

(AlGaAs/GaAs)-ФОТОПРИЕМНИКИ НА ПОДЛОЖКАХ Si, ПОЛУЧЕННЫЕ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ И МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

В. М. Андреев, В. Г. Антипов, В. С. Калиновский, Р. В. Каллион,
С. А. Никишин, С. С. Рувимов, М. В. Степанов,
Е. М. Танклевская, В. П. Хвостиков

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 8.07.1992. Принята к печати 14.07.1992)

Сообщается о получении комбинированным методом жидкофазной и молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктур в системе AlGaAs/GaAs/Si для быстродействующих фотоприемников ме-за-конструкции. По данным просвечивающей электронной микроскопии, поверхностная плотность дислокаций в полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии слоях GaAs на подложках Si достигала 10^7 – 10^8 см⁻². Подавление антифазных доменов при эпитаксии наблюдалось при достаточно малых толщинах растущего слоя GaAs, достигавших в отдельных случаях величины ~1000 Å. По данным микрокатодолюминесценции, на стадии жидкофазной эпитаксии плотность дефектов в активных областях таких гетероструктур может быть снижена до $(2-3) \cdot 10^4$ см⁻².

Применение жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [1], а также сочетание возможностей молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и ЖФЭ [2] являются весьма перспективными подходами при изготовлении гетероструктур толщиной несколько микрон в системе GaAs/Si.

В данной работе приведены результаты исследования параметров гетероструктур в системе (GaAs—AlAs)/Si и фотоприемников на их основе, полученных по гибридной схеме МПЭ—ЖФЭ.

МПЭ GaAs проводилась на установке ЭП-1301, модифицированной в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. В качестве подложек использовались пластины КДБ-40 Si (001), разориентированные на 2.5° в направлении [110]. Предэпитаксиальная химическая обработка, выполненная по методике [3, 4], обеспечивала получение на поверхности подложки пассивирующей фазы дигидрида кремния. Состав и структура поверхности подложек контролировалась *in situ* (в аналитической камере ЭП-1301) методами оже-электронной спектроскопии (ОЭС) и дифракции медленных электронов (ДМЭ) с помощью четырехсетеочного энергоанализатора с обратным обзором дифракционной картины [5]. По данным ОЭС, типичное соотношение интенсивностей (I) оже-сигналов кислорода (510 эВ) и кремния (92 эВ) после загрузки подложек Si в ЭП-1301 составляло $(I_O/I_{Si}) = (0.9-1.5) \cdot 10^{-3}$, а для углерода (272 эВ) это соотношение составляло $(I_C/I_{Si}) = (1.0-3.3) \cdot 10^{-3}$. Структура поверхности таких подложек по данным ДМЭ и дифракции быстрых электронов на отражение была (1×1) . Предэпитаксиальная термообработка (этап I на рис. 1) таких подложек в ростовой камере ЭП-1301 при фоновом давлении мышьяка $\sim 10^{-7}$ Па в течение нескольких десятков минут при плавном изменении температуры T_S вплоть до 600°C , как правило, приводила к получению атомарно-чистых поверхностей ($I_O/I_{Si} \rightarrow 0$, $I_C/I_{Si} \rightarrow 0$). Во время этой термообработки при $T_S = (350 \pm 50)^\circ\text{C}$ наблюдали структурную перестройку поверхности Si (001): $(1 \times 1) \rightarrow (2 \times 1) + (1 \times 2)$.

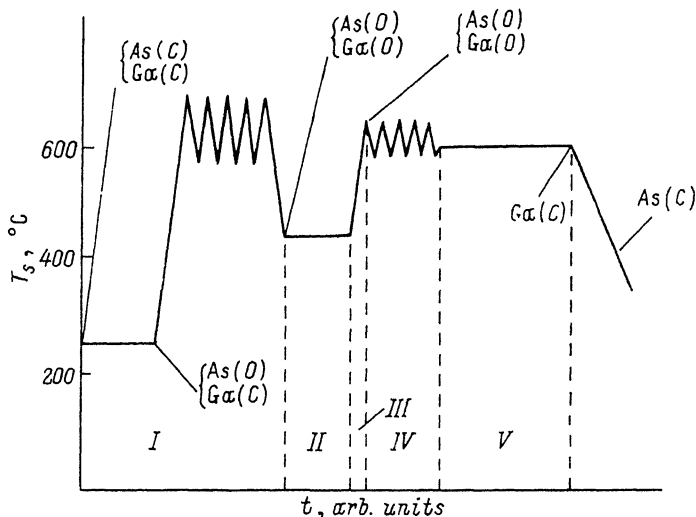


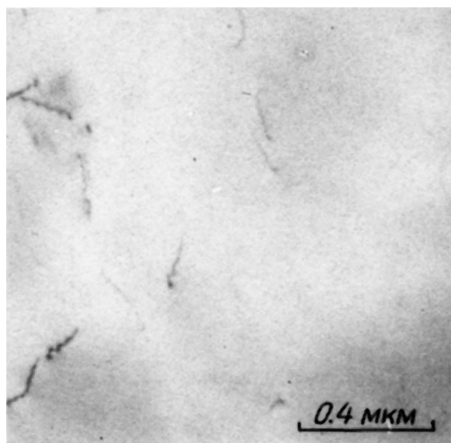
Рис. 1. Температурно-временной режим МПЭ GaAs на Si (001). Обозначения: As (O) и As (C) — заслонка перед источником мышьяка открыта и закрыта соответственно; Ga (O) и Ga (C) — то же для источника с галлием.

Температурно-временной режим выращивания однодоменных слоев GaAs на двухдоменных подложках Si (001) (этапы II, III, IV и V на рис. 1) разрабатывался с учетом данных работ [6, 7]. Отличительной особенностью использованного нами режима являлось то, что в отличие от классических схем [6] процесс МПЭ не прерывался, начиная с низкотемпературной стадии (этап II на рис. 1). Поток галлия во время этапа III (рис. 1) плавно увеличивался от значения $J_{Ga} = (0.5-1.0) \cdot 10^{14}$ ат/см²·с до значения $J_{Ga} = (3-8) \cdot 10^{14}$ ат/см²·с, а величина потока As₄ поддерживалась постоянной в течение всего процесса МПЭ на уровне $J_{As_4} \approx 10^{15}$ ат/см²·с. Рост при $T_s = 600$ °С (этап V на рис. 1) осуществлялся со скоростью 0.5—1.0 мкм/ч при соотношении потоков $(J_{As_4}/J_{Ga}) = 1.5-3.0$. Предварительная калибровка потоков осуществлялась по методике [8].

Подавление антифазных доменов, регистрируемое методом ДОБЭ по структурной перестройке поверхности $(4 \times 4) \rightarrow (2 \times 4)$ в описанном выше режиме, наблюдалось при достаточно малых толщинах растущего слоя GaAs, достигавших в отдельных случаях величины ~ 1000 х. Этот результат подтверждался данными просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). На рис. 2 приведен полученный в электронном микроскопе снимок приповерхностной области слоя GaAs, общая толщина которого составляла ~ 2 мкм. Характерным является отсутствие на поверхности антифазных границ, а также наличие прорастающих дислокаций, которые по данным дифракционного анализа имеют значительную винтовую компоненту вектора Бюргерса. Локальная плотность прорастающих дислокаций на поверхности изменялась в диапазоне 10^7-10^8 см⁻².

На таких подложках GaAs/Si методом ЖФЭ были изготовлены структуры для гетерофотоприемников в системе AlGaAs/GaAs. Процесс ЖФЭ являлся двухстадийным. На первом этапе выращивался буферный слой GaAs толщиной ~ 5 мкм из охлаждаемого со скоростью ~ 2 К/с раствора-расплава (температура начала эпитаксии — 550 °С). Далее, во втором процессе в температурном интервале (615—590) °С формировалась структура фотоэлемента путем последовательного выращивания слоев: Al_{0.02}Ga_{0.98}As ($n \approx 10^{17}$ см⁻³) толщиной ~ 2 мкм; GaAs, легированный Ge ($p \approx 10^{18}$ см⁻³), толщиной 1.5—2 мкм и широкозонный слой p-Al_{0.7}Ga_{0.3}As (0.3—0.5 мкм), легированный Mg. Оценка качества активного слоя

Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение (на просвет) приповерхностного слоя GaAs. Светлое поле, отражение (220).



p-GaAs гетероструктуры проводилась путем сравнения интенсивности его люминесценции при 300 и 80 К. Возбуждение люминесценции осуществлялось лазером с длиной волны генерации ~ 0.63 мкм. Соответствующие спектры фотолюминесценции, представленные на рис. 3, свидетельствуют о достаточно высоком качестве активного слоя.

На пластинах с перечисленными слоями при использовании методов фотолитографии формировались гетерофотодиоды меза-конструкции (площадь $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ см²). В качестве электрических контактов к слоям *n*- и *p*-типа проводимости использовались сплавы Au + Ge и Au + Zn соответственно. Боковая грань меза-диодов для надежной пассивации *p*—*n*-перехода защищалась диэлектриком (SiO₂).

Результаты исследования параметров таких фотодиодов представлены на рис. 4 и 5. На прямой ветви темновой ВАХ (рис. 4) можно выделить два характерных участка: первый — в диапазоне плотностей тока ($3 \cdot 10^{-7}$ — $5 \cdot 10^{-5}$) А/см², для которого фактор качества ВАХ $A = 2.1$, а плотность тока насыщения $j_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ А/см²; и второй — в диапазоне ($5 \cdot 10^{-5}$ — $3 \cdot 10^{-3}$) А/см², для которого $A = 1.7$ и $j_0 \sim 1 \cdot 10^{-8}$ А/см². На начальном участке (рис. 4, $A = 2.1$) темновой ток полностью определялся рекомбинационно-генерационным механизмом протекания, о чем свидетельствовали результаты [9], где было показано, что применяемая защита боковых граней меза-структуры с помощью пассивирующих покрытий, в нашем случае SiO₂, обеспечивает снижение поверхностных токов утечки до величин $\sim 10^{-6}$ А/см². Этот результат подтвердили и исследования обратной ветви темновой ВАХ (рис. 4, кривая *b*) фотодиодов. Ответственными за такой механизм протекания тока, по-видимому, являются дефекты (дислокации), наследуемые активными слоями гетероструктуры фотодиода на этапе ЖФЭ из слоя GaAs/Si, полученного методом МПЭ. По данным микрокатодолюминесценции, плотность таких дефектов в активном слое была на уровне $(2-3) \cdot 10^4$ см⁻².

С увеличением плотности тока (более 10^{-5} А/см²) происходил рост доли инжекционной составляющей и фактор качества уменьшался до величины $A = 1.7$ (рис. 4). Относительно рано начинающийся загиб прямой ветви темновой ВАХ с напряжениями ≥ 0.65 В объясняется значительной величиной контактного сопротивления в данной меза-структуре. Величина шунтирующего сопротивления фотодиода при напряжении смещения 10 мВ превышала 30 ГОм. Квантовая чувствительность меза-фотодиодов достигала величины $Q = 0.35$ и измерялась при возбуждении через фронтальное широкозонное окно AlGaAs диаметром 20 мкм (рис. 4). Квазинепрерывный световой сигнал мощностью ~ 0.7 мкВт от полупроводникового лазера с длиной волны генерации $\lambda = 0.83$ мкм вводился через упомянутое окно с использованием одномодового волокна. Полученное невысокое значение Q объяснялось сложностью ввода светового сигнала из волокна в фотодиод, так как электрический контакт к матрице меза-фотодиодов осуществлялся токовыми зондами. В данном случае зонды не позволяли подвести оптическое волокно вплотную к окну исследуемого прибора.

Емкость фотодиодов при нулевом смещении составляла (0.6—0.8) пФ и снижалась более чем в 2 раза при подаче обратного смещения (рис. 5). Невысокое зна-

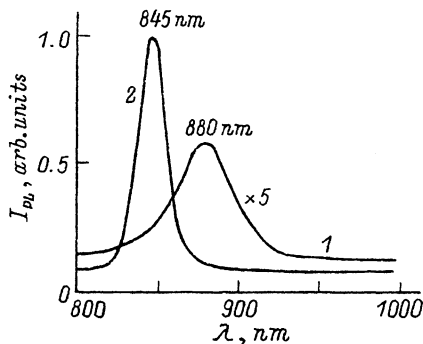


Рис. 3. Спектры интенсивности фотолюминесценции I_{PL} активного слоя p -GaAs. T , К: 1 — 300, 2 — 80.

чение емкости для фотодиодов AlGaAs/GaAs на Si-подложке данной площади может быть существенно снижено за счет уменьшения концентрации легирующей примеси (от 10^{17} до величины $<10^{16}$ см^{-3}) в слое GaAs в области объемного заряда p - n -перехода, что обеспечит быстрдействие выше 30 пс.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения комбинированного метода МПЭ—ЖФЭ при изготовлении быстро-

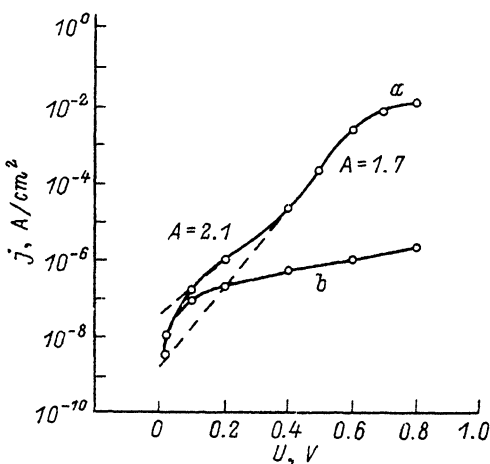


Рис. 4. Темновые вольт-амперные характеристики меза-фотодиода. a — прямая ветвь, b — обратная. $T = 300$ К.

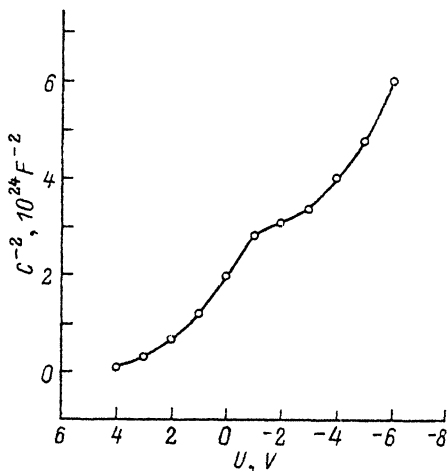


Рис. 5. Вольт-фарадная характеристика меза-фотодиода. Частота — 1 МГц.

действующих фотоприемников в системе AlGaAs/GaAs/Si.

В заключение авторы выражают признательность А. М. Минтаинову и В. А. Соловьеву за проведение люминесцентных исследований структур и Ж. И. Алфёрову за внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. М. Андреев, А. М. Минтаилов, А. К. Намазов, О. В. Сулима, Н. Н. Фалеев, А. Ю. Якимов. Письма ЖТФ, 17, 1 (1991).
- [2] В. М. Андреев, О. В. Сулима. Электронная промышленность, Сер. электроника, вып. 11, 24 (1990).

- [3] В. Г. Антипов, Р. В. Каллион, С. А. Никишин, Д. В. Синявский. Письма ЖТФ, 16, 66 (1990).
- [4] В. Г. Антипов, С. А. Никишин, Д. В. Синявский. Письма ЖТФ, 17, 19 (1991).
- [5] В. Г. Антипов, И. Б. Большунов, С. С. Романов. ПТЭ, вып. 4, 166 (1990).
- [6] J. Vaggio, H. Asonen, J. Lammasniemi, M. Pessa. Appl. Phys. Lett., 55, 1987 (1989).
- [7] В. Г. Антипов, Р. В. Каллион, Р. Н. Кютт, С. А. Никишин, С. С. Рувимов, Д. В. Синявский, В. А. Соловьев, Л. М. Сорокин, Н. Н. Фалеев, М. П. Шеглов. Письма ЖТФ, 18, 1 (1992).
- [8] В. Г. Антипов, С. А. Никишин, В. Н. Светлов, Д. В. Синявский, В. А. Спиренков. ЖТФ, 61, 174 (1991).
- [9] В. М. Андреев, А. Б. Гучмазов, Т. В. Декольчук, Н. Б. Джелепова, В. С. Калиновский, В. М. Лантратов. Письма ЖТФ, 13, 1481 (1987).

Редактор Л. В. Шаронова
