

К. т. н. Ю. Н. БОБРЕНКО, Н. В. ЯРОШЕНКО, Г. И. ШЕРЕМЕТОВА,
к. т. н. Т. В. СЕМИКИНА, к. ф.-м. н. Б. С. АТДАЕВ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: sheremet@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
07.09 2009 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ФОТОПРИЕМНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnS

Исследовалась чувствительность тонкопленочных фотоприемников на основе ZnS в ультрафиолетовой и видимой области спектра при низких уровнях облучения. Показано, что оптимизацией толщины переходного слоя $(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}$ можно значительно уменьшить длинноволновую чувствительность.

Практический интерес к новым полупроводникам, служащим для регистрации и измерения ультрафиолетового излучения, возник в последние десятилетия, когда особо острой стала проблема уменьшения озонового слоя и загрязнения окружающей среды. Развитие биологии, медицины, сенсорной техники и др. дало импульс к разработкам новых фотоприемников (ФП) УФ-излучения на основе широкозонных полупроводников, таких как GaN, AlGaIn, ZnO, ZnS, SiC [1]. Особый интерес представляют фотоприемники, «слепые» к видимому излучению.

В работе рассматриваются тонкопленочные ФП на основе гетероперехода $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}/\text{CdSe}/\text{Mo}$. Слои ZnS и CdSe были получены методом термического испарения в квазизамкнутом объеме и осаждения конденсата на металлизированную ситалловую подложку. Барьерообразующий слой $\text{Cu}_{1,8}\text{S}$ (с концентрацией носителей заряда $N_a \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$) также наносился методом термического испарения в вакууме на поликристаллическую тонкопленочную многослойную структуру ZnS/CdSe/Mo. Прямозонный полупроводник CdSe использовался для создания омического контакта к ZnS и ориентирующего действия на осаждаемый конденсат ZnS с целью получения совершенных слоев, близких к эпитаксиально выращенным пленкам. Осаждение базовых слоев CdSe и ZnS, а также образующихся при смене полупроводников неизбежных переходных слоев происходило в едином технологическом цикле.

Выбирая параметры газодинамического потока пара в реакторе, устанавливали такой режим, чтобы реакция



не смещалась вправо при смене слоев. Для этой цели использовались два патрубка на дне камеры и тепловые затворы.

Выбирая определенные режимы осаждения, можно получить как переходные слои толщиной в несколько постоянных кристаллической решетки, так и слои, толщина которых сравнима с толщиной фоточувствительного полупроводника (будем называть их соответственно тонкими и толстыми варизонными слоями).

Для создания эффективных ФП УФ-излучения использовались поликристаллические слои CdSe со столбчатой структурой. Величина кристаллитов находилась в пределах 0,5—2 мкм. Проводимость слоев зависела только от концентрации собственных дефектов, специальное легирование не применялось. Концентрация носителей в базовом слое CdSe определялась по вольт-фарадным характеристикам и находилась в пределах $N_d = 10^{12} \text{—} 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Таким образом были получены ФП как с низкоомной, так и с высокоомной базой.

Основная особенность полученных тонкопленочных ФП — это использование барьера вблизи поверхности, глубина залегания которого менее 50 нм. В рассматриваемых приемниках, как и в диодах Шоттки, верхним барьерным слоем служит не металл, а сильновырожденный сульфид меди $\text{Cu}_{1,8}\text{S}$. Наличие барьера у поверхности уменьшает скорость поверхностной рекомбинации, ослабляет негативное влияние малого времени жизни носителей. Требования к ФП, работающим со слабыми сигналами, определяются пороговыми характеристиками, а именно: малыми шумами, малым темновым током I_s , низкой чувствительностью к нежелательным сигналам, например к фотоэмиссии из металла или сильновырожденного полупроводника, к токам, обусловленным двойными переходами, и т. д.

Особый интерес в данной работе представляют образцы с низкоомной базой, т. к. они слабочувствительны к видимому свету. В то же время, образцы с высокоомной базой обладают рядом уникальных свойств: имеют две области чувствительности — УФ и видимую, но в то же время — большое значение отношения темнового тока к току при видимом излучении, а также S-образное дифференциальное сопротивление и др.

Фотоприемники на основе гетероперехода $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}/\text{CdSe}/\text{Mo}$ эффективны при низких уровнях освещенности. Основным критерием эффективности служит отношение сопротив-

ления базы R_s к дифференциальному сопротивлению R_d . С целью выяснения влияния R_s на характеристики ФП запишем основное уравнение фотодиода при работе в фотовентильном режиме с учетом большого шунтирующего сопротивления ($R_{sh} \rightarrow \infty$) в виде

$$I_{ph} = I_L - I_s \{ \exp[\beta(U + I_{ph}R_s)] - 1 \}, \quad (2)$$

где I_{ph} — фототок через нагрузочное сопротивление R ;
 I_L — фототок, соответствующий количеству поглощенных приемником фотонов;
 I_s — темновой ток;
 β — приведенный термический потенциал, $\beta = q/(AkT)$;
 A — параметр неидеальности диода;
 T — температура;
 U — напряжение на диоде.

В случае слабых сигналов при условии $(U + I_{ph}R_s) \ll q/(AkT)$, разлагая экспоненту в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами, получим

$$I_{ph} = I_L - I_s \beta (U + I_{ph}R_s) \quad (3)$$

или

$$I_{ph}(1 + I_s \beta R_s) = I_L - I_s \beta U.$$

Так как величина R_s слабо влияет на характеристики ФП при условии $I_s \beta R_s \ll 1$, можно записать $R_s \ll 1/(I_s \beta)$, а с учетом $1/(I_s \beta) = R_d$ получим $R_s \ll R_d$.

Используя характеристики ФП $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/\text{CdSe}/\text{Mo}$: площадь образца 5 мм^2 , $I_s = 10^{-7} \text{—} 10^{-8} \text{ А/см}$, $\beta \approx 20$ (в нашем случае $A=2$, $T=300 \text{ К}$), получим $R_s \ll 10^5 \text{—} 10^6 \text{ Ом}$.

Слой с $R_s < 10^3 \text{ Ом}$ слабо влияют на характеристики ФП при выбранных условиях.

Толщина W слоя ZnS определялась по коэффициенту поглощения УФ-излучения α и диффузионной длине пробега неосновных носителей L_p . При $\alpha = 10^5 \text{—} 0,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ основная часть УФ-излучения поглощается в слое толщиной $W \approx 20 \text{—} 100 \text{ нм}$. Следовательно в слое толщиной $W=300 \text{ нм}$ будет поглощаться практически все УФ-излучение. При $W > 300 \text{ нм}$ будем считать слой ZnS толстым, а при $W < 300 \text{ нм}$ — тонким.

В работе исследовались ФП с тонким слоем ZnS и низкоомной базой (критерий низкоомности — $R < 10^3 \text{ Ом}$). На рис. 1 показаны две энергетические зонные диаграммы (ЭЗД) фотоприемников $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/\text{CdSe}/\text{Mo}$ с толстым и тонким варизонным слоем (ZnS) $_x$ (CdSe) $_{1-x}$.

Диаграммы не отображают всех физических процессов, в частности, на рис. 1, а не показан неизбежный из-за технологических особенностей варизонный тонкий слой между ZnS и CdSe (меньше 10 нм). Варизонные слои уменьшают дефектность структуры на границе раздела, вызванную различием параметров решеток. Меняя состав (ZnS) $_x$ (CdSe) $_{1-x}$, можно добиться наращивания фоточувствительного слоя, близкого к эпитаксиальному. Основным показателем фотоэмиссии дырок из CdSe служит разрыв валентной зоны ΔE_v (рис. 1, а), равный 0,6 эВ [2], и туннелирование дырок через треугольный барьер между CdSe и ZnS (рис. 1, б). При соответствующих режимах осаждения были получены образцы с тонкими (в несколько нм) и толстыми варизонными слоями.

В тонкий слой вносится заведомо «дефектная» структура, где дефекты вызваны несовпадением параметров решеток, температурных коэффициентов расширения слоев, которая создает условия для рекомбинации фотоносителей. На рис. 1, а показана ЭЗД с «дефектным» (тонким варизонным) слоем, где поток носителей в коротковолновой области разделяется сильным полем в ZnS. Фотоносители в длинноволновой области CdSe не смогут преодолеть потенциальный барьер для дырок и будут рекомбинировать на структурных дефектах границы раздела, а также в «кармане» для дырок, что показано на рисунке стрелками. Рис. 1, б отображает варизонный слой с менее «дефектной» структурой (нет потенциальной ямы для дырок). Часть дырок туннелирует через треугольный барьер в ZnS, поскольку высота его стала меньше. Толщина такого слоя может быть сопоставима с толщиной ZnS, широкий варизонный слой снижает тянущее поле и увеличивает R_s .

Подтверждением этому служит зависимость фоточувствительности от длины волны, показанная для двух образцов ФП площадью 5 мм^2 на рис. 2. Фототоки в точках максимальной чувствительности коротковолновой и длинноволновой областей отличаются для толстого и тонкого слоев соответственно на 2 и 3 порядка.

Отметим, что у ФП с тонким слоем несколько уменьшается фоточувствительность в УФ-области.

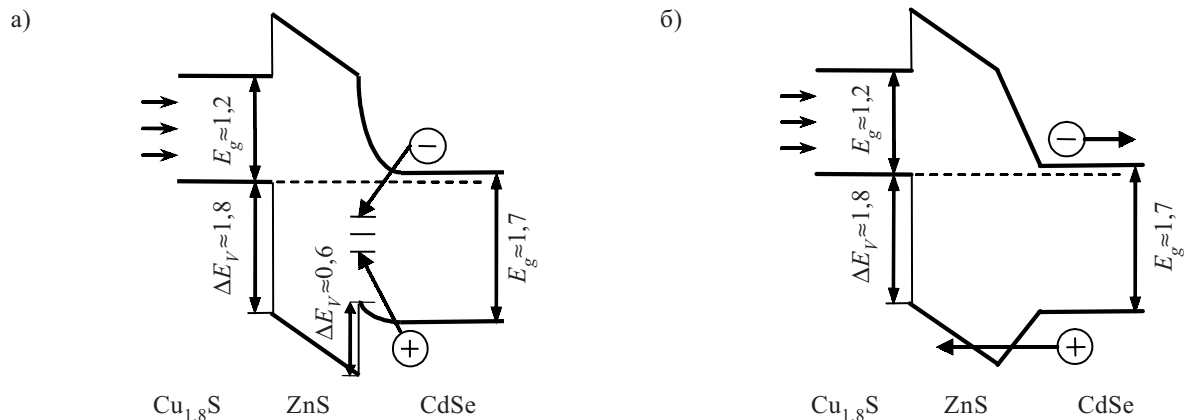


Рис. 1. Энергетические зонные диаграммы УФ ФП с тонким (а) и толстым (б) варизонным слоем

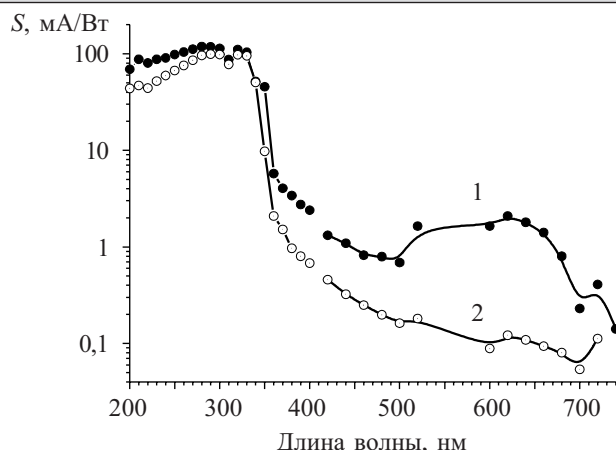


Рис. 2. Спектральная фоточувствительность S двух ФП с одинаковым слоем ZnS и варизонными слоями разной толщины:

1 — толстый; 2 — тонкий

Это объясняется увеличением рекомбинации в глубине слоя, поскольку введение варизонного слоя ослабляет электрическое поле в ZnS. С введением «дефектного» слоя фототок в длинноволновой области снижается на порядок.

Для тонкопленочных поликристаллических ФП с гетеропереходом $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-A}^2\text{B}^6$ характерно прохождение эмиссионных и туннельно-рекомбинационных токов [3], а при наличии высокоомных слоев ZnS при малых значениях напряжения и низкой температуре возможно появление и токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). На рис. 3 показана ВАХ фотодиода при обратном смещении $U_{\text{обр}}$ и при комнатной температуре. В обратносмещенном диоде ток меньше в ФП с тонким варизонным слоем, в котором идет более интенсивная рекомбинация через состояния на границе раздела, облегчается туннельный захват электронов на состояния в запрещенной зоне. Токовая зависимость отражает типичный механизм ТОПЗ: $I = 9/8\epsilon\mu U^2/W^3$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость ZnS; μ — подвижность носителей; W — толщина слоя ZnS. Ток, проходящий через тонкий слой, снижается на порядок, что подтверждает механизм прохождения тока, показанный на ЭЗД.

При увеличении напряжения проявляется туннельно-рекомбинационный механизм, кривая идет круче

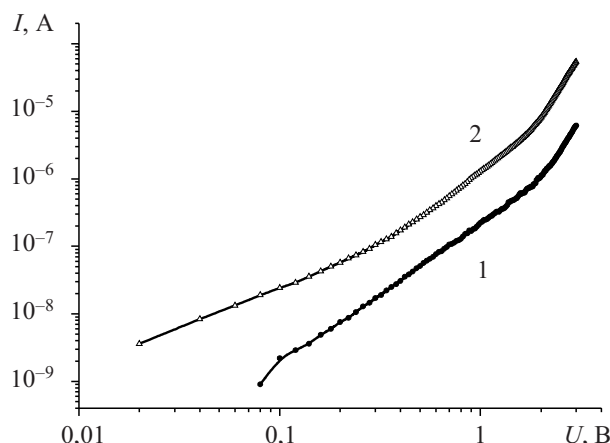


Рис. 3. Зависимость темнового тока от напряжения при обратном смещении фотодиода ($U_{\text{обр}} < 1,2$ В) для образцов ФП с варизонными слоями разной толщины:

1 — тонкий; 2 — толстый

в образце с тонким варизонным слоем. Ток I_s больше в ФП с толстым варизонным слоем, т. к. возрастает вероятность туннелирования через сниженный барьер.

Таким образом, изменяя толщину варизонного слоя, можно значительно уменьшить «нежелательную» длинноволновую чувствительность фотоприемника. Это важно при одновременном падении потоков слабого ультрафиолетового и сильного видимого излучения, поскольку позволяет обходиться без специальных фильтров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бланк Т. В. Гольдберг Ю. А. Полупроводниковые фотоэлектропреобразователи для ультрафиолетовой области спектра // ФТП.— 2003.— Т. 37, вып. 9.— С. 1025—1055.
2. Su-Huai Wei, Alex Zunger. Calculated natural band offsets of all II-VI and III-V semiconductors: Chemical trends and the role of cation d orbitals // Appl. Phys. Lett.— 1998.— Vol. 72, N 16.— P. 2011—2013.
3. Павелец С. Ю., Бобренко Ю. Н., Комащенко А. В., Шенгелия Т. Е. Новая структура поверхностно-барьерного сенсора ультрафиолетового излучения на основе CdS // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 5.— С. 626—628.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Барский А. Г. Оптико-электронные следящие системы.— М.: Логос, 2009.— 200 с.

Изложены теория, методы расчета и проектирования оптико-электронных следящих линейных и нелинейных систем, широко используемых при решении различных задач в области управления, прежде всего в военной технике. Даны методы их анализа и синтеза, учитывающие специфику систем пространственного слежения с модуляцией. Особое внимание уделено получению инженерных зависимостей для параметров звеньев систем с точки зрения обеспечения оптимальности их характеристик.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Оптотехника» и специальности «Оптико-электронные приборы и системы». Может быть полезна специалистам, занимающимся разработкой оптико-электронных следящих систем.

