

УДК 621.383

## Сенсибилизация ИК-фоточувствительности в слоистых кристаллах типа соединений селенида индия электрическим полем

А. Ш. Абдинов, Н. А. Рагимова, Г. Х. Эйвазова

Бакинский государственный университет, г. Баку, Республика Азербайджан

Р. Ф. Бабаева, Р. М. Рзаев

Азербайджанский государственный экономический университет,  
г. Баку, Республика Азербайджан

*Ранние исследования показывают, что слоистые кристаллы селенида индия (InSe) являются высокочувствительными фотопроводниками в широком диапазоне температуры и длины волны света ( $0,35 \leq \lambda \leq 1,25$  мкм). Исследованы возможности расширения спектрального диапазона (сенсибилизация) ИК-фоточувствительности этих кристаллов в сторону более длинных волн. Установлено, что в высокоомных образцах InSe с хорошо инжектирующими контактами в суперлинейной области ВАХ (где имеет место заметная инжекция) при относительно низких температурах ( $T \leq 150$  К) появляется значительная фоточувствительность и в примесной области (вплоть до 3,50 мкм с максимумом при  $\lambda = 2,64$  мкм) происходит сенсибилизация ИК-фоточувствительности изучаемых монокристаллов InSe электрическим полем. Изучены зависимости этого явления от величины приложенного к образцу внешнего электрического напряжения, используемых контактных материалов, температуры, длины волны и интенсивности примесного света. Показано, что сенсибилизация ИК-фоточувствительности монокристаллов InSe электрическим полем и специфические особенности этого явления обусловлены наличием уровней прилипания различного типа и крупномасштабных пространственных неоднородностей. Даны оценки значениям основных параметров уровней прилипания, а также неоднородностей.*

Полупроводниковые материалы, обладающие высокой фоточувствительностью в широком диапазоне оптического спектра и температуры, особенно при температурах выше комнатной, все время находятся в центре внимания физиков и инженеров. К числу интересных и перспективных с этой точки зрения материалов относятся также монокристаллы селенида индия (InSe), являющиеся одним из характерных представителей полупроводниковых соединений  $A_3B_6$  со специфической слоистой структурой. Получение и исследование этих материалов хотя начались еще давно, однако их электронные свойства более комплексно и всесторонне изучаются лишь в последнее время [1–7].

В результате проведенных различными авторами исследований уже установлено, что монокристаллы InSe являются высокочувствительными фотопроводниками как в видимой, так и в ближней инфракрасной (ИК) области спектра (при  $0,35 \leq \lambda \leq 1,25$  мкм), а также в широком диапазоне температуры (почти до  $T \approx 300$  К).

Обнаружение в этом полупроводнике при относительно низких температурах комплекса необычных (не присущих для многих полупроводниковых материалов и не объясняющихся в

рамках представлений о квазиоднородном полупроводнике) фотоэлектрических явлений – остаточной, аномальной, отрицательной и остаточной отрицательной фотопроводимостей; спектральной памяти и накопления световой памяти; индуцированных примесных фотоэффектов; различных видов (ИК, температурное и электрическое) гашения фотопроводимости и остаточной проводимостей (оптической и электрической памяти) делают монокристаллы InSe незаменимыми материалами для наблюдения и изучения особенностей разнообразных, в том числе специфических электронных процессов в полупроводниках, в частности, и в твердых телах вообще. Монокристаллы селенида индия являются также подходящими объектами для изучения электронных процессов в частично-неупорядоченных материалах.

В работах [8–10] сообщалось о влиянии легирования на фотоэлектрические свойства монокристаллов InSe и показана возможность сенсибилизации в них более длинно- и коротковолновой фоточувствительности путем легирования примесями редкоземельного элемента диспрозия (Dy) с определенным процентным содержанием. Данная работа посвящена исследованию влияния внешнего электрического

напряжения, большего некоторого предельного (когда наблюдается заметная инжекция через контакты), на фотопроводимости и выяснению возможности расширения спектрального диапазона (сенсбилизации) ИК-фоточувствительности монокристаллов InSe с помощью внешнего электрического поля. В частности, исследовано влияние инжекции на спектр фоточувствительности монокристаллов InSe при различных условиях.

### Образцы и методика

Исследуемые образцы с поперечными размерами  $\sim 3,00 \times 5,00$  мм и толщиной 0,05—1,00 мм срезались из крупных монокристаллических кусков InSe, выращенных методом медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры вдоль слитка. Синтез InSe осуществлялся путем сплавления измельченной смеси In+Se со стехиометрическим составом. Атомы примеси диспрозия (Dy) вводились в шихту перед началом синтеза. Состав, распределение атомов Dy по объему слитка, а также монокристалличность изучаемых образцов проверялись с помощью комплекса физико-химических, термографических и рентгено-структурных анализов. Исходное удельное темновое сопротивление отдельных образцов составляло  $\rho_{T0} \approx 10^7 - 10^8$  Ом·см при температуре жидкого азота (77 К) и сильно (почти несколько порядка) уменьшалось с ростом температуры до комнатной (300 К). Образцы обладали высокой фоточувствительностью при температурах вплоть до 350 К, и при оптимальных условиях величина интегральной чувствительности (отношение темнового сопротивления к световому) достигала  $\sim 10^5 - 10^6$ .

В качестве контактного материала брались серебряная паста, металлический индий или же обычный припой (Sn). Токовые контакты наносились в открытом воздухе на свежесколотые естественно-зеркальные поверхности образцов путем нанесения серебряной пасты, а также припаиванием индия или олова. Контакты располагались так, чтобы при необходимости ток протекал в направлении перпендикулярно естественным слоям (вдоль оси «С») или же вдоль естественных слоев (в направлении, перпендикулярном оси «С»). Качество токовых контактов (инжектирующая способность, электрическая прочность) контролировалось по вольт-амперной характеристике, снятой на характеристографе при различных условиях.

Измерения проводили в широком диапазоне изменения температуры ( $T = 77 - 350$  К), длины волны ( $\lambda = 0,30 - 4,50$  мкм) и интенсивности света (вплоть до  $\sim 10^2$  Лк), при предельно слабых и достаточно больших (когда наблюдается обу-

словленная инжекцией ярко выраженная нелинейность темновой ВАХ) значениях приложенного к образцу внешнего электрического напряжения методом обеспечения постоянного значения разности потенциалов между токовыми контактами при различных условиях (в темноте и при воздействии на образец света с различной длиной волны и интенсивностью). Температура образца менялась путем испарения жидкого азота в специальном устройстве — криостате.

Темновая ВАХ изучаемых структур металл—InSe—металл (металл Ag, In или Sn) имела степенной характер ( $I_T \sim U^k$ , где показатель степени « $k$ » при рассмотренных условиях с ростом  $U$  меняется от 1/2 почти до 6) и отдельные ее участки обуславливаются наличием дрейфовых барьеров (при предельно слабых полях) [11] и осуществлением инжекции в режиме токов, ограниченных пространственными зарядами — ТОПЗ (при дальнейшем росте приложенного напряжения) [12].

### Экспериментальные результаты

Влияние внешнего электрического поля на фоточувствительности изучаемых структур металл—InSe—металл в основном проявлялось в том, что при относительно больших напряжениях на длинноволновой части (на спадающей ветви) спектрального распределения собственной фотопроводимости фоточувствительность увеличивается, а за длинноволновой границей собственной фотопроводимости в широком интервале изменения температуры ( $T \leq 150$  К) и длины волны света (вплоть до 3,50 мкм) появляется значительная ИК-фоточувствительность — происходит сенсбилизация последней в монокристаллах InSe внешним электрическим полем. Подобная сенсбилизация ИК-фоточувствительности в изучаемых кристаллах наблюдалась как при непосредственном (одновременном) воздействии внешнего напряжения  $U \geq U_{lim}$ , так и через определенный промежуток времени (до 25—30 мин) после прекращения воздействий на изучаемые структуры при низких температурах ( $T \approx 77$  К) внешнего электрического напряжения, большего некоторого предельного ( $U \geq U_{lim}$ ), т. е. напряжения, соответствующего значению показателя степени темновой ВАХ  $k \geq 2$ . Однако во втором случае, во-первых, величина сенсбилизированного фотосигнала оказалась мала относительно случая, имеющего место при непосредственном воздействии внешнего напряжения  $U \geq U_{lim}$ ; во-вторых, с ростом промежутка времени после прекращения воздействия внешнего напряжения ( $U \geq U_{lim}$ ) она постепенно ослаблялась и, наконец, совсем исчезла.

При прочих одинаковых условиях величина сенсibilизированной фоточувствительности менялась также с температурой. В частности, при рассмотренных условиях эффект наиболее сильно проявлялся при температуре жидкого азота ( $T = 77$  К). С дальнейшим ростом температуры он уменьшался, и при  $T \geq 150$  К эффект сенсibilизации совсем исчезал.

В результате проведенных измерений установлено, что спектр сенсibilизированного внешним электрическим полем ИК-фоточувствительности в изучаемых структурах металл—InSe—металл при рассмотренных условиях охватывает диапазон длины волны света  $1,30 \leq \lambda \leq 3,50$  мкм и имеет ярковыраженный максимум при  $\lambda = 2,64$  мкм (рис. 1).

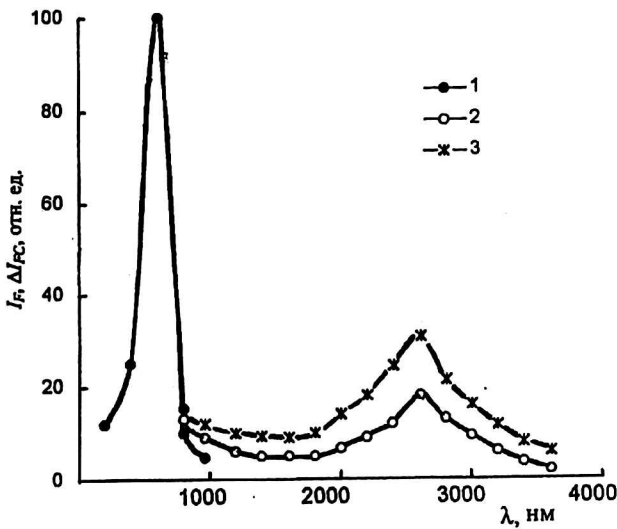


Рис. 1. Спектр фоточувствительности структур М—InSe—М до (1), после (2) и при одновременном воздействии (3) внешнего напряжения  $U > U_{lim}$ ;  $T = 77$  К

С ростом величины сенсibilизирующего внешнего напряжения (внешнего напряжения с  $U \geq U_{lim}$ ) амплитуда сенсibilизированной ИК-фоточувствительности ( $I_{FO} = I_{FI} - I_{FO}$ , где  $I_{FO}$  и  $I_{FI}$  величины фототока в ИК-области до и после воздействия внешнего напряжения с  $U \geq U_{lim}$ , соответственно) меняется немонотонно — сначала (при относительно малых  $U \geq U_{lim}$ ) увеличивается, а далее — при более больших  $U \geq U_{lim}$  уменьшается (рис. 2). С улучшением инжектирующей способности токовых контактов, при прочих одинаковых условиях, величина сенсibilизированного ИК-фотосигнала ( $I_{FC}$ ) увеличивается, а сам эффект сенсibilизации ИК-фоточувствительности проявляется более отчетливо.

Изучена также зависимость сенсibilизированной ИК-фоточувствительности ( $I_{FC}$ ) от интенсивности падающего на образец примесного (ИК) света ( $\Phi_c$ ). Оказалось, что зависимость сенсibilизированного ИК-фотосигнала от интенсивности примесной подсветки подчиняется

степенному закону ( $I_{FC} \sim \Phi_c^\alpha$ ), и с ростом  $\Phi_c$  значение  $\alpha$  уменьшается от 1,0 до  $\sim 0,1$  (рис. 3).

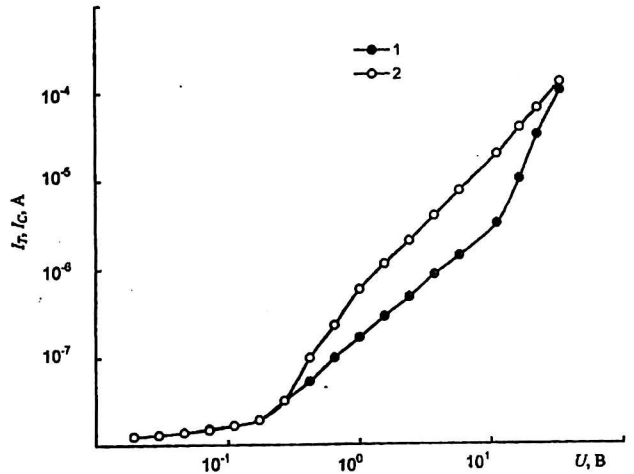


Рис. 2. Зависимость сенсibilизированной ИК-фоточувствительности ( $I_{FC}$ ) от сенсibilизирующего напряжения в структурах М—InSe—М;  $T = 77$  К;  $\lambda = 2,60$  мкм

1, 2 — обозначения те же, что на рис. 1

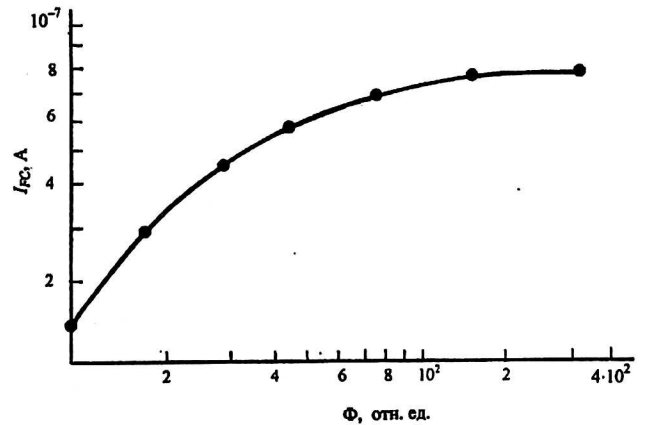


Рис. 3. Зависимость сенсibilизированной ИК-фоточувствительности от интенсивности примесного света в структурах М—InSe—М;  $T = 77$  К;  $\lambda = 2,60$  мкм

В ходе исследований кинетики (зависимости процессов установления стационарного значения сенсibilизированного ИК-фотосигнала и его релаксации при включении и выключении примесного света от времени, соответственно) сенсibilизированной ИК-фоточувствительности установлено, что в изучаемых кристаллах InSe она имеет ярко выраженный медленно-релаксирующий характер [11].

### Обсуждение

Анализ полученных результатов с учетом уже существующих в научной литературе данных об электронных свойствах высокоомных монокристаллов селенида индия позволяют видеть, что сенсibilизация ИК-фоточувствительности внешним электрическим полем в этих материалах

прежде всего обусловлена наличием уровней прилипания в их запрещенной зоне. В частности, предполагается, что при напряжениях, больших некоторого предельного, (где наблюдается обусловленная инжекцией нелинейность темновой ВАХ), через токовые контакты в объем изучаемых образцов инжектируются неравновесные носители заряда. В дальнейшем эти инжектированные носители заряда захватываются существующими в запрещенной зоне кристаллов InSe уровнями прилипания с глубиной залегания  $\epsilon_m = \epsilon_c - 0,34$  эВ [12].

При последующем (или одновременном) воздействии на такой образец (с уровнями прилипания и заполненных инжектированными носителями заряда) света из области примесного поглощения (ИК-излучением), подобно примесному полупроводнику, наблюдается ИК-(примесная)-фотопроводимость. Однако последняя уже обусловлена не с фотоионизацией примесных уровней, а опустошением заполненных инжекцией уровней прилипания. Длинноволновая граница этой дополнительной (сенсibilизированной внешним электрическим полем) ИК-фотопроводимости ограничивается энергетической глубиной залегания указанных уровней прилипания. На самом деле, найденное в ранних работах значение энергетической глубины залегания уровней прилипания  $\epsilon_l = \epsilon_c - 0,34$  эВ [12] хорошо коррелируется с длинноволновой границей ( $\lambda \approx 3,50$  мкм) обнаруженной сенсibilизированной ИК-фотопроводимости в изучаемых кристаллах InSe.

В рамках предложенной модели объясняются также зависимости сенсibilизированной ИК-фотопроводимости от интенсивности примесного света (см. рис. 2) и сенсibilизирующего внешнего напряжения (см. рис. 3) в изучаемых структурах. В частности, предполагается, что при относительно слабых интенсивностях примесного света, подобно имеющего место в обычных примесных фотопроводниках, число возбужденных светом носителей тока мало по сравнению с числом ловушек, которыми они могут быть вновь захвачены. Поэтому процесс захвата имеет мономолекулярный характер. При дальнейшем росте интенсивности примесного света процесс захвата все более приобретает бимолекулярный характер. Согласно сказанному, с ростом интенсивности примесного света  $I_{FC}$  увеличивается сначала линейно, а далее — сублинейно.

Что касается немоноотонной зависимости  $I_{FC}$  от приложенного к изучаемой структуре М—InSe—М внешнего напряжения с  $U \geq U_{lim}$ , то, скорее всего, рост  $I_{FC}$  с  $U$  при относительно небольших больших  $U \geq U_{lim}$  может объясняться одинаковой зависимостью концентрации свободных темновых и захваченных на ловушках носителей от приложенного внешнего напряжения. При больших значениях внешнего напря-

жения скорость роста концентрации захваченных на ловушках носителей отстает от скорости роста концентрации свободных носителей с внешним напряжением. Поэтому при больших значениях приложенного внешнего напряжения показатель степени зависимости  $I_{FC}(U)$  мала по сравнению с показателем степени зависимости  $I_T(U)$ . В результате при таких значениях приложенного внешнего напряжения с ростом  $U$  значение  $I_{FC}$  уменьшается.

Медленный характер процессов релаксации сенсibilизированной ИК-фотопроводимости в изучаемых кристаллах обусловлен пространственной неоднородностью материала и связан с наличием рекомбинационных барьеров, возникших в результате такой пространственной неоднородности исследуемых образцов. Эти предположения и объяснение подтверждаются выводами многочисленных работ по фотоэлектрическим явлениям в высокоомных монокристаллах InSe [1—12].

### Заключение

В высокоомных монокристаллах слоистого полупроводника селенида индия (InSe) при относительно низких температурах ( $T \leq 150$  К) можно сенсibilизировать ИК-фотопроводимость ( $1,25 \leq \lambda \leq 3,50$  мкм) внешним электрическим напряжением, большим некоторого предельного (при напряжениях, когда имеет место заметная инжекция). Это явление обусловлено наличием в запрещенной зоне изучаемого материала мелких уровней прилипания для основных носителей тока с энергетической глубиной залегания  $\epsilon_{the} = \epsilon_c - 0,34$  эВ. Пространственная неоднородность высокоомных кристаллов InSe при этом проявляет себя в медленном характере процессов релаксации (нарастания и спада) сенсibilизированного фотосигнала при включении и прекращении внешнего ИК-излучения.

### Литература

1. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г. Явление фото- и электропамяти в высокоомных кристаллах  $n$ -InSe// ФТП. 1975. Т. 9. № 9. С. 1690—1693.
2. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г. Аномальная фотопроводимость в монокристаллах электронного селенида индия// Там же. 1975. № 10. С. 1970—1976.
3. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г. Отрицательная остаточная фотопроводимость в монокристаллах селенида индия// Там же. № 12. С. 2382—2385.
4. Абдинов А. Ш., Аббасова П. Г., Гасанов Я. Г. Эффект фотоэлектрической утомляемости в монокристаллах селенида индия// Там же. 1983. Т. 14. № 4. С. 761—762.
5. Abdullaev G. B., Alieva M. Kh., Mamedova A. Z. Thermal and infra-red quenching of photoconductivity in  $n$ -InSe single crystals// Phys. Stat. Sol. 1968. V. 25. P. 75—78.
6. Абдинов А. Ш., Ахмедов А. А., Гасанов Я. Г., Магомедов А. З. Индуцированная собственной подсветкой примесная фотопроводимость в монокристаллах InSe со свойством остаточной фотопроводимости//ФТП. 1981. Т. 15. № 7. С. 1255—1258.

7. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г. О спектральной памяти в монокристаллах  $n$ -InSe// Изв. АН Аз. ССР. Сер. ФТ и МН. 1975. № 4. С. 91—96.

8. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф. Примесный фотоэффект в частично-неупорядоченных кристаллах InSe, легированных Dy// Неорганические материалы. 1994. Т. 30. № 7. С. 883—889.

9. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф. Накопление памяти слабых световых сигналов и спектральная память в монокристаллах InSe:Dy// Там же. 1995. Т. 31. № 6. С. 896—898.

10. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф., Рзаев Р. М., Эйвазова Г. Х. К вопросу о фотопроводимости перспективных для солнечной энергетики монокристаллов InSe:Dy// Проблемы энергетики. 2001. № 1. С. 66—71.

11. Шейнкман М. К., Шик А. Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках// ФТП. 1978. Т. 10. № 2. С. 209—251.

12. Абдинов А. Ш., Гасанов Я. Г., Мамедов Ф. И. ВАХ высокоомных монокристаллов слоистых соединений  $A^3B^6$ // Там же. 1982. Т. 16. № 6. С. 993—998.

## Sensitization of IR photosensitivity by electrical field in indium selenide layered crystals

A. Sh. Abdinov, N. A. Ragimova, 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 early studies have demonstrated, that the laminated crystals of the indium selenide (InSe) are highly sensitive photoconductors in a wide range of the temperature and light wavelength ( $0.35 \leq \lambda \leq 1.25 \mu\text{m}$ ). In the present report we have studied opportunities of expansion of a spectral range (sensitization) of the IR-photosensitivity of these crystals to the longer wavelengths. It is established, that in the high-resistance InSe samples with good injecting contacts in superlinear section of the CVC (where the appreciable injection takes place) at rather low temperatures ( $T \leq 150 \text{ K}$ ) a considerable photosensitivity occurs and in impurity area (up to  $3.50 \mu\text{m}$  with a maximum at  $\lambda = 2.64 \mu\text{m}$ ) a sensitization of the IR-photosensitivity for the investigated InSe single crystals by an electric field takes place. The dependence of this phenomenon on magnitude of the external electric field voltage, applied to the sample, as well as on the used contact materials, temperature, wavelength and intensity of an impurity light have been studied. It has been shown, that a sensitization of the IR-photosensitivity of the InSe single crystals by an electric field and the particular features of this phenomenon are conditioned with the presence of trapping levels of a various type and large-scale dimensional discontinuities. The values of fundamental parameters of trapping levels, as well as discontinuities have been estimated.*