

06.3;07

©1994

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ

InSe/CuAlSe₂

И.В.Боднар, В.Ю.Рудь, Ю.В.Рудь

Среди тройных соединений I-III-VI₂, как и в группе их бинарных аналогов, имеется несколько широкозонных полупроводников (CuAlSe₂, AgGaS₂ и CuAlS₂), которые представляют интерес для развития люминесцентной электроники в коротковолновой области видимого диапазона [1,2]. Хорошо известно, что как в случае содержащих алюминий бинарных соединений III-V, так и для их тройных аналогов CuAlVI₂ технология очень сложна [3]. Поэтому число работ по содержащим алюминий тройным полупроводникам достаточно ограничено и только в последнее время в результате привлечения широкого арсенала современных технологических методов эти исследования чрезвычайно быстро прогрессируют [3-10]. Например, физико-технологические исследования CuAlSe₂ позволили развить технологии выращивания объемных кристаллов и эпитаксиальных пленок с яркой фотолюминесценцией в оранжевой, зеленой и синей областях спектра. Совершенно логично, что теперь возникает проблема создания светодиодов из таких материалов. Однако пока в большинстве полупроводников I-III-VI₂ проблема конверсии типа проводимости остается нерешенной [2,12]. Особенно этот вопрос стоит остро для содержащих алюминий соединений I-III-VI₂, полученных в своем большинстве совсем недавно. Для CuAlSe₂ применение самых различных методов выращивания (в том числе молекулярно-пучковой эпитаксии), введение ряда примесей и изменения в составе питающей фазы пока не позволили достичь конверсии типа проводимости $p \rightarrow n$ [3-8]. Поэтому создание гомодиодных структур на CuAlSe₂ в настоящее время проблематично и в этом плане большие возможности открывает технология создания гетеропереходов, в которой склонность CuAlSe₂ сохранять p -тип проводимости может быть преодолена в результате сопряжения этого широкозонного ($E_G \simeq 2.67$ эВ при $T = 300$ К [1,4]) полупроводника с другими веществами n -типа.

В данной работе представлены результаты исследований, позволившие получить первые фоточувствительные ге-

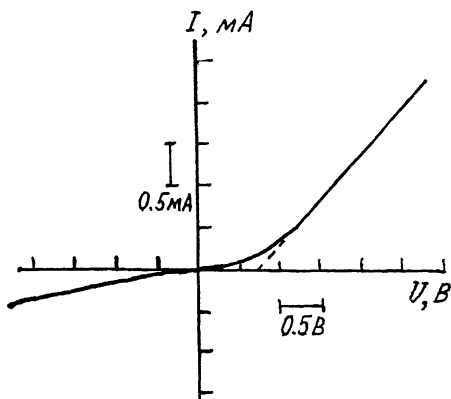


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода $n\text{-InSe}/p\text{-CuAlSe}_2$ ($T = 300$ K).

теропереходы на основе монокристаллов $p\text{-CuAlSe}_2$ методом их посадки на оптический контакт с поверхностью естественного скола слоистого бинарного соединения $n\text{-InSe}$ ($E_G \approx 1.25$ эВ при $T = 300$ K [13]).

Монокристаллы CuAlSe_2 p -типа проводимости с концентраций свободных дырок $p \approx 10^{13} - 10^{14}$ см^{-3} при $T = 300$ K выращивались направленной кристаллизацией из близкого к стехиометрии этого соединения расплава при вертикальном расположении тигеля. Предложенная технология позволяет получать монокристаллические слитки диаметром до 15 и длиной до 80–100 мм. Исследования удельной электропроводности и коэффициента Холла показали, что получаемые кристаллы электрически однородны. В качестве омических контактов использовалась химически осажденная на механически полированную поверхность медь. Для создания диодных структур использовались как плоскости естественного скола, так и механически полированные плоскости. В ряде случаев исследования выполнены на ориентированных в плоскостях (100) и (001) пластинах CuAlSe_2 . Монокристаллы $n\text{-InSe}$ также выращивались методом направленной кристаллизации и всегда были n -типа проводимости ($n \approx 10^{14} - 10^{16}$ см^{-3} при 300 K).

Ввиду отсутствия в настоящее время CuAlSe_2 n -типа нами исследовалась возможность получения $n-p$ гетероструктур методом посадки на оптический контакт свежесколотых зеркально-гладких плоскостей пластин $n\text{-InSe}$ с толщинами 10–100 мкм на механически полированные на алмазной пасте с размером зерна $\lesssim 1$ мкм плоскости тройного соединения $p\text{-CuAlSe}_2$. После приведения этих плос-

костей в контакт жесткая пластина p -CuAlSe₂ прижималась механически к слоистому полупроводнику, закрепленному в корпусе серийного фотодиода. В результате проведенной работы изготовлены выпрямляющие гетероструктуры n -InSe/ p -CuAlSe₂. Стационарная вольт-амперная характеристика одного из таких гетеропереходов приведена на рис. 1. Пропускное направление отвечает отрицательной полярности внешнего смещения на кристалле n -InSe. При напряжениях $U \simeq 2$ В выпрямление в лучших структурах достигает 10. С ростом прямого смещения $U > 1$ В линейная аппроксимация ВАХ вида $U = U_{отс} + R_{отс}I$ дает значения $U_{отс} \simeq 0.7 - 0.9$ В и $R_{отс} \simeq (5 \dots 8) \cdot 10^6$ Ом для различных структур. Обратный ток полученных структур во всем диапазоне исследованных смещений следует степенному закону $I \sim U^m$, где показатель m изменяется от 0.5 до 1 с ростом U , что может быть обусловлено токами утечки, связанными с несовершенством структур. Следует подчеркнуть, что электрические свойства были достаточно воспроизводимыми и за время исследований (~ 30 суток) не обнаружили каких-либо деградационных процессов.

На рис. 2 приведены также примеры типичных спектральных зависимостей квантовой эффективности фотопреобразования, вычисленной как отношение фототока короткого замыкания к числу падающих фотонов неполяризованного излучения, для полученных гетероструктур при освещении неполяризованным излучением со стороны широкозонной компоненты p -CuAlSe₂.

Как видно из рис. 2, спектральные зависимости характеризуются практически постоянной или даже возрастающей в коротковолновую область квантовой эффективностью фотопреобразования η в диапазоне между ширинами запрещенных зон InSe и CuAlSe₂. Длинноволновый экспоненциальный край fotocувствительности гетероструктур определяется поглощением в узкозонной компоненте InSe [13], тогда как коротковолновый спад η связан с поглощением излучения в прилегающей к активной области гетероперехода толще CuAlSe₂, о чем свидетельствует спектр оптического пропускания CuAlSe₂ (рис. 2). Проявление "эффекта окна" по отношению к интенсивности падающего излучения обусловлено резкой и достаточно совершенной гетерограницей. Поскольку широкая полоса fotocувствительности впервые созданного гетероперехода охватывает практически весь диапазон спектра солнечного излучения, эти структуры следует отнести в ряд перспективных устройств для применения в качестве солнечных элементов.

В гетероструктурах, полученных посадкой на оптический контакт с n -InSe пластин CuAlSe₂ с ориентацией (100), в области спада fotocувствительности была обнаружена пе-

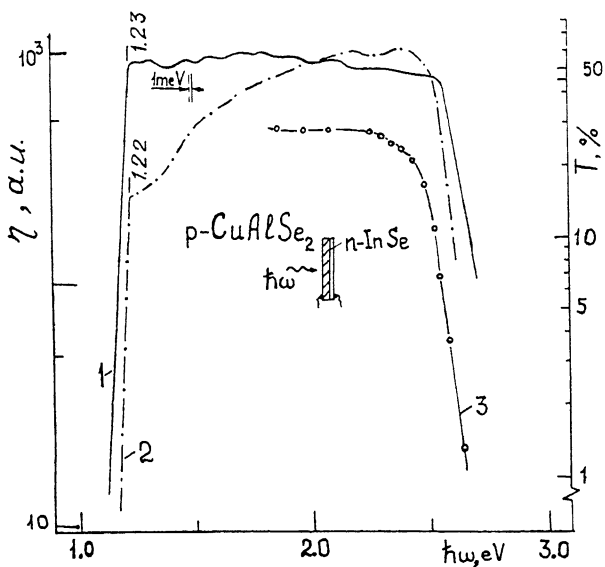


Рис. 2. Спектральные зависимости фоточувствительности гетеропереходов $n\text{-InSe}/p\text{-CuAlSe}_2$ (1 и 2) и оптического пропускания однородного монокристалла $p\text{-CuAlSe}_2$ (3) в естественном излучении ($T = 300\text{ K}$, 1 — образец № 5, 2 — образец № 17, 3 — толщина пластины $d = 0.11\text{ мкм}$, которая входит в состав гетероперехода № 5).

риодическая зависимость η от азимутального угла между электрическим вектором световой волны \mathbf{E} и тетрагональной осью с кристалла CuAlSe_2 [11]. Спектральный контур отрицательного фотоплеохроизма соответствовал дихроизму оптического пропускания, а его амплитуда достигала максимума $\approx 40\%$ вблизи $\hbar\omega \approx 2.58\text{ эВ}$ при толщинах CuAlSe_2 $d = 0.11\text{ мм}$. Соответствие знаков фотоплеохроизма и линейного дихроизма пропускания указывает на то обстоятельство, что прямые межзонные A -переходы в CuAlSe_2 преимущественно разрешены в поляризации $\mathbf{E} \parallel c$, а в валентной зоне верхнее положение принадлежит Γ_7 в соответствии с моделью зонного спектра I-III-VI₂ [4,12].

Таким образом, представленные результаты доказывают возможность изготовления выпрямляющих структур на основе CuAlSe_2 , которые перспективны для использования

их в качестве широкополосных фотопреобразователей, а также при разработке электролюминесцентных источников линейно-поляризованного излучения коротковолнового диапазона.

Список литературы

- [1] *Bettini M.* // Sol. St. Commun. 1973. V. 13. N 4. P. 599-601.
- [2] *Electroluminescence* / Ed. by J.I.Pankove. Berlin Springer-Verlag, 1977. 212 p.
- [3] *Chichibu S., Shishikura M., Ino J., Matsumoto S.* // J. Appl. Phys. V. 70. N 3. P. 1648-1655.
- [4] *Shirakata S., Chichibu S., Matsumoto S., Isomura S.* // Jap. J. Appl. Phys. 1993. V. 32. Pt. 2. N 2A. P. L167-169.
- [5] *Chichibu S., Matsumoto S., Shirakata S., Isomura S., Higuchi H.* // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. N 25. P. 3306-3308.
- [6] *Chichibu S., Iwai A., Matsumoto S., Higuchi H.* // J. Cryst. Growth. 1993. V. 126. N 8. P. 635-642.
- [7] *Aksenov I., Kai T., Sato K.* // Abstracts ICTMC-9, Yokohama, 1993. P. 96.
- [8] *Mochizuki K., Niva E., Kimoto K., Matsumoto K.* // Abstracts ICTMC-9. Yokohama, 1993. P. 341.
- [9] *Grutso S.A., Makovetskaya L.A.* // Abstracts ICTMC-9. Yokohama, 1993. P. 125.
- [10] *Savchuk V.A., Lipnitskii V.I., Korzun B.V., Makovetskii G.I.* // Abstracts ICTMC-9. Yokohama, 1993. P. 341.
- [11] *Рудь Ю.В.* Изв. вузов. Физика. 1986. Т. 29. В. 8. С. 68-85.
- [12] *Shay J.L., Wernick J.H.* Ternary Chalcopyrite Semiconductors. N.Y.: Pergamon Press, 1975. P. 244.
- [13] *Мезмиев Н.М., Рудь Ю.В., Салаев Э.Ю.* // ФТП. 1978. Т. 12. В. 8. С. 1566-1570.

Физико-технический
институт им. А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
21 февраля 1994 г.