

вестник Дона: электронный журнал. 2012. №3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/954>

References:

1. Radiation resistance of materials. Reference. Ed Dubrovsky V. B. Atomizdat, 1973. – 264 p.
2. V. B. Dubrovsky, Radiation resistance of construction materials. Stroizdat, 1977. – 278 p.
3. V. I. Andreev, Some problems and methods of mechanics of heterogeneous bodies: Monograph – M.: Publishing house ASV, 2002. – 288 p.
4. N. N. Kalitkin, Numerical methods. M.: Nauka, 1978 – p.512
5. S.V. Litvinov, Yu.F. Kozelsky, B. M. Yazyev, Calculation of cylindrical bodies at impact of thermal and radiation loads [Engineering journal of don]. 2012. №3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/954>

УДК 537.226/.621.315.592

Атлуханова Л.Б., Габиров Ф.С., Ризаханов М.А.

НЕСТАНДАРТНЫЕ РЕЛАКСАЦИИ ИНДУЦИРОВАННОЙ ПРИМЕСНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В СОЕДИНЕНИЯХ $A^{II}B^{VI}$ И $A^{III}B^V$

Atlukhanova L. B., Gabibov F. S., Rizakhanov M. A.

CUSTOM RELAXATION INDUCED IMPURITY PHOTOCONDUCTIVITY IN THE UNITED $A^{II}B^{VI}$ and $A^{III}B^V$

Аннотация. Описаны два типа нестандартных релаксаций индуцированной примесной фотопроводимости (ИПФ), наблюдаемых в фотопроводниках CdS , $ZnSe$, $GaAs$ и др.) в зависимости от кинетических особенностей ловушек. В одном случае на стадии послевспышечного монотонного спада, характерной для релаксаций, связанных с медленными ловушками (отношение скорости захвата электрона к скорости рекомбинации $R \ll 1$), фотоответ испытывает колебания низкой частоты ($f=0.03-0.3$ Гц). Релаксация второго типа свойственна быстрым фотоэлектрически ловушкам ($R \gg 1$): в измерениях на переменном сигнале ($f \geq 20$ Гц) кривые релаксации приобретают форму кривых обычной примесной фотопроводимости. Проанализированы электронные процессы, ответственные за нестандартные релаксации ИПФ. На примере быстрых центров, в состав которых входит характерный для $A^{II}B^{VI}$ $\langle Ag \rangle$ до-

нор Ag_i^0 , впервые в полупроводниках экспериментально исследована зависимость сечения захвата электронов ловушек от энергии, выделяемой при локализации.

Ключевые слова: индуцированная фотопроводимость, электронная ловушка, центр рекомбинации, энергия ионизации, сечение захвата, оптически активная ловушка, фотоионизация, макронеоднородности.

Abstract. Two types of non-standard relaxation induced impurity photoconductivity (IIP) observed in photoconductors CdS, ZnSe, GaAs and others, depending on the kinetic characteristics of the traps are described. In one case, at the stage of post flashing monotonic decay which is typical for relaxation associated with slow traps (the ratio of the speed of the electron capture to the recombination rate ($R \ll 1$), the photo response is experiencing vibrations of low frequency ($f=0.03-0.3\text{Hz}$). Relaxation of the second type characterized by rapid photoelectric traps ($R \gg 1$): measurement alternating signal ($f \geq 20\text{Hz}$) relaxation curves take the form of curves usual impurity photoconductivity. Electronic processes responsible for relaxation of non-standard IIP are analyzed. For example, fast-centers, which include the characteristic $A^{II}B^{VI} <Ag>$ donor Ag_i^0 , for the first time in semiconductors experimentally, investigated the dependence of the cross section of electron capture by traps energy released during localization.

Key words: the induced photoconductivity, electronic trap, center of recombination, ionising energy, section of capture, optically an active trap, photoionization, macroinhomogeneities.

Введение. В физике полупроводников широкое распространение получили представления об электронных ловушках (центрах прилипания), как о локальных центрах, способных обмениваться электронами лишь с одной (с-зоной). Исследованию электронных ловушек посвящено большое число работ [1]. Однако физико-химическая природа и различные особенности поведения электронных ловушек недостаточно изучены.

Постановка задачи. В данной работе методом индуцированной примесной фотопроводимости выполнены исследования с целью установления кинетических особенностей электронных ловушек в широкозонных фотопроводниках АПВVI (CdSe, CdS ZnSe и др.) и АПВV (GaAs).

Методы исследования. Классический вариант релаксации ИПФ в фотопроводниках с одной оптически активной ловушкой описан Рывкиным [1]. Соответствующие кривые кинетики ИПФ, записанные по методике последовательного воздействия на фотопроводник собственным светом с целью неравновесного заполнения электронной ловушки и примесным светом для ее ионизации, состоят из двух стадий.

На первой стадии фотоответ резко увеличивается по причине фотоионизации ловушки, а на второй постепенно спадет из-за активизации процесса перехода носителей заряда на центр рекомбинации. Скорость релаксации фотоотве-

та зависит от соотношения кинетических параметров ловушки и центра рекомбинации.

Обсуждение результатов. Релаксация классического типа (рис.1, кривая а) может наблюдаться и в предварительно возбужденных собственным светом фотопроводниках типа GaAs с двумя близкими по глубине оптически активными центрами, один из которых донор, другой – акцептор.

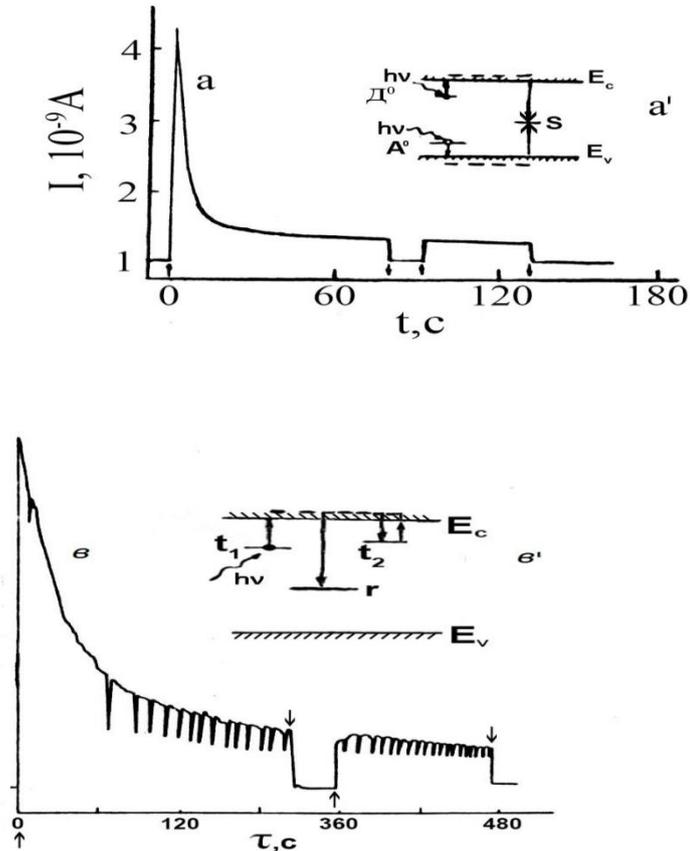


Рисунок 1. - а, в – кривые релаксации ИПФ в кристаллах и в ZnSe<Ag> при 90 К.

Инфракрасное излучение синхронно ионизирует оба центра, что сопровождается вспышечным ростом ИПФ. Рекомбинация носителей через быстрый (s-) центр рекомбинации стимулирует переход структуры в квазистационарное состояние постепенного спада фотоответа (схема а').

Релаксация ИПФ, сопровождаемая низкочастотными колебаниями, наблюдается в кристаллах ZnSe<Ag> с оптически активной ловушкой $E_c-0,4 \text{ эВ}$ (рис. 1, кривая в), фотоответ на стадии после вспышечного спада переходит в отличие от классического варианта в режим колебаний с частотой, возрастающей по мере фотопередислокации электронов из оптически активной ловушки t_1 на центр рекомбинации (схема в'). Колебания являются затухающими.

Декремент затухания, частота колебаний привязаны к числу свободных фотоэлектронов.

Стрелками показаны точки включения (\uparrow) и выключения инфракрасного света а в схемы электронных переходов, ответственных за релаксацию ИПФ в

GaAs и ZnSe<Ag>. Ранее в CdSe<Au> исследована неустойчивость темнового тока в форме S-образной вольт-амперной характеристики, наблюдаемой как следствие ударной ионизации γ -центра рекомбинации $E_v + 0,6$ эВ [2].

Колебания, наблюдаемые на стадии роста равновесного примесного фототока, исследованы в CdSe<Cu> [3]. Роль рабочего центра играет ловушка $E_c - 0,11$ эВ, которая, если судить по ее весьма низкому сечению захвата электрона $\sigma n \approx 10^{-23}$ м², может быть причислена к двухзарядным акцепторам. Двойные акцепторы с уровнями вблизи с-зоны характерны для соединений АІВVI [4]. Перечисленные неустойчивости тока в CdSe<Au>, CdSe<Cu> объяснены [2,3] CdSe<Au>, CdSe<Cu> в предположении об их электрической макронеоднородности. Центры $E_v + 0,6$ эВ, $E_c - 0,11$ эВ могут размещаться в объеме крупномасштабных нарушений, в пределах которых формируются электрические поля, достаточные для разогрева носителей заряда и варьировать населенность электронных центров.

Попытки объяснить природу осциллирующей ИПФ приводят к выводу о существовании и в ZnSe<Au> высокоомных фрагментов (электродоменов), в пределах которых не раздельно, а вместе локализованы γ -центр рекомбинации и двойной акцептор, играющий роль ловушки, непосредственно ответственной за колебания ИПФ.

По мере фотопередислокации электронов из оптически активной ловушки t_1 на γ -центр рекомбинации (рис. 1.) происходит рост внутреннего поля в объеме макронеоднородности, разогрев фотоэлектронов до уровня, достаточного для преодоления рекомбинационного барьера вокруг ловушки - двойного акцептора t_2 .

Лавинообразный захват фотоэлектронов может привести к новому поэтапному быстрому росту внутреннего поля в объеме макронеоднородности, достаточному для тепловой ионизации ловушки t_2 . Прямые доказательства явления термической ионизации ловушки, облегченной электромодуляцией ее сечения захвата электрона, представлены в сравнительно недавно опубликованной работе [5].

Фотоответ в ZnSe<Ag>, благодаря ловушке-пульсара, переходит, как и в названном выше, CdSe<Cu>, в автоколебательный режим под влиянием электрических полей, разгораемых в макронеоднородных фрагментах кристалла в зависимости от интенсивности и характера рекомбинационно активных процессов. Электронные центры такого класса в переменном локальном поле способны периодически переходить из разряда медленных в разряд быстрых ловушек.

Фотопроводники с ловушками-пульсарамы представляют прикладной интерес. На их основе могут быть сконструированы малогабаритные низкочастотные генераторы. Релаксация ИПФ, подобная релаксации равновесной примесной фотопроводимости.

В кристаллах АІВVI с примесями Ag наблюдаются быстрые ловушки, связанные с изолированным междоузельным донором Ag_i^0 ($i=1$) [6-9], распределенными по длине донор-донорными парами Ag_{20} ($i=2$) [10,11] и многоатом-

ными частицами Ag_i0 ($i \geq 3$) [9,12]. Ассоциаты Ag_i0 ($i \geq 3$) являются глубокими центрами с уровнями ниже $E_c - 0,6$ эВ и ведут себя в типичных соединениях как центры равновесной примесной фотопроводимости.

Одно и двухатомные центры Ag_i0 , Ag_20 выделяются состояниями выше уровня $E_c - 0,6$ эВ и в достаточно высокоомных соединениях играют роль как электронных ловушек, обуславливают ИПФ. Из-за значительного различия между сечениями захвата электрона ловушек Ag_i0 , $Ag_2(i)$ ($\sigma_{tn} = 10^{-14} - 10^{-16}$ (см. рис.2) и г-центра рекомбинации ($\sigma_{rn} = 10^{-17} - 10^{-19}$ см² [13]) процессы повторного захвата электронов на ловушки преобладают над скоростью их рекомбинации. Как следствие, релаксация, связанной с Ag_i0 , $Ag_2(i)$ -центрами, приобретает при частоте модуляции инфракрасного света $f \geq 20$ Гц форму релаксации равновесной примесной фотопроводимости (рис. 2, кривая a'), в том числе и релаксации фотоответа от многоатомных ассоциатов Ag_i0 ($i \geq 3$).

Распределение центров Ag_i0 ($i \geq 1$) по энергии в широком интервале $E_c - (0,20-1,2)$ эВ, однотипный характер релаксации соответствующих фотосигналов открывают возможность проконтролировать недостаточно исследованную экспериментально зависимость скорости захвата носителей заряда на ловушки от энергии, выделяемой при локализации. Ценность предпринятых исследований в том, что захват электронов на центры Ag_i0 ($i \geq 1$), несмотря на различие в их структуре, происходит в притягивающем поле заряда $+e$.

Релаксация равновесного и индуцированного примесного фотоответа, центров Ag_i0 ($i \geq 1$) на стадии спада носит биомолекулярный характер. Изменение на этой стадии числа фотоэлектронов n за время d_t

$$d_n = -v_n \sigma_{tn} n^2 d_t. \quad (1)$$

Решение дифференциального уравнения (1) представляет собой равенство

$$1/n - 1/n_0 = v_{tn} \sigma_{tn} t. \quad (2)$$

Здесь v_n - тепловая скорость электронов, n_0 - стационарная концентрация фотоэлектронов. Кривые релаксации фотопроводимости $CdS<Ag>$ в токово-временных координатах ($1/I - 1/I_0$, t), линейны (рис. 2, прямые $a-d$) в соответствии с выражением (2), I_0 , I - стационарное и текущее значения силы фототока.

Темными кружочками показаны экспериментальные значения сечения σ_{tn} в $CdS<Ag>$. Знаком «▲» выделены значения E_{tn} , σ_{tn} электронного центра $E_c - 1,18$ эВ в $CdS<Cu>$ [15].

Вставки: $a-d$ - кривые релаксации ИПФ в координатах [$1/I - 1/I_0$, t], построенные по данным измерения кинетики ИПФ в точках $h\nu = 0,26, 0,31, 0,4$, и $0,46$ эВ; a' - типичная кривая релаксации ИПФ в $CdS<Ag>$, наблюдаемом при модулированном воздействии инфракрасным светом ($h\nu = 0,26$ эВ).

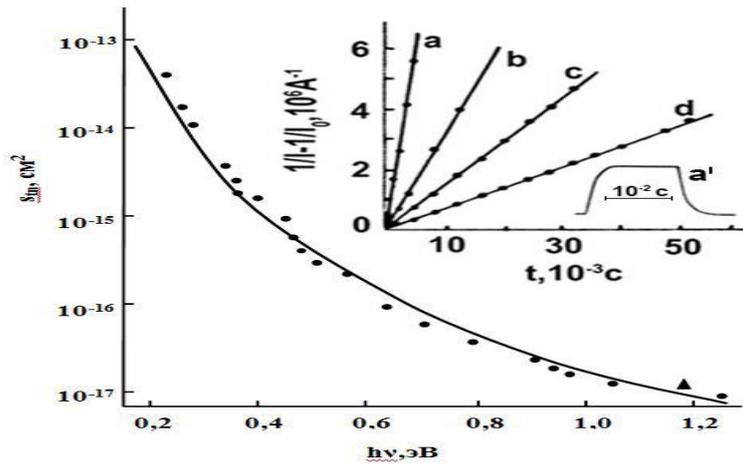


Рисунок 2. - Зависимость сечения захвата носителей заряда электронной ловушки stn [14] от энергии, выделяемой при локализации

Наклоны прямых $1/I - 1/I_0 = f(t)$, определяемые сечениями stn , а, следовательно, и сами сечения stn (на рис. 2 выделены кружочками) уменьшаются с ростом энергии фотонов или, что то же самое, с увеличением энергии, выделяемой при захвате электронов. Ошибки измерений таковы, что истинные значения сечений укладываются в интервале $stn \times 10 \pm 1 \text{ см}^2$. Уменьшение скорости захвата stn с ростом энергии локализации носителей заряда может быть объяснено в рамках предположения о динамическом аспекте механизма захвата носителей заряда на электронные центры $Ag_i^0 (i \geq 1)$.

Нормированная в точке $hv = 1.0 \text{ эВ}$ теоретическая зависимость $stn \sim Etc^{-5}$ [14], справедливая для электронных центров безизлучательного захвата (рис. 2, сплошная кривая), удовлетворительно описывает экспериментальные данные, несмотря на пренебрежение в расчетах зависимостью сечений stn от радиуса орбит соответствующих электронных центров. Возможно, что рост электронной орбиты центров $Ag_i^0 (i \geq 1)$ с уменьшением глубины компенсируется увеличением их геометрических размеров.

Вывод. В кристаллах $ZnSe$ обнаружена и исследована новая электронная ловушка, способная периодически переходить в непрерывных условиях из разряда медленного центра в разряд быстрого центра.

Установлена зависимость сечения захвата электронов от энергии, выделяемой при локализации носителей заряда на электронные ловушки, распределенные в широком интервале энергии.

Наблюдаемая падающая зависимость $stn = f(Etc)$ свидетельствует о безизлучательном захвате электронов на быстрые электронные ловушки.

Библиографический список:

1. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках, М., ГИФМЛ, 1963, 573 с.

2. Ризаханов М.А., Зобов Е.М. N-образное нарастание и колебания примесного фототока в кристаллах CdSe<Cu>, Физика и техника полупроводников, 1979, том 13, №1, 2030-2032
3. Ризаханов М.А., Зобов Е.М. Регулирование примесным светом тока в кристаллах CdSe<Au> в области отрицательного дифференциала сопротивления. Физика и техника полупроводников, 1979, т.13, №5, с. 998-1000
4. Девлин С.С. Свойства переноса. С.417-464 (в кн. Физика и химия соединений АII BVI (пер. с англ. под ред. С.А. Медведева), М., изд. «Мир», 1970.
5. Зобов Е.М., Зобов М.Е., Ризаханов М.А. Термическая ионизация электронной ловушки $E_c - 0.17$ эВ в $Zn_{0,97}Cd_{0,03}S(Cu,Cl)$, облегченная электромодуляцией ее эффективного сечения захвата, Письма в ЖТФ, 2012, т. 38, №1, 86-93.
6. Ризаханов М.А., Эмиров Ю.Н, Габибов Ф.С., Хамидов М.М., Шейнкман М.К. Природа оранжевой люминесценции в кристаллах CdS<Ag>, Физика и техника полупроводников, 1978, т. 12, №.7, с. 1342-1345.
7. Ризаханов М.А., Габибов Ф.С. Спектральные сдвиги полос индуцированной примесной фотопроводимости в кристаллах CdS<Ag>, Физика и техника полупроводников, 1979, т.13, №7, 1324-1328.
8. Ризаханов М.А., Зобов Е.М.. Неохлаждаемый примесный детектор ИК света среднего диапазона на основе неравновесно очувствленного CdS<Ag>, Физика и техника полупроводников, 1980, т.14, №12, с 2407-2410.
9. Ризаханов М.А., Хамидов М.М. Фотостимулированные явления нетепловой диффузии и ассоциации доноров в кристаллах ZnSe<Ag>, Письма в ЖТФ, 1985, т.11, №9, с.561-567.
10. Зобов Е.М., Гарягдиев Г.Г., Ризаханов М.А. Новые квазилинейчатые спектры индуцированной примесной фотопроводимости в CdS<Ag>, обусловленные рапсделенными донор-донорными парами, Физика и техника полупроводников, 1987, т. 21, №9, с.1637-1641.
11. Зобов Е.М., Ризаханов М.А. Инжекционное очувствление симметричных МПМ структур на основе CdSe<Ag> в среднем диапазоне ИК света., Физика и техника полупроводников, 1989, т.23, №7, с. 1291-1293.
12. Габибов Ф.С. Глубокие электронные центры, обуславливающие равновесную фотопроводимость в CdSe<Ag> в области $h\nu > 0,6$ эВ. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Тезисы докл. II научной конференции, Ашхабад. Ылым. 1991, с. 39-40.
13. Лашкарев В.Е., Любченко А.В., Шейнкман М.К. Неравновесные процессы в фотопроводниках, 1981, Киев, "Наукова думка", 285 с.

References:

1. S. Rivkin Photoelectric phenomena in semiconductors, М., GIFML 1963, 573

р.

2. Rizakhanov M.A., E.M. Zobov N-shaped rise and fluctuations in the impurity photocurrent in crystals CdSe <Cu>, physics and technology of semiconductors, 1979, vol 13, №1, pp. 2030-2032.
3. Rizakhanov M.A., E.M. Zobov Adjusting the impurity in the light of current crystals CdSe <Au> in negative differential resistance. Physics and engineering of semiconductors, 1979, vol.13, №5, pp. 998-1000.
4. Devlin SS transfer properties. S.417-464 (in the book. Physics and chemistry of compounds AII VVI (trans. From English. Ed. S. Medvedev), M., ed., "Mir", 1970.
5. Zobov E.M., Zobov M.E., M.A. Rizakhanov Thermal ionization electron-electron traps $E_c - 0.17$ eV in Zn_{0,97}Cd_{0,03}S (Cu, Cl), lightweight elektromodulyatsiey its effective capture cross section, Technical Physics Letters, 2012, vol 38, №1, pp. 86-93.
6. Rizakhanov M.A., JK Emirs, Habibov F.S., M.M. Khamidov, Sheinkman M.K. Nature orange luminescence in crystals CdS <Ag>, physics and technology of semiconductors, 1978, vol. 12, No. 7, pp.1342-1345.
7. Rizakhanov M.A., FS Habibov Spectral shifts bands induced impurity photoconductivity in crystals CdS <Ag>, physics and technology of semiconductors, 1979, vol .13, №7, pp.1324-1328.
8. Rizakhanov M.A., E.M. Zobov impurity detector Uncooled IR medium range light on the basis of nonequilibrium Sensing CdS <Ag>, physics and technology of semiconductors, 1980, vol .14, №12, pp. 2407-2410.
9. Rizakhanov M.A., M.M. Khamidov Fotostimulirovannye nonthermal effects of diffusion and donor associations in the crystals of ZnSe <Ag>, Technical Physics Letters, 1985, vol .11, №9, pp.561-567.
10. E.M. Zobov, G.G.Garyagdy, M.A. Rizakhanov, New quasiline spectra induced impurity photoconductivity in CdS <Ag>, due rapsredelennymi donor-donor pairs, physics and technology of semiconductors, 1987, vol .21, №9, s.1637-1641.
11. E.M. Zobov, M.A. Rizakhanov, Injection SENSITIVE JCI symmetric structures based on CdSe <Ag> in the middle range of IR light. Physics and technics of semiconductors, 1989, vol.23, №7, pp. 1291-1293.
12. F.S. Habibov, Deep electronic centers, causing the equilibrium photoconductivity in CdSe <Ag> in $h\nu > 0,6$ eV. Photoelectric phenomena in semiconductors. Abstracts. II conference, Ashgabat. Ylym. 1991, pp. 39-40.
13. V.E.Lashkarev, A.V. Lubchenco, M.K.Sheinkman Non-equilibrium processes in photoconductors, 1981, Kiev, "Naukova Dumka", 285 p.
14. G.Ascarelli, S.Rodriguez, Recombination of electron and Donors in n-type Germanum , Phys.Rev., 1961, vol.124, pp. 1321-1327.
15. J.M. Steydio Photoconductive d' impurites dans le Sulfure de Cadmium dope Cuirve,- Ann. Soc. Sci., Bruxselles, 1974, vol.88, №1, pp. 357-380.