

УДК 621.382

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КРЕМНІЄВИХ P-I-N ФОТОДІОДІВ (За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)

*В. Л. Перевертайло¹, В. М. Попов²,
О. П. Поканевич², Л. І. Тарасенко¹*

Державне підприємство “Науково-дослідний інститут мікроприладів “НТК”
Інститут монокристалів” НАН України, вул. Північно-Сирецька, 3, 04136, м.Київ, Україна,
¹ detector @ carrier. kiev.ua , ² popovmc@i.kiev.ua

Анотація

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КРЕМНІЄВИХ P-I-N ФОТОДІОДІВ

В. Л. Перевертайло, В. М. Попов, О. П. Поканевич, Л. І. Тарасенко

Досліджено електрофізичні параметри тестових структур на високоомному кремнії, які сформовані в процесі виготовлення p-i-n фотодіодів. З допомогою тестових МДН структур спеціальної конструкції визначено практично важливі характеристики систем Si-SiO₂ та Si-SiO₂-Si₃N₄, які характеризують якість кремнію та міжфазової границі розділу діелектрик — напівпровідник: швидкість поверхневої генерації S_g, об’ємний генераційний час життя неосновних носіїв заряду у кремнії τ_g, а також значення фіксованого заряду Q_{ss} та рухомого заряду у діелектрику Q_i. Встановлено вплив типу діелектрика на величину S_g та напруги на діелектрику на швидкість генерації неосновних носіїв заряду у МДН структурах. Виявлено взаємозв’язок величин рухомого заряду з рівнем зворотніх струмів діодів.

Показано високу інформативність застосованих конструкцій тестових МДН структур і використаної методології контролю якості технології при розробці та виготовленні p-i-n фотодіодів.

Ключові слова: p-i-n фотодіоди, високоомний кремній, МДН структури, керований діод.

Abstract

INVESTIGATION OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF SILICON P-I-N PHOTODIODES

V. L. Perevertaylo, V. M. Popov, O. P. Pockanevich, L. I. Tarasenko

Electrophysical parameters of test structures formed on high-resistivity silicon during manufacturing of p-i-n photodiodes have been investigated. Using specially constructed MIS test structures the following important electrophysical parameters of Si-SiO₂ and Si-SiO₂-Si₃N₄ systems characterizing the quality of silicon and semiconductor-insulator interface have been analyzed: surface generation velocity S_g, bulk generation life-time of minority carriers τ_g, fixed charge Q_{ss} and mobile charge Q_i in dielectric. The influence of different types of insulators on S_g values and effect of voltage applied to the insulator on minority carrier generation velocity in MIS structures were found. The correlation between Q_i and reverse currents in p-i-n photodiodes was revealed. High effectiveness of used test structures and proposed methodology for quality control of technological processes in p-i-n photodiodes processing have been established

Key words: p-i-n photodiodes, high-resistivity silicon, MIS structures, gated diode.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ P-I-N ФОТОДИОДОВ

В. Л. Перевертайло, В. М. Попов, А. П. Поканевич, Л. И. Тарасенко

Исследованы электрофизические параметры тестовых структур на высокоомном кремнии, сформированных в процессе изготовления p-i-n фотодиодов. С помощью тестовых МДП структур специальной конструкции исследованы практически важные характеристики систем Si-SiO₂ и Si-SiO₂-Si₃N₄, отражающие качество кремния и межфазной границы раздела диэлектрик-полупроводник: скорость поверхностной генерации S_g, объёмное генерационное время жизни неосновных носителей заряда в кремнии τ_g, а также значения фиксированного Q_{ss} и подвижного заряда в диэлектрике Q_i. Установлено влияние типа диэлектрика на величину S_g, а также напряжения на диэлектрике на скорость генерации неосновных носителей заряда в МДП структурах. Обнаружено взаимосвязь между величиной подвижного заряда с уровнем обратных токов диодов.

Показана высокая информативность применяемых конструкций тестовых МДП структур и используемой методологии контроля качества технологии при разработке и изготовлении p-i-n фотодиодов.

Ключевые слова: p-i-n фотодиоды, высокоомный кремний, МДП структуры, управляемый диод.

1. Вступ

Однією з актуальних задач у радіаційному, ядерно-фізичному та аналітичному приладобудуванні є створення кремнієвих p-i-n фотоприймачів для сцинтиляторних блоків детектування, що використовуються в дозиметрії та спектрометрії гамма- і рентгенівських випромінювань [1,2].

Для реєстрації гамма- і рентгенівських ви-

промінювань звичайно широко застосовуються детектори типу сцинтилятор — фотоелектронний помножувач. Останнім часом роблять спроби замінити фотопомножувачі кремнієвими фотоприймачами, Рис.1. Перевагою детекторів на основі пари сцинтилятор-фотодіод є можливість мініатюризації приймально-детектуючих каналів приладів, низька напруга живлення, мала споживна потужність та ін.

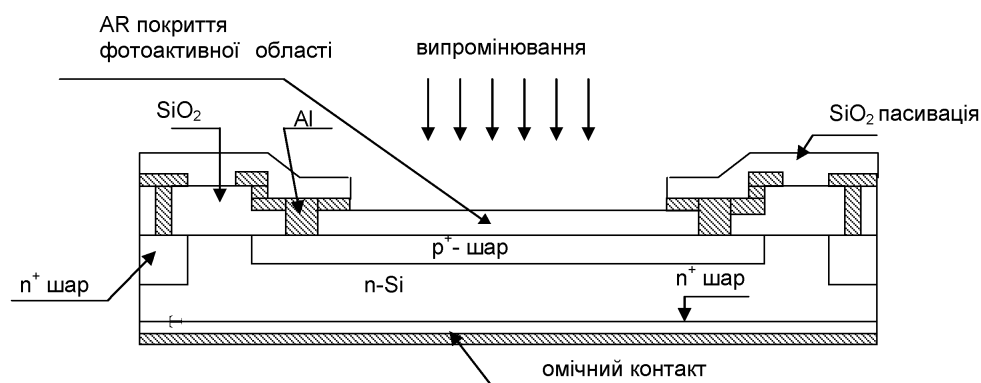


Рис. 1. Схематичне зображення кремнієвого p-i-n фотоприймача.

Але створення подібних фотоприймачів нашоветується на значні проблеми, які пов'язані з необхідністю забезпечення малих зворотних струмів p-n переходів ($< 3-5 \text{ нА/см}^2$ при $U_{p-n} = 50 \text{ В}$) та їх малих ємностей ($30-50 \text{ пФ/см}^2$ при $U_{p-n} = 50 \text{ В}$). Це пов'язано з необхідністю зменшення шумів фотодіода при реєстрації дуже слабких спалахів

світла, що виникають при поглинанні γ - і рентгенівського випромінювання в матеріалі сцинтилятора. Ці фотоприймачі повинні мати високу чутливість на довжині хвилі випромінювання сцинтилятора, що потребує мати максимум спектральної чутливості фотоприймача якнайближче до спектру випромінювання сцинтилятора.

Крім того, фотоприймач повинен мати велику площу (від одного до декількох квадратних сантиметрів), що ставить надзвичайно високі вимоги до дефектності вихідного матеріалу і технологічних процесів виготовлення подібних приймачів [2].

Ясно, що при виготовленні таких фотоприймачів необхідно мати надчистий вихідний кремній, чисті технологічні процеси, відповідні конструктивно-технологічні рішення та застосувати інформативні методи та засоби контролю технологічних параметрів фотодіодів.

Таким чином, створення р-і-n фотодіодів з потрібними робочими характеристиками потребує застосування комплексу методів аналізу найбільш важливих електрофізичних параметрів технологічних структур, які мають безпосередній вплив на властивості приладів. З цією метою розроблено спеціальні тестові структури і проведені комплексні дослідження електрофізичних властивостей систем діелектрик — напівпровідник в процесі виготовлення р-і-n фотодіодів.

2. Експериментальна частина

Як уже було сказано вище, однією з найбільш важливих проблем при виготовленні фотодіодів є забезпечення величини їх зворотних темнових струмів на рівні декількох наноампер на сантиметр квадратний поверхні. Ясно, що зворотні струми зумовлені генераційно-рекомбінаційними процесами в областях просторового збіднення (ОПЗ) діодів, які є як в об'ємі кремнії, так і на його поверхні, тому генераційно-рекомбінаційні процеси в ОПЗ та поблизу її потребують першочергового вивчення. Найбільш поширеним методом вимірювання складових поверхневої та об'ємної генерації з можливістю їх розділення є використання так званого МДН керованого діоду (КД), який являє собою р-n перехід, що прилягає до МДН структури. Ця структура дає можливість спостерігати за темпом генерації на поверхні при прикладенні невеликої збіднюючої напруги на електрод МДН структури, або спостерігати за темпом генерації в об'ємі матеріалу та на периферії структури при прикладенні інвертуючої напруги на електрод. В останньому випадку бажано розділяти генерацію в об'ємі і в периферійних областях структури, тому нами були розроблені і використані спеціальні тестові

структури, які дозволяють відділити генераційну складову об'єму від генерації в периферійних областях, про що детально сказано нижче.

Іншим визначальним фактором, що впливає на генераційно-рекомбінаційні процеси та на їх стабільність в часі є рухомий заряд (рухомі іони), що переміщується в діелектрику та на поверхні розділу Si-SiO₂ при прикладенні напруги до структури і при цьому змінює розподіл полів в ОПЗ та поблизу неї і, відповідно, характер генерації-рекомбінації.

При значних забрудненнях рухомими іонами величина рухомого заряду може бути такою, що радикально змінює генераційно-рекомбінаційні параметри в активних областях приладів і робить їх непридатними для використання. Тому нами приділена значна увага вимірюванням рухомого заряду, про що також йдеться нижче.

2.1. Методика вимірювання генераційних параметрів р-і-n фотодіодів

Тестові структури являли собою МДН керовані діоди та МДН конденсатори, сформовані в процесі виготовлення р-і-n фотодіодів. Товщина підзатворного діелектрика у МДН КД (в тому числі в конденсаторах) становила 4000-5000 Å. Площа квадратних електродів дорівнювала 4 мм². Ефективна концентрація легуючої домішки у високоомному кремнії була на рівні $(3-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

МДН КД мали дві різні конструкції. В першій конструкції р-n перехід, що є стоком неосновних носіїв в нерівноважних стаціонарних умовах, мав малу площу (20x70 мкм) і незначно (20x50 мкм) перекривався керуючим електродом. В другій — р-n перехід являв собою розгалужену структуру: 20 довгих (близько 2000 мкм) та вузьких (шириною 10 мкм) паралельних один одному р-n переходів, рівномірно розташованих під всією площею електроду.

Дві конструкції МДН КД були вибрані з метою більш точного визначення поверхневої і об'ємної складових генераційного струму у р-і-n діодах, тобто для більш коректного визначення швидкості поверхневої генерації S_g та часу життя неосновних носіїв заряду у кремнії τ_g . В першій конструкції ("точковий" р-n перехід стоку) вплив р-n переходу внаслідок його малої площі на вимірювання τ_g мінімізовано. В другій конструкції (розгалужений р-n перехід стоку),

навпаки, створені умови для найбільш точного вимірювання швидкості поверхневої генерації S_g , так як поверхнева складова генераційного струму при вимірюванні з допомогою МДН КД залежить від відстані між областю генерації і р-п переходом, який слугує стоком для неосновних носіїв. Тому у МДН КД з розгалуженим р-п переходом практично всі генеровані носії заряду поступають в ланцюг стоку, де проходить вимірювання відповідного струму, який дозволяє розрахувати значення S_g .

На зворотній стороні пластин для створення омичного контакту до підкладки досліджуваних зразків було сформовано n^+ — шар і нанесено алюміній.

Дослідження проводились на двох партіях пластин, які відрізнялись технологією виготовлення діелектрика під керуючим електродом: в першому випадку застосовувався одношаровий діелектрик (SiO_2), у другому — двошаровий (SiO_2 - Si_3N_4).

Визначення S_g проводилось за методикою Фітцджеральда і Гроува [4,5] на основі аналізу залежностей стаціонарних струмів генерації неосновних носіїв заряду у підзатворній області МДН КД від напруги на керуючому електроді. Вимірювання виконані з допомогою цифрового аналізатора ВАХ 4145А (США) та аналітичної зондової станції ММ7000 (США).

Дослідження τ_g проводилось на основі аналізу залежностей нестационарної ВЧ ємності МДН структур від часу згідно методу Цербста [6]. Метод високочастотних вольт-фарадних характеристик (ВЧ ВФХ) застосовувався для розрахунків величин фіксованого заряду в діелектрику Q_{ss} МДН структур. Вимірювання ВЧ ємностей МДН структур проведено на установці дослідження електрофізичних параметрів напівпровідникових структур НР 4061А (США).

2.2. Вимірювання рухомого заряду у діелектрику.

Вимірювання рухомого (іонного) заряду у діелектрику проводилось на основі метода динамічних вольтамперних характеристик (ДВАХ) при температурі $T=250^\circ\text{C}$. В основі методу є реєстрація з допомогою електрометра надмалих ємнісних струмів у МДН структурі в процесі повільного (0,01 — 0,1 В/с) прикладання лінійно зростаючої напруги (ЛЗН) [3]. При напругах поблизу нуля при зміні знаку ЛЗН

спостерігається поява сплеску іонного струму, інтегрування якого дає величину рухомого заряду Q_i , Рис. 2. Перевагою методу є можливість прямого визначення повної величини рухомого заряду, обумовленого, як правило, лужними металами у діелектрику.

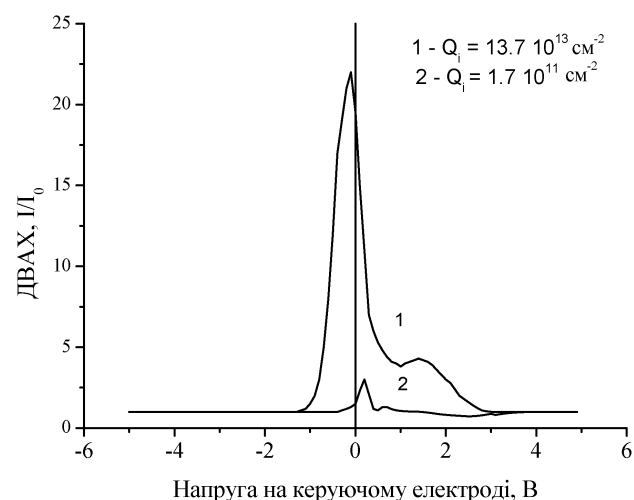


Рис. 2. Реєстрація рухомого (іонного) заряду в окисі МДН структур з високою (1) та низькою (2) концентраціями іонів лужних металів. Метод ДВАХ. $T=250^\circ\text{C}$.

3. Результати досліджень і обговорення

Типові генераційні струми з явно вираженою поверхневою складовою у МДН КД з розгалуженим р-п переходом приведені на Рис. 3. Величини S_g у структурах з SiO_2 в якості підзатворного діелектрика склали у середньому 1,4 см/с. У випадку застосування двошарового діелектрика (SiO_2 — Si_3N_4) середні величини S_g дорівнювали 3,7 см/с. Названі величини є достатньо низькими і вказують на малу концентрацію активних поверхневих станів на границі розділу Si — SiO_2 . Цей факт вказує на незначний вклад поверхневої складової в зворотній струм р-і-n фотодіодів.

Результати розрахунків τ_g показали, що значення даного параметру знаходяться в діапазоні $(1,9 — 6,0) \cdot 10^{-3}\text{с}$, але більш високі величини τ_g у вказаному діапазоні властиві структурам з одинарною плівкою SiO_2 в якості діелектрика під керуючим електродом у порівнянні з подвійним діелектриком $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$. Визначені величини τ_g достатньо високі, що свідчить про хорошу якість кремнію поблизу границі розділу Si — SiO_2 .

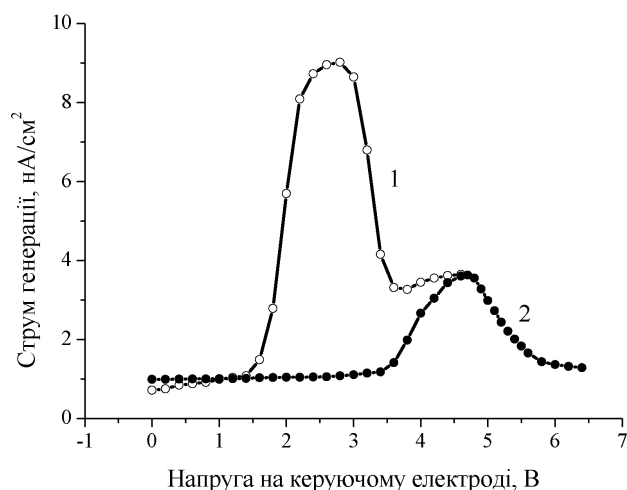


Рис. 3. Залежність генераційного струму в МДН керованих діодах з двошаровим (1) і одношаровим (2) діелектриком від напруги на керуючому електроді. Зворотне зміщення на р-п переході стоку — 1В.

В той же час детальний аналіз динамічних залежностей ємності $C = f(t)$ і графіків Цербста показав, що у ряді випадків у системах Si — SiO₂ має місце немонотонна залежність швидкості об'ємної генерації неосновних носіїв заряду у кремнії від ширини області просторового заряду у кремнії. На початковій стадії релаксація носить повільний характер, а в кінці процесу прискорюється. Така поведінка свідчить про наявність двох складових процесу генерації — повільної та швидкої. Швидка генерація, скоріше за все, пов'язана із збільшенням напруги на окислі в кінці процесу релаксації і може бути обумовлена наявністю особливих центрів генерації безпосередньо в області границі розділу Si—SiO₂. Початкова стадія релаксації в більшій мірі визначається властивостями кремнію. Дані саме цієї стадії процесу релаксації були використані для розрахунків величин τ_{go} . Оцінка показує, що дані значення об'ємного генераційного часу життя неосновних носіїв заряду характеризує шар кремнію товщиною до 50 мкм. Величини Q_{ss} були у межах $2,5 \cdot 10^{10} - 1,4 \cdot 10^{11}$ см⁻². Значення фіксованого заряду у діелектрику визначаються вихідним кремнієм та технологією формування діелектрика.

Розглянемо більш детально дані описаних вище вимірювань на ряді технологічних партій виготовлення р-і-п фотодіодів, які приведені у таблиці.

У якості інтегральної характеристики швидкості протікання генераційних процесів у МДН структурі приймався загальний час релаксації T_p , який включає в себе як об'ємну, так і поверхневу складові генерації неосновних носіїв заряду.

Із таблиці випливає, що у структурах з високим T_p (більше 10 с), тобто з якісним приповерхневим кремнієм і впорядкованою границею розділу, в середньому спостерігається більш низький рівень Q_i (менш ніж $1 \cdot 10^{11}$ см⁻²). Це свідчить в цілому про більш високу чистоту технологічної системи Si — SiO₂. При T_p менше 10 с величини Q_i перевищують $1 \cdot 10^{11}$ см⁻². Тобто, підвищений вміст іонів Na, K, Ca в окислі кремнію, з якими пов'язують наявність рухомого заряду, корелює з більш високою швидкістю генерації у МДН структурі, що може бути обумовлено наявністю на поверхні кремнію різних неконтрольованих домішок (наприклад, металів), що створюють додаткові центри генерації неосновних носіїв заряду.

Ці дані підтверджують результати вимірювань Q_i у партії приладів з високими зворотними струмами. У всіх випадках рухомий заряд у діелектрику був підвищений (більше $1 \cdot 10^{11}$ см⁻²). Це свідчить про забруднення окислу кремнію позитивними іонами лужних металів. Відомо, що присутність цих іонів у окислі кремнію в областях виходів р-п переходів на поверхню кремнію супроводжується збагаченням основними носіями заряду n-типу кремнію і відповідним зменшенням ширини області просторового заряду. У результаті локально зростає електричне поле р-п переходу і збільшується величина зворотнього струму. Тобто маємо прямий вплив чистоти технологічної структури на параметри приладів.

4. Висновки

Досліджено електрофізичні характеристики тестових структур на високоомному кремнії, виготовлених при формуванні р-і-п фотодіодів. Визначені величини генераційних параметрів кремнію і границі розділу Si — SiO₂. Величини об'ємного генераційного часу життя неосновних носіїв знаходяться у межах $(0,1 - 4,0) \cdot 10^{-3}$ с і свідчать про достатню якість приповерхневого шару кремнію. Швидкість поверхневої генерації заряду для структур з одношаровим (SiO₂) і двошаровим (SiO₂ — Si₃N₄) діелектриком у середньому відповідно складає 1,4 і 3,7 см/с. Загальний діапазон змін швидкості поверхневої генерації у досліджених структурах у залежності від технології їх формування знаходиться у межах 0,6 — 10,3 см/с. Визначено фіксований заряд у окислі МДН структур, значення якого лежать у діапазоні $(0,2-2,2) \cdot 10^{11}$ см⁻². Показана

висока інформативність застосованих конструкцій тестових МДН структур для аналізу генераційних параметрів систем діелектрик — напівпровідник у р-і-п фотодіодах. Встановлена наявність взаємозв'язку між зворотніми струмами р-і-п фотодіодів і рівнями рухомого іонного заряду Q_i у окисі, які відображають ступінь забруднення окисі і поверхні кремнію неконт-

рольованими домішками. Показана інформативність аналізу Q_i при контролі якості матеріалів і технології виготовлення р-і-п фотодіодів.

Розроблена методологія контролю технології виготовлення кремнієвих р-і-п фотодіодів, основою якої є комплексний аналіз електрофізичних параметрів систем діелектрик — напівпровідник з допомогою спеціальних тестових структур.

Таблиця

Параметри тестових МДН структур для різних технологічних партій р-і-п фотодіодів

№ партії (№ пластины)	Швидкість поверхневої генерації S_g , см/с	Фіксований заряд в окислі кремнію (SiO_2) Q_{ss} , см ⁻²		Загальний час релаксації МДН стру- ктури T_p , с		Об'ємний генера- ційний час життя не- основних носіїв τ_g , мс		Рухомий (іонний) заряд в окислі, Q_i , см ⁻²
		МДН керован- ний діод	МДН конден- сатор	МДН керован- ний діод	МДН конден- сатор	МДН керован- ний діод	МДН конден- сатор	МДН конден- сатор
4742 (09-1.1)	5,24	$5,1 \cdot 10^{10}$	$5,2 \cdot 10^{10}$	6	5	0,81	0,69	$8,0 \cdot 10^{10}$
4742 (09-1.2)	8,3	$4,5 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	4	4	0,51	0,51	$1,07 \cdot 10^{11}$
4742 (09-2.1)	8,43	$4,7 \cdot 10^{10}$	$4,8 \cdot 10^{10}$	6	5	0,76	0,68	$1,33 \cdot 10^{11}$
4742 (09-2.2)	6,74	$4,6 \cdot 10^{10}$	$4,9 \cdot 10^{10}$	5	5	0,68	0,68	$1,05 \cdot 10^{11}$
4700 (1)	0,62	$1,8 \cdot 10^{11}$	-	14	-	0,35	-	-
4785 (1)	1,26	$2,2 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^{10}$	17	15	0,52	0,38	$7,8 \cdot 10^9$
4785 (2)	-	$3,3 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^{10}$	12	11	0,31	0,3	$6,5 \cdot 10^9$
4785 (3)	10,3	$8,3 \cdot 10^{10}$	$8,2 \cdot 10^{10}$	14	11	0,35	0,3	$7,6 \cdot 10^9$
4785 (4)	10,1	$8,8 \cdot 10^{10}$	$8,5 \cdot 10^{10}$	4	4	0,11	0,11	$4,2 \cdot 10^9$
4804 (7)	1,46	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,2 \cdot 10^{11}$	17	18	0,54	0,56	$3,2 \cdot 10^{10}$
4804 (11)	1,18	$2,2 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	35	24	1,0	1,4	$3,0 \cdot 10^{10}$

Література

- Атрощенко Л.В., Бурачас С.Ф., Гальчинецький Л.П., Гринев Б.В., Рыжиков В.Д., Старжинский Н.Г., Кристаллы сцинтилляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе. Под общей редакцией В.Д. Рыжикова, К.: Наукова Думка, 1998. — 311с.
- Перевертайло В.Л. Создание элементной базы для ядерно-физического и радиационного приборостроения на основе кремниевой интегральной технологии. Труды Пятой международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии”, Одесса, 17-21 мая 2004 г. — С.200.
- E.I.Goldman, A.G.Zhdan, G.V.Chucheva. Ion transport phenomena in oxide layer on the silicon surface and electron-ion exchange effects at the SiO_2/Si interface // J.Appl. Physics. — 2001. — №1. — P.130-145.
- Fitzgerald D.J. Grove A.S. Surface recombination in Semiconductors // Surf. Science. — 1968. — №2. — P.347-362.
- Grove A.S., Fitzgerald D.J. Surface effects on p-n junctions: characteristics of surface space charge regions under non-equilibrium conditions // Sol. — St. Electr. — 1966. — №8. — P.783-806.
- Zerbst M.Z. Relaxation Effekte an Halbleiter-Isolator-Grenzflächen // Angew. Phys. — 1966. — №1. — P.3039 — 3046.