

06.5;08.2

Выглаживание поверхности антимионида галлия

© Р.В. Левин, И.В. Федоров, А.С. Власов, П.Н. Брунков, Б.В. Пушный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Lev@vregroup.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 июля 2019 г.

В окончательной редакции 25 августа 2020 г.

Принято к публикации 3 сентября 2020 г.

Впервые представлены результаты исследования условий получения атомарно-гладкой поверхности подложек GaSb. Экспериментально показано, что можно улучшить качество поверхности образцов, изменяя условия отжига. Наименьшая шероховатость 1.3 nm получена при времени отжига 16 min при температуре 650°C в потоке триметилсурьмы и H₂.

Ключевые слова: отжиг, подложка, GaSb, шероховатость, атомно-силовой микроскоп, фотолуминесценция.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.23.50350.17971

В последнее время все больше исследователей уделяет внимание квантово-размерным гетероструктурам. Эти материалы потенциально применимы для разработки многих перспективных устройств, таких как лазеры, фотодиоды и многие другие [1–3]. Свойства большинства полупроводниковых материалов чувствительны к качеству ростовых поверхностей (шероховатости). Одним из направлений, которое способствует созданию качественных квантово-размерных гетероструктур, является получение ростовых поверхностей, которые будут максимально приближены к атомарно-гладким поверхностям с наименьшей шероховатостью. Во время роста гетероструктур шероховатость ростовой поверхности может наследоваться от слоя к слою [4], что может привести к рассеянию носителей заряда [5] на гетерогранице с большой шероховатостью и, следовательно, к ухудшению параметров приборов на основе таких материалов. Также шероховатость влияет на величину переходных слоев в квантово-размерных гетероструктурах, что было представлено на примере напряженных сверхрешеток InAs/GaSb.

В настоящей работе методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовалась зависимость шероховатости поверхности подложек GaSb от температуры, времени отжига и состава газовой среды, в которой проводился отжиг. Под термином „шероховатость“ в работе понимается среднеквадратичная шероховатость R_q , которая характеризует среднеквадратичное отклонение профиля поверхности относительно базовой линии внутри исследуемого участка.

Эксперименты проводились на установке газовой эпитаксии AIX200 (AIXTRON, Германия) на подложках *n*-GaSb(001) с уровнем легирования $n = (5-7) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Давление в реакторе составляло 76 Torr. Подложка во время роста вращалась со скоростью более 100 rpm. Газ-носитель — очищенный водород с точкой росы не выше -100°C , а суммарный поток через реактор составлял 5.5 slpm. Среднеквадратичная шероховатость подложек перед отжигом составляла

$R_q = 20 \text{ nm}$. На начальном этапе исследований подложки отжигались в температурном диапазоне $T = 500-700^\circ\text{C}$ в течение 2 min в потоке водорода. На следующем этапе исследовалось влияние времени отжига и состава газовой среды (образцы отжигались в потоке водорода или в смешанном газовом потоке водорода и триметилсурьмы (TMSb)) на морфологию поверхности подложек при оптимальной температуре отжига. Шероховатость всех образцов исследовалась на атомно-силовом микроскопе Dimension 3100 (Veeco, США). Для измерения топографии поверхности использовался кантилевер TESP-V2 с радиусом кривизны острия 8 nm [6].

На первом этапе определялась оптимальная температура отжига, т.е. температура, при которой наблюдалась наименьшая шероховатость. Для этого образцы подложек отжигались в течение 2 min при различных температурах в диапазоне $T = 500-700^\circ\text{C}$ в потоке водорода. После отжига образцы были исследованы на АСМ. Анализ данных с АСМ показал, что наименьшая

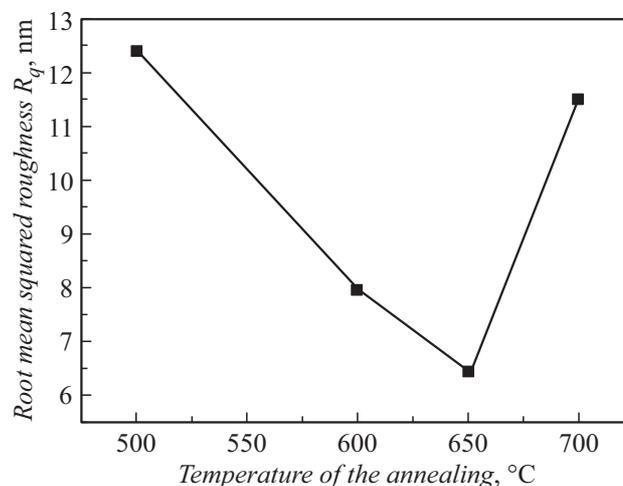


Рис. 1. Зависимости шероховатости поверхности образцов от температуры отжига в потоке H₂.

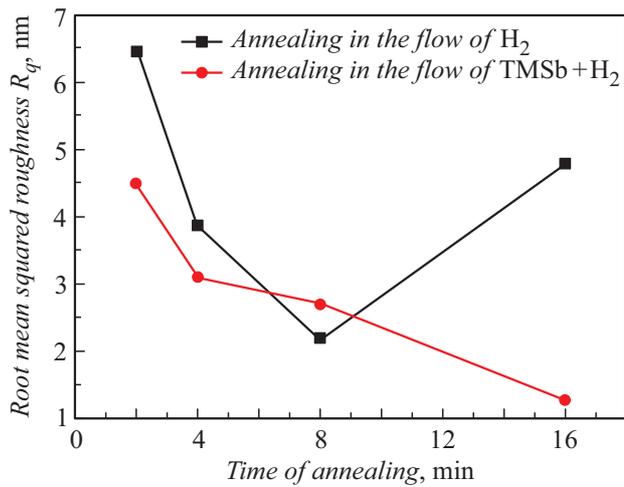


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности образцов от времени в различных газовых средах ($T = 650^\circ\text{C}$).

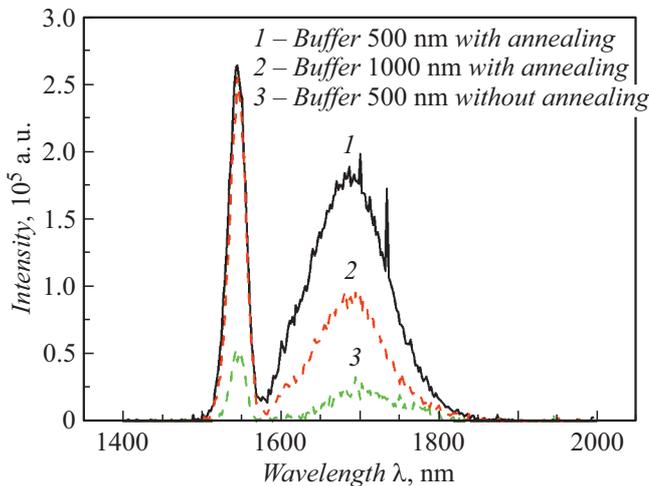


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции выращенных буферных слоев толщиной 500 и 1000 nm с отжигом и без него.

шероховатость достигается при температуре 650°C и составляет 6.4 nm (рис. 1).

Полученную зависимость мы связываем с одновременной десорбцией атомов Ga и Sb с поверхности подложки во время отжига.

Согласно [7], до 600°C давления паров галлия над подложкой больше, чем у сурьмы; следовательно, он активнее десорбирует с поверхности отжигаемой подложки, получается более развитый рельеф. При приближении к температуре 600°C давления паров Ga и Sb достигают паритета, идет более равномерная десорбция атомов с подложки, из-за чего поверхность подложки приобретает меньшую величину шероховатости. Если продолжать увеличивать температуру, то будет активнее десорбировать сурьма, что снова увеличит шероховатость подложки.

После определения оптимальной температуры (650°C) исследовалось влияние времени отжига и различной газовой среды на морфологию поверхности образцов. Для этого подложки отжигались в течение времени $t = 2\text{--}16$ min в потоке водорода или смешанном потоке водорода и TMSb (скорость подачи TMSb в реактор примерно $15\ \mu\text{mol}/\text{min}$). На рис. 2 представлены результаты, полученные после анализа данных АСМ.

Для отжига в потоке водорода наименьшая шероховатость 2.2 nm достигается на 8-й минуте, при дальнейшем увеличении времени отжига шероховатость увеличивается. Для отжига в потоке TMSb и H₂ наименьшая шероховатость 1.3 nm достигалась на 16-й минуте, причем это наименьшая полученная шероховатость.

Методом фотолюминесценции было исследовано влияние отжига на люминесцентные свойства слоев. Для этого были выращены буферные слои толщиной 500 и 1000 nm при температуре 600°C и соотношении элементов V/III, равном 2, аналогично режиму из работы [8]. Перед ростом буферных слоев все подложки отжигались при 650°C в течение 2 min. Первоначальная шероховатость поверхности подложек GaSb была 20 nm, а после первого отжига — 6.4 nm. После роста буферного слоя шероховатость составила 3.8 nm. Затем образцы с выращенными буферными слоями отжигались при 650°C в течение 2 min. Шероховатость слоев после отжига составила 2.1 nm. Анализ спектров фотолюминесценции (рис. 3) показал, что даже отжиг в течение 2 min улучшает качество поверхности выращенных структур и способствует увеличению интенсивности излучения примерно в 5 раз (по сравнению с неотожженным буферным слоем). Независимо от толщины выращенного буферного слоя величина интенсивности основного (межзонного) пика не изменяется у отожженных образцов.

В результате исследований было показано, что оптимальная температура отжига подложек GaSb равна 650°C . Наименьшая шероховатость при отжиге в потоке водорода была 2.2 nm при времени отжига 8 min, а в потоке TMSb и H₂ — 1.3 nm при времени отжига 16 min. Также было показано, что даже небольшой отжиг благоприятно сказывается на люминесцентных свойствах выращенных слоев.

Финансирование работы

АСМ-исследования проводились с использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), поддерживаемого Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0018).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Razeghi M., Nguyen B.-M.* // Rep. Prog. Phys. 2014. V. 77. P. 082401–082418.
- [2] *Rogalski A., Kopytko M., Martyniuk P.* // Proc. SPIE. 2017. V. 10177. P. 1017715.
- [3] *Li X., Zhao Y., Wu Q., Teng Y., Hao X., Huang Y.* // J. Cryst. Growth. 2018. V. 502. P. 71–75.
- [4] *Васев А.В., Путьато М.А., Семягин Б.Р.* // Вестн. НГУ. Сер.: Физика. 2008. Т. 3. № 4. С. 9–19.
- [5] *Протасов Д.Ю., Малин Т.В., Тихонов А.В., Цацульников А.Ф., Журавлев К.С.* // ФТП. 2013. Т. 47. В. 1. С. 36–47.
- [6] www.brukerafmprobes.com
- [7] Optoelectronic properties of semiconductors and superlattices. V. 3. Antimonide-related strained-layer heterostructures / Ed. M.O. Manasreh. 1st ed. CRC Press, 1997. 501 p.
- [8] *Левин Р.В., Неведомский В.Н., Баженов Н.Л., Зегря Г.Г., Пушкин Б.В., Мизеров М.Н.* // ФТП. 2019. Т. 53. В. 2. С. 273–276.