

Автоматизированный расчет оптических приемников и трансимпедансных усилителей на основе символьного анализа

М.В. Черкашин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Аннотация. В докладе представлена программа для автоматизированного расчета интегральных СВЧ оптических приемников (ОПрм) и трансимпедансных усилителей (ТИУ), выполненных на основе полевых КМОП-транзисторов. Алгоритм работы программы основан на применении алгоритмов компьютерного символьного анализа и моделей фотодиода и КМОП-транзисторов в виде эквивалентных схем.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, символьный анализ, трансимпедансный усилитель, оптический приемник, КМОП-транзистор.

1. Введение

Современные интегральные оптические приемники (ОПрм), используемые в волоконно-оптических линиях связи, могут иметь полосу пропускания до нескольких десятков ГГц. Поэтому для их расчета требуется применение методов СВЧ схемотехники и моделирования. Основными компонентами входного каскада ОПрм являются фотодиод (ФД) и интегральная схема трансимпедансного усилителя (ТИУ), которые могут быть выполнены в виде отдельных чипов и при гибридной интеграции объединяются в общем корпусе с помощью соединительных элементов, например, в виде разварочных проволочек [1-3]. На СВЧ параметры этих элементов оказывают заметное влияние на характеристики ОПрм.

При расчете ТИУ для расширения полосы пропускания часто используются схемы каскадов на основе применения цепей отрицательных обратных связей (ООС) и элементов высокочастотной коррекции [1-3]. Существующие методы расчета таких усилителей, как правило, базируются на моделях активных элементов в виде упрощенных ЭС [1-3] и простых аналитических выражениях, что не обеспечивает заданной точности на высоких частотах и требует в дальнейшем применения процедур параметрической оптимизации.

В [4, 5] были предложены методики анализа и проектирования СВЧ ТИУ, базирующиеся на совместном применении компьютерного символьного анализа и линейных моделей транзисторов в виде эквивалентных схем (ЭС). В качестве основы для символьного анализа используется метод узловых потенциалов, а получение символьных (аналитических) выражений для характеристик ТИУ выполняется с помощью методов компьютерной алгебры. В [4] показано, что такой подход дает возможность исследовать влияние различных параметров схемы на характеристики усилителя, включая его устойчивость, а также помогает выбрать конструкцию и размер КМОП-транзисторов. В [5] на основе метода Г.В. Брауде [6, 7] была предложена методика расчета корректирующих элементов усилительного каскада ТИУ выполненного в виде КМОП-инвертора для получения максимально-плоской амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) трансимпеданса. Однако в [4, 5] процедуры символьного анализа и расчета схем ТИУ были реализованы в среде математического пакета MathCAD, кроме того в них не учитывается наличие

соединительных элементов между ФД и ТИУ, а сам ФД представлен только в виде емкости закрытого p-n-перехода. Все это не позволяет выполнить расчет входного каскада ОПрм с учетом соединения между ФД и ТИУ и учесть паразитные параметры ФД.

С целью устранения указанного недостатка была разработана программа SYMATIA (Symbolic Analysis of Trans-Impedance Amplifiers) для анализа и автоматизированного расчета интегральных ОПрм и ТИУ, выполненных на основе КМОП-транзисторов. Программа реализована в системе для научных и математических расчетов MATLAB. Она позволяет для выбранной схемы каскада усилителя автоматически получить символьные выражения для основных сигнальных характеристик ТИУ с учетом ФД, а также определить значения элементов схемы, отвечающие заданным значениям трансимпеданса или полосы пропускания при обеспечении максимально-плоской формы АЧХ или равномерного значения группового времени запаздывания (ГВЗ).

2. Описание программы

Эквивалентная схема рассчитываемого ОПрм, включающего ФД, усилительный каскад ТИУ и элементы их соединения, показана на рис. 1,а. Фотодиод в схеме описывается следующими элементами: I_{PD} – источник фототока; C_{PD} – емкость ФД; G_{PD} – сумма проводимости обратно смещенного ФД и проводимости резистора, через который на диод подается напряжение смещения; R_C – сумма омического сопротивления контактной области ФД (R_{PDc}) и омического сопротивления соединительного элемента (R_{sc}); L_C – индуктивность соединительного элемента.

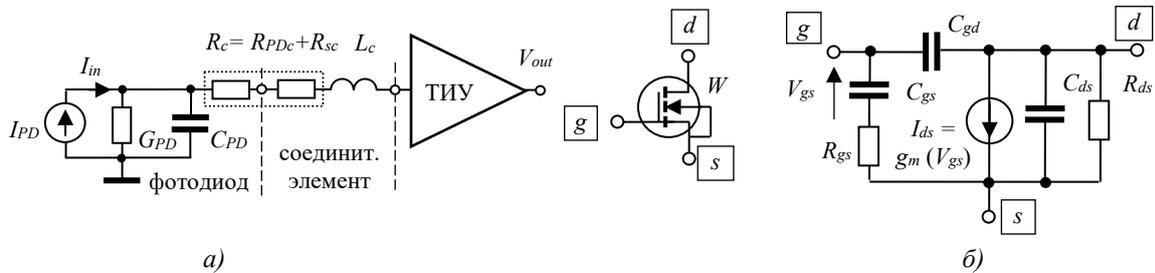


Рисунок 1. Эквивалентная схема ОПрм (а) и эквивалентная схема КМОП-транзистора (б)

Программа SYMATIA позволяет рассчитать как ОПрм на рис. 1,а, так и отдельный усилительный каскад ТИУ (без ФД). В последнем случае нужно принять $G_{PD} = 0$ и $R_{PDc} = 0$, однако при этом в случае необходимости элементы C_{PD} , $R_C = R_{sc}$ и L_C могут моделировать соответственно паразитную емкость входной контактной площадки, сопротивление и индуктивность соединения с внешней схемой.

КМОП полевые транзисторы (ПТ) в программе представлены стандартной эквивалентной схемой (ЭС) [1-3] – см рис. 1,б. Пользователь может задать модель ПТ как через значения элементов ЭС (R_{gs} , R_{ds} , C_{gs} , C_{gd} , C_{ds} , g_{m0}) в выбранной рабочей точке по постоянному току, так и через общую ширину затвора ПТ W . При изменении W значения элементов ЭС будут автоматически пересчитаны.

В настоящее время в программе SYMATIA в качестве усилительного каскада ТИУ может быть выбрана одна из трех типовых схем, часто применяемых на практике при построении ОПрм [1-3]: а) каскад на одном ПТ с общим истоком (ОИ), б) каскад на основе КМОП-инвертора, выполненный на двух ПТ с разным типом проводимости, в) каскад на двух ПТ включенных по схеме ОИ-общий сток (ОС) – см. рис. 2.

В программе реализованы два режима расчета – анализ и синтез. Входными данными для программы в обоих режимах являются: 1) тип схемы усилительного

каскада ТИУ; 2) параметры ЭС КМОП ПТ; 3) параметры моделей фотодиода и соединения с ТИУ (C_{PD} , G_{PD} , R_c , L_c); 4) сопротивления резисторов R_1 и R_2 , обеспечивающих смещение по постоянному току.

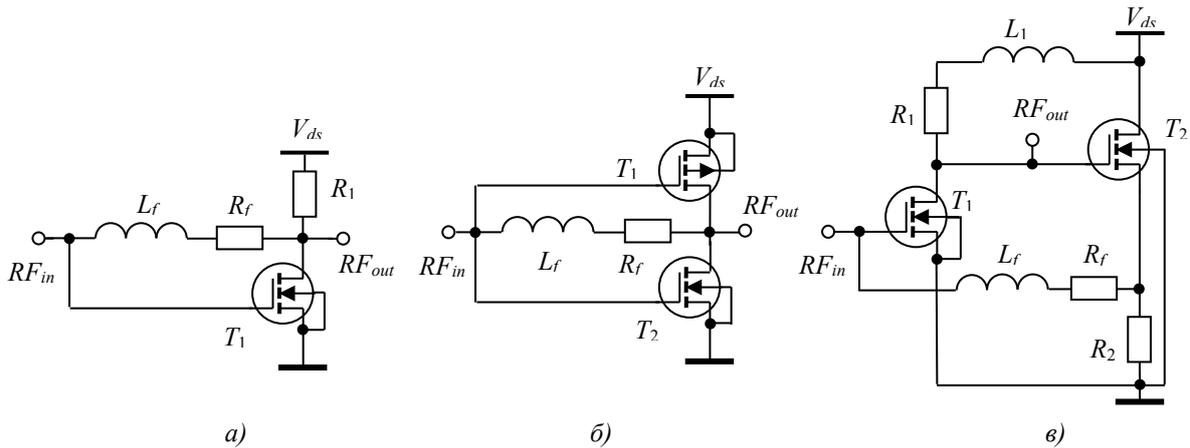


Рисунок 2. Типовые схемы усилительных каскадов ТИУ: каскад на ПТ с ОИ (а); КМОП-инвертор на двух ПТ с разной проводимостью (б); каскад на двух ПТ включенных по схеме ОИ-ОС (в)

В режиме **анализа** (символьного и численного моделирования) нужно также задать значения элементов цепи ООС (R_f и L_f) и элемент ВЧ-коррекции – индуктивность L_1 . По этим данным программа рассчитывает и выводит графики частотных характеристик ОПРм или ТИУ (АЧХ, ФЧХ и ГВЗ) для трансимпеданса Z_T и коэффициента усиления по напряжению K_U , а также для входного (Z_{in}) или выходного (Z_{out}) импедансов ТИУ. Кроме того, рассчитываются значение трансимпеданса на низкой (нулевой) частоте Z_{T0} и верхняя граничная частота полосы пропускания $f_{3дб}$. Также можно вывести на экран или в текстовый файл символьные выражения для характеристик ТИУ, представленные в виде дробно-рациональных функций для дальнейшего исследования.

В режиме **синтеза** (расчета элементов) требуемые величины Z_{T0} или $f_{3дб}$, наоборот, задаются и программа рассчитывает значения элементов цепи ООС (R_f и L_f) и/или индуктивности L_1 , соответствующие максимально-плоской форме АЧХ или равномерному ГВЗ трансимпеданса для ОПРм (или ТИУ) в полосе пропускания.

В отличие от [4, 5] в программе SYMATIA формирование матрицы узловых проводимостей для исследуемой схемы формализовано, т.е. выполняется по заданным узлам подключения каждого элемента (через netlist). Поэтому в программу легко могут быть добавлены другие структурные схемы усилительных каскадов ТИУ или дополнительные корректирующие элементы. Кроме того, элементы модели ФД (C_{PD} , G_{PD}) и контакта (R_c , L_c) тоже включаются в общую матрицу проводимостей, а значит и в формируемые символьные выражения для характеристик, что позволяет учесть и аналитически исследовать их влияние на характеристики ОПРм. Иначе говоря, алгоритм рассчитывает сопротивление R_f и индуктивность L_f в цепи ООС для каскадов ТИУ на рис. 2, соответствующие максимально-плоской форме АЧХ (или равномерному ГВЗ) в целом для приемника, т.е. уже с учетом подключения ФД и контакта между ФД и ТИУ..

Весьма полезным является использование реализованного в MATLAB смешанного символьно-численного анализа, когда часть переменных в функции, которая описывает рабочую характеристику ОПРм, могут задаваться в виде символов, а другие – своими численными значениями. Это позволяет значительно сократить порядок и сложность как получаемых символьных выражений, так и решаемых

полиномиальных уравнений в режиме синтеза. Благодаря такому упрощению функций и символично-численному анализу появилась возможность формирования и решения уравнений для определения значений элементов цепей ООС, отвечающих требуемым значениям уровня трансимпеданса или полосы пропускания ОПрм, либо ТИУ.

3. Примеры расчетов

С целью демонстрации возможностей программы SYMATIA приведем несколько вариантов расчета элементов цепи ООС простого интегрального ОПрм, содержащего ФД и входной каскад ТИУ на КМОП-транзисторах включенных по схеме ОИ-ОС (рис. 2,б). При этом ИС ТИУ реализована на основе отечественной радиочастотной (РЧ) 90 нм КМОП-технологии ПАО «Микрон». Выбранные параметры фотодиода близки к параметрам как отечественных ФД, изготовленных по технологии ИФП СО РАН [8], так и зарубежных ФД, обеспечивающих полосы рабочих частот до 15-20 ГГц [1-3].

Элементы ЭС *n*МОП-транзисторов T_1 и T_2 для указанной технологии были найдены по результатам зондовых измерений *S*-параметров на пластине [9]. Значения этих элементов при напряжениях смещения $V_{gs} = 0,65 - 0,7$ В, $V_{ds} = 1,2$ В представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения элементов ЭС КМОП-транзисторов T_1 и T_2

Транзистор	W , мкм	C_{gs} , фФ	C_{gd} , фФ	C_{ds} , фФ	R_{gs} , Ом	R_{ds} , Ом	g_{m0} , мСм	I_{dy} мА
T_1	70	53,2	26,5	32,4	8	245	45	6,8
T_2	70	45,6	26,8	27,3	13,2	597	11	0,8

Для моделирования и расчета ОПрм задаем следующие входные данные программы: 1) ширина затвора транзисторов $W = 70$ мкм, величины резисторов $R_1 = 192$ Ом, $R_2 = 812$ Ом; индуктивность $L_1 = 0$ нГн, 2) параметры моделей ФД и контакта с ТИУ: $R_{PD} = 100$ кОм, $C_{PD} = 200$ фФ, $R_c = 5$ Ом, $L_c = 1$ нГн.

Вариант 1. Сначала выполним расчет (синтез) ОПрм для обеспечения требуемого значения трансимпеданса на низкой частоте $Z_{T0} = 200$ Ом. В результате были получены следующие значения элементов цепи ООС ТИУ: $R_f = 217,7$ Ом, $L_f = 4,05$ нГн. При этом граничная частота полосы пропускания ОПрм равна $f_{3дБ} = 7,13$ ГГц. Графики АЧХ и ГВЗ Z_T приемника показаны на рис 3,а. (сплошная красная линия – кривая 1).

Вариант 2. Если для этой же величины Z_{T0} рассчитать элементы ТИУ при идеальном контакте между ФД и ТИУ (т.е. когда $R_c = L_c = 0$), тогда получим: $R_f = 217,7$ Ом, $L_f = 4,94$ нГн; $f_{3дБ} = 6,67$ ГГц. Графики АЧХ и ГВЗ трансимпеданса ОПрм также приведены на рис. 3,а (пунктирная синяя линия – кривая 2).

Таким образом, несмотря на то, что во 2-м варианте расчета суммарное сопротивление контактной области ФД R_{PDc} и соединительного элемента R_{sc} задано равным нулю (т.е. рассматривается идеальный случай), было получено меньшее значение полосы пропускания приемника. Это объясняется тем, что в 1-м варианте индуктивность соединительного элемента L_c , которая была взята ненулевой, играет роль дополнительного корректирующего элемента, расширяющего полосу пропускания ОПрм.

Однако, наличие такого элемента в схеме может приводить к появлению выброса на АЧХ (рис. 3,а) и соответственно к ухудшению равномерности характеристики ГВЗ (см. рис. 3,б) Такой эффект был впервые отмечен в работах Г.В.Брауде [6], и для его компенсации нужно использовать специальные схемы подавления выброса в следующих каскадах усилителя [6, 7].

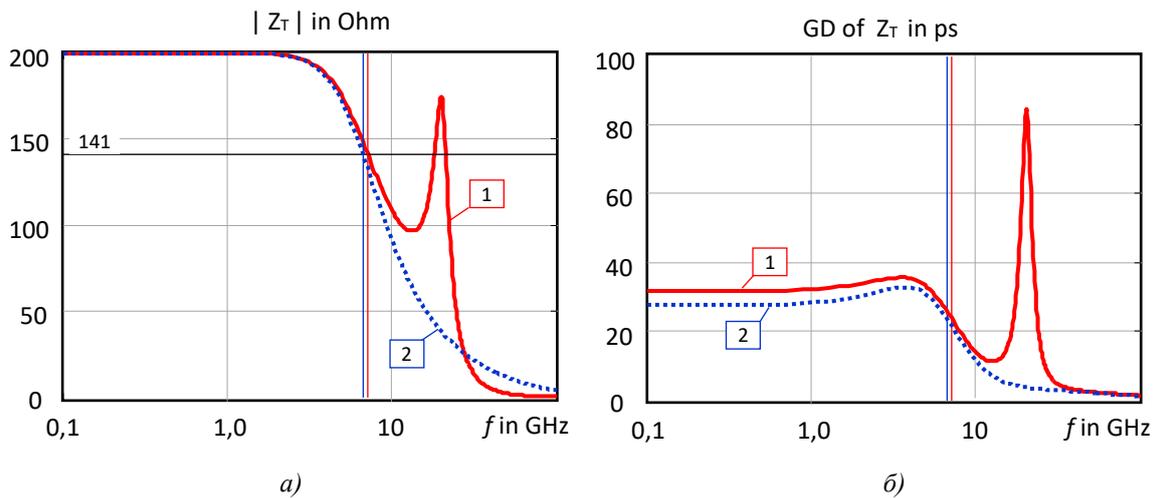


Рисунок 3. Частотные характеристики ОПРм для заданной величины $Z_{T0} = 200$ Ом: АЧХ (а) и ГВЗ (б) трансимпеданса Z_T

Вариант 3. Теперь выполним расчет ОПРм для заданной полосы пропускания. При тех же входных данных для значения верхней граничной частоты приемника $f_{3\text{дБ}} = 10$ ГГц с помощью программы найдем величины элементов цепи ООС ТИУ: $R_f = 149,3$ Ом, $L_f = 2,0$ нГн. При этом низкочастотное значение трансимпеданса усилителя равно $Z_{T0} = 153$ Ома, график АЧХ для этого случая показан на рис. 4,а (сплошная красная линия – кривая 1).

Вариант 4. При той же заданной $f_{3\text{дБ}} = 10$ ГГц в идеальном случае ($R_c = L_c = 0$) получим: $R_f = 107,4$ Ом, $L_f = 2,04$ нГн, $Z_{T0} = 124$ Ом, АЧХ представлена тоже на рис. 4,б (пунктирная синяя линия – кривая 2).

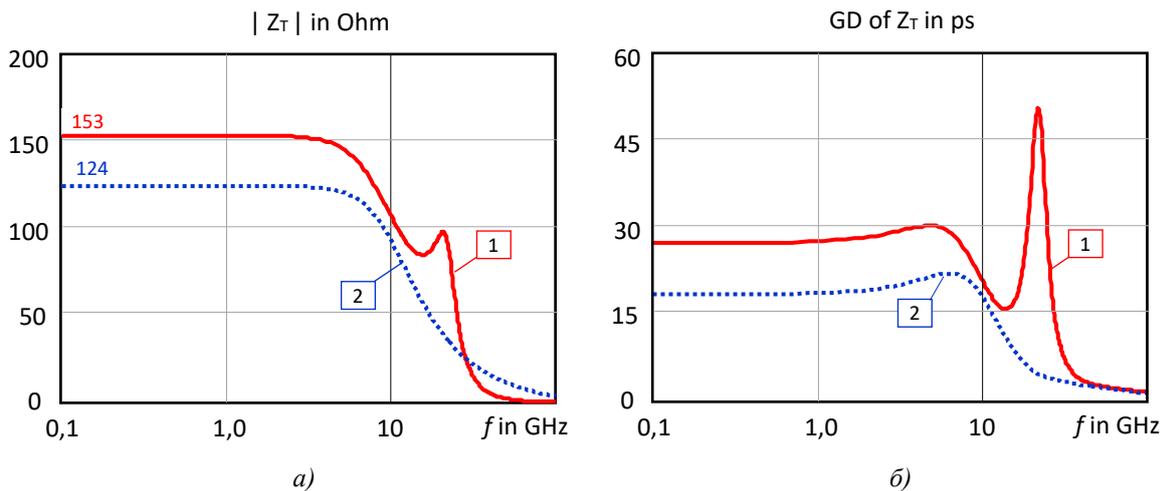


Рисунок 4. Частотные характеристики ОПРм для заданной величины полосы пропускания $f_{3\text{дБ}} = 10$ ГГц: АЧХ (а) и ГВЗ (б) трансимпеданса Z_T

Как и следовало ожидать, в 3-м и 4-м вариантах расчета из-за расширения полосы пропускания коэффициент трансимпедансного усиления Z_{T0} стал ниже, чем в предыдущих двух вариантах. Однако здесь использование корректирующего действия индуктивности L_c при одинаковой полосе приводит к увеличению трансимпеданса Z_{T0} .

Все рассчитанные примеры были проверены моделированием в профессиональной САПР AWR MWO, результаты полностью совпадают с характеристиками, полученными с помощью программы SYMATIA.

4. Заключение

Разработанная программа SYMATIA дает возможность выполнить автоматизированный расчет и анализ интегральных ОПрм и ТИУ, выполненных на КМОП-транзисторах, с учетом параметров ФД и контакта между ФД и ТИУ. Программа для нескольких типовых схем входных каскадов ТИУ находит значения элементов ООС и индуктивности ВЧ коррекции для получения максимально-плоской формы АЧХ или равномерного значения ГВЗ трансимпеданса ОПрм. Возможно также получение (генерация) символьных выражений для сигнальных характеристик ОПрм (или ТИУ) в виде дробно-рациональных функций с целью их дальнейшего аналитического исследования.

Данная работа выполнялась в рамках **государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор FEWM-2022-0006).**

Список литературы

1. Razavi B. Design of integrated circuits for optical communications. – John Wiley & Sons, 2012. – 444 p.
2. Gao J. Optoelectronic integrated circuit design and device modeling. – Higher Education Press, 2011. – 292 p.
3. Sackinger E. Analysis and design of transimpedance amplifiers for optical receivers. – John Wiley & Sons, 2018. – 573 p.
4. Коряковцев А.С., Бабак Л.И., Коколов А.А. Компьютерный символьный анализ и исследование сигнальных характеристик СВЧ-интегрального трансимпедансного усилителя на КМОП-транзисторах // – Томск: Доклады ТУСУР. 2023. – Т. 26, – № 1. – С. 7-15.
5. Коряковцев А.С., Бабак Л.И., Коколов А.А. Символьный анализ и расчет входного каскада СВЧ трансимпедансного усилителя по схеме КМОП-инвертора с обратной связью // XII Всероссийской науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Сборник докладов. – Санкт-Петербург. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2023. – С.145-150.
6. Брауде Г.В. Коррекция телевизионных и импульсных сигналов. – М.: Связь, 1967. – 249 с.
7. Лурье О.Б. Усилители видеочастоты. – М.: Советское радио, 1961. – 676 с.
8. Журавлев К.С. и др. Мощные СВЧ-фотодиоды на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs, синтезируемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Журнал технической физики. 2021. – Т. 91, – № 7. – С. 1158-1163.
9. Коколов А.А., Бабак Л.И. Методика построения малосигнальной модели СВЧтранзистора с высокой подвижностью электронов // – Томск: Доклады ТУСУР. – 2010. –Т. 22. – № 2-1. – С. 153-156.