

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ДЕТЕКТОРНЫЕ CdTe-СТРУКТУРЫ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

Ш.А. Мирсагатов, А.С. Ачилов, Б.Н. Заверюхин

*Физико-технический институт, Научно-производственное объединение
“Физика-Солнце” Академии наук Узбекистана (Ташкент)*

Узбекистан

Поступила в редакцию 25.04.2013

Для детекторов короткопробежных частиц созданы пленочные CdTe-детекторные структуры с барьером Шоттки. Структуры изготовлены на основе крупноблочных *p*-CdTe пленок с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^7$ Ом·см. Кристаллиты пленок расположены ортогонально к плоскости Mo-подложки, на которой они сформированы. Исследованы вольт-фарадные, вольтамперные и шумовые характеристики структур. Структуры регистрировали α -частицы с энергией 5.482 МэВ от источника Am²⁴¹. Энергетическое разрешение *R*-структур составляет величину $22 \div 29$ кэВ при напряжениях смещения $V = 5 - 8$ В и $T = 293$ К. При повышении величины V происходит инжекция неосновных носителей в базу структур. Установлено, что источником инжекции электронов в базу является Mo-контакт и соединение MoO₃ вблизи него.

Ключевые слова: полупроводник, пленка, ядерное излучение, детектор, барьер Шоттки, энергетическое разрешение.

ТОНКОПЛІВКОВІ ДЕТЕКТОРНІ CdTe-СТРУКТУРИ З БАР'ЄРОМ ШОТТКИ

Ш.А. Мірсагатов, А.С. Ачілов, Б.Н. Заверюхін

Для детекторів короткопробіжних частинок створені плівкові CdTe-детекторні структури з бар'єром Шоттки. Структури виготовлені на основі великоблочних *p*-CdTe плівок з питомим опором $\rho \sim 10^7$ Ом·см. Кристаліти плівок розташовані ортогонально до площини Mo-підкладки, на якій вони сформовані. Досліджені вольт-фарадні, вольтамперні та шумові характеристики структур. Структури реєстрували α -частинки з енергією 5.482 MeV від джерела Am²⁴¹. Енергетичний можливий розподіл *R*-структур становить величину $22 \div 29$ кеВ при напругах зсуву $V = 5 - 8$ В і $T = 293$ К. При підвищенні величини V відбувається інжекція неосновних носіїв у базу структур. Установлено, що джерелом інжекції електронів у базу є Mo-контакт і з'єднання MoO₃ поблизу нього.

Ключові слова: напівпровідник, плівка, ядерне випромінювання, детектор, бар'єр Шоттки, енергетичний дозвіл.

THIN FILM CdTe-STRUCTURES WITH BARRIER SCHOTTKY

Sh.A. Mirsagatov, A.S. Achilov, B.N. Zaveryukhin

At first for registration of nuclear radiation film CdTe-detector structures with Schottky barrier were created. The structures are made on the basis of large block-*p*-CdTe films with resistivity $\rho \sim 10^7$ Ом·см. Crystallites of the films are orthogonal to plane of Mo-substrate on which they are formed. The capacitance-voltage, current-voltage characteristics and an energy resolution of the structures were measured and transport mechanisms of current carriers were defined for different values of bias voltage. The structures registried α -particles with energy 5.482 MeV from source Am²⁴¹. Energy resolution *R* of the structures was $22 \div 29$ keV at $T = 293$ K. It is established that improving of the characteristics of the detector structures associated with removal processes of an electron injection in region of back Mo-contact. It was found that source of the electron injection at high bias voltages are Mo-contact and oxide MoO₃ between the film and the molybdenum contact.

Keywords: semiconductor, film, nuclear radiation, detector, barrier Schottky, energy resolution.

ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллы теллурида кадмия (CdTe) широко применяют для создания детекторов различных ядерных излучений. Большие атомные номера компонент этого материала

и его ширина запрещенной зоны обеспечивают более высокую эффективность регистрации ядерных излучений неохлаждаемыми CdTe-детекторами по сравнению с монокристаллическими Si и Ge-детекторами. Следует

упомануть, что также созданы и пленочные детекторы на основе GaAs и SiC [1, 2]. В последние годы на основе CdTe и $Cd_{1-x}Zn_xTe$ монокристаллов начали интенсивно создавать детекторы с барьером Шоттки. Существенным преимуществом таких детекторов являются малые темновые обратные токи ($\sim 10^{-7}$ А) и высокие рабочие температуры ($T \geq 300$ К). Кроме этого, такие детекторы с барьером Шоттки могут эффективно регистрировать электромагнитные кванты (гамма и рентгеновские) с энергиями до 1 МэВ и выше [3 – 6]. Известно, что монокристаллы соединений A^2B^6 , используемые для создания детекторов ядерных излучений, имеют недостатки. Основным недостатком A^2B^6 -монокристаллов является наличие в них значительного количества дефектов различной природы, которые понижают времена жизни носителей заряда и ухудшают характеристики детекторов [7]. Кроме этого, технология получения этих монокристаллов весьма сложная и имеет высокую стоимость. Негативное влияние дефектов можно существенно уменьшить, если в качестве базового материала использовать крупноблочные поликристаллические CdTe-пленки со столбчатой структурой зерен (кристаллиты). В этих пленках зерна охватывают всю их толщину. Положительным аргументом в пользу применения таких поликристаллических пленок для создания детекторов является то, что пленки в направлении своего роста обладают свойствами монокристаллов, а в горизонтальном направлении свойствами поликристаллов. Границы зерен служат стоками для дефектов различного рода, что приводит к увеличению времени жизни носителей заряда в кристаллитах [8]. С другой стороны эти границы могут шунтировать кристаллиты и быть основным источником токов утечек. Поэтому пассивация межкристаллитных границ имеет первостепенное значение для поликристаллических полупроводниковых материалов, используемых для создания твердотельных электронных приборов. В этом направлении нами разработана технология, которая позволяет выращивать крупноблочные поликристаллические CdTe-пленки с различными удельными сопротивлениями, толщинами и

значениями времени жизни $\tau \sim 10^{-7} - 10^{-6}$ с неосновных носителей заряда. В этих пленках кристаллиты ориентированы перпендикулярно к плоскости металлической подложки, на которой они сформированы.

Ранее нами были созданы пленочные CdTe-детекторы на основе металл-окисел-полупроводник-структура [9]. Эти детекторы показали довольно хорошие спектрометрические характеристики при регистрации низкоэнергетического рентгеновского излучения (X). Несмотря на достигнутые при этом технические успехи, особенности механизмов переноса носителей тока, определяющих спектрометрические и электрические характеристики пленочных CdTe-детекторов, остаются невыясненными. Механизмы переноса же носителей в детекторных структурах с барьером Шоттки на основе монокристаллического CdTe довольно хорошо изучены [10].

Целью настоящей работы является изготовление пленочных структур с барьером Шоттки на основе крупноблочных поликристаллических CdTe-пленок для создания на их основе детекторов короткопробежных ядерных частиц. Отметим также, в частности, что наличие барьера Шоттки позволяет исследовать и влияние приконтактных областей тылового контакта на характеристики CdTe-пленочных детекторных структур (ПДС).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Образцы. Для достижения поставленной цели была поставлена задача: а) изготовить пленочные детекторные структуры с барьером Шоттки, в которых кристаллиты (зерна) пленок располагаются перпендикулярно к поверхности тылового металлического контакта, б) исследовать электрофизические и спектрометрические характеристики ПДС при регистрации ими α -частиц с энергией ~ 5.5 МэВ. Пленочные CdTe-детекторные структуры создавались по следующей технологии: барьер Шоттки формировался путем напыления алюминия (толщиной $\sim 350 - 500$ Å) в вакууме ($P \sim 10^{-5}$ Торр) на поверхность крупноблочных CdTe-пленок p -типа, выращенных на молибденовой (Mo) подложке толщиной 300 микрон, так как между Mo и пленками

p-CdTe существует хорошая адгезия. Подложка также исполняла роль тылового электрического контакта. Выращенные кристаллиты пленок располагались перпендикулярно к поверхности Мо-подложки. Пленки имели столбчатую структуру зерен и в направлении роста представляли собой практически монокристалл с ориентацией (111). Размеры зерен в поперечнике составляли от 100 мкм до 150 мкм. Толщина *p*-CdTe-пленок составляла $L \approx 30 - 150$ мкм, так что зерна пронизывали всю толщину пленок, которые являлись компенсированным материалом. Схема структуры представлена на рис. 1. Известно, что одним из основных требований, предъявляемых к детекторным материалам, является их высокое удельное сопротивление и поэтому мы взяли для структур пленки с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^7$ Ом·см имевших времена жизни неосновных носителей $10^{-7} - 10^{-6}$ с. Площадь входного окна структуры с Al-контактом составляла ~ 0.07 см². Изготовлено и исследовано всего 25 структур, имевших схожие характеристики.

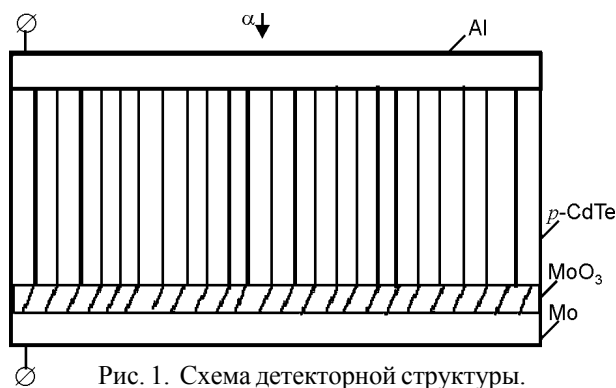


Рис. 1. Схема детекторной структуры.

В детекторных структурах между пленками *p*-CdTe и Мо-контактами существовал тонкий (~ 30 Å) слой MoO_3 . Этот слой формировался в процессе роста пленок *p*-CdTe на Мо-подложке для пассивации пленочных поверхностных состояний. Пассивация преследовала цель улучшения характеристик структур.

В связи с этим также возникла необходимость изучения влияния приконтактных областей с MoO_3 -слоями на характеристики CdTe-структур.

а) Спектрометрия α -частиц детекторными структурами. Пленочные детекторные структуры оказались способными регистрировать короткопробежные ядерные час-

тицы. Для регистрации частиц использовалась стандартная спектрометрическая линейка (зарядочувствительный предусилитель, основной усилитель, многоканальный амплитудный анализатор, прецизионный генератор импульсов). В этих детекторных структурах, находившихся в вакууме, неравновесные носители заряда генерировались α -частицами с энергией 5.482 МэВ от источника Am^{241} . Энергетическое разрешение R отдельных структур составляло величину $22 \div 29$ кэВ при оптимальных напряжениях смещения $V = 7 - 8$ В и температуре $T = 293$ К. Исследовалось также поведение емкости, тока и шума детекторных структур от обратного напряжения смещения $V_{\text{см}}$ (отрицательный потенциал прикладывался к Мо-подложке).

б) Анализ электрофизических и шумовых характеристик детекторных структур. Данный анализ позволяет выявить и понять механизмы переноса носителей тока оказывающих влияние на функциональные характеристики детекторов на основе ПДС.

Измеренная на частоте 100 кГц вольт-фарадная характеристика $C(V)$ детекторной Al-*p*-CdTe-Мо-структуры №12 представлена в традиционных координатах $1/C^2 = f(V_{\text{см}})$ (рис. 2). Возрастающий участок этой характеристики имеет излом и состоит из двух прямых линий 1 и 2, соответственно. Наличие прямых линий 1 и 2 свидетельствует о неоднородности приповерхностного *p*-CdTe-слоя.

Характеристика $C(V)$ выходит на плато при напряжениях смещения $V_{\text{см}} \sim 3$ В – 4В.

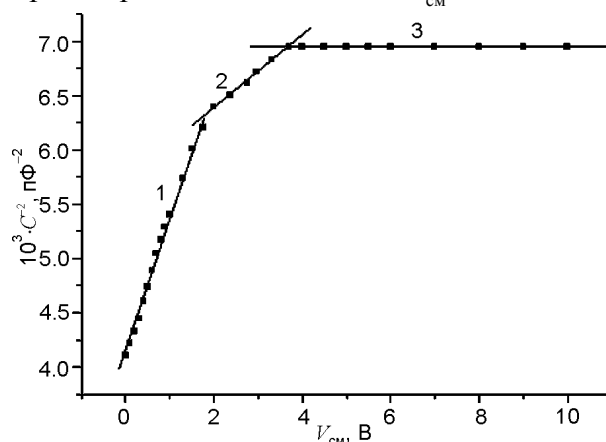


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика CdTe-детекторной структуры № 12 с барьером Шоттки в координатах $C^{-2}(V)$. Частота тестового сигнала $f = 100$ кГц. $T = 293$ К. Удельное сопротивление базы детекторной структуры $\rho \approx 10^7$ Ом·см.

Это означает, что объемный заряд при этих напряжениях уже полностью охватывает всю толщину базы Al-p-CdTe-Mo-структуры. На плато $C(V)$ -характеристики электрическая емкость структуры $C \approx 12.2$ пФ. Оценка толщины слоя объемного заряда “ d ” по известной формуле плоского конденсатора дает величину $d \sim 45.7$ мкм (при значениях: $\epsilon = 9$ [11], $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14}$ Ф·с⁻¹, ϵ , ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость полупроводника и вакуума, соответственно, при площади входного окна (фронтальный Al-контакт) детекторной структуры $S \approx 7 \cdot 10^{-2}$ см²), что практически соответствует толщине p-CdTe-пленки $L = 46$ мкм.

В этой структуре при $V_{см} = 0$ электрическая емкость $C = 16.8$ пФ, а толщина слоя объемного заряда составляет $d \sim 33$ мкм. В таком слое объемного заряда полностью укладывается пробег R α -частиц с энергией 5.482 МэВ в CdTe равный порядка 25 мкм.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) пленочной CdTe-детекторной структуры с барьером Шоттки описывается выражением для тока $I = V^\alpha$ (A^* и α безразмерные коэффициенты) и состоит из четырех участков (рис. 3): 1. $I = AV^{\alpha_1}$, $\alpha_1 \approx 0.55$; 2. $I = AV^{\alpha_2}$, $\alpha_2 \approx 1$; 3. $I = AV^{\alpha_3}$, $\alpha_3 \approx 2$; 4. $I = AV^{\alpha_4}$, $\alpha_4 \approx 3.9$. На первом участке ВАХ ток ограничивается генерационным током в слое объемного заряда, так как она неплохо описывается формулой [11]

$$I_r = \frac{n_i}{2\tau_0} \left(\frac{2q\epsilon\epsilon_0}{N_{A,eff}} \right)^{1/2} \Phi_k - \frac{n_i}{2\tau_0} \left(\frac{2q\epsilon\epsilon_0}{N_{A,eff}} \right)^{1/2} V^{1/2}, \quad (1)$$

где n_i – собственная концентрация носителей, q – заряд электрона; $N_{A,eff}$ – эффективная концентрация заряженных акцепторных центров; Φ_k – контактная разность потенциалов, $\tau_0 = \tau_n = \tau_p$ – время жизни носителей заряда в собственном полупроводнике.

Из наклона прямой 1 (рис. 3) при помощи формулы (1) определялась величина времени жизни носителей заряда. Эта величина, определенная таким путем, имела значение $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ с при следующих значениях параметров: $n_i \approx 10^6$ см⁻³ собственная концентрация в CdTe кубической модификации при $T = 293$ К, $\epsilon = 9$, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см,

$S = 0.07$ см² и $N_{A,eff} = 2.1 \cdot 10^{12}$ см⁻³, а при $N_{A,eff} = 3.5 \cdot 10^{12}$ см⁻³ величина $\tau_0 \approx 3.3 \cdot 10^{-7}$. Величины $N_{A,eff}$ были определены из $C(V)$ характеристик.

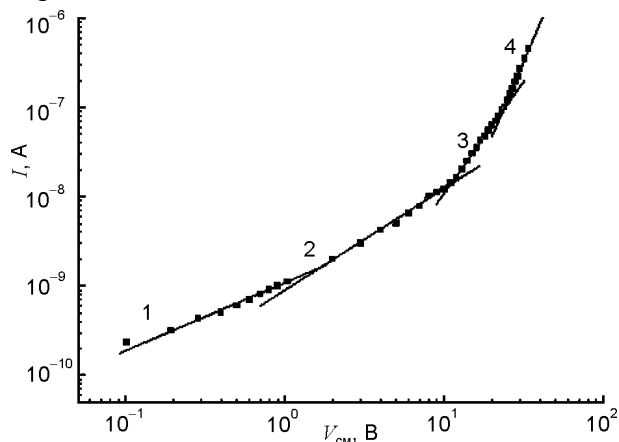


Рис. 3. Вольтамперная характеристика CdTe-детекторной структуры № 12 с барьером Шоттки в двойном логарифмическом масштабе, $T = 293$ К.

Для детекторных структур с барьером Шоттки, изготовленных на основе p-CdTe-пленок с $\rho \approx 10^5$ Ом·см, величина $\tau_0 \approx 4 \cdot 10^{-8}$ с. Отсюда следует, что с увеличением ρ базы повышается и время жизни носителей заряда. Известно, что увеличение удельного сопротивления пленок теллурида кадмия связано с повышением температуры синтеза, при которой повышается вероятность появления и скопления свободных атомов теллура (Te) на поверхности кристаллитов [12]. Атомы Теллегко образуют соединение TeO_2 , которое является хорошим диэлектриком. Этот диэлектрик, способствует пассивации межкристаллитных границ. В результате такой пассивации происходит уменьшение концентрации поверхностных состояний и увеличение времени жизни носителей.

Рассмотрим второй участок ВАХ, на котором поведение тока от напряжения описывается линейной зависимостью. Из этого участка ВАХ было определено, что величина $\rho \approx 4 \cdot 10^{10}$ Ом·см при значениях: $L = 46$ мкм и $S = 0.07$ с² (площадь верхнего Al-контакта). Такое значение ρ практически совпадает со значением удельного сопротивления для кубической модификации теллурида кадмия собственной проводимости. Это обстоятельство является подтверждением того, что объемным зарядом охвачена вся толщина p-CdTe пленки.

Появление квадратичного закона тока от напряжения (участок 3 ВАХ) обусловлено монополярной инжекцией электронов из области тылового контакта. Результаты проведенного рентгенофазного анализа показали и подтвердили, что между *p*-CdTe-пленкой и Mo-подложкой сформировался окисный слой MoO₃. Этот слой представляет собой полупроводник *n*-типа проводимости и является источником монополярной инжекции. Оценка времени диэлектрической релаксации производилась по формуле $t_{\Omega} \approx 10^{-12} \rho$ [11]. Проведенные также оценки для эффективной подвижности (μ_{eff}) по напряжению перехода V_x от закона Ома к квадратичному закону [12] ($\mu_{\text{eff}} \approx 3.4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) и по наклону квадратичного участка тока от напряжения дали следующие значения подвижностей ($\mu_{\text{eff}} \approx 3.4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и $\mu_{\text{eff}} \approx 4.4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, соответственно. Это обстоятельство показывает, что в детекторной структуре образуется объемный заряд подвижных носителей заряда. Таким образом, в исследуемой структуре механизм переноса тока определяется закономерностями монополярной инжекции. Эти результаты также подтверждают, что подавляющая часть инжектированных электронов находится на мелких ловушках (уровнях прилипания). Четвертый участок ВАХ, где ток растет резко ($I = AV^{3.9}$), появляется при монополярной инжекции, когда уровень прилипания (E_i) пересекается с квазиуровнем Ферми (E_f) или они находятся на очень близком расстоянии [13].

Теперь проанализируем зависимость шума E_n детекторной структуры от обратного напряжения смещения ($V_{\text{см}}$) (на рис. 4 представлен энергетический эквивалент шума от $V_{\text{см}}$).

Как видно из рис. 4, шум структуры достигает наименьшего значения $E_n \sim 16$ кэВ при $V_{\text{см}} = 4$ В, которое сохраняется почти до $V_{\text{см}} = 8$ В, после чего он вновь начинает расти. Сопоставление зависимости $E_n(V_{\text{см}})$ с вольт-фарадной характеристикой показывает, что шум достигает наименьшей величины при том напряжении смещения, при котором объемный заряд полностью охватывает всю толщину детекторной базы (*p*-CdTe-слой) структуры. При этом область постоянства

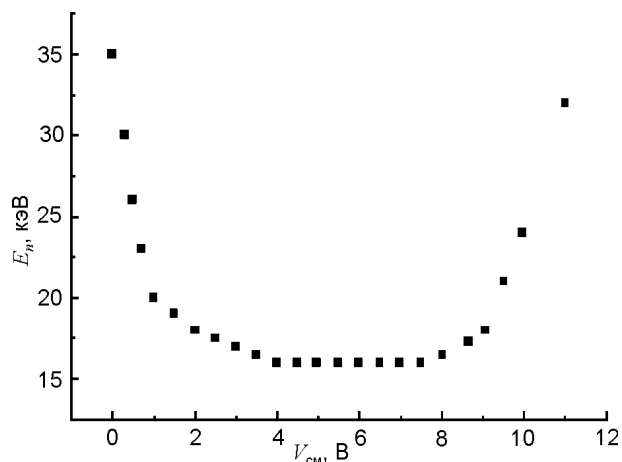


Рис. 4. Зависимость шума от напряжения смещения CdTe-детекторной структуры № 12 при $T = 293$ К.

зависимости $E_n(V_{\text{см}})$ соответствует линейной области вольтамперной характеристики.

Это означает, что в области наименьшего значения шума отсутствует инжекция электронов либо их концентрации намного меньше, чем концентрации n_i , то есть $n_i > n$. При этом следует отметить, что значение напряжения смещения (V_x) и вид ВАХ (в области ее перехода от закона Ома к квадратичному закону) совпадают со значением $V_{\text{см}}$, при котором начинает возрастать шум детекторной структуры. Если учесть, что при V_x концентрация инжектированных электронов (n) начинает превышать концентрацию n_i и они образуют объемный заряд подвижных носителей в базе, то становится очевидным, что инжектированные электроны из приконтактной области (слой MoO₃) и тылового контакта являются основным источником шумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе крупноблочных *p*-CdTe-пленок с удельными сопротивлением $\rho \sim 10^7$ Ом·см созданы детекторные структуры с барьером Шоттки чувствительные к ионизирующему излучению. Кристаллиты в этих структурах расположены перпендикулярно к плоскости пластинки металлического контакта (Mo), на которой они сформированы. В таких структурах при напряжениях смещения $V_{\text{см}}$, приводящих к полному обеднению базы, механизм переноса носителей заряда определяется процессами тепловой генерации носителей в слое объемного заряда базы.

Режим обеднения базы обеспечивает создание в ней электрического поля необходимого для эффективного сбора неравновесных носителей заряда. При оптимальных рабочих напряжениях смещения и комнатных температурах детекторные структуры имеют хорошие спектрометрические характеристики. При более высоком напряжении смещения $V_{см}$, когда уровень Ферми и уровень прилипания пересекаются, механизм переноса носителей заряда в базе начинает определяться процессами инжекции в нее электронов из Мо-контакта и его приконтактной MoO_3 -области. Устранение источников инжекции позволит улучшить спектрометрические характеристики детекторных структур.

Проведенные исследования дают основание полагать, что создавая более “толстые” структуры “металл-CdTe-пленка-металл” можно изготавливать на их основе детекторы не только для эффективной регистрации короткопробежных ядерных частиц, но и для регистрации жестких рентгеновских и гамма излучений. Кроме этого, исследованные структуры весьма перспективны для разработок инжекционных фотодетекторов видимого диапазона электромагнитного излучения и фотодетекторов твердотельных детектирующих систем на основе сцинтилляторов. Авторы выражают благодарность Н.Н. Заверюхиной за дискуссию и советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботнарчук В.М., Жилиев Ю.В., Иванов А.М., Строкан Н.Б., Федоров Л.М. Особенности эпитаксиальных слоев GaAs как детекторов α -частиц//Письма ЖТФ. – 1998. – Т. 24, Вып. 7. – С. 8-15.
2. Строкан Н.Б., Иванов А.М., Савкина Н.С., Давыдов Д.В., Богданова Е.В., Лебедев А.А. Применение SiC-триодных структур как детекторов ядерных частиц//ФТП. – 2002. – Т. 36, Вып. 3. – С. 375-378.
3. Takahashi T., Watanabe S.//IEEE Trans. Nucl. Sci., – 2001. – Vol. 48. – P. 950.
4. Watanabe S., Takahashi T., Okada Y., Sato G., Kouda M., Mitani T., Kabayashi Y., Nakazawa K., Kuroda Y., Onishi M.//IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2002. – Vol. 49. – P. 210.
5. Tanaka T., Kabayashi T., Mitani T., Nakazawa K., Oonuki K., Sato G., Takahashi T., Watanabe S.//New Astronomy Reviews. – 2004. – Vol. 48. – P. 309.
6. Косяченко Л.А., Склярчук В.М., Масляничук О.Л., Грушко Е.В., Гнатюк В.А., Аоки Т. Hatanaka Y. Особенности электрических характеристик диодов Шоттки на основе CdTe с почти собственной проводимостью//Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, Вып. 24. – С.29-37.
7. Hermon H., Shieber M., James R.B. Journal of Electronic Materials. – 1999. – Vol. 28. – P. 688-702.
8. Поликристаллические полупроводники/Под ред. Г. Харбеке. – М.: Мир, 1989. – 341 с.
9. Заверюхин Б.Н., Мирсагатов Ш.А., Заверюхина Н.Н., Володарский В.В., Заверюхина Е.Б. Пленочные детекторы ядерных излучений из теллурида кадмия//Письма ЖТФ. – 2003. – Т. 29, Вып. 22. – С. 80-87.
10. Косяченко Л., Масляничук О., Склярчук В. Особенности переноса заряда в диодах Шоттки на основе полуизолирующего CdTe//ФТП. – 2005. – Т. 39, Вып. 6. – С. 754-761.
11. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Советское радио, 1980. – 296 с.
12. Zanio K. Semiconductors and Semimetals//Acad. Press, N.Y. – 1978. – Vol. 13. – P. 210.
13. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. – М.: Мир, 1973. – 210 с.

LITERATURA

1. Botnaryuk V.M., Zhilyaev Yu.V., Ivanov A.M., Strokhan N.B., Fedorov L.M. Osobennosti ‘epitaksial’nyh sloev GaAs kak detektorov α -chastic //Pic’ma ZhTF.– 1998.– Т. 24, Вып. 7.– С. 8-15.
2. Strokhan N.B., Ivanov A.M., Savkina N.S., Davydov D.V., Bogdanova E.V., Lebedev A.A. Primenenie SiC-triodnyh struktur kak detektorov yadernykh chastic//FTP. – 2002. – Т. 36, Вып. 3. – С. 375-378.
3. Takahashi T., Watanabe S.//IEEE Trans. Nucl. Sci., – 2001. – Vol. 48. – P. 950.
4. Watanabe S., Takahashi T., Okada Y., Sato G., Kouda M., Mitani T., Kabayashi Y., Nakazawa K., Kuroda Y., Onishi M.//IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2002. – Vol. 49. – P. 210.
5. Tanaka T., Kabayashi T., Mitani T., Nakazawa K., Oonuki K., Sato G., Takahashi T., Watanabe S.//New Astronomy Reviews. – 2004. – Vol. 48. – P. 309.
6. Kosyachenko L.A., Sklyarchuk V.M., Maslyanchuk O.L., Grushko E.V., Gnatyuk V.A., Aoki T. Hatanaka Y. Osobennosti ‘elektricheskikh harakteristik diodov Shottki na osnove CdTe s pochti

- sobstvennoj provodimost'yu//Pis'ma v ZhTF. – 2006. – T. 32, Вып. 24. – S.29-37.
7. Hermon H., Shieber M., James R.B. Journal of Electronic Materials. – 1999. – Vol. 28. – P. 688-702.
 8. Polikristallicheskie poluprovodniki/Pod red. G. Harbeke. – M.: Mir, 1989. – 341 s.
 9. Zaveryuhin B.N., Mirsagatov Sh.A., Zaveryuhina N.N., Volodarskij V.V., Zaveryuhina E.B. Plenochnye detektory yadernyh izluchenij iz tellurida kadmiya//Pis'ma ZhTF. – 2003. – T. 29, Вып. 22. – S. 80-87.
 10. Kosyachenko L., Maslyachuk O., Sklyarchuk V. Osobennosti perenosa zaryada v diodah Shottki na osnove poluizoliruyushego CdTe//FTP. – 2005. – T. 39, Вып. 6. – S. 754-761.
 11. Vikulin I.M., Stafeev V.I. Fizika poluprovodnikovyh priborov. – M.: Sovetskoe radio, 1980. – 296 c.
 12. Zanio K. Semiconductors and Semimials//Acad. Press, N.Y. – 1978. – Vol. 13. – P. 210.
 13. Lampert M., Mark P. Inzhekcionnye toki v tverdyh telah. – M.: Mir, 1973. – 210 s.