

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Йодказис С., Пятраускас М., Нятикшис В., Утенко В.

Представлены экспериментальные результаты измерений времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в эпитаксиальных слоях арсенида галлия на полуизолирующих подложках из того же материала. ННЗ в приповерхностной зоне слоя создавались облучением образца ультракоротким (≈ 22 пс) импульсом света с длиной волны 0.53 мкм, получаемым с помощью АИ: Nd³⁺-лазера. Исследовались образцы с разной толщиной эпитаксиального слоя, изменявшегося травлением. Экспериментально полученное распределение времени жизни ННЗ по толщине эпитаксиального слоя сравнивалось с результатами численного моделирования. Наблюдаемое уменьшение времени жизни ННЗ в области слоя, прилегающего к подложке, объясняется проникновением из нее атомов хрома.

Совершенствование технологии получения высококачественных полуизолирующих (ПИ) монокристаллов GaAs и на их основе эпитаксиальных слоев нуждается в детальном знании процессов дефектообразования, происходящих во время эпитаксиального роста, последующей высокотемпературной термобработки (ВТО).

Нарращивание монокристаллического эпитаксиального слоя (ЭС) сопровождается образованием дефектов структуры — дислокаций, дефектов упаковки и др. — и появлением мелких и глубоких энергетических уровней в зоне запрещенных энергий кристалла, которые в свою очередь могут быть как центрами прилипания, так и рекомбинации носителей заряда. В то же время решение задач по созданию быстродействующих (со скоростью переключения < 100 пс) фотодетекторов, транзисторов, формирователей сверхкоротких электрических импульсов стимулировало поиск и исследование полупроводниковых материалов и структур с временами жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в этом временном интервале. С другой стороны, важное место занимают как контроль дефектов, электрофизических и геометрических параметров ЭС [1-3], так и исследования влияния подложки на электрофизические параметры ЭС [4]. Также следует отметить, что концентрация дефектов в ЭС изменяется в процессе температурного воздействия [5]. В [6] определены изменения времени жизни ННЗ и концентрации мелких нескомпенсированных уровней с ростом толщины эпитаксиального слоя. В [7] указывается на эффективную диффузию атомов Сг из подложки в эпитаксиальные слои. В [8] сообщается о возможности насыщения глубоких электронных ловушек в ЭС арсенида галлия при высоких уровнях возбуждения и наблюдении бимолекулярной рекомбинации ННЗ, которая гасилась с повышением легирующей примеси Si из-за захвата дырок на глубокие примесные уровни. Из всего сказанного следует, что прецизионное управление электрофизическими свойствами эпитаксиальных пленок арсенида галлия, являющихся базой при изготовлении СВЧ приборов, выдвигает высокие требования не только к технологии их изготовления, но и к методам определения параметров дефектных состояний. Быстродействие опто- и микроэлектронных приборов, как правило, обуславливают рекомбинационные процессы ННЗ через локальные уровни.

Наличие пико- и наносекундных времен релаксации фотопроводимости в ЭС потребовало применения в экспериментах ультракоротких световых импульсов (УКИ) и специальной регистрирующей аппаратуры. Структурная схема экспериментальной установки более подробно рассмотрена в [9]. Экспериментально исследовались три группы эпитаксиальных слоев арсенида галлия (соответственно кристаллы I—III группы). Параметры образцов обобщены и представлены в таблице.

Стационарные характеристики исследуемых образцов

№ группы	Максимальная толщина эпитаксиальной пленки d , мкм	Удельное сопротивление ρ , Ом \cdot см $^{-1}$	Равновесная концентрация носителей заряда N_0 , см $^{-3}$	Подвижность μ , см 2 /с \cdot В
I	9.3	2.2	$4.7 \cdot 10^{14}$	6000
II	7.3	$3.4 \cdot 10^3$	$3.8 \cdot 10^{12}$	480
III	8.3	—	—	—

Измерялись кинетики фотопроводимости ЭС, стравленных до определенной толщины, при их возбуждении мощными пикосекундными импульсами света ($\tau_L \approx 22$ пс, $\lambda = 0.53$ мкм). Концентрация фотовозбужденных носителей оценивалась по формуле $N = \eta (1 - R) \alpha E / h\nu l^2$, где η — квантовый выход; R , α — коэффициенты отражения и поглощения соответственно; E — возбуждающая энергия; $h\nu$ — энергия кванта света; l^2 — площадь возбуждения между контактами. Максимальная концентрация ННЗ достигала 10^{17} см $^{-3}$, т. е. имеет место случай $N \gg N_0$. Экспериментально измеренные кинетики фотопроводимости в подложках I—III групп кристаллов GaAs (на которых выращивались ЭС) представлены на рис. 1. С целью выяснения возможных механизмов релаксации фотовозбуждающих носителей было произведено численное дифференцирование вышеупомянутых кривых, т. е. вычислена зависимость мгновенного времени жизни ННЗ от времени. Результаты этих вычислений представлены на рис. 2. Видно, что в интервале времен $2 \cdot 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-7}$ с τ увеличивается от $3 \cdot 10^{-10}$ до $5 \cdot 10^{-7}$ с. Можно выделить три величины мгновенных времен жизни ННЗ: τ_1 , τ_2 , τ_3 .

На рис. 3 представлены зависимости τ_1 , τ_2 , τ_3 от толщины эпитаксиального слоя в кристаллах I—III групп соответственно. Видно, что при переходе из подложки в ЭС времена τ_1 , τ_2 увеличиваются и достигают максимума в середине эпитаксиального слоя. Далее при переходе к поверхности время релаксации или уменьшается (рис. 3, а), или не изменяется (рис. 3, б, в).

С целью выяснения влияния возможных каналов рекомбинации ННЗ на τ_1 , τ_2 , τ_3 было проведено численное моделирование процессов рекомбинации ННЗ по методике, описанной в [10]. Численное решение полной системы уравнений, описывающей рекомбинацию носителей заряда, проводилось с учетом гауссовой формы возбуждающего импульса света:

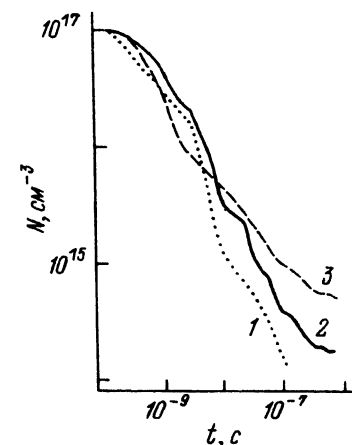


Рис. 1. Зависимость концентрации ННЗ N от времени в подложках кристаллов GaAs.

1—3 — зависимости в подложках GaAs соответственно I—III групп кристаллов.

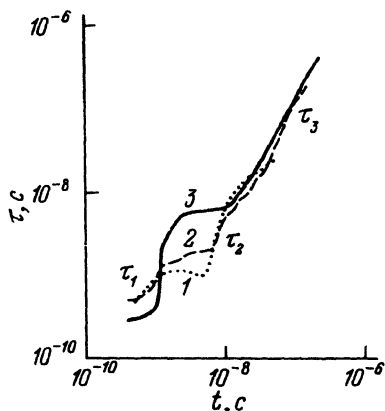


Рис. 2. Зависимость времени релаксации фотопроводимости от времени в подложках кристаллов GaAs после возбуждения пикосекундным импульсом света.

Обозначения, как на рис. 1.

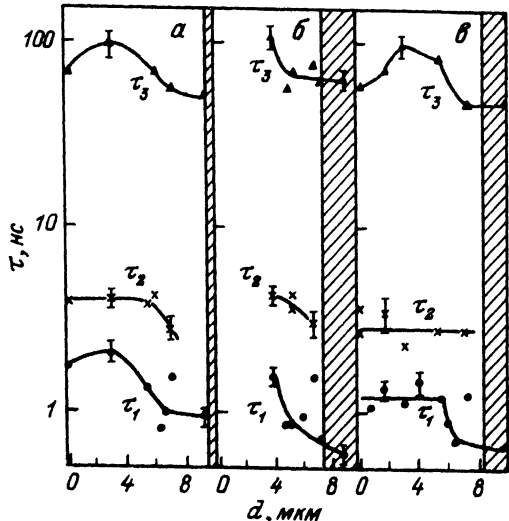


Рис. 3. Зависимость времени релаксации фотопроводимости от толщины эпитаксиального слоя: а-в — в кристаллах I—III групп соответственно. Заштрихованная область — подложка.

$$\frac{dN}{dt} = \alpha\beta I_m \exp [-(2 - at)^2 - e^4] + \sum_i \gamma_n^i [(N_0 + N + N_{cm}^i) m_i - (N_i - m_{oi}) N],$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha\beta I_m \exp [-(2 - at)^2 - e^4] - \sum_i \gamma_p^i [m_{oi}P + (P_0 + P + P_{vm}^i) m_i],$$

$$\frac{dm_i}{dt} =$$

$$= \gamma_n^i (N_i - m_{oi}) N - \gamma_p^i m_{oi} P - \gamma_p^i (P_0 + P_{vm}^i + P) m_i - \gamma_n^i (N_0 + N + N_{cm}^i) m_i, \quad (1)$$

где N — концентрация электронов; P — концентрация дырок; γ^i — коэффициент захвата носителя уровнем; N_0, P_0 — равновесная концентрация электронов и дырок; E_i — энергия уровня; N_i — концентрация рекомбинационных уровней; m_i — концентрация носителей на уровне; α — коэффициент поглощения; β — квантовый выход ($\beta = 1$); $i = 1, 2, 3, 4$; I_m — максимальная интенсивность возбуждающего света. Система уравнений (1) решалась методом Гира [11].

Исследовалось влияние трех уровней: $E_1 = 0.1$ эВ, $E_2 = 0.4$ эВ, $E_3 = 0.78$ эВ на рекомбинацию ННЗ. Коэффициенты захвата носителей заряда уровнями взяты из литературы [12]:

$$\gamma_n^1 = 7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}, \quad \gamma_n^2 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}, \quad \gamma_n^3 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с};$$

$$\gamma_p^1 = 10^{-15} \text{ см}^3/\text{с}, \quad \gamma_p^2 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}, \quad \gamma_p^3 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}.$$

На рис. 4 представлена зависимость времени жизни фотовозбужденных электронов от времени после возбуждения пикосекундным оптическим импульсом при различных концентрациях уровня прилипания электронов N_1 . Видно, что в данной зависимости прослеживаются участки с временами τ_1 и τ_2 . Резкое увеличение τ при $\Delta t > 10^{-7}$ с можно объяснить несколькими

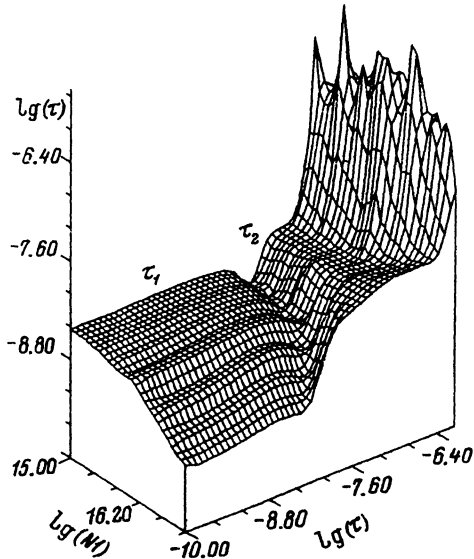


Рис. 4. Теоретическая зависимость времени жизни неравновесных электронов от времени после возбуждения пикосекундным импульсом света при различных концентрациях N_1 уровня $E_1 = 0.1$ эВ, $N_2 = N_3 = 10^{16}$ см^{-3} .

Концентрация N_1 изменяется от $1 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{17}$ см^{-3} .

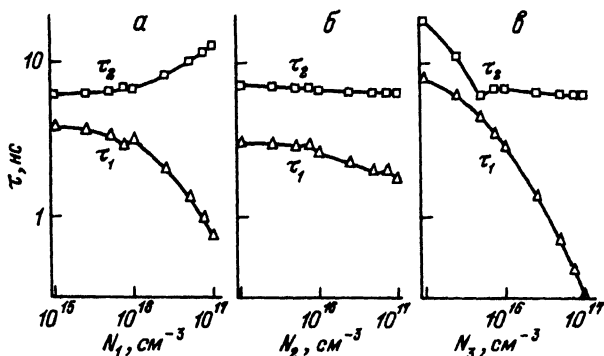


Рис. 5. Теоретическая зависимость τ_1 и τ_2 от концентрации уровней прилипания и рекомбинации.

а - $N_2, N_3 = \text{const} = 10^{16}$ см^{-3} , б - $N_1, N_3 = \text{const} = 10^{16}$ см^{-3} , в - $N_1, N_3 = \text{const} = 10^{16}$ см^{-3} .

причинами: неучетом в теоретической модели бимолекулярной рекомбинации ННЗ, неучетом влияния многозарядных центров рекомбинации и центров прилипания дырок. На рис. 5 представлена зависимость времен τ_1, τ_2 от концентрации уровней прилипания и рекомбинации. Из результатов, представленных на рис. 5, видно, что увеличение концентрации уровня прилипания N_1 уменьшает τ_1 и увеличивает τ_2 (рис. 5, а), тем временем увеличение концентрации мелкого уровня рекомбинации N_2 тоже уменьшает τ_1 и не влияет на τ_2 , а увеличение концентрации N_3 значительно уменьшает τ_1 и незначительно τ_2 (рис. 5, в). Таким образом, наблюдаемые нами изменения τ_1 и τ_2 в эпитаксиальных слоях кристаллов GaAs можно объяснить как уменьшением концентрации мелкого уровня прилипания электронов N_1 ,

так и уменьшением концентрации глубокого уровня рекомбинации N_3 . Предполагается, что уменьшение τ_1 в области ЭС (находящейся вблизи подложки) обусловлено увеличением концентрации глубоких уровней рекомбинации N_3 , в состав которых могут входить атомы Сг, диффундировавшие из подложки.

По экспериментальным исследованиям кинетик фотопроводимости ЭС GaAs, выращенных до определенной толщины, установлено, что максимальное значения величины τ_1 , τ_2 достигают в середине эпитаксиального слоя (т. е. при толщине пленки 6 мкм). Определено влияние концентрации уровней рекомбинации и прилипания N_1 , N_2 , N_3 на времена рекомбинации неравновесных электронов в эпитаксиальных слоях кристаллов GaAs. Предполагается, что уменьшение τ_1 в области ЭС (находящейся вблизи подложки) обусловлено увеличением концентрации глубоких уровней рекомбинации N_3 , в состав которых могут входить атомы Сг, диффундировавшие из подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Yamada T., Tokomitsu E., Saito K., Akatsuka T., Miyanchi M., Konagai M., Takahashi K. // *J. Cryst. Growth*. 1989. V. 95. P. 145—149.
- [2] Stradling R. A // *EMIS. Data review*. 1985. RN-15481.
- [3] Zhan-Guo Wang, Grimmeis H. C., Ledebro L.-A. Department of solid state Physics. Lund, Sweden.
- [4] Wainert H., Diegner B., Kugler J. // *Phys. St. Sol. (a)*. 1986. V. 97. P. K177—K182.
- [5] Lee J. M., Tran L. T., Tsai H. L., Shichijo H. // *J. Vac. Sci. Techn.* 1987. V. 5(3). P. 827—830.
- [6] Конников С. Г., Соболев М. М. // *ФТП*. 1987. Т. 21. В. 5. С. 938—941.
- [7] Ушаков В. В., Гиппиус А. А., Корнилов Б. В. // *ФТП*. 1978. Т. 12. В. 2. С. 358—363.
- [8] Werner A., Kunst M., Monstakas T. D. // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 56. N 16. P. 1558—1560.
- [9] Томашюнас Р., Мастейка Р., Пятраускас М., Жиндулис А., Кутра Й. // *Деп. в Лит. НИИНТИ*. Вильнюс, 1990. № 2524.
- [10] Вайткус Ю., Стороста Ю., Пинцявичюс А., Пятраускас М., Кажукаускас В. // *Лит. физ. сб.* 1988. Т. 28. № 6. С. 744—751.
- [11] Заленская Е. К. Математическое обеспечение ЭС ЭВМ. Вып. 22.2.12. Минск, 1980. С. 129.
- [12] Bourglion J. C., von Berdeleben H. I., Stievehard D. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64(9). P. R65—R91.

Вильнюсский университет

Получена 17.12.1991

Принята к печати 11.02.1992