

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ В РАСТРОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ (ЭКСПЕРИМЕНТ)

Конников С. Г., Салата О. В., Соловьев В. А., Сяницын М. А.,
Уманский В. Е., Винокуров Д. А.

Исследованы электрофизические свойства тонких гетероэпитаксиальных слоев n -GaAs, выращенных МОС гидридным методом. Впервые экспериментально продемонстрированы возможности нового метода одновременного определения скорости интерфейсной рекомбинации и диффузионной длины (L_d) неосновных носителей заряда в материале активной области двойной гетероструктуры. Показано, что в преднамеренно не легированных слоях n -GaAs диффузионная длина в 2—3 раза превышает L_d в легированных кремнием пленках GaAs, в которых в широком диапазоне концентраций примеси доминирует безызлучательный канал рекомбинации. Исследовано влияние технологических режимов выращивания на величину L_d .

Введение. Контроль электрофизических параметров гетероэпитаксиальных пленок необходим на всех стадиях разработки полупроводниковых приборов. Однако в литературе практически отсутствуют данные о применении локальных методов растровой электронной микроскопии для определения диффузионных длин (L_d) и скорости рекомбинации на гетерограницах неосновных носителей заряда в слоях, толщина которых меньше значений нескольких L_d .

В настоящей работе представлены результаты применения описанного в предыдущей работе [1] метода определения электрофизических параметров материала активной области двойных гетероструктур (ДГС) для исследования свойств эпитаксиальных слоев n -GaAs, выращенных МОС гидридным методом.

1. Экспериментальные образцы

Образцы были выращены МОС гидридным методом при атмосферном давлении в вертикальном реакторе проточного типа с ВЧ нагревом подложкодержателя. В качестве источников использовались триметил галлия, триметил алюминия, арсин и водород — газ-носитель. Для легирования донорной примесью применялся моносилан. Структуры выращивались путем последовательного осаждения на подложку n^+ -GaAs (100) широкозонного слоя $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.3 \div 0.4$), исследуемого слоя n -GaAs и верхнего широкозонного эмиттера $Al_yGa_{1-y}As$ ($y = 0.4$) толщиной $0.1 \div 0.2$ мкм. Температура роста слоев AlGaAs составляла 800°C , а слоев GaAs изменялась в пределах $660 \div 800^\circ\text{C}$. Уровень легирования GaAs варьировался в диапазоне $N_D - N_A = 3 \cdot 10^{15} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$. К подложке n^+ -GaAs изготавливался омический контакт, а на поверхности формировались барьеры Шоттки площадью 0.01 мм^2 путем напыления Cr/Ni через маску. Изготовление серии барьеров Шоттки небольшой площади обеспечивало малые токи утечки и возможность исследования однородности распределения электрофизических параметров по площади ДГС.

Концентрация мелкой примеси в активной области ДГС измерялась $C-V$ методом на том же барьере Шоттки, на котором определялась диффузионная длина.

Измерение электрофизических параметров проводилось на автоматизированном комплексе растровой электронной микроскопии JSM50-ЭВМ ДВК-3. На барьер Шоттки подавалось обратное смещение, достаточное для разрушения потенциального барьера на гетерогранице активной области и верхнего эмиттера. Необходимая величина обратного смещения определялась по форме сигнала тока, индуцированного электронным зондом (ТИЭЗ) при сканировании электронным пучком плоскости скола исследуемой гетероструктуры, что позволяло однозначно определить момент разрушения потенциального барьера [2].

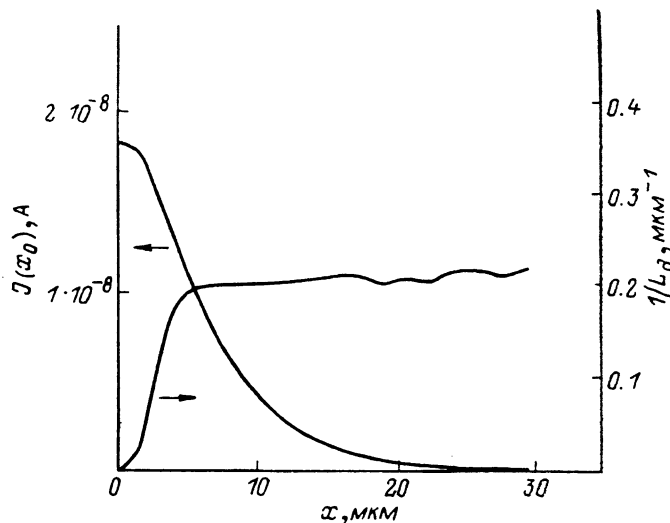


Рис. 1. Экспериментальные координатные зависимости сигнала ТИЭЗ и обратной диффузионной длины в преднамеренно не легированном n -GaAs.

$$L_d = 5.4 \pm 0.3 \text{ мкм.}$$

Для определения диффузионной длины в материале активной области и приведенной скорости интерфейсной рекомбинации (\bar{s}_i) электронный пучок сканировали по поверхности ДГС в направлении к краю барьера Шоттки в соответствии со схемой эксперимента (рис. 1 в [1]). Ток пучка составлял $10^{-12} \div 10^{-10}$ А, что обеспечивало малый уровень возбуждения в материале активной области. Ускоряющее напряжение выбиралось в диапазоне $10 \div 25$ кВ в зависимости от толщины эпитаксиальных слоев ДГС путем математического моделирования кривых ТИЭЗ с целью минимизации токов, индуцированных в широкзонных эмиттерах. Пример экспериментальной координатной зависимости сигнала ТИЭЗ представлен на рис. 1.

2. Определение скорости интерфейсной рекомбинации

Для определения скорости рекомбинации на гетерогранице GaAs—AlGaAs были выращены ДГС с преднамеренно не легированной активной областью n -GaAs, толщина которой варьировалась в диапазоне $t = 0.05 \div 1.0$ мкм. Концентрация фоновой донорной примеси составляла $N_D = (7 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 2 представлена зависимость квадрата обратной эффективной длины $L_{эфф}$ от обратной толщины активной области, позволявшая одновременно определить L_d и \bar{s}_i в соответствии с выражением

$$\left(\frac{1}{L_{эфф}}\right)^2 = \left(\frac{1}{L_d}\right)^2 + \frac{2\bar{s}_i}{L_d} \frac{1}{t}. \quad (1)$$

Полученная зависимость позволяет определить значение диффузионной длины $L_d = 5.2 \pm 0.3$ мкм и приведенной скорости интерфейсной рекомбинации $\bar{s}_i = 0.04$, что соответствует абсолютной скорости рекомбинации на гетерогранице $S_i =$

≈ 650 см/с при низком уровне возбуждения. Эта величина существенно ниже значений, приведенных в работе [3] для ДГС, выращенных МОС гидридным методом, и находится на уровне лучших образцов ДГС, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией и исследованных в работе [4].

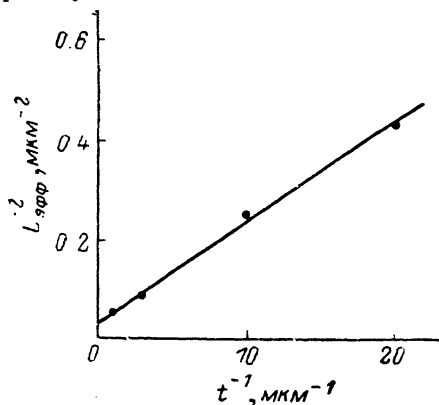


Рис. 2. Результаты одновременного определения L_d и s_i .

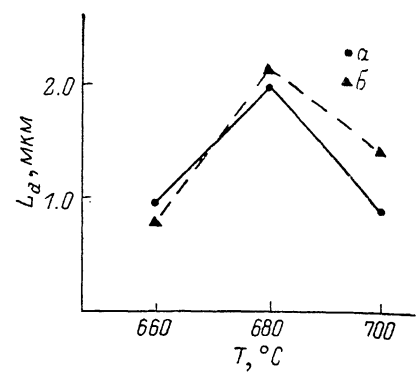


Рис. 3. Зависимость диффузионной длины в n -GaAs : Si от температуры выращивания на подложках GaAs : Te (а) и GaAs : Sn (б).

3. Диффузионные длины в n -GaAs, легированном Si

На рис. 3 приведены зависимости диффузионной длины в эпитаксиальных слоях n -GaAs : Si толщиной $2 \div 3$ мкм от температуры выращивания. Уровень легирования во всех структурах поддерживался постоянным: $N_D - N_A = (4 \div 6) \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Как следует из представленных данных, оптимальная температура роста составляла 680°C , что соответствует минимальной степени компенсации $N_A/N_D = 0.3 \div 0.4$.

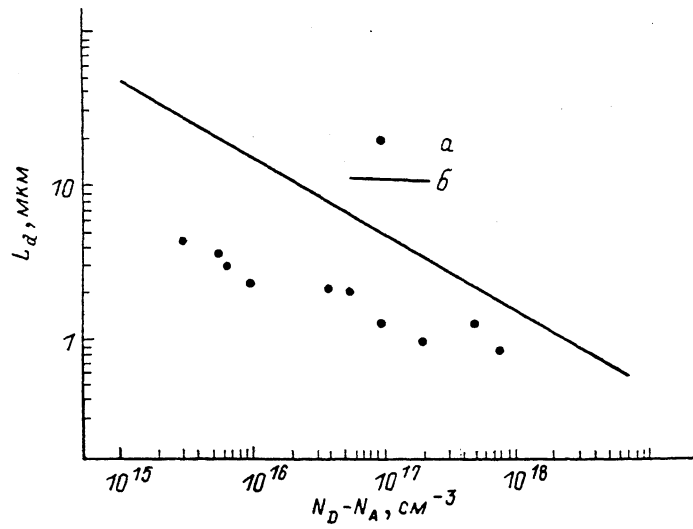


Рис. 4. Экспериментальная концентрационная зависимость L_d в n -GaAs : Si (а) и расчетная зависимость $L_{вх}$ (б).

На рис. 4 приведены результаты определения концентрационной зависимости длины диффузии в n -GaAs : Si. Для оценки качества исследуемого материала существенно отношение измеряемой длины диффузии к предельно возможному значению L_d , контролируемому только излучательной рекомбинацией ($L_{вх} = \sqrt{D\tau_{вх}}$). При этом можно определить внутренний квантовый выход люминесценции при низком уровне возбуждения: $\eta_i^{\text{в}} = (L_d/L_{вх})^2$.

Измерение коэффициента диффузии неосновных носителей заряда в исследуемых гетероэпитаксиальных пленках¹ позволило определить $D = 4 \div 5 \text{ см}^2/\text{с}$ во всем диапазоне концентраций мелкой примеси. На рис. 3 сплошной линией показана зависимость $L_{\text{изл}} = \sqrt{D B n}$, где $B = 2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ — коэффициент излучательной рекомбинации. Как следует из полученных данных, несмотря на закономерное уменьшение L_d и рост внутреннего квантового выхода с уровнем легирования (от 5 до $\sim 15\%$), в исследуемом материале в широком диапазоне концентраций доминирует безызлучательный канал рекомбинации, что, очевидно, связано с особенностями вхождения в решетку амфотерной примеси Si. Действительно, исследование преднамеренно не легированных образцов $n\text{-GaAs}$ с концентрацией фоновой примеси $N_D = (7 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ дает значение $L_d = 5 \div 6 \text{ мкм}$, что соответствует в 4—5 раз более высокому внутреннему квантовому выходу излучательной рекомбинации при низком уровне возбуждения. При высоком уровне возбуждения в нелегированном $n\text{-GaAs}$, выращенном МОС гидридным методом, получен практически 100%-й внутренний квантовый выход [5].

Таким образом, исследование гетероэпитаксиальных слоев $n\text{-GaAs}$, выращенных МОС гидридным методом, позволили установить связь электрофизических параметров с уровнем легирования и условиями выращивания. При этом показано, что рекомбинационные свойства исследованных материалов чрезвычайно чувствительны к режимам технологического процесса, особенно при легировании амфотерной примесью типа Si в GaAs. Полученные данные необходимы при разработке приборов на основе изученных гетероструктур.

В заключение авторы выражают благодарность Б. С. Явичу за полезные обсуждения и постоянное внимание к работе.

Список литературы

- [1] Конников С. Г., Соловьев В. А., Уманский В. Е., Чистяков В. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 8. С. 1411—1415.
- [2] Конников С. Г., Соловьев В. А., Уманский В. Е., Хусаинов А. А., Чистяков В. М., Ясневич И. Н. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 9. С. 1648—1653.
- [3] Partain L. D., Kuryla M. S., Fraas L. M., McLeod P. S., Cape J. A. // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. N 11. P. 5150—5158.
- [4] Dawson P., Woodridge K. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 45. N 6. P. 1227—1232.
- [5] Алфёров Ж. И., Гарбузов Д. З., Жигулин С. Н., Кузьмин И. А. и др. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 12. С. 2111—2117.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 2.01.1989
Принята к печати 3.04.1989

¹ Метод определения коэффициентов диффузии будет опубликован в следующей работе.