

УДК 621.317:006.354

В.С. ОСАДЧУК, Ю.С. КРАВЧЕНКО, В.І. КОЛОМІЄЦЬ, І.О. ЧЕХІВСЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет

ВПЛИВ РАДІАЦІЇ НА РОБОТУ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ. Ч.1. ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РЕКОМБІНАЦІЙНІ ВТРАТИ В АКТИВНІЙ І ПАСИВНІЙ БАЗІ

Аналітичним шляхом досліджено вплив радіаційного випромінювання на роботу напівпровідникових приладів, зокрема, на величину радіаційних втрат в базі біполярного транзистора. Окремо проаналізовано вплив випромінювання на радіаційні втрати в активній і пасивній базі транзистора. Показано, що основним джерелом радіаційних втрат в активній базі є збільшення часу життя τ неврівноважених носіїв заряду. В той же час, радіаційні втрати в пасивній базі транзистора, в основному, також пов'язані зі зміною часу життя носіїв заряду, але цей вплив не такий значний, як в активній.

Ключові слова: радіація, радіаційні втрати, біполярний транзистор, активна і пасивна база біполярного транзистора.

V.S. OSADCHUK, YU.S. KRAVCHENKO, V.I. KOLOMIETS, I.O. CHEKHIVS'KIY
Vinnitsia National Technical University

EFFECT OF RADIATION ON BIPOLAR TRANSISTOR WORK. PART 1. INFLUENCE RADIATION ON RECOMBINATION LOSSES IN ACTIVE AND PASSIVE BASE

Abstract – The effect of radiation influencing on the operations in semiconductor devices, including radiation losses in the base of transistor was analytically investigated. Emission influencing on the radiation losses in the emitter, in the volume charge layer of emitter junction and on the transistor surface was analyzed separately. It is shown that recombination losses in thin emitter does not depend on radiation and recombination losses on the surface of the transistor depend on the values of the radiation surface recombination velocity change and therefore depend on absorbed dose of radiation.

Keywords: radiation, radiation loss bipolar transistor active and passive base bipolar transistor.

Вступ

Дія радіації на роботу напівпровідникових приладів [1–6], насамперед, пов'язана з появою в структурі напівпровідника зворотних та незворотних радіаційних ефектів, які призводять до змін їх електрофізичних параметрів, ускладнюючи умови ефективного використання різноманітних електронних засобів, що знаходяться в зоні такого впливу [8–16]. В той же час, деякі з цих ефектів, що мають зворотний характер і пов'язані з короткочасним зростанням концентрації вільних носіїв заряду, а, значить, і короткочасною зміною параметрів відповідного електронного пристрою, можуть бути використані для створення сенсорів радіації [7].

Мета даної роботи – дослідити вплив радіаційного випромінювання на роботу напівпровідникових приладів, зокрема, на величину радіаційних втрат в базі біполярного транзистора.

Вплив радіації на коефіцієнт передачі струму транзистора.

Основним параметром, важливим для будь-якого транзистора є коефіцієнт передачі струму h_{21} , тобто відношення вихідного струму до вхідного. Для зручності розглянемо транзистор включений за схемою зі спільним емітером. Розрахунок транзистора проводиться за методом поданим в літературі [17]. Розрізняють статичний h_{21E} і диференційний h_{21e} коефіцієнт передачі струму:

$$h_{21E} = \left. \frac{j_K}{j_B} \right|_{j_K = const, V_{K-E} = const}; \quad h_{21e} = \left. \frac{dj_K}{dj_B} \right|_{j_K = const, V_{K-E} = const} \quad (1)$$

де j_K – струм колектора (вихідний струм),

j_B – струм бази (вхідний),

V_{K-E} – напруга колектор – емітер (вихідна напруга).

Як відомо, в стаціонарному активному (підсилювальному) стані режимі весь струм бази витрачається на підтримку процесів рекомбінації в транзисторі. Оскільки коефіцієнт передачі залежить від режиму по постійному струму (тобто від комбінації значень j_K та V_{K-E}), то чим інтенсивніше проходять процеси рекомбінації, тим більшим буде струм бази і, як наслідок, меншим коефіцієнт передачі струму. З огляду на конструкцію транзистора (рис. 1)

$$j_B = j_A + j_{II} + j_{EII} + j_I + j_S, \quad (2)$$

де $j_A, j_{II}, j_{EII}, j_I, j_S$ – струми рекомбінації в активній та пасивній базі, в шарі просторового заряду

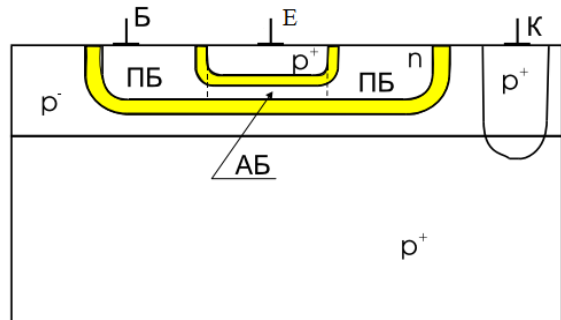


Рис. 1. Типова конструкція р-п-р-транзистора

емітерного переходу, в емітері (пов'язаний з зустрічною інжекцією електронів з бази в емітер), на поверхні кристалу.

Враховуючи (1) і (2) зручніше аналізувати зворотній коефіцієнт передачі струму:

$$\frac{1}{h_{21E}} = \frac{J_B}{J_K} = \frac{J_A}{J_K} + \frac{J_{II}}{J_K} + \frac{J_{EII}}{J_K} + \frac{J_I}{J_K} + \frac{J_S}{J_K}, \quad (3)$$

де AB і $ПБ$ – відповідно активна і пасивна база,
 E, B, K – емітер, база, колектор.

Для визначеності розглянемо $p-n-p$ транзистор. Оскільки всі дірки на шляху від емітера до колектора слід віднести до втрат, то кожен доданок в (3) – рекомбінаційні втрати в певній області [18]. Тоді запишемо:

$$\frac{1}{h_{21E}} = R_A + R_B + R_{EII} + R_I + R_S, \quad (4)$$

Оскільки при опроміненні в транзисторі найбільше змінюється час життя неврівноважених носіїв заряду, то відповідно, змінюються і рекомбінаційні втрати, а отже і h_{21E} .

Вплив радіаційного випромінювання на рекомбінаційні втрати в активній базі

Відповідно (3) і (4) $R_A = \frac{J_A}{j_K}$. Частина базового струму пов'язану з рекомбінацією в активній базі знаходимо зі співвідношення [18]:

$$J_A = qS_{EA} \int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau(x)} dx, \quad (5)$$

де q – заряд електрона, S_{EA} – площа емітера, що межує з активною базою, W_A – товщина активної бази, $p(x)$ – розподіл неосновних носіїв заряду від координат в активній базі, $\tau(x)$ – залежність часу життя неврівноважених носіїв заряду від координат.

Для визначення струму колектора введемо поняття часу прольоту неосновних носіїв заряду через активну базу транзистора:

$$t_A = \int_0^{W_A} \frac{dx}{v_x(x)}, \quad (6)$$

де v_x – направлена по осі x швидкість переміщення інжекттованих з емітера в базу неосновних носіїв заряду.

Чисельник і знаменник в (6) помножимо на $qS_{EA}p(x)$, отримаємо:

$$t_A = \int_0^{W_A} \frac{qS_{EA}p(x)}{v_x(x)qS_{EA}p(x)} dx, \quad (7)$$

В знаменнику отримаємо струм дірок як функція координати $J_p(x)$. Оскільки коефіцієнт переносу неосновних носіїв через базу наближається до одиниці, то приймемо $J_p(x) = const$. Якщо врахувати, що коефіцієнт передачі струму в схемі зі спільною базою також близький до одиниці, тоді можна вважати, що $J_p(x) = J_E = J_K$. Тоді (7) перепишемо:

$$t_A = \int_0^{W_A} \frac{qS_{EA}p(x)dx}{j_K}, \quad (8)$$

чисельником (8) є повний заряд дірок, інжекттованих емітером в активну базу Q_A . Отже:

$$j_K = \frac{Q_A}{t_A}. \quad (9)$$

Враховуючи (5) і (9) отримаємо:

$$R_A = t_A \frac{\int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau(x)} dx}{\int_0^{W_A} p(x) dx}. \quad (10)$$

Тепер розглянемо, що у виразі (10) залежить від опромінення. Як відомо, найбільш чутливим до радіаційного впливу параметром напівпровідника є час життя τ неврівноважених носіїв заряду [18]. Цю залежність τ від потоку Φ визначається напівемпіричним виразом:

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \Phi, \quad (11)$$

де τ_0 – початковий час життя неосновних носіїв заряду в активній базі транзистора, τ_ϕ – після опромінення потоком Φ , k_τ – коефіцієнт радіаційних змін часу життя, що залежить від виду радіаційного впливу.

Розподіл інжектованих в базу носіїв заряду $p(x)$, залежить від розподілення по базі типозадаючої домішки і від середньої рухливості ($D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$) неосновних носіїв заряду в базі. Обидва цих параметра залежать від опромінення, але зміни рухливості можна вважати ефектом третього порядку меншості і ним можна знехтувати. Зміна ефективної концентрації типозадаючої домішки – ефект другого порядку меншості і його слід враховувати лише при низькому рівні легування, що для активної бази, де концентрація домішки порядку $(10^{16} - 10^{18}) \text{ см}^{-3}$, не характерно.

Враховуючи вище перераховане, можна зробити висновок, що $p(x)$, від опромінення практично не залежить.

Час прольоту t_A також залежить від низько чутливих до опромінення параметрів і, відповідно, на фоні змін часу життя змінами часу прольоту можна знехтувати.

Таким чином враховуючи (10) і (11) запишемо:

$$R_{A\phi} = t_A \frac{\int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau_\phi(x)} dx}{\int_0^{W_A} p(x) dx} = t_A \frac{\int_0^{W_A} \frac{p(x)}{\tau_0(x)} dx}{\int_0^{W_A} p(x) dx} + t_A \Phi \frac{\int_0^{W_A} k_\tau(x) p(x) dx}{\int_0^{W_A} p(x) dx}, \quad (12)$$

Перший доданок в (12) це початкові рекомбінаційні втрати в активній базі, другий – додаткові втрати при опроміненні.

Вплив радіаційного випромінювання на рекомбінаційні втрати в пасивній базі

На Рис. 2 зображено фрагмент пасивної бази. Будемо вважати, що всі носії заряду, інжектовані з емітера в пасивну базу, в ній і рекомбінують. При цьому можна використовувати одномірне наближення, якого достатньо для інженерних розрахунків [19].

Вважатимемо, що легування бази в напрямку осі y не змінюється, а залежить лише від x . Оскільки розмір пасивної бази в напрямку y , набагато більше дифузійної довжини неосновних носіїв заряду, то можна вважати, що з бічної сторони емітерного переходу дірки інжектуються в напівбезкінечне середовище. Тоді їх розподіл по координатам буде експонентним:

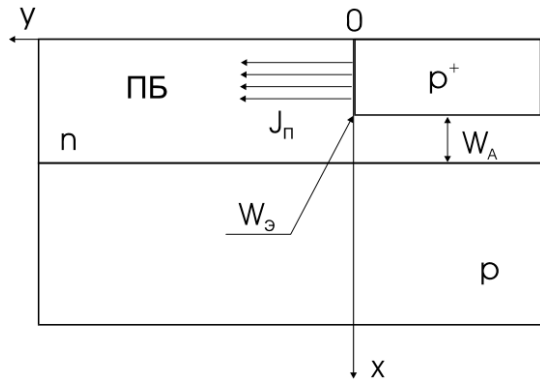


Рис. 2. Одномірна модель струму J_n

$$p_n(y) = p(0) \exp\left(-\frac{y}{L_n}\right). \quad (13)$$

Граничне значення дірок $p(0)$ при $y=0$ визначається співвідношенням:

$$p(0) = p_{n0}(x) \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right). \quad (14)$$

де p_{n0} – рівноважна концентрація дірок в базі, яка залежить від координати x . Введемо поняття середньої концентрації домішки в пасивній базі, і відповідно середнє значення інжектованих носіїв.

$$\begin{aligned} \bar{p}(0) &= \frac{1}{W_E} \int_0^{W_E} p(x) \Big|_{y=0} dx = \frac{1}{W_E} \int_0^{W_E} p_{n0}(x) \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) dx = \\ &= \frac{1}{W_E} \int_0^{W_E} \frac{n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)}{N_{II}(x)} dx = \frac{n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)}{W_E} \int_0^{W_E} \frac{1}{N_{II}(x)} dx = n_i^2 \frac{1}{N_{II}(x)} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right), \end{aligned} \quad (15)$$

де N_{II} – концентрація типозадаючої домішки в пасивній базі.

Знаючи розподіл дірок визначимо струм J_{II} .

Враховуючи, що швидкість рекомбінації нерівноважених носіїв заряду визначається співвідношенням:

$$r(x, y) = \frac{\Delta p(x, y)}{\tau_{II}}, \quad (16)$$

де $\bar{\tau}_{\Pi}$ – середнє значення часу життя в пасивній базі. Загальна кількість дірок, рекомбінуючи в усій пасивній базі буде рівною:

$$S_{E\Pi} \int_0^{\infty} \int_0^{W_E} \frac{\Delta p(x, y)}{\bar{\tau}_{\Pi}} dx dy, \quad (17)$$

де $S_{E\Pi}$ – площа емітерного переходу, що межує з пасивною базою. Враховуючи, що рівноважна концентрація неосновних носіїв заряду в пасивній базі дуже мала, то нею можна знехтувати і вважати, що $\Delta p(x, y) = p_n(x, y)$. Розподіл концентрацій неосновних носіїв заряду з врахуванням (13), (14), (15) можна звести до функції однієї змінної:

$$p(x, y) = p(y) = n_i^2 \left(\frac{\bar{1}}{N_{\Pi}(x)} \right) \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT} \right) \exp\left(-\frac{y}{L_n} \right). \quad (18)$$

Тоді складова струму бази, що забезпечує рекомбінацію в пасивній базі з врахуванням (17) і (18), буде рівна:

$$J_{\Pi} = \frac{qS_{E\Pi} \bar{D}_{\Pi} n_i^2}{\bar{L}_{\Pi}} \left(\frac{\bar{1}}{N_{\Pi}(x)} \right) \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT} \right). \quad (19)$$

Тепер використовуючи вираз для струму колектора ($J_K = J_d \exp \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT} \right)$) визначимо рекомбінаційні втрати в пасивній базі:

$$R_{\Pi} = \frac{j_{\Pi}}{j_K} = \frac{qS_{E\Pi} \bar{D}_{\Pi} n_i^2}{\bar{L}_{\Pi} J_d} \left(\frac{\bar{1}}{N_{\Pi}} \right) = \frac{qS_{E\Pi} \bar{D}_{\Pi} n_i^2 \bar{N}_A W_A}{\bar{L}_{\Pi} qS_{EA} \bar{D}_A n_i^2} \left(\frac{\bar{1}}{N_{\Pi}} \right) = \frac{S_{E\Pi} \bar{D}_{\Pi} W_A}{S_{EA} \bar{D}_A \bar{L}_{\Pi}} \bar{N}_A \left(\frac{\bar{1}}{N_{\Pi}} \right). \quad (20)$$

Оскільки $\bar{L}_{\Pi} = \sqrt{\bar{D}_{\Pi} + \bar{\tau}_{\Pi}}$, то з врахуванням (11) запишемо залежність $R_{\Pi}(\Phi)$ в вигляді:

$$R_{\Pi}(\Phi) = R_{\Pi 0} \sqrt{1 + k_{\tau\Pi} \bar{\tau}_{\Pi 0} \Phi}. \quad (21)$$

де $k_{\tau\Pi}$ – коефіцієнт радіаційної зміни часу життя в пасивній базі.

Висновок

Аналітичним шляхом досліджено вплив радіаційного випромінювання на роботу напівпровідникових приладів, зокрема, на величину радіаційних втрат в базі біполярного транзистора. Окремо проаналізовано вплив випромінювання на радіаційні втрати в активній і пасивній базі транзистора. Показано, що основним джерелом радіаційних втрат в активній базі є збільшення часу життя τ нерівноважених носіїв заряду. В той же час, радіаційні втрати в пасивній базі транзистора, в основному, теж пов'язані зі зміною часу життя носіїв заряду в пасивній базі, але цей вплив не такий значний як в активній.

Література

1. Брудный В. Н. Влияние облучения электронами на электрические свойства арсенида галлия / В. Н. Брудный, С. В. Малянов, М. А. Кривов // Изв. Вузов. Физика. – 1966. – С. 132–134.
2. Брудный В. Н. Электрические и рекомбинационные свойства $Cd_xHg_{1-x}Te$, облученого электронами / В.Н. Брудный, А. В. Войцеховский, М.А. Кривов // ФТП. – 1977. – С. 1540–1544.
3. Кононов Б. А. Радиационная физика неметаллических кристаллов : т.3, ч.2 / Б. А. Кононов, В. К. Струц. – К. : Наукова думка, 1971. – С. 154.
4. Кумахов М. А. Множественные процессы в теории взаимодействия ядерных частиц с кристаллами : дис. ... канд. физ.-мат. наук / М. А. Кумахов / НИИЯФ, МГУ. – 1969.
5. Винецкий В. Л. Радиационная физика полупроводников / В. Л. Винецкий, Г. А. Холодарь. – К. : Наукова думка, 1976. – С. 336.
6. Хіврич В.І. Ефекти компенсації в напівпровідниках та сенсори радіації на цій основі : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук / В.І. Хіврич. – Одеса : ОНУМ, –2006. – 25 с.
7. Будяшкіна С. В. Радиационные эквиваленты при действии ядерных излучений на материалы электроники. / С. В. Будяшкіна, В. И. Звягин, В. М. Ленченко// Физическая химия в микроэлектронике. – Красноярск, 1976, – С. 3–21.
8. Губская В. И. Особенности радиационного дефектообразования в кремнии при альфа-облучении. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиац. повреждений и радиац. Материаловедение / В. И. Губская, П. В. Кучинский, В. М. Ломако, А.П. Петрунин. – М., 1981. – С. 8.

9. Аброян И.А. Распределение дефектов по глубине при облучении кремния легкими ионами / И.А. Аброян, А.И. Титов // Ионная имплантация. Второй Советско-Американский семинар. – Новосибирск, 1979. – С. 335–350.
10. Ходжаев Т. А. Исследование кинетики накопления радиационных дефектов / Т. А. Ходжаев, О. В. Гафуров, К. Д. Джанобилов // Физика конденсированных средств : материалы научной конференции, посвященной памяти д.т.н. проф. Гафурова О. В. – Душанбе, 1999. – С. 53–55.
11. Ходжаев Т. А. Исследование кинетики введения дефектов Si n- и р- типа / Т. А. Ходжаев, О. В. Гафуров, Ю. М. Прохоцкий // Межд. науч. тех. конф. «Физико-химическая исследования полупроводниковых диэлектрических и композиционных материалов». – Куляб, 2001. – С. 3.
12. Ходжаев Т. А. Образование радиационных дефектов в облученном Р-кремнии / Т. А. Ходжаев, О. В. Гафуров, Ю. М. Прохоцкий // Межд. науч. тех. конф. «Физико-химическая исследования полупроводниковых диэлектрических и композиционных материалов». – Куляб, 2001. – Куляб, – 2001. – С. 5.
13. Ходжаев Т. А. Природа образования радиационных дефектов в облученном р- кремнии / Т. А. Ходжаев, О. В. Гафуров, Ю. М. Прохоцкий // Материалы межд. конф. «Современные проблемы физико-механических свойств конденсированных сред». – Худжанд, 2002. – С. 112–114.
14. . Першенков В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных схем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М. : Энергоатомиздат, Москва, 1986, – С. 256.
15. Лубченко А. Ф. Физические основы радиационной технологии твердотельных электронных приборов / А. Ф. Лубченко, В. А. Гирий, В. М. Кулаков. – К. : Наукова Думка, 1976. – С. 200.
16. Брудный В.Н. Радиационные дефекты в арсениде галлия (обзор) / В.Н. Брудный, М.А. Кривов // Изв. Вузов. Физика. – 1980. – С. 64–75.
17. Кравченко Ю.С. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Твердотільна електроніка» щодо розрахунків транзисторів і транзисторних структур для студентів напрямів “Мікро- та наноелектроніка” і “Електронні пристрої та системи” : навчальний посібник / Ю.С. Кравченко, С.Ю. Кравченко. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – С. 60.
18. Вологдин Е.Н. Радиационная стойкость биполярных транзисторов : навчальний посібник / Е.Н. Вологдин, А. П. Лисенко. – М. : НОЦ, 1999. – С. 101.
19. Холодарь Г. А. Непрямая рекомбинация вакансий и междоузельных атомов в облученном кремнии / Г. А. Холодарь, Ю. В. Данковский, В. В. Конопляных. – Винецкий В ФТП, 1976. – С. 1712 –1718.

References

1. Brudnyy V. N. Vplyv olucheny elektronamy na elektrychni vlastyivosti arsenidu haliyu / V. N Brudnyy, S. V. Malyanov , M. A. Kryvov – Yzv. Vuziv. Fyzyka. – 1966 – P. 132–134.
2. Brudnyy V. N., Elektrychni ta rekombinatsyionnye vlastyivosti CdxHgl – XTE , oprominennya elektronamy / V. N Brudnyy, A. V. Voytsekhovskyy , M. A. Kryvov ta in . – FTP. 1977. T. 11. Vyp. 8. – P. 1540–1544.
3. Kononov B. A. Radiatsiyana fizyka nemetalichnykh krystaliv. t.z , ch.2 / B. A. Kononov, V. K. Struts , – Kyiv, Naukova dumka, – 1971. – P. 154.
4. Kumiv M. A. Mnozhynni protsesy v teoriiyi vzyayemodiyi yadernykh chastok z krystalamy. / M. A. Kumiv – Dyss. kand. fiz.mat . nauk, NDIYAF , MHU, – 1969
5. Vynetskaya V. L. Radiatsiyana fizyka napivprovodnykh / V. L. Vynetskaya , H. A Kholodar – Naukova dumka . – 1976, – P. 336.
6. Khivrych V.I. Efekty kompensatsiyi u napivprovodnykh ta sensoriv radiatsiyi na Tsiy Osнови : avtoreferat dysertatsiyi na zdobuttya naukovooho stupeniv doktora fizyko–matematychnykh nauk / V.I. Khivrych – Odesa : Onuma , – 2006. – P. 25.
7. Budyashkina S. V. Radiatsiyani ekvivalenty pry diyi yadernykh vyprominyuvan na materialy elektroniky. V kn . : Fyzichna khimiya v mikroelektronitsi / S. V. Budyashkina , V. I. Zvyahin , V. M. Lenchenko , – Krasnoyarsk , – 1976, – P. 3–21.
8. Hubska V. I. Osoblyvosti radiatsiyonno defektoutvorennya v kremniyi pry alfa– oprominenni . Pytannya atomnoyi nauky i tekhniki, ser. : Fyzyka radyats . poshkodzen i radyats . Materialoznavstvo / V. I. Hubska , P. V. Kuchynskyy, V. M. Lomako , A.P. Petrunyn . – 1981, – P. 8.
9. Abroyan I.A. Rozpodil defektiv po hlybini pry oprominenni kremniyu lehkyymi ionamy . V kn . : Ionna implantatsiya . Druhyy Radyansko – Amerykanskyy seminar . / I.A. Abroyan , A.I Tytov – Novosybirsk, – 1979, – P.335–350.
10. Khodzhaev T. A. Doslidzhennya kinetyky nakopychennya radiatsiynykh defektiv. Materialy naukovoyi konferentsiyi / T. A. Khodzhaev , O. V. Hafurov , K. D. Dzhano bilov – «Fyzyka kondensovanykh zasobiv» svyashchennoyi pam'iyati d.t.n. prof. Hafurova V. Dushanbe , – 1999, – P. 53–55.
11. Khodzhaev T. A. Doslidzhennya kinetyky vvodennya defektiv Si n– i r– typu. Mezhd. nauch. tekhn. konf. «Fyziko – khimichna doslidzhennya napivprovodnykovykh dielektrychnykh i kompozytsiynykh materialiv». / T. A. Khodzhaev , O. V. Hafurov , YU. M. Prokhotskiy . – Kulyab , – 2001. – P. 3.
12. Khodzhaev T. A. Osvita radiatsiynykh defektiv v oprominenomu R– kremniyi . Mezhd. nauch. tekhn. konf. «Fyziko – khimichna doslidzhennya napivprovodnykovykh , dielektrychnykh i kompozytsiynykh materialiv». / T. A. Khodzhaev , O. V. Hafurov , YU. M. Prokhotskiy . – Kulyab , – 2001. – P.5.
13. Khodzhaev T. A. Pryroda osvity radiatsiynykh defektiv v oprominenomu r– kremniyi . Materialy mezhd. konf. «Suchasni problemy fizyko–mekhanichnykh vlastyivostey kondensovanykh seredovysykh » . / T. A. Khodzhaev , O. V. Hafurov , YU. M. Prokhotskiy . – Khudzhand – 2002. – P. 112–114.
14. . Pershenkov V. S. Poverkhnevi radiatsiyani efekty v elementakh intehrallynykh skhem. / V.S. Pershenkov, V.D. Popov, A.V. Shalnov. – M. : Vyshcha shkola, – 1986, – P. 256.
15. Lubchenko A. F. Fyzichni osnovy radiatsiynoyi tekhnolohiyi tvordotilnykh elektronnykh pryladiv. / A.F. Lubchenko , V.A. Hiriy, V. M. Kulakov. ta in – Kyiv : Naukova Dumka , – 1976. – P. 200.
16. Brudnyy V.N. Radiatsiyani defekty v arsenidi Haliya (ohlyad) / V.M. Brudnyy, M.A. Kryvov – Yzv. Vuziv. Fyzyka. – 1980. – P. 64–75.
17. Osadchuk V.S., Osadchuk V.O. Tranzystory . – Vinnytsya , VDTU, – 2003.
18. Volohdin E.N. Radiatsiyana stiykist bipolyarnykh tranzystoriv : navchalnyy posibnyk / O.M. Volohdin , A. P. Lysenko – Moskva: NOTS , –1999. – P. 101
19. . Kholodar H. A. Nepryama rekombinatsiya vakansiy i mezhdouzelynykh atomiv v oprominenomu kremniyi . / H. A. Kholodar , YU. V. Dankovskyy , V. V. Konoplyanykh , – Vynetskaya U FTP , – 1976, – P. 1712 –1718.