

является оксидом висмута висмута на подложке. В образует несколько оксидов: Bi_2O_3 , Bi_2O_4 , Bi_2O_5 . Микроскопический анализ соотношения $\text{Bi} : \text{O}$ для пленки после пребывания в разряде, проведенный нами на электронно-зондовом микроанализаторе САМБ ВАХ, показал преобладание Bi над формульным соотношением в пределах от 27 % для BiO до 18 % для Bi_2O_5 . Согласно [6, 7], Bi_2O_3 — это полупроводник, запрещенная зона которого порядка 3 эВ, а сопротивление при комнатной температуре 10^6 — 10^8 Ом·см. Согласно нашим данным, Bi в процессе разряда переходит в высокоомное (10^7 Ом·см) соединение, что приводит к уменьшению тока во время разряда. Сравнение же спектров пропускания Bi_2O_3 и пленки, полученной в разряде (рис. 3, кривая б), говорит о совпадении этих характеристик. Микроскопический анализ показал, что соотношение между Bi и O не соответствует ни одной из формул оксидов: висмут преобладает над кислородом. Такой результат можно объяснить неполным прохождением реакции окисления с образованием $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{Bi}$.

Таким образом, мы полагаем, что при воздействии на пленку Bi газового разряда в среде, содержащей кислород, Bi окисляется и на поверхности пленки образуется Bi_2O_3 , по оптическим и электрическим свойствам существенно отличающийся от Bi . Образующийся слой оксида препятствует окислению более глубоких слоев Bi , поэтому реакция просветления существенно замедляется со временем. Электронный поток разряда является катализатором процесса окисления, создавая катодопроводность, он индуцирует процесс окисления на всю глубину пленки. На различии оптических свойств Bi и Bi_2O_3 реализуется получение стабильного необратимого фотографического изображения.

Список литературы

- [1] Касымов Ш. С., Парицкий Л. Г., Рыжков С. М. Деп. в ВИНТИ. № 2696-74. Л., 1974.
- [2] Астров Ю. А., Касымов Ш. С., Парицкий Л. Г. Деп. в ВИНТИ. № 1031-75. Л., 1975.
- [3] Астров Ю. А., Касымов Ш. С., Парицкий Л. Г., Рыжков С. М. Деп. в ВИНТИ. № 1032-75. Л., 1975.
- [4] Бурова Т. В., Парицкий Л. Г., Хайдаров З. Деп. в ВИНТИ. № Р-3215/81. Л., 1981.
- [5] Бурова Т. В., Парицкий Л. Г., Лодыгин А. Н., Хайдаров З. Деп. в ВИНТИ. № 7064-84. Л., 1984.
- [6] Agasiev A. A., Zeinally A. Kh., Guseinov Ya. Yu. // Mat. Res. Bull. 1986. Vol. 21. P. 765—771.
- [7] Гусейнов Я. Ю. Автореф. канд. дис. Баку, 1989. 19 с.

Азербайджанский государственный
университет им. С. М. Кирова
Баку

Поступило в Редакцию
21 августа 1989 г.
В окончательной редакции
21 мая 1990 г.

06; 12

Журнал технической физики, т. 60, в. 10, 1990

© 1990 г.

ДИАГНОСТИКА ГЕТЕРОГРАНИЦ $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ ПО ОЖЕ-ПРОФИЛЯМ КОСОГО ШЛИФА, ПОЛУЧЕННОГО ХИМИЧЕСКИМ ТРАВЛЕНИЕМ

А. Т. Гореленок, Н. Д. Ильинская, М. И. Костина, Е. С. Новикова,
М. А. Панченко, А. Э. Петров

Методы профилирования состава гетероструктур InGaAs/InP с разрешением в несколько монослоев необходимы для разработки ряда оптоэлектронных приборов спектрального диапазона 1.0—1.65 мкм. Особый интерес вызывает анализ гетероструктур, выращенных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Это связано с возможностью подтравы предыдущего слоя InGaAsP расплавом для выравнивания последующего слоя и образования переходной области неизопериодического состава [1], что должно привести к ухудшению качества гетерограницы, которое проявляется на таких важных характеристиках как скорость поверхностной рекомбинации неравновесных носителей, темп термогенерации электронов и дырок и т. д.

Недостаток наиболее развитого метода профилирования — оже-электронной спектроскопии (ОЭС) при травлении ионным пучком заключается в увеличении погрешности измерений при увеличении глубины травления.

Для диагностики гетерограниц, лежащих глубоко под поверхностью образца (несколько тысяч ангстрем), наиболее удобен метод ОЭС косого шлифа, полученного химическим травлением [2]. В работе [3] показано, что этот метод пригоден для измерения толщины тонких (50—100 Å) слоев с 10%-ной точностью.

В настоящей работе метод ОЭС косого шлифа, полученного химическим травлением, использовался для определения толщин переходной области в системе InGaAsP—InP при росте узкозонного слоя на широкозонном и наоборот. Проведено сравнение данных, полученных по ОЭС косого шлифа, с данными по ОЭС при послойном травлении ионным пучком.

Исследованные структуры были получены методом ЖФЭ на подложках InP (100). Методика изготовления косого шлифа при помощи химического травления заключалась в равномерном погружении образца в полирующий травитель, причем величина получаемого угла скоса α определялась соотношением скоростей травления и погружения образца.

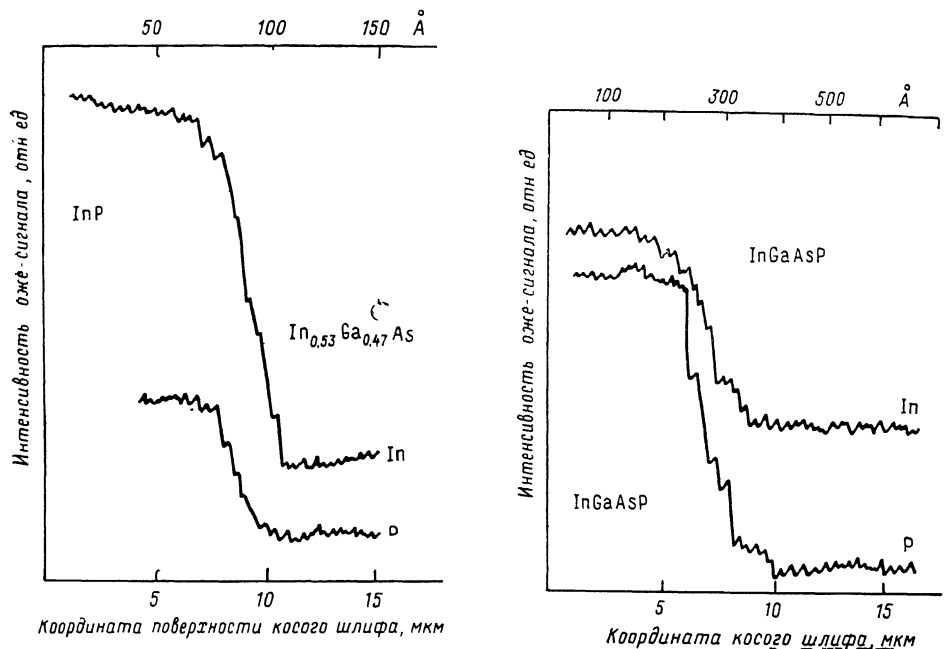


Рис. 1. Оже-сканирование поверхности косого шлифа гетероструктуры In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP с коэффициентом увеличения 1000.

Рис. 2. Оже-сканирование поверхности косого шлифа гетероструктуры InGaAsP ($\lambda_g=1.0$ мкм)/InGaAsP ($\lambda_g=1.55$ мкм) с коэффициентом увеличения 250.

К травителю для изготовления косого шлифа предъявляются следующие требования: равная или близкая по величине скорость травления различных составов InGaAsP и InP, хорошая смачиваемость поверхности образца, малая летучесть и др. Использованный в работах [2-4] раствор брома в метаноле обладает рядом недостатков: равная скорость травления InP и InGaAsP, высокая летучесть. Поэтому в настоящей работе использовался насыщенный при 20 °C раствор KBrO₃ в воде в смеси с концентрированной ортофосфорной кислотой в различных соотношениях [6]. Было показано, что скорости травления InP и InGaAsP с различным содержанием компонентов близки по величине, а диапазон изменения скоростей травления в зависимости от условий (температура, соотношение компонентов травителя) составляет от 0.1 до 1.2 мкм/мин.

Следует отметить, что эпитаксиальные структуры, изготовленные методом ЖФЭ, имеют некоторый рельеф поверхности, который повторяется при изготовлении косого шлифа. По этой причине выбирались образцы, имеющие наиболее ровные участки поверхности. Для более точного определения угла скоса косого шлифа наклон измерялся при помощи профилометра Дектак 3030. Используемая методика позволяла получать косые шлифы с углом скоса от нескольких градусов до 0.05° и менее.

Для получения профиля состава по разным компонентам косой шлиф исследовался методом ОЭС на установке типа оже-микровояд JEOL JAMP-10S. Анализатор типа цилиндрическое зеркало позволял работать как в режиме производной $dN(E)/dE$, так и в интегральном

режимах $N(E)$ при модуляции интенсивности пучка. В процессе измерений энергия первичного пучка устанавливалась 5 кВ. При токе $0.5\text{--}2 \cdot 10^{-7}$ А диаметр пучка составлял $0.5\text{--}1$ мкм. Для удаления атмосферных загрязнений и повышения полезного контраста поверхность образцов подвергалась подтравливанию на глубину $10\text{--}20$ Å пучком ионов аргона с энергией 1 кВ. Поскольку значительные изменения стехиометрического состава поверхности наступают при глубоком травлении $100\text{--}150$ Å, то предполагалось, что подтравливание не должно значительно влиять на результаты. Для контроля отдельные образцы изучались без подтравливания.

При измерении исследуемая граница (или слой) располагалась перпендикулярно линии сканирования электронного пучка в режиме «Line Profile». Оже-профиль вдоль линии получался в цифровой форме с помощью ЭВМ. Амплитуда сигнала получалась как разность пиковых значений (peak-to-peak) в режиме производной либо как разность значения в пике и значения фона вблизи пика в интегральном режиме. Поскольку интегральный режим позволял получить лучшее отношение сигнал/шум при малых токах пучка, то обычно использовался именно он. Время записи 500—1000 точек по линии профиля составляло для пиков In и P около 10 мин, для Ga и As — более 30 мин.

В случае если возникали сомнения в достаточности пространственного разрешения аппаратуры при угле скоса $\alpha > 0.1^\circ$, полученный оже-профиль по линии можно было сравнить с профилем интенсивности вторичных электронов на той же линии при значительно меньшей интен-

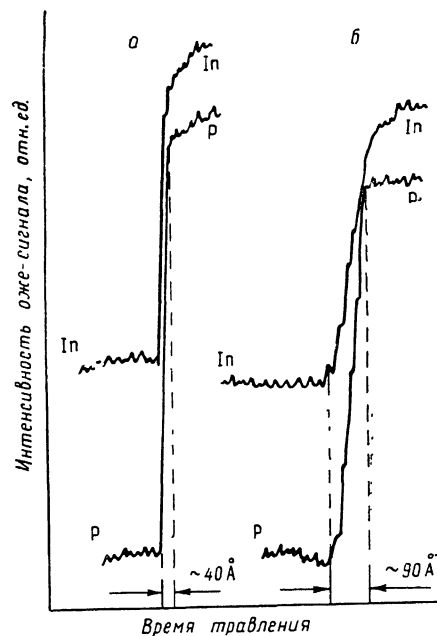


Рис. 3. Оже-профилирование гетероструктуры $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ при послойном травлении ионным пучком для толщин поверхностного слоя 150 (а) и 2000 Å (б).

сивности пучка $10^{-3}\text{--}10^{-10}$ А и соответственно гораздо лучше разрешении $0.06\text{--}0.1$ мкм.

Типичный профиль состава для гетероструктуры, полученной в результате роста $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ на InP , приведен на рис. 1, а для гетероструктуры, образованной в результате роста InGaAsP ($\lambda_g=1.0$ мкм) на InGaAsP ($\lambda_g=1.55$ мкм), приведен на рис. 2. Как видно из рисунков, величина размытия гетерограницы в первом случае составляет величину ~ 40 , а во втором — ~ 200 Å. С ростом скачка ширины запрещенной зоны ΔE_g при росте широкозонного слоя на узкозонном величина размытия гетерограницы увеличивается. Большая величина интерфейса при росте InGaAsP ($\lambda_g=1.0$ мкм) на InGaAsP ($\lambda_g=1.55$ мкм) объясняется подтравом слоя с $\lambda_g=1.55$ мкм расплавом при росте широкозонного слоя с $\lambda_g=1.0$ мкм [1].

На рис. 3 приведены данные оже-профилирования при ионном травлении первого образца (рис. 1) при разных толщинах поверхностного слоя (путем отстушения на разную величину от границы двух материалов на поверхности косого шлифа). Из рис. 3 видно, что измеряемая величина размытия гетерограницы изменялась от 40 (при толщине поверхностного слоя 150 Å) до 90 Å (при толщине поверхностного слоя 2000 Å). Это связано с увеличением погрешности измерений с увеличением глубины травления.

Таким образом, при определении толщины переходных областей, лежащих на глубине > 1000 Å, наиболее предпочтителен метод диагностики косого шлифа. Нужно отметить, что этот метод можно использовать также для изучения флуктуаций толщины слоев вдоль поверхности образца.

Список литературы

- [1] Cook L. M., Fend M., Tashiba M. M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 37. N 2. P. 173—175.
- [2] Bisaro R., Laurencin G., Friederich A., Razeghi M. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 40. N 11. P. 978—980.
- [3] Bresse J. F. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 59. N 6. P. 2026—2030.



ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

А. А. Кургузов, О. И. Семенов

При термической десорбции и рассеянии атомов щелочных металлов на металлической поверхности с большой вероятностью идет процесс поверхностной ионизации. Вероятность этого процесса по экспериментальным данным [1, 2] зависит от энергетической разности между работой выхода материала мишени и энергией ионизации основного состояния отлетающей от поверхности атомной частицы, температуры поверхности и угла падения ионов на поверхность.

Существующие модели [1, 3] описывают отдельные детали процесса ионизации для случая термической десорбции и выведены в приближении существования термодинамического равновесия в системе отлетающая частица—поверхность. Однако в случае скоростей отлета атомных частиц, существенно превышающих тепловые, время взаимодействия частицы становится значительно меньшим времени установления термодинамического равновесия и исходные положения указанных моделей не выполняются. Вместе с тем этот диапазон скоростей соответствует режимам работы ионных источников, плазменных ускорителей и многих других физических приборов, в работе которых процесс ионизации атомов может играть существенную роль.

Рассмотрим этот процесс, используя метод вторичного квантования. При взаимодействии атомной частицы с поверхностью ее энергетические уровни сдвигаются и уширяются в результате взаимодействия с электронами в приповерхностной зоне. В работе [4] было показано, что при приближении частицы к поверхности изменение энергии связанных состояний может быть значительным. Экранирование приводит к тому, что связанные состояния выходят в континуум, и на расстояниях порядка нескольких атомных единиц от поверхности может существовать только основное состояние с пониженной энергией ионизации. Это позволяет свести гамильтониан взаимодействия атомной частицы с поверхностью к виду [5]

$$H(t) = \sum_k \epsilon_k n_k(t) + \epsilon_a(t) n_a(t) + \sum_k [V_k(t) c_a^\dagger(t) c_k(t) + \text{в. с.}],$$

где ϵ_k — энергия k -уровня поверхности металла; ϵ_a — энергия основного состояния атома; c_a^\dagger , c_a , c_k^\dagger , c_k — операторы «рождения» и «уничтожения» электрона в состояниях a и k соответственно; V_k — матричный элемент оператора взаимодействия; $n = \langle c^\dagger c \rangle$ — число заполнения состояний.

Вероятность ионизации будет

$$P = 1 - n_a(\infty).$$

Следуя работе [6], запишем уравнения движения для операторов c_a и c_k

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} = i [H(t), c_a(t)], \quad \frac{\partial c_k}{\partial t} = i [H(t), c_k(t)]. \quad (1)$$

Решая систему дифференциальных уравнений (1) и вводя ширину атомного уровня, взаимодействующего с поверхностью в виде

$$\Delta(t) = \pi \sum_k |V_k(t)|^2 \delta(\epsilon_a - \epsilon_k),$$