

06;12

Структурные и электрические характеристики эпитаксиальных InP слоев на пористых подложках и параметры Au–Ti барьеров Шоттки к ним

© И.Н. Арсентьев, М.В. Байдакова, А.В. Бобыль, Л.С. Вавилова,
С.Г. Конников, В.П. Улин, Н.С. Болтовец, Р.В. Конакова,
В.В. Миленин, Д.И. Войциховский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: bobyly@theory.ioffe.rssi.ru
Государственный научно-исследовательский институт „Орион“, Киев,
Украина
E-mail: bms@i.kiev.ua
Институт физики полупроводников НАНУ, Киев, Украина
E-mail: konakova@eee.semicond.kiev.ua

Поступило в Редакцию 14 января 2002 г.

На InP (100) пористых и монокристаллических (контрольных) подложках методом жидкофазной эпитаксии выращивались три InP эпитаксиальных слоя: буферный n^{++} , активный n и контактный n^+ . На высокое качество активного n -слоя на пористой подложке по сравнению с таким же на контрольной указывают: величины полуширин рентгенодифракционных рефлексов (311), концентрации дислокаций и подвижности электронов: $54''$, $5 \cdot (10^2 - 10^3) \text{ cm}^{-2}$, $4000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ и $76''$, $5 \cdot (10^4 - 10^5) \text{ cm}^{-2}$, $3000 - 3500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ соответственно. Изготовлены и исследованы Au–Ti диоды Шоттки с рабочей площадью мезаструктуры $\sim 1.8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$. Оказалось, что диоды на пористых подложках по сравнению с контрольными имели значительно меньшие величины токов утечек и большие значения пробивных напряжений: 1 nA, 27 V и 200 nA, 15 V соответственно.

Использование тонкопленочных гомо- и гетероэпитаксиальных структур на основе соединений A^3B^5 в полупроводниковых приборах различных типов предъявляет повышенные требования к их структурному совершенству и стабильности. Эти требования наиболее суще-

ственны для материалов, используемых при создании СВЧ-приборов: диодов с барьером Шоттки, диодов Ганна, полевых транзисторов [1], что делает весьма актуальным разработку новых методов получения высококачественных эпитаксиальных структур. Одним из таких методов является использование „мягких“ пористых подложек, которые позволяют существенно снизить внутренние механические напряжения в эпитаксиальных слоях [2] и повысить структурное совершенство различных гетероструктур, и в частности гетероструктур A^3B^5 [3,4].

Для характеристики эпитаксиальных слоев в качестве основной методики обычно используются люминесцентные исследования. Ранее нами были проведены такого рода исследования GaN [3] и InGaAs [4] слоев, полученных методами молекулярно-пучковой и жидкофазной эпитаксии соответственно на пористых GaAs подложках. Однако практически не изучены электрофизические свойства таких слоев, а также свойства структур металл–слой. Не проводилось детального сопоставления параметров слоев, получаемых на пористых и контрольных монокристаллических („жестких“) подложках при соблюдении идентичности условий выращивания и всей совокупности последующих технологических операций изготовления контактов.

В данной работе проведены структурные и электрофизические исследования InP гомоэпитаксиальных структур, состоящих из трех слоев (буферный n^{++} , активный n и контактный n^+) и полученных на InP (100) пористых и контрольных подложках методом жидкофазной эпитаксии. Эта комбинация слоев выбрана в связи с тем, что она обычно используется в приборных структурах с барьером Шоттки и других структурах для СВЧ-диодов и транзисторов [1,5]. Гомоэпитаксиальный тип структуры и жидкофазный вариант технологии ее выращивания были выбраны на основании следующих соображений.

1. В настоящее время хотя и проводятся интенсивные исследования гетероэпитаксии InP слоев на различных пористых подложках [6,7], однако не лишена актуальности задача повышения качества гомоэпитаксиальных слоев. Наличие даже незначительных решеток микродеформаций ($\sim 10^{-3}$) в рабочих слоях приводит к их быстрой деградации, появлению дефектов, значительно увеличивающих токи утечек [1], фликер-шумы [8] и повышающих концентрации центров безызлучательной рекомбинации [9]. В итоге падает процент выхода годных приборов на их основе.

2. Жидкофазная эпитаксия, хотя и имеет явные недостатки, в частности допускает первичное подтравливание поверхности подложек, однако в настоящее время является наиболее рентабельной и более оперативной при проведении серии технологических экспериментов [10]. Ниже параметры диодов Шоттки, полученные в данной работе, будут сопоставлены с аналогичными параметрами контрольных диодов, изготовленных с использованием газофазных промышленных структур на жесткой подложке (образец № 1).

Эпитаксиальные 3-слойные пленки InP выращивались методом жидкофазной эпитаксии на специально подготовленных подложках фосфида индия (100) размером 10×15 mm, легированных оловом с концентрацией $n^{+++} = 1 \div 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Прослойки пористого материала ($9\text{--}12 \mu\text{m}$) получали электрохимическим травлением в хлоридных и бромидных водных растворах. Эпитаксия проводилась из раствора-расплава InP–In при температурах начала кристаллизации 655°C . Была проведена оптимизация режимов эпитаксиального роста, в частности времени отжига подложки перед ее контактом с жидкой фазой для удаления продуктов реакции порообразования. Для подавления процессов первичного подтравливания подложек и проникновения жидкой фазы в объем пористого материала первоначально насыщенный расплав переохлаждался на 10°C перед его контактом с подложкой [10].

Для сравнения выращивались и исследовались трехслойные пленки InP на обычных „жестких“ подложках. Параметры эпитаксиальных структур приведены в табл. 1. Барьеры Шоттки формировались титановой металлизацией с последующим золочением и представляли собой прямые мезаструктуры с рабочей площадью $\sim 1.8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$. Омические контакты были изготовлены на основе золотогерманиевой эвтектики.

Исследовались структурные параметры образцов рентгенодифракционным методом и сканирующей электронной микроскопией в отраженных электронах. Холловская подвижность носителей заряда и вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов с барьером Шоттки измерялись непосредственно на пластине. На рис. 1 приведены фотографии скола двух образцов. Видно, что эпитаксиальный слой на пористой подложке имеет однородную морфологию поверхности скола. Это может указывать на отсутствие (или низкую плотность) блочных малоугловых границ, которые вызывают механические напряжения и являются источниками конкурирующих плоскостей скола, наблюдаемых

Таблица 1. Параметры слоев InP, выращенных на „жестких“ и пористых подложках n^{+++} -InP

Номер образца	Тип структуры	Параметры структуры									
		n^{+++} , cm^{-3}	$d_{n^{+++}}$, μm	n^{++} , cm^{-3}	$d_{n^{++}}$, μm	n , cm^{-3}	d_n , μm	n^+ , cm^{-3}	d_{n^+} , μm	μ_n , $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1}$	N_d , cm^{-2}
№ 18	n^{+++} - n - n^+ , „жесткая“ подложка	$1 \div 2 \cdot 10^{18}$	300		1	$1 \div 3 \cdot 10^{16}$	$1.5 \div 2$	$1 \div 3 \cdot 10^{18}$	$0.1 \div 0.12$	3000– –3500	$5 \cdot 10^4 - 10^5$
№19	n^{+++} - n^+ - n - n^{+++} , пористая подложка	$1 \cdot 10^{18}$	300	$2 \cdot 10^{17}$	1	$1 \div 3 \cdot 10^{16}$	$2 \div 2.5$		$0. \div 0.12$ 1	4000	$5 \cdot 10^2 - 10^3$

Здесь μ_n — подвижность электронов в n -слое InP, N_d — плотность дислокаций в n -слое InP.

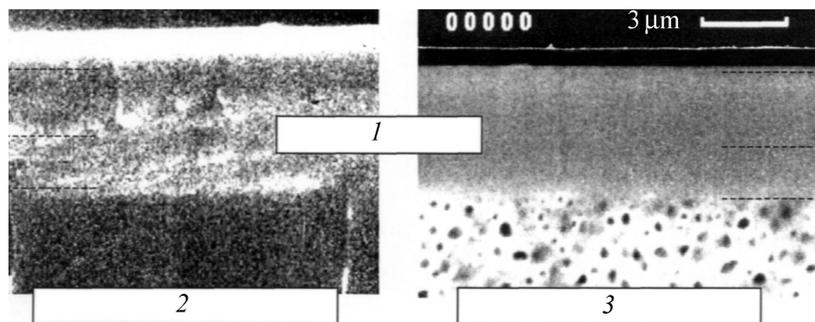


Рис. 1. Эпитаксиальные 3-слойные (1) сколы на „жесткой“ (2) [обр. № 18] и пористой (3) [обр. № 19] InP-подложках. Фотографии сделаны на электронном микроскопе в режиме отраженных электронов и максимального контраста. Пунктир — приблизительное положение внутренних границ InP слоев.

при скалывании слоев, выращенных на жесткой подложке. Видно также, что в использованных режимах эпитаксии расплав не проникает в область пористого InP.

Структурное совершенство образцов оценивалось по данным рентгено-дифракционных измерений. Двухкристальные дифракционные кривые в $(\theta, 2\theta)$ геометрии вблизи InP(004)- и InP(311)-отражений были получены с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), монохроматизированного Ge(001)-кристаллом. На рис. 2 приведены дифракционные кривые исходной пористой подложки до эпитаксии и двух образцов № 18 и 19 с эпитаксиальными слоями. Видно, что в симметричной геометрии вблизи InP(004)-отражения дифракционная картина для пористой подложки представляет собой узкий максимум (с полушириной $\text{FWHM} \sim 20''$), который расположен на широкой диффузной подставке, обусловленной рассеянием излучения в пористом материале (рис. 2, *a*). После наращивания слоя максимумы для образцов как на обычной (рис. 2, *b*), так и на пористой (рис. 2, *c*) подложках уширяются и их полуширины составляют $\text{FWHM} \sim 25''$ и $31''$ соответственно. При этом диффузная подставка для образца на пористой подложке интенсивнее, чем для обычного образца. Эффект уширения обусловлен тем, что дифракционные кривые вблизи InP(004)-отражения для образцов, выращенных на пористых подложках, представляют собой

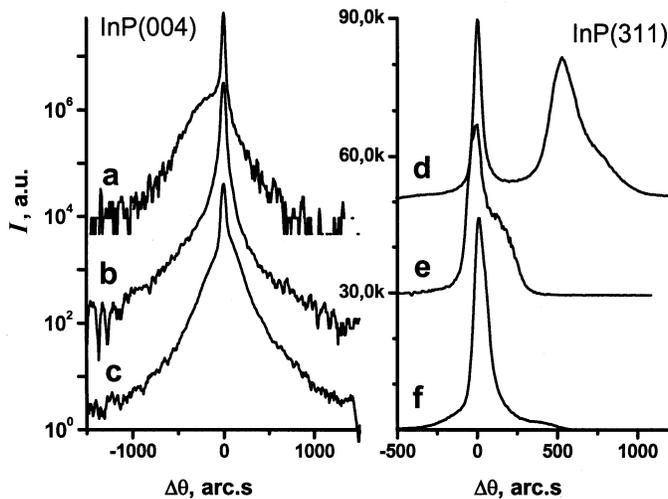


Рис. 2. Дифракционные кривые исходной пористой подложки до эпитаксии (*a, d*) и двух образцов № 18 (*b, e*) и № 19 (*c, f*) с эпитаксиальными слоями на „жесткой“ и пористой подложках соответственно вблизи InP (004)-отражения (*a, b, c*) и InP (311)-отражения (*d, e, f*).

суперпозицию когерентных компонент дифрагированного излучения: 1) монокристаллической части InP-подложки, 2) эпитаксиального InP слоя и 3) диффузной компоненты пористой части InP подложки, разупорядоченной порами.

Для разделения дифракции от этих трех компонент снимались кривые вблизи InP(311)-отражения, которые приведены на рис. 2, *d-f*. Видно, что для дифракции от пористой подложки (рис. 2, *d*) наблюдается два максимума: с FWHM $\sim 54''$ — от тонкой (< 100 nm) приповерхностной области пористой подложки InP и с FWHM $\sim 300''$ — от ее объемной части с развитой системой ветвящихся пор. Расстояние между максимумами составляет $540''$, что соответствует рассогласованию параметром этих слоев $\Delta a/a \sim 5 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 2, *e, f* приведены картины дифракции от образцов, выращенных на обычной и на пористой подложках. На рис. 2, *e* видно, что для образца № 18 кривая дифракции состоит из максимумов: от рабочего слоя и узкого контактного слоя. Образец № 19, выра-

Таблица 2. Параметры диодных структур с барьером Шоттки на основе слоев InP (I_1 — обратный ток)

Номер образца	Тип структуры	ϕ_b , eV	n	I_1 , nA (при $V = 4$ V)	V_B , V
№ 18	$n^{+++}-n-n^+-Ti-Au$ „жесткая“ подложка	0.46	1.27	200	15
№ 1	$n^{+++}-n^{++}-n-Ti-Au$ „жесткая“ подложка (промышленная, газофазная)	0.55	1.17	20	20
№ 19	$n^{+++}-n^{++}-n-Ti-Au$ пористая подложка	0.54	1.09	1	27

щенный на пористой подложке, имеет другое соотношение толщин буферного, рабочего и контактного слоев, поэтому на кривой хорошо различим только один максимум. Оценив полуширины максимумов, можно сделать вывод, что структурное совершенство рабочего слоя для образца на пористой подложке существенно выше, чем для образца на „жесткой“ стандартной подложке: полуширина максимума для образца № 19 составляет 54'', тогда как для образца № 18 — 76''. При этом полуширина от тонкого сильнолегированного поверхностного слоя в обоих случаях одинакова — порядка 250''. Следует отметить, что на фотографиях скола видно, что на поверхности пористого образца образуется переходный структурно-совершенный слой InP. Мы полагаем, что именно этот слой отвечает за узкий максимум на рис. 2, *d* и хорошие структурные характеристики именно этого слоя определяют высокое качество следующего рабочего InP слоя и уникальные параметры диодов Шоттки.

Из табл. 1 видно, что слои InP толщиной $1.5 \div 2 \mu\text{m}$, с концентрацией доноров $1 \div 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, выращенные на пористых подложках с буфером толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$ и концентрацией доноров $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, являются более совершенными, чем аналогичные на пористых подложках без буфера, и обладают более высокой подвижностью электронов. Слои без буфера на пористых подложках в силу особенностей легирования диспропорцием растут по островковому механизму и более дефектны.

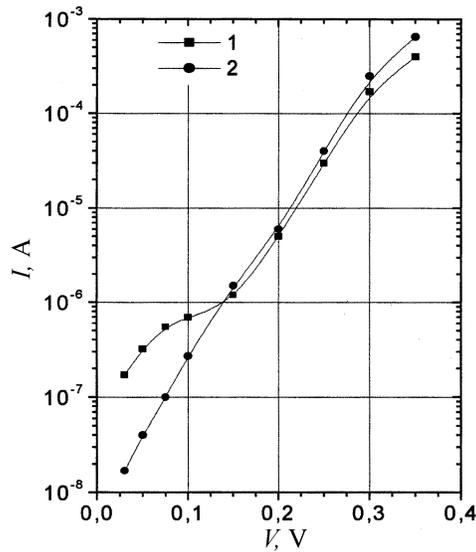


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика диодных структур с барьером Шоттки на основе слоев InP, выращенных на „жесткой“ (1) и пористой (2) подложках n^{+++} -InP (образцы № 18 и 19 соответственно).

Параметры Шоттки приведены в табл. 2. Из нее видно, что лучшими параметрами обладают диоды Шоттки Au-Ti- n - n^{++} - n^{+++} -InP, изготовленные на пористой подложке с буферным слоем. Диоды Шоттки (образец № 1), изготовленные из промышленной газофазной структуры на „жесткой“ подложке n^{+++} -InP, имеют параметры, типичные для таких диодов [1]. Диоды Шоттки, изготовленные на n^{+++} - n^{++} - n -Ti-Au и n^{+++} - n -Ti-Au структурах, вследствие формирования барьера Шоттки к сильнолегированному n^+ -слою, имеют высоту барьера на 0.08–0.09 V ниже, чем диоды без контактного n^+ -слоя, что находится в соответствии с выводом о влиянии на высоту барьера Шоттки сил изображения [11].

На рис. 3 приведены типичные прямые ветви ВАХ диодов Шоттки Au-Ti- n - n^{++} - n^{+++} -InP, изготовленных на пористых n^{+++} -подложках InP с буфером (кривая 2, образец № 19) и на n^{+++} „жестких“ подложках с буфером (кривая 1, образец № 18). Видно, что прямые ветви ВАХ диодов обоих типов имеют протяженные участки, подчиняющиеся

уравнению

$$I = I_s \exp\left(\frac{eV}{nkT} - 1\right), \quad (1)$$

где I_s — ток насыщения, n — фактор идеальности, e — заряд электрона, V — приложенное прямое напряжение. Однако начальный участок прямой ветви ВАХ диодной структуры Au-Ti- n - n^{++} - n^{+++} -InP, изготовленной на „жесткой“ подложке в диапазоне напряжений 0.03–0.15 В, не описывается (1). Фактор идеальности для кривой 1 равен 1.09, для кривой 2 — 1.17. Такая величина n , а также высокая подвижность электронов в активных слоях InP и выполнимость критерия $v_D > v_R$, где v_D — эффективная скорость диффузии электронов от границы обедненного слоя к точке максимума потенциальной энергии, v_R — эффективная скорость поверхностной рекомбинации в точке максимума потенциальной энергии, указывают на возможность описать ток насыщения уравнением термоэлектронной эмиссии. Используя последнее, можно определить высоту барьера Шоттки ϕ_b , которая оказалась для диодов, изготовленных на пористых подложках, равной 0.54 eV, а для диодов Шоттки Au-Ti- n - n^{++} - n^{+++} -InP на „жесткой“ подложке — 0.55 eV.

Диоды с барьером Шоттки, полученные на пористых подложках с буфером, имеют высокую воспроизводимость параметров ϕ_b и n и минимальные величины обратных токов (порядка $1 \div 3$ пА) во всем диапазоне измеряемых напряжений, вплоть до напряжения лавинного пробоя V_B , величина которого составила 27 В, что для концентрации примеси $N_B = 3.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ находится в хорошем соответствии с эмпирической формулой [12]:

$$V_B = 60 \left(\frac{E_g}{1.1}\right)^{1.5} \left(\frac{N_B}{10^{16}}\right)^{-0.75}, \quad (2)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны InP.

Таким образом, применение пористых подложек n^{+++} -InP для формирования n^{++} - n -InP эпитаксиальных структур позволяет создавать структурно-совершенные активные эпитаксиальные слои n -InP с высокой подвижностью, что может быть использовано для изготовления высококачественных СВЧ-диодов.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность И.С. Тарасову за обсуждение работы и внимание к ней, П.С. Копьеву, В.В. Кузнецову и Р.А. Сурису за поддержку и ряд полезных замечаний.

Работа выполнена в рамках Российско-украинской программы и при частичной поддержке проектом РФФИ № 01-02-17585.

Список литературы

- [1] Венгер Е.Ф., Конакова Р.В., Коротченко Г.С., Милени В.В., Руссу Э.В., Прокопенко И.В. Межфазные взаимодействия и механизмы деградации в структурах металл-InP и металл-GaAs. Киев: ИФП НАНУ, 1999. 233 с.
- [2] Luryi S., Suhir E. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. P. 140.
- [3] Мамутин В.В., Улин В.П., Третьяков В.В., Иванов С.В., Конников С.Г., Копьев П.С. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 1. С. 3.
- [4] Солдатенко Ф.Ю., Улин В.П., Яковенко А.А., Федорова О.М., Конников С.Г., Корольков В.И. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 21. С. 15.
- [5] Бобыль А.В., Варенко Г.Д., Евдокимов С.А., Евстигнеев А.М., Конаков Р.В., Юсов Ю.П. Оптические методы диагностики полупроводниковых структур на основе соединений A_3B_5 . Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИ „Электроника“. 1990. Сер. 8. В. 1 (1572). 64 с.
- [6] Fujikura H., Liu A., Hamamatsu A., Sato T., Hasegawa H. // Jap. J. Appl. Phys. 2000. V. 39. P. 4616.
- [7] Liu A., Duan C. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 43.
- [8] Bobyl A.V., Gaevskii M.E., Karmanenko S.F., Kutt R.N., Suris R.A., Khrebtov I.A., Tkachenko A.D., Morosov A.I. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. P. 1274.
- [9] Bobyl A.V., Kyutt R.N., Tret'yakov V.V. // Semicond. Sci. Technol. 1998. V. 14. P. 589.
- [10] Алфёров Ж.И., Арсентьев И.Н., Вавилова Л.С., Гарбузов Д.З., Красовский В.В., Тикуннов А.В., Чалый В.П. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 6. С. 1115.
- [11] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 400 с.
- [12] Kao C.-W., Crowell C.R. // Sol. St. Electron. 1980. V. 23. N 8. P. 881.