

Об.2; 12

© 1993

МИКРОПЛАЗМЫ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ GaP p - n -СТРУКТУРАХ, ВЫРАЩЕННЫХ НА Si ПОДЛОЖКАХ

Ю.В. Ж и л я е в, Б.С. К о н д р а т ь е в,
 Н. Н а з а р о в, В.С. Т у т ы г и н,
 Л.М. Ф е д о р о в

В настоящее время значительный интерес проявляется к получению эпитаксиальных слоев GaP на Si подложках и фосфид-галлиевых приборных структурах на их основе [1-6]. Использование высококачественных кремниевых подложек большего размера в качестве основы для создания GaP p - n -структуры позволяет расширить сферу применения приборов на основе фосфида галлия.

В работе [7] методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе получены GaP p - n -структуры на Si подложках, излучающие свет при обратном смещении. Исследования электрических и электролюминесцентных свойств GaP p - n -структур на Si подложках в той же работе продемонстрировали лавинный характер пробоя и наличия микроплазм (МП). Однако собственно микроплазменные исследования не проводились.

Следует отметить, что существующая физика микроплазменных явлений требует установления характерных свойств МП, включая динамику параметров случайного токового процесса - $I_u(t)$ [8-10].

В настоящей работе впервые приводятся результаты исследования основных свойств и параметров МП в эпитаксиальных GaP p - n -структурах на Si подложках при комнатных температурах.

Объектами исследования служили GaP p - n -структуры на Si подложках, полученные методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе $Ga(GaP)-PCl_3-H_2$ [6].

Для получения p - n - GaP/n - Si структуры сначала на Si подложке выращивался гетероэпитаксиальный слой n - GaP , а затем на него наращивался слой p - GaP . Толщина эпитаксиального слоя n - GaP составляла 6 мкм. В процессе эпитаксии первичные слои n - GaP легировались теллуром и серой до концентрации электронов $n \approx (1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Эпитаксиальный слой p - GaP выращивался на n - GaP/n - Si структуре и легировался в процессе эпитаксии цинком до концентрации дырок $p \approx (0.5-1) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, при этом толщина p - GaP слоя составляла (3-4) мкм.

Кремниевыми подложками, предназначенными для получения p - n - GaP/n - Si структур, были двухсторонние полированные пластины Si -КЭФ-001 толщиной ~ 400 мкм, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией $4-6^\circ$ в направлении [110].

Площади исследованных p - n - GaP/n - Si структур составляли $S \approx (2-6) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Омические контакты создавались вплавлением в атмосфере очищенного водорода при температуре 550–600 °С, для p - GaP эпитаксиальных слоев использовался сплав $In + 2\% Zn$, для n - Si подложек – $In + 2\% Te + 1\% Ni$.

Для исследования микроплазменного участка пробоя и отдельных МП GaP p - n -перехода использовались стандартные методы [8] и методика временного статистического анализа МП токовых пульсаций [10–14].

Оценки традиционных параметров МП, таких, как диаметр – $D_{МП}$, напряжение пробоя – U_B , последовательное сопротивление – R_S , а также оценка области вариации напряжений – ΔU , где ток нестабилен, определялись с помощью характериографа Л2–56, оптического микроскопа ММР–4 и схема микроплазменного характериографа.

Детальное изучение микроплазменного случайного тока в области нестабильности отдельных микроплазм осуществлялось с помощью автоматизированного комплекса микроплазменных исследований, описанного в работах [10, 11, 14]. Микроплазменный импульсный токовый процесс $I_{\mu}(t)$ анализировался в области 1 мкс–0.5 с по программно задаваемому числу импульсов, $N \approx 10^3$ – 10^4 . Вначале исследования МП тока проводились в более широкой области времен – от 100 нс до 20 мкс и от 1 мкс до единиц секунд.

Вольт–амперные характеристики p - n - GaP/n - Si структур исследовались при 300 К; напряжения пробоя для различных структур с микроплазмами составляли 11–18 В. На рис. 1, а представлена I - U характеристика одной из исследованных p - n - GaP/n - Si структур. Участок микроплазменного пробоя приведен на рис. 1, б. Общий вид I - U характеристики, как и вид участка пробойной I - U с МП, достаточно типичен для обычных p - n -структур с МП. Начальный участок пробоя (рис. 1, б) связан с включением МП, имеющих диаметр ~ 3 – 5 мкм, а при достижении величин токов $I_{обр}(U) \approx I_0 + I_{ср}^{МП}(U) \geq 1$ мА в ряде образцов отмечались более мелкие каналы выхода рекомбинационного излучения с диаметром на порядок меньше, чем в первом случае.

Изучению подвергались в основном первые, по порядку включения, микроплазмы. Наиболее характерные значения „размеров“ областей нестабильности (ΔU) составляли $\sim (0.1$ – $0.5)$ В. В целом же по совокупности исследованных микроплазм в GaP p - n -переходе отмечалось достаточное разнообразие в вариациях параметров МП. Отмечались МП, имеющие малые размеры области нестабильности $\Delta U \approx 0.1$ В, максимальные средние амплитуды импульсов $I_1 = \bar{I} < 10$ мкА. В отличие от них, типичные МП имели $I_1 = 10$ – 30 мкА. Последовательное сопротивление первых МП $R_S \approx (3$ – $5) \times 10^3$ Ом.

Исходя из оценок ширины области пространственного заряда ($W \approx 0.5$ мкм) при данных значениях напряжения пробоя, выполняются соотношения: $D_{МП} > W \approx 0.5$ мкм (случай типичных МП) и $D_{МП} \approx W$ для мелких МП. Анализ литературных данных показывает, что, несмотря на близость параметров исследованных МП к клас-

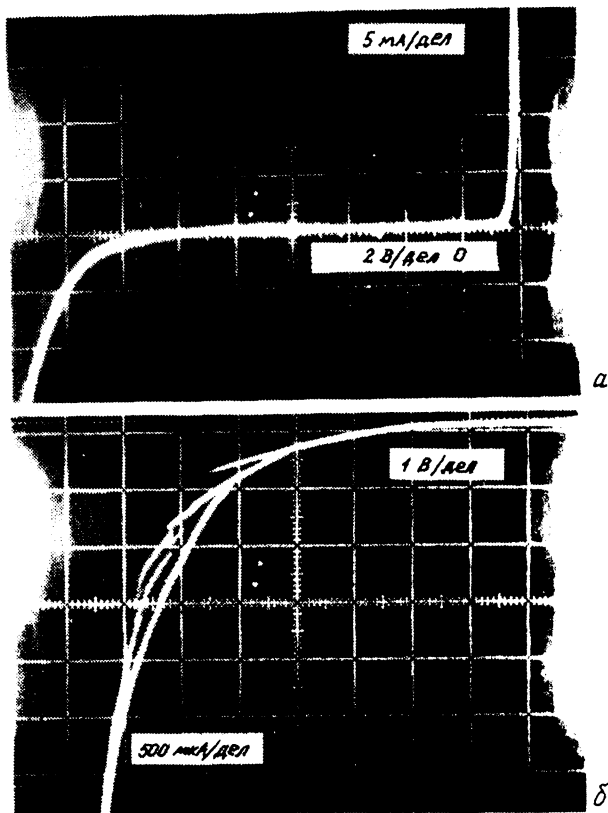


Рис. 1. Общий вид $I-U$ характеристики $p-n-GaP/n-Si$ структуры (а); участок микроплазменного пробоя $I-U$ характеристики (б).

сическим на кремнии [8, 10], малые значения параметров МП, включая R_S позволяют выделить некоторую специфику МП в исследованных $p-n-GaP/n-Si$ структурах.

Проводились оценки основных свойств динамики развития пульсаций случайного тока МП. С ростом значения напряжения $U \in \Delta U$ или перенапряжения $\mathcal{S}U (\mathcal{S}U = U - U_B - \text{превышение над напряжением пробоя } U_B \text{ отдельной МП})$ происходит рост среднего тока пробоя за счет изменения соотношений между всеми основными параметрами флуктуаций генерируемого тока - τ_i, τ_0, τ_2 и I_f .

Наиболее сильно изменяются соотношения между временными параметрами $\tau_i(U)$, ($i = 0, 1, 2$), т.е. длительностями и паузами - соответственно изменяется темп генерации импульсов тока в единицу времени - λ^* . На рис. 2, а представлена зависимость темпа генерации от напряжения для первой МП с напряжением пробоя $U_B = 11.27$ В. Максимальный темп генерации, соответствен-

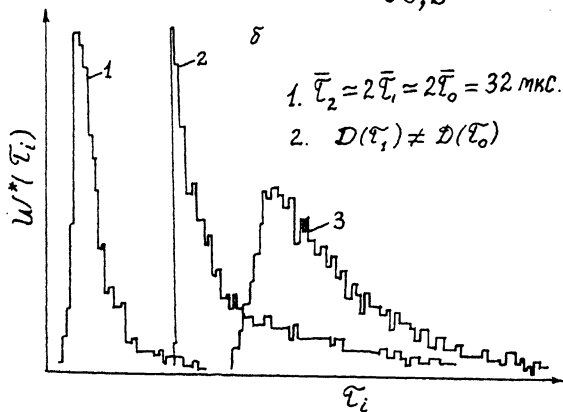
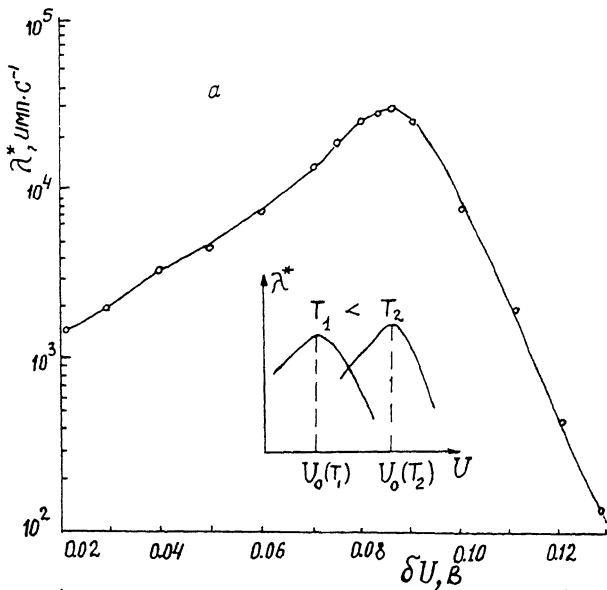


Рис. 2. Темп генерации импульсов в области неустойчивости первой микроплазмы (300 К). На вставке: иллюстрация положительности ТКН. б) Вид одномерных гистограмм временных параметров τ_i при $\mathcal{U} = \mathcal{U}_0$, $T = 300$ К. 1 - $W^*(\tau_i)$; 2 - $W^*(\tau_0)$; 3 - $W^*(\tau_2)$, где $D(\tau_i)$ - дисперсия распределенных параметров пульсаций.

но, минимальное значение квазипериода $\bar{\tau}_2 = \bar{\tau} + \bar{\tau}_0$, достигается в характерной для любой МП области напряжений $\mathcal{U} = \mathcal{U}_0$. На рис. 2, б представлены конкретные данные для типичной МП. Выращения 1 и 2 иллюстрируют числовые соотношения между временными параметрами пульсаций.

Значения максимальной частоты следования импульсов тока для всех исследованных МП (как „типичных“, так и с малыми размерами

ми) укладывались в диапазон $f_{max} \approx (3-10) \cdot 10^4$ Гц. Так, типичным МП свойственна меньшая частота следования в максимуме генерации, соответственно более длинные импульсы и паузы. В ряде случаев для них же наиболее отчетливо отмечалась пачковость импульсов, известная и для кремниевых МП при пониженных температурах [8]. Сопоставление полученных данных с наиболее детально исследованными на кремнии и карбиде кремния МП свидетельствует о некотором сходстве случая типичных МП и МП „Мак Интайровского“ типа, а по временным характеристикам – с МП на карбиде кремния [12, 13].

Температурный коэффициент напряжения пробоя ($\beta = \frac{1}{U_B} \cdot \frac{dU}{dT}$) положителен и имеет для отдельных МП значение $(3-5) \cdot 10^{-3}$ В/град. (рис. 2, а, вставка). Из рисунка видно, что требуется увеличить обратное смещение, приложенное к структуре, чтобы наблюдать максимум генерации. Таким образом, подтверждаются данные о типичном микроплазменном лавинном механизме пробоя, указанные в работе [7].

Отметим некоторые свойства первичных характеристик – признаков динамики МП токовых систем и свойств флуктуационного МП процесса – $I_{\mu}(t)$. В качестве важнейших выступают функции плотностей распределения, например, временных параметров пульсаций – $W(\tau_1)$, $W(\tau_0)$, $W(\tau_2)$ [9-14].

Изменение стохастических свойств $I_{\mu}(t)$ от начала генерации импульсов $U > U_B$ до практически полного включения МП (вырождения в канал проводимости) проявляется через наблюдаемые изменения в распределениях – гистограммах распределений – $W_{\mu}^*(\tau_i)$. На рис. 2, б показан характерный для области $U = U_0$ вид гистограмм распределений. Можно указать, что при всех других значениях $U \in \Delta U$ распределения $W(\tau_1)$ и $W(\tau_0)$ не совпадают. Принципиальным является несоответствие законов распределений по τ_1 и τ_0 , наличие модальности, что роднит МП в данных $p-n$ -структурах с исследованными на кремниевых и карбид-кремниевых $p-n$ -структурах. Это подтверждает общность модельных основ формирования МП токовых каналов как в высоковольтных, так и низковольтных $p-n$ -структурах, а также теоретически подтверждает немарковость флуктуационной модели МП и указывает на связанность механизмов включения и выключения генерации носителей заряда.

Таким образом, впервые исследованы свойства МП в $p-n-GaP/n-Si$ структурах и определены их основные параметры. Указаны соответствия МП в $p-n-GaP/n-Si$ структурах с широким классом низковольтных МП, а также отмечены их специфические особенности. Показано формирование тока на МП участке пробоя.

Полученные данные, по нашему мнению, могут быть использованы для совершенствования технологии получения $p-n-GaP/n-Si$ структур и непосредственно в создании приборов, использующих свойства МП, в частности – генераторов шумоподобных сигналов.

Авторы выражают благодарность В.В. Евстропову за полезное обсуждение результатов работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G o n d a S., M a t s y s h i m a Y., M u -
k a i S., M a k i t a Y., I g a r a s h i O. //
Japan. Phys. 1978. V. 17. N 6. P. 1043-1048.
- [2] К а w a n a m i H., I s h i h a r a S., N a -
g a i K., H a y a s h i Y. // Japan J. Appl.
Phys. 1986. V. 25. N 5. P. L419-L420.
- [3] P o g g e H.B., K e m l a g e B.M., B r o -
a d i e K.W. // J. Crystal Growth. 1977. V. 37.
P. 13-22.
- [4] H u b e r H., W i n s t e l G.H. // Siemens
forsch Entwickl - Ber. 1973. V. 2. N 3. P. 171-174.
- [5] М о r i H., О g a s a w a r a M., Y a m a -
m o t o M., T a c h i k a w a M. // Appl. Phys.
Lett. 1987. V. 51. N 16. P. 1245-1247.
- [6] Ж и л я е в Ю.В., К р и в о л а п ч у к В.В., Н а з а -
р о в Н. и др. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 7. С. 1303-1305.
- [7] Е в с т р о п о в В.В., Ж и л я е в Ю.В., Н а з а р о в Н.
и др. // ФТП. 1993. Т. 27. В. 3 (в печати).
- [8] Г р е х о в И.В., С е р е ж к и н Ю.Н. Лавинный пробой
р-п-перехода в полупроводниках. Л., 1980. 152 с.
- [9] А л а д и н с и к и й В.К. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 11.
С. 2034-2041.
- [10] К о н д р а т њ е в Б.С., С о б о л е в И.А., Т у т у ы -
г и н В.С., Т и р а н о в М.Л. // Припринт ФТИ им.
А.Ф. Иоффе АН СССР. № 1252. Л., 1988. 60 с.
- [11] К о н д р а т њ е в Б.С., С о б о л е в И.А. // ФТП. 1986.
Т. 20. В. 1. С. 133-136.
- [12] К о н д р а т њ е в Б.С., П о п о в И.В., С т р е л ь -
ч у к А.М., Т и р а н о в М.Л. // ФТП. 1990. Т. 24.
В. 4. С. 647-652.
- [13] К о н д р а т и j e v B.S., P o p o v I.M. //
Proseeding of 3r Inf. Conf. on Amorph. and Crys-
tal SiC. USA. Washington, 1990. P. 199-207.
- [14] К о н д р а т њ е в Б.С., Т и р а н о в М.Л., Т у т у -
г и н М.Л., Х о д а с е в и ч А.В. Межвузовский сб. Про-
блемы передачи и обработки информации. С.-Петербург, 1991.
С. 131-136.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию
24 февраля 1993 г.