

УДК 539.216.2:621.315.592

© Н.Т.Гладких, И.П.Гребенник,
С.В.Дукаров, М.С.Зото, И.В.Сорокина, 1992

Харьковский госуниверситет

ЭЛЕКТРОНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК Ni И GaAs

Приводятся результаты электронографического исследования фазового состава двухслойных пленок Ni/GaAs в зависимости от соотношения толщин слоев. Конденсация никеля проводилась при 400°C. Показано, что структура и число образующихся при взаимодействии фаз различны в случаях, когда пленка GaAs конденсировалась при 20 и 400°C.

Контакты металл–проводник широко используются в микроэлектронике, однако, если процессы на границе металл–кремний, металл–германий изучены достаточно полно, то явления на границе металла с арсенидом галлия исследованы недостаточно. В частности, представляет интерес система Ni–GaAs, для которой в работе [1] получены некоторые сведения о межфазном взаимодействии в зоне контакта для пленки Ni толщиной 0,1–0,5 мкм, химически осажденной на легированную оловом полированную монокристаллическую подложку GaAs при отжиге в атмосфере водорода при 300–550°C.

В настоящей работе описаны результаты исследования межфазного взаимодействия тонких слоев Ni и GaAs.

Объектом исследования служили тонкие пленки GaAs и Ni, полученные путем последовательного термического испарения и конденсации в вакууме 10^{-4} Па на подложки – монокристаллы NaCl. Подложки располагались по отношению к испарителям таким образом, чтобы в различных точках получать слои GaAs примерно постоянной толщины (~30 нм), а слои Ni – переменной (3–50 нм). Для GaAs применяли метод дискретного испарения, для Ni – метод термического испарения из вольфрамовой проволоки. Температура подложки при конденсации GaAs составляла 20 и 400°C, а при конденсации никеля – 400°C. Полученные образцы охлаждались в вакууме и далее исследовались электронографически. Расшифровка образующихся при взаимодействии фаз производилась путем сравнения экспериментальных значений межплоскостных расстояний с рассчитанными для известных фаз двойных систем Ni–As и Ni–Ga [2–6].

Характерные электронограммы, полученные от пленок Ni/GaAs при конденсации слоев GaAs на подложки NaCl при 20 и 400°C, а Ni разной толщины при 400°C, приведены на рис. 1, 2. Видно (рис. 1), что в случае осаждения GaAs на подложки из NaCl при 20°C электронограммы указывают на отсутствие ориентирующего действия подложки на структуру образующихся при контактном взаимодействии фаз системы Ni–GaAs. В то же время конденсация GaAs на подложку NaCl при 400°C приводит к образованию монокристалльной GaAs-фазы,

оказывающей ориентирующее действие на растущие на межфазной границе фазы, особенно при толщинах пленки Ni, сравнимых с толщиной GaAs (рис. 2).

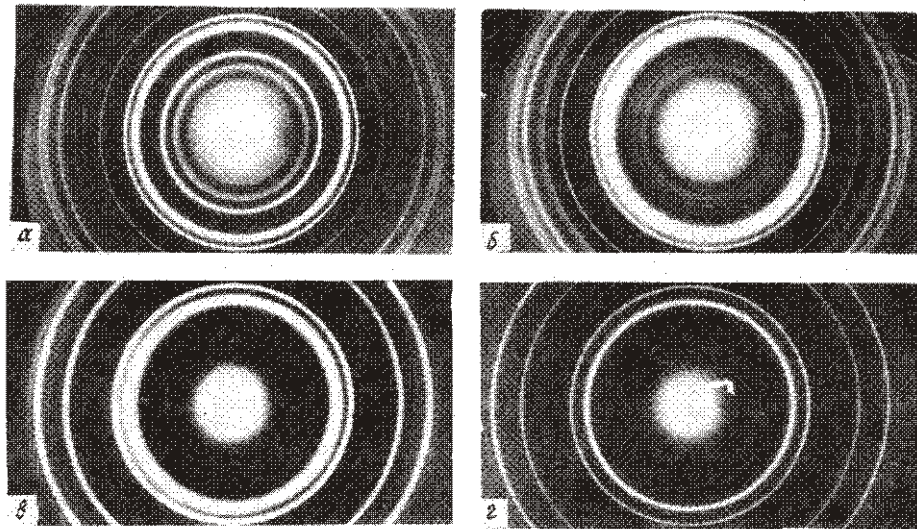


Рис. 1. Электронограммы двухслойных пленок Ni/GaAs (конденсация GaAs при 20°C) при толщине пленок никеля 30 (а), 16 (б), 10 (в) и 4 нм (г)

Результаты расчетов межплоскостных расстояний по полученным электронограммам содержатся в таблице (случай нанесения слоев GaAs и Ni при 400°C). В той же таблице приведены расчетные значения межплоскостных расстояний ряда известных фаз двойных систем Ni-As и Ni-Ga без учета законов погасания, так как для идентичных по структуре фаз тройной системы Ni-Ga-As возможно появление запрещенных рефлексов.

Если расчет электронограмм от растущих поликристаллических фаз вызывает затруднения, то образование фаз в различном структурном состоянии представляет дополнительные возможности уточнения приводимых расчетов.

При идентификации образующихся фаз использовались известные методы визуального разделения дифракционных отражений фаз с учетом расположения сплошных и прерывистых колец, рефлексов от монокристаллических составляющих (с учетом их формы), интенсивности отражений, которые определяются как структурой фаз, так и их состоянием. Учитывалось также образование двойниковых прослоек, взаимная ориентация фаз в условиях ориентационного и размерного соответствия. Для фаз переменного состава двойных систем предполагалась также возможность изменения параметров кристаллической решетки при образовании идентичных структур в тройной системе. В результате оказалось возможным выделить максимумы одинакового внешнего вида, принадлежащие одной фазе, и получить соответствующие им наборы межплоскостных расстояний.

Очень слабые рефлексы от монокристаллической составляющей (рис. 2, а), лежащие на соответствующих дугах, в силу близости отражений (330), (600), (630) фазы NiGa_4 отражений от (220), (400), (420) фазы GaAs следует, по видимому, отнести к образующей фазе с решеткой типа NiGa_4 ($t_{\text{Ni}} = 10$ нм, $t_{\text{GaAs}} = 30$ нм). Сильные дифракционные кольца принадлежат α -фазе (ГЦК-решетка на основе Ni). При отсутствии ориентирующего действия подложки (пленки GaAs) наличие фазы NiGa_4 характеризовало появление системы весьма тонких дифракционных линий, отвечающих отражениям от

плоскостей с межплоскостными расстояниями d_{hkl} , равными 2,83; 2,51; 2,41; 1,25; 1,14; 1,05 Å (отражение от плоскостей (300), (311), (422), (622), (552), (811)). Образующаяся при взаимодействии Ni и GaAs фаза Ni_5As_2 была мелкодисперсной и ее характеризовал набор размытых линий с $d_{hkl} = 2,72$; 1,89; 1,79; 1,62; 1,29; 1,25 Å (отражения от плоскостей (111), (104), (302), (303), (311), (410)).

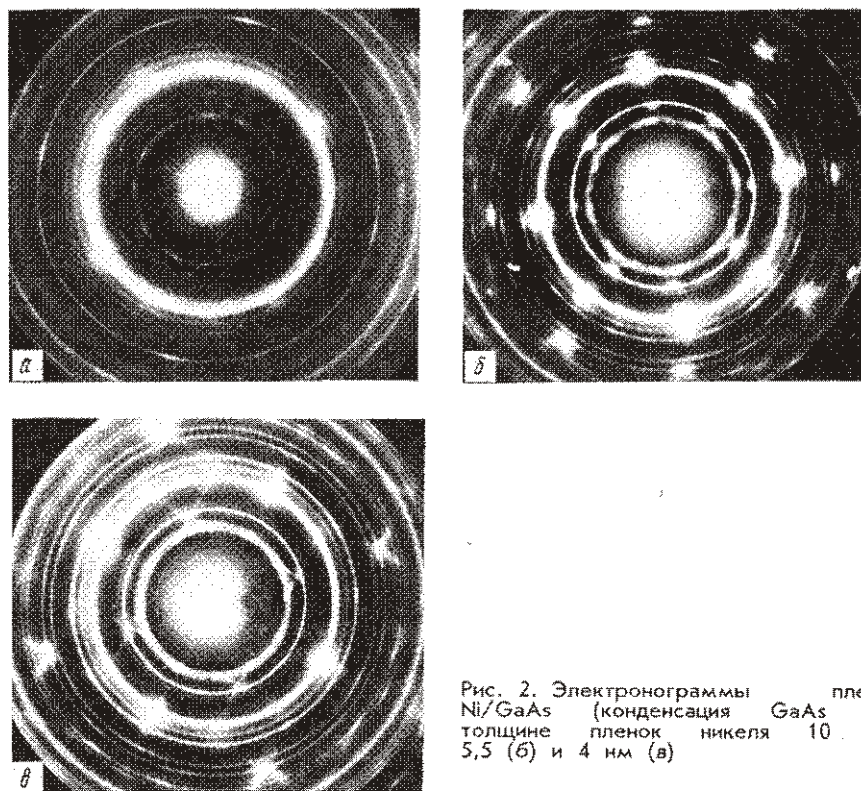


Рис. 2. Электронограммы пленок Ni/GaAs (конденсация GaAs при толщине пленок никеля 10 (а), 5,5 (б) и 4 нм (в)).

При росте кристалликов с решеткой γ -фазы Ni_3Ga_2 появлялись три яркие линии (самая яркая с $d_{hkl} = 2,02$ Å, получаемая отражением от плоскости (102)). О наличии фазы с решеткой типа NiAs можно было судить по появлению ярких сплошных линий с $d_{hkl} = 2,66$ и 1,97 Å, полученных отражением от плоскостей (101), (102). В ряде случаев наблюдается образование текстурированной фазы с решеткой $NiGa_4$, приводящей к наличию 12 утолщенных дуг на отражениях от плоскостей (211), (311), (422), (611), (552). По мере уменьшения толщины слоя Ni при контактном взаимодействии наблюдали образование смеси фаз с решетками типа α' -фазы (сверхструктуры типа Cu_3Au [3]) + $NiGa_4$ (при $t_{Ni} = 30$ нм); α' -фазы + Ni_5As_2 + $NiGa_4$ (при $t_{Ni} = 16$ нм); γ - Ni_3Ga_2 + α - $NiAs_2$ + GaAs + Ni_3Ga_4 + аморфная фаза (при $t_{Ni} = 10$ нм); NiAs + $NiGa_4$ + α - $NiAs_2$ (при $t_{Ni} = 4$ нм). При этом положения гало аморфной фазы на электронограммах (2,25–1,92 Å; 1,56–1,50 Å) отвечают наложению дифракционных линий с близкими межплоскостными расстояниями от $NiGa_4$ и кристаллического Ga.

Аналогичная картина получается в случае, когда слой GaAs наносили на монокристаллы NaCl при 20°C, затем производили нагрев до 400°C и пленку Ni

[illegible]

осаждали на нагретую пленку GaAs. При этом прослеживается переход от фаз с большей концентрацией Ni (α -фаза, Ni_3As_2 , $\gamma\text{-Ni}_3\text{Ga}_2$) к фазам с меньшей концентрацией Ni ($\alpha\text{-NiAs}_2$, Ni_3Ga_4 , NiAs) по мере уменьшения толщины пленки Ni.

Исключением является фаза NiGa_4 с максимальным содержанием Ga, которая образуется практически во всем исследованном интервале толщин контактирующих слоев Ni и GaAs. Являясь самой низкотемпературной фазой системы Ni–Ga, она при температуре конденсации может переходить в жидкое состояние. Это, возможно, является причиной частичной аморфизации для пленок с соотношением толщин $t_{\text{Ni}}:t_{\text{GaAs}} = 1:4$.

Следует отметить, что только начиная с толщин пленки Ni 16 нм электронограммы содержат дифракционные рефлексы подложки GaAs, оказывающей ориентирующее действие на растущую фазу NiGa_4 . При больших толщинах слоев Ni отражения от пленки GaAs на электронограммах не выявляются. В результате ориентирующего действия подложки GaAs наблюдаются два варианта ориентации растущей фазы NiGa_4 — при совпадении отражений (300) NiGa_4 и (200) GaAs (рис. 2, а) или когда обратная решетка NiGa_4 повернута на 45° вокруг первичного пучка и отражения (200) GaAs и (300) NiGa_4 , (220) GaAs и (330) NiGa_4 , чередуясь, образуя 8 рефлексов (рис. 2, б).

Электронно-микроскопические снимки от пленок в большинстве случаев отвечают мелкокристаллической структуре образующихся при взаимодействии фаз.

Сравнение полученных результатов с данными работы [1] указывает на отличие протекающих процессов взаимодействия в тонких пленках и массивных объектах, хотя и в том, и в другом случае одной из образующихся является фаза NiGa_4 . (Образование фаз NiAs и NiGa авторы [1] сами подвергают сомнению.) Если в тонких слоях наблюдали при определенных соотношениях толщин Ni и GaAs практически полное растворение GaAs в Ni, то в работе [1] результатом контактного взаимодействия являлось полное исчезновение дифракционных линий или гало от Ni (так как пленки Ni аморфны).

Наличие гало на электронограммах может свидетельствовать о механизме образования фаз с участием жидкой фазы [1], так как наличие гало на электронограммах подтверждает формирование на границе металл–полупроводник аморфного тонкого слоя, постулируемого авторами [7], который может играть роль "плавающей зоны" в процессе роста контактного слоя.

Таким образом, в результате электронографических исследований установлено, что в двухслойных пленках Ni/GaAs различной толщины структура и число образующихся фаз различаются в случаях, когда пленка GaAs конденсируется при 20 и 400°C . При этом слой этой пленки, сконденсированной при 400°C , оказывает ориентирующее действие на рост фаз.

1. Мейлер Б.Л. // Поверхность. — 1985. — N 4. — С. 62.
2. Хансен М.Ю., Андерко К. Структуры двойных сплавов. — М.: Металлургиздат, 1962.
3. Эллиот Р.П. Структуры двойных сплавов. — М.: Металлургия, 1970.
4. Шанк Ф.А. Структуры двойных сплавов. — М.: Металлургия, 1973.
5. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. — М.: Физматгиз, 1959.
6. Яценко С.П. Галлий. Взаимодействие с металлами. — М.: Наука, 1974.
7. Гершинский А.Е., Ржанов А.В., Черепов В.И. // Поверхность. — 1982. — N 2. — С. 1.

Получено 15.01.91 (оконч. вариант — 23.12.91)