

**СВЕРХБЫСТРЫЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ LT-GaAs,  
ЛЕГИРОВАННОМ ДЕЛЬТА-СЛОЯМИ Si**

© 2016 г. Д.И. ХУСЯИНОВ, А.М. БУРЯКОВ, Е.Д. МИШИНА,  
Г.Б. ГАЛИЕВ\*, Е.А. КЛИМОВ\*, С.С. ПУШКАРЁВ\*

Московский технологический университет (МИРЭА),  
\*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники  
Российской академии наук, г. Москва  
e-mail: dinar1434429@mail.ru

Арсенид галлия, выращенный при низкой температуре роста (<400 °С) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (LT-GaAs), был хорошо изучен за последние двадцать лет. На сегодняшний день этот материал широко используется для сверхбыстрых оптических и ТГц устройств [1–3]. Для таких устройств наиболее важным свойством LT-GaAs является низкое время жизни носителей заряда (~1-10 пс) [4]. В работе *Wells et al* [5] было показано, что уменьшение времени жизни носителей заряда приводит к увеличению ширины спектра ТГц антенн. Существует несколько способов управления временем жизни носителей заряда в LT-GaAs: изменение потоков галлия и мышьяка, варьирование температуры роста, отжиг, а также легирование примесями [6–8].

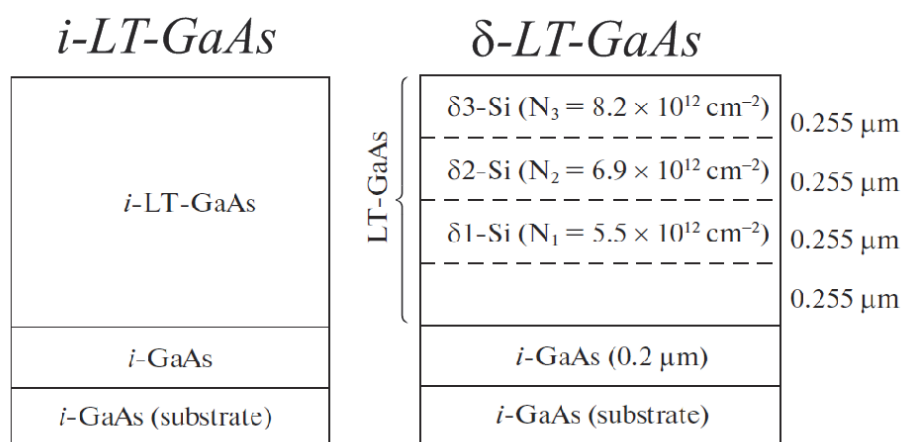


Рис. 1. Схематическое изображение исследованных образцов отожжённого LT-GaAs.

В нашей работе исследовались отожжённые пленки LT-GaAs с легированием дельта-слоями кремния и без (рис. 1). Структуры выращены на подложке GaAs с направлением кристаллографических осей (100). Температуры роста для каждого образца составляли 230 °С. После роста, каждый образец был подвержен отжигу при 680 °С.

Для исследования сверхбыстрых процессов в пленках LT-GaAs использовалась методика оптической «накачки-зондирования». В качестве источника лазерного излучения использовался твердотельный лазер на кристалле сапфира, допированного ионами титана с длиной волны 800 нм (энергия фотона 1.55 эВ) и длительностью импульса 100 фс. Плотность пиковой мощности «накачки» составляла -  $\frac{2.1 \times 10^7 \text{ Вт}}{\text{см}^2}$ , «зондирования» -  $\frac{2.1 \times 10^6 \text{ Вт}}{\text{см}^2}$ . Излучение накачки, проходя через линию задержки фокусиру-

лось на поверхность образца. Исследование сверхбыстрой динамики носителей заряда в структуре проводилось путем измерения изменения коэффициента отражения  $\Delta R/R_0$ .  $\Delta R/R_0$  представляет собой временную функцию интервала между импульсами накачки и зондирования.

Для интерпретации экспериментальных результатов использовалась безызлучательная модель Шокли-Рида-Холла[9]. Измерив зависимости фотовозбужденных неравновесных носителей заряда от времени, мы можем выразить изменение в коэффициенте преломления от времени и промоделировать изменение коэффициента отражения. Уравнения скорости неравновесных носителей заряда Шокли-Рида-Холла:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I(t)}{h\nu} \alpha - C_n n (N_{DD} - n_{DD}) + n_{DD} C_n^{th}, \quad (1)$$

$$\frac{dn_{DD}}{dt} = -C_p n_{DD} p + C_n n (N_{DD} - n_{DD}) + C_p^{th} (N_{DD} - n_{DD}) - C_n^{th} n_{DD}, \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{I(t)}{h\nu} \alpha - C_p n_{DD} p + C_p^{th} (N_{DD} - n_{DD}), \quad (3)$$

где  $N_{DD}$  – концентрация ионизованных глубоких доноров,  $n_{DD}$  – концентрация не ионизованных глубоких доноров,  $I(t)$  – зависящая от времени плотность мощности,  $h\nu$  – энергия фотона,  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $C_{p,n}$  – коэффициент захвата электрона и дырки глубокой донорной примесью,  $C_{p,n}^{th}$  – коэффициент переизлучения носителя заряда.

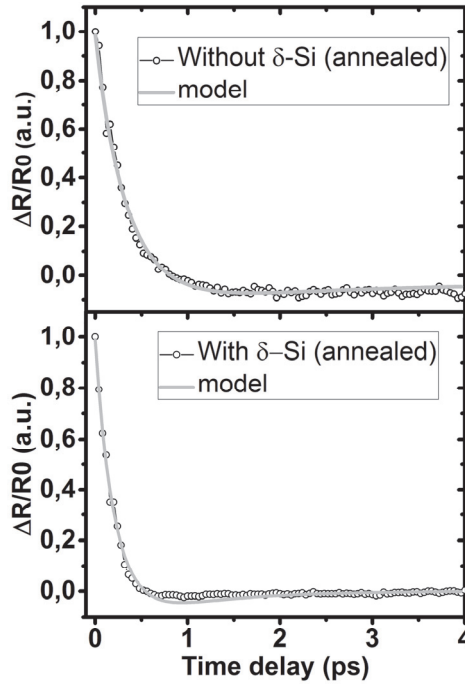


Рис. 2. Результаты наложения модели на экспериментальные результаты. Получено два параметра для образца без дельта легирования  $N_{dd} \approx 1 * 10^{18} cm^{-3}$  и  $N_a \approx 1 * 10^{18} cm^{-3}$  и  $N_{DD} \approx 2.8 * 10^{18} cm^{-3}$  и  $N_a \approx 1.6 * 10^{18} cm^{-3}$  для образца, легированного дельта слоями Si.

Нами был рассмотрен временной диапазон от 0 до 4 пс. Данный временной интервал выбран, потому что в этом временном промежутке происходит сверхбыстрая рекомбинация за счет рассеяния носителей заряда на глубоких донорных примесях[10]. В результате наложения модели на экспериментальные данные путем изменения параметров  $N_{dd}$  и  $N_a$  были получены их значения для структур LT-GaAs без и с легированием дельта-слоями Si. Для образца без дельта-легирования были получены следующие значения для концентраций примесей  $N_{dd} \approx 1 * 10^{18} cm^{-3}$  и  $N_a \approx 1 * 10^{18} cm^{-3}$ , что является аналогичным результатом работы [11]. Для образца, легированного дель-

та-слоями получены параметры  $N_{DD} \approx 2.8 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and  $N_a \approx 1.6 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . В образце с легированием дельта-слоями Si концентрация глубоких донорных уровней увеличилась в 3 раза, а концентрация акцепторов также увеличилась в 1.5 раз. Эти изменения влияют на резкость спада коэффициента отражения и соответственно время жизни носителей заряда.

Результат эксперимента и наложения модели представлен на рис. 2. Модель наложена на экспериментальные данные, в результате чего были получены концентрации глубоких доноров  $N_{ad}$  и акцепторов  $N_a$  для двух структур.

Рассмотрена экспериментальная установка сверхбыстрой спектроскопии «накачка-зондирование», получены экспериментальные результаты при измерении сверхбыстрой динамики носителей заряда в LT-GaAs с легированием дельта-слоев кремнием и без легирования, проведено моделирование процессов в низкотемпературном арсениде галлия на основе теории Шокли-Рида-Холла.

Исследование влияния легирования дельта-слоев кремнием LT-GaAs показали, что легирование дельта-слоями кремния приводит к снижению времени жизни носителей заряда. Моделирование процессов в LT-GaAs на основе теории Шокли-Рида-Холла показали, что легирование дельта-слоями кремния приводит к увеличению концентрации глубоких доноров в 3 раза, но при этом уменьшается концентрация акцепторов, что и приводит к низкому времени жизни неравновесных носителей заряда.

Эта работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (Грант #16-29-14029) и грантом № 14.Z50.31.0034.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Venkatesh M. et al.* Optical characterization of GaAs photoconductive antennas for efficient generation and detection of Terahertz radiation // *Opt. Mater. (Amst)*. 2014. Vol. 36, № 3. P. 596–601.
2. *Awad M. et al.* Characterization of low temperature GaAs antenna array terahertz emitters // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 91, № 18. P. 181124.
3. *Erlig H. et al.* LT-GaAs detector with 451 fs response at 1.55 [micro sign]m via two-photon absorption // *Electron. Lett.* 1999. Vol. 35, № 2. P. 173.
4. *Gupta S. et al.* Subpicosecond carrier lifetime in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures // *Appl. Phys. Lett.* 1991. Vol. 59, № 25. P. 3276–3278.
5. *Wells N.P. et al.* Transient reflectivity as a probe of ultrafast carrier dynamics in semiconductors: A revised model for low-temperature grown GaAs // *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 116, № 7. P. 073506.
6. *Kaminska M. et al.* Structural properties of As-rich GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures // *Appl. Phys. Lett.* 1989. Vol. 54, № 19. P. 1881–1883.
7. *Lavrukhin D. V. et al.* Investigation of the optical properties of GaAs with  $\delta$ -Si doping grown by molecular-beam epitaxy at low temperatures // *Semiconductors*. 2015. Vol. 49, № 7. P. 911–914.
8. *Murotani T., Shimanoe T., Mitsui S.* Growth temperature dependence in molecular beam epitaxy of gallium arsenide // *J. Cryst. Growth*. 1978. Vol. 45, № C. P. 302–308.
9. *Shockley W., Read W.T.* Statistics of the Recombination of Holes and Electrons // *Phys. Rev.* 1952. Vol. 87, № 46. P. 835–842.
10. *Shockley W.* Electrons, Holes, and Traps // *Proc. IRE*. 1958. Vol. 46, № 6. P. 973–990.
11. *Ortiz V. et al.* Low-temperature-grown GaAs: Modeling of transient reflectivity experiments // *J. Appl. Phys.* 2007. Vol. 102, № 4. P. 1–9.