

Особенности возникновения устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия

В работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния различных факторов (расстояние между контактами, тип контактов, марка исходных пластин) на возникновение устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия n -типа. Установлено, что расстояние между анодным и катодным контактами является определяющим фактором, обуславливающим возникновение устойчивых колебаний тока большой амплитуды в таких структурах.

Ключевые слова: полуизолирующий арсенид галлия, рекомбинационная неустойчивость тока

Одним из перспективных направлений развития современной твердотельной электроники является функциональная электроника [1-3], использующая принципы физического моделирования и интеграции динамических неоднородностей, таких как домены сильного электрического поля, зарядовые пакеты, акустические волны и т.п. Для построения функциональных устройств используются нелинейные активные среды. К таким средам, в частности, может быть отнесен арсенид галлия n -типа, в котором в сильных электрических полях вследствие междолинного переноса электронов возможно возникновение отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) и соответствующей неустойчивости тока (эффект Ганна) [4,5], а также принципиально иной неустойчивости тока – рекомбинационной, или концентрационной, обусловленной зависящим от напряженности электрического поля сечением захвата свободных электронов на глубокие акцепторные уровни в объеме полупроводника [6,7], либо перезарядкой поверхностных состояний [8] (поверхностно-барьерная неустойчивость тока).

Из-за многообразия физических факторов, которые не всегда удается контролировать в полной степени, рекомбинационные неустойчивости тока занимают ведущее место среди других видов неустойчивостей как по количеству, так и по противоречивости имеющихся литературных данных. Анализ работ по рекомбинационным неустойчивостям тока [7,8] показывает, что необходимым условием существования колебаний является наличие в образцах электронных ловушек с глубокими энергетическими уровнями. Такие ловушки создаются либо введением примеси, либо связаны с наличием всевозможных дефектов или поверхностных состояний.

Анализ современного состояния исследований неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниках показывает, что исследование неустойчивостей тока в длинных планарно-эпитаксиальных структурах на основе высокоомного арсенида галлия n -типа имеет как общенаучное, так и прикладное значение, так как открывает перспективы создания разнообразных устройств преобразования и обработки сложных информационных сигналов как в ИК и оптическом, так и в СВЧ и КВЧ диапазонах.

Ранее было установлено [9], что в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе n -GaAs возможно наблюдение отрицательной дифференциальной проводимости и соответствующих низкочастотных осцилляций тока, частота, амплитуда и форма которых могут в существенной степени определяться

величиной приложенного напряжения, интенсивностью и локализацией засветки, а также рядом других факторов. Однако в ходе этих исследований не были детально исследованы конкретные факторы, определяющие возникновение указанной неустойчивости тока. В связи с этим, целью данной работы является экспериментальное исследование влияния межконтактного расстояния, типа контактов и марки исходных пластин на возникновение устойчивых колебаний тока большой амплитуды в таких структурах.

Экспериментальные образцы изготавливались на основе пластин двух марок САГ-2БК и САГИС и представляли собой последовательно сформированные на полуизолирующей подложке (толщиной 400 мкм) из арсенида галлия эпитаксиальные слои: буферный слой n_b -GaAs с концентрацией электронов $n_b < 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, активный слой n -GaAs ($n = 1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $d = 0.3 - 0.33 \text{ мкм}$) и контактный слой n^+ -GaAs ($n^+ = 1.65 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $d^+ = 0.2 - 0.12 \text{ мкм}$, где n и n^+ – концентрации свободных электронов, d и d^+ – толщины слоев). Отдельный элемент представлял собой два омических контакта и токопроводящий промежуток между ними. Омические контакты к n^+ -GaAs создавались на основе $AuGe/Ni/Au$. С целью межэлементной изоляции производилось формирование меза-структур прямоугольной формы шириной 300 мкм и длиной 1300 мкм с двумя прямоугольными омическими контактами (рис. 1). Каждый кристалл содержал по 8 структур, расстояние между контактными площадками которых варьировалось в пределах 300 – 1000 мкм с шагом 100 мкм и фактически определяло длину активной области структуры L_A .

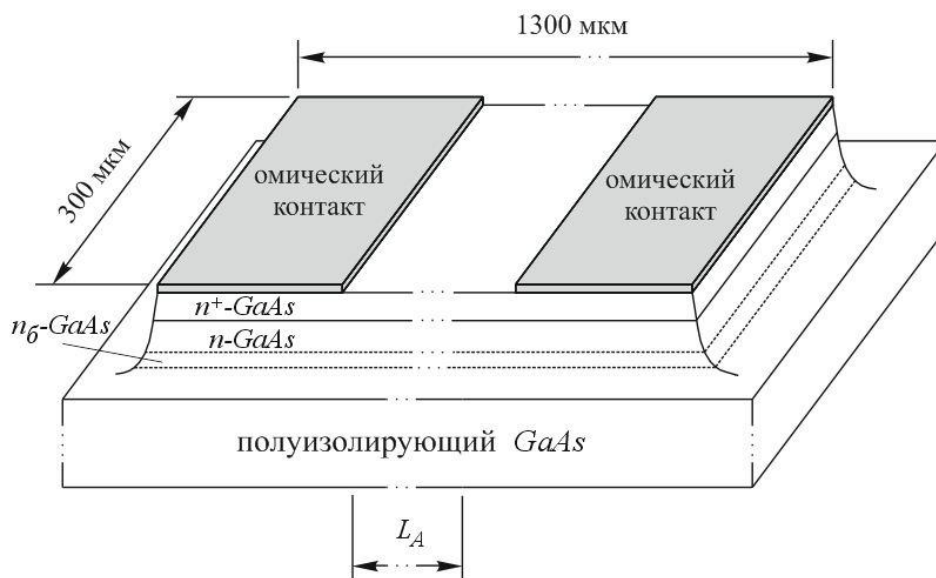


Рис. 1.

На активную область структуры в промежутке между контактными площадками локально наносился защитный слой химически стойкого лака для формирования областей травления требуемой геометрической формы (рис. 2). После этого проводилось последовательное травление незащищенного n^+ -слоя, n -слоя и буферного n_b -слоя в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$ (1:40:1). Контроль глубины травления осуществлялся по времени травления и последующему измерению величины электрического сопротивления структуры.

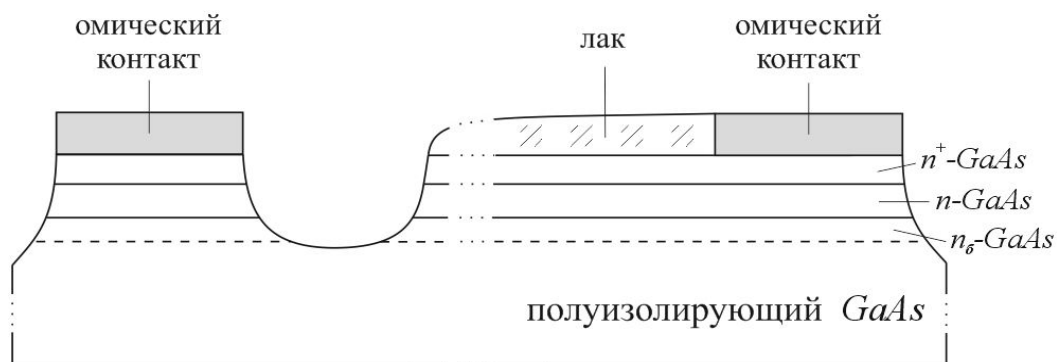


Рис. 2.

С помощью латунных зондов к исследуемой структуре прикладывалось импульсное напряжение (до 300 В), формируемое генератором импульсов ГИ, и усиливается импульсным усилителем У. Напряжение с сопротивления нагрузки R_n (100 Ом), включенного последовательно с исследуемой структурой, подавалось на вход осциллографа О. Схема экспериментальной установки и форма наблюдаемых колебаний приведены на рис. 3. Однородная засветка структуры осуществлялась с использованием лампы накаливания.

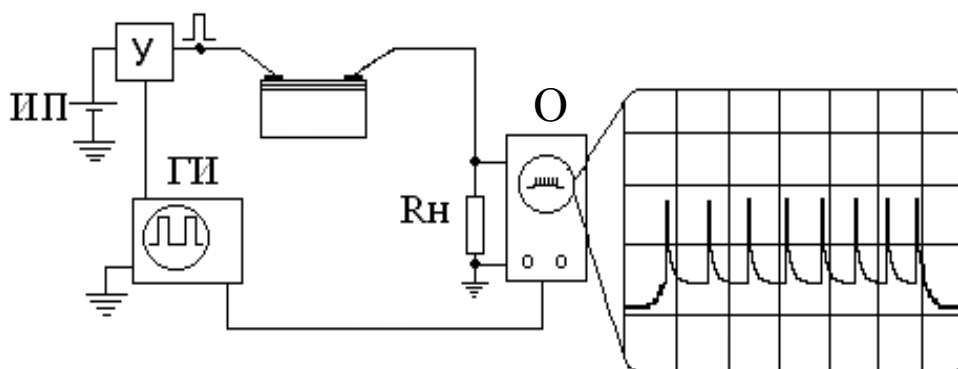


Рис. 3.

Стравленные участки активной области исследуемых структур имели прямоугольную форму и различались длиной и локализацией относительно контактных площадок. Для систематизации результатов экспериментального исследования выделены две группы локализации участков травления.

К первой группе относятся структуры с расположением стравленного участка у одной из контактных площадок. Длина стравленного участка составляла десятую часть, пятую часть, половину и большую часть активной области структуры. Для первой группы образцов характерны следующие особенности возникновения колебаний тока: устойчивые колебания тока возникали на большинстве структур; колебания тока наблюдались только в случае расположения стравленной области у анодного контакта; при увеличении длины стравленного участка (от 20 до 800 мкм) пороговое напряжение возникновения колебаний увеличивалось (от 15 до 200 В), а амплитуда колебаний уменьшалась (от 300 до 10 мВ); частота осцилляций слабо зависела от длины стравленного участка, и находилась в диапазоне 50 – 500 кГц. На небольшом количестве образцов была зафиксирована чувствительность к световому воздействию, проявляющаяся в увеличении частоты генерируемых колебаний тока и уменьшении их амплитуды. Так же было зафиксировано уменьшение частоты и увеличение амплитуды генерируемых колебаний тока при увеличении приложенного напряжения.

Ко второй группе локализации участков травления относятся структуры с расположением стравленного участка возле обоих контактов или в середине активной области. Для второй группы образцов характерны следующие особенности возникновения колебаний тока: устойчивые колебания тока большой амплитуды возникали на большинстве структур; колебания возникали при обеих полярностях прикладываемого напряжения; частота возникающих осцилляций, а так же напряжение возникновения колебаний слабо зависели от локализации стравленного участка в активной области структуры; пороговое напряжение увеличивалось при увеличении совокупной длины стравленных участков.

Также проводилось исследование влияния типа контактов (контакт Me (зонд) – подложка и контакт $Me - n^+ - n - n_{\delta}$ – подложка) и марки исходной пластины (САГ-2БК и САГИС) на формирование устойчивых колебаний тока высокой амплитуды. В ходе данного исследования были получены следующие результаты: 1) при расположении анодного зонда на высокоомной подложке, а катодного – на контакте $Me - n^+ - n - n_{\delta}$ – подложка структуры происходило формирование устойчивых колебаний тока большой амплитуды; 2) формирование устойчивых колебаний тока высокой амплитуды при расположении анодного зонда на контакте $Me - n^+ - n - n_{\delta}$ – подложка структуры, а катодного – на высокоомной подложке происходило либо при значительно меньших межконтактных расстояниях, чем в первом случае, либо при воздействии однородной засветки на межконтактную область; 3) при увеличении расстояния между анодным и катодным контактами в обоих случаях увеличивалось пороговое напряжение возникновения колебаний и уменьшалась амплитуда колебаний, а частота осцилляций слабо зависела от межконтактного расстояния, что согласуется с результатами, полученными для структур первой группы локализации участков травления; 4) все представленные экспериментальные данные получены на структурах, сформированных на пластинах $GaAs$ марки САГ-2БК, при аналогичных экспериментах со структурами, сформированными на пластинах марки САГИС, осцилляции тока возникали в единичных случаях, имели отличную форму, меньшую частоту и амплитуду, что может быть обусловлено отличием примесного состава высокоомных подложек пластин САГИС от пластин САГ-2БК.

В ходе экспериментального исследования были установлены следующие факторы, влияющие на возникновение устойчивых колебаний тока большой амплитуды.

1) Фактором, в наибольшей степени влияющим на возникновение устойчивых колебаний тока большой амплитуды, является длина стравленного участка (расстояние между анодным и катодным контактами). Наиболее высокоамплитудные колебания (300 мВ) при низких пороговых напряжениях возникновения (20 В) характерны для малых длин (порядка 20 мкм).

2) Экспериментально установлено влияние локализации стравленного участка в активной области относительно контактов структуры на возникновение устойчивых колебаний тока большой амплитуды. При несимметричном расположении стравленного участка в активной области структуры колебания тока возникают только в случае его локализации вблизи анодного контакта. При симметричном расположении, а также при расположении участков травления вблизи обоих контактов структуры, колебания тока возникают при любой полярности прикладываемого напряжения.

3) Исследование влияния типа контактов и марки исходной пластины позволило установить, что возникновение устойчивых осцилляций тока с наибольшей амплитудой характерно для структур, сформированных на пластинах марки САГ-2БК при условии, что катодным является контакт типа $Me - n^+ - n - n_{\delta}$ – подложка. Эксперименты, проведенные на структурах, сформированных на пластинах марки САГИС, показали, что возникновение устойчивых осцилляций тока высокой амплитуды происходит в

единичных случаях; колебания имеют форму, отличную от формы колебаний, наблюдаемых в структурах на основе пластин марки САГ-2БК, и характеризуются меньшей частотой и амплитудой.

На основе анализа результатов проведенного экспериментального исследования с большой долей вероятности можно утверждать, что физические процессы, обуславливающие возникновение устойчивых низкочастотных колебаний тока большой амплитуды в исследуемых структурах, протекают в полуизолирующей подложке в непосредственной близости от одного из контактов структуры.

Библиографический список

1. Гуляев Ю.В. Акустоэлектроника: (исторический обзор) // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 8. С. 887–895.
2. Шука А.А. Функциональная электроника // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 5–6. С. 149–168.
3. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977. 562 с.
4. Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С. Эффект Ганна. М.: Сов. радио, 1975. 288 с.
5. Шур М.С. Современные приборы на основе арсенида галлия / Пер. с англ.; Под ред. М.Е. Левинштейна. М.: Мир, 1991. 632 с.
6. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М.: Наука, 1972. 416 с.
7. Neumann A. Slow domains in semi-insulating GaAs // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. № 1. P. 1–26.
8. Муравский Б.С., Черный В.Н., Яманов И.Л., Потапов А.Н., Жужа М.А. Неравновесные электронные процессы в транзисторных структурах с туннельно-прозрачным окислом // Микроэлектроника. 1989. Т. 18. № 4. С. 304-309.
9. Михайлов А.И., Митин А.В. Экспериментальное исследование спектра колебаний тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах арсенида галлия в условиях засветки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 4. С. 87-91.