

где решение ищется в виде $y_{p_j}^j(t)$.

Решая последовательно, начиная с последнего, уравнения (21), получим частное решение

$$\bar{y}_{p_j}^j(t) = \frac{1}{m} \bar{b}_{p_j}^j(t)t, \\ \bar{y}_{p_{j-1}}^j(t) = \frac{1}{2m^2} \bar{b}_{p_j}^j(t)t^2 + \left(\frac{1}{m} \bar{b}_{p_{j-1}}^j(t) - \frac{1}{2} \bar{b}_{p_j}^j(t) \right) t, \quad (22)$$

$$\bar{y}_1^j(t) = \sum_{l=1}^{p_j} \bar{y}_{1,l}^j(t)t^l,$$

где $\bar{y}_{1,l}^j(t)$, $l = 1, \dots, p_j$ – некоторые непрерывные, m – периодически е функции, выражающиеся через $\bar{b}_l^j(t)$, $l = 1, \dots, p_j$.

Так как преобразование

$$y_1^j(t) = z_1^j(t) + \bar{y}_1^j(t), \dots, y_{p_j}^j(t) = z_{p_j}^j(t) + \bar{y}_{p_j}^j(t), \quad (23)$$

$\bar{y}_l^j(t)$, $l = 1, \dots, p_j$, определяются формулами (22), приводит систему (21) к виду

$$z_1^j(t+m) = z_1^j(t) + z_2^j(t),$$

$$z_{p_{j-1}}^j(t+m) = z_{p_{j-1}}^j(t) + z_{p_j}^j(t), \quad (24)$$

$$z_{p_j}^j(t+m) = z_{p_j}^j(t),$$

общее непрерывное решение которой имеет вид

$$z_{p_j}^j(t) = \omega_{p_j}^j(t), \\ z_{p_{j-1}}^j(t) = \omega_{p_{j-1}}^j(t) + \frac{1}{m} t \omega_{p_j}^j(t), \quad (25)$$

$$z_1^j(t) = \omega_1^j(t) + \frac{1}{m} t \omega_2^j(t) + \left(\sum_{i=1}^{p_j-1} \alpha_i^j t^i \right) \omega_{p_j}^j(t),$$

где α_i^j – некоторые постоянные и $\omega_1^j(t), \dots, \omega_{p_j}^j(t)$ – произвольные непрерывные m – периодические функции [3, 4].

Таким образом, принимая во внимание (15), (22), (23) и (25), получим представление любого непрерывного решения системы (14) и, следовательно, любого непрерывного решения системы уравнений (1).

Литература

1. Пелюх Г.П., Шарковский А.Н. О линейных разностных уравнениях с периодическими коэффициентами. В кн.: Качественные методы теории дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. Киев: Ин-т математики АН УССР. 1997. С.91-100.
 2. Быков Я.В., Боташев А.И. О периодических решениях систем разностных уравнений // Изв. АН Киргизской ССР. 1970. №3. С.11-19.
 3. Турдиев Т., Шарипова Т. Линейные функционально-разностные уравнения. // Изв.АН УзССР, №1, 1975.
 4. Тураев Х. О структуре непрерывных решений систем линейных разностных уравнений с периодическими коэффициентами. В кн.: Краевые задачи для дифференциальных уравнений смешанных типов. -Ташкент: «Фан». 1990.
- РЕЗЮМЕ.** Ушбу ишда $x(t+1)=A(t)x(t)+B(t)$ кўринишдаги коэффициентлари 1 га тенг бўлган чизикли айирмали тенгламалар системасининг узлуксиз ечимларини тузиш масалалари ўрганилган. Бу ердат $t \in \mathbb{R} = (-\infty, +\infty)$, $A(t)$ – даври 1 га тенг бўлган хакикий узлуксиз $n \times n$ матрица, $B(t)$ – даври 1 га тенг бўлган n ўлчовли хакикий вектор.

РЕЗЮМЕ. В настоящей работе изучается вопросы построения непрерывного решения систем линейных разностных уравнений с 1-периодическими коэффициентами следующего вида: $x(t+1)=A(t)x(t)+B(t)$ где $t \in \mathbb{R} = (-\infty, +\infty)$, $A(t)$ – вещественная непрерывная 1-периодическая $n \times n$ – матрица, $B(t)$ – вещественный 1- периодический вектор размерности n .

SUMMARY. This work studies the problems of constructing continuous solutions of a system of linear differential equations of the form $x(t+1)=A(t)x(t)+B(t)$ with coefficients equal to 1. Here $t \in \mathbb{R} = (-\infty, +\infty)$, $A(t)$ is a real continuous $n \times n$ matrix with period 1, $B(t)$ is a real n -dimensional vector with period 1.

NOTT VA DE-MASSA NAZARIYASIGA ASOSAN TUNNEL DIODNING O'TISH VAQTINI HISOBLASH

M.K.O'ktamova – dotsent

A.A.Mamatsboyev – magistrant

Namangan muhandislik-qurilish instituti

Tayanch so'zlar: Nott va De-Massa nazariyasi, diffuziya sig'imi, tunnel diodning o'tish vaqti.

Ключевые слова: теория Нотта и Де-Масса, диффузионная емкость, время включения туннельного диода.

Key words: Nott and De-Massa theory, diffusion capacitance, turn-on time of a tunnel diode.

Kirish. Texnologiyalar jadallik bilan rivojlanib borayotgan davrda ularga bo'lgan talab ham ortib boradi. Tunnel diodlaridan kosmik apparatlarni yasashda keng qo'llaniladi. Ba'zi kosmik apparatlardan o'rganayotgan obyekti haqidagi ma'lumotni ishonchli saqlashi yoki tezlik bilan ma'lumotni subyektga yetkazishi talab etiladi. Katta hajmdagi ma'lumotlarni kichik xotiralarda saqlash, saqlangan ma'lumotlarni turli maydonlar ta'siridan himoyalangan holda uzatishda, qurilma ichidagi tunnel diodi katta ahamiyatga ega.

Yaqin vaqtgacha ham yarimo'tkazgichli diodlar fizikasi va texnikasiga konsentratsiyasi $10^{16} - 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ dan oshmagan kristallar kirar edi. Mos ravishda ulardagi erkin zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi shunday darajada va hatto undan kamroq

edi. Oddiy diodlarda p-n o'tish yetarlicha katta qalinlik va nisbatan kichik maydon kuchlanishi bilan tavsiflanadi. Kuchli legirlangan p-n ulanishli tunnel printsipli birinchi marta kashf etilganda, tunnel diodida eng muhimi yuqori tezlikda tunnel o'tish vaqti edi. Bu shuni anglatadiki, o'tish nol nuqtadan eng yuqori nuqtaga juda qisqa ko'tarilish vaqti bilan sodir bo'lishi mumkin [1-2]. Tunnel diodida differensial qarshiligining hosil bo'lishi, keyinchalik, generatorlarning yaratilishiga turtki bo'ldi. Yuqori chastotali signal ishlab chiqarish yoki tebranishga endi ushbu xarakteristikani qo'llash orqali erishish mumkin edi. Differentsial qarshilik xarakteristikasi, shuningdek, tunnel diodini yuqori chastotali kuchaytiruvchi qurilma sifatida ishlatishga imkon berdi [3]. Yuqori chastotali signalni boshqarish tunnel dio-

dining qo'llanilishidir. Tunnel diodining o'tish vaqtini hisoblash uchun ko'plab umumiy analitik usullar berilgan [4-7]. Ayniqsa, turli xil geteroo'tishli tunnel diodlarining o'tish vaqti, tunnel diodining tayyorlangan materiallar turiga ham bog'liq [5]. Oddiy yarimo'tkizgichlardan farqli ravishda tunnel diodlarda qirindilarning konsentratsiyasi $10^{18} - 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ miqdorda bo'lgan yarimo'tkazgichlar qo'llaniladi [1,6]. Kremniy asosli tunnel diodining ishlash texnologiyasi va volt-ampere xarakteristikalar bilan Yan Yan tomonidan himoya qilingan (PhD) ishida ko'rishimiz mumkin [7]. Professor J.Pavlikning doktorlik ishida esa tunnel diodli qurilmalarni sxemalashda zarur bo'lgan modellar o'rganilgan [8]. Bugungi kunda tunnel diodi beradigan umumiy tok Nott va De Mass [9] nazariyasiga ko'ra olinadi, ushbu nazariyaga asosan tunnel dioddagi umumiy tok - I , tunnel toki - I_T , ortiqcha tok - I_X hamda diffuziya toklari - I_{diff} yig'indisiga teng. Jazoirlik olimlar Messadi Lotfi va Dibi Zoxir ishlarida tunnel diodidagi barcha toklar xarakteristikalarini tajribalar natijasida olindi. Tajriba natijalarini tushuntirishda Nott va De Mass nazariyalariga asoslanishdi va o'zlarining yangi "Tasdiqlash" nomli modelini taqdim etishdi [10].

Metadalogiyasi. Tunnel diodi volt-ampere xarakteristikasi (VAX) Nott va De-Massa nazariyasida - I_p tunnel tokining eng yuqori nuqtasidagi qiymati va shu qiymatga to'g'ri keluvchi kuchlanish - V_p , minimumidagi tok kuchi - I_v ga hamda minimumga to'g'ri keluvchi kuchlanish - V_v qiymatining o'zgarishi (1) ifoda bilan aniqlanadi.

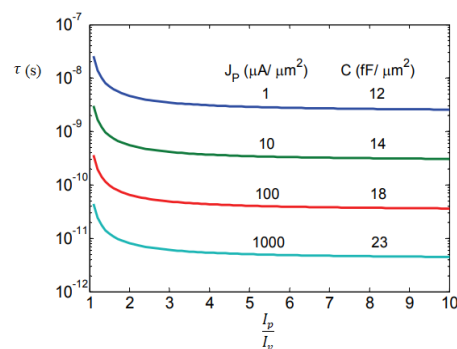
$$I = I_p \left(\frac{V}{V_p} \right) \exp \left(1 - \frac{V}{V_p} \right) + I_v \exp(A_2(V - V_v)) + I_0 \exp \left(\frac{-qV}{kT} \right) \quad (1)$$

Tunnel diodining o'tish vaqtini esa quyidagi (2) ifoda orqali keltiramiz. $\tau = \frac{C \cdot U}{I}$ dan

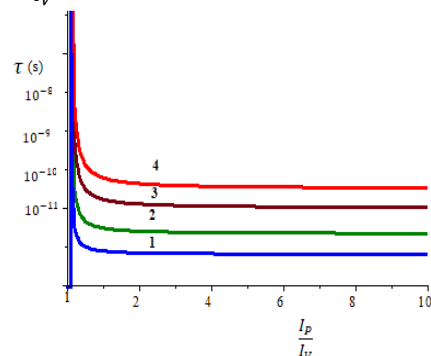
$$\tau = \frac{C (V_v - V_p)}{I_p (1 - \frac{I_v}{I_p})} \quad \text{formula kelib chiqadi} \quad (2)$$

τ – tunnel o'tish vaqti. C-diffuziya sig'imi.

Asosiy natija va xulosalar. Ge asosli tunnel diodlaridan Yan o'zining bir nechta tajriba grafiklarini oladi [7]. Tajriba grafiklari orasida tunnel o'tish vaqtining $\frac{I_p}{I_v}$ ga nisbatiga bog'liqlik grafigi ham keltirilgan. (1-rasm).



1-rasm. Ge asosli tunnel diodi uchun tunnel o'tish vaqtining $\frac{I_p}{I_v}$ ga nisbatiga bog'liqlik tajriba grafigi.



2-rasm Y.Yanning tajriba natijalari asosida I_p va C ning qiymatlari mosravishda tanla bolinib, (2) ifodaga qo'yil ganda 1-holatdan, 4-holatga tomon tunnel o'tish tokening ortishi nazariy kuzatildi.

Ma'lumki, p-n o'tishli tunnel diodida diffuzion sig'im kattaligi asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtiga proporsional [1-2]. Shuningdek, tunnel diodlarida sifat faktori degan tushuncha mavjud bo'lib, - I_p tunnel tokining eng yuqori nuqtasidagi qiymatini diffuzion sig'imning nisbatiga teng. Sifat faktorining qiymati qanchalik birdan kichiklashsa, tunnel diodning ish rejimi ortadi [2,7].

Xulosa. Ushbu ishda Nott va De Mass nazariyasi asosida diffuzion sig'imning, elektronlarning keskin ortishi kuzatildi. Diffuzion sig'imning ortishi tunnel diodida sifat faktorining o'zgarishiga olib kelishi aniqlandi. Ge asosli tunnel diodi uchun tunnel o'tish vaqtining $\frac{I_p}{I_v}$ ga nisbatiga bog'liqlik tajriba grafigini nazariy grafik bilan mosligi ko'rildi. Tunnel tokining o'tish vaqti maydonlar ta'siriga ham bog'liq bo'ladi. Tashqi maydonlar tunnel diodining elektrofizik xususiyatlarini o'zgartirib yuboradi.

Adabiyotlar

1. Fistul I., Shvarts N.Z. Uspekhi Physicheskikh Science 77, 109-160.(1962).
2. Berger P.R. Negative differential resistance devices and circuits//Comprehensive Semiconductor Science and Technology. 2011, -P. 176-241.
3. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. // John Wiley & Sons, Inc. 2007, 3, -P. 418-480.
4. Aliyev K.M, Kamilov IK, Ibragimov X.O, Abakarova N.S. Pisma JTF, 37, 42.2011. -P. 809-813.
5. Berger P.R., Gulyamov G., Dadamirzaev M.G., Uktamova M.K., Boidedaev S.R. 2024. Romanian journal of physics.
6. Dashiell M.W., Kolodzey J., Crozat P., Aniel F., Lourtioz J.M. Microwave properties of silicon junction tunnel diodes grown by molecular beam epitaxy//IEEE Electron Device Lett., 2002.
7. Yan Y. Silicon-based tunnel diode technology.//[Silicon-Based Tunnel Diode Technology \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/312111111_Silicon-Based_Tunnel_Diode_Technology), 2008.

8. Pawlik J. Development of Tunnel Diode Devices and Models for Circuit Design and Characterization//Dissertation for Doctor of Philosophy in Microsystems Engineering, Rochester Institute of Technology. 2007, -P.1-96.<https://scholarworks.rit.edu/theses>.

9. Demassa T. A., Knott D. P. The prediction of tunnel diode voltage-current characteristics//Solid State Electron. 1970, vol. 13, -P. 131-138.

10. Lotfi M., Zohir D.A Spice Behavioral Model of Tunnel Diode. // Simulation and Application. International Journal of Control and Automation. 2016, Vol. 9.

РЕЗЮМЕ. Nottva De-Massa nazariyasiga asosan tunnel diodining o'tish vaqtini diffuziya sig'imiga va tunnel diodidagi eng yuqori tok qiymatiga bog'liqligi hisoblangan. Shuningdek, tunnel diodida hosil bo'ladigan eng yuqori kuchlanish qiymatiga va eng past kuchlanish qiymati ham tunnel diodining o'tish vaqtiga ta'sir qilishi kuzatildi. Tunnel diodining o'tish vaqtini tunnel diodidagi eng yuqori tok qiymatini, eng quyinuqtadagi tok qiymatiga nisbatiga bog'liqlik nazariyusulda olindi va tajriba natijalariga moslik darajasi tekshirildi.

РЕЗЮМЕ. На основе теории Нотта и Де-Масса была рассчитана зависимость туннельного диода от диффузионной емкости и пикового тока в туннельном диоде. Кроме того, было замечено, что пиковое значение напряжения и минимальное значение напряжения, генерируемое в туннельном диоде, также влияют на время включения туннельного диода. Теоретически получена зависимость туннельного диода от времени включения туннельного диода по отношению пикового значения тока к значению тока в самой низкой точке туннельного диода и проверена степень согласия с экспериментальными результатами.

SUMMARY. Based on the Nott and De-Massa theory was calculated, the dependence of the tunnel diode on the diffusion capacitance and the peak current in the tunnel diode. In addition, it was observed that the peak voltage value and the minimum voltage value generated in the tunnel diode also affect the turn-on time of the tunnel diode. The dependence of the tunnel diode was checked on the turn-on time of the tunnel diode on the ratio of the peak current value to the current value at the lowest point in the tunnel diode was obtained theoretically and the degree of agreement with the experimental results.

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ АТОМА ЭРБИЯ

М.Б.Шарибаев – кандидат физико-математических наук

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Ш.К.Каландарова – докторант

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

Таянч сўзлар: эпитаксиал пленкалар, легирлаш, фотолюминесценция, интенсивлик.

Ключевые слова: эпитаксиальные пленки, легирование, фотолюминесценция, интенсивность.

Key words: epitaxial films, doping, photoluminescence, intensity.

Рост числа исследований кремния, легированного эрбием, связан с возможностью использования этого материала для создания кремниевых оптоэлектронных приборов на длине волны $1.54\mu\text{m}$ [1]. Одним из условий успешной реализации кремниевых приборных структур является достижение высокого содержания оптически активных центров, связанных с эрбием. При легировании кремния эрбием с помощью ионной имплантации используются ионы с высокой энергией (0.5–5MeV). Это приводит к образованию дефектов, которые сохраняются частично даже после продолжительного отжига и приводят к преципитации редкоземельной примеси [2]. При ионной имплантации, как и в иных методах легирования, в результате взаимодействия атомов эрбия и кремния формируются оптически неактивные силицидные соединения. Было установлено, что для подавления образования преципитатов эрбия и силицидов эрбия необходимо осуществлять процесс легирования при пониженных температурах и слои кремния со легированных кислородом для формирования оптически активных центров, включающих ионы Er^{3+} [3]. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при со испарении кремния и эрбия удается выращивать слои с общей концентрацией эрбия вплоть до 10^{22}cm^{-3} [4]. Однако интенсивность фотолюминесценции в слоях с концентрацией эрбия, большей 10^{18}cm^{-3} , начинает ослабевать, что связано, вероятно, с образованием дефектов кристаллической структуры [4,5]. Другой метод, позволяющий выращивать

сильно легированные слои кремния, — твердофазная эпитаксия (ТФЭ). Процесс выращивания в нем осуществляется в две стадии: осаждение слоя при низких температурах, когда сегрегация примеси кинетически подавлена, и последующий отжиг пленки аморфного кремния [6]. Цель настоящей работы — исследование возможности выращивания сильно легированных эрбием слоев кремния методом ТФЭ, проявляющих фотолюминесценцию на длине волны $1.54\mu\text{m}$.

Выращивание легированных эрбием слоев кремния осуществлялось в сверхвысоковакуумной установке МЛЭ [7]. Испарение Si проводилось из сублимационного источника в виде прямоугольного бруска, разогреваемого прохождением тока, а испарение Er — также из сублимационного источника, вырезанного из металлической фольги. Подложкой служила прямоугольная пластина кремния, вырезанная по плоскости (100) или (111) из монокристаллического кремния марки КДБ-12. Она, как и источники, нагревалась пропусканием тока. После отжига подложки при $T=1250^\circ\text{C}$ в течение 10 min проводилось выращивание слоев кремния либо методом МЛЭ при температуре подложки 500°C , либо методом ТФЭ на нагретую подложку с последующим отжигом *in situ*. Спектры ФЛ структур измерялись при температуре 77 K с помощью Фурье-спектрометра BOMEM DA3 с разрешением 1cm^{-1} при накачке излучением Ar^+ лазера (с длиной волны $\lambda=514.5\text{nm}$) мощностью 80 mW со стороны эпитаксиального слоя. Структура слоев исследовалась методом электронографии. Спектр