

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СЕЛЕНИДА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А.Ш.АБДИНОВ, Р.Ф.БАБАЕВА, А.Т.БАГИРОВА,
Р.М.РЗАЕВ, Г.Х.ЭЙВАЗОВА

*Бакинский Государственный Университет
АЗ 1145, Баку, ул.З.Халилова, 23*

В широком диапазоне температур ($77 \div 400\text{K}$), длин волн ($0.30 \leq \lambda \leq 3.50 \mu\text{м}$) и интенсивности (вплоть до $\sim 10^2 \text{лк}$) света исследованы особенности некоторых электрических неустойчивостей: эффекта переключения и низкочастотных осцилляций тока различного происхождения в монокристаллах n-InSe, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ) типа Gd, Ho и Dy при $N_{\text{РЗЭ}} \approx 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1} \text{ат.}\%$. Предложены механизмы, которые качественно хорошо объясняют возникновение и особенности отдельных эффектов, а также влияние легирования РЗЭ на эти эффекты в изучаемом материале.

В ранних работах нами сообщалось об особенностях некоторых электрических [1, 2], фотоэлектрических [3, 4] и люминесцентных свойств [5, 6] монокристаллов селенида индия, легированных редкоземельными элементами (n-InSe<РЗЭ>) типа гадолия (Gd), гольмия (Ho) и диспрозия (Dy) при различных процентных содержаниях ($N_{\text{РЗЭ}}$) введенной примеси ($N_{\text{РЗЭ}} \approx 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1} \text{ат.}\%$). Данная работа посвящена исследованию особенностей электрических неустойчивостей: эффектов переключения и низкочастотных осцилляций тока различного происхождения в этих материалах.

Исследуемые кристаллы n-InSe<РЗЭ> выращивались методами Бриджмена и медленного охлаждения при постоянном градиенте температур вдоль слитка. Легирование их осуществлялось путем добавления измельченного металлического РЗЭ химической чистоты в шихту перед началом процесса синтеза [7].

Измерения проводились при температурах $77 \div 400\text{K}$ на экспериментальной установке, собранной на базе КСВУ-12, в состав которой входил МДР-12.

Брались структуры M-InSe<РЗЭ>M (где M - металл) как с поперечными (ток протекает в направлении перпендикулярно естественным слоям – вдоль оси «С» кристалла), так и продольными (ток протекает вдоль естественных слоев кристалла) токовыми контактами. В качестве контактного материала (M) служили металлический In, Sn или серебряная паста (Ag). Токовые контакты создавались путем припаивания In, Sn или нанесением Ag в открытом воздухе к исследуемому кристаллу. Расстояние между контактами в структурах с поперечными и продольными контактами составляли $0,1 \div 0,3$ и $2 \div 3 \text{мм}$, соответственно.

При исследовании эффекта переключения измерения проводились в режиме генератора тока ($R_{\text{H}} \gg R_{\text{обр}}$, где $R_{\text{обр}}$ и R_{H} – сопротивления образца и нагрузки, соответственно), а при изучении низкочастотных осцилляций - в режиме генератора напряжения ($R_{\text{H}} \ll R_{\text{обр}}$) [8, 9].

В результате проведенных исследований установлено, что при одинаковых значениях температур (T), интенсивностей (Φ) и длины волны света (λ) влияние легирования РЗЭ типа Gd, Ho и Dy на изучаемые электрические неустойчивости в кристаллах n-InSe определяется, в основном, уровнем легирования ($N_{\text{РЗЭ}}$), а не материалом введенной примеси.

В структурах M-InSe<РЗЭ>M с поперечными контактами, в которых доминирует эффект переключения со временем, за который совершается переход

структуры из высокоомного состояния в низкоомное (временем переключения), $\tau_{пер} \leq 10^{-8}$ с (эффект быстрого переключения), с ростом $N_{P3Э}$ значение электрического напряжения, необходимого для переключения ($U_{пер}$) сначала, хотя слабо, но все же заметно увеличивается относительно исходного (имеющего место в специально нелегированных кристаллах n-InSe), а далее уменьшается (Рис.1, кривые 1-3). В некоторых случаях при $N_{P3Э} \approx (10^{-2} \div 10^{-1})$ ат.% даже быстрое переключение заменяется медленным (с $\tau_{пер} \geq 1,0$ с) с областью отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) и гистерезисом на ВАХ.

В обоих типах структур $U_{пер}$ оказывается зависимым также от температуры и воздействия фотоактивного (создающего фотопроводимость) света. При этом ход кривых зависимостей $U_{пер}$ от температуры, длины волны и интенсивности света для кристаллов n-InSe<P3Э> хорошо коррелируется с ходом соответствующих зависимостей, установленных в специально нелегированных кристаллах n-InSe.

При низких температурах и малых интенсивностях фотоактивного света наблюдается также влияние легирования P3Э на зависимости $U_{пер}(\lambda)$ и $U_{пер}(T)$, которое с ростом T и Φ резко ослабляется.

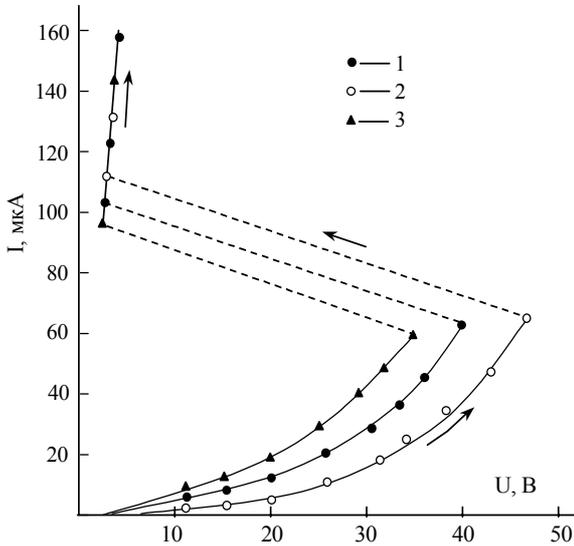


Рис.1.

Темновые ВАХ структур In-InSe<Dy>-In с поперечными контактами при различных уровнях легирования: N_{Dy} (ат.%): 1- 0; 2 - 10^{-4} ; 3 - 10^{-2} ; $T = 77$ К, $d = 10^{-2}$ см.

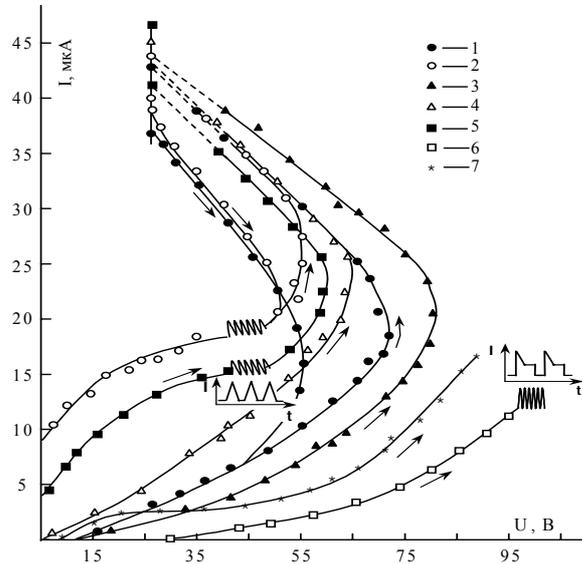


Рис.2.

Темновые (кривые 1,3,4) и световые (кривые 2,5-7) ВАХ структур In-InSe<Dy>-In с продольными контактами при различных условиях: N_{Dy} (ат.%): 1,2 - 0; 3 - 10^{-4} ; 4÷7 - 10^{-2} ; λ (мкм): 2, 5 - 0,95; 6 - 1,60; 7 - 0,95 и 1,60 одновременно; $T = 77$ К, $d = 2 \cdot 10^{-1}$ см.

В структурах M-InSe<P3Э>M с продольными контактами, в которых доминирует эффект медленного переключения с ростом $N_{P3Э}$ (Рис.2, кривые 1,3, 4), помимо напряжения переключения заметным образом меняются также параметры предпробойной части темновой и световой ВАХ. В этом случае, также как и в структурах M-InSe-M (Рис.2, кривая 2), при освещении собственным светом в предпробойной части ВАХ наблюдается область насыщения и генерация низкочастотных пилообразных колебаний тока (Рис.2, кривая 5), а на пороге пробоя (при $U \approx U_{пер}$) при воздействии примесного света с $1.50 \leq \lambda \leq 2.00$ мкм генерируются прямоугольные низкочастотные колебания тока со специфической начальной и конечной вспышкой (Рис.2, кривая 6). Установлено, что частота (f), амплитуда (I_0) и длительность (τ_0) обоих типов колебаний помимо температуры,

напряжения, интенсивности и длины волны света зависят также от $N_{P3Э}$ и при рассмотренных нами условиях с ростом $N_{P3Э}$ от нуля до 10^{-1} ат.% f меняется в пределах $100 \div 30$ Гц, а I_0 – в пределах $\sim 40 \div 100$ мкА. При этом f уменьшается, а I_0 увеличивается.

При одновременном освещении изучаемых структур собственным и относительно коротковолновым ($1.50 \leq \lambda \leq 2.00$ мкм) примесным светом исчезают как участок насыщения на предпробойной части ВАХ (Рис.2, кривая 7), так и генерации низкочастотных колебаний тока.

Для объяснения обнаруженных особенностей электрических неустойчивостей в монокристаллах n-InSe<P3Э> нами предлагается следующее объяснение. Как и сказано в [1-6], в естественных слоях специально нелегированных кристаллов n-InSe из-за неоднородного распределения исходных точечных дефектов различного типа могут образоваться крупномасштабные хаотически распределенные неоднородности. Поэтому некоторые фотоэлектрические свойства этих кристаллов при определенных условиях могут описываться на основе двухбарьерной модели полупроводника, состоявшего в целом из низкоомной матрицы с хаотически распределенными в этой матрице крупномасштабными высокоомными включениями [10] с учетом наличия в запрещенной зоне локальных центров различного типа (мелких уровней α -прилипания, медленных г- и быстрых S-центров рекомбинации) [11]. Предполагается, что при относительно больших значениях приложенного напряжения начинают заполняться мелкие уровни α -прилипания инжектированными носителями тока. При этом, одновременно, происходит и искривление края разрешенных энергетических зон под действием внешнего электрического поля. При определенном значении внешнего напряжения ($U \approx U_{пер}$) это искривление краев зон обеспечивает возможность коллективного опустошения заполненных инжектированными носителями мелких уровней α -прилипания путем туннелирования. В результате чего проводимость образца резко увеличивается, что, в свою очередь, приводит к росту температуры вследствие Джоулева нагрева и температурному сглаживанию неоднородного потенциального рельефа образца. Последнее приводит к перераспределению приложенного напряжения вдоль образца и электрическому пробое межслоевой среды, т. е. происходит эффект быстрого переключения. С другой стороны, при увеличении температуры образца происходит и термическое опустошение г-центров. Поэтому в темноте при опустошении мелких уровней α -прилипания происходит «вспышечный» рост тока через образец, а опустошение г-центров обуславливает его температурное гашение. По-видимому, с этим и связаны обнаруженные в образцах с поперечными контактами на пороге переключения нерегулярные (спонтанные) пульсации темнового тока. Однако, в связи с тем что в изучаемых кристаллах концентрация мелких уровней α -прилипания (n_t) значительно больше, чем концентрация г-центров медленной рекомбинации (n_r) [12], при незначительном увеличении приложенного напряжения нерегулярные пульсации темнового тока заменяются эффектом быстрого переключения.

В рамках сделанного предположения обнаруженное в изучаемых кристаллах влияние температуры и собственного света на эффект переключения может объясняться как сглаживанием потенциального рельефа естественных слоев, так и ускорением заполнения мелких уровней α -прилипания. При этом в результате изменения амплитуды потенциального рельефа происходит перераспределение приложенного напряжения между естественными слоями и межслоевой средой, поэтому наблюдаются зависимости $U_{пер}(\Phi)$, $U_{пер}(\lambda)$ и $U_{пер}(T)$.

С ростом $N_{P3Э}$ до $\sim 10^{-1}$ ат.% также меняется потенциальный рельеф (степень пространственной неоднородности) естественных слоев кристаллов $InSe\langle P3Э \rangle$, поэтому наблюдается зависимость $U_{пер}(N_{P3Э})$. Что касается замены быстрого переключения на медленное при относительно больших $N_{P3Э}$, то его можно объяснить тем, что при таких $N_{P3Э}$ за счет преобладания ковалентной связи между ионами P3Э, находящихся в соседних естественных слоях [13], степень анизотропии электрических свойств кристаллов в направлениях вдоль и перпендикулярно оси «С» значительно уменьшается и начинают преобладать те свойства, которые характерны вдоль естественных слоев в специально нелегированных кристаллах.

В ранних работах [14, 15] на основе подробных исследований показано, что пилообразные и прямоугольные низкочастотные колебания тока в специально нелегированных кристаллах $n-InSe$ обусловлены температурно-электрической неустойчивостью и индуцированной инжекцией примесным пробоем, соответственно. Что касается обнаруженного влияния легирования P3Э на них, то скорее всего, оно может объясняться изменением степени пространственного упорядочения кристаллов $n-InSe\langle P3Э \rangle$, увеличением концентрации мелких уровней α -прилипания, а также уменьшением энергетической глубины залегания их и γ -центров медленной рекомбинации за счет изменения взаимодействия донорно-акцепторных пар с ростом $N_{P3Э}$. В пользу правдоподобности этого предположения свидетельствует также обнаруженный нами ход температурной зависимости параметров низкочастотных осцилляций тока и уменьшение верхней границы температурного интервала их наблюдения с увеличением $N_{P3Э}$.

В рамках выдвинутых предположений исчезновение области насыщения ВАХ и низкочастотных осцилляций тока в структурах с продольными контактами при одновременном воздействии собственного и примесного света могут объясняться одновременным опустошением γ -центров рекомбинации и мелких уровней α -прилипания в случае относительно коротковолнового и длинноволнового примесного света, соответственно.

1. А.Ш.Абдинов, Р.Ф.Бабаева, *Неорганические материалы*, **30** (1994) 339.
2. А.Ш.Абдинов, Р.Ф.Бабаева, Р.М.Рзаев, Г.Х.Эйвазова, *Azerbaijan National Academy of Sciences, Transactions, series of physical-mathematical and technical sciences, physics and astronomy*, **XXIV** №5 (2004) 75.
3. А.Ш.Абдинов, Р.Ф.Бабаева, *Неорганические материалы*, **30** (1994) 883.
4. А.Ш.Абдинов, Р.Ф.Бабаева, Р.М.Рзаев, Г.Х.Эйвазова, *Проблемы энергетики*, №1 (2001) 66.
5. А.Ш.Абдинов, Н.М.Мехтиев, Р.Ф.Бабаева, Р.М.Рзаев, Р.М.Исмаилов, *Azerbaijan National Academy of Sciences, Transactions, series of physical-mathematical and technical sciences, physics and astronomy*, **XXIII** №5 (2003) 143.
6. А.Ш.Абдинов, Р.Ф.Бабаева, *Прикладная физика*, **5** (2004) 75.
7. А.М.Гусейнов, Т.И.Садыхов, *В сб. Электрофизические свойства полупроводников и плазмы газового разряда*, Изд.АГУ, Баку, (1989) 42.
8. С.А.Горяинов, И.Д.Абезгаус, *Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением*, Энергия, М., (1970) 250.
9. Г.А.Ахундов, А.Ш.Абдинов, Н.М.Мехтиев, А.Г.Кязым-заде, *ФТП*, **8** (1974) 2283.
10. М.К.Шейнкман, А.Я.Шик, *ФТП*, **10** (1976) 209.
11. С.М.Рывкин, *Фотоэлектрические явления в полупроводниках*, Наука, М., (1963) 494.
12. А.Ш.Абдинов, А.Г.Кязым-заде, *ФТП*, **10** (1976) 81.

13. С.З.Джафарова, Н.А.Рагимова, Г.И.Абуталыбов, А.М.Гусейнов, А.Ш.Абдинов, *ФТП*, **25** (1991) 983.
14. А.Ш.Абдинов, А.Г.Кязым-заде, А.А.Ахмедов, *ФТП*, **11** (1977) 2026.
15. А.Ш.Абдинов, А.Г.Кязым-заде, А.А.Ахмедов, *ФТП*, **11** (1977) 899.
16. С.Г.Калашников, В.И.Пустовойт, Г.С.Падо, *ФТП*, **4** (1970) 1255.

**NADİR TORPAQ ELEMENTLƏRİ İLƏ AŞQARLANMIŞ İNDIUM SELEN
MONOKRİSTALLARINDA ELEKTRİK DAYANIQSIZLIQLARININ XÜSUSİYYƏTLƏRİ**

Ə.Ş.ABDİNOV, R.F.BABAYEVA, A.T.BAĞIROVA, R.M.RZAYEV, G.H.EYVAZOVA

İşdə temperaturun (77-400K), işığın dalğa uzunluğu ($0.30 \leq \lambda \leq 3.50 \mu\text{m}$) və intensivliyinin çox geniş diapazonunda $N_{\text{NTE}} \approx 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$ at.% miqdarında Gd, Ho və Dy tipli nadir torpaq elementləri (NTE) ilə aşqarlanmış n-InSe monokristallarında bəzi elektrik dayanıqsızlıqlarının - çevirmə effektinin və jərəyanın müxtəlif tipli alçaq tezlikli ossilyasiyalarının xüsusiyyətləri tədqiq edilmişdir. Ayrı-ayrı effektlərin yaranmasını və xüsusiyyətlərini, eləcə də NTE ilə aşqarlanmanın təsirini kəmiyyətə yaxşı izah edə bilən mexanizmlər təklif olunmuşdur.

**FEATURES OF ELECTRICAL INSTABILITIES IN InSe SINGLE CRYSTALS,
DOPED BY RARE ELEMENTS**

A.Sh.ABDINOV, R.F.BABAEVA, A.T.BAGIROVA, R.M.RZAEV, G.Kh.EYVAZOVA

The features of some electrical instability such as – switching phenomenon and various types of low-frequency current oscillations in n-InSe monocrystals, doped by rare elements (RE) of Gd, Ho and Dy with $N_{\text{RE}} \approx 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$ at.% were investigated in a wide ranges of temperatures (77÷400K), wavelength ($0.30 \leq \lambda \leq 3.50 \mu\text{m}$) and light intensity (up to $\sim 10^2 \text{lx}$). The mechanisms were offered which qualitatively well explain occurrence and features of separate effects, and also influence of doping by RE on them in an investigated materials.

Редактор: А.Халилова