

УДК 621.315.592

Приемники ИК-излучения на основе моноселенида галлия

А. Ш. Абдинов, С. И. Амирова, Р. Ф. Бабаева, Н. А. Рагимова

Экспериментально изучены отрицательная фотопроводимость и инфракрасное гашение собственной фотопроводимости в чистых и легированных редкоземельными элементами монокристаллах моноселенида галлия (p -GaSe). Показано, что оба явления в этом полупроводнике обусловлены наличием в его запрещенной зоне двух типов рекомбинационных центров — быстрых и медленных, а их запоминающий характер связан с пространственной неоднородностью материала. Предполагается возможность создания на основе чистых и легированных кристаллов p -GaSe различного типа инфракрасных фоторезисторов.

PACS: 71.20. Nr; 72.40 W

Ключевые слова: кристаллы, локальные энергетические уровни, отрицательная фотопроводимость, фоновое, инфракрасное, излучение, гашение.

Введение

Регистрация слабого инфракрасного (ИК) излучения является одной из основных проблем фотоэлектроники. При наличии фонового излучения этот вопрос еще больше усложняется, и при этом применение обычных фоторезисторов, принцип работы которых опирается на изменение проводимости полупроводника под действием света, значительным образом ограничивается. Все сказанное требует расширение поиска новых полупроводниковых материалов и принципиально новых методов для создания фотоприемников, способных регистрировать слабое ИК-излучение.

Анализ существующих к настоящему времени научных работ позволяет сказать, что одним из перспективных в этом аспекте материалов может явиться монокристалл моноселенида галлия (GaSe), ширина запрещенной зоны у которого при 77 К составляет $\sim 2,0$ эВ и который обладает высокой собственной фотопроводимостью во всем видимом диапазоне оптического спектра [1].

Сложный энергетический спектр, вернее, существование различных локальных уровней запрещенной зоны [2] способствует также обнаружению в этом полупроводнике при низких температурах ($T \leq 250$ К) специфических примесных фотоэлектрических явлений (отрицательной фотопроводимости, оптического или инфракрасного гашения собственной фотопроводимости, примесной фотопроводимости [3], индуцированной фоновой подсветкой или внешним электрическим полем), за счет которых можно эффективно передвинуть красную границу спектрального распределения фоточувствительности в более длинноволновую сторону, а именно, в ближнюю ИК-область оптического спектра.

Хотя к настоящему времени в некоторых работах [1, 2] уже отмечено обнаружение отрицательной фотопроводимости (ОФП) и ИК-гашения собственной фотопроводимости в кристаллах моноселенида галлия, однако подробные систематические исследования этих фотоэлектрических явлений не проводились, а также фактически не выявлены возможности использования кристаллов этого полупроводника для создания фотоприемников для различных областей ИК-диапазона спектра.

Целью данной работы было комплексное экспериментальное исследование отрицательной фотопроводимости и инфракрасного гашения собственной фотопроводимости в чистых (т. е. специально не легированных) и легированных различными редкоземельными элементами (РЗЭ) монокристаллах моноселенида галлия (p -GaSe), полученных методом медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры вдоль слитка и легированных из твердой фазы [3]. Данные исследования, как предполагалось, должны были

Абдинов Ахмед Шахвелед о., проф., заведующий кафедрой¹.
Амирова Сабина Икрам кызы, преподаватель кафедры¹.
Бабаева Рена Фикрет к., профессор кафедры Физики и химии².
Рагимова Наиля Али кызы, преподаватель кафедры Физической электроники¹.

¹Бакинский Государственный Университет.
Азербайджан, АЗ 1145, г. Баку, ул. З. Халилова, 23.
Тел. (994 12) 439-73-73.

E-mail: abdinov-axmed@yandex.ru

²Азербайджанский Государственный экономический университет.

Азербайджан, АЗ 1001, г. Баку ул. Истиглалийят, 6.
E-mail: Babaeva-Rena@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10 августа 2015 г.

© Абдинов А. Ш., Амирова С. И., Бабаева Р. Ф., Рагимова Н. А., 2015

выявить реальные возможности создания фотоприемников ИК-излучения на основе монокристаллов селенида галлия.

Экспериментальные результаты

В экспериментах с чистыми (нелегированными) образцами с различным исходным (при 77 К) темновым удельным сопротивлением ($\rho_{mo} = 10^3 \div 7 \cdot 10^8$ Ом·см), а также с легированными образцами с различным атомарным процентным содержанием РЗЭ ($N_{PЗЭ} = 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$ ат. %) при различных внешних условиях (температурах, напряженностях гальванически приложенного к исследуемому образцу внешнего электрического поля, освещенностях) снимались спектральные распределения и кинетика фотопроводимости.

Измерения проводились в диапазоне температур от 77 до 350 К и при длинах волн от 0,2 до 3,0 мкм падающего на исследуемый образец света. Интенсивность света варьировалась от предельно слабого, вплоть до $5 \cdot 10^2$ лк, а напряженность гальванически приложенного к исследуемому образцу внешнего электрического поля менялась в пределах от нескольких единиц В/см до т. н. напряженности переключения [4].

Перед каждым измерением (с целью ликвидации влияния предыстории на полученные экспериментальные результаты) образцы подвергались специальной термической процедуре, а именно, сначала в темноте нагревались до ~ 400 К, а далее (опять же в темноте) резко охлаждались путем погружения в жидкий азот.

В результате проведенных измерений установлено, что при бесфоновом возбуждении (когда исследуемый образец освещается лишь одним лучом монохроматического света с варьированной длиной волны) в исследуемых кристаллах *p*-GaSe проявляется высокая положительная фотопроводимость ($\Delta i_{сф}$) (рис. 1, кривая 1) (при оптимальных условиях R_T / R_{CB} достигает в относительных величинах $10^2 \div 10^3$, где R_T и $R_{св}$ — темновое и световое сопротивление исследуемого образца соответственно) и сравнительно слабая, но имеющая достаточную для научных и практических целей величину отрицательная фотопроводимость ($\Delta i_{оф}$) (при оптимальных условиях R_{CB} / R_T достигает $\sim 10^2$) (рис. 1 и 2).

Оказалось, что в низкоомных ($\rho_{mo} \geq 10^4$ Ом·см) кристаллах спектр, обнаруженный в области собственного поглощения положительной фотопроводимости, охватывает диапазон длины волны $0,35 \leq \lambda \leq 0,70$ мкм и имеет максимум при длине волны $\lambda_{см} = 0,58$ мкм, а отрицательная фотопроводимость наблюдается в диапазоне длины волны

$0,75 \leq \lambda \leq 1,90$ мкм и имеет максимум при $\lambda_{ом} = 0,90$ мкм.

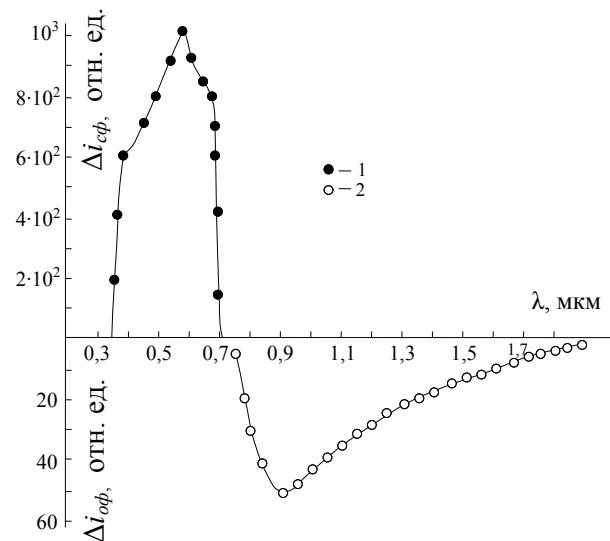


Рис. 1. Спектральное распределение фотопроводимости монокристаллов селенида галлия при бесфоновом освещении, $T = 77$ К, $\rho_{mo} = 10^8$ Ом·см

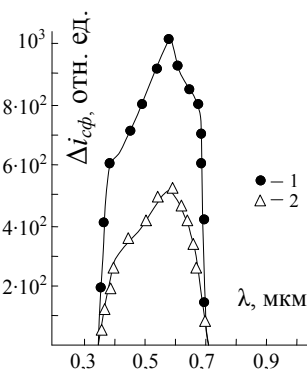


Рис. 2. Спектральное распределение собственной фотопроводимости монокристаллов селенида галлия при отсутствии (кривая 1) и при наличии фонового освещения светом из области примесного поглощения (кривая 2); $T = 77$ К, $\rho_{mo} = 10^8$ Ом·см, $\lambda_2 = 0,90$ мкм

При воздействии фонового освещения, т. е. при освещении исследуемого образца одновременно двумя монохроматическими лучами, длина волны λ_1 одного из которых варьируется по всему диапазону собственного поглощения (в диапазоне $0,35 \leq \lambda_1 \leq 0,70$ мкм), а другой луч имеет фиксированную длину волны λ_2 из области примесного поглощения ($0,75 \leq \lambda_2 \leq 1,90$ мкм), при прочих одинаковых условиях величина $\Delta i_{сф}$ значительно уменьшается (рис. 2, кривая 2) относительно эффекта при бесфоновом освещении (рис. 2, кривая 1), т. е. наблюдается оптическое или инфракрасное гашение собственной фотопроводимости.

Спектр глубины ИК-гашения собственной фотопроводимости (зависимости $\gamma_{CT} = [(\Delta i_{cf} - \Delta i'_{cf})/\Delta i_{cf}] \cdot 100\%$ от λ_2 , где Δi_{cf} и $\Delta i'_{cf}$ — значения собственной фотопроводимости при бесфоновом освещении и в случае, когда одновременно с основным, на исследуемый образец воздействует также и фоновое освещение соответственно) охватывает диапазон длины волны $0,75 \leq \lambda \leq 1,90$ мкм (рис. 3) и имеет максимум при $\lambda_{эм} = 0,90$ мкм. Следует отметить, что при этом для обеспечения высокой эффективности собственная фотопроводимость создавалась монохроматическим светом с $\lambda_1 = 0,58$ мкм и с умеренной интенсивностью.

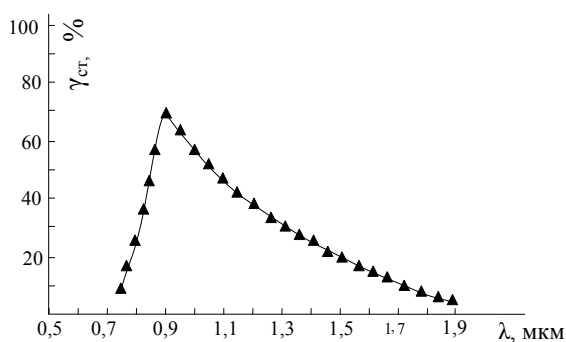


Рис. 3. Спектральное распределение глубины ИК-гашения собственной фотопроводимости в кристаллах моноселенида галлия; $T = 77$ К, $\rho_{mo} = 10^8$ Ом·см, $\lambda_c = 0,58$ мкм

При $T \leq 140 \div 160$ К (для различных образцов в зависимости от значения их исходного темнового удельного сопротивления) как абсолютная величина ($|\Delta i_{of}|$) отрицательной фотопроводимости, так и γ_{CT} (значение глубины ИК-гашения собственной фотопроводимости) от температуры не зависят, а при дальнейшем повышении T , оба они (как $|\Delta i_{of}|$, так и γ_{cm}) резко уменьшаются. При $T \geq 200 \div 220$ К в исследуемых кристаллах отрицательная фотопроводимость (ОФП) и ИК-гашение собственной фотопроводимости совсем исчезают.

Величины $|\Delta i_{of}|$ и γ_{cm} зависят также от интенсивности падающего на исследуемый образец света. Причем эти зависимости имеют сложный характер. В частности, при прочих одинаковых условиях величины $|\Delta i_{of}|$ и γ_{cm} с ростом интенсивности падающего на исследуемый образец примесного света Φ_n сначала увеличиваются по сублинейному закону ($\Delta i_{of}, \gamma_{cm} \sim \Phi_n^{0,5}$), далее в некотором диапазоне изменения Φ_n зависимости $\Delta i_{of}(\Phi_n)$ и $\gamma_{cm}(\Phi_n)$ подчиняются линейному закону. При более высоких интенсивностях примесного света обе эти зависимости выходят на насыщение.

При исследовании зависимости $|\Delta i_{cf} - \Delta i'_{cf}|$ от интенсивности падающего на изучаемый обра-

зец собственного света Φ_c , установлено, что при прочих одинаковых внешних условиях с ростом Φ_c величина $|\Delta i_{cf} - \Delta i'_{cf}|$ увеличивается, а величина γ_{cm} — почти не меняется.

Оказалось, что при рассмотренных нами условиях как отрицательная фотопроводимость, так и ИК-гашение собственной фотопроводимости имеют запоминающий характер. Например, если после установления стационарного состояния (т. е. после достижения стационарных значений $|\Delta i_{of}|$ и $\Delta i'_{cf}$) прекратить воздействие примесного света, то исходное значение темновой проводимости (в случае бесфоновго возбуждения) и/или собственной фотопроводимости (при наличии фонового освещения) восстанавливаются не мгновенно, а имеют долговременно релаксирующий характер [5].

Проведенные измерения показали, что при прочих одинаковых условиях абсолютная величина $\Delta i_{on} = \Delta i_{cf} - \Delta i''_{cf}$ (где $\Delta i''_{cf}$ — значение собственной фотопроводимости через 20 секунд после прекращения воздействия гасящего примесного света), глубина гашения Δi_{cf} и длительность времени релаксации τ_{on} остаточного ИК-гашения собственной фотопроводимости [6] в чистых кристаллах оказываются зависящими от значения исходного темнового удельного сопротивления ρ_{mo} исследуемого образца, а в легированных кристаллах — от уровня легирования РЗЭ (значения $N_{PЗЭ}$). При прочих одинаковых условиях значения Δi_{on} , κ и τ_{on} с ростом ρ_{mo} увеличиваются, а с $N_{PЗЭ}$ — меняются немонотонно. В легированных РЗЭ кристаллах эти величины не зависят от химической природы введенной примеси, но меняются при варьировании уровня легирования. Конкретно, с ростом $N_{PЗЭ}$ значения Δi_{on} , κ и τ_{on} сначала увеличиваются (при $N_{PЗЭ} \leq 10^{-3}$ ат. %), а далее — при $N_{PЗЭ} > 10^{-3}$ ат. % — уменьшаются. Аналогичный характер имеют также зависимости абсолютной величины, кратности и времени релаксации отрицательной фотопроводимости от ρ_{mo} и $N_{PЗЭ}$.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ полученных нами экспериментальных результатов позволяет сказать, что как отрицательная фотопроводимость, так и ИК-гашение собственной фотопроводимости в обеих группах (как в чистых, так и в легированных РЗЭ) кристаллах моноселенида галлия обусловлены наличием в их запрещенной зоне двух типов рекомбинационных центров, а именно, S -центров быстрой и r -центров медленной рекомбинации [7]. Кроме того, необходимо учесть возможность изменения рекомбинационного канала процессом рекомбинации через медленные r -центры на быст-

рые S -центры при освещении образца примесным светом с энергией $\varepsilon_r \leq h\nu < \varepsilon_g$, где ε_r — энергетическая глубина залегания r -центров, а ε_g — ширина запрещенной зоны полупроводника при рассмотренных внешних условиях.

По значению длины волны, соответствующей красной границе спектрального распределения отрицательной фотопроводимости ОФП и ИК-гашения собственной фотопроводимости для различных образцов, оценена энергетическая глубина залегания r -центров рекомбинации. Оказалось, что для различных образцов они меняются в пределах $\varepsilon_r = \varepsilon_c - (0,55 \div 0,60)$ в единицах эВ.

Предполагается, что обнаруженный в проведенных нами экспериментальных измерениях запоминающий характер отрицательной фотопроводимости и ИК-гашения собственной фотопроводимости, скорее всего, обусловлены пространственной неоднородностью исследуемых кристаллов моноселенида галлия (в частности, наличием в них хаотических, крупномасштабных дефектов), которая, в свою очередь, определяет величину $\rho_{то}$. Сама неоднородность определяется технологической предисторией, а также уровнем легирования изучаемого образца.

Обнаруженные в данной работе специфические фотоэлектрические свойства кристаллов моноселенида галлия в виде ОФП и ИК-гашения собственной фотопроводимости, а также характерная слоистая структура [8], высокоомность ($\rho_{то} \approx 10^4 \div 10^8$ Ом·см [9]), большие значения величин $|\Delta i_{оф}|$ и $\gamma_{см}$, а главное, возможность управления параметрами отрицательной фотопроводимости и ИК-гашения собственной фотопроводимости путем варьирования $N_{PЗЭ}$ позволяют рекомендовать указанные кристаллы в качестве перспективного полупроводникового материала, пригодного не только для создания высокочувствительных фотоприемников видимого диапазона, но и для создания на их основе двух типов фотоприемников света для ближней ИК-области спектра (для первого «окна» прозрачности атмосферы). Имеются в виду, в частности, ИК-фоторезисторы с фоновым и бесфоновым воздействием, отличающиеся стабильностью параметров и характеристик, а также чувствительностью, которой можно целенаправ-

ленно управлять различными способами (в т. ч. варьированием интенсивности фонового освещения и уровня легирования РЗЭ, а также выбором образцов с подходящими исходными удельными темновыми сопротивлениями).

Заключение

Проведенные нами экспериментальные исследования, а также полученные при их обсуждении результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

- монокристаллы селенида галлия (p -GaSe), помимо положительной собственной фотопроводимости в диапазоне $0,3 \div 0,7$ мкм, обладают также заметной отрицательной фотопроводимостью в области примесного поглощения в диапазоне $0,7 \div 2,0$ мкм;

- наблюдаемая в этом полупроводнике ярко выраженная отрицательная фотопроводимость делает его перспективным материалом для изготовления приемников ИК-излучения в области вплоть до $\sim 2,0$ мкм;

- на основе монокристаллов p -GaSe можно создать принципиально новый фотоприемник ИК-излучения ($0,70 \leq \lambda \leq 2,00$ мкм) с управляемыми параметрами, который работает на основе оптического гашения собственной фотопроводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф., Рзаев Р. М. и др. // Journal of Caucasian University. Physics. 2013. V. 1. P. 16.
2. Абдинов А. Ш., Гасанов Я. Г., Мамедов Ф. М. // ДАН Аз. ССР. 1981. Т. 37. В. 11. С. 22.
3. Мехтиев Р. Ф., Абдуллаев Г. Б., Ахундов Г. А. // ДАН Аз. ССР. 1962. Т. 18. В. 6. С. 11.
4. Akhundov G. A., Abdinov A. Sh., Mekhtiev N. M. // Phys. Stat. Solidi (a). 1973. V. 18. No. 1. P. 33.
5. Шейнкман М. К., Шик А. Я. // ФТП. 1976. Т. 10. № 2. С. 209.
6. Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г., Ахмедов А. А. // ФТП. 1978. Т. 12. № 9. С. 1759.
7. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. — М.: Наука. 1963.
8. Медведьева З. С. Халькогениды элементов III-B подгруппы периодической системы. — М.: Наука. 1968.
9. Абдинов А. Ш., Бабаева Р. Ф., Рагимова Н. А. и др. // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 4. С. 362.

The IR-radiation receivers on a basis of gallium monoselenide

A. Sh. Abdinov¹, S. I. Amirova¹, R. F. Babayeva², and N. A. Ragimova¹

¹Baku State University

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

E-mail: abdinov-axmed@yandex.ru

²Azerbaijan State Economic University
6 Istiglaliyyat str., Baku, AZ 1001, Azerbaijan Republic
E-mail: Babaeva-Rena@yandex.ru

Received August 10, 2015

Consideration is given to negative photoconductivity and infrared quenching of intrinsic photoconductivity in the pure and alloyed with rare-earth elements gallium monoselenide crystals (p-GaSe). It is shown that both negative photoconductivity and infrared quenching of the intrinsic photoconductivity in p-GaSe crystals are stipulated by presence in the forbidden zone two types of recombination centers — fast and slow ones. Their memory character is connected with a spatial heterogeneity of the material. Possibility of creation of infrared photoresistors with background and background-free effect based on pure and alloyed p-GaSe crystals is supposed.

PACS: 71.20. Nr; 72.40 W

Keywords: crystals, local power levels, negative photoconductivity, background, infrared, radiation, clearing.

REFERENCES

1. A. Sh. Abdinov, R. F. Babaeva, R. M. Rzaev, et al., Journal of Caucasian University. Physics. **1**, 16 (2013).
2. A. Sh. Abdinov, Ya. G. Gasanov, and F. M. Mamedov, Dokl. Akad. Nauk Az. SSR **37** (11), 22 (1981).
3. R. F. Mekhtiev, G. B. Abdullaev, and G. A. Akhundov, Dokl. Akad. Nauk Az. SSR **18** (6), 11 (1962).
4. G. A. Akhundov, A. Sh. Abdinov, and N. M. Mekhtiev, Phys. Stat. Solidi (a) **18**, 33 (1973).
5. M. K. Sheinkman and A. Ya. Shik, Semiconductors **10**, 209 91976).
6. A. Sh. Abdinov, A. G. Kyazym-zade, A. A. Akhmedov, Semiconductors **12**, 1759 (1978)
7. S. M. Ryvkin, *Photoelectrical Phenomena in Semiconductors* (Nauka, Moscow, 1963) [in Russian].
8. Z. S. Medved'eva, *Chalcogenides of the III-B Elements* (Nauka, Moscow, 1968) [in Russian].
9. A. Sh. Abdinov, R. F. Babaeva, N. A. Ragimova, et al., Neorgan. Materialy **50**, 362 (2014).