

УДК 621.315.592

Влияние легирования редкоземельными элементами на исходную и сенсibilизированную ИК-фоточувствительность слоистых кристаллов селенида индия

А. Ш. Абдинов, Г. Х. Эйвазова

Бакинский государственный университет, г. Баку, Республика Азербайджан

Р. Ф. Бабаева, Р. М. Рзаев

Азербайджанский государственный экономический университет, г. Баку,
Республика Азербайджан

Исследовано влияние легирования редкоземельными элементами (РЗЭ) типа Gd, Ho и Dy при $N_{REE} \approx 0-10^1$ ат. % на исходную, а также сенсibilизированную ИК-фоточувствительность в кристаллах слоистого полупроводника n -InSe. Показано, что зависимость исходной и сенсibilизированной ИК-фоточувствительностей от уровня легирования РЗЭ в изучаемых кристаллах InSe обусловлена зависимостью степени пространственной неоднородности кристалла, энергетической глубины залегания мелких уровней α -прилипания и r -центров медленной рекомбинации, а также плотности мелких уровней α -прилипания от N_{REE} .

Монокристаллы селенида индия (n -InSe) обладают высокой фоточувствительностью во всей видимой и в некоторой области ближней инфракрасной (ИК) части оптического спектра ($0,35 < \lambda \leq 1,30$ мкм) в широком интервале температуры (вплоть до ~ 450 К) [1]. Недавно появилась также информация о возможностях сенсibilизации ИК-фоточувствительности вплоть до 3,50 мкм различными внешними воздействиями (электрическим полем и собственным светом [2]) и управлением электронных свойств (3—7) путем легирования различными РЗЭ этого полупроводника. Однако влияние легирования РЗЭ на исходную и сенсibilизированную ИК-фоточувствительность этого материала не изучено, хотя полученные при этом результаты могут быть полезными как для физики слоистых полупроводников типа соединений A_3B_6 , так и для выявления новых возможностей их для применения в ИК-технике.

Данная работа посвящена исследованию влияния легирования РЗЭ типа гадолиния (Gd), гольмия (Ho) и диспрозия (Dy) при малом процентном содержании вводимой примеси ($N_{REE} \approx 0-10^1$ ат. %) на исходную и сенсibilизированную (электрическим полем и собственным светом) ИК-фоточувствительность в монокристаллах селенида индия.

Эксперимент

Изучаемые образцы с поперечными и продольными токовыми контактами (когда ток через образец протекает в направлении перпендикулярно и вдоль естественных слоев, соответственно) скалывались из крупных слитков n -InSe<РЗЭ>, выращенных методами медленного охлаждения при постоянном градиенте температу-

ры вдоль слитка и Бриджмена [8]. Исследовались образцы с $N_{REE} = 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$ ат. % для каждого из вышеупомянутых РЗЭ (Gd, Ho и Dy). Токовые контакты получали путем припаивания металлического индия In, олова Sn или же нанесением специальной серебряной пасты на свежеосколотые поверхности образцов.

Измерения проводили в интервале температур 77—400 К при напряженности, приложенной к образцам электрического поля, от предельно слабой до $2,5 \cdot 10^3$ В/см.

Длина волны, интенсивность и длительность воздействия падающего на образец монохроматического света с достаточной точностью менялись в пределах 0,25—4,00 мкм, $0-10^2$ лк и от непрерывного до $\sim 0,1$ мс, соответственно.

Установлено, что при относительно низких температурах ($T \leq 200$ К) специально нелегированные кристаллы n -InSe, помимо высокой собственной положительной ($0,40 \leq \lambda \leq 1,25$ мкм) фоточувствительности, обладают также относительно слабой (по сравнению с собственной) отрицательной примесной фоточувствительностью (в области $1,30 \leq \lambda \leq 1,90$ мкм) (рис. 1, а кривая 1). В этих кристаллах при определенных условиях также можно сенсibilизировать ИК-фоточувствительность воздействием собственного света и (или) электрическим полем, которое больше некоторого критического (см. рис. 1, б, кривые 1 и 2, соответственно).

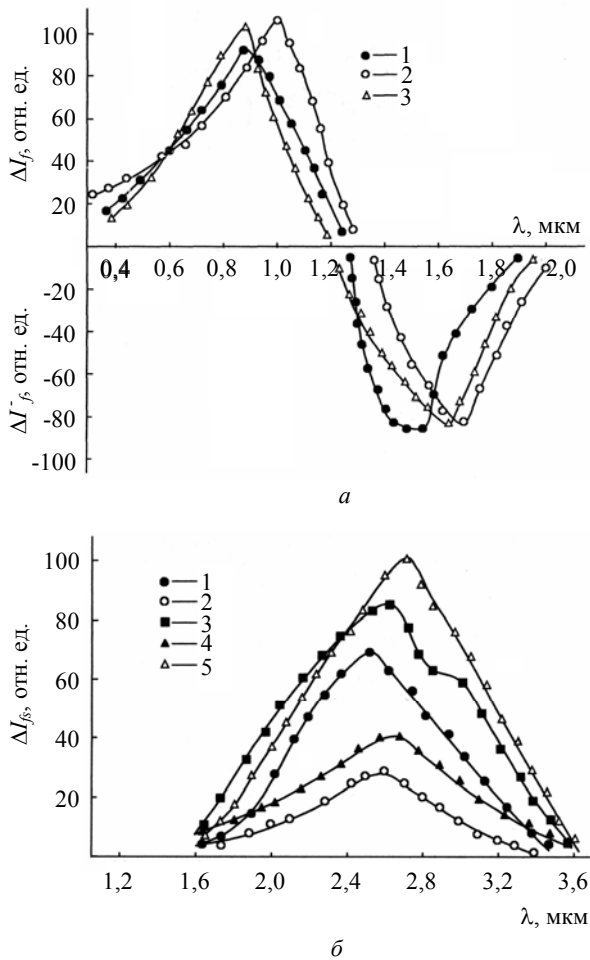


Рис. 1. Спектральное распределение:

a — фоточувствительности монокристаллов *n*-InSe<Dy> при $T = 77$ К и различных уровнях легирования: N_{Dy} , ат. %: 1 — 0; 2 — 10^{-3} ; 3 — 10^{-1} ;

б — сенсibilизированной собственным светом (кривые 1—3) и электрическим полем (кривые 4 и 5) фоточувствительности в монокристаллах *n*-InSe<Dy> при $T = 77$ К, $\lambda_c = 0,95$ мкм и различных уровнях легирования. N_{Dy} , ат. %: 1, 4 — 0; 2, 5 — 10^{-5} ; 3 — 10^{-2}

С ростом температуры величина отрицательной примесной фоточувствительности уменьшается и при $T \geq 200$ К она совсем исчезает (рис. 2, кривая 1). При этом сужается ширина спектра собственной фотопроводимости (при 300 К собственная фотопроводимость охватывает диапазон длины волны $0,50 \leq \lambda \leq 1,20$ мкм).

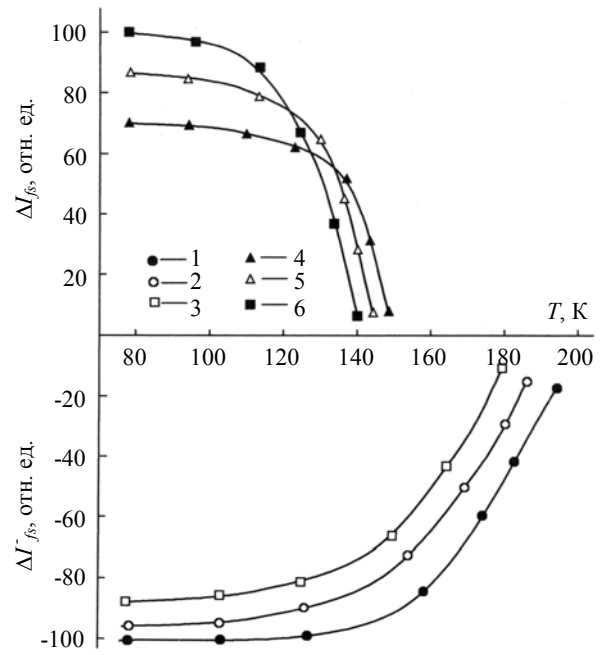


Рис. 2. Температурная зависимость отрицательной (кривые 1—3) и сенсibilизированной собственной подсветкой (кривые 4—6) ИК-фоточувствительностей в кристаллах *n*-InSe<Dy> при $T = 77$ К, $\lambda_c = 0,95$ мкм и различных уровнях легирования:

N_{Dy} , ат. %: 1, 4 — 0; 2, 5 — 10^{-5} ; 3, 6 — 10^{-2}

При легировании монокристаллов *n*-InSe примесями РЗЭ, помимо характеристик и особенностей исходной фоточувствительности (см. рис. 1, кривые 2 и 3), заметным образом меняются также характеристики и особенности сенсibilизированных различными воздействиями ИК-фоточувствительностей (см. рис. 1, б, кривые 3—5). В частности, независимо от материала введенной примеси РЗЭ при относительно низких температурах ($T \leq 200$ К), с ростом N_{REE} положение красной границы собственной фотопроводимости (λ_{red}) меняется. Причем зависимость λ_{red} от N_{REE} имеет немонотонный характер — с ростом N_{REE} до $\sim 10^{-5}$ ат. % она увеличивается почти до $\sim 1,45$ мкм, затем уменьшается, и при $N_{REE} \approx 10^{-1}$ ат. % составляет $\sim 1,30$ мкм (см. рис. 1). С изменением N_{REE} в рассмотренном интервале немонотонно меняется также положение максимума спектра собственной фотопроводимости в области $0,95—1,08$ мкм. Оказалось, что влияние легирования РЗЭ рассмотренных типов на исходную собственную фоточувствительность в ИК-области спектра от материала введенной примеси не зависит.

С изменением уровня легирования меняется и спектр исходной примесной ИК-фоточувствительности (см. рис. 1, а, кривые 2 и 3). В частности, с ростом N_{REE} спектр отрицательной фотопроводимости несколько расширяется в сторону относительно длинных волн, а величина ΔI_F — почти не меняется.

При легировании РЗЭ меняются температурные характеристики отрицательной и сенсibilизированной ИК-фоточувствительностей (см. рис. 2), а ход их люкс-амперных характеристик почти не меняется. При легировании РЗЭ кинетика

обоих типов ИК-фоточувствительностей подвергается заметному изменению — сначала уменьшается, а далее (при $N_{\text{REE}} > 10^{-3}$ ат. %) увеличивается скорость их релаксации при включении и выключении света.

Как в специально нелегированных, в легированных РЗЭ кристаллах InSe при $N_{\text{REE}} < 10^{-3}$ ат. % оба типа фоточувствительностей имеют медленно-релаксирующий характер, который с ростом N_{REE} от 10^{-3} до $\sim 10^{-1}$ ат. % заметно ослабляется.

Легирование примесями РЗЭ в рассмотренных нами условиях в отличие от исходного значительно влияет на сенсibilизированные ИК-фоточувствительности. В частности, величина сенсibilизированных примесных ИК-фоточувствительностей увеличивается, а красная граница ее спектра расширяется в сторону более длинных волн (см. рис. 1, б, кривые 3—5).

В кристаллах InSe при легировании РЗЭ, помимо темновой ВАХ (рис. 3, кривые 1—3), подвергается изменению и ход кривых зависимости ΔI_{fs} от приложенного напряжения (см. рис. 3, кривые 4 и 5).

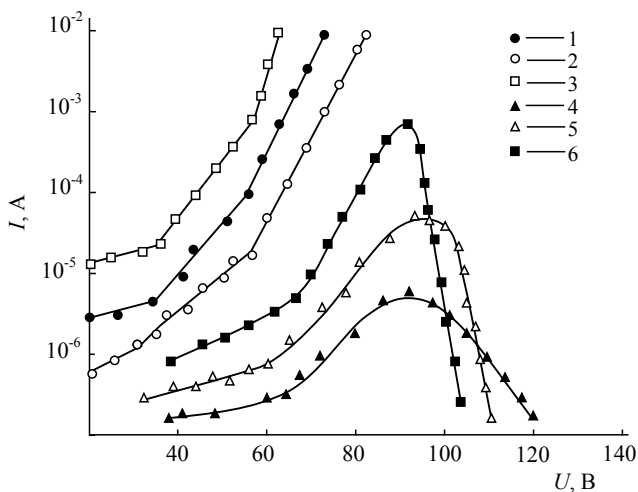


Рис. 3. Темновые ВАХ (кривые 1—3) и зависимость сенсibilизированной фоточувствительности от значения приложенного внешнего электрического напряжения (кривые 4—6) в кристаллах $n\text{-InSe}\langle\text{Dy}\rangle$ при $T = 77$ К и различных уровнях легирования:

N_{Dy} , ат. %: 1, 4 — 0; 2, 5 — 10^{-5} ; 3, 6 — 10^{-2}

Обсуждение

В ранних работах [9] установлено, что отрицательная фотопроводимость в специально нелегированных кристаллах $n\text{-InSe}$ обусловлена наличием в запрещенной зоне изучаемого материала двух типов центров рекомбинации:

r -медленных и S -быстрых [10], а сенсibilизация примесной ИК положительной фоточувствительности связана с заполнением мелких уровней α -прилипания внешним воздействием (светом или инъекцией) и последующим опустошением их под действием относительно длинноволнового примесного света [10]. Зависимость ширины спектра и положения красной границы собственной фотопроводимости от температу-

ры объясняется зависимостью флуктуации потенциала в изучаемых кристаллах от температуры [1].

Что касается влияния легирования примесями РЗЭ на исходную ИК-фоточувствительность, то нами предполагается следующее. При легировании РЗЭ с ростом количества введенной примеси, во-первых, немонотонно меняется (сначала увеличивается, а далее уменьшается) степень пространственной неоднородности кристаллов, во-вторых, при относительно больших N_{REE} из-за увеличения взаимодействия донорно-акцепторных пар энергетическая глубина залегания r -центров медленной рекомбинации уменьшается, однако их концентрация почти не меняется. Поэтому при относительно малых N_{REE} вследствие туннелирования носителей тока через рекомбинационные барьеры r -центры опустошаются под действием относительно длинноволнового примесного света по сравнению с имеющим место в исходном специально нелегированном кристалле. При более высоких уровнях легирования хотя из-за уменьшения степени пространственной неоднородности кристалла уменьшается и вероятность туннельного опустошения r -центров, однако уменьшается и энергетическая глубина залегания последних вследствие смещения их в сторону потолка валентной зоны за счет роста взаимодействия донорно-акцепторных пар. По-видимому, именно из-за этого при увеличении N_{REE} положение красной границы отрицательной фотопроводимости хотя слабо, но все же смещается в сторону более длинных волн. На основе этого предположения можно удовлетворительно объяснить и влияние легирования на температурную зависимость отрицательной фотопроводимости.

Под действием собственного света или же внешнего электрического поля, большего некоторого критического, мелкие уровни α -прилипания заполняются генерированным светом или инжектированными носителями тока. Последующим или одновременным освещением такого кристалла примесным ИК-светом из соответствующей полосы поглощения происходит опустошение мелких уровней α -прилипания, и наблюдается положительная примесная ИК-фоточувствительность. При относительно малых N_{REE} с ростом количества введенной примеси степень пространственной неоднородности увеличивается. Одновременно увеличивается и вероятность опустошения мелких уровней α -прилипания под действием более длинноволнового примесного ИК-света вследствие туннелирования носителей через рекомбинационные барьеры. Поэтому при таких уровнях легирования с ростом N_{REE} положение красной границы сенсibilизированной примесной ИК-фоточувствительности смещается в сторону более длинных волн. В рамках этой модели рост величины ΔI_{fs} при увеличении N_{REE} можно объяснить ростом плотности мелких уровней α -прилипания (N_r). При относительно больших N_{REE} хотя степень пространственной неоднородности кристалла постепенно уменьшается, однако из-за роста взаимодействия донорно-акцепторных пар мелкие уровни α -прилипания смещаются в сторону дна зоны проводимости. Вследствие этого уменьшается энергетическая глубина залегания мелких уровней α -

прилипания, и с дальнейшим увеличением N_{REE} положение красной границы сенсibilизированной примесной ИК-фоточувствительности продолжает смещаться в сторону более длинных волн. Что касается роста величины сенсibilизированной электрическим полем примесной ИК-фоточувствительности, то она может объясняться увеличением N_r . Уменьшение значения приложенного напряжения, при котором срывается сенсibilизация примесной ИК-фоточувствительности (ΔI_{fs} падает почти до нуля) с ростом N_{REE} , связано с облегчением электрического пробоя мелких уровней α -прилипания при больших уровнях легирования РЗЭ.

Заключение

В кристаллах n -InSe как исходная, так и сенсibilизированная ИК-фоточувствительности зависят от легирования РЗЭ. Причем эти зависимости определяются количеством, а не материалом введенной примеси. Влияние легирования РЗЭ на характеристики и особенности сенсibilизированных и исходной фоточувствительностей прежде всего обусловлено изменением степени пространственной неоднородности кристалла, смещением r -центров медленной рекомбинации и мелких уровней α -прилипания в сторону края соответствующих разрешенных зон вследствие роста взаимодействия донорно-акцепторных пар, а также ростом плотности мелких уровней α -прилипания при увеличении процентного содержания введенной примеси РЗЭ.

Литература

1. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г. Явления фото- и электропэмти в высокоомных монокристаллах n -InSe// ФТП. 1975. Т. 9. В. 9. С. 1690—1693.
2. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф., Рагимова Н. А., Рзаев Р. М., Эйвазова Г. Х. Сенсibilизация фоточувствительности преобразователей солнечной энергии на основе кристаллов селенида индия: Confer. Proceeding First International conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering. — Baku, 2002. P. 318—321.
3. Искендер-заде З. А., Садыхов О. М., Салаев Эль. Ю. Фотозлектрические свойства монокристаллов InSe:Gd// В сб. Физика плазмы и конденсированных сред. — Баку: изд-во АГУ, 1985. С. 62—67.
4. Абдинов А. Ш., Мехтиева Н. М., Бабаева Р. Ф., Рзаев Р. М., Исмаилов Р. М. Фотоллюминесценция легированных диспрозием монокристаллов селенида индия и галлия// Известия НАН Азербайджана. Сер. ФМ и ТН. 2003. № 5. С. 143—147.
5. Рагимова Н. А., Джафарова С. З., Абуталыбов Г. И. К вопросу о влиянии соединений РЗЭ на оптический спектр экситонов в кристаллах InSe// Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 3. С. 10—13.
6. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф. "Переходная" релаксация темнового тока в чистых и легированных кристаллах селенида индия// Неорган. материалы. 1994. Т. 30. №. 3. С. 339—341.
7. Abdinov A. Sh., Guseinov A. M., Nurullaev Yu. G., Sadykhov O. M. The Influence of Gadolinium Doping on the Switching Effect in Indium Selenide Single Crystals// Phys. Stat. Sol. (a). 1989. V. 116. P. K173—177.
8. Гусейнов А. М., Садыхов Т. И. Получение легированных редкоземельными элементами монокристаллов селенида индия// В сб. Электrofизические свойства полупроводников и плазмы газового разряда. — Баку: изд-во АГУ, 1984. С. 42—44.
9. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г. Отрицательная фотопроводимость и гашение фототока в n -InSe при примесном возбуждении// ФТП. 1976. Т. 10. №. 1. С. 81—84.
10. Рывкин С. М. Фотозлектрические явления в полупроводниках. — М.: Наука, 1963. — 494 с.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

The effect of doping by rare earth elements on initial and sensibilized IR-photosensitivity of layered indium selenide crystals

A. Sh. Abdinov, G. H. Eyvazova

Baku State University, Baku, Republic of Azerbaijan

R. F. Babayeva, R. M. Rzayev

Azerbaijan State Economic University, Baku, Republic of Azerbaijan

The effect of doping by rare earth elements (REE) such as Gd, Ho and Dy at $N_{REE} \approx 0-10^{-1}$ at. % on initial, as well as sensibilized IR-photosensitivity in the crystals of layered semiconductor n -InSe have been investigated. It is shown that dependence of the initial and sensibilized IR-photosensitivity on the level of doping by REE in investigated InSe crystals is caused by dependence of a degree of spatial heterogeneity of a crystal, energy depth of shallow α -sticking levels and slow r -centers of recombination, and also density of shallow α -sticking levels on N_{REE} .

УДК 621.383

Ультрафиолетовый фотоприемник для спектрального диапазона 0,19—0,28 мкм на природном алмазе типа 2а