DOI 10.12851/EESJ201503C02ART04

Alexander T.Shlyakhov, *ScD*, *associate professor*;

Alfiya G. Shlyakhova, ScD, an associate professor, Almetyevsk State Oil Institute

Influence of Alloying on Electrophysical Properties GaAs:Te

Key words: GaAs: Te, the influence of doping, concentration, compensation, mobility, photoluminescence, temperature, impurity complexes, vacancies V_{Ga} and V_{AS} , scattering, non-monotonic dependence.

Annotation: Presents research results of electrophysical and luminescent properties of single crystals of GaAs doped with Te to a concentration of charge carriers $n=10^{17}-7\cdot10^{18}$ cm⁻³. Obtained nonmonotonic concentration dependence of the degree of compensation, the intensities of the impurity and the "boundary" of the bands of the recombination radiation, scattering of free charge carriers. The data obtained are interpreted as the result of the influence of the dopant redistribution vacancies in sublattices of the crystal, resulting in at $n\approx 2\cdot 10^{18}$ cm⁻³ to a change in the structural ensemble of impurity defects.

1 Введение

В работе (1) установлено, что люминесцентные характеристики арсенида галлия определяются не только абсолютными значениями концентрации легирующей примеси, но и степенью компенсации. Поэтому изучение электрофизических свойств позволит установить роль собственных точечных структурных дефектов (СТСД) в механизме компенсации и её взаимосвязь с эффективностью люминесценции.

2 Методика эксперимента

Исследовались монокристаллы GaAs: Te, выращенные методом Чохральского из расплава стехиометрического состава, с концентрацией n=1,7·10¹⁷-7·10¹⁸см⁻³. Образцы вырезались разных слитков, выращенных по единой технологии. Ha ИЗ свежеполированную поверхность монокристаллов с помощью индия припаивались контактные медные проводники, соблюдая условие симметричности. Затем контакты подвергались формовке импульсами тока при напряжении 250 В на концах разрядника. Полученные контакты были омичными и обладали малым сопротивлением. Омичность контактов проверялись на приборе-испытателе р-п-переходов по обычной методике при температуре 77К.

Исследования электропроводности, постоянной Холла, подвижности носителей заряда указанных образцов проводились в температурном интервале 77-400К. Измерения эффекта Холла (R_H) и электропроводности (σ) осуществлялось методом Ван-дер-Пау (2,3) на образцах размерами 7×7 мм и толщиной d=150÷200 мкм. Индукция магнитного поля в зазоре магнита измерялась с помощью прибора Ш1-8 и составила B=0,415 Тл.

Применяемая схема стабилизации и управления температурой обеспечивала любой выбранный температурный шаг, например, $\Delta T=0,1^{\circ}$ при его стабильности $\pm 0,1\%$. При сканировании температуры, разогрев образцов осуществлялся со скоростями до 10° /мин. Измерение температуры образцов осуществлялось с помощью калиброванной термопары медь- константан.

Электрические параметры материала рассчитывались по следующим формулам:

$$R_{H} = \frac{U_{H} \cdot d}{J_{1,3} \cdot B} , \quad U_{H} = \frac{U_{2,4}(+B) + U_{2,4}(-B)}{2}$$

$$n = \frac{6,25 \cdot 10^{18}}{R_{H}}$$

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \cdot f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\mu = R_{H} \cdot \sigma$$

где R_H – постоянная Холла, n - концентрация носителей заряда,см⁻³, U_H -холловское напряжение, измеряемое между контактами 2,4 при пропускании тока J_{1,3} через несмежные контакты 1,3, при двух противоположных напряжениях магитного поля, ρ – удельное сопротивление, σ – удельная проводимость, μ_H – холловская подвижность, R_{12,34}=U₃₄/J₁₂ – сопротивление, то есть R_{12,34} является отношением напряжения, измеряемого между контактами 3, 4, к току, протекающему между смежными контактами 1,2. Аналогично R_{23,41}=U₄₁/J₂₃. Функция f (R_{12,34}/R_{23,41}) учитывает расположения контактов (2). Раздельное определение концентрации донорных и акцепторных центров (степени компенсации) проводили по диаграммам, построенным на основе формул Брукса-Херринга (4). Для выполнения такого анализа были использованы результаты определения холловской концентрации носителей заряда (ХКНЗ) и подвижность при температуре 77К.

3 Экспериментальные результаты и обсуждение

На этом этапе исследования СТСД в монокристаллах GaAs: Те измеряли холловскую концентрацию носителей заряда (ХКНЗ) и их подвижность в температурном интервале 77 – 400 К. Результаты измерений при двух температурах комнатной T=300 К и температуре жидкого азота T=77 К приведены в таблице. Пользуясь теоретическими зависимостями $\mu(n)$ по концентрации и соответствующей подвижности электронов при 77 К было найдено, что степень компенсации K=N_A/N_д в этих кристаллах изменяется от 0.65 до 0.25 при увеличении уровня легирования. Данные такого анализа, отражающего степень компенсации материала при различном уровне донорной легирующей примеси приведены на рис.1.



Рисунок 1. Зависимость коэффициента компенсации K = N_A/N_D кристаллов GaAs: Те при 77K от концентрации свободных носителей заряда.

	ХКНЗ n,см ⁻³		Удельное		Подвижность µ,				Varuanta
N⁰			сопротивление р,		CM ²		Коэффициент	Концентрация	концентрация
кристалла			Ом∙см		$\overline{B \cdot c}$		компенсации К	доноров N _D ,см ⁻³	акцепторов
	Т=77 К	Т=300 К	Т=77 К	Т=300 К	Т=77 К	Т=300 К			INA,CM
1	$1,7 \cdot 10^{17}$	$1,8.10^{17}$	15,6·10 ⁻³	$13,2\cdot10^{-3}$	2350	2630	0,65	$4,9.10^{17}$	$3,2.10^{17}$
2	$2,2\cdot 10^{17}$	$2,3\cdot 10^{17}$	$11,2.10^{-3}$	9,2·10 ⁻³	2540	2960	0,6	$5,5 \cdot 10^{17}$	$3,3\cdot10^{17}$
3	$4,2.10^{17}$	$4,3\cdot 10^{17}$	$5,5.10^{-3}$	$4,8.10^{-3}$	2730	3040	0,5	$8,4.10^{17}$	$4,2.10^{17}$
4 ²⁾	$5,2\cdot 10^{17}$	$5,3\cdot 10^{17}$	$4,3.10^{-3}$	3,9·10 ⁻³	2770	3000	0,45	$9,5 \cdot 10^{17}$	$4,3.10^{17}$
5	$9,7 \cdot 10^{17}$	$9,7\cdot 10^{17}$	$2,2.10^{-3}$	$2,2.10^{-3}$	2920	2910	0,35	$1,49 \cdot 10^{18}$	$5,2.10^{17}$
6 ²⁾	$1,5 \cdot 10^{18}$	$1,5 \cdot 10^{18}$	$1,6.10^{-3}$	$1,7.10^{-3}$	2640	2510	0,3	$2,1\cdot 10^{18}$	$6,4\cdot 10^{17}$
7	$1,8.10^{18}$	$1,9.10^{18}$	1,35·10 ⁻³	1,31·10 ⁻³	2600	2520	0,25	$2,4.10^{18}$	$6 \cdot 10^{17}$
8 ²⁾	$3,0.10^{18}$	$3,1\cdot 10^{18}$	$0,87 \cdot 10^{-3}$	$0,73 \cdot 10^{-3}$	2520	2230	0,2	$4 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$
$9^{2)}$	$3,8\cdot10^{18}$	$3,9.10^{18}$	$0,65 \cdot 10^{-3}$	$0,72 \cdot 10^{-3}$	2410	2180	0,25	$4,8.10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$
10	$4,9.10^{18}$	$5,1\cdot 10^{18}$	$0,60 \cdot 10^{-3}$	0,63·10 ⁻³	2180	1960	0,25	$6,5 \cdot 10^{18}$	$1,6.10^{18}$
11 ²⁾	$7,0.10^{18}$	$7,0.10^{18}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$0,52 \cdot 10^{-3}$	2000	1740	0,3	1.10^{19}	$3 \cdot 10^{18}$

Таблица. Холловская концентрация носителей заряда (ХКНЗ), удельное сопротивление, подвижность, концентрации донорных и акцепторных центров¹) в монокристаллах GaAs : Те, выращенных методом Чохральского из-под флюса

¹⁾ раздельное определение концентрации донорных и акцепторных центров проводили по диаграммам работы [4], используя результаты определения ХКНЗ и подвижности при температуре 77К.

²⁾ проведены измерения $\mu(T)$ в диапазоне температур 77÷400 К.

Зависимости отношения интенсивностей акцепторной (E₁, E₂) и донорной («краевой») линии фотолюминесценции при 77 К от концентрации свободных носителей заряда (рис.2) (1) так же характеризует степень компенсации материала. Имеется возможность сопоставить данные гальваномагнитных и фотолюминесцентных измерений изменения степени компенсации арсенида галлия от уровня легирования.



Рисунок 2. Зависимость отношения интенсивностей акцепторной (E_1, E_2) и донорной («краевой») фотолюминесценции I_A/I_D кристаллов GaAs: Те при 77 К от концентрации свободных носителей заряда.

Действительно, рекомбинационные свойства GaAs : Те в диапазоне концентраций носителей 10^{17} - 10^{18} см⁻³ определяются наличием в кристалле вакансий галлия и комплексов с их участием (V_{Ga} Te_{AS})²⁻, - ответственных за полосу E₁(рис.3), при этом наблюдается сильная компенсация материала (K=0,6). При n≈2·10¹⁸ см⁻³ происходит смещение состава СТСД в сторону увеличения концентрации вакансий мышьяка, которые n⁺- GaAs, в силу своего донорного характера, полностью ассоциированы с атомами легирующей примеси, образуя новый акцепторный комплекс (V_{Ga} Te_{AS} V_{AS})⁻ - ответственный за полосу E₂ (рис.3), при этом увеличивается электрическая активность донорной примеси и степень компенсации имеет практически постоянное значение К≈0,25.

Физические характеристики кристаллов, имеющие особенности экстремального характера, могут быть объяснены существенным ослаблением роли СТСД, определяемым влиянием уровня легирования. Состав кристалла в экстремуме близок к «стехиометрическому».



Рисунок 3. Изменение интенсивности в максимуме излучения примесных полос фотолюминесценции $E_1 \approx 1,2$ эВ (•) и $E_2 \approx 1,35$ эВ (+) кристаллов GaAs: Те при T=85 K от концентрации электронов.

В исследованном диапазоне температур для любых концентраций не наблюдалось зависимости концентрации электронов от Т, что означает полную ионизацию мелких доноров, т.е. выполнение равенства $n=N_{\rm A}$ - $N_{\rm A}$. На рис.4 представлены типичные температурные зависимости холловской подвижности $\mu_{\rm H}$ монокристаллов арсенида галлия с умеренным уровнем легирования ($n=10^{17}\div10^{18}$ см⁻³, кривые 1 и 2) на которых видны два различных участка её поведения. При температурах ниже 200 К подвижность увеличивается с ростом Т. Затем $\mu_{\rm H}$ достигает максимума при 150÷200 К, величина и положение которого зависит от концентрации электронов (n): с ростом п максимум уменьшается по величине и для $n\geq 2\cdot10^{18}$ см⁻³ вообще не наблюдается (рис.4 кривые 3 и 4). При высоких температурах (T>300 K) для

любого уровня легирования подвижность уменьшается по закону $\mu_{\rm H} \sim T^{-(0,4\div0,5)}$.

Для концентраций n=10¹⁷÷10¹⁸см⁻³, из анализа температурных зависимостей подвижности электронов в области низких температур 77-200 К, следует о том, что основным механизмом рассеяния носителей заряда является рассеяние на двукратно ионизированных акцепторных центрах (V_{Ga} Te_{AS})²⁻ и на донорах Te_{As}⁺. При концентрациях n≥2·18¹⁸см⁻³ преобладает рассеяние электронов на полярных и оптических фононах. Так как предполагается, что кулоновское взаимодействие между примесными дефектами Te_{As}⁺ и (V_{Ga} Te_{AS})⁻ приводит к эффектам спаривания и образованием крупномасштабных пар, которые ведут себя как дипольные рассеивающие центры с малой эффективностью рассеяния.

www.auris-verlag.de



Рисунок 4. Температурная зависимость холловской подвижности в арсениде галлия с различным уровнем легирования: I-5,2 · 10¹⁷ см⁻³, 2-1,5 · 10¹⁸ см⁻³, 3-3 · 10¹⁸ см⁻³, 4-3.8 · 10¹⁸ см⁻³.

4 Заключение

Установлена взаимосвязь между электрической активностью СТСД в арсениде галлия n – типа и уровнем легирования. Легирование GaAs теллуром в диапазоне концентрацией электронов $10^{17} \div 10^{18}$ см⁻³ сопровождается генерацией вакансий галлия и примесных комплексов с их участием (V_{Ga} Te_{AS})²⁻, определяющих основной механизм рассеяния электронов, поэтому образцы имеют высокую степень компенсации К≈0,6. При n≈2·10¹⁸ см⁻³ происходит перестройка примесных полос люминесценции с максимумом энергии ≈1,2эВ (E₁) на полосу излучения ≈1,35 эВ (E₂). Происходит

смещение ансамбля СТСД в сторону увеличения концентрации вакансий мышьяка и примесных комплексов с их участием (V_{Ga} Te_{AS} V_{AS}), ответственных за полосу излучения $\approx 1,35$ эВ. Наблюдается резкое возрастание интенсивности «краевой» полосы излучения (1), на порядок превышающей излучение примесных полос излучения, при этом степень компенсации имеет минимальное значение К $\approx 0,25$. Состав кристалла в экстремуме близок к «стехиометрическому».

Достигнутый уровень понимания влияния легирования на ансамбль СТСД в арсениде галлия позволяет решать конкретные практические задачи: например, авторам при выращивание более совершенных монокристаллов (5), и для контроля качества полупроводниковых материалов (6,7).

References:

- 1. Shlyakhov AT. The influence of doping on the composition of structural defects in gallium arsenide: Author's abstract of candidate's dissertation, candidate of physico-math. sciences, Leningrad, 1990; 16.
- 2. Kuchis EV. Galvanomagnetic effects and methods of their research. Moscow, Radio and communication, 1990; 264.
- 3. Grekov YB, Shlyakhov AT. Method of measuring the temperature dependency of the electrical parameters of semiconductors: A.S. 1405638 the USSR.
- 4. Walukiewicz W, Lagowski L, Jastrzebski L, Lichtensteiger M. and Gatos HC. Electron mobility and free-carrier absorption in GaAs: Determination of the compensation ratio: J App. Phys, 1979, V. 50, №2;. 899-908.
- 5. Shlyakhov AT, Bolsheva JN, Grekov YB. Method of growing single crystals of gallium arsenide: A.S. 1584454 the USSR
- 6. Shlyakhova AG. The differential scanning calorimetry for gallium arsenide quality control: Izvestiya Vuzov. The energy problem, 2006, No. 11-12; 104-107.
- 7. Semikolenova NA, Chernukha OE, Shlyakhova AG, Shlyakhov AT. Optimization of the thermal analysis of substances: Bulletin of Omsk University, 2004, No. 3; 54-56.