

06

Двухкомпонентное акцепторное легирование эпитаксиального фосфида галлия и его использование в приборах высокотемпературной электроники

© Ю.В. Жиляев, Е.А. Панютин, Л.М. Федоров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: Eugeny.Panyutin@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 29 февраля 2008 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований обратной ветви ВАХ для ряда высокотемпературных двухэлектродных приборов — выпрямительного диода, стабилитрона и эмиттера горячих электронов, технологические сценарии которых объединяет наличие бинарного цинк-магнитного легирования. Проанализированы причины, приводящие к возникновению различных типов лавинного пробоя в зависимости от соотношения цинкового и магнитного компонента. Различия в свойствах и поведении ВАХ связываются с различным характером и спецификой внутренней диффузии акцептора, всегда сопутствующей процессу легирования в ходе роста многослойных эпитаксиальных $p-n$ -структур.

PACS: 85.40.Ry, 85.30.Kk

Разработка элементной базы высокотемпературной электроники и электронных компонентов на основе фосфида галлия ($E_g = 2.26$ eV) отражает потребности различных областей современной техники [1]. К настоящему времени исследованы основные типы высокотемпературных дискретных GaP-приборов (выпрямительные диоды и стабилитроны [2], биполярные и полевые транзисторы [3–6], динисторные элементы [7]), которые были получены как жидкофазными, так и газофазными методами; температурный предел их работы достигает 400–500°C. Существует ряд объективных обстоятельств, препятствующих быстрому переходу технологии этих приборов к той степени управляемости, которая обеспечила бы рентабельность их промышленного производства.

Одна из ключевых и недостаточно проработанных проблем связана с относительно высоким уровнем структурной неоднородности осажда-

емых слоев, что существенно влияет и на микромасштабное распределение легирующей примеси (в частности, акцептора), и впоследствии проявляется в возникновении аномалий обратной ветви ВАХ $p-n$ -перехода. Поскольку обратный ток является, помимо прочего, наиболее термочувствительным параметром получаемых приборов, представляется важным произвести сопоставление характерных особенностей обратной ветви в зависимости от типа акцептора и ряда других, значимых с точки зрения возможности управления процессом, технологических факторов.

С этой целью удобно рассмотреть три типа двухэлектродных приборов, имеющих различное функциональное назначение — выпрямительный диод, стабилитрон и эмиттер горячих электронов [2,8], изготовленных на основе эпитаксиальных структур, полученных газофазным методом в хлоридной системе. Объединяет эти типы приборов то обстоятельство, что для каждого из них обратная ветвь ВАХ является рабочей; конкретные режимы работы обратносмещенного перехода для них существенно различаются. Для термостойкого выпрямительного диода основной технологической задачей является обеспечение минимального тока утечки (в широком диапазоне температур) с сохранением приемлемых инжекционных свойств в течение прямосмещенной фазы его функционирования. Для стабилитрона, работа которого ограничивается только обратносмещенным состоянием перехода, помимо малых значений его токов утечки, необходимо обеспечить устойчивую и долговременную работу этого перехода в режиме лавинного пробоя. Что же касается эмиттерных диодов, способных осуществлять поставку горячих электронов в вакуум или газообразную среду, основным показателем их эффективной работы является величина тока эмиссии.

Как оказалось в ходе проведения предварительных исследований, всем этим трем наборам требований можно удовлетворить использованием двухкомпонентного цинк-магниевого легирования акцепторного слоя, причем единственный параметр, который необходимо изменять для перекрытия всего спектра сформулированных условий, — соотношение легирующих компонентов. Имеются два устойчиво наблюдаемых экспериментальных факта, которые типичны, в общих чертах, как для жидкофазных технологий, так и для осаждения GaP из газовой фазы в хлоридной системе. Во-первых, качественное различие в характере обратных ветвей ВАХ $p-n$ -переходов, получаемых с использованием теллура (донор) и цинка, а также теллура и магния с одной стороны, во-вторых, существенно более сильная зависимость ВАХ переходов

от дислокационной структуры подложки для случая Zn-легированных слоев по сравнению со слоями, легированными магнием. С точки зрения поведения ВАХ в предпробойной области, а также с учетом характера самого пробоя, из числа диодов, изготовленных на основе $n-n^0-p$ -структур и образующих ряд с различным вкладом „цинковой“ компоненты, можно выделить несколько качественно различных типов. В частности, для всех исследованных образцов (площадь $S = 1 \text{ mm}^2$ при технологически задаваемой толщине n^0 слоя $w = 2-20 \mu\text{m}$) наблюдается ряд характерных особенностей, наличие или отсутствие которых определяется только долей паров цинка — вводимого в ходе легирования — в общем потоке акцепторной (цинк-магниевого) паровой смеси.

Все изготовленные образцы — по данным исследования обратных ветвей из ВАХ — можно было бы разделить на три группы (рис. 1), которые, в порядке возрастания доли цинка, характеризуются

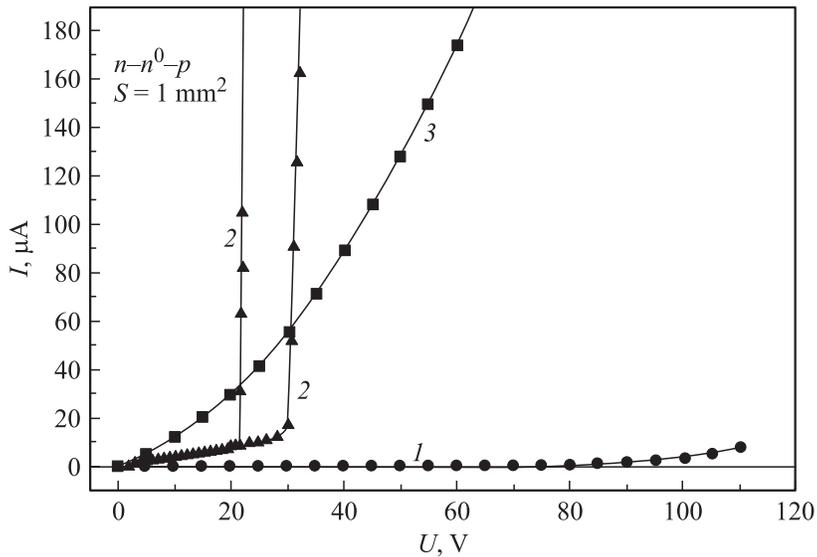


Рис. 1. Типичный вид обратной ветки ВАХ диодных структур для различных случаев легирования p -слоя (Mg , $\text{Mg} + \text{Zn}$, $\text{Mg} + \text{Zn}^+$). Во всем многообразии кривых можно выделить при качественно различных типа характеристик, соответствующих трем группам диодов (1, 2, 3).

следующими отличительными признаками. Первая группа (1): p - n -переходы диодов отличаются жестким и разрушающим характером пробоя (напряжение пробоя $V_b = 30\text{--}300\text{ V}$) и малыми ($< 10^{-5}\text{ A}$) токами утечки в предпробойной области. Вторая группа (2): образцы демонстрируют стабильный и обратимый пробой ($V_b = 20\text{ V--}80\text{ V}$), имеют малые токи утечки и характеризуются наличием вторичного (разрушающего) пробоя. Третья группа (3): переходы обладают мягким характером пробоя; токи утечки высоки ($I_0 > 10^{-4}\text{ A}$).

Следует отметить, что изменение технологических параметров роста структуры в допустимых пределах (в первую очередь, варьирование температуры зоны роста) либо использование подложечного материала, поставляемого различными производителями, приводит к существенному видоизменению вышеприведенной классификации диодных структур. Так, в частности, применение подложек повышенной дефектности, в особенности со смещением к более высокотемпературным режимам роста, однозначно приводило к тому, что даже незначительное присутствие цинка позволяло получать лишь такие p - n -переходы, которые наиболее соответствовали третьей группе. С другой стороны, использование качественных и относительно малодислокационных (плотность дислокаций $\leq 10^6\text{ cm}^{-2}$) GaP-подложек n -типа большой ($\varnothing 52\text{ mm}$) площади — в сочетании с режимом выращивания вблизи нижней границы температурного диапазона ($\approx 760^\circ\text{C}$) — позволило получать диоды, параметры и специфика ВАХ которых были типичны для приборов группы (1) практически для любого соотношения цинк-магний. Тем не менее, осуществление роста в области предельно низких температур оказалось не оптимальным с точки зрения морфологии осаждаемых слоев.

Исследование „бесцинковых“ приборов (группа (1)) в температурном диапазоне $25^\circ\text{C--}500^\circ\text{C}$ позволило установить, что высоковольтные переходы при напряжении $U = 100\text{ V}$ демонстрировали ток утечки (включая и область предельно высоких температур), не превышающий $200\text{ }\mu\text{A}$ (рис. 2), что обеспечивало коэффициент выпрямления $< 10^2$ даже при 450°C . Кроме поверхностной составляющей, которая могла быть частично устранена предварительным травлением периферии незащищенного перехода, обратный ток имел и объемное происхождение, за которое — помимо межзонной генерации — ответственно, как предполагается, присутствие в n^0 -слое не только фоновых Si-доноров, но и собственных дефектов типа вакансий. Для диодных структур, образующих ряд по значениям толщины n^0 -слоя

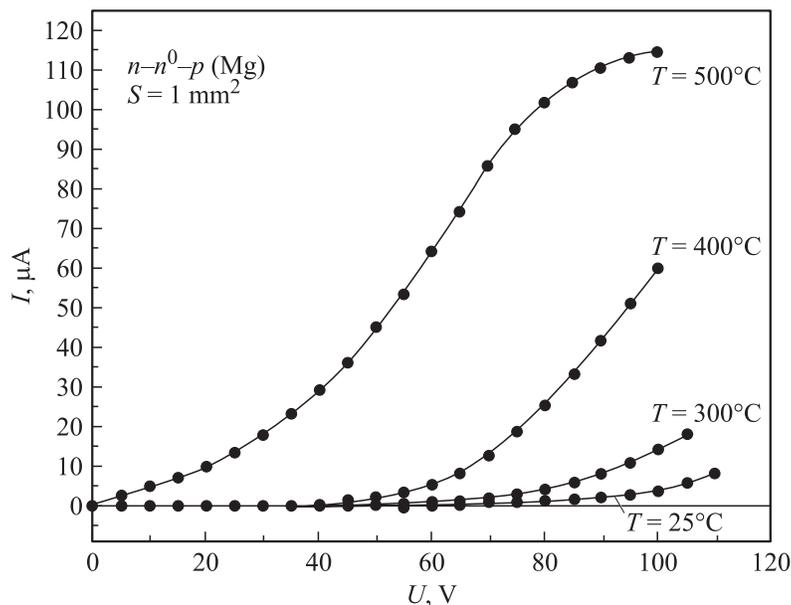


Рис. 2. Обратная ветвь ВАХ выпрямительного диода. Толщина n^0 -слоя — $6 \mu\text{m}$, p -слой легирован магнием. Представлены кривые, полученные при различных температурах.

($w = 1-12 \mu\text{m}$), предельное рабочее напряжение полученных приборов находилось в диапазоне $20 \text{ V} < V_{\text{max}} < 300 \text{ V}$. Превышение критических значений напряжения для тех диодов, которые имели $V_{\text{max}} > 30 \text{ V}$, как правило, приводило к пробое, сопровождающемуся быстрой и необратимой деградацией перехода.

Иная ситуация имеет место для образцов $n-n^0-p$ -структур из группы (2), отличающихся от предыдущих диодов дозированным введением в p -слой цинка (с сохранением магния в качестве доминирующего акцептора). Для приборов, изготовленных на основе таких структур, поведение ВАХ в допробойной и предпробойной областях отличается от аналогичных „бесцинковых“ диодов пониженным напряжением пробоя (типичное напряжение V_b при соответствующем значении w оказывается в 2–3 раза меньше) и увеличенным — в пределах одной пластины — разбросом значений этого напряжения. Поэтому наиболее привлекательной их особенностью является качественное изменение

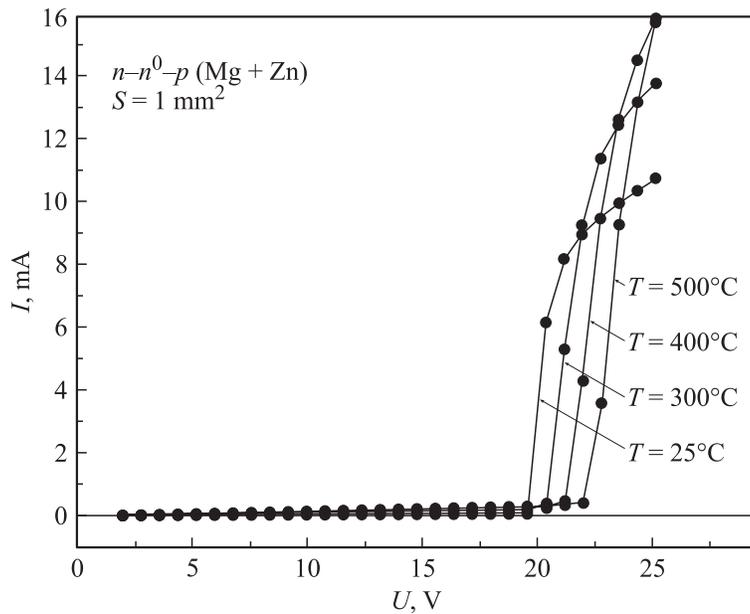


Рис. 3. ВАХ диодов стабилитронного типа, полученных на основе структур $n-n^0-p^+$ -с применением бинарного легирования p -слоя.

структуры и динамики самого пробоя, который для этого типа образцов имеет однородный, а также устойчивый и неструктурный характер. В то же время, ВАХ приборов в начальной области пробоя демонстрирует достаточно низкое ($\sim 100 \Omega$) дифференциальное сопротивление (рис. 3) и с увеличением тока, несмотря на саморазогрев образцов, сохраняет характерный сублинейный вид вплоть до наступления (при 150–200 мА) вторичного теплового пробоя. Для значений толщины n^0 -слоя, лежащих в промежутке $w = 2 \mu\text{m} - 20 \mu\text{m}$, диоды образуют ряд по величине критического напряжения ($\sim 15 - 80 \text{ V}$). Видоизменение типа лавинного пробоя связывается с формированием распределений акцепторов с более высокой (в среднем) концентрацией и имеющих более крутые профили, что создает — при обратном смещении — поля с большими градиентами и, в свою очередь, блокирует возможность перехода к неустойчивым режимам пробоя с S -образной ВАХ (подроб-

нее см., например, [9]). Такой характер пробоя в сочетании с малыми предпробойными токами и большим скачком дифференциального сопротивления позволяет отнести диоды этого типа к высокотемпературным стабилитронам.

Дальнейшее увеличение доли цинка в общем объеме акцепторного легирования (группа (3)) на первых стадиях приводило к возрастанию статистического вклада образцов, имеющих повышенную величину тока утечки, а далее вело к еще большему и „повсеместному“ возрастанию этого тока (с величины $1-2 \mu\text{A}$ до $200-800 \mu\text{A}$ при 10V). Возникновение значительных токов утечки связывается с присутствием в обратном токе перехода туннельной составляющей, появление которой в локальных областях перехода возможно как следствие аккумуляции ионов цинка малоподвижными вакансиями галлия, имеющими склонность к образованию вблизи дислокаций концентрированных скоплений. Как оказалось, подобные „некачественные“ переходы продемонстрировали относительно большие токи эмиссии ($2-5 \text{nA}$ в режиме постоянного тока), что было в дальнейшем использовано для многоэлектронного инициирования и ускорения развития газового разряда [8].

Приведенные данные и результаты наблюдений в своей совокупности дают основание полагать, что причина подобных различий в характере и параметрах обратной ветви ВАХ может заключаться в особенностях и различиях элементарных механизмов коллективной миграции ионов цинка и ионов магния. Поскольку легирование в процессе эпитаксиального выращивания $p-n$ -структур всегда сопровождается диффузией, эти особенности, в свою очередь, могут нетривиально проявляться в структурно-неоднородной среде, характеризующейся наличием локальной дисторсии решетки, обуславливаемой ростовыми дефектами, и приводить — по окончании процесса — к качественно различному микрорельефу донорно-акцепторных концентраций вблизи $p-n$ -перехода.

Список литературы

- [1] Zipperian T.E., Thomas E., Dawson L.R. // IEEE Tr. El. Devices. 1982. V. 29. N 10. P. 1690.
- [2] Жиляев Ю.В., Криволапчук В.В., Панютин Е.А. и др. Всесоюзная конференция „Создание комплексов преобразовательной техники“, Москва, 25–27 ноября 1986 г. М., 1986. С. 69–70.

- [3] *Zipperian T.E., Dawson L.R., Chaffin R.J.* In: Proc. IEEE Conf. On High-Temperature Electronics (Tusson, 1981). New York, 1981. P. 59–61.
- [4] *Жилев Ю.В., Панютин Е.А., Федоров Л.М.* // Письма в ЖТФ. 1994. В. 20. С. 26.
- [5] *Zhilyaev Yu.V., Panyutin E.A., Fedorov L.M.* 23 Int. Symp. of Comp. Semic., SPb, Sept 23–27. 1996.
- [6] *Zhilyaev Yu.V., Fedorov L.M., Panyutin E.A.* // „MRS meeting-99“, Nov. 29–Dec. 3, Boston. P. 413.
- [7] *Keune D.L., Greffield M.G.* // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 8. P. 3417–3421.
- [8] *Тухас В.А., Хромой Ю.Д., Панютин Е.В., Жилев Ю.В.* и др. 3-я Всесоюзная конференция по физике газового разряда. Махачкала, сентябрь 1987.
- [9] *Пикус Г.Е.* Основы теории полупроводниковых приборов. М., 1965. 448 с.