

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ AlGaAs СТРУКТУР

В. М. Андреев, А. А. Алаев, В. Р. Ларионов,
В. Д. Румянцев, Ш. Ш. Шамухамедов

При выращивании эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ из раствора—расплава коэффициенты сегрегации Al и легирующих примесей и скорость роста существенно зависят от кристаллографической ориентации подложки [1-7]. При этом ориентационные эффекты проявляют себя по-разному при изменении условий кристаллизации — температуры роста, скорости охлаждения, состава жидкой фазы и др. По этой причине при создании приборных структур трудно использовать известные из литературы зависимости состава твердой фазы от состава расплава.

В данной работе исследования ориентационных эффектов при жидкофазной эпитаксии AlGaAs гетероструктур выполнены применительно к структурам $n^+\text{GaAs}-n\text{GaAs}-p\text{GaAs}-p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, используемым для создания на их основе солнечных фотоэлементов. В этих структурах: $n^+\text{GaAs}$ — подложка; $n\text{GaAs}$ — эпитаксиальный слой, легированный оловом или теллуром; $p\text{GaAs}$ — диффузионный слой, получаемый в процессе выращивания слоя твердого раствора $p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, легированного цинком. Было исследовано влияние ориентации подложек в плоскостях (111) А, (111) В и (100) на коэффициенты сегрегации Sn и Те при выращивании «буферного» слоя $n\text{GaAs}$, а также на состав и толщину слоя $p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, особенно в области составов

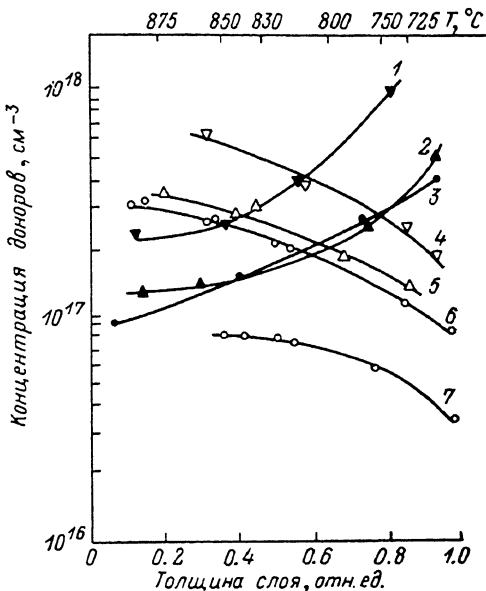


Рис. 1. Распределение концентрации носителей тока по толщине эпитаксиальных слоев $n\text{GaAs}$, легированных теллуром (1—3) и оловом (4—7) и выращенных на подложках GaAs , ориентированных в плоскостях (100) (3, 6, 7), (111) А (2, 5) и (111) В (1, 4) при концентрациях олова в расплаве 5 (1, 4—6) и 1.7 ат. % (7).

твердых растворов с $x=0.7\div 0.95$, представляющих наибольший интерес для фотопреобразователей.

Эпитаксиальные слои $n\text{GaAs}$ и $p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ выращивались из раствора—расплава ($\text{Ga}+\text{As}$ + легирующая добавка или алюминий), заключенного в зазоре, толщина которого варьировалась в диапазоне 0.3—1.5 мм с использованием техники ЖФЭ, предложенной в работе [8]. Слои $n\text{GaAs}$ кристаллизовались при снижении температуры со скоростью 1 град/мин от $T_{\text{п}}=900$ до 700 °С и со скоростью 2—3 град/мин до комнатной температуры с остановками роста и небольшим подрастворением выращенных слоев, что создавало метки на декорированных сколах полученных слоев, соответствующие температурам остановок. Толщина зазора между подложками и графитовым «сводом» при выращивании слоев $n\text{GaAs}$ составляла 1 мм. При легировании оловом концентрации примеси в жидкой фазе варьировалась в диапазоне 1.7—5 ат. %. Легирование теллуром осуществлялось путем насыщения раствора—расплава арсенидом галлия, легированным теллуром до концентрации доноров $(2\div 3)\cdot 10^{18}$ см⁻³.

Распределение концентрации электронов по толщине эпитаксиальных слоев было получено из вольт-емкостных измерений при ступенчатом травлении исследуемых слоев.

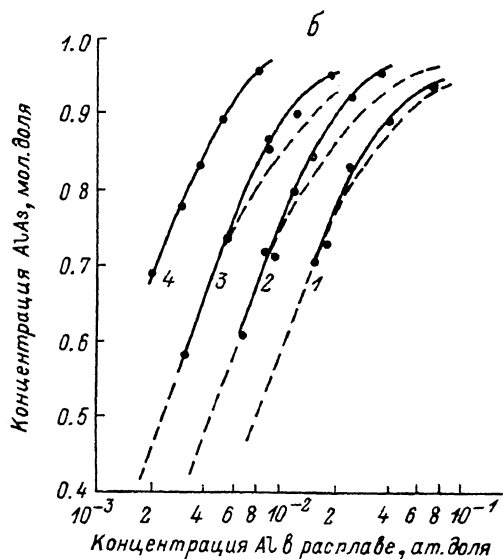
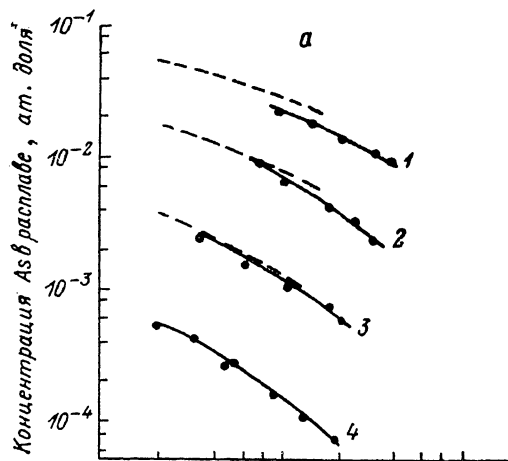
При легировании оловом, так же как и в работе [4] при уменьшении температуры кристаллизации слоев, наблюдается снижение концентрации носителей тока (рис. 1), что может быть связано с уменьшением концентрации атомов As в расплаве и облегчением встраивания атомов Sn в подрешетку As, что приводит к возрастанию концентрации акцепторов и увеличению степени компенсации N_A/N_D .

Механизм возникновения понижированного донора замещения при реакции атома теллура в жидкой фазе с вакансией мышьяка в растущем слое [5, 6] позволяет объяснить увеличение концентрации носителей в слоях, легированных теллуrom, с уменьшением температуры роста. Различие в эффективных коэффициентах распределения олова и теллура при выращивании слоев на различных ориентациях

$$K_{(111)B} > K_{(111)A} \geq K_{(100)}$$

может быть объяснено различием в степенях компенсации N_A/N_D для разных ориентаций.

При разработке методики выращивания твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.7-0.95$)



мы столкнулись с необходимостью проведения дополнительных исследований малопозученного участка диаграммы состояния, соответствующего большим концентрациям AlAs в твердой фазе при относительно низких (до 600 °C) температурах кристаллизации. Изотермы ликвидуса (рис. 2, а) получены для температур 600, 700, 800 и 900 °C при концентрации алюминия в расплаве $10^{-3}-5 \cdot 10^{-2}$ ат.%. Соответствующие зависимости состава твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.4-0.95$) от содержания Al в расплаве (рис. 2, б) получены на подложках, ориентированных в плоскости (100). Полученные нами зависимости (сплошные линии на рис. 2, б) находятся в хорошем соответствии с расчетными кривыми [9], показанными штриховыми линиями.

В соответствии с полученными изотермами ликвидуса толщина кристаллизующихся слоев твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ уменьшается с увеличением содержания AlAs (рис. 3) и уменьшением толщины зазора, составляя, например, при $T=740$ °C и толщине зазора $h=0.3$ мм: $d=0.8$ мкм при $x=0.95$ и $d=2.2$ мкм при $x=0.7$.

Значения толщин получены (рис. 3, кривые 1-7) при кристаллизации слоев

Рис. 2. Изотермы ликвидуса системы Al—Ga—As в области составов жидкой фазы, соответствующих значению параметра $x=0.4-0.95$ в $Al_xGa_{1-x}As$ (а) и зависимости состава твердой фазы от состава жидкой (б) в диапазоне температур 900 (1), 800 (2), 700 (3), 600 °C (4).

твердых растворов на подложках, ориентированных в плоскости (100) из зазора, ограниченного другой пластиной GaAs, также ориентированной в плоскости (100). Кривые 8 и 9 получены при выращивании эпитаксиальных слоев $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.9$ и 0.95) из зазора толщиной 0.3 мм на подложке, ориентированной в плоскости (111) A, тогда как поверхность буферной пластины, образующей зазор, имеет ориентацию (111) B. Ориентационные эффекты в данном случае проявляются в зависимостях коэффициента сегрегации Al (K^{Al}) от кристаллографической ориентации подложки, при этом K^{Al} увеличивается в ряду ориентаций

$$K^{Al}_{(111)A} > K^{Al}_{(100)} > K^{Al}_{(111)B}$$

Влияние ориентации подложки на коэффициенты сегрегации Al должно приводить к существенному различию толщин слоев, получаемых на двух подложках, ограничивающих

расплав, при их различной ориентации. Дополнительное влияние на разность толщин слоев в этом случае оказывает также различие скоростей роста на подложках разной ориентации, которые в свою очередь зависят от состава твердого раствора.

Воздействие обоих указанных факторов приводит к сложной зависимости отношения d_1/d_2 толщин слоев, получаемых на парах подложек разной ориентации, от состава твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ (рис. 4). Для твердых растворов с $x=0.8-0.95$ максимальное отношение d_1/d_2 , равное 2—3, имеет место для случая $d_{(111)B}/d_{(111)A}$. Зависимости от T_n толщины слоев с $x=0.9$ и 0.95, кристаллизующихся на подложке с ориентацией (111) А. при ориентации (111) В другой органичивающей расплав пластины, как уже отмечалось выше, показаны на рис. 3 соответственно кривыми 8 и 9.

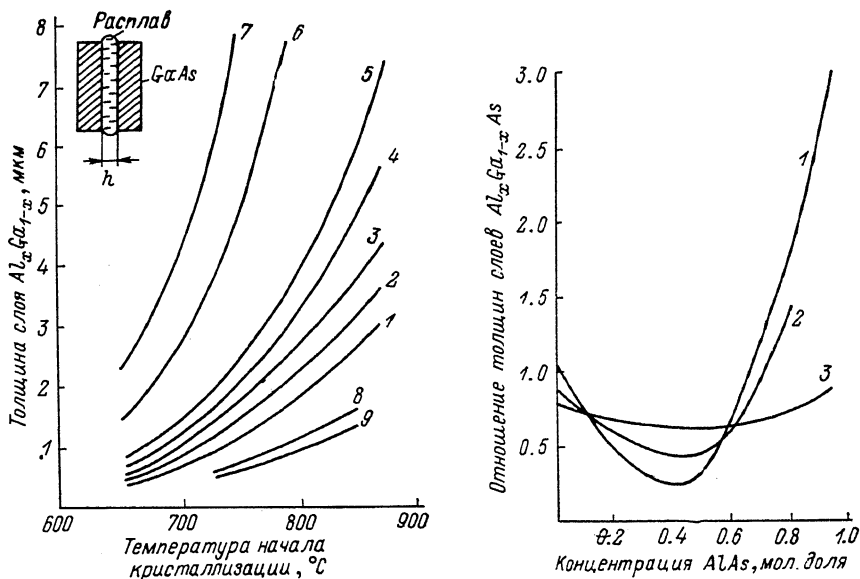


Рис. 3. Зависимость толщины эпитаксиальных слоев $Al_xGa_{1-x}As$ от температуры начала роста T_n при различных концентрациях AlAs в твердом растворе на границе с подложкой. 1, 9 — 0.95; 2, 8 — 0.9; 3 — 0.85; 4 — 0.8; 5 — 0.70; 6, 7 — 0.75 мол. доля при толщине расплава $h=300$ (1—5, 8, 9), 600 (6) и 1000 мкм (7). Ориентации подложек: (100) для 1—7 и (111) А/(111) В для 8, 9.

Рис. 4. Зависимости отношения толщин слоев, выращенных из зазоров 0.3 мм между подложками разной ориентации при $T_n=850^\circ C$.

1 — $d_{(111)B}/d_{(111)A}$, 2 — $d_{(111)B}/d_{(100)}$, 3 — $d_{(111)A}/d_{(100)}$ при различном составе твердой фазы.

Представленные на рис. 4 результаты могут быть объяснены различной величиной энергии встраивания атомов кристаллизующего вещества в решетку подложек, ориентированных в различных кристаллографических направлениях, и зависимостью этой энергии от состава жидкой фазы. В результате этого в процессе роста эпитаксиального слоя из тонкого (0.3 мм) зазора происходит перекачка кристаллизующего вещества от медленно растущей поверхности к поверхности, имеющей большую скорость роста.

Таким образом, полученные результаты позволяют использовать ориентационные эффекты для управления легированием эпитаксиальных слоев $nGaAs$, а также составом и толщиной слоев твердых растворов $AlGaAs$.

В заключение авторы благодарят С. Г. Конникова, Т. Б. Попову, Т. В. Черневу за проведение микрорентгеноспектрального анализа структур и Ж. И. Алферова за интерес и внимание к данной работе.

Литература

- [1] Andreev V. M., Egorov B. V., Syrбу A. V. et al. Kristall und Technik, 1980, v. 15, N 4, p. 379—385.
- [2] Андреев В. М., Сырбу А. В., Трофим В. Г., Яковлев В. П. ЖТФ, 1978, т. 48, № 8, с. 1760—1767.
- [3] Андреев В. М., Сырбу А. В. ЖТФ, 1978, т. 48, № 9, с. 1927—1930.
- [4] Болховитянов Ю. Б., Болховитянова Р. И., Марченко И. Е. и др. В кн.: Генерация СВЧ колебаний с использованием эффекта Ганна. Новосибирск, ИФП СО АН СССР, 1974, с. 285—290.

- [5] Casey H. C., Panish M. B., Wolfstirn K. B. J. Phys. Chem. Solids, 1971, v. 32, N 3, p. 571—580.
 [6] Casey H. C., Panish M. B. J. Cryst. Growth, 1972, v. 13/14, N 1, p. 818—822.
 [7] Коваленко В. Ф., Марончук И. Е., Мокрицкий В. А., Орех В. И. Изв. АН СССР. Неорг. материалы, 1976, т. 4, № 12, с. 623—627.
 [8] Alferov Zh. I., Andreev V. M., Konnikov S. G. et al. Kristall und Technik, 1976, v. 11, N 10, p. 1013—1020.
 [9] Кейси Х., Паниш И. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981, т. 2, с. 105.

Физико-технический институт
им. А. В. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
14 октября 1986 г.
В окончательной редакции
12 декабря 1987 г.

УДК 621.396.535.8

Журнал технической физики, т. 58, в. 9, 1988

ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЕ КОММУТАТОРЫ И ДЕФЛЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ МДП—ЖК

Г. Г. Воеводкин, Ю. Д. Думаревский, А. А. Кузнецов, С. М. Нефедов

В оптических системах передачи и обработки информации часто возникает потребность в коммутации оптических изображений или матриц и ввода их в различные участки оптической схемы. Это, как правило, осуществляется механически либо подачей напряжения на пьезокерамику. Мы исследовали возможность коммутации оптическим управлением.

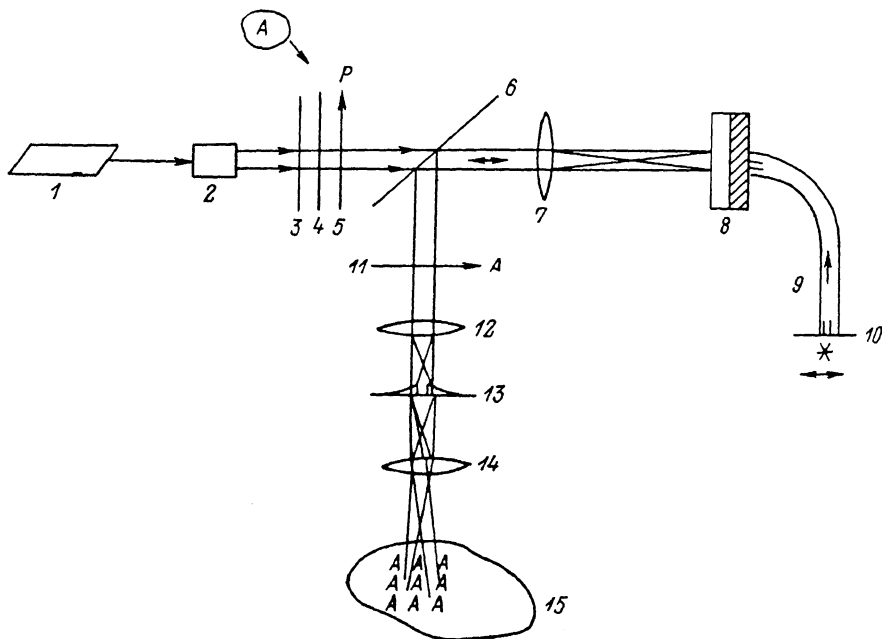


Рис. 1. Оптическая схема коммутатора на основе структуры МДП—ЖК с использованием когерентного света.

1 — He—Ne лазер ЛГ-38; 2 — коллиматор; 3 — двумерная решетка; 4 — слайд с изображением объекта; 5, 11 — поляризаторы; 6 — полупрозрачное зеркало; 7, 12, 14 — линзы; 8 — оптически управляемый транспарант; 9 — упорядоченный волоконный жгут; 10 — экран осциллографа; 13 — набор стеклянных клиньев; 15 — экран.

Принцип работы оптически управляемого транспаранта [1] основан на переориентации анизотропных молекул в слое жидких кристаллов (ЖК) при приложении напряжения, причем потенциальный рельеф может быть создан оптическим путем. В этом случае падающий на фотополупроводник свет генерирует в нем носители, пространственно модулируя тем самым его проводимость, а значит, и напряжение на ЖК. Интенсивность света, прошедшего через