

## ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРЕ СЦИНТИЛЛЯТОР (ПОДЛОЖКА) — ПЛАНАРНЫЙ ФОТОПРИЕМНИК $ZnSe_xTe_{1-x}$ — $ZnSe$

А. В. Коваленко, Т. М. Бочкова

Днепропетровский государственный университет, 320625, Днепропетровск, Украина  
(Получена 17 февраля 1993 г. Принята к печати 15 марта 1993 г.)

Показана возможность создания комбинированных детекторов ионизирующего излучения: сцинтиллятор (подложка) — планарный фотоприемник  $ZnSe_xTe_{1-x}$ — $ZnSe$ . В качестве подложки использованы кристаллы  $Bi_4Ge_3O_{12}$  и  $ZnSe$ . Фотоприемник на основе варизонного слоя  $ZnSe_xTe_{1-x}$ , полученный методом газофазной эпитаксии в токе очищенного водорода, обеспечивает хорошее согласование между спектром излучения подложки и областью фоточувствительности гетероструктуры  $ZnSe_xTe_{1-x}$ — $ZnSe$ .

Высокая эффективность детектирования, радиационная стойкость, возможность промышленного производства таких сцинтилляторов как  $Bi_4Ge_3O_{12}$  (BGO) и  $ZnSe$  определяют их широкое практическое использование для регистрации ионизирующих излучений. Характеристики сцинтилляторов BGO и  $ZnSe$  хорошо изучены, они приведены в таблице (при составлении таблицы использованы данные обзоров [1-3]). Благодаря своим свойствам BGO незаменим в физике высоких энергий и компьютерной томографии;  $ZnSe$  используется в радиометрических устройствах. Оба материала наиболее эффективны для производства малогабаритных датчиков мощных потоков высокоэнергетического излучения. Однако качество таких устройств определяется не только свойствами сцинтилляторов, в производстве которых имеются определенные достижения, но и характеристиками фотоприемников, а также степенью их согласованности с источником излучения.

Существует большое количество комбинированных детекторов, где регистрация излучения сцинтиллятора осуществляется с помощью фотоэлектронных умножителей, обеспечивающих высокую эффективность и хорошее энергетическое разрешение в широком диапазоне энергий [4]. Однако такие устройства громоздки, дороги и слишком сложны для массового производства.

Во многих случаях более удобным является применение фотодиодов (ФД), в частности лавинных ФД. Примерами таких устройств являются сцинтилляционный детектор на основе  $ZnSe$ , описанный в [2], а также детектор BGO-ФД, описанный в работе [5]. К проблемам, стоящим перед разработчиками детекторов этого типа, относятся: создание ФД большой площади с низким уровнем шумов, согласование источника излучения с приемником как по опикогеометрическим характеристикам (разрешающая способность, апертурный угол), так и по спектрально-энергетическим (спектральный диапазон, способ фокусировки излучения, т. е. линзовая система, световод и т. п.). Сказочное определяет поиск новых технологических приемов для создания компактных и эффективных фотосенсоров соответствующих размеров и чувствительности.

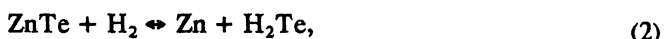
В данной работе рассматривается возможность создания комбинированного детектора ионизирующего излучения, в котором фотоприемником является ге-

Характеристика	ВГО	ZnSe
Симметрия кристаллической решетки	$T_d^2$	$T_d^2$
Параметр кристаллической решетки, Å	10.520	5.6684
Ширина запрещенной зоны ( $T = 300$ К), эВ	4.1	2.67
Световыход с ФЭУ, отн. ед.	12—16	40—50
Световыход с ФД, отн. ед.	3—5	170—200
Время высвечивания, мкс	0.3	5—7
Уровень послесвечения (через 20 мс), %	0.05	0.05
Эффективный атомный номер	74	33
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7.13	5.42
Энергетическое разрешение (662 КэВ), %	9—13	13—17
Радиационная длина, мм	10.5	28—35
Коэффициент преломления в максимуме излучения	2.15	2.58
Угол полного внутреннего отражения, град	28	23
Коэффициент поглощения в максимуме излучения, см <sup>-1</sup>	0.07—0.2	0.1—0.3
Положение максимума излучения, нм	480—500	600—620

тероструктура  $ZnSe_xTe_{1-x}-ZnSe$ , полученная методом газовой фазной эпитаксии на подложке из скнтиллирующего материала. В качестве подложки использовались кристаллы ВГО (100), выращенные нами из расплава методом Чохральского по стандартной технологии путем двойной перекристаллизации, а также кристаллы ZnSe (100), выращенные из расплава под давлением инертного газа методом Бриджмена-Стокбаргера. Физические характеристики подложек соответствуют данным, приведенным в таблице.

Фотоувствительная гетероструктура  $ZnSe_xTe_{1-x}-ZnSe$  выращивалась на подложке из материала скнтиллятора в горизонтальном кварцевом реакторе с тремя основными каналами для размещения и испарения вещества в потоке очищенного водорода (рис. 1). Четвертый добавочный канал в данном реакторе предназначен для перемешивания потоков реагентов перед подложкой. Источниками сырья служили особо чистые бинарные соединения ZnSe и ZnTe, температура испарения которых поддерживалась  $\sim 1250 \pm 0.05$  К. Коррекция стехиометрии достигалась благодаря наличию избыточного давления Zn, Se или Te, испаряемых из элементарных источников в одном из основных каналов протекания водорода. Зона реактора, где происходило осаждение вещества, имела принудительное водяное охлаждение, поэтому эпитаксиальные слои выращивались в поле большого температурного градиента,  $\sim 200$  К/см, что способствовало получению экстремально чистых пленок [4]. Низкая температура подложки ( $T \sim 475-575$  К) снижает активность диффузионных процессов на границе раздела, что обеспечивает получение резкой границы «слой—подложка». Расход газа-носителя в основном канале во время роста составлял 0.2—0.3 л/мин; скорость роста 1.5—2 мкм/ч.

Выращивание пленки тройного соединения осуществлялось из химических соединений, получаемых в результате диссоциации исходных бинарных источников как при конгруэнтном испарении с последующей диссоциацией в водородной среде, так и при обычной химической диссоциации. Указанные процессы описываются следующими уравнениями:



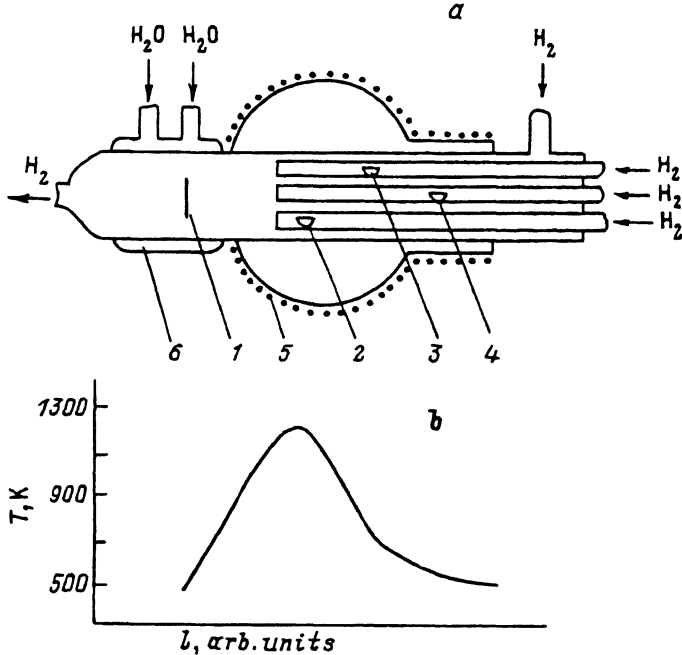


Рис. 1. *a* — схема кварцевого реактора для выращивания варизонного слоя  $ZnSe_xTe_{1-x}$  методом газовой эпитаксии: 1 — подложка; 2 — источник  $ZnSe$ ; 3 — источник  $ZnTe$ ; 4 — источник, корректирующий стехиометрию эпитаксиального слоя ( $Zn$ ,  $Se$ ,  $Te$ ); 5 — резистивная печь; 6 — рубашка водяного охлаждения зоны осаждения. *b* — распределение температуры по длине  $l$  реактора.



Для указанных реакций с учетом активности химических элементов справедливы соотношения

$$P(Zn) P(H_2Se)/P(H_2) A(ZnSe) = K_1(ZnSe), \quad (5)$$

$$P(Zn) P(H_2Te)/P(H_2) A(ZnTe) = K_2(ZnTe), \quad (6)$$

$$A(ZnSe)/P(Zn) P(Se_2)^{1/2} = K_2(ZnSe), \quad (7)$$

$$A(ZnTe)/P(Zn) P(Te_2)^{1/2} = K_2(ZnTe), \quad (8)$$

где  $P$  — парциальное давление соответствующего реагента,  $K_1$  и  $K_2$  — константы равновесия,  $A$  — химическая активность элементов.

Для случая синтеза тройной структуры  $ZnSe_xTe_{1-x}$  химическая активность элементов может быть представлена в виде [6-8]

$$A(ZnSe) = X_{ZnSe} \exp [(1 - X_{ZnSe})^2 W/RT], \quad (9)$$

$$A(ZnTe) = (1 - X_{ZnSe}) \exp [(X_{ZnSe})^2 W/RT], \quad (10)$$

где  $X$  — мольная доля,  $W$  — параметр взаимодействия,  $R$  — газовая постоянная.

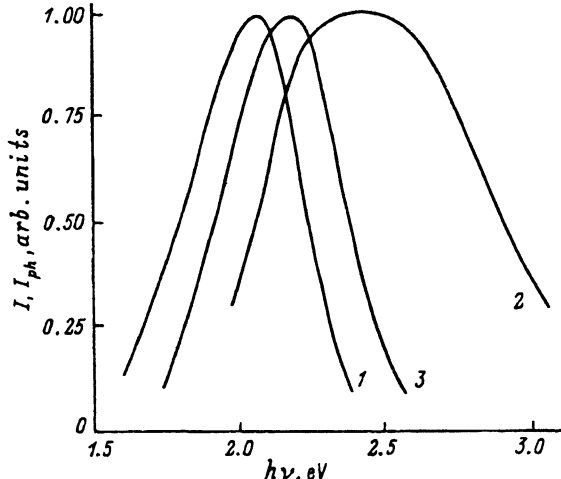


Рис. 2. Спектры интенсивности излучения  $I$  монокристаллов ZnSe (1), BGO (2) и фоточувствительности  $I_{ph}$  варизонного слоя  $ZnSe_xTe_{1-x}$  (3).

Таким образом, варьируя давление компонент реагирующих элементов и температуру испарения источников, в данной ростовой системе можно управлять параметром  $X$  при синтезе эпитаксиального слоя  $ZnSe_xTe_{1-x}$ .

Газораспределительный блок ростовой установки управлялся персональным компьютером. В соответствии с заданной программой расход водорода в основных каналах с источниками ZnSe и ZnTe изменялся в противофазе. В начале синтеза он был максимален в канале с ZnSe и минимален в канале с ZnTe, затем плавно изменялся в процессе эпитаксии, и соотношение расхода водорода в указанных каналах инвертировалось. После синтеза варизонного слоя в ростовой системе осуществлялось эпитаксиальное выращивание слоя ZnSe.

Создание гетероструктуры  $ZnSe_xTe_{1-x}$ —ZnSe и использование ее в качестве фотосенсора позволило решить следующие задачи. Во-первых, внутреннее электрическое поле гетероперехода, пространственно разделяя носители заряда разных знаков, уменьшает интенсивность рекомбинационных процессов и способствует повышению эффективности преобразования сцинтилляционного излучения в электрический сигнал. Во-вторых, такая структура обеспечивает максимальное перекрытие спектров излучения подложки со спектром фоточувствительности варизонного слоя, особенно когда в качестве подложки используется кристалл ZnSe (рис. 2). В-третьих, в такой структуре детектора удачно разрешаются многие проблемы согласования оптико-геометрических и спектрально-энергетических характеристик излучателя и приемника. В-четвертых, открываются возможности разработки многоэлементных детекторов, в том числе и таких, где фотоприемники находятся вне траектории прямого пучка ионизирующего излучения.

Существенное внимание в данном детекторе необходимо уделить созданию системы электродов к фоточувствительной гетероструктуре. Внешний электрод, размещенный на поверхности эпитаксиального слоя ZnSe, необходимо сделать полупрозрачным для отражения внутрь фотоприемника непоглощенного излучения сцинтиллятора. Электрод между подложкой и варизонным слоем  $ZnSe_xTe_{1-x}$  необходимо выполнить в виде сетки. В случае гомоэпитаксии на подложке ZnSe, когда эпитаксиальный слой, как показывают данные рентгенодифракционного анализа, является монокристаллическим, размер ячейки сетчатого электрода может быть довольно большим. При гетероэпитаксии на подложке BGO ввиду

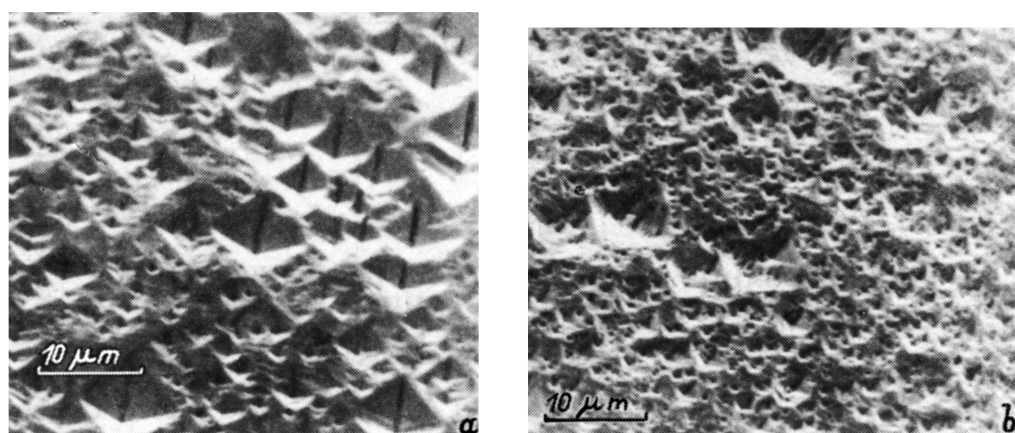


Рис. 3. Морфология поверхности эпитаксиальных слоев ZnSe: *a* — монокристаллический слой на подложке ZnSe; *b* — остротекстурированный слой на подложке BGO.

большого рассогласования параметров кристаллических решеток подложки и эпитаксиального слоя последний имеет поликристаллическую структуру. В лучшем случае при соответствующем подборе технологических параметров роста он оказывается остротекстурированным. На рис. 3 представлена морфология поверхности монокристаллического и остротекстурированного эпитаксиальных слоев ZnSe. Во втором случае сетчатый электрод должен быть с меньшей ячейкой, соизмеримой с размерами отдельных кристаллитов. Для этого необходимо использовать методы фотолитографии, позволяющие получить сетчатый электрод с размером ячейки 2—5 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. Gevay. *Progr. Cryst. Growth Charact.*, **15**, 145 (1987).
- [2] В. Д. Рыжиков. Препринт ИМК-90-5. Харьков (1990).
- [3] В. Д. Рыжиков. В кн.: Сцинтилляционные кристаллы полупроводниковых соединений  $A_2B_6$ . Получение, свойства, применение. Обзорн. информ. Сер. Монокристаллы и сцинтилляционные материалы. М. (1989).
- [4] М. В. Синьков, В. Д. Сапрыкин, В. Г. Чалая и др. Многоэлементные детекторы ионизирующего излучения. Киев (1985).
- [5] A. W. Lightstone, McYnture, R. Lecomte, D. Schmitt. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33**, 456 (1986).
- [6] M. Umal-Syed, P. Lilley. *J. Cryst. Growth*, **88**, 415 (1988).
- [7] A. Koukitu, H. Nakai, T. Suzuki, H. Seki. *J. Cryst. Growth*, **84**, 425 (1987).
- [8] D. W. Kisker, A. G. Zawadzki. *J. Cryst. Growth*, **89**, 378 (1988).

Редактор Л. В. Шаронова