

УДК 621.315.592

Многофункциональные фотоприемники на основе кристаллов n -InSe

А. Ш. Абдинов, Н. М. Мехтиев, Р. Ф. Бабаева, Р. М. Рзаев

Экспериментально исследованы зависимости основных параметров и характеристик собственной фотопроводимости от различных факторов в монокристаллах моноселенида индия (n -InSe). Показано, что полученные экспериментальные результаты могут удовлетворительно объясняться на основе частичной неупорядоченности кристаллов этого полупроводника и позволяют рекомендовать их в качестве подходящего материала для создания многофункциональных фотоприемников света — фоторезисторов со свойством фотозлектрической памяти и накопления воздействия последовательных слабых световых сигналов.

PACS: 71.20. Nr; 72.40 W

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

Введение

Моноселенид индия InSe, помимо своих других уникальных свойств [1, 2], привлекает внимание исследователей также как полупроводник, в котором наблюдается весьма разнообразные уникальные фотозлектрические явления (остаточная, аномальная и отрицательная фотопроводимости, индуцированные примесные фотоэффекты, аддитивное накопление созданных воздействием последовательных слабых световых сигналов фотозлектрической памяти и т. п.) [3, 4], которые, помимо чисто научных, представляют также значительное прикладное значение для различных областей электроники и, прежде всего, для оптоэлектроники.

Несмотря на обладание такими разнообразными фотозлектрическими свойствами, вопрос о собственной фотопроводимости этого полупроводника оказывается не менее интересным и перспективным, а потому нуждающийся в подробном экспериментальном исследовании.

В данной работе с целью выявления новых особенностей собственной фотопроводимости и возможностей создания многофункциональных фотоприемников света на основе этого полупроводника нами экспериментально исследованы зависимости основных параметров и характеристик собственной фотопроводимости кристаллов n -InSe от внешних и внутрикристаллических факторов.

Экспериментальные результаты

В результате проведенных экспериментальных 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. Она состоит из коротковолнового положительного и длинноволнового отрицательного компонентов (рис. 1). С повышением температуры амплитуда обеих компонентов 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 исследуемых кристаллах моноселенида индия, помимо температуры T , зависит также от величины исходного, т. е. имеющего место при 77 К темнового удельного сопротивления (ρ_{TO}), количественного (атомарно-процентного) содержания введенной примеси (N), воздействия сильного электрического поля (E). Величина ρ_{TO} чистых кристаллов, в зависимости от происхождения и технологической предыстории исследуемого образца, меняется в пределах $10^2 \div 10^8$ Ом·см.

Абдинов Ахмед Шахвелел о., профессор, зав. кафедрой. Бакинский Государственный университет. Азербайджанская Республика, AZ 1145, г. Баку, ул. Академика Захид Халилова, 23. E-mail: abdinov-axmed@yandex.ru

Мехтиев Низами Микаил о., профессор, зав. кафедрой. Азербайджанская Государственная нефтяная академия. Азербайджанская Республика, AZ 1148, г. Баку, Проспект Азадлыг, 20.

Бабаева Рена Фикрет к., профессор.

Рзаев Ровнаг Мирза о., зав. кафедрой. Азербайджанский Государственный экономический университет. Баку, Азербайджан, AZ 1145, г. Баку, ул. З. Халилова, 23. Тел. (994 12) 439-73-73. E-mail: Babaeva-Rena@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27 октября 2014 г.

© Абдинов А. Ш., Мехтиев Н. М., Бабаева Р. Ф., Рзаев Р. М., 2014

Причем, как показывают предварительные измерения, по своим фотоэлектрическим свойствам чистые кристаллы этого полупроводника разделяются на две группы, а именно низкоомные ($\rho_{TO} \leq 10^3$ Ом·см) и высокоомные ($\rho_{TO} > 10^4$ Ом·см).

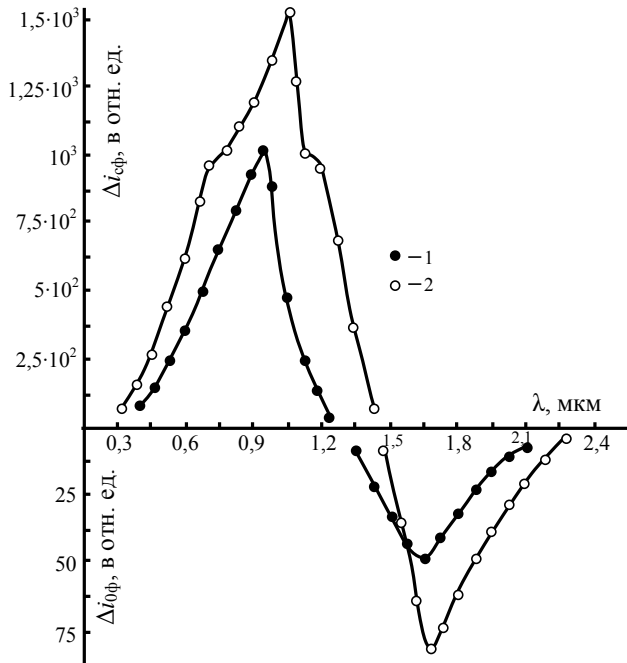


Рис. 1. Спектр фотопроводимости кристаллов *n*-InSe при бесфоновом возбуждении $T = 77$ К; $\Phi_e = 0,6\Phi_{cm}$; $E = 40$ В/см; ρ_{TO} , Ом·см: 1 — $2 \cdot 10^2$; 2 — 10^8

В низкоомных кристаллах спектр собственной фотопроводимости охватывает диапазон длины волны $0,40 \leq \lambda \leq 1,25$ мкм и имеет максимум при $\lambda_{cm} \approx 0,95$ мкм. Установлено, что структура, а также местонахождение основного максимума и границ (как коротковолнового, так и длинноволнового) спектра не зависит от температуры и воздействия гальванически приложенного внешнего электрического поля.

С ростом ρ_{TO} при низких температурах максимум и красная граница спектра собственной фотопроводимости постепенно смещаются в сторону более длинных волн. В кристаллах с $\rho_{TO} = 10^8$ Ом·см при 77 К максимум собственной фотопроводимости наблюдается при $\lambda_{cm} \approx 1,02$ мкм, а красная граница его спектра соответствует $\lambda_{ck} \approx 1,40$ мкм.

С повышением температуры зависимости положения максимума (λ_{cm}) и красной границы (λ_{ck}) собственной фотопроводимости от величины ρ_{TO} сильно ослабевают. При $T > 250$ К подобные зависимости почти не наблюдаются.

При низких температурах с увеличением ρ_{TO} спектр собственной фотопроводимости со стороны коротких длин волн тоже расширяется, причем коротковолновая граница его растягивается в сторону более коротких длин волн (вплоть до 0,30 мкм).

Кроме того, в высокоомных кристаллах на обеих (как на коротковолновой, так и на длинноволновой) ветвях спектра собственной фотопроводимости появляются слабовыраженные дополнительные максимумы (ступени).

В ходе проведенных экспериментальных исследований выявлено, что в высокоомных кристаллах при сильных электрических полях с ростом E (при прочих одинаковых условиях) амплитуда фотоотклика Δi_{cf} уменьшается, а λ_{cm} и λ_{ck} слегка смещаются в сторону более коротких длин волн.

Основные параметры спектра собственной фотопроводимости (максимум и обе границы) в исследуемых кристаллах моноселенида индия оказались значительным образом зависимыми также от содержания введенной примеси N . В частности, установлено, что с ростом N как λ_{cm} , так и λ_{ck} 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. % вновь уменьшаются и приближаются к значениям, имеющим место в чистых кристаллах с $\rho_{TO} \approx 10^2$ Ом·см. При этом коротковолновая граница спектра собственной фотопроводимости тоже соответствующим образом меняет свое место: с ростом N она сначала смещается в сторону более коротких длин волн (вплоть до 0,30 мкм), а далее возвращается обратно, приближаясь к значению, имеющему место в чистых низкоомных кристаллах *n*-InSe. Зависимость спектрального распределения собственной фотопроводимости от химической природы введенной примеси не обнаружена.

Считаем интересными также результаты, полученные при исследованиях зависимости кинетики собственной фотопроводимости от величины исходного темнового удельного сопротивления ρ_{TO} , уровня легирования (т. е. значения N), температуры T и напряженности электрического поля E . В частности, установлено, что при прочих одинаковых условиях с ростом ρ_{TO} процесс релаксации фотоотклика замедляется. При этом в образцах с $\rho_{TO} \geq 10^4$ Ом·см при $T \leq 250$ К наблюдается ярко выраженный эффект фотоэлектрической памяти [5] (рис. 2). Отметим, что кратность $k = \Delta i_{OP} / i_T$ (Δi_{OP} — величина квазitemнового тока через 30 с после прекращения воздействия света, а i_T — исходное стационарное значение темнового тока при данной температуре) и длительность времени запоминания τ_{OP} остаточной фотопроводимости (ОП) с ростом ρ_{TO} увеличиваются, с ростом N — меняются немонотонно, а с повышением T и E — уменьшаются. При оптимальных условиях кратность ОП составляет $\sim 10^3 \div 10^4$, а τ_{OP} — достигает до $\sim 10^5 \div 10^6$ с (при $T = 77$ К, в слабых электрических полях, при умеренных освещенностях монохроматическим светом с $\lambda = \lambda_{cm}$, в образцах чис-

тых кристаллов с $\rho_{TO} \approx 10^7 \div 10^8$ Ом·см или в образцах легированных кристаллов с $N \approx 10^{-3}$ ат. %).

Оказалось, что созданные последовательными слабыми световыми импульсами остаточная фотопроводимость $\Delta i_{OП}$ почти аддитивно складываются. При рассмотренных нами условиях и уровнях легирования химическая природа материалов тоже не влияет на кинетику собственной фотопроводимости.

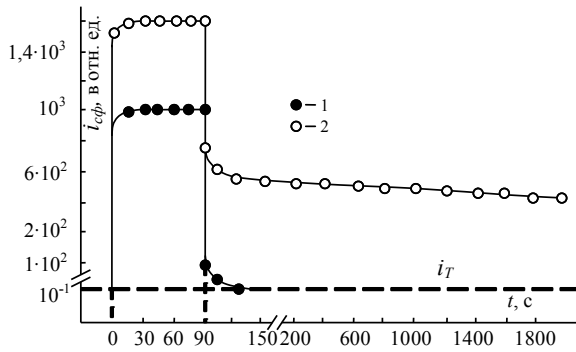


Рис. 2. Кинетика собственной фотопроводимости кристаллов *n*-InSe. $T = 77$ К; $\Phi_c = 0,6\Phi_{см}$, $\lambda = 0,95$ мкм, $E = 30$ В/см; ρ_{TO} , Ом·см: 1 — $2 \cdot 10^2$; 2 — 10^8

Экспериментально также 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 $U_{пер}$ (т. е. напряжение, при котором образец скачком за $\tau \leq 10^{-8}$ с переходит из исходного высокоомного состояния в запоминающее низкоомное) уменьшается. Другими словами, 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.

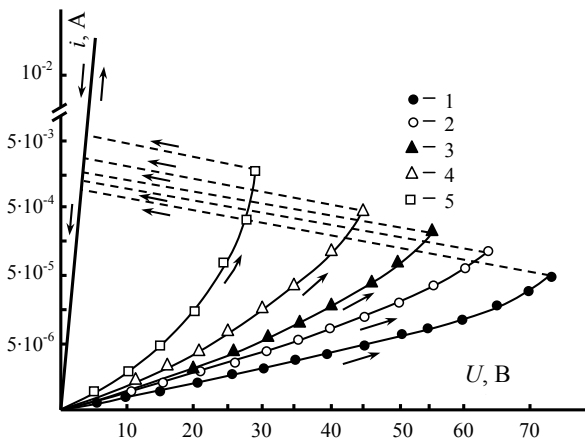


Рис. 3. ВАХ кристаллов *n*-InSe с эффектом переключения при различных освещенностях. $T = 77$ К; $\rho_{TO} = 10^8$ Ом·см, $\lambda = 0,95$ мкм; $\Phi_c/\Phi_{см}$: 1 — 0; 2 — 0,2; 3 — 0,4; 4 — 0,6; 5 — 1,0

Обсуждение результатов

Все обнаруженные выше экспериментальные результаты качественно удовлетворительно объясняются пространственной неоднородностью кристаллов моноселенида индия (с наличием в них хаотических крупномасштабных дефектов). Здесь 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].

Конечно, высокоомность и 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 этот полупроводник является перспективным материалом для опто- [11] и фотоэлектроники [12], точнее, для изготовления многофункциональных фотоприемников света (фотоприемников, которые при выборе соответствующих режимов могут успешно выполнить функции фоторезисторов, фототриггеров, элементов фотоэлектрической памяти и накопителей воздействию последовательных слабых световых импульсов), способных работать во всей видимой, а также в ближних частях УФ- и ИК-областей оптического спектра. Для этого моноселенид индия InSe имеет подходящее значение ширины запрещенной зоны ($\varepsilon_g \approx 1,02 \div 1,05$ эВ) и спектральный диапазон собственной фотопроводимости ($0,30 \leq \lambda \leq 1,45$ мкм), обладает заметной высокотемпературной (вплоть до ~ 350 К) фоточувствительностью и фотоэлектрической памятью. Он обладает слоистой кристаллической структурой [9], а его высокоомность достигает значений $\sim 10^8$ Ом·см) [10].

Заключение

Проведенные нами экспериментальные исследования позволяют делать следующие основные выводы.

– Монокристаллы селенида индия в зависимости от происхождения и предыстории исследуемого образца имеют различные исходные значения темнового удельного сопротивления ($\rho_{TO} \approx 10^2 \div 10^8$ Ом·см) и по своим фотоэлектрическим свойствам разделяются на две группы: низкоомные ($\rho_{TO} \leq 10^3$ Ом·см) и высокоомные ($\rho_{TO} > 10^4$ Ом·см).

– В отличие от низкоомных, в высокоомных кристаллах спектр собственной фотопроводимости охватывает более широкий диапазон длины волны (0,30÷1,50 мкм), наблюдается фотоэлектрическая память и фототриггерный эффект во всем диапазоне fotocувствительности.

– Высокоомные кристаллы этого полупроводника могут быть перспективными рабочими материалами для создания неохлаждаемых фоторезисторов с S-образной вольт-амперной характеристикой, а также обладающими 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. и др. // ФТП. 1990. Т. 24. № 8. С. 1413.
2. Драпак С. И., Ковалюк З. Д. // ФТП. 2007. Т. 41. № 10. С. 1214.

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.

4. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф. // Неорганические материалы. 1995. Т. 31. № 7. С. 896.

5. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г. // ФТП, 1975. Т. 9, № 9. С. 1690.

6. Абдинов А. Ш., Акперов Я. Г., Мамедов В. К. и др. // ФТП, 1980. Т. 14. № 4. С. 749.

7. Бабаева Р. Ф. Автореферат дисс. докт. физ.-мат.н. Баку. 2009.

8. Шейнкман М. К., Шик А. Я. // ФТП, 1976. Т. 10, № 2. С. 209.

9. Медведьева З. С. Халькогениды элементов III Б подгруппы периодической системы. — М.: Наука, 1968.

10. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф., Амирова С. И. и др. // ФТП. 2013. Т. 47. В. 8. С. 1009.

11. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Заитов Ф. А. и др. Полупроводниковые фотоприемники. Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон спектра. — М.: Радио и связь. 1984.

12. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига. 2011.

Multifunctional photodetectors based on the n-InSe crystals

A. Sh. Abdinov¹, N. M. Mehtiyev², R. F. Babayeva³, and R. M. Rzayev³

¹Baku State University

23 Z. Khalilov str., Baku, AZ 1145, Azerbaijan Republic

E-mail: abdinov-axmed@yandex.ru

²Azerbaijan State Oil Academy

20 Azadlyg av., Baku, AZ 1148, Azerbaijan Republic

³Azerbaijan State Economic University

23 Z. Khalilov str., Baku, AZ 1145, Azerbaijan Republic

E-mail: Babaeva-Rena@yandex.ru

Received October 27, 2014

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.

PACS: 71.20. Nr; 72.40 W

Keywords: monocrystals, photoconductivity, kinetics, phototrigger effect, bistable switching, switching tension.

References

1. M. Yu. Gusev, A. I. Dmitriev, A. N. Zyuganov, et al., *Semiconductors* **24**, 1413 (1990).
2. S. I. Drapak and Z. D. Kovalyuk, *Semiconductors* **41**, 1214 (2007).
3. A. Sh. Abdinov, Doctor Dissertation on Phys. and Math. (Baku, 1997).
4. A. Sh. Abdinov and R. F. Babaeva, *Anorganic Materials* **31**, 896 (1995).
5. A. Sh. Abdinov and A. G. Kyazym-zade, *Semiconductors* **9**, 1690 (1975).
6. A. Sh. Abdinov, ya. G. Akperov, V. K. Mamedov, et al., *Semiconductors* **14**, 749 91980).
7. R. F. Babaeva, Doctor Dissertation on Phys. and Math. (Baku, 2009).
8. M. K. Sheinkman and A. Ya. Shik, *Semiconductors* **10**, 209 (1976).
9. Z. S. Medved'eva, *Chalcogenides of Elements III B* (Nauka, Moscow, 1968) [in Russian].
10. A. Sh. Abdinov, R. F. Babaeva, S. I. Amirova, et al., *Semiconductors* **47**, 1009 (2013).
11. I. D. Anisimova, I. M. Vikulin, F. A. Zaitov, et al., *Semiconductor Photoreceivers* (Radio Svyaz', Moscow, 1984) [in Russian].
12. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes.* (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].