

УДК 621.315.592

## Влияние света на подвижность свободных носителей заряда в кристаллах моноселенида индия

© А.Ш. Абдинов<sup>¶</sup>, Р.Ф. Бабаева\*, С.И. Амирова, Н.А. Рагимова, Р.М. Рзаев

Бакинский государственный университет,  
Az-1148 Баку, Республика Азербайджан

\* Азербайджанский государственный экономический университет,  
Az-1145 Баку, Республика Азербайджан

(Получена 13 мая 2013 г. Принята к печати 5 июля 2013 г.)

Исследовано влияние света из различных областей оптического поглощения (собственного и примесного) на подвижность свободных носителей заряда в чистых (специально не легированных) кристаллах моноселенида индия ( $n$ -InSe) с различным значением исходной темновой удельной проводимости ( $\sigma_{T0} = 10^{-3} - 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  при 77 К) при различных внешних условиях. Обнаружены зависимость подвижности свободных носителей заряда от воздействия света, положительная и отрицательная подвижностная память, а также стирание (гашение) подвижностной памяти. Предложена модель, которая основывается на частичной неупорядоченности исследуемых кристаллов и качественно удовлетворительно объясняет полученные экспериментальные результаты.

### 1. Введение

В ранних работах [1–3] сказано о возможности объяснения электрических и фотоэлектрических свойств кристаллов моноселенида индия (InSe) на основе двухбарьерной энергетической модели частично неупорядоченного полупроводника, состоявшей в целом из низкоомной матрицы (НО) с хаотическими высокоомными включениями (ВО) [4]. Предполагается, что на границах НО–ВО существуют рекомбинационные, а между соседними ВО включениями — дрейфовые барьеры.

Рекомбинационные барьеры в основном обуславливают обнаружение при определенных условиях медленно-релаксирующих явлений (эффектов памяти различного типа), которые к сегодняшнему дню в кристаллах InSe подробно исследованы. Однако влияние дрейфовых барьеров на величины отдельных физических параметров в этом полупроводнике почти не выяснено, хотя при определенных условиях оно может быть существенным в процессах и параметрах, непосредственно связанных с подвижностью свободных носителей заряда ( $\mu$ ).

В данной работе с целью выявления роли дрейфовых барьеров в электронных свойствах кристаллов моноселенида индия экспериментально исследовано влияние света на подвижность свободных носителей заряда в этом материале при различных внешних условиях.

### 2. Методика исследований и образцы

Исследуемые образцы скальвались из выращенных методом медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры вдоль слитка [5]  $n$ -типа моноселенида индия ( $n$ -InSe). Синтез соединения InSe осуществлен традиционным способом совместного сплавления составных (исходных) компонентов, взятых в стехиометри-

ческом соотношении: металлический In (марки 99.999) и гранулированный Se (марки 99.99999).

Термографические и рентгеноструктурные исследования показали, что полученные кристаллы InSe являются однофазными по составу и, относясь к  $\alpha$ -модификации, имеют ромбоэдрическую слоистую структуру с параметрами  $a = 4.01 \text{ \AA}$ ,  $c = 24.96 \text{ \AA}$  [6–8]. Благодаря природной слоистости и слабой связи между слоями изучаемого материала имелась возможность не только получить отдельные образцы путем скальвания в воздушной атмосфере, но и обеспечить их геометрическую совершенность (образцы имели плоскопараллельную форму с почти идеально зеркальной поверхностью) и инертность к адсорбции атомов из атмосферы. Поэтому как в дополнительных механических и химических обработках, так и в мерах для защиты поверхности изучаемых образцов от химического воздействия окружающей среды не было необходимости. Толщина исследуемых образцов вдоль оси „ $c$ “ кристалла была не больше 0.30 мм, а поперечные размеры их по плоскости „ $c$ “ кристалла составляли (2–3)–(6–8) мм.

В качестве материала токовыводящих контактов использовались металлический индий, серебряная паста и (или) аквадак.

Измерения проводились при помощи экспериментальной установки, собранной на базе монохроматора МДР-12 и электромагнита с управляемой индукцией в пределах практически от 0.15 до 1.0 Тл. При измерениях световой пучок и магнитное поле были направлены перпендикулярно, а ток через образец — параллельно слоям. Температура образца менялась в пределах 77–400 К, так как при  $T \geq 450 \text{ К}$  начиналась собственная проводимость.

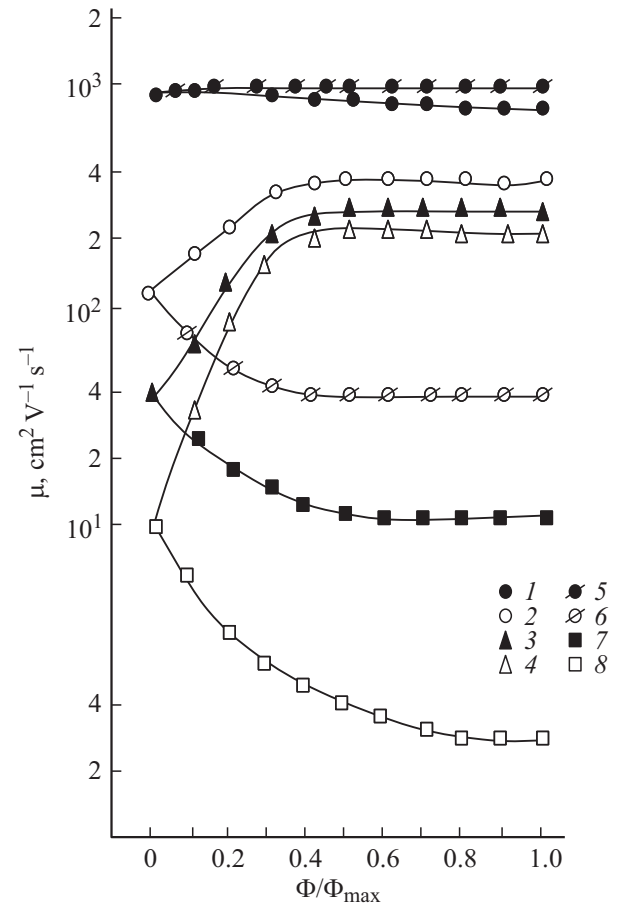
Интенсивность падающего на образец света регулировалась при помощи специальных градуированных металлических сеток, а одиночные световые импульсы с необходимой длительностью получались при помощи затвора от фотоаппарата.

<sup>¶</sup> E-mail: abdinov-axmed@yandex.ru

Подвижность ( $\mu$ ) и концентрация ( $n$ , или коэффициент Холла  $R_H = \frac{1}{en}$ ) свободных носителей заряда, а также удельная проводимость ( $\sigma$ , или удельное сопротивление  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ ) образцов при различных условиях (в темноте и при воздействии света) измерялись на основе традиционного комбинированного трехзондового метода [9].

### 3. Результаты измерений

В результате проведенных измерений установлено, что при 300 К значение удельной темновой проводимости ( $\sigma_{dc}$ ) изучаемых кристаллов  $n$ -InSe меняется в пределах  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$  и значительно больше по сравнению с имеющим место при 77 К, которое составляет  $\sim 10^{-3}$ – $10^{-8}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$  для различных образцов (рис. 1, кривые 1 и 2). Однако концентрация свободных носителей заряда ( $n$ ) в рассмотренном диапазоне (77–300 К) незначительно меняется с температурой и для различных образцов составляет  $5 \cdot 10^{12}$ – $10^{13}$  и  $\sim 5 \cdot 10^{13}$ – $10^{14}$  см $^{-3}$  при 77 и 300 К соответственно (рис. 1, кривые 3 и 4). Эти результаты свидетельствуют о том, что резкий спад удельной темновой проводимости при понижении температуры от 300 до 77 К прежде всего обусловлен сильным уменьшением подвижности, а не изменением концентрации свободных носителей заряда с температурой (рис. 1, кривые 5 и 6). Однако, согласно существующей теории подвижности свободных носителей заряда в кристаллических полупроводниках [10], такое сильное изменение  $\mu$  с температурой (уменьшение почти на 3–4 порядка при понижении температуры всего на 200°) (рис. 1, кривые 5 и 6) является аномальным, так как согласно этой теории в области низких и высоких температур зависимости  $\mu(T)$  в кристаллических полупроводниках должны приблизительно подчиняться законам  $\mu \propto T^{3/2}$  и  $\mu \propto T^{-3/2}$  соответственно. Естественно, что последние не могут обуславливать обнаруженного в эксперименте значительного изменения  $\mu$  с температурой в таком



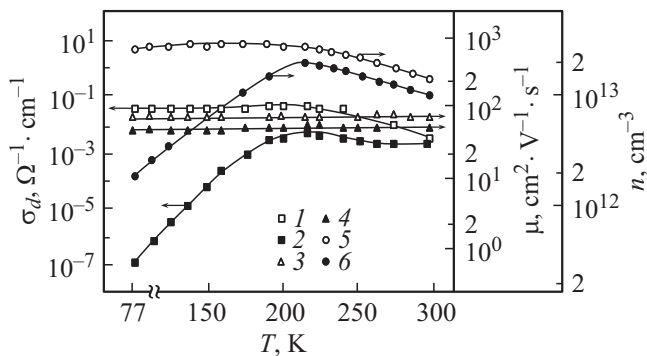
**Рис. 2.** Зависимости подвижности свободных носителей заряда от интенсивности света с различной длиной волны в кристаллах  $n$ -InSe с различной исходной темновой удельной проводимостью.  $T = 77$  К;  $\lambda$ , мкм: 1, 2, 3, 4 — 0.95; 5, 6 — 1.60.  $\sigma_{dc0}$ , Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ : 1, 5 —  $5 \cdot 10^{-3}$ ; 2 —  $2 \cdot 10^{-5}$ ; 3 —  $3 \cdot 10^{-6}$ ; 4, 5, 6 —  $2 \cdot 10^{-7}$ .

небольшом диапазоне изменения  $T$ . Исходя из этого можно сказать, что в рассмотренном случае в зависимости  $\mu(T)$  доминирует иная ситуация, нежели описанная в существующей теории о подвижности свободных носителей заряда в кристаллических полупроводниках.

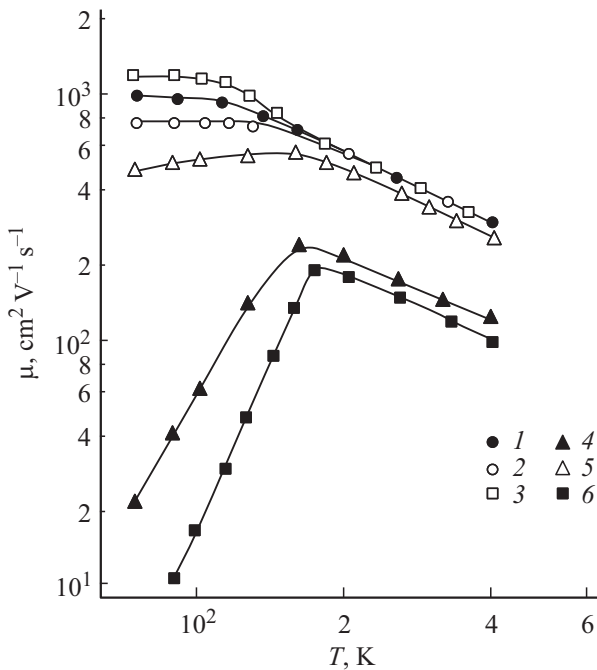
Экспериментально снимали также зависимости  $\mu$  от интенсивности света ( $\Phi$ ) с различной длиной волны ( $\lambda$ ) в образцах с различной  $\sigma_{T0}$  (с различной темновой удельной проводимостью при 77 К) (рис. 2), от температуры при различных  $\Phi$  (рис. 3), от времени при воздействии света с различной  $\lambda$  (рис. 4) и от времени при различных режимах освещения (рис. 5) в исследуемых образцах.

Установлено, что заметная зависимость  $\mu$  от воздействия света наблюдается в области низких температур ( $T \leq 150$ – $200$  К для различных образцов в зависимости от значения  $\sigma_{dc0}$ ), причем лишь в высокоомных ( $\sigma_{dc0} \leq 10^{-4}$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ) кристаллах (рис. 2, кривые 2–4 и рис. 3, кривые 4–6).

При освещении светом из области собственного поглощения (собственным светом) в момент включения света  $\mu$  быстро возрастает от исходного темнового ( $\mu_0$ )



**Рис. 1.** Температурные зависимости темновой удельной проводимости (кривые 1 и 2), концентрации (кривые 3 и 4) и подвижности свободных носителей заряда (кривые 5 и 6) в образцах, склеенных из различных участков монокристаллических слитков чистых кристаллов  $n$ -InSe.  $\sigma_{dc0}$ , Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ : 1, 2, 3 —  $5 \cdot 10^{-4}$ ; 4, 5, 6 —  $10^{-6}$ .



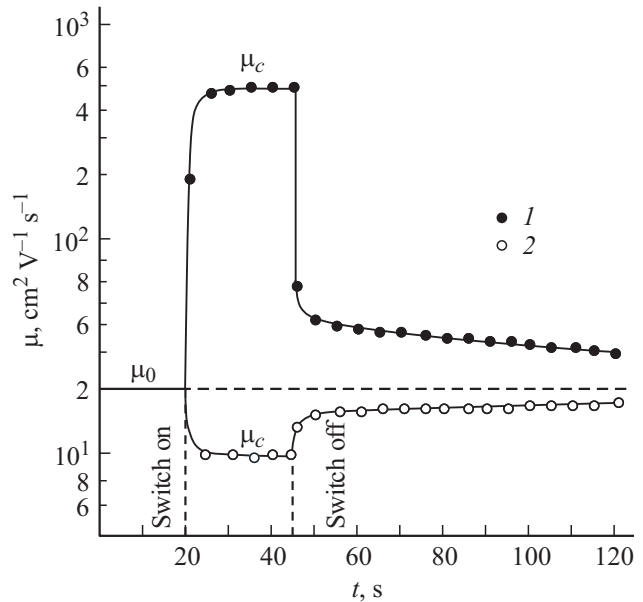
**Рис. 3.** Температурные зависимости подвижности свободных носителей заряда в низкоомных (кривые 1–3) и высокоомных (кривые 4–6) кристаллах *n*-InSe при воздействии света с различной длиной волны.  $\sigma_{dc0}$ , Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>: 1, 2, 3 —  $5 \cdot 10^{-3}$ ; 4, 5, 6 —  $2 \cdot 10^{-7}$ ;  $\lambda$ , мкм: 2, 5 — 0.95; 3, 6 — 1.60.  $T = 77$  К;  $\Phi$ , отн. ед.: 1, 4 — 0; 2, 3, 5, 6 — 0.8.

до соответствующего стационарного светового ( $\mu_s$ ) значения (рис. 4, кривая 1), а при выключении света спадает от  $\mu_s$  до  $\mu_0$  в два этапа. Вернее, сначала  $\mu$  быстро (за времена жизни свободных носителей заряда в изучаемом материале) уменьшается почти на 70–80% относительно  $\mu_s$ , а далее значительно медленнее (при оптимальных условиях за несколько сотен секунд) релаксируется до  $\mu_0$  (наблюдается „положительная подвижностная память“). Скорость установления  $\mu_s$  при включении света, а также релаксация  $\mu$  от  $\mu_s$  до  $\mu_0$  после выключения света оказываются зависимыми от величины  $\sigma_{T0}$ , температуры, интенсивности света. С уменьшением  $\sigma_{dc0}$  и  $\Phi$  процесс установления стационарного значения  $\mu_s$  ускоряется, а процесс релаксации остаточной подвижности — значительно замедляется. При этом величина остаточной подвижности ( $\Delta\mu = \mu - \mu_0$ , где  $\mu$  — величина подвижности носителей тока через 15–20 с после выключения света) увеличивается. С повышением температуры процессы установления и релаксации  $\mu$  при включении и выключении света соответственно сильно ускоряются.

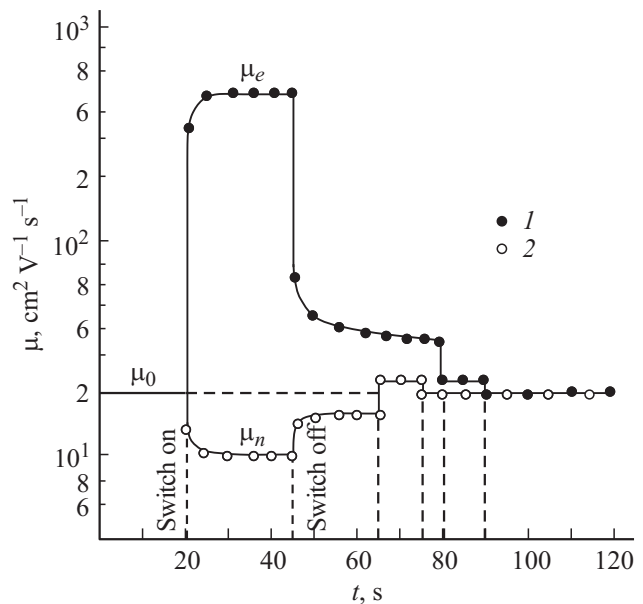
При воздействии на исследуемые образцы света из области примесного поглощения (примесного света) при низких температурах подвижность свободных носителей заряда уменьшается относительно исходного ( $\mu_0$ ) и после прекращения воздействия света она длительное время оказывается меньше, чем  $\mu_0$  (медленно релаксируется до  $\mu_0$ ), т.е. наблюдается отрицательная остаточная

подвижность („отрицательная подвижностная память“) (рис. 4, кривая 2).

Процесс релаксации положительной остаточной подвижности ускоряется при воздействии на исследуемый образец кратковременным тепловым и (или) световым



**Рис. 4.** Кинетика подвижности свободных носителей заряда в высокоомных кристаллах *n*-InSe при воздействии света с различной длиной волны.  $\sigma_{dc0} \approx 2 \cdot 10^{-7}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>;  $T = 77$  К;  $\Phi = 0.8$  отн. ед.  $\lambda$ , мкм: 1 — 0.95; 2 — 1.60.



**Рис. 5.** Кинетика подвижности свободных носителей заряда в высокоомных кристаллах *n*-InSe при различных внешних условиях.  $T$ , К: 1, 3 — 77; 2 —  $t = (0-150)c - 77$ ; 4 —  $t = (151-165)c - 350$ ; 5 —  $t > 165c - 77$ .  $\lambda$ , мкм: 1 — 0.95; 3 —  $t = (0-20)c - 0.95$ ; 4 —  $t = (151-170)c - 1.60$ ;  $\sigma_{T0} \approx 2 \cdot 10^{-7}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>.

импульсом из области примесного поглощения (рис. 5), т. е. в изучаемых кристаллах имеет место температурное и оптическое гашение подвижностной памяти. При этом достаточно нагреть образец за 5–10 с до  $\sim 350$  К, а далее путем погружения в жидкой азот резко охладить его до 77 К, или 10–15 с освещать интенсивным примесным светом, создающим отрицательную фотопроводимость [11] в изучаемом материале [12]. Температурное гашение обеспечивает стопроцентное, а оптическое гашение — не более чем 60–70% стирание остаточной подвижности.

Отрицательная подвижностная память стирается лишь тепловым воздействием.

#### 4. Обсуждение экспериментальных результатов

Обнаруженная нами особенность влияния света на подвижность свободных носителей заряда в кристаллах моноселенида индия отвергает возможность объяснения полученных экспериментальных результатов на основе механизмов, при которых доминируют лишь рассеяние свободных носителей заряда на колебаниях решетки и (или) точечных собственных дефектах, а также на ионах неконтролируемых примесей [10], при которых не должны иметь место такие ярко выраженные долговременно релаксирующие процессы.

Известно, что медленные процессы в полупроводниках обычно обуславливаются либо системой заряженных частиц, обладающих „коллективными“ свойствами, либо перезарядкой поверхностных состояний, или же наличием в объеме кристалла крупномасштабных дефектов типа высокоомных включений (ВО) в низкоомной матрице (НО) [4]. Нам кажется, что первые два из указанных предположений не приемлемы для объяснения обнаруженных зависимостей  $\mu$  от воздействия света, так как хотя наличие системы заряженных частиц, обладающих „коллективными“ свойствами, при определенных условиях может вызывать медленную релаксацию проводимости образца, однако на подвижность свободных носителей заряда оно так значительно влиять не может. Что касается возможности влияния поверхностных состояний, то при такой высокой степени химической стабильности, инертности к адсорбции и идеальной (на атомарном уровне) зеркальности поверхности исследуемых образцов оно также не может играть существенную роль.

Поэтому считаем более справедливым, обсудить полученные экспериментальные результаты на основе наличия в изучаемых кристаллах хаотических крупномасштабных дефектов в виде высокоомных включений (ВО) в низкоомной матрице (НО) [4]. Дело в том, что в таком полупроводниковом образце свободные носители заряда для участия в проводимости должны обладать энергией, необходимой для преодоления дрейфовых барьеров ( $\Delta\varepsilon_d$ ). При этом в темноте при низких температурах концентрация свободных носителей заряда незначительна, а

подвижность их ( $\mu$ ) отличается от истинной (дрейфовой) подвижности ( $\mu_d$ ) и определяется выражением [13]

$$\mu = \mu_d \exp\left(-\frac{(\Delta\varepsilon_d)^2}{2k^2T^2}\right),$$

где  $\Delta\varepsilon_d$  — высота дрейфовых барьеров,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура образца. Поэтому дрейфовые барьеры играют доминирующую роль в проводимости образца, т. е. чем больше размеры и количество дрейфовых барьеров, тем меньше будет  $\sigma_{dc0}$ .

При освещении, в зависимости от температуры, а также от длины волны и интенсивности света, концентрация свободных носителей заряда и размеры дрейфовых барьеров будут меняться по-разному. В частности, под действием собственного света вследствие роста концентрации свободных носителей заряда будут уменьшаться размеры дрейфовых барьеров, что в свою очередь будет приводить к соответствующему росту подвижности свободных носителей заряда. После прекращения воздействия света часть созданных фотоносителей быстро рекомбинируется, а в зависимости от температуры, величины исходной темновой удельной проводимости образца и интенсивности света оставшая часть их рекомбинируется значительно медленнее. Вследствие этого после прекращения воздействия света исходное состояние флуктуации потенциала и размеры дрейфовых барьеров также восстанавливаются медленно, и наблюдается подвижностная память. При этом остаточная подвижность  $\Delta\mu = (\mu - \mu_0) > 0$ , а величина ее зависит как от  $\sigma_{dc0}$ , так и от  $T$  и  $\Phi$ . Это обусловлено тем, что размеры рекомбинационных барьеров в образцах с меньшей  $\sigma_{T0}$  велики, а с повышением  $T$  и  $\Phi$  — уменьшаются. Это предположение подтверждается полученными экспериментальными зависимостями  $\Delta\mu(\sigma_{T0})$ ,  $\Delta\mu(T)$  и  $\Delta\mu(\Phi)$ .

В рамках предложенной выше модели удовлетворительно объясняется также обнаруженное нами оптическое и температурное гашение подвижностной памяти. В частности, предполагается, что при освещении образца, находящегося в состоянии положительной остаточной подвижности, примесным светом и (или) при нагревании его до  $T \geq 350$  К с последующим резким охлаждением вследствие соответствующего гашения неравновесной проводимости происходит гашение подвижностной памяти.

В случае воздействия на исследуемый образец, находящийся в исходном состоянии, примесного света, создающего отрицательную фотопроводимость, происходит иной процесс. При этом вследствие замены рекомбинационного канала через медленные  $r^-$  на быстрые  $S$ -центры рекомбинации [11], концентрация свободных носителей заряда уменьшается относительно исходной. Последнее приводит к уменьшению  $\mu$  вследствие увеличения высоты дрейфовых барьеров ( $\Delta\varepsilon_d$ ). Поэтому наблюдается отрицательный подвижностный фотоэффект, вернее,  $\Delta\mu = (\mu - \mu_0) < 0$ . В этом случае после установления  $\mu_s$ , при прекращении воздействия примесного света исходное значение подвижности свободных

носителей заряда ( $\mu_0$ ) восстанавливается медленно — наблюдается отрицательная остаточная подвижность. В отличие от положительной, отрицательная остаточная подвижность релаксируется (исчезает) сравнительно быстро. По-видимому, это связано с тем, что при рассмотренных нами условиях термическое восстановление равновесной концентрации свободных носителей заряда в свободных энергетических зонах происходит быстрее, чем рекомбинация фотоносителей путем преодоления их рекомбинационных барьеров.

## 5. Заключение

Таким образом, можно сказать, что в чистых (специально не легированных) высокоомных кристаллах моноселенида индия ( $n$ -InSe) при низких температурах наблюдается значительная зависимость подвижности свободных носителей заряда от воздействия света.

При этом абсолютная величина изменения подвижности ( $|\Delta\mu| = |\mu - \mu_0|$ ) зависит от величины исходной удельной темновой проводимости ( $\sigma_{dc0}$ ) образца, температуры ( $T$ ), а также от интенсивности ( $\Phi$ ) и длины волны ( $\lambda$ ) света.

Знак изменения подвижности (величины  $\Delta\mu = \mu - \mu_0$ ) зависит от длины волны света — при воздействии собственного света  $\Delta\mu > 0$ , а при воздействии примесного света  $\Delta\mu < 0$ .

В обоих случаях после прекращения воздействия света  $\Delta\mu$  релаксирует медленно — наблюдается положительная и отрицательная подвижностная память соответственно.

Увеличение подвижности свободных носителей заряда при воздействии собственного света обусловлено оптическим сглаживанием флуктуации потенциала свободных энергетических зон. Обнаруженная при этом положительная подвижностная память связана с наличием рекомбинационных барьеров, которые препятствуют рекомбинации избыточной концентрации неравновесных носителей заряда.

Уменьшение подвижности свободных носителей заряда при воздействии примесного света обусловлено уменьшением их концентрации в свободных энергетических зонах вследствие замены рекомбинационного канала через медленные, на быстрые центры рекомбинации.

При этом скорость гашения отрицательной остаточной подвижности определяется со скоростью термического восстановления исходной (равновесной) концентрации свободных носителей заряда в соответствующих свободных энергетических зонах исследуемого образца.

## Список литературы

- [1] А.Ш. Абдинов, А.Г. Кязым-заде, А.А. Ахмедов. Изв. АН АзССР. Сер. физ.-техн. и мат. наук, № 2, 72 (1977).
- [2] А.Ш. Абдинов, А.Г. Кязым-заде. ФТП, **9** (10), 1970 (1975).
- [3] А.Ш. Абдинов, Р.Ф. Бабаева. Неорг. матер., **31** (8), 1020 (1995).

- [4] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10** (2), 209 (1976).
- [5] Р.Ф. Мехтиев, Г.Б. Абдуллаев, Г.А. Ахундов. ДАН АзССР, **18** (6), 11 (1962).
- [6] З.С. Медведева. Халькогениды элементов подгруппы III B периодической системы (М., Наука, 1968).
- [7] Н.Х. Абрикосов, В.Ф. Банкина, Л.В. Порецкая, Е.В. Скуднова, С.Н. Чижевская. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе (М., Наука, 1975).
- [8] G.R. Miller, Che-Yu-Li, C.W. Spenser. J. Appl. Phys., **34** (5), 1398 (1963).
- [9] Н.Ф. Ковтанюк, Ю.А. Концевой. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов (М., Металлургия, 1970).
- [10] Р. Смит. Полупроводники (М., Мир, 1982).
- [11] Р.М. Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках (М., Наука, 1963).
- [12] А.Ш. Абдинов, Я.Г. Гасанов. ФТП, **16** (8), 1525 (1982).
- [13] Э.Д. Головкина, Н.Н. Левченко, А.Я. Шик. ФТП, **9** (10), 383 (1976).

Редактор М.А. Полянская

## Influence of light on mobility of free charge carriers in indium monoselenide crystals

A.Sh. Abdinov, R.F. Babayeva\*, S.I. Amirova, N.A. Ragimova, R.M. Rzayev

Baku State University,  
Az-1148 Baku, Azerbaijan

\* State Economic University of Azerbaijan,  
Az-1145 Baku, Azerbaijan

**Abstract** Influence of light from various absorption area (intrinsic and impurity) on mobility of free charge carriers in pure (specially not alloyed) indium monoselenide ( $n$ -InSe) crystals with various value of the initial specific dark resistance ( $\sigma_{D0} = 10^{-3} - 10^{-8} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  at 77 K) under various external conditions. Dependence of free charge carriers mobility on influence of light, positive and negative mobility memory, as well as deleting (quenching) of the mobility memory have been found. The model have been offered which is based on partial disorder of investigated crystals and qualitatively well explains the received experimental results.