

УДК 621.315.592

**СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОБСТВЕННОЙ
ФОТОПРОВОДИМОСТИ КРИСТАЛЛОВ
МОНОСЕЛЕНИДА ИНДИЯ**

А.Ш.АБДИНОВ*, Р.Ф.БАБАЕВА, Р.М.РЗАЕВ**, Э.А.РАСУЛОВ***

Бакинский Государственный Университет,

**Азербайджанский Государственный Экономический Университет*

abdinov_axmed@yahoo.com

Babaeva-Rena@yandex.ru

Экспериментально обнаружены и исследованы некоторые специфические особенности собственной фотопроводимости кристаллов моноселенида индия (n-InSe).

Показано, что полученные при этом экспериментальные результаты могут удовлетворительно объясняться на основе частичной неупорядоченности изучаемых кристаллов, и позволяют рекомендовать указанный полупроводник в качестве перспективного материала для создания фоторезисторов с памятью и S-образной вольт-амперной характеристикой.

PACS: 71.20. Nr; 72.40 W

Ключевые слова: монокристалл, фотопроводимость, кинетика фотопроводимости, фототриггерный эффект, бистабильное переключение, напряжение переключения.

Моноселенид индия (InSe) привлекает внимание исследователей как полупроводник, в котором наблюдается весьма разнообразные уникальные электронные фотоэлектрические явления (остаточная-, аномальная- и отрицательная фотопроводимости, индуцированные примесные фотоэффекты, аддитивное накопление созданных воздействием последовательных слабых световых сигналов фотоэлектрической памяти, фототриггерного эффекта и т.п.) [3, 4], которые помимо чисто научных, представляют также значительное прикладное значение для различных областей электроники, а прежде всего, для оптоэлектроники. Однако вопрос о собственной фотопроводимости этого полупроводника оказывается более интересным, перспективным, а также нуждающимся в подробном экспериментальном исследовании.

В данной работе с целью выявления новых особенностей собственной фотопроводимости и возможностей практического применения для создания специфических фоторезисторов на основе этого полупроводника нами экспериментально исследованы зависимости основных параметров и характеристик собственной фотопроводимости кристаллов n-InSe от различных внешних и внутрикристаллических факторов.

Экспериментальные результаты

Брались чистые (специально не легированные) и легированные редкоземельными элементами монокристаллы n-InSe.

При 77 К удельное темновое сопротивление чистых образцов в зависимости от происхождения менялись в пределах $\sim 10^2 \div 10^8$ Ом·см.

Уровень легирования в кристаллах n-InSe<РЗЭ> варьировались в интервале $10^{-5} \div 10^{-1}$ ат. %.

В качестве РЗЭ использовались гадолиний (Gd), гольмий (Ho) и диспрозий (Dy).

Освещение исследуемых образцов осуществлено в поперечном режиме, т.е. световой поток был направлен перпендикулярно слоям кристалла. Измерения проводились при $77 \div 350$ К, освещении светом с $0.30 \leq \lambda \leq 2.50$ мкм и $\Phi \leq 5 \cdot 10^2$ Лк.

В результате проведенных измерений установлено, что при отсутствии фонового воздействия (когда исследуемый образец освещается лишь одним монохроматическим световым лучом) в обеих группах изучаемых кристаллов (как в чистых, так и в легированных) n-InSe, в области низких температур наблюдается значительная фоточувствительность, имеющая сложную спектральную характеристику - состоящей из коротковолнового положительного и длинноволнового отрицательного компонентов (рис. 1). С повышением температуры амплитуда обеих компонентов наблюдаемой фотопроводимости уменьшается. Наконец, при $T \geq 250$ К отрицательная фотопроводимость совсем исчезает, а положительная (собственная) фотопроводимость наблюдается вплоть до ~ 350 К.

Оказалось, что спектр собственной фотопроводимости в кристаллах моноселенида индия помимо температуры (Т), зависит также от величины исходного, т.е. имеющего место при 77 К, темнового удельного сопротивления ($\rho_{то}$), количественного (атомарно-процентного) содержания введенной примеси редкоземельного элемента (N), воздействия приложенного на исследуемый образец сильного электрического поля (Е).

Величина $\rho_{то}$ чистых кристаллов, в зависимости от происхождения и технологической предыстории исследуемого образца - меняется в пределах $\sim 10^2 \div 10^8$ Ом·см. Причем, как показывают предварительные контрольные измерения, по своим фотоэлектрическим свойствам чистые кристаллы этого полупроводника заметным образом разделяются на две группы - низкоомные ($\rho_{то} \leq 10^3$ Ом·см) и высокоомные ($\rho_{то} > 10^4$ Ом·см).

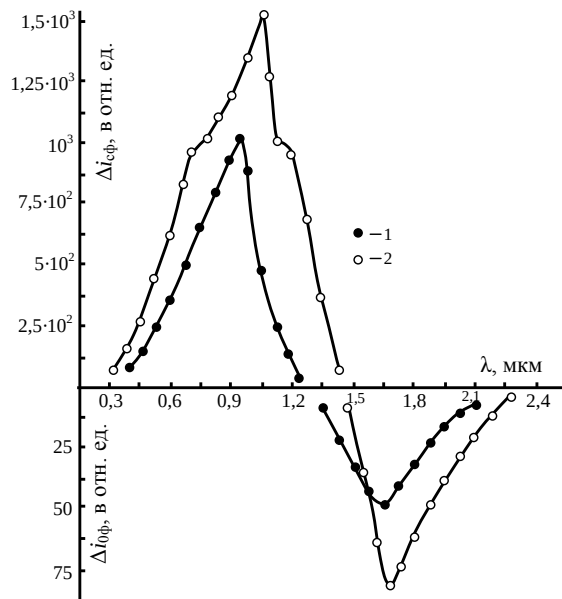


Рис.1. Спектральное распределение фотопроводимости кристаллов n-InSe при бесфоновом возбуждении. $T=77\text{ K}$; $\Phi_c=0.6\Phi_{cm}$; $E=40\text{ В/см}$; $\rho_{TO}, \text{ Ом}\cdot\text{см}$: 1 - $2\cdot 10^2$; 2 - 10^8

В низкоомных чистых кристаллах n-InSe спектр собственной фотопроводимости охватывает диапазон $0.40 \leq \lambda \leq 1.25\text{ мкм}$ и имеет ярко выраженный максимум при $\lambda_{cm} \approx 0.95\text{ мкм}$. Установлено, что структура, а также местонахождение основного максимума и границ (как коротковолнового, так и длинноволнового) этого спектра от температуры и воздействия электрического поля не зависит.

С ростом величины ρ_{TO} при низких температурах максимум и красная граница спектра собственной фотопроводимости постепенно смещаются в сторону более длинных волн. В кристаллах с $\rho_{TO}=10^8\text{ Ом}\cdot\text{см}$ при 77 K максимум собственной фотопроводимости наблюдается при $\lambda_{cm} \approx 1.02\text{ мкм}$, а красная граница его спектра соответствует $\lambda_{ck} \approx 1.40\text{ мкм}$.

С повышением температуры зависимости положения максимума (λ_{cm}) и красной границы (λ_{ck}) собственной фотопроводимости от величины ρ_{TO} сильно ослабевают. Наконец, при $T > 250\text{ K}$ подобные зависимости практически не наблюдаются.

При низких температурах с увеличением величины ρ_{TO} спектр собственной фотопроводимости со стороны коротких длин волн тоже расширяется. Вернее, коротковолновая граница его заметным образом растягивается в сторону более коротких длин волн (вплоть до 0.30 мкм). Кроме того, в высокоомных ($\rho_{TO} > 10^4\text{ Ом}\cdot\text{см}$) кристаллах на обеих (как на коротковолновом, так и на длинноволновом) ветвях спектра собственной фотопроводимости появляются слабовыраженные дополнительные максимумы (ступени).

В ходе проведенных нами экспериментальных исследований выявлено, что в высокоомных чистых кристаллах n-InSe при сильных электрических полях (при тех напряженностях электрического поля, под действием которых наблюдается заметная инжекция через токовые контакты в объем образца), с ростом E , при прочих одинаковых внешних условиях амплитуда фотоотклика (значение $\Delta i_{\text{сф}}$) уменьшается, а $\lambda_{\text{см}}$ и $\lambda_{\text{ск}}$ – слегка смещаются в сторону более коротких длин волн.

Основные параметры спектра собственной фотопроводимости (максимум и обе границы) в кристаллах моноселенида индия в области низких температур при слабом легировании ($N \leq 10^{-3}$ ат.%) их РЗЭ оказались значительным образом зависимыми также от содержания введенной примеси (N). В частности установлено, что с ростом N как $\lambda_{\text{см}}$, так и $\lambda_{\text{ск}}$ сначала (при $N \leq 10^{-3}$ ат.%) смещаются в сторону более длинных волн (почти до 1.05 мкм и 1.45 мкм, соответственно), а далее (при $N > 10^{-3}$ ат.%) – заново уменьшаясь, приближаются к значениям, имеющим место в чистых кристаллах с $\rho_{\text{то}} \approx 10^2$ Ом·см. При этом коротковолновая граница спектра собственной фотопроводимости тоже соответствующим образом меняет свое местоположение. Вернее, с ростом N , сначала она смещается в сторону более коротких длин волн (вплоть до 0.30 мкм), а далее возвращаясь обратно, приближается к имеющему место в чистых низкоомных кристаллах n-InSe.

Зависимость спектрального распределения собственной фотопроводимости от химической природы введенной примеси не обнаружена.

В ходе соответствующих измерений установлено, что при прочих одинаковых условиях, с ростом значения $\rho_{\text{то}}$, процесс релаксации фотоотклика значительным образом замедляется и наконец, в образцах с $\rho_{\text{то}} \geq 10^4$ Ом·см при $T \leq 250$ К наблюдается ярко выраженный эффект фотоэлектрической памяти [5] (рис.2). Причем кратность ($\kappa = \Delta i_{\text{оп}} / i_T$, где $\Delta i_{\text{оп}}$ – величина квазитемнового тока через 30 с после прекращения воздействия света, а i_T – исходное стационарное значение темнового тока при данной температуре) и длительность времени запоминания ($\tau_{\text{оп}}$) остаточной фотопроводимости (ОП) с ростом $\rho_{\text{то}}$ увеличиваются, с ростом N – меняются немонотонно, а с повышением T и E – уменьшаются. При оптимальных условиях (при $T = 77$ К, в слабых электрических полях, при умеренных освещенностях монохроматическим светом с $\lambda = \lambda_{\text{см}}$, в образцах чистых кристаллов с $\rho_{\text{то}} \approx 10^7 \div 10^8$ Ом·см или в образцах легированных кристаллов с $N \approx 10^{-3}$ ат.%) кратность ОП составляет $\sim 10^3 \div 10^4$, а $\tau_{\text{оп}}$ – достигает до $\sim 10^5 \div 10^6$ с.

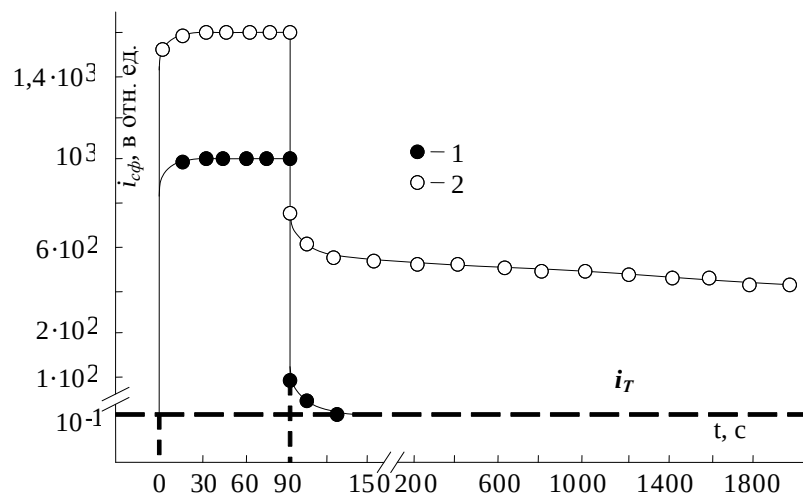


Рис. 2. Кинетика собственной фотопроводимости кристаллов n-InSe.
 $T=77\text{ K}$; $\Phi_c=0.6\Phi_{cm}$, $\lambda=0.95\text{ мкм}$, $E=30\text{ В/см}$;
 ρ_{TO} , Ом·см: $1 - 2 \cdot 10^2$; $2 - 10^8$

Оказалось, что созданные последовательными слабыми световыми импульсами остаточная фотопроводимость ($\Delta i_{оп}$) почти аддитивно складываются.

При рассмотренных нами условиях и уровнях легирования химическая природа примесных материалов не влияет также на кинетику собственной фотопроводимости.

В результате проведенных нами экспериментальных измерений установлено, что параметры эффекта переключения (параметры переключателей с «S»-образной ВАХ на основе высокоомных кристаллов этого полупроводника [1, 6]) значительным образом зависят от воздействия собственного света и с ростом интенсивности последнего (Φ_c), напряжение переключения ($U_{пер}$) – напряжение, при котором образец скачком ($\tau \leq 10^{-8}\text{ с}$) переходит из исходного высокоомного состояния в запоминающее низкоомное, уменьшается (наблюдается «фототриггерный эффект» - управление величины $U_{пер}$ воздействием света) [6] (рис.3). При этом, величина $U_{пер}$ управляется также длиной волны света. Причем зависимость $U_{пер}(\lambda)$ хорошо коррелируется со спектром собственной фотопроводимости.

Обсуждение результатов

Все обнаруженные выше нами экспериментальные результаты качественно удовлетворительно могут объясняются на основе пространственной неоднородностью кристаллов моноселенида индия (с наличием в них

хаотических крупномасштабных дефектов), в результате которого на свободных энергетических зонах возникают рекомбинационные и дрейфовые барьеры [7], а исследуемый образец ведет себя как двухфазовая система, состоящая в целом из низкоомной матрицы с хаотическими высокоомными включениями и описывается двухбарьерной энергетической моделью [8].

Показано, что хотя высокоомность, технологические трудности получения поверхности с большой площадью, а также высокая себестоимость, ограничивают использования этого полупроводника для серийного изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии в электрическую (солнечных элементов), однако подходящее значение ширины запрещенной зоны ($\epsilon_g \approx (1.02 \div 1.05)$ эВ) и спектральный диапазон собственной фотопроводимости

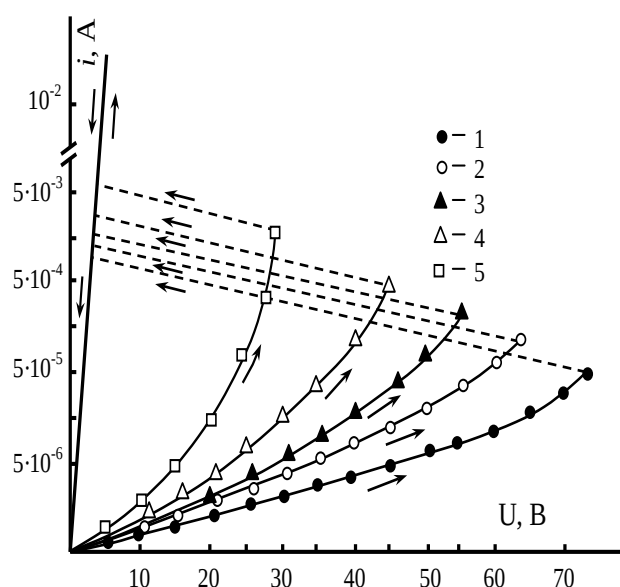


Рис. 3. ВАХ кристаллов n-InSe с эффектом переключения при различных освещенностях. $T=77$ K; $\rho_{TO}=10^8$ Ом·см, $\lambda=0.95$ мкм; Φ_c/Φ_{cm} : 1 - 0; 2 - 0.2; 3 - 0.4; 4 - 0.6; 5 - 1.0

($0.30 \leq \lambda \leq 1.45$ мкм), обладание заметной высокотемпературной (вплоть до ~ 350 K) фоточувствительности и фотоэлектрической памяти, слоистая кристаллическая структура [9], высокоомность (ρ_{TO} — достигает до $\sim 10^8$ Ом·см) [10], делают его перспективным материалом для опто- [11] и фотоэлектроники [12], вернее, для изготовления многофункциональных фотоприемников света со специфическими функциональными особенностями и способностью работать во всей видимой, а также в ближних частях УФ- и ИК-областей оптического спектра.

Заключение

Проведенные нами экспериментальные исследования показывают, что монокристаллы селенида индия (n-InSe):

- по своим фотоэлектрическим свойствам разделяются на две группы – низкоомные ($\rho_{\text{ТО}} \leq 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и высокоомные ($\rho_{\text{ТО}} > 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$);
- спектр собственной фотопроводимости в высокоомных кристаллах охватывает более широкий диапазон длины волны ($0.30 \div 1.50 \text{ мкм}$);
- обладанием свойством фотоэлектрической памяти и фототриггерного эффекта;
- позволяет рекомендовать этот полупроводник как перспективный рабочий материал для создания не требующего специального охлаждения фоторезисторов с S-образной вольт-амперной характеристикой, а также свойством памяти и накопления воздействию последовательных слабых световых импульсов во всем видимом и ближнем ИК-диапазоне оптического спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев М.Ю., Дмитриев А.И., Зюганов А.Н., Ковалюк З.Д., Лазаренко В.И., Лашкарев Г.В., Смиртенко П.С. Отрицательная дифференциальная проводимость монокристаллов InSe в диапазоне температур 4.2-30 К. // ФТП. 1990, т.24, №8, с.1413-1416.
2. Драпак С.И., Ковалюк З.Д. Экспериментальное исследование влияния ароматических углеводов на удельное сопротивление селенида индия. // ФТП. 2007, т.41, №10, с. 1214-1217.
3. Абдинов А.Ш. Электронные явления в неоднородных полупроводниках типа соединений $A^{III}B^{VI}$ со слоистой структурой. Автореферат дисс. докт. физ.-мат.н. Баку, 1997, 48 с.
4. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф. Накопление памяти слабых световых сигналов и спектральная память в монокристаллах InSe<Dy>. // Неорганические материалы. 1995, т.31, № 7, с. 896-898.
5. Абдинов А.Ш., Кязым-заде А.Г. Явление фото- и электропамяти в высокоомных монокристаллах n-InSe. // ФТП, 1975, т.9, №9, с. 1690-1693.
6. Абдинов А.Ш., Акперов Я.Г., Мамедов В.К., Салаев Эль.Ю. Фототриггерный эффект в монокристаллах селенидов индия и галлия. // ФТП, 1980, т. 14, № 4, с. 749-753.
7. Бабаева Р.Ф. Особенности электронных явлений в частично-неупорядоченных полупроводниках типа легированных редкоземельными элементами кристаллов $A^{III}B^{VI}$ со слоистой структурой и гетероструктурах на их основе. Автореферат дисс. докт. физ.-мат.н. Баку, 2009, 38 с.
8. Шейнкман М.К., Шик А.Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках // ФТП. 1976, т.10, №2, с. 209-232.
9. Медведева З.С. Халькогениды элементов III Б подгруппы периодической системы. - М.: Наука, 1968.
10. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Амирова С.И., Рзаев Р.М. Влияние температуры и легирования редкоземельными элементами на подвижность носителей тока в кристаллах моноселенида индия // ФТП. 2013, т.47, в.8, с. 1009-1013.
11. Анисимова И.Д., Викулин И.М., Заитов Ф.А., Курмашев Ш.Д. Полупроводниковые фотоприемники. Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон спектра. М.: Радио и связь, 1984, с.216.
12. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. М.: Физматкнига, 2011, с.448.

İNDİUM MONOSELENİDİ KRİSTALLARININ MƏXSUSİ FOTOKEÇİRİCİLİYİNİN SPESİFİK XÜSUSİYYƏTLƏRİ

Ə.Ş.ABDİNOV, R.F.BABAYEVA, R.M.RZAYEV, E.A.RƏSULOV

XÜLASƏ

Təcrübi olaraq indium monoselenidi (n-InSe) kristallarında məxsusi fotokeçiriciliyin əsas parametr və xarakteristikalarının müxtəlif xarici və kristaldaxili amillərdən asılılığı tədqiq olunmuşdur.

Göstərilmişdir ki, alınmış nəticələr tədqiq olunan kristalların qismən nizamsızlığı əsasında izah oluna bilər və bu yarımkeçiricidən spesifik xüsusiyyətli fotoelektrik yaddaşlı, fototrigger effektini nümayiş etdirən və ardıcıl zəif işıq siqnallarının təsirini toplayan fotorezistorların düzəldilməsi üçün işçi material kimi istifadə etmək olar.

Açar sözlər: monokristal, fotokeçiricilik, fotokeçiriciliyin kinetikasi, fototrigger effekti, bistabil çevrilmə, çevrilmə gərginliyi.

SPECIFIC PECULIARITIES OF INTRINSIC PHOTOCONDUCTIVITY IN CRYSTALS OF INDIUM MONOSELENIDES

A.Sh.ABDINOV, R.F.BABAYEVA, R.M.RZAYEV, E.A.RASULOV

SUMMARY

In this paper, the results received at experimental research of dependences of key parameters and characteristics of intrinsic photoconductivity on various factors in indium monoselenide (n-InSe) crystals are presented.

The received experimental results are explained on the basis of partial disorder of the investigated semiconductor and testify to possibility of manufacturing on the basis of n-InSe crystals multifunctional photodetectors of light – photoresistors, phototriggers with memory and possibilities of accumulation of influence of successive weak light signals.

Key words: monocrystals, photoconductivity, kinetics, phototrigger effect, bistable switching, switching tension.

Принято в редакцию: 26.01.2015 г.

Подписано к печати: 20.04.2015 г.