

К. т. н. Н. М. ВАКИВ, к. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ,
И. Р. ЗАВЕРБНЫЙ, И. А. МРЫХИН

Украина, г. Львов, НПП “Карат”
E-mail: granat@carat.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
10.12 2001 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. И. КЛИМОВСКАЯ
(ИФПП НАНУ, г. Киев)

ДАТЧИКИ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР GaAs, ПОЛУЧЕННЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЖФЭ ИЗ РАСПЛАВОВ Bi

*Рассмотрены особенности получения эпитаксиальных структур п. и. *-GaAs—n-GaAs из Ga—Bi-растворов-расплавов и параметры датчиков Холла, изготовленных на их основе.*

В настоящее время холловские датчики являются хорошо отработанными полупроводниковыми приборами и широко используются в различных отраслях техники.

Анализ датчиков Холла ведущих мировых фирм (см. табл. 1) показал, что основными материалами для создания датчиков Холла являются GaAs, InAs, InSb. Арсенид галлия имеет ряд преимуществ перед остальными, что обусловлено его высокой граничной рабочей температурой, а также хорошо отработанной технологией получения высококачественных полуизолирующих подложек.

Датчики Холла (ДХ) изготавливаются на основе тонких пластин объемного полупроводникового материала, эпитаксиальных структур, а также ионно-имплантированных структур. Из сравнения значений входного ($R_{вх}$) и выходного ($R_{вых}$) сопротивлений следует, что большинство холловских датчиков обладают несимметричным чувствительным элементом. Для высокочувствительных датчиков характерным является большой разброс нормированной магнитной чувствительности (в пределах 15—50%). Наиболее разнообразная номенклатура датчиков изготавливается на основе ионно-имплантированных структур. Эти датчики характеризуются, как правило, наибольшей чувствительностью, однако значения температурных коэффициентов холловского напряжения (U_x) и остаточного напряжения (U_0) почти в два раза больше, чем в датчиках Холла, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев.

Особенностью высокочувствительных датчиков Холла является большое значение $R_{вх}$. Поэтому в аппаратуре, где лимитируется потребляемая мощность, необходимо искать компромисс между энергопотреблением датчика и электронной схемы. В таких случаях целесообразно использовать датчики Холла с малым значением входного сопротивления и, соответственно, невысокой чувствительностью. Применение датчиков Холла с большим значением U_0 и температурного коэффициента остаточного напряжения влекут за собой необходимость использования более сложной электрической схемы, что,

* п. и. — полуизолирующий.

соответственно, увеличивает стоимость прибора и его энергопотребление. Поэтому, несмотря на довольно разнообразную номенклатуру ДХ, в данное время существует потребность в датчиках Холла, которые бы характеризовались низкими температурными коэффициентами U_x и U_0 , высокой чувствительностью, а также небольшой стоимостью.

Типовая эпитаксиальная структура, пригодная для изготовления высокочувствительных ДХ, должна иметь толщину активного слоя меньше 1 мкм и концентрацию электронов на уровне $5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Структуры с такими параметрами можно получить методами газовой эпитаксии (ГФЭ), МОС-гидридной, молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), а также низкотемпературной жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ) [1].

В данной работе рассматриваются особенности получения эпитаксиальных структур для датчиков Холла методом низкотемпературной “висмутовой” ЖФЭ. Использование традиционного растворителя на основе галлия обеспечивает скорости кристаллизации 100—200 нм/с [2]. Для воспроизводимого получения слоев толщиной 0,1 мкм методом ЖФЭ эта скорость должна быть на порядок меньшей. Особенности фазовых равновесий в системе Ga—Bi—As, а именно, S-подобный ход кривой ликвидуса [3], предоставляют прекрасную возможность существенно уменьшить скорости кристаллизации слоев GaAs при температурах роста 500—700°C.

Низкая растворимость мышьяка в висмутовых и Ga—Bi-растворах-расплавах с большим содержанием висмута требует использования переохлажденных расплавов, причем с уменьшением растворимости мышьяка величина допустимого переохлаждения расплава возрастает. Для наращивания слоев GaAs из Ga—Bi-растворов-расплавов нами был выбран метод резкого охлаждения, обеспечивающий получение более гладких слоев, а также границ раздела между слоями.

На рис. 1 приведены рассчитанные по формуле (1) [4, с. 132] и экспериментально определенные зависимости толщины слоев GaAs от концентрации висмута в расплаве галлия для разных температур кристаллизации.

$$d = \frac{1}{C_{As}^S m} \left(\frac{D}{\pi} \right)^{0,5} \left(2\Delta T t^{0,5} + \frac{4}{3} v t^{1,5} \right) \quad (1)$$

Параметры наиболее типичных датчиков Холла ведущих фирм

Способ получения активного слоя	Код сенсора	Номинальный ток, мА	Нормированная магнитная чувствительность, В/А·Т	Минимальное входное сопротивление, Ом	Минимальное выходное сопротивление, Ом	Максимальное нормированное остаточное напряжение, U_0 , мВ/мА	Температурный коэффициент напряжения, U_x , %/К	Температурный коэффициент остаточного напряжения, мкВ/К	Стоимость, \$
Эпитаксия	HHP-SP ¹	5	10	150	150	0,04	—	—	—
	HHP-SA ¹	5	10	150	150	0,04	—	—	—
	KSY44 ²	7	150–265	600	1000	2,1	0,03	-0,3	—
	ПХИ312 ³	—	400	5000	5000	—	0,5	50	—
	ПХИ611 ³	—	1000	700	700	—	< -2	< ±200	—
Ионная имплантация	KSY46 ²	7	150–265	600	1000	2,1	0,03	-0,3	—
	GH-601 ⁴	5	100–280	450	580	3,2	-0,07	1	9,0
	KSY10 ⁵	5	170–230	900	900	5,0	-0,05	—	—
	KSY13 ⁵	5	190–290	900	900	6,0	-0,05	—	—
	GH-600 ⁴	5	100–280	450	580	3,2	-0,07	1	9,0
	GH-700 ⁴	5	100–280	450	—	2,8	-0,07	1	5,0
	GH-800 ⁴	5	190–260	600	600	4,0	-0,07	40	7,0
	HGA-2010 ⁶	1	110–280	450	—	2,8	-0,06	1	—
Объемный материал	KSY16 ⁷	5	190–260	900	900	4,0	-0,07	—	—
	MULTY-1 ¹	10	5	400	300	0,03	-0,03	0,1	0,6
	MULTY-7 ¹	20	2,5	350	150	0,015	-0,01	0,1	0,7

¹ Агерос, Словакия [Агерос]; ² Siemens/ Infin./Tec., Германия [www.infineon.com]; ³ Россия (С.-Петербург) [Информ. лист. №№ 87-0482, 91-0]; ⁴ F.W.Bell, США [www.fwbell.com; F.W.Bell "Hall generators", p. 11]; ⁵ Siemens/ Infin./Tec., Германия [Siemens "Magnetic Sensor" Data Book, p. 137, 140]; ⁶ Lake Shore, США [Lake Shore Cr.]; ⁷ Infineon Tec., Германия [www.infineon.com]

где C_{As}^S — концентрация мышьяка в твердой фазе;
 m — наклон кривой ликвидуса;
 D — коэффициент диффузии мышьяка,
 $D=5 \cdot 10^{-6}$ см²/с;
 ΔT — величина пересыщения раствора-расплава,
 $\Delta T=25^\circ\text{C}$;
 v — скорость охлаждения, $v=1^\circ\text{C}/\text{мин}$;
 t — время, с.

Толщина ростового зазора, принятая для расчета, равна 1мм.

Как видно из рис. 1, кривые характеризуются S-подобным ходом. Минимальные толщины слоев можно получить при концентрациях висмута в расплаве 60–80 ат.%, причем толщины слоев GaAs, полученных из Ga–Bi-рас-

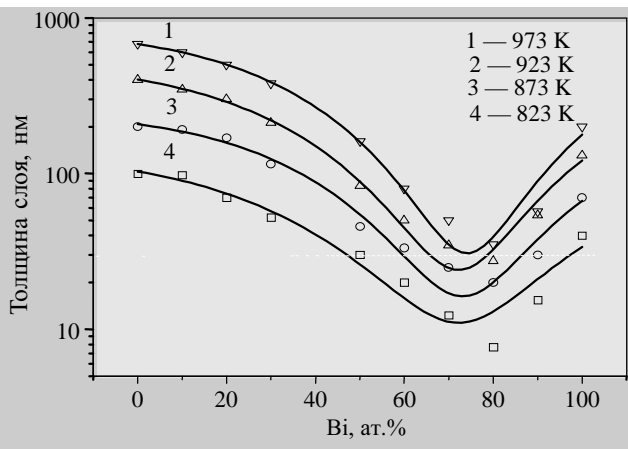


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и расчетные зависимости толщин слоев GaAs от концентрации висмута в Ga–Bi-растворе-расплаве

плавов (70 ат.%) при температурах кристаллизации 973 К, почти в 25 раз меньше, чем толщины слоев, полученных из галлиевых расплавов. Однако наблюдаемое аномальное снижение скорости кристаллизации слоев GaAs в системе Ga–Bi–GaAs, к сожалению, не может найти широкого практического применения из-за значительного ухудшения электрофизических характеристик эпитаксиальных слоев.

Проведенные нами исследования зависимости концентрации основных носителей и их подвижности в слоях, полученных из Ga–Bi-растворов-расплавов различного состава, приведены на рис. 2. В интервале концентраций висмута в расплаве от 20 до 80 ат.% концентрация электронов (n) возрастает и достигает максимального значения, а подвижность (μ) снижается до 2500 см²/В·с, и только при 97 ат.% висмута концентрация электронов резко уменьшается, а подвижность достигает максимального значения, которое даже выше, чем в слоях, полученных из галлиевых расплавов.

Рассмотрим один из возможных механизмов, объясняющий такое поведение электрофизических свойств GaAs, выращенного из Ga–Bi-растворов-расплавов. Известно, что основными фоновыми примесями в GaAs являются кремний и углерод. Углерод проявляет ярко выраженные акцепторные свойства, и его концентрация в слоях не зависит от состава Ga–Bi-растворов-расплавов [5]. Значительно сложнее поведение кремния, который при низких температурах и малых концентрациях занимает узлы атомов галлия, проявляя при этом донорные свойства [6, с. 147]. При выращивании слоев GaAs из галлиевых расплавов концентрация вакансий галлия ($N_{V_{Ga}}$) в них значительно меньше концентрации вакансий мышьяка ($N_{V_{As}}$). Увеличение концентрации висмута

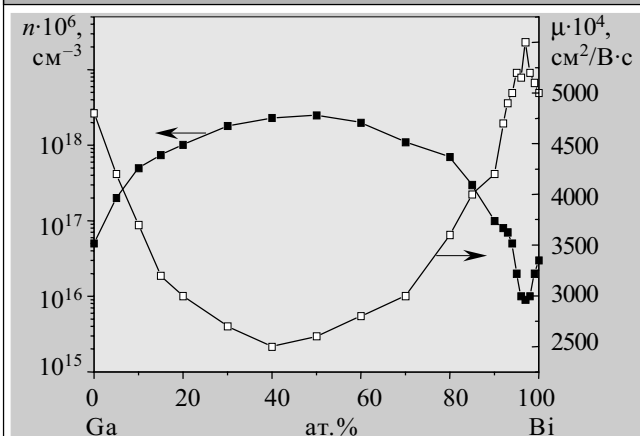


Рис. 2. Зависимость концентрации и подвижности электронов в слоях GaAs от концентрации Bi в Ga—Bi-растворе-расплаве (300 K)

в расплаве повышает стехиометрию расплава (соотношение количества атомов Ga и As), следствием чего является выравнивание концентрации N_{VGa} и N_{VAs} в слоях, а для висмутового расплава должно выполняться соотношение $N_{VGa} = N_{VAs}$. Увеличение концентрации вакансий галлия должно приводить к преимущественному вхождению кремния в подрешетку галлия. Центры такого типа являются донорными, чем и обусловлено резкое увеличение концентрации электронов в эпитаксиальных слоях GaAs при добавлении висмута в раствор-расплав галлия.

Наблюдаемое при более 60 ат.% Bi в расплаве Ga снижение концентрации электронов и повышение их подвижности можно объяснить значительным уменьшением растворимости фонового кремния в расплавах висмута [5]. Кроме того, на снижение концентрации электронов при более 60 ат.% Bi в Ga может оказывать процесс образования сложных комплексов с участием висмута. Связывание вакансий галлия происходит вследствие того, что изовалентная примесь (висмут), имея большой тетраэдрический радиус, взаимодействует с V_{Ga} и образует комплекс, который не является электрически активным. Уменьшение общего количества свободных вакансий галлия приводит к снижению вероятности закрепления кремния в подрешетке галлия и снижению соответственно концентрации электронов в слоях GaAs.

Таким образом, с приборной точки зрения наибольший интерес представляет висмутовый угол диаграммы состояния Ga—Bi—GaAs. Практическое применение могут найти Ga—Bi-растворы-расплавы, содержащие 95—100 ат.% висмута. Минимальные толщины слоев, полученных из этих расплавов при температуре 873 K, составляют 60—70 нм.

На основе полученных экспериментальных данных определена зависимость скорости кристаллизации слоев из Ga—Bi-растворов-расплавов (97 ат.%) от времени кристаллизации (рис. 3). Из сравнения кривых 1 и 3 следует, что при времени кристаллизации слоев GaAs 10 секунд скорость кристаллизации слоев составляет 5 нм/с. Эта величина на один порядок меньше скорости кристаллизации слоев из галлиевых расплавов при тех же температурах кристаллизации. При жидкофазной эпитаксии минимальное время наращивания слоя определяется временем за-

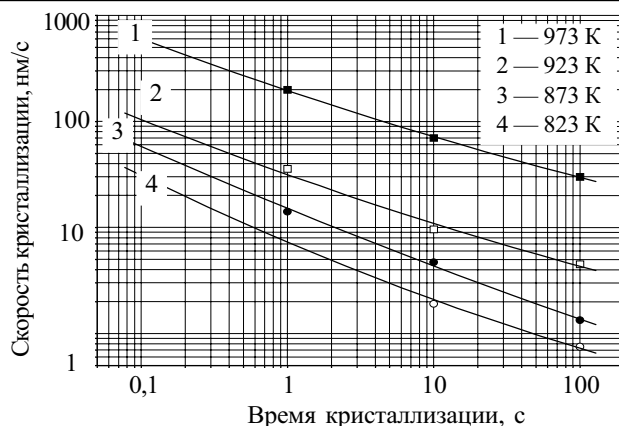


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости скорости кристаллизации слоев GaAs, полученных из Ga—Bi, от времени: 1 — 0 ат.% Bi; 2, 3, 4 — 97 ат.% Bi

мены растворов-расплавов, которое для наиболее распространенных типов поршневых контейнеров составляет 5—10 с. Поэтому, как видно из рис. 3, скорость кристаллизации из висмутовых расплавов при температуре 823 K может составлять 4—5 нм/с, что вполне достаточно для воспроизводимого наращивания слоев толщиной 0,01—0,1 мкм.

Однородность слоев и их структурное совершенство определяются методом получения и технологическими параметрами процесса. При кристаллизации слоев газофазными методами однородная газовая смесь реагентов пропускается над нагретой полупроводниковой подложкой. Динамика газового потока приводит к образованию приграничного слоя возле поверхности подложки. Между этим приповерхностным слоем и остальным объемом газовой фазы в реакторе существует градиент концентрации, который определяет степень равновесности процессов кристаллизации. Аналогичный градиент существует и при ЖФЭ между приповерхностным слоем раствора-расплава и остальным объемом жидкой фазы, однако его величина значительно меньше, чем в газофазных методах. Отмеченные выше особенности и определяют более высокое структурное совершенство слоев, полученных ЖФЭ. С этой точки зрения интересным является определение влияния висмутовых растворителей на однородность слоев GaAs, полученных низкотемпературной ЖФЭ.

Для сравнения эпитаксиальных структур, изготовленных газофазными методами и ЖФЭ, нами были получены из галлиевых и Ga—Bi-растворов-расплавов эпитаксиальные структуры п.и.-GaAs—*n*-GaAs с концентрацией электронов $(1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной слоев *n*-GaAs, равной 0,9—1,0 мкм. Исследовались также эпитаксиальные структуры, полученные ГФЭ и МОС-гидридной эпитаксией с аналогичными параметрами. На основе этих структур были изготовлены чувствительные элементы датчиков Холла (ЧЭДХ). Как параметр, определяющий однородность структуры по толщине и концентрации, мы выбрали входное сопротивление ЧЭДХ. Эпитаксиальные структуры (ЭС) не разделялись на отдельные кристаллы, а электрическая развязка между отдельными чувствительными элементами на структуре обеспе-

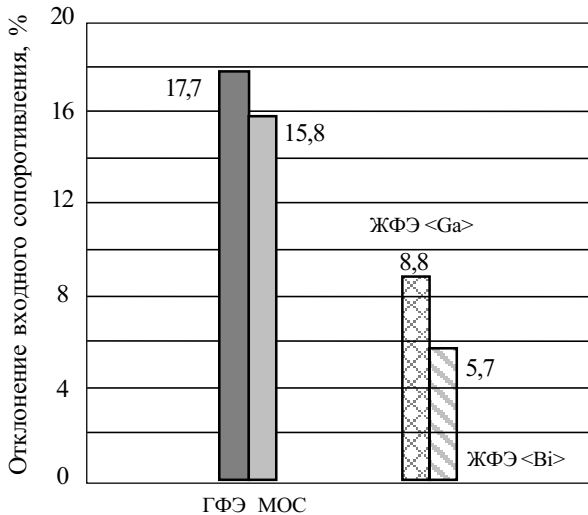


Рис. 4. Отклонение $R_{вх}$ от среднего значения для структур, полученных различными методами

чивалась мезаструктурами, что давало возможность оценить равномерность распределения $R_{вх}$ чувствительных элементов по площади структуры.

Степень однородности эпитаксиальных структур характеризует отклонение значения $R_{вх}$ от среднего значения. Как видно из диаграммы, приведенной на рис. 4, отклонение входного сопротивления ЧЭДХ, изготовленных на основе ЭС, полученных методом ЖФЭ<Ga—Bi>, в два раза меньше, чем в ЧЭДХ, изготовленных на ЭС, выращенных ГФЭ и МОС-гидридной эпитаксией. Это свидетельствует об их высокой однородности как по толщине, так и по концентрации носителей, а также о хорошем структурном совершенстве. Более высокой однородностью характеризуются также эпитаксиальные слои *n*-GaAs, полученные из висмутовых расплавов, по сравнению со слоями, выращенными из галлиевых расплавов.

Технология «висмутовой» ЖФЭ обеспечивает воспроизводимое изготовление структур п.и.-GaAs—*n*-GaAs диаметром 40 мм. Толщина эпитаксиального слоя *n*-GaAs может составлять 0,01 мкм, а концентрация электронов изменяться в пределах от 10^{16} до 10^{19} см⁻³. Таким образом, эпитаксиальные структуры п.и.-GaAs—*n*-GaAs представляют определенный интерес с точки зрения повышения выхода годных и уменьшения стоимости ДХ.

На основе этих структур авторами работы изготовлены датчики Холла. Их основные параметры при-

ведены в табл. 2. Особенностью датчиков являются сравнительно низкие значения температурных коэффициентов холловского напряжения (U_x) и остаточного напряжения (U_0) по сравнению с датчиками, изготовленными на основе ионно-имплантированных структур (табл. 1).

Технология висмутовой ЖФЭ слоев GaAs может представлять определенный интерес с точки зрения повышения их радиационной стойкости вследствие изовалентного легирования. На это, в частности, указывают полученные авторами [7] результаты исследований скорости удаления носителей в GaAs, легированном индием.

Таким образом, с использованием низкотемпературной «висмутовой» ЖФЭ получены эпитаксиальные структуры п.и.-GaAs—*n*-GaAs:Sn с толщиной слоев *n*-GaAs в пределах 0,1—1,0 мкм. На основе этих структур изготовлены датчики Холла, имеющие низкие температурные коэффициенты холловского и остаточного напряжения, а также высокую чувствительность. В то же время большинство датчиков Холла, выпускаемых ведущими фирмами, имеют достаточно высокие значения температурных коэффициентов U_x и U_0 , что обусловлено технологией изготовления структур для датчиков.

Сравнение однородности эпитаксиальных структур, изготовленных методами ГФЭ, МОС-гидридной эпитаксией и ЖФЭ, показало, что наиболее однородными по толщине и концентрации являются структуры, выращенные низкотемпературной «висмутовой» ЖФЭ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Алферов Ж. И., Андреев В. М., Конников С. Г. и др. Жидкофазные AlGaAs-структуры с квантово-размерными слоями толщиной до 20 Å // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14, вып. 2. – С. 171–176.
- Ларионов В. Р., Минтаиров А. М., Смекалин К. Е. и др. Кристаллизация и легирование квантово-размерных AlGaAs-слоев // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по физическим процессам в полупроводниковых гетероструктурах.— Калуга. – 1990. – Т. 2. – С. 25–26.
- Якушева Н. А., Чикичев С. И. Растворимость арсенида галлия в висмут-галлиевых расплавах // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1987. – Т. 23, № 10. – С. 1607–1609.
- Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Т. 2.— М.: Мир, 1981.
- Куницын А. Е., Новиков С. В., Чалдышев В. В. и др. Анализ спектров фотолюминесценции слоев GaAs, выращенных из Ga—Bi растворов-расплавов // ФТП.— 1995.— Т. 29, вып. 11.— С. 2088—2091.
- Шишияну Ф. С. Диффузия и деградация в полупроводниковых материалах и приборах.— Кишинев: Штиинца, 1978.
- Брудный В. Н., Будницкий Д. Л., Колин Н. Г. и др. Влияние электронного облучения на электрофизические свойства и фотолюминесценцию ядерно-легированного арсенида галлия // Изв. вузов. Физика.— 1991.— № 4.— С. 45—51.

Таблица 2

Параметры датчиков Холла на основе полученных структур

Код сенсора	Номинальный ток, мА	Минимальная нормируемая магнитная чувствительность, В/А·Т	Минимальное входное сопротивление, Ом	U_x , %/К	Температурный коэффициент U_0 , мкВ/К
ΔХВ-03	10	35	250	0,008	0,1
ΔХВ-05	10	110	520	0,01	0,1
ΔХВ-08	10	150	680	0,02	0,2