

МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКЕ

Щеглов С.С., Копылова Н.А.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Копылов А.Ф.

Сибирский федеральный университет

В работе представлены результаты численного моделирования универсального элемента для сверхвысокочастотных (СВЧ) твердотельных микро- и наносхем – управляемой микрополосковой линии (УМПЛ) на полупроводниковой подложке. Линия выполнена на полупроводниковой подложке из арсенида галлия или кремния с активным слоем полупроводника n -типа. Изменение электрофизических параметров активного полупроводникового слоя под действием внешнего электрического поля приводит к управлению характеристиками распространяющейся в линии передачи электромагнитной СВЧ волны.

На рис. 1 показан моделируемый отрезок УМПЛ (а) и его эквивалентная схема (б).

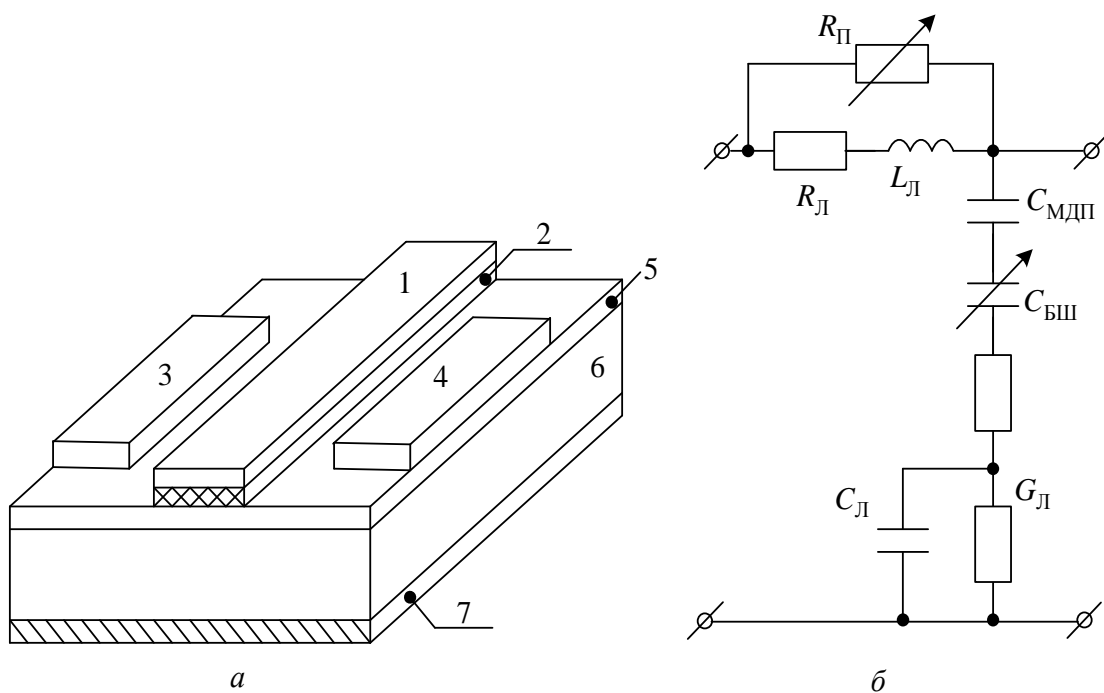


Рис. 1. Моделируемый отрезок УМПЛ (а) и его эквивалентная схема (б)

На рис.1 а обозначены: отрезок микрополосковой линии передачи 1, образующий к активному полупроводниковому n -слою арсенида галлия или кремния либо контакт Шоттки, либо МДП-структуру 2; омические управляющие контакты 3 и 4 сформированные на активном n -слое полупроводника 5, который выполнен на полупроводниковой подложке 6, имеющей металлизацию 7 своей обратной стороны.

На рис. 1 б показана эквивалентная схема УМПЛ, которая представляет собой комбинацию эквивалентной схемы обычной микрополосковой линии передачи (МПЛ) и подключенных к ней элементов, обусловленных наличием активного полупроводникового слоя. Параметры обычной линии передачи без активного

полупроводникового слоя обозначены как $L_{\text{л}}$, $C_{\text{л}}$, $G_{\text{л}}$, $R_{\text{л}}$ (погонные индуктивность, емкость, проводимость потерь и сопротивление потерь МПЛ, соответственно). Погонные параметры, обусловленные наличием полупроводникового активного слоя, имеют следующие обозначения: $R_{\text{л}}$ – погонное сопротивление активного слоя полупроводника под полоской линии передачи в направлении, совпадающем с направлением распространения электромагнитной волны в УМПЛ; $C_{\text{МДП}}$ – емкость МДП – структуры под полоской линии передачи; $C_{\text{ПАР}}$ – ёмкость активного слоя полупроводника под полоской линии передачи, обусловленная областью пространственного заряда под линией; $R_{\text{ПАР}}$ – погонное сопротивление активного слоя полупроводника под полоской линии передачи в направлении, перпендикулярном направлению распространения СВЧ волны, обусловленное неполным перекрытием проводящей части активного полупроводникового слоя областью пространственного заряда под полоской линии.

Кратко принцип работы УМПЛ можно изложить следующим образом. При изменении управляющего напряжения $U_{\text{УПР}}$ между омическими контактами 3 и 4 изменяются параметры среды распространения электромагнитной волны в активном слое полупроводника 5 линии и появляется возможность управления этими параметрами и, соответственно, характеристиками распространения сигнала в линии. Изменение параметров среды распространения в активном слое полупроводника моделируется параметрами $R_{\text{л}}$, $C_{\text{ПАР}}$, $R_{\text{ПАР}}$ эквивалентной схемы УМПЛ рис. 1 б. При этом, как видно из эквивалентной схемы, если обеспечить преимущественное изменение сопротивления активного полупроводникового слоя в направлениях продольном $R_{\text{л}}$ и поперечном $R_{\text{ПАР}}$ направлению распространения электромагнитной волны в линии при относительно слабом изменении емкости $C_{\text{ПАР}}$, то отрезок УМПЛ должен реализовать аттенуатор с относительно небольшим изменением фазы, и, наоборот, при преимущественном изменении емкости $C_{\text{ПАР}}$ и относительно небольших вариациях $R_{\text{л}}$ и $R_{\text{ПАР}}$ следует ожидать, что отрезок УМПЛ будет представлять преимущественно вариатор фазочастотных характеристик (ФЧХ) и частотных характеристик группового времени запаздывания (ГВЗ) при относительно небольшом изменении амплитуды проходящего через отрезок УМПЛ СВЧ сигнала.

Для численного анализа характеристик УМПЛ был создан соответствующий пакет прикладных программ, позволяющий моделировать параметры линии и исследовать её свойства.

Принятый к моделированию отрезок УМПЛ представляет собой полосковую линию длиной 7 миллиметров, сформированную на активном слое арсенида галлия с равновесной концентрацией носителей заряда $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью носителей заряда в слабых электрических полях $\mu_0 = 3,5 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Толщина активного n -слоя принята равной 10 мкм. Линия отделена от входного и выходного СВЧ разъёмов зазорами, ёмкость которых при моделировании принята равной 1 пФ. Волновое сопротивление УМПЛ составляет около 50 Ом (ширина полоски линии принята 280 мкм при толщине подложки 300 мкм и относительной диэлектрической проницаемости подложки $\epsilon = 13$). Таким образом, на определенных частотах моделируемый отрезок УМПЛ может представлять собой резонатор, свойства которого могут существенно исказить картину происходящих в отрезке УМПЛ физических процессов. Для того, чтобы избежать влияния резонансных эффектов, мы приняли частотный диапазон моделирования параметров и характеристик отрезка УМПЛ равным 5-7 ГГц (первая

резонансная частота отрезка длиной 7 мм при $\epsilon=13$, если этот отрезок считать полуволновым резонатором, составляет около 3,6 ГГц). Сопротивления нагрузки и генератора были приняты равными стандартному значению 50 Ом.

На рис. 2 показана электрическая эквивалентная схема промоделированного отрезка УМПЛ.

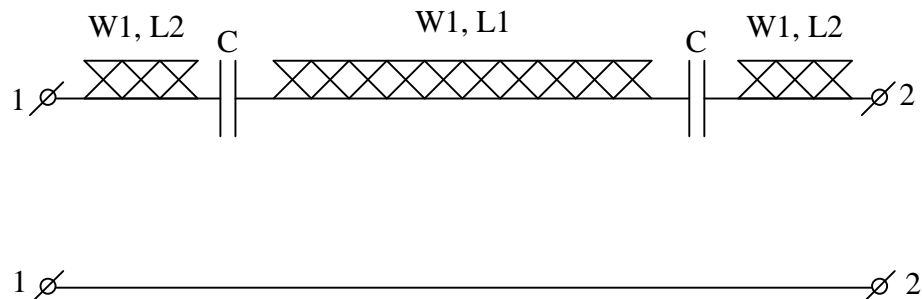


Рис. 2. Электрическая эквивалентная схема промоделированного отрезка УМПЛ.

На рис. 2 обозначены: $W1, L1$ – принятый к моделированию отрезок УМПЛ, обладающий волновым сопротивлением $W1=50$ Ом и длиной $L1=7$ мм; $W1, L2$ – входной и выходной отрезки микрополосковой линии передачи волновым сопротивлением также $W1=50$ Ом и длиной $L2=2$ мм, предназначенные для подключения входного и выходного СВЧ разъёмов; C – ёмкость зазоров между входным и выходным отрезками микрополосковой линии передачи и моделируемым отрезком УМПЛ, принятая равной 1 пФ каждая.

Были промоделированы следующие характеристики УМПЛ: амплитудно-частотная характеристика, представляющая собой АЧХ коэффициента передачи мощности K_p ; фазочастотная характеристика, представляющая собой частотную зависимость фазы коэффициента передачи проходящего через отрезок линии сигнала (ФЧХ коэффициента передачи мощности ϕ_{K_p}) в диапазоне частот от 5 до 7 ГГц при двух значениях управляющего напряжения – нулевом $U_{упр}=0$ и напряжении насыщения $U_{упр}=U_s$ активного канала линии, а также частотные зависимости активной составляющей α комплексной константы распространения $\gamma = \alpha + j\beta$ и фазовой постоянной β также при двух напряжениях – нулевом $U_{упр}=0$ и напряжении насыщения $U_{упр}=U_s$. Напряжение насыщения U_s определяется так же, как и для полевых транзисторов. Постоянное напряжение управления прикладывается между омическими контактами 3 и 4, а СВЧ сигнал подается между полоской УМПЛ 1 и металлизированным основанием структуры 7.

На рис. 3 представлены результаты моделирования АЧХ коэффициента передачи мощности K_p при $U_{упр}=0$ (штриховая кривая 1) и при $U_{упр}=U_s$ (сплошная кривая 2) в диапазоне частот от 5 до 7 ГГц. Как видно из полученных АЧХ, при обоих напряжениях на УМПЛ наблюдается рост величины K_p с увеличением частоты, что свидетельствует о приближении текущего значения частоты к резонансному значению, составляющему около 7,2 ГГц на волновом резонансе отрезка УМПЛ. При $U_{упр}=U_s$ на контактах 3 и 4 УМПЛ величина K_p растет.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования ФЧХ коэффициента передачи мощности ϕ_{K_p} при $U_{упр}=0$ (штриховая кривая 1) и при

$U_{\text{упр}} = U_S$ (сплошная кривая 2) также в диапазоне частот от 5 до 7 ГГц. Как показывают кривые 1 и 2, с увеличением напряжения на омических контактах УМПЛ происходит уменьшение фазы коэффициента передачи по мощности УМПЛ φ_{K_p} . С ростом частоты величина фазы φ_{K_p} уменьшается.

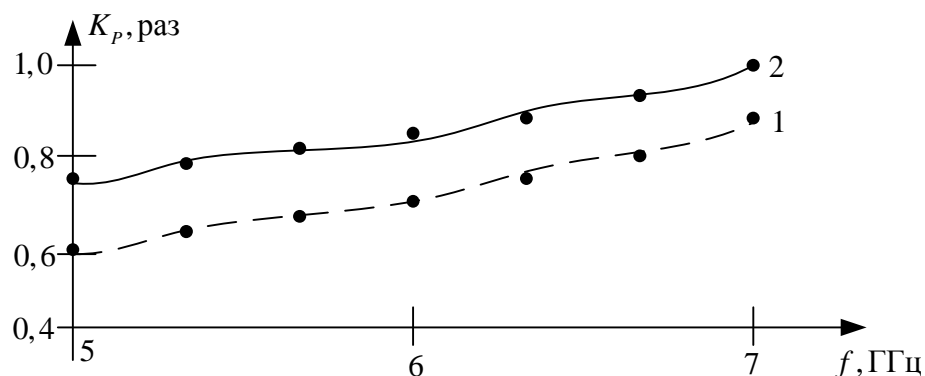


Рис. 3. АЧХ коэффициента передачи мощности K_p отрезка УМПЛ: 1 – при $U_{\text{упр}} = 0$, 2 – при $U_{\text{упр}} = U_S$

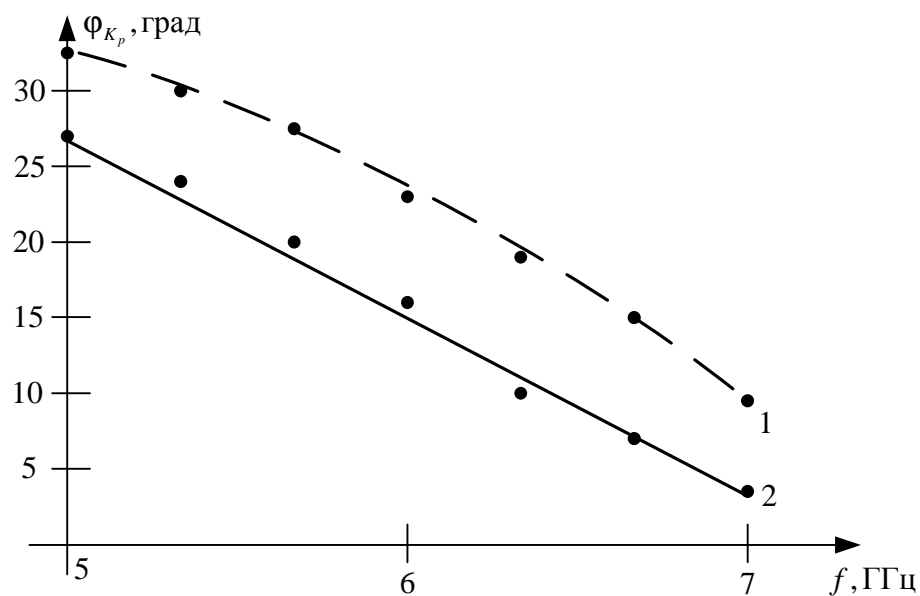


Рис. 4 ФЧХ коэффициента передачи мощности φ_{K_p} отрезка УМПЛ: 1 – при $U_{\text{упр}} = 0$, 2 – при $U_{\text{упр}} = U_S$

На рис. 5 показаны частотные зависимости величины α для тех же частот 5-7 ГГц и при тех же напряжениях управления: штриховая кривая 1 – при $U_{\text{упр}} = 0$, сплошная кривая 2 – при $U_{\text{упр}} = U_S$.

На рис. 6 приведены частотные зависимости фазовой постоянной β для того же отрезка УМПЛ для тех же, что и ФЧХ, частот.

Анализ полученных частотных зависимостей величин K_p , φ_{K_p} , α , β показывает следующие тенденции в поведении этих зависимостей: увеличение величины коэффициента передачи по мощности отрезка УМПЛ K_p с ростом частоты и уменьшение с ростом частоты величины затухания в этом отрезке α , свидетельствующие о приближении этих кривых к резонансной частоте, ожидаемой на частоте 7,2 ГГц; уменьшение величины фазы коэффициента передачи по мощности φ_{K_p} с ростом частоты, свидетельствующее о том, что реактивное сопротивление разделительных ёмкостей C (см. рис. 2) уменьшается с частотой, а также подтверждающее, что ФЧХ φ_{K_p} приближается к резонансной частоте 7,2 ГГц; величина фазовой постоянной УМПЛ β , растущая с увеличением частоты.

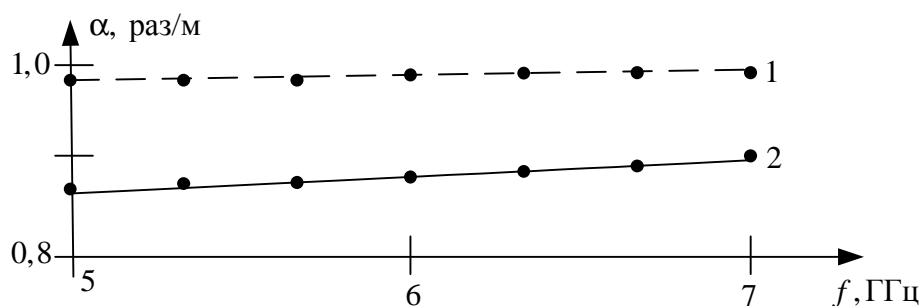


Рис. 5. Погонное затухание α отрезка УМПЛ: 1 – при $U_{\text{УПР}} = 0$, 2 – при $U_{\text{УПР}} = U_S$

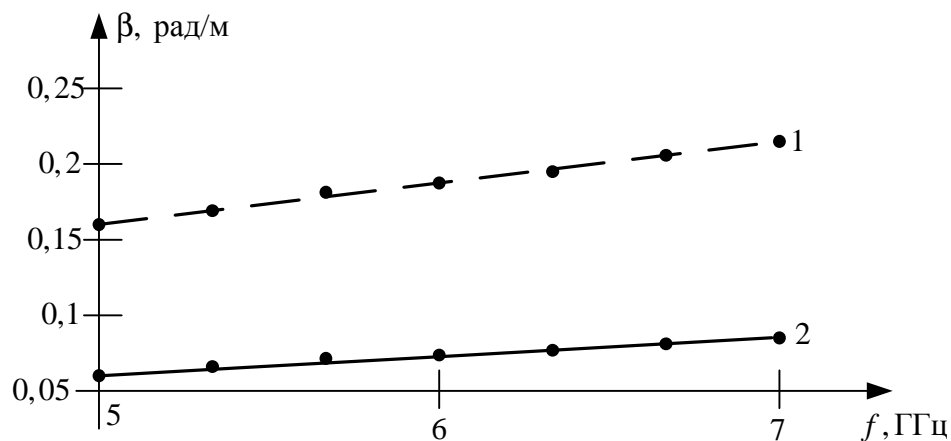


Рис. 6. Фазовая постоянная β отрезка УМПЛ: 1 – при $U_{\text{УПР}} = 0$, 2 – при $U_{\text{УПР}} = U_S$

Таким образом, парадоксальный, на первый взгляд, результат по поведению частотных характеристик φ_{K_p} (падает с ростом частоты) и β (увеличивается с ростом частоты), оказывается совершенно естественным – величина φ_{K_p} уменьшается с ростом частоты из-за уменьшения реактивного сопротивления ёмкостей C , а величина β увеличивается с ростом частоты из-за увеличения набега фазы в УМПЛ. В то же время, при увеличении напряжения между управляющими омическими контактами УМПЛ происходит увеличение коэффициента передачи по мощности K_p и уменьшение

погонных потерь α из-за роста сопротивления R_{Π} и уменьшения сопротивления $R_{\Pi AP}$ с одновременным уменьшением ёмкости $C_{\text{БШ}}$ (см. рис. 1 б).