядты (QDLTS), токты (CDLTS), оптикалы (ODLTS), екілік релаксационды (DDLTS) және Лаплас түрлендіргіші (LDLTS) спектроскопия әдістері жатады [2,10]. Соңғы жылдары релаксационды спектроскопия әдісінің жұмыс қызметінің жақсаруына байланысты, микро және наноқұрылымды жартылай өткізгіштерге зерттеулер жүргізу қолданысына ие болды [11-13].

Релаксационды әдістің артықшылығы:

- терең деңгейлердегі заряд тасымалдаушылардың эмиссиясы мен ұстап алу қимасын оқып үйренуге мүмкіндік береді;

- дефектінің түрлері мен оның табиғатын зерттеуге мүмкіндік береді;

- иондалу энергиясы, ұстап алу қимасы және концентрациясы сияқты терең деңгейлердің параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді [1, 2, 8].

Д.В. Лэнг ұсынған релаксационды спектроскопия әдісінің көмегімен зерттеулер жүргізу кезінде өзіндік кемшіліктері туындауы мүмкін. Атап айтсақ, компенсацияланған үлгілерді, яғни релаксационды спектроскопия әдісімен зерттеулер жүргізу барысында сиымдылығы өзгермейтін жартылай өткізгіштерге, зерттеулер жүргізу мүмкіндігі болмайды. Себебі, кейбір зерттелінетін үлгілердің заряд тасымалдаушыларының концентрациясы аса көп болуы мүмкін. Сондықтан, мұндай жағдайларды токты спектроскопия (CDLTS) қолданылады [13-16]. Таңдалынған әр бір әдістің өзіндік

ережелері мен қойылған шектеулеріне байланысты зерттеулер жүргізіледі.

Жұмыстың мақсаты – кремнилі КД208А диодының терең деңгейлі параметрлерін релаксационды спектроскопия әдісінің көмегімен анықтау. Осыған орай зерттеу нәтижелері алу барысында, жартылай өткізгішті материалдардың энергетикалы зоналық құрылымын оқып үйренуге толықтай мүмкіндік береді.

Зерттеу әдістемесі

Зерттеу үлгісі ретінде өндірістік кремнилі КД208А диоды қолданылды.

Кремнилі КД208А диодтың негізгі техникалық сипаттамалары төмендегі кестеде көрсетілген.

1-кесте – Кремнилі КД208А диодтың негізгі техникалық сипаттамасы

Диод атауы	$U_{кері(max)}$, В	I_{max} , А	$v_{жұм.жөнілігі}$, кГц
Д223А	100	1.5	1

Релаксационды спектроскопия әдісі DLS-спектрометрдің көмегімен жүргізілді. Өлшеу құрылғысының принципі блок схемасы және жұмыс істеу принципі [17] жұмыста толықтай көрсетілген.

Экспериментті жүргізу барысында көзделінген нәтижелерді алу мақсатында кремнилі диодты 196 °С – тан 70 °С – қа дейін суытамыз. Көптеген дерек көздеріне сүйенсек, эксперименттер жүргізу барысында температураның өзгеру жылдамдығы 0,01÷0,5 К/сек диапазонын сақтау керек екендігі ескертіледі [18, 19].

Зерттелініп отырған кремнилі диодқа -7 ÷ 0,2 В импульсті кернеу береміз.

Қысқа уақытты заряд тасымалдаушылармен толтыру импульсінің уақыт мерзімі 10 мс құрайды.

Зарядталған қосылу аймағына «-7 В» кері кернеу берген кезде, зерттелініп отырған диодтың зарядталған қосылу аймағының ені ұлғаяды және сиымдылығы төмендейді. Демек, қарастырылып отырған аймақта, бос заряд тасымалдаушылары жоқ екенін біліреді. Содан кейін, «0,2 В» импульсін қосқанда, *p-n* өткелдің сиымдылығының артқанын байқаймыз. Осы кезде, зарядталған қосылу аймағының ені кішірейеді және терең деңгейлер бос заряд тасымалдаушылармен толтырылады. Бұл құбылысты заряд тасымалдарын ұстап алу процесі деп атайды.

Содан соң, импульсті кернеуді кенеттен мүлдем алып тастасақ, яғни, бастапқы қалпына келтірсек, сиымдылықтың экспоненциалды түрде өзгеруін көреміз. Осы сәтте, қалып қойған бос заряд тасымалдаушылары электр өрісінің әсерінен, терең деңгейлерден ыршып шығады. Бұл процессті – заряд тасымалдаушылардың эмиссиясы немесе сиымдылық релаксациясы деп атайды.

Зерттеу нәтижелері

Жартылай өткізгіштің сиымдылық релаксациясы температураға өте тәуелді болады және оның экспоненциалды өзгеруі келесі өрнекпен анықталады:

$$C(t) = \Delta C \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right), \quad (1)$$

ΔC – импульс берілген кездегі сиымдылықтың өзгеруі, τ – тұрақты уақыт релаксациясы немесе уақыт жылдамдығы «gate window».

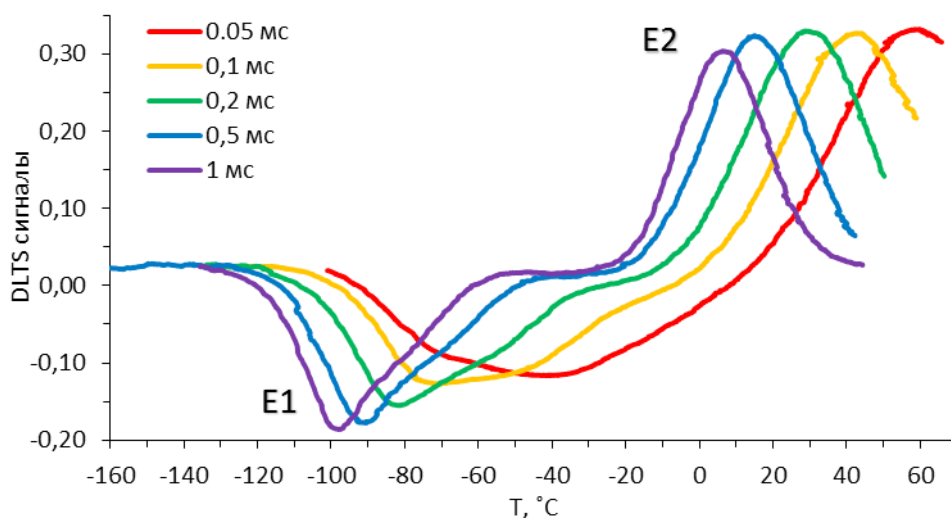
Терең деңгейлердің параметрлерін анықтау кезіндегі маңызды қадамы – DLTS спектрін тұрғызу болып табылады. DLTS спектрі *p-n* өткелдің сиымдылық релаксациясы, белгілі бір тұрақты уақыт релаксациясына $[t_1, t_2]$ қатысты өзгеруіне негізделген. Қажетті параметрлерді алу үшін тұрақты уақыт релаксациясын $[t_1, t_2]$ өзгерту арқылы бірнеше DLTS спектрін (5-6) тұрғызамыз. Сиымдылық релаксациясы DLS-спектрометріндегі «Voxcap» функциясының көмегімен автоматты түрде өңделеді және электрлі сигнал ретінде коррелятордың шығысына келіп түседі. Келіп түскен сигналды аналогты-цифрлы түрлендіргіш құрылғысы арқылы арнайы дербес компьютерге жазылады [17].

Эксперименталды алынған нәтижелер LabVIEW бағдарламасының көмегімен DLTS спектрін тұрғызамыз және оларға есептеулер жүргіземіз.

Төмендегі 1-суретте эксперименталды түрде зерттеулер жүргізілген кремнилі КД208А диодтың әр түрлі тұрақты уақыт релаксациясымен алынған DLTS спектрлері көрсетілген.

Суретте байқағанымыздай, температура -196 °С-тан 70 °С-қа дейін өзгерту кезінде 2 терең деңгей анықталды.

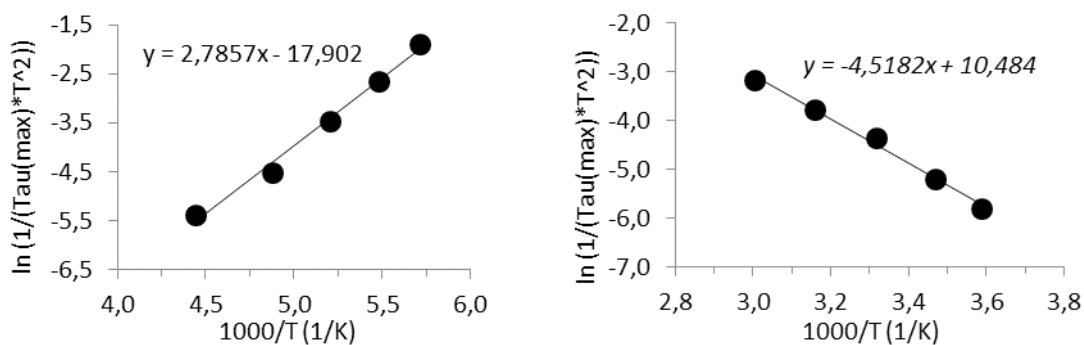
Әр бір алынған спектрдің экстремумы, белгілі бір терең деңгейдің шамасына тең болады. Әр бір жеке спектрдің экстремумы мен тұрақты уақыт релаксациясының шамасына қатысты Аррениус графигі тұрғызылады. Аррениус графигі $1000/T - \ln(1/(\tau T^2))$ – ға қатынасы түрінде тұрғызылады.



1-сурет – Кремнилі КД208А диодтың DLTS спектрлері

Бұл жағдайда тангенс бұрышы арқылы терең деңгейлердің иондалу энергиясы ΔE_{TD} анықталады. Ал ордината өсімен қиылысу арқылы – ұстап алу көлденең қимасының σ

параметрі анықталады. Төмендегі 2 – суретте кремнилі КД208А диодтың терең деңгейлерінің параметрлерін анықтауға арналған Аррениус графигі көрсетілген.



а) б)

Эксперименталды түрде алынған терең деңгейлер: а) E1; б) E2.

2-сурет – Кремнилі КД208А диодтың Аррениус графигі:

Терең деңгейлердің иондалу энергиясын ΔE_{TD} және ұстап алу көлденең қимасы σ параметрлерін анықтау үшін, термионды эмиссияға негізделген Ричардсон формуласы қолданылады [17]:

$$e_{n,p}(T) = \frac{1}{\tau} = AT^2 \exp\left[-\frac{\Delta E_{TD}}{kT}\right], \quad (2)$$

мұндағы

$$A = \frac{4\sqrt{6}\sigma k^2 \pi^{3/2} m^*}{h^3}, \quad (3)$$

мұндағы, $e_{n,p}$ – эмиссия жылдамдығы, ΔE_{TD} – терең деңгейлердің иондалу энергиясы, k – Больцман тұрақтысы, σ – ұстап алу қимасы, m^* – заряд тасымалдаушылардың орташа жылдамдығы.

(2) түрлендіру арқылы келесі өрнекті аламыз [1, 17]:

$$\ln\left(\frac{1}{\tau T^2}\right) = \ln(K\sigma) - \frac{\Delta E_{TD}}{kT}, \quad (4)$$

мұндағы

$$K = \frac{4\sqrt{6}k^2\pi^{3/2}m^*}{h^3}. \quad (5)$$

Алынған (4) формуланың көмегімен – ΔE_{TD} және σ параметрлерін анықтаймыз.

Төмендегі кестеде кремнилі КД208А диодтың эксперименталды алынған параметрлері көрсетілген.

2-кесте – Кремнилі КД208А диодтың негізгі параметрлері

Терең деңгейлер	Иондалу энергиясы E (эВ)	Ұстап алу қимасы σ (см ²)	Диодтың сыйымдылығы (77К-350К) ΔC (пФ)
E1	-0,24	2,73387*10 ⁻¹⁷ м ² 2,73387*10 ⁻¹³ см ²	0,30 ÷ 075
E2	0,39	1,64128*10 ⁻²⁰ м ² 1,64128*10 ⁻¹⁶ см ²	

Зерттеу нәтижелеріне тоқталатын болсақ, 1-суретте көрсетілгендей, екі терең деңгейді анықтадық. E1 донорлы терең деңгейі -130 °С ÷ -30 °С температура диапазонында анықталды. Литературалық қорек көздеріне сүйенетін болсақ, E1 терең деңгейі көміртегі атомының қоспасына сәйкес келеді деп жорамалдаймыз. [20] литературалық қорек көзі бойынша көміртегі қоспасы кремнилі материалында тек бір ғана донорлы деңгеймен кездескен ($E_t = E_c - 0,25$ эВ).

E2 акцепторлы терең деңгейі -10 °С ÷ 70 °С температура диапазонында анықталды. Бұл энергетикалық деңгейді – оттегі атом қоспасы

болуы мүмкін деп жорамалдаймыз. Зи С.М. монографиясында [20] оттегі қоспасына байланысты көптеген дәлелдер көрсетілген. Және де Чохраль әдістемесімен кристалды өсіру процесі кезіндегі оттегінің кристалға еніп, әр түрлі дефектілік жағдайларды тудыратыны жайлы да айтылған.

Осыған орай, эксперименталды алынған нәтижелерді қорытындылай отырып, айтылған дефектілер – локализацияланған, яғни, энергетикалы шектелген. Мұндай терең деңгейлер жартылай өткізгішті құрылғылардың электрлі физикалық сипаттамаларына әсер ететінін білеміз. Дефекттер, рекомбинациялы центр ретінде немесе белгілі бір тип тұзағы ретінде жұмыс істеуі мүмкін.

Қорытынды

Мақалада релаксионды спектроскопия әдісінің көмегімен кремнилі КД208А диодтың терең деңгейлі параметрлері зерттелді.

Зерттеу нәтижелеріне тоқталатын болсақ, экспериментті жүргізу барысында акцепторлы және донорлы терең деңгейлері анықталынды.

Мақалада негізгі алынған ақпараттар мен зерттеу нәтижелері, басқа авторлардың жүргізілген жұмыстарымен сәйкес келеді. Әдістеменің көмегімен анықталынған дефектілердің түрлері, жартылай өткізгішті құрылғылармен айналысатын жұмыс орындарына пайдалы ақпараттар беретініне толықтай сенімдіміз. Сонымен қатар, релаксионды спектроскопия әдісін оқып үйрену үшін, арнайы жоғарғы оқу орындарында зертханалық жұмыстар жүргізу үшін кешенді әдістемелер жасауға болады.

Әдебиеттер

- 1 Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: a new method to characterize traps in semiconductors // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol.45. – P.3023-3032.
- 2 Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. – Л.: Наука, 1981. – 176 с.
- 3 Grimmeiss H.G., Ovren C. Fundamentals of junction measurements in the study of deep levels in semiconductors // J. Phys. E.: Scientific Instr. – 1981. – Vol.14, No.10. – P. 1032–1042.
- 4 Акчурин Р.К., Андрианов Д.Г., Берман Л.С. и др., Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями / Под ред. В.И. Фистуля. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
- 5 Sah C.T., Forbes L., Rosier L.L., Tasch A.F. Thermal and optical emission and capture rates and cross sections of electrons and holes at imperfection centres in semiconductors from photo and dark junction current and capacitance experiments // Solid-State Electronics. – 1970. – Vol.13, No.8. – P. 759–788.
- 6 Lang D.V. Space charge spectroscopy in semiconductors / Thermally stimulated relaxation processes in solids // Ed. by P. Braunlich. New York: Springer-Verlag, 1979. – P. 93–133.
- 7 Johnson N.M., Deep-level transient spectroscopy: characterization and identification of electronic defects // Optical engineering. – 1986. – N.5. – P. 698–704.

- 8 Денисов А.А., Лактюшкин В.Н., Садофев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней // *Обзоры по электронной технике, сер. технология, организация производства и оборудование*. – М.: ЦНИИ “Электроника”, 1985. – Вып. 15(144). – 52 с.
- 9 Farmer J.W., Nugent J.C. Transient current spectroscopy on neutron irradiated silicon // *Neutron Transmutat. Doping Semicond.: Mater. Proc. 4th Neutron Transmutat. Doping Conf., Gaithersburg, Md, 1–3 June, 1982. New York, London, 1984.* – P. 225–239.
- 10 Кузнецов Н.И. Токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней (i-DLTS) // *ФТП*. – 1993. – Т.27. – Вып. 10. – С.1674-1679.
- 11 Schmalz K., Yassievich I.N., Rucker H., Grimmeis H.G. Characterization of Si/Si1-xGex/Si quantum wells by space-charge spectroscopy // *Phys. Rev. B*. – 1994. – Vol.50. – P.14287-14301.
- 12 Chretien O., Apetz R., Vescan L., Souifi A., Luth H., Schmalz K., Koulmann J.J. Thermal hole emission from Si/Si1-xGex/Si quantum wells by deep level transient spectroscopy // *J. Appl. Phys.* – 1995. – Vol.78. – P.5439-5447.
- 13 Козловский В.И., Садофьев Ю.Г., Литвинов В.Г. Разрыв зон в структурах с одиночной квантовой ямой Zn1-xCdxTe/ZnTe, выращенных на GaAs (100) эпитаксией из молекулярных пучков // *ФТП*. – 2000. – Т.34, вып. 8. – С. 998-1003.
- 14 Broniatowski A., Blossie A., Srivastava P.C., Bourgoin J.C. Transient capacitance measurements on resistive samples // *J. Appl. Phys.* – 1983. – Vol.54. – P.2907- 2910.
- 15 Астрова Е.В., Лебедев А.А., Лебедев А.А. Влияние последовательного сопротивления диода на нестационарные емкостные измерения параметров глубоких уровней // *ФТП*. – 1985. – Т.19, вып.8. – С. 1382-1385.
- 16 Антонова И.В., Шаймеев С.С. Температурная зависимость амплитуды пика DLTS в кремнии с глубокими центрами // *ФТП*. – 1991. – Т.25, вып.5. – С. 847-851.
- 17 Аймағанбетов К.П., Жолдыбаев К.С., Жантуаров С.Р., Рахимбаев Б.С., Токмолдин Н.С. Реализация метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней в условиях лабораторного эксперимента для студентов вузов // *Вестник КазНУ, серия физическая*. – 2017. – №1 (60). – С.148-156.
- 18 Boddaert X., Letartle X., Stevenard D., Bourgouin J. Thermal stability of EL2 in GaAs. // *Add. mater., Process and Devices III-V Compound Semicond.: Symp., Boston, Nov.28-Dec.2, 1988. 1989. Pittsbur.* – P.3-8.
- 19 Von Bardeleben H., Bourgouin J., Stevenard D., Lannoo M. On the metastable state of EL2 in GaAs. // *Gallium arsenide and relat. compounds: Proc. 14th int. symp. Heraclion 28 Sept.-10 Okt. 1987. – 1988.* – P.399-452.
- 20 Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х т. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – Т.1. – 456 с.

References

- 1 D.V. Lang, *J. Appl. Phys.* 45, 3023-3032, (1974)
- 2 L.S. Berman and A.A. Lebedev, *Emkostnaya spektroskopiya glubokikh centrov v poluprovodnikakh*, (L: Izd-vo Nauka, 1981) 176 p. (in Russ).
- 3 H.G. Grimmeiss and C. Ovren, *J. Phys. E.: Scientific Instr.* 14, 10, 1032–1042, (1981).
- 4 R.K. Akchurin, D.G. Andrianov and L.S. Berman i dr., *Fizika i materialovedenie poluprovodnikov s glubokimi urovnyami*, (M: Izd-vo Metallurgiya, 1987), 232 p. (in Russ).
- 5 C.T. Sah., L. Forbes, L.L. Rosier and A.F. Tasch, *Solid-State Electronics.* 13, 8, 759–788. (1970).
- 6 D.V. Lang, *Space charge spectroscopy in semiconductors, Thermally stimulated relaxation processes in solids*, Ed. by P. Braunlich. (New York: Springer-Verlag, 1979), p.93–133.
- 7 N.M. Johnson, *Optical engineering* 5, 698–704, (1986).
- 8 A.A. Denisov, V.N. Laktiushkin and Yu.G. Sadofev, *Relaksacionnaya spektroskopiya glubokikh urovney. Obzory po elektronnoy tekhnike, ser. tekhnologiya, organizaciya proizvodstva i oborudovanie.* (M: TCNII Elektronika, 1985, 15, 144), 52 p. (in Russ).
- 9 J.W. Farmer and J.C. Nugent, *Mater. Proc. 4th Neutron Transmutat. Doping Conf., (Gaithersburg, Md, 1–3 June, 1982. New York, London, 1984)*, p. 225–239.
- 10 N.I. Kuznetsov, *FTP* 27, 10, 1674-1679, (1993) (in Russ).
- 11 K. Schmalz, I.N. Yassievich, H. Rucker, and H.G. Grimmeis, *Phys. Rev. B* 50, 14287-14301, (1994).
- 12 O. Chretien, R. Apetz, L. Vescan, A. Souifi, H. Luth, K. Schmalz and J.J. Koulmann, *J. Appl. Phys.* 78, 5439-5447, (1995).
- 13 V.I. Kozlovskii, Yu.G. Sadofev and V.G. Litvinov, *Razryv zon v strukturakh s odinochnoy kvantovoy yamoi Zn1-xCdxTe/ZnTe, vyrashennykh na GaAs (100) epitaksiey iz molekulyarnykh puchkov* (T: Izd-vo FTP, 2000, 8), p.998-1003. (in Russ).
- 14 A. Broniatowski, A. Blossie, P.C. Srivastava and J.C. Bourgoin, *Appl. Phys.* 54, 2907- 2910, (1983).
- 15 E.V. Astrova and A.A. Lebedev, *FTP* 8, 1382-1385, (1985). (in Russ).
- 16 I.V. Antonova and S.S. Shaimeev, *FTP* 25, 5, 847-851, (1991). (in Russ).
- 17 K.P. Aimaganbetov, K.S. Zholdybaev, S.R. Zhantuarov, B.S. Rakhimbaev and N.S. Tokmoldin, *Recent Contributions to Physics*, 1 (60), 148-156, (2017). (in Russ).
- 18 X. Boddaert, X. Letartle, D. Stevenard and J. Bourgouin, *Add. mater. Process and Devices III-V Compound Semicond.: Symp. (Boston, Nov.28-Dec.2, 1988. 1989, Pittsbur.)*, p.3-8.
- 19 H. Von Bardeleben, J. Bourgouin, D. Stevenard and M. Lannoo, *Proc. 14th int. symp. (Heraclion 28 Sept.-10 Okt. 1987, 1988)*, p.399-452.
- 20 S.M. Zi, *Fizika poluprovodnikovykh priborov* (Moscow: Izd-vo Mir, v 2-kh t. per s angl., 1984), 456 p. (in Russ).