

Влияние ростовых дислокаций на структуру, фотолюминесценцию эпитаксиальных слоев $i-n^- - n-n^+$ -GaAs и параметры сверхвысокочастотных полевых транзисторов на их основе

© М.П. Лисица, Ф.В. Моцный[¶], В.Ф. Моцный, И.В. Прокопенко

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
252028 Киев, Украина

(Получена 15 сентября 1999 г. Принята к печати 26 сентября 2000 г.)

Проведены электронно-микроскопические исследования структуры эпитаксиальных слоев $i-n^- - n-n^+$ -GaAs двух типов на подложках полуизолирующего арсенида галлия ориентации $\langle 100 \rangle$. Измерены низкотемпературные спектры фотолюминесценции и проанализированы их особенности. Показано, что образование ростовых дислокаций в таких структурах существенно влияет на спектры фотолюминесценции и ухудшает параметры сверхвысокочастотных полевых транзисторов на их основе.

1. Введение

Ионно-имплантационные и эпитаксиальные структуры арсенида галлия широко используются для изготовления сверхвысокочастотных (СВЧ) полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) типа FET. Возрастающие требования к увеличению выхода пригодных полупроводниковых приборов, повышение их надежности, уменьшение деградации стимулируют дальнейшие исследования как исходных структур, так и ПТШ на их основе.

Природа центров и механизмы излучательной рекомбинации в ионно-имплантированных кремнием кристаллах GaAs изучена в [1]. Влияние способа выращивания на фоновую концентрацию углерода в пленках GaAs рассмотрено в [2]. Представлялось интересным изучить влияние ростовых дислокаций на фотолюминесценцию (ФЛ) $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs и параметры СВЧ ПТШ на их основе, что и составило предмет данной работы.

2. Результаты и их обсуждение

Исследованы структуры $i-n^- - n-n^+$ -GaAs двух типов, используемых в обычных СВЧ полевых транзисторах с затвором Шоттки. Они выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в едином технологическом цикле.

Структуры первого типа (образец 572) получены при давлении $(1.3-1.9) \cdot 10^{-7}$ Па в ростовой камере, структуры второго типа (образец 573) — при давлении $(7.5-8.7) \cdot 10^{-8}$ Па. Структуры обоих типов сформированы последовательным нанесением специально не легированного буферного n^- -слоя, а также намеренно легированных кремнием разной концентрации активных n^- и n^+ -слоев GaAs на ориентированные в кристаллографическом направлении $\langle 100 \rangle$ высококачественные полуизолирующие i -подложки GaAs. Выбор кремния в качестве легирующей примеси обусловлен широким

использованием его в технологии GaAs для получения материала n -типа проводимости.

Температура подложек поддерживалась равной $540 \pm 20^\circ\text{C}$. Толщины подложек, n^- -, n^- и n^+ -слоев были равны 350, 1.0, 0.25 и 0.20 мкм соответственно.

Концентрация и подвижность электронов в слоях определялись из вольт-фарадных характеристик и данных измерений коэффициента Холла методом Ван-дер-Пау соответственно.

Фотолюминесценция возбуждалась аргоновым лазером ЛГ 106 М-1 с энергией квантов 2.41 эВ и мощностью 50 мВт. Максимальная плотность мощности сфокусированного пучка достигала $5 \cdot 10^{17}$ кв./см². Спектры ФЛ измерялись при погружении образцов в жидкий гелий и регистрировались со стороны падающего светового потока на установке, собранной на базе спектрометра высокой разрешающей способности ДФС-24 ($4.5 \text{ \AA}/\text{мм}$).

Электронно-микроскопические измерения выполнены на растровом электронном микроскопе JSM-35.

Некоторые электрофизические характеристики обеих $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs и параметры СВЧ ПТШ на их основе, измеренные на характерной частоте 12 ГГц, приведены в таблице. Обращает на себя внимание тот факт, что даже при незначительном ухудшении вакуума в ростовой камере вследствие натекания кислорода атмосферы (только при выращивании пластин серии 572 в спектре масс остаточных газов проявляется пик, обусловленный кислородом) заметно изменяется концентрация и подвижность электронов в n^+ - и n^- -слоях исходных пластин. В свою очередь это существенно ухудшает основные рабочие параметры СВЧ ПТШ, а именно шумовую температуру и коэффициент усиления.

Типичные спектры ФЛ I_{FL} исследованных структур GaAs показаны на рис. 1. Как видно, они существенно различны. Так, спектры структур первого типа, полученные от двух разных точек поверхности образца, размыты и состоят из широкой бесструктурной краевой полосы 1.523 эВ с резким коротковолновым крылом и пологим длинноволновым, на которое накладывается слабая примесная полоса 1.492 эВ. Характерно, что интенсивность излучения таких образцов изменяется при переходе от

[¶] E-mail: motsnyi@sun.semicond.kiev.ua

Некоторые электрофизические характеристики $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs и параметры полевых транзисторов с затвором Шоттки (FET), изготовленных на их основе

№ пластины		572		573	
T, K		300	77	300	77
Концентрация электронов в слоях, cm^{-3}	n^+	$4 \cdot 10^{18}$	—	$3 \cdot 10^{18}$	—
	n	$5 \cdot 10^{17}$	—	$3 \cdot 10^{17}$	—
Подвижность электронов в слоях, $cm^2/V \cdot c$	n^+	1600	1660	2045	2140
	n	3260	2980	4465	3595
Параметры ПТШ на частоте 12 ГГц	Коэффициент усиления, дБ	7–7.5	—	8.5–9	—
	Шумовая температура, К	225–300	—	90–140	—

одной точки поверхности к другой, что является яркой иллюстрацией их неоднородности.

Спектры структур второго типа (см. кривую 3 и вставку) состоят из ряда узких линий, обусловленных свободными экситонами в первом возбужденном состоянии (1.5187 эВ), поляритонами верхней (1.5157 эВ) и нижней (1.5148 эВ) ветвей, связанными на нейтральных донорах экситонами (D, X) (1.5140 эВ), рекомбинацией свободных дырок на нейтральном доноре (D, h) (1.5131 эВ), электронными переходами между зоной проводимости и акцепторами (E_c-A) (1.4938, 1.4877 эВ), а также донорно-акцепторными парами ($D-A$) (1.4915, 1.4806 эВ), в которых акцепторами являются углерод C_{As}^0 и кремний Si_{As}^0 в состоянии $1S_{3/2}$ с энергиями термической ионизации 26.5 и 35.1 мэВ соответственно [1,3]. Кроме того, отметим следующее:

— поляритонный канал излучательной рекомбинации существенно преобладает над всеми остальными каналами;

— квантовый выход излучательной рекомбинации с верхней поляритонной ветви примерно в 3 раза выше, чем с нижней;

— отсутствие в спектрах ФЛ линий, принадлежащих связанным на точечных структурных дефектах экситонам (d, X).

Спектры ФЛ образцов обоих типов в области электронных переходов E_c-A и $D-A$ -пар содержат слабые, сравнимые по интенсивности линии, что свидетельствует о примерно равном содержании примесных атомов C_{As}^0 и Si_{As}^0 в каждом из них. Следовательно, эти примеси не могут быть причиной более низких подвижностей электронов в n^+ - и n -слоях пластин первого типа, а также невысоких рабочих параметров СВЧ ПТШ на их основе.

Таким образом, все вместе взятое, как и проявление в спектрах линии свободных экситонов в состоянии $n = 2$, прямо указывает на незначительное содержание в исследованных образцах серии 573 различных дефектов кристаллической решетки и, стало быть, на высокое структурное совершенство таких образцов.

Эти выводы хорошо коррелируют с данными электронно-микроскопических измерений, которые представлены на рис. 2. Действительно, образцы серии 572 являются блочными, с множеством кристаллитных малоугловых

границ, вдоль которых располагаются различные дислокации (в том числе дислокации несоответствия на границе раздела n^- -слоя с подложкой), прорастающие даже в подложку (рис. 2, а), тогда как образцы серии 573 являются однородными, совершенными, с четкими границами раздела между $i-n^-$ - и $n^- - n$ -областями (рис. 2, б). Исходя из полученных результатов можно заключить, что ростовые дислокации существенно ухудшают качество $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs и параметры СВЧ ПТШ на их основе, а метод ФЛ является надежным средством установления структурного качества подобных образцов.

Под воздействием ростовых дислокаций кристаллическая решетка $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs деформируется, вследствие чего ширина запрещенной зоны E_G

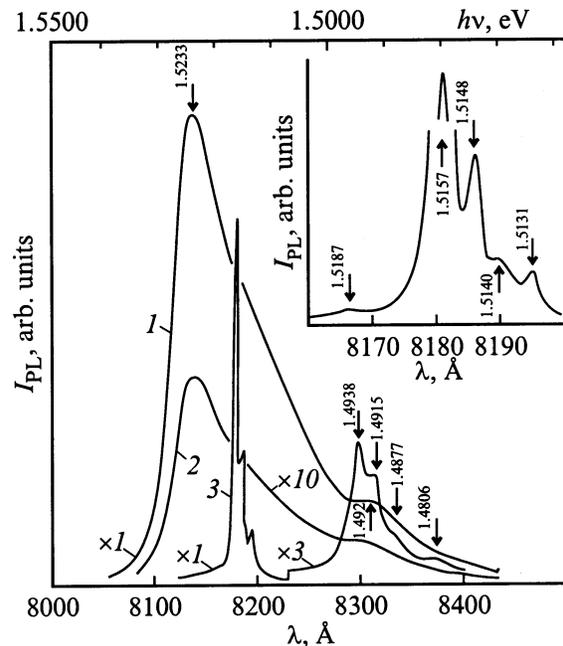


Рис. 1. Спектры ФЛ $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs для обычных СВЧ полевых транзисторов с затвором Шоттки типа FET: 1, 2 — свечение разных мест образца 572, 3 — образец 573. На вставке — центральная часть спектра ФЛ образца 573 (кривая 3). $T = 4.2 K$. Длина волны возбуждающего излучения 5145 Å. Указаны характерные энергии $h\nu$ в эВ.

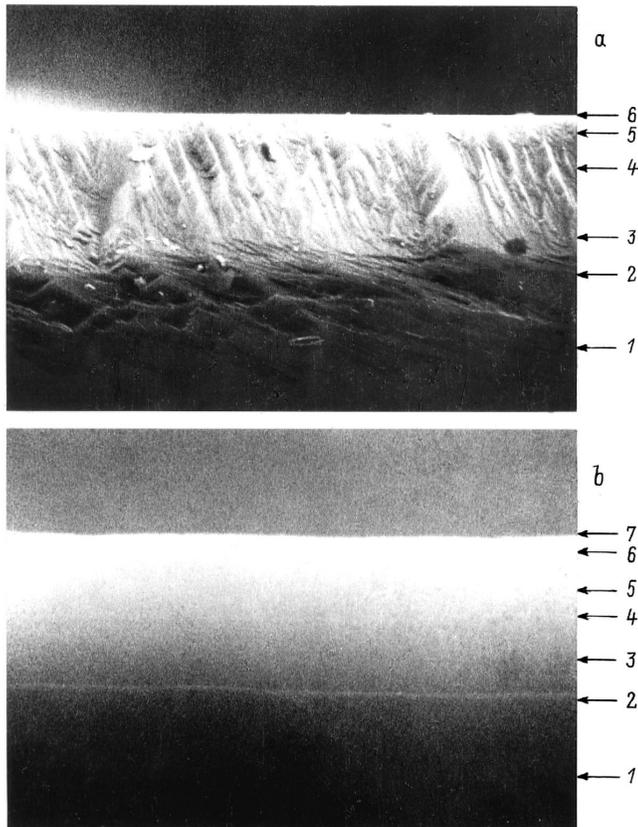


Рис. 2. Данные измерений $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs на растровом электронном микроскопе JSM-35: *a* — образец 572: 1 — подложка, 2 — граница раздела n^- -слоя с подложкой, 3 — n^- -слой, 4 — n -слой, 5 — n^+ -слой, 6 — поверхность образца; *b* — образец 573: 1 — подложка, 2 — граница раздела n^- -слоя с подложкой, 3 — n^- -слой, 4 — граница раздела n^- - и n -слоев, 5 — n -слой, 6 — n^+ -слой, 7 — поверхность образца. Ширина растрового изображения 11,3 мкм.

возрастает и краевая полоса сдвигается в сторону больших энергий на 3,8 мэВ. Подобная ситуация при 2 К была зарегистрирована ранее авторами работы [4] в спектрах ФЛ кристаллов GaAs n -типа, подвергнутых одноосному давлению вдоль направлений $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$. Наблюдался коротковолновый сдвиг экситонной полосы, величина которого существенно зависела от направления приложения силы. Максимальный сдвиг ее для этих направлений составлял $\sim 3,2$, $\sim 8,2$ и 11,0 мэВ при давлениях $7,0 \cdot 10^8$, $1,1 \cdot 10^9$ и $1,4 \cdot 10^9$ Па соответственно. Он примерно равен либо в 2–3 раза больше найденного для $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs с ростовыми дислокациями. Однако указать направление действия силы, а также оценить величину давления в таких образцах не представляется возможным.

Наблюдаемые особенности в поляритонном излучении могут быть обусловлены рассеянием поляритонов нижней ветви на различных несовершенствах кристаллической решетки с последующим забросом их на верхнюю поляритонную ветвь [5,6].

3. Заключение

1. Натекание кислорода атмосферы в ростовую камеру при изготовлении $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs методом MBE способствует образованию ростовых дислокаций.

2. Ростовые дислокации существенно изменяют спектры ФЛ $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs, концентрацию и подвижность электронов в n^+ - и n -слоях, а также значительно ухудшают параметры СВЧ ПТШ типа FET: шумовую температуру и коэффициент усиления.

3. Метод ФЛ является надежным средством для установления качества эпитаксиальных $i-n^- - n-n^+$ -структур GaAs.

Авторы благодарят Е.П. Лаурса за образцы и А.П. Остряницу за электронно-микроскопические измерения.

Работа была частично поддержана Международной соросовской программой поддержки образования в области точных наук (ISSP), грант № ЕРИ052023.

Список литературы

- [1] Ф.В. Мощный. Автореф. докт. дис. (Киев, 1993).
- [2] O. Tejayadi, Y.L. Sun, J. Klem, R. Fischer, M.V. Klein, H. Morokoc. Sol. St. Commun., **46**, 251 (1983).
- [3] V.G. Komarov, F.V. Motsnyi, V.F. Motsnyi, O.S. Zinets. J. Phys. Studies, **2**, 555 (1998).
- [4] R.N. Bhargava, M.I. Nathan. Phys. Rev., **124**, 695 (1967).
- [5] В.И. Сугаков. Опт. и спектр., **26**, 732 (1969).
- [6] Yu.V. Kryuchenko, V.I. Sugakov. Phys. St. Sol. (b), **111**, 177 (1982).

Редактор В.В. Чалдышев

The influence of growth dislocations on structure and photoluminescence of $i-n^- - n-n^+$ GaAs epitaxial layers as well as on parameters of ultra-high-frequency field effect transistors with Schottky's barrier (FET) on their basis

M.P. Lisitsa, F.V. Motsnyi, V.F. Motsnyi, I.V. Prokopenko

Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
252028 Kiev, Ukraine

Abstract Electron microscopy study has been made on two types of $i-n^- - n-n^+$ GaAs epitaxial layers grown on GaAs semi-insulating substrates with $\langle 100 \rangle$ orientation. The low temperature photoluminescence spectra were measured and analysed. It has been shown that growth dislocations in these structures exert influence upon photoluminescence spectra and worsen the parameters of related ultra-high-frequency field effect transistor with Schottky's barrier.