

Высоковольтные р-і-п структуры на основе арсенида галлия для импульсных и высокочастотных применений

В работе рассмотрены особенности технологии изготовления методом жидкофазной эпитаксии высоковольтных гетероструктур на основе GaAs и его твердых растворов. Приведены осциллограммы переключения высоковольтных приборов на основе данных гетероструктур для импульсной силовой и высокочастотной электроники с нано- и пикосекундными временами переключения и рабочими частотами коммутации до 10 МГц.

Ключевые слова: высоковольтный р-і-п диод, арсенид галлия, жидкофазная эпитаксия, приборы импульсной силовой электроники.

Интерес к высоковольтным структурам на основе GaAs объясняется поиском альтернативных кремнию материалов импульсной силовой электроники, способных работать при более высоких частотах повторения импульсов и при более высоких температурах. В сравнении с кремнием, GaAs обладает большей шириной запрещенной зоны и значительно большей подвижностью электронов (также и в сравнении с SiC и GaN), относительно высокой электрической прочностью и относительно малыми временами жизни носителей заряда, а также большей радиационной стойкостью. Преимуществом GaAs является также то, что это прямозонный полупроводниковый материал, для которого возможно получение твердых растворов, позволяющих варьировать в широком диапазоне оптические и электрические свойства приборных слоев GaAs- A_3B_5 гетероэпитаксиальных структур и изменять электрические характеристики приборов на их основе. К настоящему времени для изготовления высоковольтных GaAs р-і-п-структур в основном используется метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [1-3].

Изготовление структур высоковольтных плавных р-і-п переходов проводилось с использованием модифицированного метода ЖФЭ по технологии, основы которой были разработаны в ФТИ им. А.Ф.Иоффе [1] и развиты в дальнейшем в нескольких научно-технических организациях. Эта технология проста в реализации, экономически эффективна и является, по нашему мнению, единственно возможной на сегодня технологией для получения высоковольтных GaAs р-п переходов, способных блокировать напряжения до 2000 В, Эпитаксиальные слои GaAs и твердых растворов $In_xGa_{1-x}As$ с содержанием InAs до 6% и $GaAs_{1-y}Sb_y$ с содержанием GaSb до 5% выращивались на GaAs подложках ориентации (111) и (100), легированных цинком до $(2-10) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Эпитаксиальное выращивание слоев плавного слаболегированного р-п перехода проводилось из ограниченного раствора-расплава In-Ga-As или Ga-As-Sb в атмосфере водорода в кассетах-лодочках из кварца или графита при температурах начала кристаллизации 850-950°C с последующим охлаждением, как правило, до комнатной температуры.

Содержание электрически активных дефектов в эпитаксиальных слоях при данном способе выращивания определяется содержанием остаточных (фоновых) примесей в расплаве и ростовой системе, температурой и длительностью предварительного отжига

раствора-расплава, расходом водорода и его влажностью, а также зависит от режима кристаллизации эпитаксиальной плёнки при принудительном охлаждении системы. При данном способе ЖФЭ выращивания структур с р-п переходом возможно получение толстых слаболегированных i-слоев GaAs, GaAsSb или InGaAs с концентрацией свободных носителей порядка 10^{13} см^{-3} или менее.

Толщина и состав гетероэпитаксиального слоя для получения наиболее быстродействующих диодов выбирались таким образом, чтобы превысить критические толщины начала релаксационного дефектообразования в псевдоморфных плёнках и обеспечить контролируемое образование дислокаций несоответствия в базовых слоях прибора, но не допустить интенсивной пластической деформации данного слоя [2,3].

Взаимосвязь режимов эпитаксии слоев GaAs, обеспечивающих разную степень изовалентного легирования, с усредненной величиной временем жизни τ_{eff} и параметрами глубоких ловушек выявлялась на основе анализа спектров DLTS, измеренных по методике, представленной в работе [4]. В слоях GaAs-АзВ₅ с сеткой дислокаций несоответствия, помимо хорошо известных акцепторных ловушек HL2 и HL5, были обнаружены глубокие акцепторные и донорные уровни ED1 и HD3, которые, как мы полагаем, связаны с наличием дислокаций несоответствия. Данные уровни имеют большие сечения захвата носителей заряда и оказывают решающее влияние на величину времени жизни неравновесных носителей заряда в базовых слоях гетероструктур с регулярной квазиоднородной сеткой дислокаций [5,6].

На базе GaAs-АзВ₅ р-и-п структур были изготовлены различные биполярные диоды для импульсной силовой и высокочастотной электроники:

1.) Гипер-быстродействующие силовые эпитаксиальные GaAs диоды (Hyper Fast Recovery Epitaxial Diodes, H-FRED) с наносекундным быстродействием.

Приборы этого типа широко используют при изготовлении высокочастотных преобразователей электроэнергии [7]. Предельный частотный лимит для кремниевых биполярных FRED обычно не превышает уровня 500 кГц из-за больших значений времени выключения t_{rr} и коммутационных потерь, а также большой величины удельной электрической емкости Si диодов. Мы разработали технологию изготовления гетероэпитаксиальных GaAs-АзВ₅ структур H-FRED диодов с наносекундными значениями времен включения t_{fr} и выключения t_{rr} (рис. 1) и отличающихся малыми значениями удельной емкости даже при нулевом смещении (C_0 менее 10 пФ/мм²) [2,3]. Такие диоды способны эффективно работать в вентильном режиме с рабочим напряжением сети 220/380 В и на частотах вплоть до уровня ~ 10 МГц.

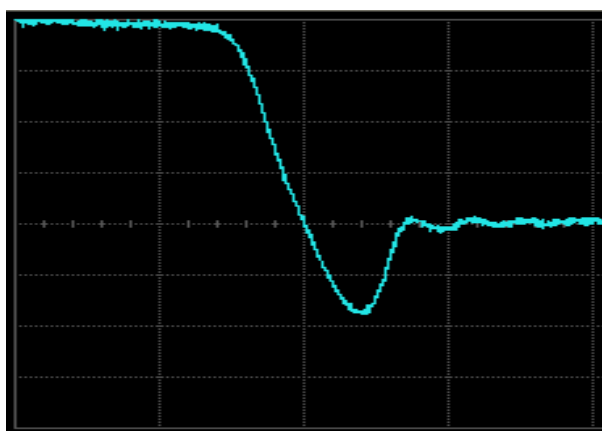


Рис. 1. Оциллограмма выключения GaAs-АзВ₅ гетероэпитаксиального диода с площадью р-п перехода $S \sim 0.01 \text{ см}^2$ и $U_R = 400 \text{ В}$ ($I_f = 1,2 \text{ А}$, $dI/dt = -240 \text{ А/мкс}$, $U_R = 200\text{В}$). Горизонтальная развертка – 10 нс/дел.; вертикальная развертка – 0.3 А/дел..

2.) Дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ).

ДДРВ – ключевой диод специального типа, обычно использующийся как «ключ-размыкатель» («opening switch») для формирования коротких импульсов в цепях с индуктивными накопителями энергии [8]. Первые Si-ДДРВ были разработаны на кремнии для генерации электрических импульсов с наносекундными временами нарастания [9]. Наши исследования показали, что высоковольтные GaAs-ДДРВ могут переключаться в два раза быстрее Si-ДДРВ при одинаковом значении пробивного напряжения диода или иметь в два с лишним раза большую амплитуду формируемого таким ДДРВ импульса напряжения, и в пять раз большую импульсную мощность при одинаковом с кремниевыми приборами быстродействии (см. рис. 2). GaAs ДДРВ в сравнении с кремниевыми способны работать на более высоких частотах генерации импульсов, вплоть до уровня в 100 МГц, при более высокой рабочей температуре перехода и при меньшем тепловом дрейфе динамических характеристик. Кроме того, данные приборы, изготовленные на основе GaAs, имеют существенно более широкий в сравнении с Si-ДДРВ динамический диапазон рабочих плотностей тока, при которых ДДРВ сохраняет высокое быстродействие. Данная разница объясняется тем, что в арсениде галлия скорость дрейфа носителей заряда имеет значение близкое к насыщенной скорости дрейфа носителей в кремнии в существенно более широком диапазоне значений напряженности электрического поля.

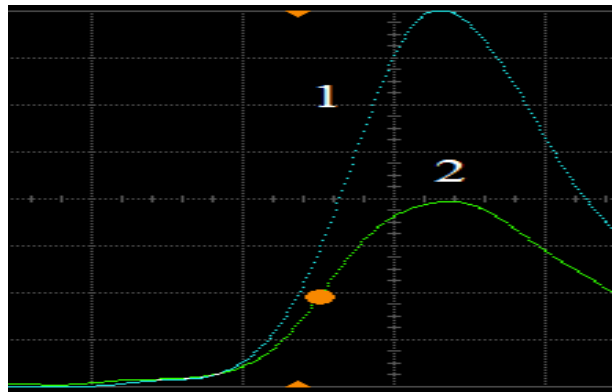


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения, генерируемые единственным GaAs-ДДРВ с амплитудой 450 В (кривая 1) и Si-ДДРВ с амплитудой 210 В (кривая 2). Приборы имеют примерно равный уровень быстродействия при переключении (чуть менее 200 пс), но разную импульсную мощность. Горизонтальная развертка – 200 пс/дел.; вертикальная развертка – 50 В/дел..

3.) GaAs диоды-обострители, работающие в режиме задержанного лавинного пробоя (GaAs Fast Ionization Devices, GaAs-FID).

GaAs-FID – это приборы с пикосекундными временами переключения, применяемые в качестве «ключей-замыкателей» («closing-switch») [9] для уменьшения длительности времен нарастания импульсов (рис. 3). Данный класс приборов работает на использовании явления задержанного лавинного пробоя p-n перехода в условиях сильного динамического превышения предела статической электрической прочности полупроводника в электрическом поле. Переключение FID-диода в проводящее состояние происходит после сверхбыстрого пробега через базовые слои структуры (за времена быстрее времён пролета электронов,двигающихся с насыщенной скоростью дрейфа) волны ударной ионизации, оставляющей за собой плотную токопроводящую плазму неравновесных носителей заряда. В настоящее время технология изготовления структур GaAs-FID обеспечивает возможность производства приборов с рабочими напряжениями

(300–1500) В и временами переключения менее 80 пс. Такие «обострители» на основе GaAs имеют в сравнении с кремневыми приборами существенно меньшие потери в проводящем состоянии, т.е. меньшее значение электрического сопротивления после переключения, которое, к тому же, поддерживается значительно дольше, несмотря на рассасывание плазмы протекающим через GaAs-FID структуру током [10]. Это открывает возможность применения таких приборов в режимах, когда требуется «обострение» фронта сравнительно длинных наносекундных импульсов, что не могут обеспечить кремниевые диодные обострители.

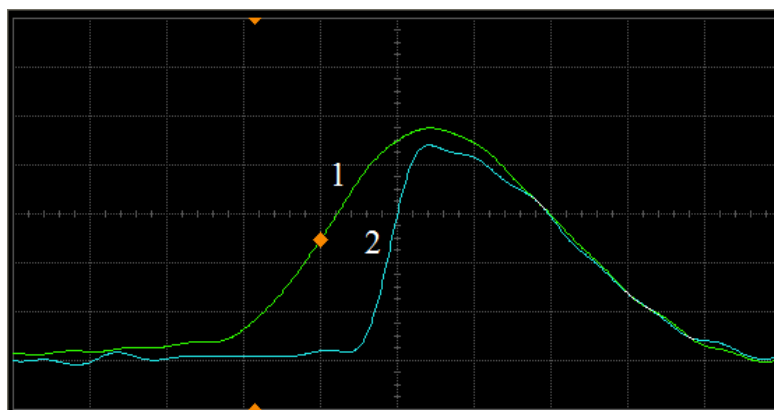


Рис. 3. Оциллограмма импульса напряжения, полученного с использованием GaAs-FID с блокирующим напряжением 450 В. 1 – импульс, подаваемый на GaAs-FID, 2 – «обостренный» импульс, формируемый после прохождения через GaAs-FID. Горизонтальная развертка – 200 пс/дел.; вертикальная развертка – 200 В/дел..

Заключение.

Основы технологии изготовления высоковольтных GaAs гетероэпитаксиальных структур методом жидкофазной эпитаксии достаточно хорошо развиты в России, что позволяет рассчитывать на реализацию в короткие сроки промышленного выпуска приборов силовой и импульсной электроники для высокочастотных и высокотемпературных применений. Это направление может составить отечественную альтернативу или, по крайней мере, сравнительно простое эффективное дополнение в дорожную карту развития технологий производства силовых приборов на основе широкозонных полупроводников. Особенно значима данная технология может быть в развитии отечественного производства новых высокочастотных быстродействующих приборов силовой и импульсной электроники с нано- и пикосекундным быстродействием, где GaAs, аналогично его позициям в СВЧ- и оптоэлектронике, может стать лидирующим полупроводниковым материалом.

Библиографический список

1. Алферов Ж.И., Корольков В.И., Никитин В.Г., Степанова М.Н., Третьяков Д.Н. Мощные быстродействующие диоды на основе арсенида галлия. – Письма в ЖТФ. – 1976. – Т. 2. – Вып. 2. – С. 201-204.
2. Солдатенков Ф.Ю., Данильченко В.Г., Корольков В.И. Управление временем жизни носителей заряда в высоковольтных p-i-n диодах на основе гетероструктур InGaAs/GaAs. – ФТП. – 2007. – Т. 41. – Вып. 2. – С. 217-220.
3. Kozlov V.A., Soldatenkov F.Yu., Danilchenko V.G., Korolkov V.I. and Shulpina I.L. Defect engineering for carrier lifetime control in high voltage GaAs power diodes. – Proc. of 25th Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC-2014). – Saratoga Springs, USA, 19-21 May 2014. – P. 139-144.

4. Соболев М.М., Солдатенков Ф.Ю., Козлов В.А. Исследования глубоких уровней GaAs p-i-n-структур. – ФТП. – 2016. – Т. 50. – № 7. – С. 941-945.
5. Соболев М.М., Солдатенков Ф.Ю. Влияние глубоких уровней дислокаций в гетероэпитаксиальных InGaAs/GaAs и GaAsSb/GaAs p-i-n-структурах на время релаксации неравновесных носителей. – ФТП. – 2018. – Т. 52. – № 2. – С. 177-183.
6. M.M. Sobolev, F.Yu. Soldatenkov, and I.L. Shul'pina. Misfit dislocation-related deep levels in InGaAs/GaAs and GaAsSb/GaAs p-i-n heterostructures and the effect of these on the relaxation time of nonequilibrium carriers. – J. Appl. Phys. – 2018. – V. 123. – P. 161588.
7. Status of the Power Electronics Industry 2017. Market & Technology Yole Développement report 2017. https://www.i-micronews.com/images/SAMPLES/POWER/Yole_YDPE17028_Power_Electronics_Industry_2017_sample.pdf
8. Kozlov V.A., Smirnova I.A., Moryakova S.A., Kardo-Sysoev A.F. New generation of drift step recovery diodes (DSRD) for subnanosecond switching and high repetition rate operation. – Conf. Record of the 21-th Power Modulator Symp., Hollywood, USA, 2002. – P. 441-444.
9. Kardo-Sysoev A.F. New semiconductor devices for generation of nano- and subnanosecond pulses. Chapter 9 in the book «Ultra-Wideband Radar Technology», Ed. by D. Taylor. – CRC Press. – New York, NY, USA, 2001. – P. 205-290.
10. V.I. Brylevskiy, I.A. Smirnova, A.V. Rozhkov, P.N. Brunkov, P.B. Rodin, I.V. Grekhov. Picosecond-range avalanche switching of high-voltage diodes: Si versus GaAs structures. – IEEE Transactions on plasma science. – 2016. – V. 44. – N. 10. – P. 1941-1946.