

А.И. Михайлов, А.В. Митин, И.О. Кожевников
ФГБОУ ВПО "Саратовский государственный университет
имени Н.Г.Чернышевского"

Многочастотная генерация в параллельных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия

В работе представлены результаты экспериментального исследования разработанного варианта параллельных планарно-эпитаксиальных структур на основе высокоомного арсенида галлия. Экспериментально обнаружены многочастотная генерация и сложение колебаний в единой последовательной нагрузке.

Ключевые слова: рекомбинационная неустойчивость тока, полуизолирующий арсенид галлия, отрицательная дифференциальная проводимость, функциональная электроника

Известно, что многие полупроводниковые материалы, применяемые в СВЧ электронике, являются нелинейными активными средами благодаря проявлению в них различных нелинейных физических эффектов. В качестве примера такой среды выступает арсенид галлия, в котором в сильных электрических полях вследствие междолинного переноса электронов возможно возникновение неустойчивости тока (эффект Ганна). Этот эффект нашел широкое применение в усилителях и генераторах сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Кроме того, в высокоомном арсениде галлия возможен и принципиально иной механизм неустойчивости тока, обусловленной увеличением с напряженностью электрического поля сечения захвата свободных электронов примесными центрами, создающими глубокие уровни в запрещенной зоне полупроводника (рекомбинационная неустойчивость тока) [1]. Наблюдаемые в этом случае колебания тока отличаются от ганновских пороговой напряженностью электрического поля и существенно меньшей (на несколько порядков) меньшей частотой [1]. Захват электронов может оказывать сильное влияние на параметры и характеристики твердотельных СВЧ приборов, создаваемых на основе таких материалов [2]. Исследование особенностей проявления этого физического механизма и обусловленной им рекомбинационной неустойчивости тока в различных полупроводниковых структурах в условиях воздействия разнообразных физических факторов (свет, температура, электрическое поле и т.д.) является актуальной задачей не только для СВЧ, но и функциональной электроники, поскольку установление закономерностей нелинейной динамики неоднородностей электрического поля, возникающих в структурах при развитии неустойчивости, может расширить функциональные возможности создаваемых на их основе устройств.

Ранее [3,4] было показано, что в длинных (с длиной активной области от 300 до 1000 мкм) высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия возможно наблюдение отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) и соответствующих низкочастотных (с частотой от единиц кГц до единиц МГц) осцилляций тока, параметры которых в существенной степени определяются величиной постоянного приложенного напряжения, интенсивностью и локализацией засветки электромагнитным излучением из диапазона длин волн, соответствующих собственному поглощению арсенида галлия, и рядом других факторов. Теоретический анализ, проводимый, в том числе, на

основе локально-полевой математической модели [5,6], указывает на то, что возникновение колебаний тока в исследуемых структурах может происходить вследствие развития в структуре рекомбинационной неустойчивости.

В дальнейших экспериментальных исследованиях [7,8] были выявлены ключевые факторы, обуславливающие возникновение в таких структурах устойчивых низкочастотных колебаний тока большой амплитуды (с КПД порядка нескольких процентов). В частности, было установлено, что наиболее высокоамплитудные колебания (200 мВ на нагрузке 100 Ом) при низких пороговых напряжениях возникновения (20 В) характерны, во-первых, для малых эффективных расстояний L_A (порядка 20 мкм) между контактами, во-вторых, для структур, сформированных на пластинах марки САГ-2БК, и, в-третьих, при условии, что катодным является контакт типа $Me - n^+ - n - n_0$ - подложка, анодным контактом при этом может являться прижимной латунный контакт (зонд на рис. 1.).

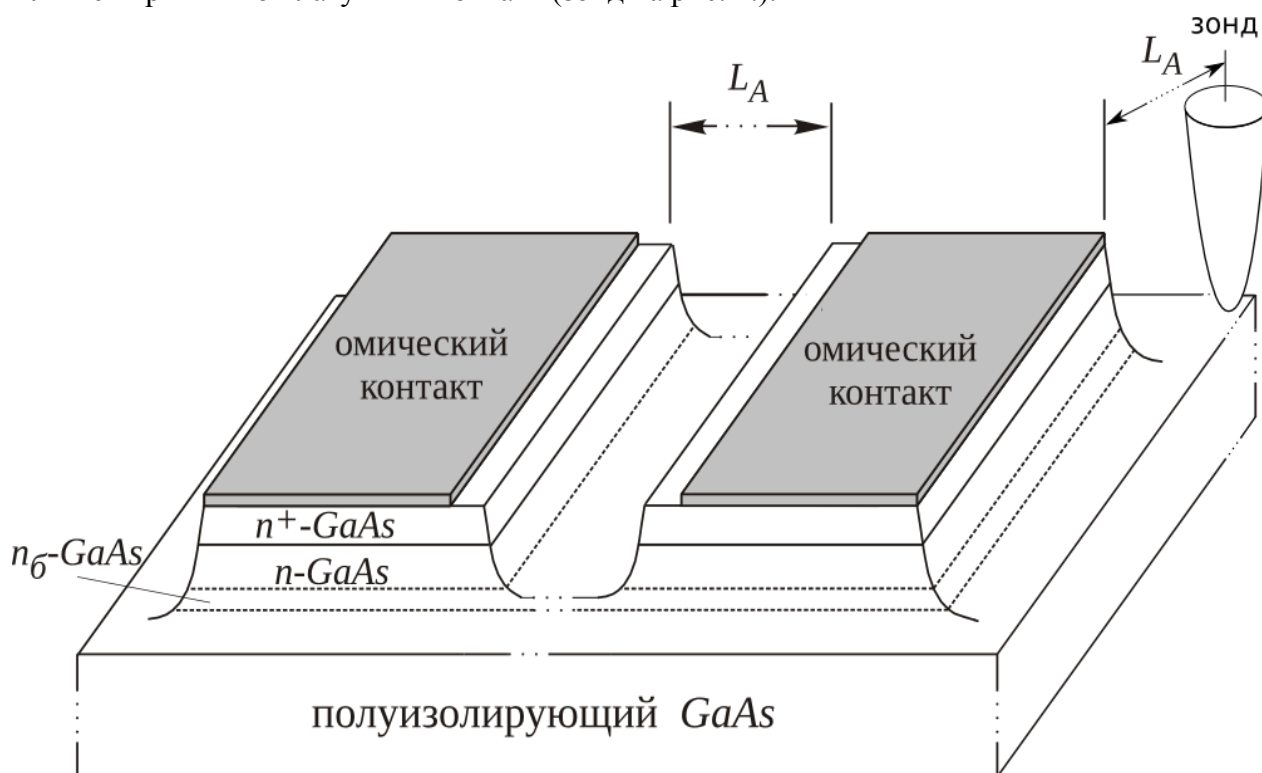


Рисунок 1

В этой работе обсуждаются результаты исследования планарно-эпитаксиальных мезоструктур, разработанных с учетом полученных ранее экспериментальных данных [7,8]. На рис. 2. схематически представлена топология разработанного образца и указаны его основные параметры. Образцы изготавливались на эпитаксиальных структурах марки САГ-2БК (рис. 1.), представляющих собой последовательно сформированные на полуизолирующей подложке (толщиной 400 мкм) из арсенида галлия эпитаксиальные слои: буферный слой n_0 -GaAs с концентрацией электронов $n_0 < 10^{14} \text{ см}^{-3}$, активный слой n -GaAs ($n = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $d = 0,3 \text{ мкм}$) и контактный слой n^+ -GaAs ($n^+ = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $d^+ = 0,2 \text{ мкм}$, где n и n^+ - концентрации свободных электронов, d и d^+ - толщины слоев).

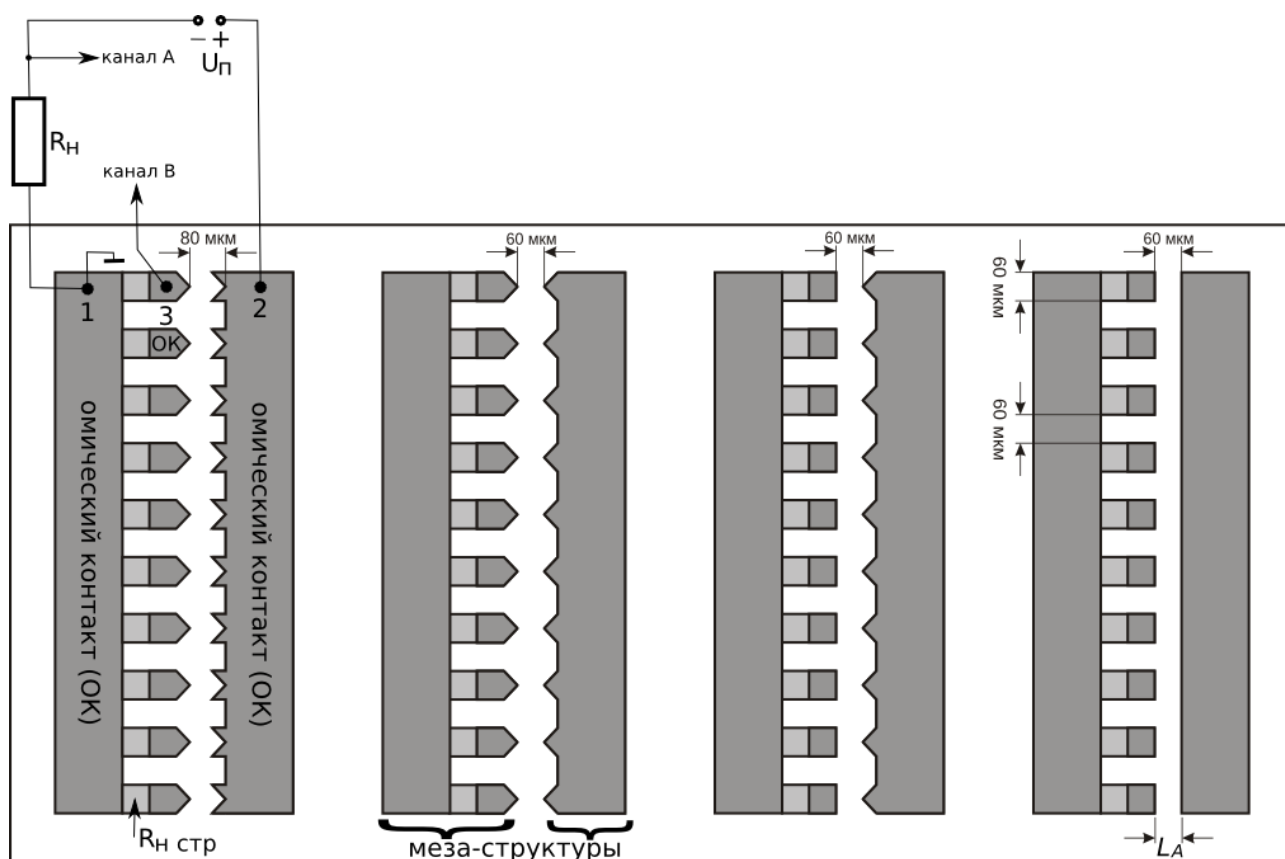


Рисунок 2

На образце создавалось по 4 элемента, каждый из которых представлял собой две сформированные меза-структуры с омическими контактами различной формы и токопроводящие промежутки между ними. Широкие омические контакты элемента предназначались для приложения внешнего постоянного напряжения и выполняли роль шин питания (положения 1 и 2 на рис. 2.), а высокоомные токопроводящие промежутки между десятью парами встречных параллельных омических контактов элемента (положения 2 и 3 на рис. 2.) формировали его отдельные структуры с длиной активной области L_A . Промежутки элемента между омическими контактами, соответствующими положениям 1 и 3 на рис. 2., выполняли роль нагрузочных сопротивлений $R_{н \text{ стр}}$ для отдельных структур элемента. Межэлементная изоляция обеспечивалась на этапе формирования меза-структур. Омические контакты к n^+ -GaAs создавались на основе $AuGe/Ni/Au$. После формирования элементов полуизолирующая подложка утоньшалась на 100 мкм и создавался тыловой контакт на основе $AuGe/Ni/Au$.

Исследования динамики тока элемента и его отдельных структур проводились с использованием схемы, представленной на рис. 2. Сопротивления R_n (100 Ом) и $R_{н \text{ стр}}$ использовались в качестве датчиков тока всего элемента и его отдельных структур соответственно. Напряжения с этих сопротивлений подавались на вход двухлучевого запоминающего осциллографа (соответственно каналы А и В). Приложение постоянного напряжения к элементу и снятие сигналов с $R_{н \text{ стр}}$ осуществлялось с помощью прижимных вольфрамовых зондов.

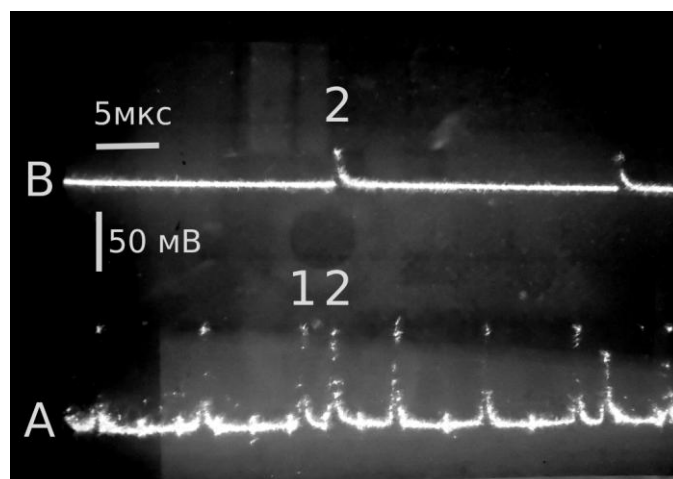


Рисунок 3

Исследования динамики тока позволили установить, что в элементе возможно одновременное существование нескольких колебательных мод, обусловленных развитием сразу в нескольких структурах элемента рекомбинационной неустойчивости тока. Представленные на рис. 4 осциллограммы (при постоянном приложенном напряжении $U_0 = 29.3$ В) для элемента первого типа (крайний слева на рис. 2), свидетельствуют о том, что одна (2) из двух возникающих в элементе колебательных мод (сигнал с канала А) обусловлена неустойчивостью тока, проявляющейся в девятой структуре ($R_{н\text{ стр}} = 135$ Ом) элемента (сигнал с канала В). Другая мода (1) обуславливалась генерацией в четвертой структуре элемента.

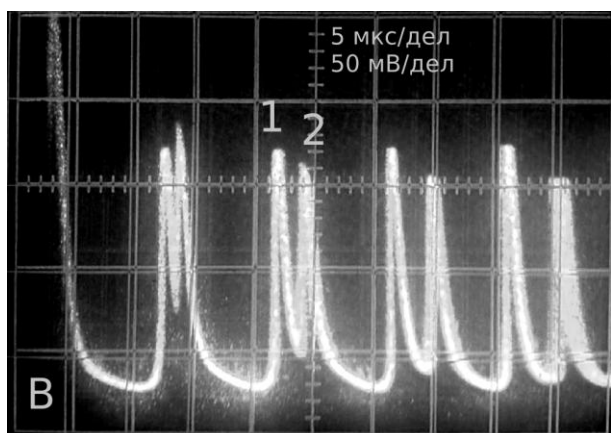


Рисунок 4

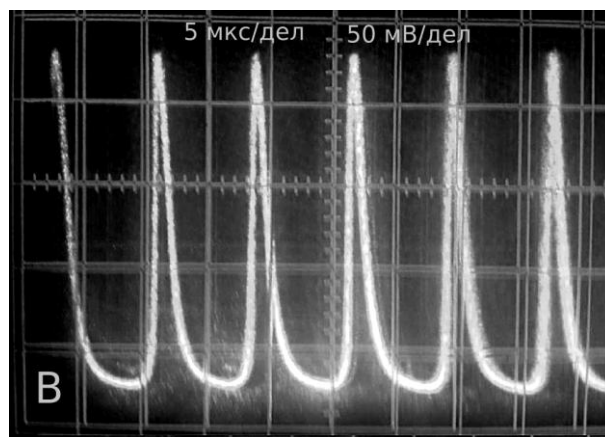


Рисунок 5

Частоты возникающих колебаний тока в существенной степени определяются величиной постоянного приложенного к элементу напряжения и интенсивностью однородной засветки его активной области (от лампы накаливания). Эти результаты согласуются с полученными ранее данными [3,4,8].

Экспериментально установлено, что разные колебательные моды характеризуются отличающимися пороговыми напряжениями возникновения и зависимостями частоты от указанных параметров, что, скорее всего, связано с технологическим разбросом параметров структур отдельного элемента. На рис. 4, 5. приведены осциллограммы при двух интенсивностях однородной засветки активной области элемента. При меньшей интенсивности засветки (рис. 4.) моды оказываются рассогласованными по фазе. При

увеличении интенсивности засветки увеличение частот каждой из мод происходит с разной скоростью (частота первой моды увеличивается медленнее, чем частота второй), что уменьшает их относительное фазовое рассогласование. При некотором значении интенсивности это приводит к полному совпадению фаз и частот колебаний, генерируемых двумя различными структурами элемента, и их сложению в результирующее колебание с большей амплитудой (рис. 5).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что возникающие колебания обусловлены развитием неустойчивостей тока в отдельных структурах элемента, и не связаны с возбуждением элементом внешней схемы. Разработанный вариант планарно-эпитаксиальных структур можно рассматривать в качестве перспективного функционального элемента для создания позиционно-чувствительного фотоприемника.

Библиографический список

1. Neumann A. Slow domains in semi-insulating GaAs / A. Neumann // – J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 90. – № 1. – pp. 1–26.
2. Костылев С.А. Влияние полуизолирующей подложки на параметры арсенидгаллиевых полевых транзисторов с барьером Шоттки / С.А. Костылев, Е.Ф. Прохоров, А.Т. Уколов // – Обзоры по электронной технике. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1986. – 40 с.
3. Михайлов А.И. Низкочастотные колебания тока в длинных планарных высокоомных структурах арсенида галлия / А.И. Михайлов, А.В. Митин // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды IX международной конференции. – Ульяновск: УлГУ. – 2007. – С. 85.
4. Михайлов А.И. Экспериментальное исследование спектра колебаний тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах арсенида галлия в условиях засветки / А.И. Михайлов, А.В. Митин // – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14. – № 4. – С. 87-91.
5. Михайлов А.И. Исследование влияния концентрации глубоких примесных уровней на возникновение устойчивых рекомбинационных и ганновских колебаний тока в длинных высокоомных структурах n^+-n^- - n^+ -GaAs / А.И. Михайлов, А.В. Митин, А.И. Терентьева // Микроэлектроника СВЧ. Всероссийская конференция. – Санкт-Петербург. СПбГЭТУ. 4-7 июня 2012. – Сборник трудов конференции. – Том 2. – С. 322-326.
6. Михайлов А.И. Математическое моделирование рекомбинационных неустойчивостей тока в длинных высокоомных структурах арсенида галлия в условиях локальной засветки / А.И. Михайлов, А.В. Митин, А.И. Терентьева // Физика и технические приложения волновых процессов: труды XI Международной научно-технической конференции / под общ. ред. Ю.Е. Мительмана. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С.180-183.
7. Михайлов А.И. Исследование влияния различных факторов на возникновение устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия / А.И. Михайлов, А.В. Митин, И.О. Кожевников // X Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов»: материалы. – Самара: ООО «Книга», 2011 – С. 128-130.
8. Михайлов А.И. Особенности возникновения устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия / А.И. Михайлов, А.В. Митин, И.О. Кожевников // Микроэлектроника СВЧ. Всероссийская конференция. – Санкт-Петербург. СПбГЭТУ. 4-7 июня 2012. – Сборник трудов конференции. – Том 1. – С. 49-53.