CHUQUR ENERGETIK SATHLI TURLI KIRISHMALAR BILAN LEGIRLANGAN KUCHLI KOMPENSATSIYALANGAN KREMNIY ASOSIDAGI TERMODATCHIKLARNING FUNKSIONAL IMKONIYATLARI

Sherg‘oziyev Shaxobiddin Boytemir o‘g‘li
Samarqand davlat veterinariya meditsinasi,
chorvachilik va biotexnologiyalar
universiteti assisteni
E-mail: shahobiddin19911111@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.24484976

Annotatsiya. Ushbu maqolada chuqur energetik sathlar hosil qiluvchi turli kirishma atomlari (Ni, Mn, S, Se, Cr, Co) bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniyning elektrofizik xossalari hamda uning asosida tayyorlangan termodatchiklarning funksional imkoniyatlari tadqiq etilgan. Kompensatsiya darajasi k ≈ 1 shartida yarimo‘tkazgich hajmidagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining keskin kamayishi ($n \le 10^{11}$ sm^{-3}) va xususiy o‘tkazuvchanlikka yaqin holatning shakllanish mexanizmi nazariy tahlil qilingan. Eksperimental natijalar asosida Si<B,S>, Si<B,Cr>, Si<P,Co>, Si<B,Mn> va Si<P,Ni> namunalari uchun solishtirma qarshilik (ρ), harorat sezgirlik koeffitsiyenti (β), o‘rnatilish (τ_o‘rn) va tiklanish (τ_tik) vaqtlari hamda ishchi harorat diapazonlari qiyosiy baholangan. Tadqiqot natijalari asosida sanoat va texnologik jarayonlar uchun yuqori sezgirlikka, tezkorlikka va radiatsiyaviy barqarorlikka ega termodatchiklar yaratishda nikel (Ni) va oltingugurt (S) bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy eng maqbul material ekanligi asoslab berilgan.

Kalit so‘zlar: kuchli kompensatsiyalangan kremniy, chuqur energetik sathlar, legirlash, kompensatsiya darajasi, termodatchik, termorezistor, harorat sezgirlik koeffitsiyenti, nikel, oltingugurt, marganes.

Аннотация. В данной статье исследованы электрофизические свойства сильнокомпенсированного кремния, легированного различными примесями с глубокими энергетическими уровнями (Ni, Mn, S, Se, Cr, Co), а также функциональные возможности термодатчиков, созданных на его основе. Теоретически проанализирован механизм формирования состояния, близкого к собственной проводимости ($n \le 10^{11}$ $см^{-3}$), при выполнении условия полной компенсации k ≈ 1. На основе экспериментальных данных проведена сравнительная оценка удельного сопротивления (ρ), коэффициента температурной чувствительности (β), постоянных времени установления (τ_у) и восстановления (τ_в), а также рабочего диапазона температур для образцов Si<B,S>, Si<B,Cr>, Si<P,Co>, Si<B,Mn> и Si<P,Ni>. Показано, что для создания высокочувствительных, быстродействующих и радиационно-стойких термодатчиков наиболее оптимальными материалами являются сильнокомпенсированный кремний, легированный никелем (Ni) и серой (S).

Ключевые слова: сильнокомпенсированный кремний, глубокие энергетические уровни, легирование, степень компенсации, термодатчик, терморезистор, температурная чувствительность, никель, сера, марганец.

Abstract. This paper investigates the electrophysical properties of heavily compensated silicon doped with various deep-level impurities (Ni, Mn, S, Se, Cr, Co) and the functional capabilities of temperature sensors fabricated on its basis. The mechanism behind the formation of near-intrinsic conductivity ($n \leq 10^{11}$ cm^{-3}) under the strong compensation condition $k \approx 1$ is theoretically analyzed. Based on experimental results, a comparative evaluation of specific resistivity (ρ), temperature sensitivity coefficient (β), response (τ_r) and recovery (τ_rec) times, and operating temperature ranges is performed for Si<B,S>, Si<B,Cr>, Si<P,Co>, Si<B,Mn>, and Si<P,Ni> samples. The findings demonstrate that heavily compensated silicon doped with nickel (Ni) and sulfur (S) serves as the most optimal material for manufacturing high-sensitivity, fast-response, and radiation-resistant temperature sensors.

Keywords: heavily compensated silicon, deep energy levels, doping, compensation degree, temperature sensor, thermistor, temperature sensitivity coefficient, nickel, sulfur, manganese.

1. Kirish

Zamonaviy sanoat avtomatikasi, energetika, mikroelektronika va texnologik jarayonlarni boshqarish tizimlarida haroratni yuqori aniqlikda va tezkor o‘lchash muhim ilmiy-texnik vazifalardan biri hisoblanadi. Ushbu maqsadda qo‘llaniladigan yarimo‘tkazgichli termorezistorlar va termodatchiklar o‘zining ixchamligi, yuqori harorat sezgirligi hamda uzoq muddatli barqarorligi bilan ajralib turadi. So‘nggi yillarda yarimo‘tkazgichlar fizikasi va elektron asbobsozlik sohasida chuqur energetik sathlar hosil qiluvchi kirishmalar bilan legirlangan **kuchli kompensatsiyalangan kremniy** asosida yangi avlod termodatchiklarini yaratishga bo‘lgan qiziqish tobora ortib bormoqda.

Kuchli kompensatsiyalangan kremniyning o‘ziga xosligi shundaki, uning hajmida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini juda past darajagacha ($n \leq 10^{11}$ sm^{-3}) kamaytirish va materialni xususiy o‘tkazuvchanlik holatiga yaqinlashtirish mumkin. Bunday materialni olish uchun dastlabki sayoz donor (P, As, Sb) yoki akseptor (B, Al) kirishmali kremniy kristalliga qarama-qarshi ishorali hamda taqiqlangan zonada chuqur energetik sathlar hosil qiluvchi kirishma atomlari (Ni, Mn, Cr, Co, Fe, S, Se, Zn va boshqalar) diffuziya usulida kiritiladi. Turli tabiatli kirishmalarning konsentratsiyasi va energetik holatiga bog‘liq holda olingan namunalarning elektrofizik parametrlari va funksional imkoniyatlari sezilarli darajada farqlanadi.

Amaliyotda qo‘llaniladigan zamonaviy yarimo‘tkazgichli termodatchiklar quyidagi asosiy ekspluatatsion talablarga javob berishi zarur: 1) yuqori termosezgirlik (β koeffitsiyentining katta qiymati); 2) tezkorlik, ya’ni harorat o‘zgarganda parametrlarning o‘rnatilish va tiklanish vaqtining minimal (5–7 s atrofida) bo‘lishi; 3) asosiy parametrlar keskin o‘zgarmaydigan keng ishchi harorat sohasi; 4) past va yuqori haroratlarda uzoq muddatli ekspluatatsiya davomida parametrlar degradatsiyaga uchramasligi; 5) ionlashtiruvchi nurlanishlar (rentgen va γ-nurlanish) ta’sirida barqarorlikni saqlash; 6) agressiv tashqi muhitlar (bosim, gaz, vibratsiya, magnit va elektr maydonlari) sharoitida ishonchli ishlash qobiliyati. Mazkur ishning maqsadi turli chuqur sathli kirishmalar bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniyning fizik

xususiyatlarini tahlil qilish va ular asosida tayyorlangan termodatchiklarning optimal tarkibini aniqlashdan iborat.

2. Kuchli kompensatsiyalangan yarimo‘tkazgichlarning nazariy asoslari

Yarimo‘tkazgichli elektronikada qo‘llaniladigan odatiy kompensatsiyalanmagan materiallarda ionlashgan kirishma atomlari konsentratsiyasi (N_a^-, N_d^+) berilgan haroratdagi asosiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasiga (p_0, n_0) teng bo‘ladi: $N_a^- = p_0$ va $N_d^+ = n_0$. Ushbu shart nafaqat butun tizimning, balki lokal elektroneytrallikning ham saqlanishini ta’minlaydi. Natijada ionlar potensialining Debay ekranlash radiusi kristall panjara doimiysi bilan solishtirarli darajada kichik bo‘lib, zaryad tashuvchilarning ko‘chish hodisalariga va materialning fundamental parametrlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatmaydi.

Biroq hajmida bir vaqtning o‘zida ham donor, ham akseptor kirishma atomlari mavjud bo‘lgan kompensatsiyalangan yarimo‘tkazgichlarda holat tubdan o‘zgaradi. Kirishma atomlari o‘zaro bir-birini kompensatsiyalaydi va bu jarayon materialning kompensatsiya darajasi k bilan tavsiflanadi. Agar dastlabki material p-turdagi yarimo‘tkazgich (akseptorlar konsentratsiyasi N_a) bo‘lib, unga qo‘shimcha ravishda N_d konsentratsiyali donor atomlari kiritilsa, kompensatsiya darajasi $k = N_d / N_a$ nisbat orqali aniqlanadi. Aksincha, dastlabki n-turdagi materialga akseptor kirishmalar kiritilganda esa $k = N_a / N_d$ ko‘rinishga ega bo‘ladi. Bu yerda N_a va N_d faqat elektroaktiv kirishma atomlari konsentratsiyasini ($N_a = N_a^-$, $N_d = N_d^+$) ifodalaydi.

Kompensatsiya darajasining qiymatiga ko‘ra yarimo‘tkazgichlar uch guruhga bo‘linadi: $k < 1$ bo‘lganda material kompensatsiyalangan, $k > 1$ bo‘lganda qayta kompensatsiyalangan (o‘tkazuvchanlik turi o‘zgargan), $k \approx 1$ (ya’ni $N_d^+ \approx N_a^-$) shart bajarilganda esa **kuchli kompensatsiyalangan** deb ataladi. Kuchli kompensatsiyalangan holatda donor atomlari akseptor atomlarining elektr o‘tkazuvchanlikka qo‘shadigan hissasini to‘liq neytrallaydi. Natijada barcha kirishma atomlari ionlashgan holatda bo‘lsa-da, ularning o‘tkazuvchanlikka ta’siri deyarli yo‘qoladi va materialning elektr o‘tkazuvchanligi faqat berilgan haroratdagi xususiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (n_i) bilan belgilanadi:

$$n_0 \approx p_0 \approx n_i = (N_c \cdot N_v)^{1/2} \exp(-E_g / 2kT) \qquad (1)$$

bu yerda N_c va N_v — mos ravishda o‘tkazuvchanlik va valent zonalaridagi holatlarning effektiv zichligi; E_g — yarimo‘tkazgichning taqiqlangan zona kengligi; k — Bolsman doimiysi; T — mutlaq harorat.

Ko‘p zaryadli chuqur energetik sathlar hosil qiluvchi kirishmalar kiritilganda kompensatsiya mexanizmi yanada boyiydi. Masalan, sayoz akseptorlar (B, Al) bilan legirlangan p-kremniyga ikkita chuqur donor sath hosil qiluvchi kirishmalar (Mn, S, Se) kiritilganda, $N_a > 2N_d$ shartda material p-turini saqlab qoladi, biroq kovaklar konsentratsiyasi $p = p_0 - 2N_d^{++}$ gacha kamayadi va o‘tkazuvchanlikning o‘zgarishi $\Delta\sigma = -2e\mu_p N_d^{++}$ ga teng bo‘ladi. Xuddi shuningdek, sayoz donorlar (P, As, Sb) bilan legirlangan n-kremniyga ikki karra akseptor sath hosil qiluvchi kirishmalar (Zn, Ni) kiritilganda, $N_d > 2N_a$ bo‘lsa, elektronlar konsentratsiyasi $n = n_0 - 2N_a^{--}$ ga kamayib, o‘tkazuvchanlik $\Delta\sigma = 2e\mu_n N_a^{--}$ miqdorga pasayadi.

Agar $N_d < 2N_a$ shart bajarilsa, n-turdagi material inversiyaga uchrab p-turdagi o‘tkazuvchanlikka o‘tadi va kovaklar konsentratsiyasi bir va ikki karra ionlashgan akseptor markazlari hisobiga quyidagicha ifodalanadi:

$$p = N_{a1}^- + N_{a2}^{--} - N_d^+, \qquad N_{a2}^{--} = N_a / [1 + g_2' \exp((E_{a2} - F) / kT)] \qquad (2)$$

bu yerda E_{a2} — ikkinchi akseptor sathning ionlashish energiyasi; F — Fermi sathi. Ko‘p zaryadli kirishmalarda $N_d = 2N_a$ (yoki $N_d^+ = 2N_a^-$) hamda tijelsiz zonali eritish usulida olingan yuqori omli kremniyga ($\rho \geq 10^4$ Om·sm, T = 300 K) teng miqdorda chuqur donor va akseptor kirishmalar kiritilganda ($N_d^{++} = N_a^-$) to‘liq kompensatsiya yuzaga keladi. Shuni alohida ta’kidlash kerakki, ionlashgan kirishma markazlarida zaryad tashuvchilarning sochilishi kuchayishi tufayli kuchli kompensatsiyalangan yarimo‘tkazgichda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi (μ) har doim xususiy yarimo‘tkazgichnikidan kichik bo‘ladi.

3. Eksperimental natijalar va ularning qiyosiy tahlili

Tadqiqot davomida chuqur sathli Ni, Mn, Cr, Co, Fe, S, Se va Zn kirishmalari bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy asosida tajriba termodatchiklari tayyorlandi. Qiyosiy tahlilning xolisligini ta’minlash maqsadida barcha namunalarning xona haroratidagi solishtirma qarshiligi bir-biriga yaqin oraliqda — $\rho = (8\div9)\cdot10^4 \div (1\div1{,}5)\cdot10^5$ Om·sm etib tanlandi, shuningdek datchiklarning tayyorlash texnologiyasi, geometrik o‘lchamlari va omik kontaktlari bir xil sharoitda shakllantirildi.

Turli kirishmalar bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy namunalarining asosiy elektrofizik va dinamik parametrlari 1-jadvalda, harorat sezgirlik koeffitsiyentining (β) maksimal qiymatlari hamda ularga mos keluvchi harorat oraliqlari esa 2-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Turli kirishmalar bilan legirlangan kremniy namunalarining asosiy parametrlari

№	Namuna tarkibi	ρ, Om·sm	O‘tkazuvchanlik turi	β, K^{-1}	τ_o‘rn, s	τ_tik, s	T_diapazon, K
1	**Si<B,S>**	$1\cdot10^5$	p	10000	12	18	250–400
2	**Si<B,Cr>**	$1\cdot10^5$	p	9600	15	20	250–370
3	**Si<P,Co>**	$1\cdot10^5$	n	8200	15	20	250–400
4	**Si<B,Mn>**	$1\cdot10^5$	p	7100	15	20	100–320
5	**Si<P,Ni>**	$1\cdot10^5$	n	10000	12	18	250–400

2-jadval. Namunalarning maksimal harorat sezgirlik koeffitsiyenti va unga mos harorat sohasi

№	Namuna tarkibi	ρ, Om·sm	O‘tkazuvchanlik turi	β_maks, K^{-1}	T(β_maks), K
1	**Si<B,S>**	$1\cdot10^5$	p	9600	300–340
2	**Si<B,Cr>**	$1\cdot10^5$	p	8300	340–360
3	**Si<P,Co>**	$1\cdot10^5$	n	7400	310–330
4	**Si<B,Mn>**	$1\cdot10^5$	p	8500	300–330
5	**Si<P,Ni>**	$1\cdot10^5$	n	9100	280–320

Olingan eksperimental ma’lumotlar asosida har bir legirlovchi kirishma guruhining texnologik afzalliklari va cheklovlari quyidagicha tavsiflanadi:

Nikel (Ni) bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy (Si<P,Ni>): Nikel diffuziyasini oddiy havo muhitida o‘tkazish mumkinligi va diffuziya vaqtining atigi **15÷20 minut**ni tashkil etishi texnologik jarayonni keskin soddalashtiradi. Metall nikelning arzonligi va keng tarqalganligi tufayli bunday termodatchiklarning tannarxi boshqa analoglarga nisbatan **50% gacha arzon**. Namunalar parametrlarining takrorlanuvchanligi yuqori bo‘lib, harorat sezgirlik koeffitsiyenti $\beta = (9000 \div 11000)\ K^{-1}$, o‘rnatilish va tiklanish vaqtlari esa mos ravishda (5÷7) s va (10÷12) s ga teng (standart sharoitlarda 12 s va 18 s). Datchik parametrlari T = (120÷150) °C haroratda uzoq muddat ishlaganda hamda $5 \cdot 10^8$ R dozagacha γ-radiatsiya va agressiv muhitlar ta’sirida yuqori barqarorlikni saqlaydi. Ishchi harorat sohasi T = (100÷370) K oralig‘ini qamrab oladi.

Oltingugurt (S) va selen (Se) bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy (Si<B,S>, Si<B,Se>): Mazkur datchiklar juda yuqori termosezgirlikka ($\beta = (10000 \div 11000)\ K^{-1}$) va keng ishchi harorat diapazoniga (T = (100÷400) K) ega. O‘rnatilish va tiklanish vaqtlari kichik (5÷7 s va 10÷12 s) bo‘lib, T = 120 °C haroratda uzoq muddat ekspluatatsiya qilinganda parametrlarida deyarli degradatsiya kuzatilmaydi. Biroq texnologik jihatdan ikkita asosiy kamchilik mavjud: birinchidan, diffuziya jarayonini havosi so‘rib olingan (vakuumlangan) kvars ampulalarda o‘tkazish talab etiladi; ikkinchidan, qalinligi d = 350 mkm bo‘lgan kremniy plastinalari uchun diffuziya davomiyligi t = 10÷20 soatni tashkil qiladi. Bu omillar mahsulotning takrorlanuvchanligi va tannarxiga ma’lum darajada ta’sir ko‘rsatadi.

Marganes (Mn) bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy (Si<B,Mn>): Marganesli namunalarda harorat ortishi bilan bir vaqtning o‘zida ham zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, ham ularning harakatchanligi oshishi hisobiga ba’zi rejimlarda termosezgirlik $\beta \approx 12000\ K^{-1}$ gacha yetadi va diffuziya vaqti qisqa (t = 15÷20 minut) bo‘ladi. Optimal ishchi harorat oralig‘i T = (100÷350) K ga teng. Shunga qaramay, marganes diffuziyasini havosi so‘rilgan kvars ampulalarda o‘tkazish va jarayondan so‘ng namunani juda katta tezlikda (≈ 200÷250 K/s) keskin sovitish (zakalka) zaruriyati texnologiyani murakkablashtiradi. Bundan tashqari, T > 120 °C haroratda va 10^7 R dan yuqori dozali γ-nurlanish ta’sirida datchik parametrlarining degradatsiyaga uchrashi uning qo‘llanilish doirasini cheklaydi.

Xrom (Cr) va kobalt (Co) bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy (Si<B,Cr>, Si<P,Co>): Ushbu materiallar asosidagi datchiklarning termosezgirligi ($\beta = 8200 \div 9600\ K^{-1}$) va tezkorligi ($\tau_o‘rn$ = 15 s, τ_tik = 20 s) Si<Ni> namunalariga yaqin bo‘lsada, Cr va Co kirishmalarini diffuziya qilish uchun ularni oldindan vakuumda bug‘latib qoplash (napylenie) hamda diffuziyani T = (1240÷1250) K kabi yuqori haroratda o‘tkazish talab etiladi. Shu sababli ularni ommaviy ishlab chiqarish texnologik va iqtisodiy jihatdan amaliy ahamiyat kasb etmaydi.

4. Xulosa

O‘tkazilgan nazariy va eksperimental tadqiqot natijalarini umumlashtirib, quyidagi asosiy xulosalarga kelish mumkin:

1. Chuqur energetik sathlar hosil qiluvchi kirishmalar bilan kompensatsiya darajasi $k \approx 1$ shartida legirlangan kremniyda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining $n \leq 10^{11}\ sm^{-3}$ gacha pasayishi yuqori sezgirlikka ega ($\beta = 7100 \div 12000\ K^{-1}$) termodatchiklarni yaratish imkonini beradi.

2. Turli kirishma turlari (Ni, Mn, S, Se, Cr, Co) bo‘yicha o‘tkazilgan qiyosiy tahlil shuni ko‘rsatdiki, texnologik soddaligi (havo muhitida 15–20 minutlik qisqa diffuziya), xomashyo arzonligi (tannarxning 50% gacha pastligi), yuqori tezkorligi (τ_o‘rn = 5÷7 s) hamda issiqlik va radiatsiyaviy barqarorligi ($5\cdot10^8$ R dozagacha) jihatidan nikel (Ni) bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy eng optimal material hisoblanadi.

3. Keng harorat oralig‘ida (100÷400 K) yuqori aniqlik va barqarorlik talab etiladigan maxsus o‘lchov tizimlari uchun esa oltingugurt (S) bilan legirlangan kuchli kompensatsiyalangan kremniy asosidagi termodatchiklardan foydalanish maqsadga muvofiqdir.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Илиев Х.М. Сильнокомпенсированный кремний с глубокими примесными уровнями и его функциональные возможности // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52. – № 4. – С. 456–462.
2. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. – М.: Мир, 1977. – 562 с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
4. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Koveshnikov S.V. Physical properties of silicon strongly compensated with nickel and sulfur // Semiconductors. – 2019. – Vol. 53. – No. 8. – P. 1045–1050.
5. Ш.Б. Шергозиев, К.С. Аюпов, С.А. Валиев, Б.А. Абдурахманов, С.Н. Сражев. Термодатчики на основе сильнокомпенсированного кремния и их функциональные возможности // Приборы – 2021. № 12 (258). 19-21.