

К ВОПРОСУ О КИНЕТИКЕ ТЕМНОВОГО ТОКА
В ЧАСТИЧНО-НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ КРИСТАЛЛАХ ТИПА
СОЕДИНЕНИЙ $A^{III}B^{VI}$ СО СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Р.Ф.БАБАЕВА

Бакинский Государственный Университет,
Babaeva-Rena@yandex.ru

При различных условиях исследована кинетика темнового тока в чистых и легированных лантаноидами (Gd, Ho, Dy) с $N \leq 10^1$ ат. % кристаллах селенида индия и галлия.

Установлено, что в области $T \leq 150K$ в этих кристаллах наблюдаются релаксации темнового тока различного характера в зависимости от величины приложенного напряжения и уровня легирования. Показано, что полученные результаты могут объясняться на основе модели частично-неупорядоченного полупроводника с двумя энергетическими барьерами и имеющая в запрещенной зоне различного типа локальных уровней.

Монокристаллы соединений $A^{III}B^{VI}$ со слоистой структурой, характерными представителями которых являются моноселениды индия (n-InSe) и галлия (p-GaSe), известны как полупроводниковые материалы с весьма необычными физическими свойствами [1-4], в том числе различным типом релаксации темновой проводимости [5, 6].

Хотя к настоящему времени специфические фотоэлектрические явления в этих материалах нашли свое удовлетворительное объяснение, однако вопрос о релаксации темновой проводимости как в них, так и в частично-неупорядоченных кристаллах вообще, нуждается в исследованиях обобщающего характера.

В данной работе на основе сравнительного анализа комплекса результатов, полученных при исследовании разнообразности релаксации темнового тока в чистых и легированных лантаноидами кристаллах моноселенидов индия и галлия, предлагается обобщающая модель, качественно удовлетворительно объясняющая механизм кинетики темнового тока при различных условиях в частично-неупорядоченных кристаллах типа соединений $A^{III}B^{VI}$ со слоистой структурой.

Изучаемые монокристаллы моноселенидов индия и галлия (как чистые, так и легированные лантаноидами) выращивались методом медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры вдоль слитка [7]. В качестве примесного материала брались Gd, Ho, Dy. Содержание введенной примеси составляло 10^{-5} ; 10^{-4} ; 10^{-3} ; 10^{-2} ; 10^{-1} ат.%. Токовые контакты были созданы путем припайки металлического In или Sn, а также нанесением серебряной пасты или аквадака.

Измерения проводились в интервале $77 \leq T \leq 350\text{K}$ при напряжениях вплоть до напряжения переключения [2, 3].

Установлено, что при низких температурах в этих кристаллах, в зависимости от величины приложенного напряжения и уровня легирования, наблюдаются релаксации темнового тока различного характера. В чистых кристаллах при малых напряжениях в момент включения внешнего напряжения стационарное значение темнового тока устанавливается не мгновенно, а заметно медленно. Причем величина длительности времени (τ_{CT}), необходимого для установления стационарного значения темнового тока (i_{CT}) и характер изменения тока от значения, соответствующего моменту включения внешнего напряжения (i_0) до i_{CT} , при этом зависят от величины приложенного напряжения (рис. 1). С повышением температуры эффект ослабляется, а с изменением исходного темнового удельного сопротивления – меняется не монотонно. При оптимальных условиях $\frac{|i_{CT} - i_0|}{i_0}$ достигает почти до 0,45, а характеристическое время процесса составляет ~ 90 секунд.

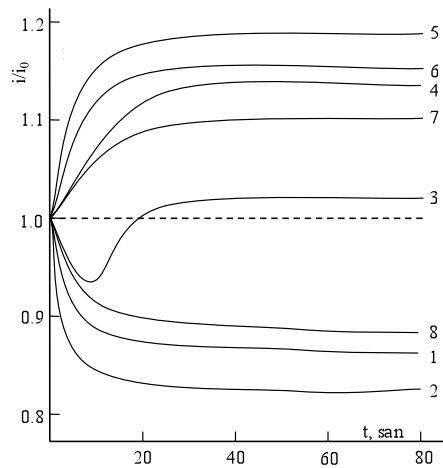


Рис.1, а. Кинетика темнового тока в кристаллах $p\text{-GaSe}\langle\text{Gd}\rangle$ при различных значениях приложенного внешнего напряжения.

U, В: 1 - 4; 2 - 6; 3 - 9; 4 - 12; 5 - 16; 6 - 20; 7 - 24; 8 - 28.

$d \approx 0.2$ мм; $T = 77\text{K}$; $N \approx 10^{-4}\text{ат.}\%$

При малых напряжениях $\Delta i < 0$ (рис. 1, б, кривая 9) наблюдается релаксация спадающего характера (рис.1, а, кривые 1, 2 и рис.1, б кривая 2), которая при средних значениях U заменяется возрастающей (рис.1, а, кривые 3-7 и рис.1, б кривые 3, 4, 6), при более высоких напряжениях опять доминирует спадающая релаксация (рис.1, а, кривая 8 и рис.1, б кривая 7). В легированных лантаноидами кристаллах характер релаксации темнового тока и величина $|\Delta i|$, помимо напряжения и температуры, оказываются зависимыми также от уровня легирования (рис. 2), а от химической природы (материала) введенной примеси почти не зависит (рис.1.б, кривые 1, 5, 8, 10-15).

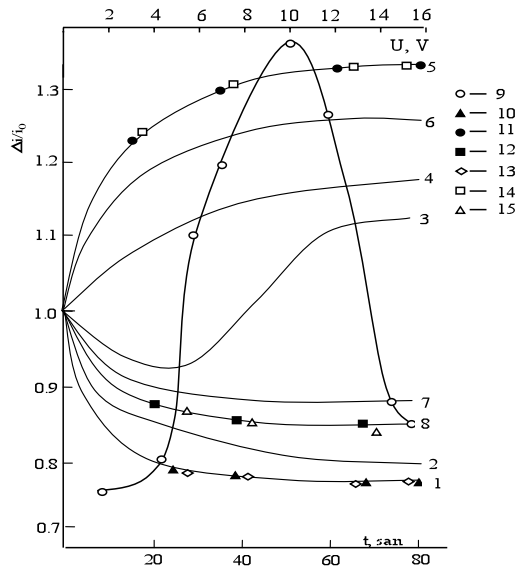


Рис.1, б. Зависимость относительного изменения темнового тока от времени (кривые 1-8, 10-15) и напряжения (кривая 9) в кристаллах p-InSe, легированных атомами Dy (кривые 1-9), Ho (кривые 10-12) и Gd (кривые 13-15) при различных значениях приложенного внешнего напряжения U, В: 1, 10, 13 - 2; 2 - 4; 3 - 6; 4 - 8; 5, 11, 14 - 10; 6 - 12; 7 - 14; 8, 12, 15 - 16. $N=10^{-4}$ ат.%; $d \approx 0.2$ мм; $T=77$ К.

После установления стационарного значения темнового тока при не очень больших напряжениях ток через образец почти не меняется со временем (рис. 3, а, кривые 1-4 и рис. 3, б, кривые 1, 2). Однако при длительном воздействии на образец внешнего напряжения, большего некоторого граничного ($U_{гр}$), ток через него медленно спадает от $i_{ст}$ до некоторого нового стационарного $i'_{ст} < i_{ст}$ (рис.3, а, кривые 5 и 6, рис. 3, б, кривые 3-6 и 4', 5'). При этом, длительность времени (τ_0), необходимого для спада тока от $i_{ст}$ до $i'_{ст}$, а также $\Delta i' = i_{ст} - i'_{ст}$, помимо температуры, оказывается зависимой также от величины напряжения. С повышением температуры значения τ_0 и $\Delta i'$ уменьшаются. С ростом напряжения сначала τ_0 уменьшается, $\Delta i'$ возрастает, а далее при более высоких значениях U) зависимости $\tau_0(U)$ и $\Delta i'(U)$ выходят на насыщение. При оптимальных условиях $\frac{\Delta i'}{i_{ст}}$ достигает $\sim 0,30$.

Как в чистых, так и в легированных лантаноидами кристаллах низкопроводящее состояние имеет запоминающий характер (рис. 3, а, кривые 5 и 6, рис. 2, б, кривые 3-5, точки «В»). Эту память можно стереть различными способами – нагреванием или освещением образца.

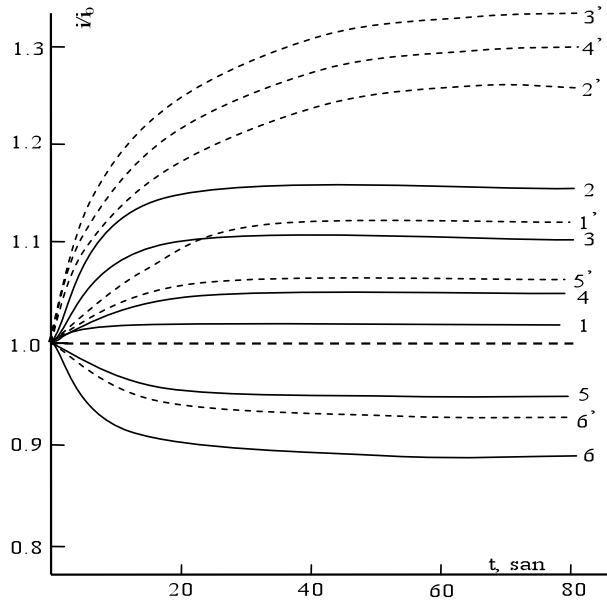


Рис. 2. Кинетика темного тока в кристаллах p-GaSe<Gd> (кривые 1-6) и n-InSe<Ho> (кривые 1'-6') при различных уровнях легирования. N, ат. %: 1, 1' - 0; 2, 2' - 10^{-5} ; 3, 3' - 10^{-4} ; 4, 4' - 10^{-3} ; 5, 5' - 10^{-2} ; 6, 6' - 10^{-1} $d \approx 0.2$ мм; T=77K; U; B: 1÷6 - 16; 1'÷6' - 10.

С изменением уровня легирования меняются значения τ_0 и $\frac{\Delta i'}{i_{CT}}$ (рис.3, б, кривые 3-5). Влияние химической природы введенной примеси на это явление не было обнаружено.

Переходя к обсуждению полученных результатов, прежде всего, следует отметить, что как уже показано в ранних работах [1-3], кристаллы слоистых соединений $A^{III}B^{VI}$ при не очень высоких температурах могут удовлетворительно описываться двухбарьерной энергетической моделью частично-неупорядоченного полупроводника, состоящего в целом из низкоомной матрицы (НО) с хаотическими крупномасштабными высокоомными включениями (ВО) [8]. Кроме этого, показано, что в запрещенной зоне этих кристаллов существуют также различные уровни прилипания (мелкие α - и глубокие β -) и центры рекомбинации (быстрые S- и медленные r-) [9]. Причем α - и S- центры преимущественно локализованы в НО, а β - и r- центры в ВО кристалла. На границе НО и ВО существуют рекомбинационные, а в НО между соседними ВО-дрейфовые барьеры для тока.

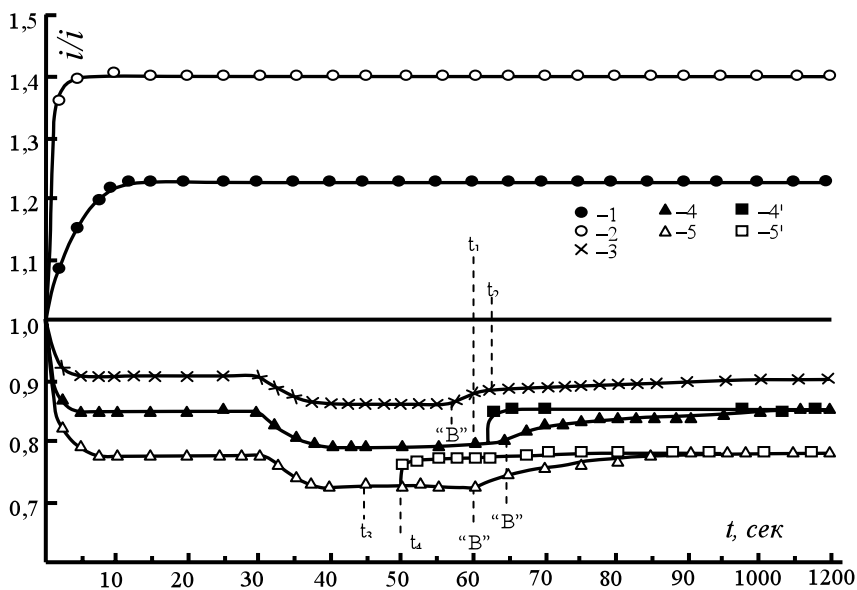
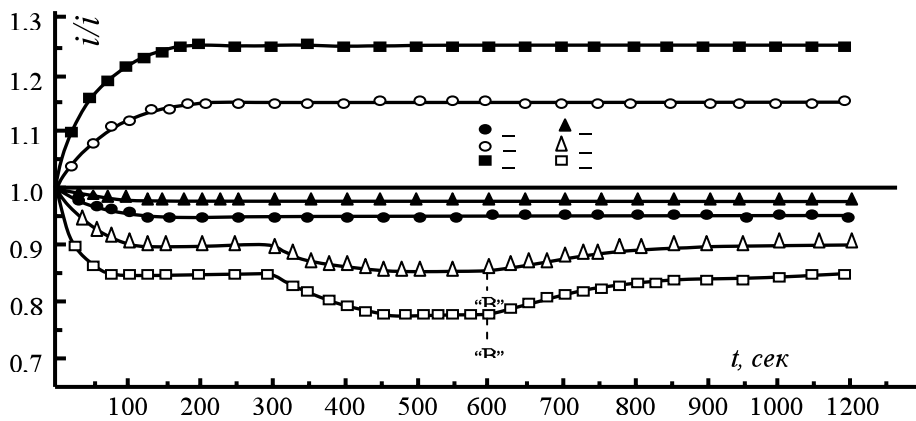


Рис.3. Кинетика темнового тока в чистых (а) и легированных гадолинием (б) кристаллах р-GaSe при различных условиях.

а) $U, В$: 1 - 2; 2 - 10; 3 - 28; 4 - 35; 5 - 42; 6 - 50. $T=77$ К.

б) $U, В$: 1 - 10; 2 - 22; 3, 4, 5, 4', 5' - 45

N , ат.‰: 1, 2, 4, 4' - 10^{-4} ; 5, 5' - 0; 3 - 10^{-1} . $T=77$ К.

При включении электрического напряжения, в зависимости от его величины, меняется доминирующего механизма взаимодействия свободных носителей заряда с точечными дефектами. При малых U преобладает взаимодействие свободных носителей притягивающими центрами и ток, уменьшаясь со временем, получает свое стационарное значение. С дальнейшим повышением U , за счет заметной инжекции через токовые контакты, постепенно стираются дрейфовые барьеры и наблюдается возрастающая релаксация темнового тока. Наконец, при тех напряжениях, когда дрейфовые барьеры почти полностью снимаются, начинает преобладать захват свободных носителей заряда отталкивающими точеч-

ными центрами. Поэтому опять наблюдается релаксация спадающего характера. При легировании обеих групп кристаллов лантаноидами, внутрикристаллические условия для переноса заряда в них заметным образом меняются. При малых N , вследствие увеличения флуктуации потенциала относительно имеющегося место в чистых кристаллах доминирующим является возрастающая релаксация. Однако при больших N , с ростом уровня легирования постепенно спрямляются флуктуации потенциала, и основным фактором, определяющим токопрохождение, становится взаимодействие носителей точечными центрами захвата - притягивающими при относительно малых и отталкивающими при более высоких напряжениях (рис.1).

Спад темнового тока при длительном воздействии на образец напряжения, большего некоторого граничного, по всем признакам скорее всего, обусловлена электрической утомляемостью изучаемых кристаллов. В частности, предполагается, что когда на образец длительное время воздействует внешнее напряжение, большего некоторого граничного, вследствие повышения уровня инжекции меняется высота рекомбинационных барьеров и облегчается преодоление свободных носителей через них. Эти носители, попадая в ВО, захватываются глубокими уровнями β прилипания, что, в свою очередь, вызывает увеличение концентрации неосновных носителей на центрах быстрой рекомбинации (S) и, соответственно, темпа рекомбинации основных носителей. Вследствие этого ток уменьшается от $i_{ст}$ до $i'_{ст}$. После прекращения воздействия напряжения с $U \geq U_{гр}$, захваченные на уровнях β -прилипания, носители заряда освобождаются значительно медленно и, поэтому низкопроводящее состояние образца имеет запоминающий характер. После полного «отдыха» образца восстанавливается его исходное состояние. Стирание памяти путем нагрева или же освещением образца, скорее всего, связано термическим или же оптическим опустошением β -уровней, соответственно.

С изменением уровня легирования меняется степень пространственной неоднородности (неупорядоченности) кристалла. Поэтому меняется и параметры эффекта электрической утомляемости в зависимости от содержания введенной примеси. Независимость этого явления от химической природы введенной примеси свидетельствует о том, что оно не связано с внутрицентровыми процессами, обусловленные самим примесным атомом.

Эта предложенная модель в силе удовлетворительно объяснить особенности кинетики темнового тока в частично-неупорядоченных кристаллах типа соединений $A^{III}B^{VI}$ со слоистой структурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдинов А.Ш., Кязым-заде А.Г. Явление фото- и электропамяти в высокоомных монокристаллах n-InSe. // ФТП. 1975, т.9, №9, с. 1690-1693; Эффект фотоэлектрической памяти в p-GaSe. // ФТП. 1975, т.9, №11, с. 2135-2138.
2. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Багирова А.Т., Рзаев Р.М., Эйвазова Г.Х. Влияние легирования редкоземельными элементами на некоторые электрические свойства монокристаллов селенида индия. // Ж. "Неорганические материалы", 2006, т.42, № 9, с.1035-1039.
3. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Багирова А.Т., Рзаев Р.М., Эйвазова Г.Х. Электрические неустойчивости в легированных редкоземельными элементами монокристаллах

- селенида галлия. // Изв. НАН Азербайджана, сер. физ.-мат. и техн. наук, 2006, т. 26, № 5, с. 75-80.
4. Абдинов А.Ш., Кязым-заде А.Г. Аномальная фотопроводимость в монокристаллах электронного селенида индия. // ФТП, 1975, т.9, №10, с. 1970-1976.
 5. Абдинов А.Ш., Акперов Я.Г., Мамедов В.К., Салаев Эль. Ю. Долговременно релаксирующая проводимость, возбужденная электрическим полем, в монокристаллах селенидов индия и галлия. // ФТП. 1981, т.15, №1, с. 113-119.
 6. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф. Переходная релаксация темнового тока в чистых и легированных кристаллах селенида индия. // Ж. "Неорганические материалы", 1994, т.30, № 3, с.339-341.
 7. Гусейнов А.М., Садыхов Т.И. Получение легированных редкоземельными элементами монокристаллов селенида индия. // В сб. «Электрофизические свойства полупроводников и плазмы газового разряда». Баку: АГУ, 1989, с.42-44.
 8. Шейнкман М.К., Шик А.Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках. // ФТП, 1976, т.10, № 2, с.209-232.
 9. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Наука, 1963, 494 с.

LAYLI QURULUŞLU A^{III}B^{VI} BİRLƏŞMƏLƏRİ TIPLİ QİSMƏN NİZAMSIZ KRİSTALLARDA QARANLIQ CƏRƏYANIN KİNETİKASI HAQQINDA

R.F.BABAYEVA

XÜLASƏ

Təmiz və $N \leq 10^{-1}$ at.% miqdarında Gd, Ho, Dy lantanoidləri ilə aşqarlanmış indium və qallium monoselenidlərində müxtəlif şəraitlərdə qaranlıq cərəyanın kinetikasi tədqiq edilmişdir.

Müəyyənləşdirilmişdir ki, bu kristallarda aşağı temperaturalarda nümunəyə tətbiq edilən gərginliyin qiymətindən və aşqarlanma səviyyəsindən asılı olaraq qaranlıq cərəyanın müxtəlif xarakterli relaksasiyaları müşahidə olunur. Göstərilmişdir ki, alınmış nəticələri qadağan olunmuş zonasında müxtəlif tip lokal səviyyələri olan iki enerji çəpərli, qismən nizamsız yarımkeçirici modeli əsasında izah etmək olar.

TO THE QUESTION OF THE KINETICS OF DARK CURRENT IN MONOCRYSTALS OF A^{III}B^{VI} COMPOUNDS WITH LAYERED STRUCTURE

R.F.BABAYEVA

SUMMARY

The article investigates the kinetics of dark current in pure and with $N \leq 10^{-1}$ at. % alloyed by Gd, Ho, Dy lanthanides GaSe and InSe crystals under various conditions.

It is established, that the relaxations of the dark current of various characters depending on the size of the enclosed pressure and level of the doping are observed in the field of $T \leq 150K$ in these crystals. It is shown, that the results can be explained on the basis of semiconductor model with two energetic barriers and various types of local levels in the forbidden zone.