Результирующие значения эквивалентной шуму разности температур, полученных после реализации процедуры выравнивания, для трех рассматриваемых приемников представлены ниже:

Номер образца	Эквивалентная шуму разность температур, %
1	100
2	93
3	69

Из приведенных результатов следует, что вне зависимости от метода выравнивания значительный исходный разброс чувствительности в матрице имеет существенное значение для формирования характеристик тепловизионного прибора. Значительный разброс в каналах матрицы приводит к снижению характеристики прибора. При этом надо заметить, что даже при относительно небольшом общем разбросе чувствительности элементов в матрице наличие отдельных единичных каналов, имеющих значение чувствительности заметно ниже среднего на фоне остальных элементов с чувствительностью, близкой к среднему значению, приводит к заметному снижению характеристик системы, что связано с ошибками вычисления коэффициентов коррекции, вызванных наличием этих каналов. Понятно, что наибольший вклад в ухудшение характеристик вносят каналы, имеющие уровень чув-ствительности, лишь ненамного превышающий "дефектный" уровень, поскольку такие каналы пропускаются при реализации процедуры замены сигналов в "дефектных" каналах и вносят отрицательный вклад в качество выравнивания геометрического шума в тепловизионной системе.

Литература

1. *Овсюк В. Н., Курышев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др.* Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
2. *Алеев Р. М., Иванов В. П., Овсянников В. А.* Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. — Казань: Изд-во Казанск. ун-та.
3. *Вафиади А. В., Нации В. А., Шабашев О. К.* Экспериментальное исследование влияния геометрического шума на основные характеристики тепловизионного прибора// Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2. С. 17.
4. *Макаров А. С., Омелаев А. И., Филиппов В. Л.* Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем.— Казань: Унипресс, 1998.
5. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения/ Пер. с англ. — М.: Мир, 1978.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Modeling of characteristics of array photodetecting device in composition with the thermal imaging system

V.A. Baloev, V.P. Ivanov, Y.M. Latypov
State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

Multielement photodetectors have a considerable spread of sensitivity between the elements, and that leads to the noise appearance on the output image due to the difference of output elements voltage at similar parameters of irradiated signal. In order to exclude the pointed image defects they used different methods of channel sensitivity equalization. At that we should notice that the efficiency of such equalization depends in many respects on the parent voltage sensitivity range of multielement photodetector.

УДК 621.315.592

Фотоэлектрические свойства изотипных гетеропереходов n-InSe<РЗЭ>/n-$CuInSe_2$ в видимой и ближней ИК-областях

А. Ш. Абдинов, Р. Ф. Бабаева, Р. М. Исмаилов, Г. Х. Эйвазова
Бакинский государственный университет, г. Баку, Республика Азербайджан

Методом посадки на оптический контакт созданы изотипные гетеропереходы n-InSe<РЗЭ>/n-$CuInSe_2$ с процентным содержанием введенной примеси N_{REE} = 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2} и 10^{-1} ат.% редкоземельных элементов (РЗЭ) типа гадолиния, гольмия и диспрозия. Исследованы их фотоэлектрические свойства в режимах фотопроводимости, фотоЭДС и фотодиода при различных ориентациях падающего света относительно контактирующих

© Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф., Исмаилов Р. М., Эйвазова Г. Х., 2007

компонентов и температурах (77 и 300 К). Обнаружены заметные зависимости основных фотоэлектрических характеристик изучаемых структур от N_{REE} и предложены механизмы для их объяснений.

Значительная фоточувствительность при температурах вплоть до 350 К в широком диапазоне длин волн света ($0{,}35 \le \lambda \le 1{,}20$ мкм) и слоистость структуры делают монокристаллы *n*-InSe перспективным и интересным материалом не только с научной, но и с практической точки зрения. Этот полупроводник может быть пригодным для создания и изучения неохлаждаемых фотоприемников, работающих в видимой и ближней ИК-областях спектра. К настоящему времени немало работ посвящено изучению фотоэлектрических свойств специально нелегированных кристаллов *n*-InSe и некоторых электри-ческих структур на их основе. В данной работе исследованы фотоэлектрические свойства изотипных гетеропереходов *n*-InSe<РЗЭ>/*n*-$CuInSe_2$ в видимой и ближней ИК-областях спектра ($0{,}30 \le \lambda \le 2{,}00$ мкм), созданных методом посадки на оптический контакт*.

Эксперимент

Использованные монокристаллы *n*-InSe<РЗЭ> с примесями редкоземельных элементов (РЗЭ) типа гадолиния (Gd), гольмия (Ho) и диспрозия (Dy) при различных уровнях легирования (N_{REE} = 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2} и 10^{-1} ат. %) и *n*-$CuInSe_2$ получены методами Бриджмена и медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры вдоль слитка. Концентрация свободных электронов в них при 300 К составляла 10^{14}—10^{15} см$^{-3}$ и ~10^{16} см$^{-3}$, соответственно. Для различных образцов толщина *n*-InSe<РЗЭ> и *n*-$CuInSe_2$-компонентов варьировалась в пределах ~10—100 мкм и ~0,5—1,0 мм, соответственно, а поперечные размеры их составляли ~ (2×3) мм.

Выбранные размеры контактирующих слоев, а также относительная мягкость (пластичность) кристаллов *n*-InSe<РЗЭ> позволяли обеспечить удовлетворительное качество прямого оптического контакта между компонентами изучаемых структур.

Токовые контакты получали путем припаивания металлического индия или серебряной пасты на свободные поверхности контактирующих компонентов, и они являлись омическими при рассмотренных нами условиях.

Схематическое изображение исследуемых структур приведено на рис. 1.

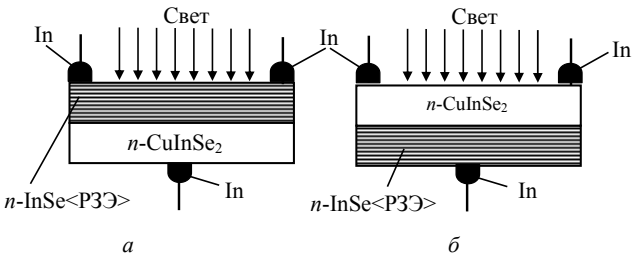

Рис. 1. Схематическое изображение изучаемых структур n-InSe<РЗЭ>/n-$CuInSe_2$ при освещении:
а — со стороны *n*-InSe<РЗЭ>-компоненты; *б* — со стороны *n*-$CuInSe_2$-компоненты

Измерения проводили в интервале $77 \le T \le 450$ К как в фотовольтаическом режиме, так и в режиме фотопроводимости. При измерениях свет падал в направлении, перпендикулярном плоскости перехода и естественным слоям *n*-InSe<РЗЭ>-компоненты.

Снимались спектральное распределение (рис. 2) и световая зависимость (рис. 3) фоточувствительности для структур с различным значением N_{REE}, а также при различных ориентациях освещения относительно контактирующих компонентов.

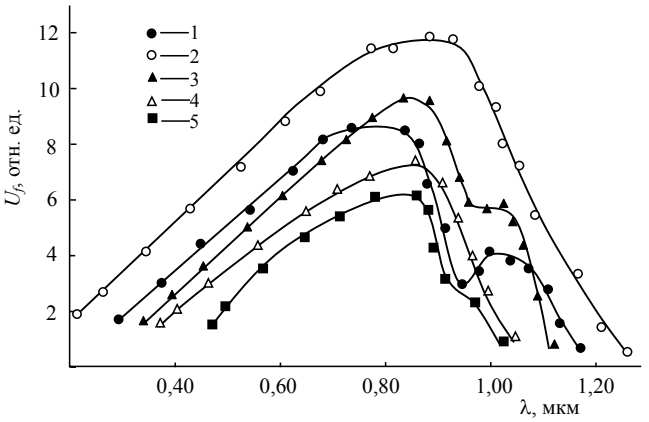

Рис. 2. Спектральное распределение фоточувствительности структур n-InSe<РЗЭ>/n-$CuInSe_2$ с различной N_{REE} при освещении со стороны n-InSe<РЗЭ>-компоненты;
N_{REE}, ат. %: 1, 4 — 0; 2 — 10^{-5}; 3 — 10^{-1};
T, K: 1, 2, 3 — 77; 4, 5 — 300

Оказалось, что при освещении изучаемых структур *n*-InSe<РЗЭ>/*n*-$CuInSe_2$ со стороны *n*-InSe<РЗЭ>-компоненты в фотовольтаическом режиме спектральное распределение ее фоточувствительности при $N_{REE} = 0$ охватывает диапазон длин волн $0{,}35 \le \lambda \le 1{,}25$ мкм и $0{,}40 \le \lambda \le 1{,}10$ мкм при 77 и 300 К, соответственно. При 77 К на кривых спектрального распределения фоточувствительности изучаемых структур, помимо основного ярковыраженного максимума ($\lambda \approx 0{,}90$ мкм), в некоторых случаях наблюдается и слабый второй макси-

* Бакуменко В. Л., Чишко В. Ф. Электрические свойства оптических контактов слоистых полупроводников// ФТП. 1977. Т. 11. В. 11. С. 2000—2002.

мум в районе $\lambda \approx 1{,}02$ мкм. С ростом процентного содержания введенной примеси до 10^{-4} ат.% спектральное распределение фоточувствительности изучаемых структур расширяется с обеих сторон относительно исходного ($N_{REE} = 0$).

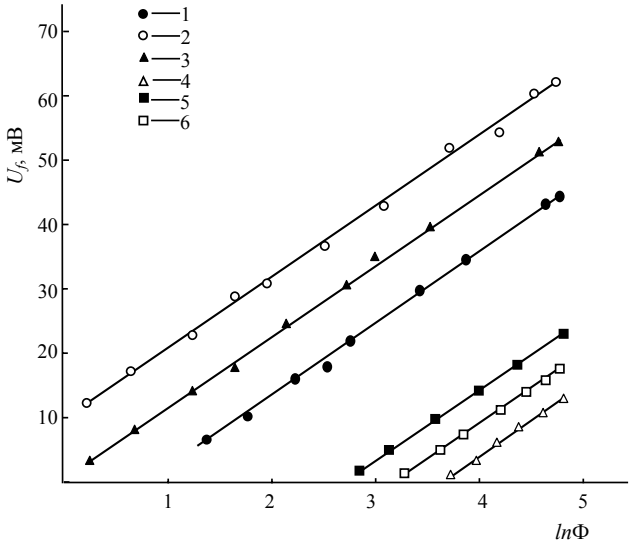

Рис. 3. Световая зависимость фотонапряжения в структуре n-InSe<РЗЭ>/n-CuInSe$_2$ при различных уровнях легирования РЗЭ;
N_{REE}, ат.%: 1, 4 — 0; 2 — 10^{-5}; 3, 6 — 10^{-1};
T, K: 1, 2, 3 — 77; 4, 5, 6 — 300

При 77 К спектральное распределение фоточувствительности структур, освещенных со стороны *n*-InSe<РЗЭ>-компоненты с $N_{REE} = 10^{-5}$ ат.% охватывает диапазон длин волн $0{,}30 \le \lambda \le 1{,}34$ мкм с основным максимумом при $\lambda \approx 1{,}00$ мкм, а второй — относительно слабый максимум при этом исчезает. С дальнейшим ростом N_{REE} спектральное распределение фоточувствитель-
ности структур *n*-InSe<РЗЭ>/*n*-CuInSe$_2$ заметно сужается, и при $N_{REE} \approx 10^{-1}$ ат. % оно охватывает диапазон длин волн $0{,}40 \le \lambda \le 1{,}10$ мкм с максимумами при $\lambda \approx 0{,}90$ мкм (основной) и $\lambda \approx$ $\approx 1{,}00$ мкм (дополнительный). При рассмотренных условиях в основном наблюдается зависимость спектрального распределения фоточувствительности изучаемых структур от количества, а не от введенного материала РЗЭ-примеси.

Установлено, что в структурах как *n*-InSe/*n*-CuInSe$_2$, так и *n*-InSe<РЗЭ>/*n*-CuInSe$_2$ при освещении монохроматическим светом с энергией $\varepsilon_{g2} \le h\nu < \varepsilon_{g1}$, где ε_{g1} и ε_{g2} — значения ширины запрещенной зоны широкозонного *n*-InSe<РЗЭ>- и узкозонного *n*-CuInSe$_2$-компонент, соответственно, в рассмотренных нами условиях фоточувствительность почти не наблюдается, а при $h\nu > \varepsilon_{g1}$ спектральное распределение фоточувствительности изучаемых структур и фоторезисторов, изготовленных на основе *n*-InSe<РЗЭ>, совпадает. Однако при этом в коротковолновой части спектра фоточувствительность резко уменьшается. При освещении изучаемых структур со стороны слоя *n*-CuInSe$_2$ как в фотовольтаическом режиме, так и в режиме фотопроводимости фоточувствительность при 77 К сильно уменьшается относительно имеющей место при освещении со стороны *n*-InSe<РЗЭ>-компоненты, а при 300 К — совсем исчезает.

Изучены также фотоэлектрические свойства структур *n*-InSe<РЗЭ>/*n*-CuInSe$_2$ при освещении кратковременными световыми импульсами с большой мощностью ($\sim 5 \cdot 10^2$ лк). Измерения проводились как в вентильном, так и фотодиодном режиме. Снималась зависимость фотоЭДС от интенсивности падающего на структуру света (см. рис. 3), и установлено, что она хорошо подчиняется существующим в научной литературе представлениям о формировании фотоЭДС в диодных структурах. Уместно отметить, что этот результат в свою очередь является еще одним достоверным подтверждением создания при посадке на прямой оптический контакт кристаллов *n*-InSe<РЗЭ> и *n*-CuInSe$_2$ диодной структуры.

Обсуждение

Полученные результаты могут быть объяснены наличием энергетического барьера в валентной зоне, которая препятствует пространственному разделению неосновных носителей заряда при освещении изучаемых структур со стороны узкозонной *n*-CuInSe$_2$-компоненты и уменьшению глубины проникновения падающего на структуру света в *n*-InSe<РЗЭ> при больших энергиях фотонов вследствие возникновения прямого перехода в более высокую зону проводимости, а также зависимостью степени пространственного упорядочения используемых кристаллов *n*-InSe<РЗЭ> от N_{REE}.

Полученные результаты также свидетельствуют о возможности управления параметрами и характеристиками изучаемых гетероструктур и фотоприемников на их основе путем варьирования содержания введенной примеси РЗЭ типа Gd, Ho и Dy. При этом, выбирая оптимальное значение N_{REE}, можно создавать на основе гетероструктур *n*-InSe<РЗЭ>/*n*-CuInSe$_2$ фотоприемники для широкого (видимого и ближнего ИК) диапазона спектра с более стабильными характеристиками и параметрами.

Зависимость свойств и параметров гетероструктур *n*-InSe<РЗЭ>/*n*-CuInSe$_2$ в основном от N_{REE}, а не от материала введенной примеси, говорит о том, что влияние легирования на свойства изучаемых образцов в рассмотренном случае не связано с электронной структурой введенных примесей, а определяется особенностями самого полупроводника *n*-InSe. Появление второго (слабого) максимума на спектральном распределении фоточувствительности при освещении изучаемых структур со стороны широкозонного компонента, скорее всего, обусловлено "эффектом окна", при этом фотоны с $h\nu > \varepsilon_{g1}$, не поглощаясь в *n*-InSe<РЗЭ>, падают на *n*-CuInSe$_2$ и в этом слое создают фоточувствительность.

Отсутствие фоточувствительности при освещении изучаемых структур со стороны *n*-InSe<РЗЭ> светом с $\varepsilon_{g2} \le h\nu < \varepsilon_{g1}$ объясняется тем, что такой свет поглощается в

n-$CuInSe_2$-слое, а из-за наличия потенциального барьера в валентной зоне структуры созданные при этом дырки не переходят из n-$CuInSe_2$ в n-InSe<РЗЭ>. С этой позиции объясняется также незначительность фоточувствительности изучаемых структур при освещении со стороны n-$CuInSe_2$.

Отличие коротковолновой части спектра фоточувствительности изучаемых структур при освещении со стороны n-InSe<РЗЭ> светом с $h\nu > \varepsilon_{g1}$ от спектрального распределения фотопроводимости фоторезистора на основе n-InSe<РЗЭ> связано с уменьшением глубины поглощения коротковолновых фотонов. В результате этого
неравновесные носители заряда генерируются на участке слоя, находящимся далеко от перехода. Поэтому пространственного разделения этих электрон-дырочных пар барьером гетеропереходов не происходит.

В заключение можно отметить, что путем легирования РЗЭ типа Gd, Ho и Dy можно управлять фотоэлектрическими параметрами и характеристиками созданных методом посадки на прямой оптический контакт изотипных гетеропереходов n-InSe<РЗЭ>/n-$CuInSe_2$ в видимой и ближней ИК-областях спектра, а также создавать структуры с более стабильными свойствами.

Обнаруженное влияние легирования РЗЭ на свойства этих гетеропереходов определяется в основном процентным содержанием, а не материалом введенной примеси. Это обусловлено тем, что при легировании кристаллов n-InSe<РЗЭ> меняется их степень пространственной неоднородности.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Photoelectric properties of isotype heterojunctions n-InSe<REE>/n-$CuInSe_2$ in visible and near IR-region

A. Sh. Abdinov, R. F. Babayeva, R. M. Ismayilov, G. H. Eyvazova
Baku State University, Baku, Azerbaijan

By the method of landing to optical contact isotype n-InSe<REE >/n-$CuInSe_2$ heterojunctions with percentage of introduced impurity $N_{REE} = 0$; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2} and 10^{-1} at. % rare-earth elements (REE) of gadolinium, holmium and dysprosium have been created. Their photoelectric properties in photoconductivity, photoEMF and photovoltaic modes have been investigated at different orientations of incident light relative to contacting components and temperatures (77 and 300 K). Appreciable dependence of the basic photo-electric characteristics of investigated structures on N_{REE} have been found out and mechanisms for their explanations have been offered.

УДК 621.382.002

Разработка InGaP-фотокатода для электронно-оптических преобразователей

Н. И. Беспалко, В. И. Сахно, А. В. Долгих
ОАО "Катод", г. Новосибирск, Россия

А. А. Мармалюк
ФГУП «НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия

Представлена разработка InGaP-фотокатода для электронно-оптических преобразователей (ЭОП), работающих в видимом диапазоне спектра. Оптимизированы технологические и конструктивные параметры InGaP-фотокатода. С помощью метода дифракции быстрых электронов оценено качество подготовки поверхности фотокатода перед активировкой. Герметизированные в ЭОП образцы фотокатодов имели интегральную чувствительность S = 300 мкА/лм и квантовую эффективность на длине волны 560 нм – QE = 30 %. Намечены пути дальнейшего усовершенствования InGaP-фотокатода.

© Беспалко Н. И., Сахно В. И., Долгих А. В., Мармалюк А. А., 2007

Широкие области применения ЭОП и постоянное повышение требований к параметрам этих приборов неуклонно ведут к совершенствованию технологии их производства и поиску новых материалов для фотокатодов.

Основным узлом ЭОП является фотокатод. В настоящее время в качестве фотокатодных узлов используются многощелочные фотокатоды и фотокатоды с отрицательным электронным сродством (ОЭС) на соединениях $A^{III}B^{V}$ (в основном GaAs). Перспективны-