

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЛОКАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ В  
МОНОКРИСТАЛЛАХ GaS, ЛЕГИРОВАННЫХ Tm, Yb**

**О.Б.ТАГИЕВ<sup>1,2</sup>, Г.Ю.ЭЙЮБОВ<sup>1</sup>**

*Институт Физики НАН Азербайджана<sup>1</sup>  
AZ 1143, Баку, пр. Г.Джавида, 33  
Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова  
AZ 1143, г.Баку, ул.Ф.Агаева, 14*

Исследованы темновые стационарные вольтамперные характеристики (ВАХ) высокоомных монокристаллов сульфида галлия (GaS), легированных редкоземельными элементами (РЗЭ) Yb, Tm. Показано, что в монокристаллах GaS, легированных Yb, Tm, перенос носителей заряда в нелинейной области ВАХ обусловлен монополярной инжекцией, ограниченной пространственным зарядом. Из анализа ВАХ определены параметры локальных уровней: концентрация ловушек ( $N_t$ ), глубина залегания ( $E_t$ ).

**ВВЕДЕНИЕ**

Как известно, инжекционные токи являются важными для изучения локальных уровней в полупроводниках, диэлектриках и структурах на их основе [1-3]. Локальные уровни оказывают сильное воздействие на инжекционные токи, возникающие во внешнем электрическом поле. В зависимости от характера распределения локальных уровней вольтамперная характеристика (ВАХ) имеет сложную структуру. Поэтому исследование инжекционных токов в полупроводниках и диэлектриках позволяет получить информацию о локальных уровнях: их концентрации, энергетическом положении в запрещенной зоне, сечении захвата свободных носителей заряда.

В последние годы интенсивно было изучено влияния легирования редкоземельными элементами (РЗЭ) на физические свойства полупроводниковых материалов Si, GaAs, GaP, InP, GaS и GaSe [3-18]. Примеси РЗЭ создают в запрещенной зоне широкозонных полупроводников фоточувствительные и люминесцентные центры [4-6]. Влияние пар РЗЭ на электрические и фотоэлектрические свойства, как показывает анализ литературы [3-18], не исследовано. В них механизмы влияния РЗЭ на электрические свойства GaS не выяснены. Поэтому в настоящей работе при разных температурах и электрических полях исследовано влияние примесей РЗЭ, таких как Yb, Tm, на электрические свойства GaS.

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Монокристаллы GaS, легированные Yb, Tm и парой РЗЭ Tm, Yb, были получены методом Бриджмена и обладали проводимостью р-типа. Удельное сопротивление полученных образцов при комнатной температуре составляло  $\sim 10^{10} \div 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Образцы GaS, легированные Yb, Tm и парой Tm и Yb, для исследования приготавливались скалыванием крупных монокристаллов по плоскости спайности (001) на пластинки толщиной от 10  $\mu\text{м}$  до 150  $\mu\text{м}$ . Индиевые контакты к образцам создавались либо вплавлением, либо при помощи напыления на противоположные зеркальные поверхности перпендикулярные оси С-кристалла. Вольтамперные характеристики измерялись при постоянном токе в темноте.

В данной работе представлены результаты исследований ВАХ в монокристаллах GaS, активированных 0,1 ат. % Yb, и 0,1 ат. % Tm, и парой 0,1 ат. % Tm и 0,1 ат. % Yb в интервале температур 280  $\div$  363 K и электрических полей 6,7  $\cdot 10^1 \div$  4,4  $\cdot 10^4 \text{ V/cm}$ .

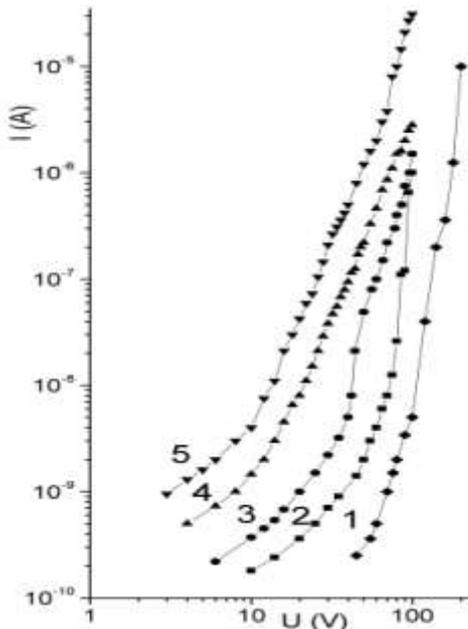
---

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Статические ВАХ кристалла GaS, легированного 0,1ат.%Tm и 0,1ат.%Yb, при различных температурах в интервале 280÷363К представлены на Рис.1.

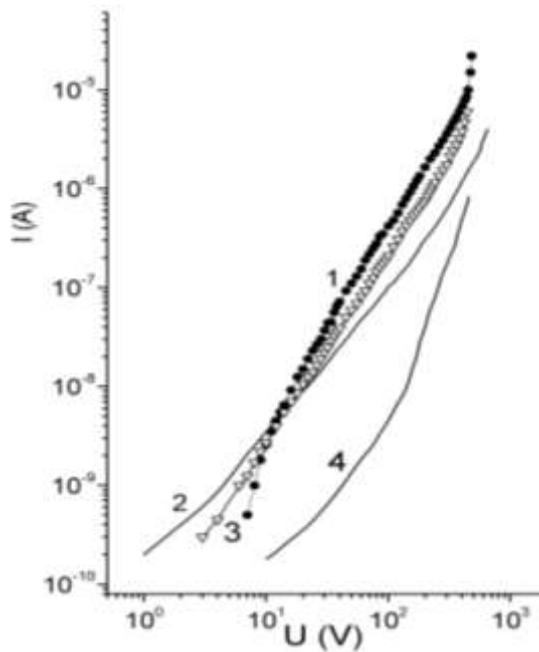
Видно, что при высоких температурах на ВАХ наблюдаются линейные ( $J \sim U$ ), квадратичные участки ( $J \sim U^2$ ) и участок резкого роста тока ( $J \sim U^n$ , где  $n > 2$ ). С понижением температуры до 280К в степенной зависимости  $J \sim U^n$  степень  $n$  увеличивается в интервале 2,2÷6,0.

На Рис.2 при 297К представлены ВАХ специально нелегированных монокристаллов GaS (Рис.2(1)) и легированных примесями Yb (Рис.2(2)), Tm (Рис.2(3)), и парой Tm, Yb (Рис.2(4)). На ВАХ нелегированных кристаллов выявлены кубический участок ( $J \sim U^3$ ), квадратичная область ( $J \sim U^2$ ) и область резкого роста тока ( $J \sim U^n$ ,  $n > 2$ ), а ВАХ кристалла GaS, легированного 0.1ат.%Yb, (Рис.2(2)) состоит из следующих участков: 1 - линейный ( $J \sim U$ ), 2- степенной (закон трёх вторых  $J \sim U^{3/2}$ ), 3 - квадратичный и 4 - участок резкого роста тока. ВАХ кристалла GaS, легированного 0.1ат.%Tm, (Рис.2(3)) обнаруживает квадратичную область и область резкого роста тока. ВАХ кристалла GaS, легированного 0.1ат.%Yb и 0.1ат.%Tm (Рис.2(4)) состоит из следующих участков: 1- линейный ( $J \sim U$ ), 2- участок ловушечный квадратичный и 3- участок резкого роста тока.



**Рис.1.**

Темновые ВАХ монокристаллов GaS, легированных 0,1ат.%Tm, 0,1ат.%Yb при различных температурах: 1-280К, 2-297К, 3-320К, 4-441К, 5-363К.



**Рис. 2.**

Темновые ВАХ монокристаллов GaS (1), GaS, легированных 0,1ат.%Yb (2), 0,1ат.%Tm (3) и 0,1ат.%Tm, 0,1ат.%Yb (4) при 297К.

Подобные ВАХ характерны для токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), в изоляторах с ловушками захвата носителей [1]. Наличие на ВАХ квадратичного участка и выполнение условия  $J \sim L^{-3}$ ,  $U_{ПЗЛ} \sim L^2$ ,  $\theta \ll 1$ , (где  $U_{ПЗЛ}$  - напряжение, соответствующее точке перехода от «ловушечного» квадратичного участка к участку резкого роста тока), а также наличие остаточного заряда после воздействия электрического поля из нелинейной области ВАХ показывает, что перенос носителей заряда в области сильных электрических полей для легированных и легированных монокристаллов GaS обусловлен монополярной инжекцией.

Поскольку для исследуемых образцов выполняется режим ТОПЗ, параметры ловушек вычислялись из кривых ВАХ применением модели Лампертовской теории токов монополярной инжекции, соответствующей дискретным уровням в запрещенной зоне. Концентрация, глубина залегания, фактор захвата ловушек вычислялись по формулам [1]

$$j = \frac{8}{9} \theta \varepsilon \varepsilon_0 \mu \frac{U^2}{L^3}, \quad (1)$$

$$N_t = 1,1 \cdot 10^6 \chi \frac{U_{ПЗЛ}}{L^2}, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{n}{n_t} = \frac{N_v}{gN_t} \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $j$ -плотность тока,  $\theta$ -фактор захвата,  $\varepsilon$ -диэлектрическая постоянная кристалла ( $\varepsilon=5,9$  [18]),  $\varepsilon_0$ -диэлектрическая проницаемость вакуума носителей заряда,  $\mu$ -подвижность носителей заряда (при температуре 300К  $\mu=20\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  [19]),  $n$ -концентрация свободных электронов,  $n_t$ - концентрация захваченных электронов  $N_t$ -концентрация ловушек,  $\chi$ - относительная диэлектрическая проницаемость среды ( $\chi=\varepsilon$ ),  $N_v$ -эффективная плотность состояний в валентной зоне (при 300К  $N_v=10^{21}\text{cm}^{-3}$  [19]),  $E_t$ - глубина залегания ловушек,  $g=2$  ( $g$ - фактор спинового вырождения).

Вслед за законом Ома наблюдение «ловушечного» квадратичного участка на ВАХ для GaS, легированного 0,1ат.%Tm, 0,1ат.%Yb позволяет заключить, что ловушки расположены выше равновесного уровня Ферми, т.е. выполняется условие  $(E_t-F)/kT \gg 1$ , и поэтому в исходном состоянии уровни незаполнены.

На ВАХ для монокристалла GaS, легированного 0.1 ат.%Yb, (Рис.2(2)) наличие участка  $J \sim U^{3/2}$  между омическим и квадратичным участкам соответствует монополярной инжекции для случаев мелких ловушек  $(E_t-F) \gg kT$ , и величина тока выражается формулой, которая приведена в работе [20]

$$J = \frac{2\pi\sqrt{2}}{3} \mu_p (\theta \varepsilon \varepsilon_0 e p_0)^{1/2} V^{3/2}, \quad (4)$$

где  $e$ - заряд электрона,  $p_0$  – концентрация равновесных носителей заряда.

Параметры ловушек, определенные из ВАХ кристаллов GaS, легированных парой РЗЭ Yb и Tm, представлены в Таблице 1.

**Таблица 1.**

Параметры глубина залегания в монокристалле GaS с легированием парой Yb и Tm.

| T, K | $\theta$             | $E_t$ , eV | $N_t$ , $\text{cm}^{-3}$ |
|------|----------------------|------------|--------------------------|
| 297  | $6,36 \cdot 10^{-7}$ | 0,80       | $3,25 \cdot 10^{13}$     |
| 320  | $2,52 \cdot 10^{-6}$ | 0,83       | $2,52 \cdot 10^{13}$     |
| 341  | $2,87 \cdot 10^{-5}$ | 0,87       | $8,65 \cdot 10^{12}$     |
| 363  | $4,60 \cdot 10^{-5}$ | 0,90       | $7,21 \cdot 10^{12}$     |

Из расчета ВАХ монокристаллов GaS, легированных РЗЭ Yb и Tm, согласно лампертовской теории монополярной инжекции были определены параметры локальных уровней при 293К, значения которых приведены в Таблице 2.

Температурная зависимость фактора захвата, построенная в координатах  $\lg\theta \sim 10^3/T$  носит линейный характер. Согласно работе [21], из наклона прямой определяется глубина залегания ловушек  $E_t=0,58\text{eV}$ , а из пересечения прямых с осью  $\lg\theta$  при  $10^3/T=0$  определяется концентрация ловушек  $N_t=5 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$ .

Температурная зависимость электропроводности GaS, легированного 0.1ат.%Yb и 0.1ат.%Tm, построенная в координатах  $\lg\sigma \sim 10^3/T$  носит линейный

характер. Глубина залегания, определенная по наклону этой зависимости, составляет 0,62eV

**Таблица 2.**

Параметры глубины залегания в нелегированных и легированных Yb и Tm монокристаллах GaS.

| Параметры<br>ловушек<br>Материалы | $E_t$ , eV | $N_t$ , $\text{cm}^{-3}$ | $\theta$             |
|-----------------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| GaS                               | 0,61       | $2,40 \cdot 10^{-13}$    | $9,29 \cdot 10^{-4}$ |
| GaS: 0,1 ат. % Tm                 | 0,66       | $2,47 \cdot 10^{-13}$    | $2,95 \cdot 10^{-4}$ |
| GaS: 0,1 ат. % Yb                 | 0,64       | $9,23 \cdot 10^{-12}$    | $3,06 \cdot 10^{-4}$ |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований ВАХ при различных температурах и электрических полях в монокристаллах GaS, легированные Yb, Tm и парой Tm, Yb, определены энергетические спектры локальных уровней. Установлено, что в этих монокристаллах нелинейная область ВАХ обусловлена монополярной инжекцией.

1. М.Ламперт, П.Марк, *Инжекционные токи в твердых телах*. М.: Мир, (1973) 416.
2. С.Manfredotti, C.De Blasi, S.Galassini, G.Miccoci, L.Buggiero, A.Tepore, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **36** (1976) 569.
3. S.Nespurek, J.Sworakowski, *Phys. Stat. Sol.(a)*, **41** (1977) 619.
4. W.I.Dovrov, R.A.Burchanan, *Appl. Phys. Lett.*, **21** №5 (1972) 201.
5. А.А.Каминский, С.Э.Саркисов, Нгах Чан и др., *Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы*, **16** (1980) 1333.
6. Л.В.Астафьева, Г.П.Скорняков, А.А.Камарзин, Ю.Н.Маловицкий, *ФТТ*, **24** (1982) 647.
7. Н.Т.Баграев, Л.С.Власенко, И.А.Меркулов, А.А.Лебедев, Л.Юсупов, *Письма в ЖЭТФ*, **32** (1980) 212.
8. В.Ф.Мастеров, В.В.Романов, Б.Е.Саморуков, *ФТП*, **12** (1978) 1616.
9. В.Г.Тадиев, Г.М.Нифтиев, Ф.Ш.Айдаев, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **89** (1985) 639.
10. В.Г.Тадиев, Г.М.Нифтиев, С.А.Абушов, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **118** (1983) К13.
11. Б.Г.Тадиев, Г.М.Нифтиев, Ф.Ш.Айдаев, В.Ф.Золин, Ч.М.Брискина, В.М.Маркушев, *Оптика и Спектроскопия*, **62** (1987) 461.
12. V.A.Kasatkin, F.P.Kesamanly, V.G.Makarenko, V.F.Masterov, B.Ye.Samorukov, *Soviet Phys. – Semicond.*, **14** (1980) 1092.
13. V.A.Kasatkin, F.P.Kesamanly, B.E.Samorukov, *Sov. Phys. Semicond*, **15** (1981) 352.
14. L.F.Zakharenkov, V.A.Kasatkin, F.P.Kesamanly, B.E.Samorukov, M.A.Sokolova, *Sov. Phys. Semicond.*, **15** (1981) 946.
15. J.Wagner, J.Windscheif, H.Ennen, *Phys. Rev. B*, **30** (1984) 6230.
16. G.Aszodi, J.Weber, Ch.Uihlein, L.Pu-lin, H.Ennen, U.Kaufmann, J.Schneider, J. Windscheif, *Phys. Rev. B*, **31** (1985) 7767.
17. N.A.Sobolev, *Microelectronics Journal*, **26** (1995) 725.
18. K.R.Allachverdiev, S.S.Babaev, E.Yu.Salaev, M.M.Tagiev, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **96** (1979) 177.
19. А.Н.М.Кипперман, Т.В.А.М.Слиепенбеек, *Nuovo cimento*, **63 B** №1 (1969) 36.
20. R.K.Willardson, Albert C.Beer, *Semiconductors and semimetals. New York and London, Academic Press.*, (1970) 361.
21. R.H.Bub, *J. Applied Physics*, **33** (1962) 1733.

**O.B.TAĞIYEV, Q.Y.EYYUBOV**

Nadir torpaq elementləri Yb və Tm ilə aşqarlanmış GaS monokristallarının volt-ampere xarakteristikaları (VAX) tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, Yb və Tm ilə aşqarlanmış GaS monokristallarının VAX-nın qeyri-xətti hissəsində yükdaşıyıcıların daşınması fəza yükləri ilə məhtudlaşmış monopolyar injeksiya ilə təmin olunur. VAX-nın analizindən local səviyyələrin parametrləri: tələlərin konsentrasiyası ( $N_t$ ) və yerləşmə dərinliyi ( $E_t$ ) təyin edilmişdir.

**ENERGY SPECTRA OF LOCAL LEVELS IN GaS SINGLE CRYSTALS, DOPED Yb, Tm**

**O.B.TAGIYEV, G.Y.EYYUBOV**

Dark stationary current-voltage characteristics (CVC) have been investigated in high-resistance gallium sulfide (GaS) single crystals, doped rare-earth elements (REE) Yb, Tm. It has been shown that in GaS single crystals doped Yb and Tm carry of charge carriers on the nonlinear region of the CVC has been caused by space-charge-limited-monopolar injection. Parameters of local levels have been determined from analysis CVC: concentration of traps ( $N_t$ ), location depth of traps ( $E_t$ ).

Редактор: Т.Мамедов