

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.315.592.9

Пометько  
Евгений Викторович

Моделирование электрических параметров тонкопленочных транзисторов

### **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

---

Научный руководитель  
Степанов Андрей Анатольевич  
кандидат технических наук.

---

Минск 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Значение электронной техники в современном мире невозможно переоценить. В настоящее время процесс производства изделий радиоэлектронной аппаратуры ведется при требованиях максимального выигрыша по габаритам, массе, надежности и минимальной стоимости на основе последних достижений микроэлектроники и относится к категории сложных многооперационных процессов, использующих разнообразные электрофизические и физико-химические методы обработки. Интегральная микросхема (ИМС) - это не только совокупность электронных элементов в одном функциональном блоке, это также большое количество различных элементов схемы, одновременно изготавливаемых в едином технологическом цикле.

Развитие интегральной электроники происходит по двум направлениям. Это разработка и изготовление полупроводниковых и пленочных ИМС.

Тонкопленочные микросхемы прочно удерживают свой сегмент на современном рынке микроэлектронных изделий, несмотря на относительную дороговизну по сравнению с ИМС полупроводниковой и толстопленочной технологий. Данный сегмент составляют микросхемы следующих направлений. Первое направление, ставшее уже традиционным, это направление прецизионных микросхем типа: наборов точных резисторов; делителей напряжений и токов различного назначения; гибридных интегральных микросхем (ГИС) высокой точности, в частности, цифроаналоговых (ЦАП) и аналого-цифровых (АЦП) преобразователей и др.

Главными критериями оценки качества перечисленных микросхем являются высокая точность преобразования и/или воспроизведения определенных физических величин, недоступные для микросхем аналогичного назначения других конкурирующих микроэлектронных технологий. При этом, несмотря на стремительное развитие полупроводниковой электроники, значительного сближения по указанным параметрам точности не происходит. Это в определенной мере связано с успешными исследованиями в области свойств тонких пленок, с экспериментальными наработками и совершенствованием технологических процессов и технологических операций, в состав которых входят, в частности, операции измерения и подгонки. Последнее обстоятельство привело также к быстрому развитию тонкопленочной сенсорной микроэлектроники. К этой

группе можно отнести термо- и тензорезисторы, датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ), магнито и фоторезисторы, преобразователи концентрации и типа газов на тонких абсорбционных пленках, тонкопленочные преобразователи Холла. Такие сенсоры, произведенные в рамках тонкопленочной технологии, значительно превосходят изделия аналогичного назначения по массогабаритным показателям, а также по многим точностным показателям. Пока тонкопленочные сенсоры имеют, как правило, меньшие чувствительности и диапазоны преобразования по сравнению с датчиками, построенными на других структурах, однако тонкопленочная сенсорика имеет свои неоспоримые преимущества. В частности, такие сенсоры могут строиться по типу ГИС микросхем, совмещая в себе сенсорные, усилительные и преобразовательные функции. Другое развивающееся направление тонкопленочной микроэлектроники - это создание больших неунифицированных ГИС (БГИС). Производство подобных устройств в рамках полупроводниковой электроники, ставшей областью массового производства, является нерентабельным. В то же время существует масса объектов и производств, где требуются единичные экземпляры или малые серии высоконадежного и точного оборудования, заменяющего громоздкое, менее надежное, собранное из большого количества серийных узлов, охваченных паутиной длинных проводников, жгутов и разъемов. К таким объектам можно в первую очередь отнести атомные и газо-распределительные станции, объекты железных и автомобильных дорог и др.

В полупроводниковой технологии резисторы изготавливают за счет локального изменения проводимости определенных областей подложки и в диапазоне от 50 Ом до 40 кОм реализуют при помощи базовой диффузии. Для получения резисторов меньших номиналов используется  $p^+$ -диффузия эмиттера. При создании высокоомных резисторов в диапазоне от 30 кОм до 500 кОм уменьшают сечение  $p$ -проводящего пути с помощью диффузии  $p$ -слоя, образуя таким образом скрытый или ПИНЧ-резистор. При этом точность изготовления не превышает, как правило, 20%, а подгонка к номинальному значению является трудноосуществимой в технологическом цикле изготовления полупроводниковой ИМС.

Пассивные же элементы - резисторы, полученные в ходе вакуумного охлаждения газообразной фазы материала, имеют допуск от номинального значения, как правило, 5-10%, что несколько лучше, чем полупроводниковые. Однако главное достоинство в отличие от полупроводниковой технологии состоит в том, что такие пассивные элементы, как, например, резисторы и

конденсаторы, являющиеся конструкциями из тонких пленок на диэлектрической подложке, принципиально подгоняемы на операциях подгонки техпроцесса изготовления, что позволяет в конечном итоге добиться допусков от номинальных значений до 0,001% и ниже. Не рассматривая вопрос о перспективах создания тонкопленочного транзистора высокого качества, не уступающего полупроводниковому, можно отметить, что в настоящее время вполне приемлемо альтернативное решение, когда в пленочную микросхему монтируется бескорпусной активный полупроводниковый элемент.

Образуемая таким образом ИМС может быть либо толстопленочной гибридной, либо тонкопленочной гибридной, а чаще носит название просто гибридной микросхемы (ГИС). Толстопленочная и тонкопленочная технологии существуют вполне автономно и, как правило, не конкурируют между собой, т.е. тонкопленочные и толстопленочные ИМС занимают свои сектора по назначению. Пленки толстопленочных ИМС, полученные в результате трафаретной печати, имеют толщины от нескольких десятков мкм и более, а пленки тонкопленочных ИМС имеют толщины от нескольких мкм и менее. Толщина пленки определяет, в основном, нагрузочную способность пленочного элемента. Таким образом, толстопленочные ИМС используются там, где требуется обеспечить большую мощность рассеяния, уступая тонкопленочным в точности воспроизведения заданных функций.

Таким образом, сектор микроэлектронных элементов малой мощности, но высокой точности воспроизведения функциональных зависимостей занимают тонкопленочные ИМС, а сектор повышенной мощности и средней точности - толстопленочные ИМС. Такое распределение сфер предполагает развитие всех микроэлектронных технологий: полупроводниковой, как функционально универсальной, толстопленочной, обладающей наибольшей простотой и реализующей ИМС повышенной нагрузочной способности, и тонкопленочной, позволяющей получить ИМС с точностью воспроизведения функциональных зависимостей, не достижимых в других микроэлектронных технологиях.

Создание ИМС более высокого качества невозможно без создания нового технологического оборудования, в частности, оборудования и аппаратуры подгонки нормируемых параметров, средств измерений этих параметров, в составе которых должны быть современные вычислительные средства, реализующие сложные алгоритмы измерений и обработки информации. Функционирование последних возможно в рамках алгоритмов подгонки и

измерений конкретных параметров с определенной степенью точности. Это можно обеспечить лишь на предварительной стадии всестороннего анализа объекта подгонки и измерений, его параметров как целевых функций, выводом критериев подгонки как критериев оптимизации подгоняемого параметра. Создание специализированных средств измерений позволяет гарантировать точность измерений в первую очередь за счет аттестации и периодических проверок принятого в производство специализированного измерительного оборудования, что не могут гарантировать никакие косвенные измерения.

Библиотека БГУИР

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Жидкие кристаллы, представляют собой материал, реагирующий на изменение напряжения между двумя стеклянными подложками. Используя это свойство, меняя напряжение, можно менять интенсивность света проходящего через слой жидких кристаллов. Для управления жидкими кристаллами на одной из стеклянных подложек монтируется много микроскопических ТПТ, и их количество равно количеству субпикселей.

В соответствие с этой структурой, характеристики ТПТ ЖКД модуля будут зависеть от характеристик каждой части этого “сэндвича”. Поэтому развитие и применение новых технологий и параметров, улучшающих характеристики какой-то части ТПТ ЖКД модуля, порождает целое поколение новых модулей со своими особенностями.

### **Цель и задачи исследования.**

*Целью* данной магистерской диссертации является моделирование электрических параметров тонкопленочных транзисторов.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

- провести исследование эффектов, возникающих при работе реальных тонкопленочных полевых транзисторов;
- построить экспериментальную модель ТПТ и провести моделирование;
- объяснить полученные в проекте экспериментальные данные и сделать выводы.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является тонкопленочный полевой транзистор. Предметом исследования являются электрофизические параметры ТПТ.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Точное моделирование электрических параметров современных ТПТ является актуальной задачей, и поиск ее удачных решений ведется в настоящее время. В связи с этим полученные результаты представляют научный и практический интерес, поскольку направлены на производство современной техники.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные результаты:

Полученные в логарифмическом виде зависимости тока стока  $I_D$  от напряжения на затворе  $V_G$  в ТПТ с каналом из поликристаллического кремния имеют характерный изгиб, что говорит о том, что в входные данные моделирования были занесены слишком большие значения концентрации

носителей, а именно  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

Из-за этого в ТПТ с на порядок большей концентрацией носителей в канале между стоком и истоком появляется шунтирующая область с маленьким сопротивлением и ВАХ транзистора вырождается в прямую. При таких условиях ТПТ работает в схеме как резистор, не принося толк ЖКД. Учитывая данное явление, зависимости тока стока  $I_D$  от напряжения на затворе  $V_G$  в ТПТ с каналом из поликристаллического кремния при различных напряжениях на стоке  $V_D$  были смоделированы заново методом создания трёх графиков зависимости, их объединения и создания семейства зависимостей, но уже с учётом требуемой концентрации носителей в канале  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Программное моделирование ТПТ проводилось соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были исследованы электрофизические параметры, в значимой степени влияющие на работу ТПТ. Исследования проводились совместно с научным руководителем кандидатом технических наук, Степановым А.А.

**Апробация результатов диссертации.** Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок были доложены на 51-й научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов БГУИР, 2015.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в работе, представленной в научном журнале (Доклады БГУИР).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 35 наименований. Общий объем диссертации составляет 50 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **реферате** представлены основные результаты магистерской диссертации, а также дана краткая характеристика проделанной работы.

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы по нахождению наилучших параметров ТПТ.

В **первой главе** приведен обзор жидкокристаллических дисплеев с пассивноматричной и активноматричной адресацией. Также здесь проводился анализ тонкопленочных транзисторов и физических параметров аморфного и поликристаллического кремния.

Во **второй главе** рассмотрена технология формирования низкотемпературного поликристаллического кремния для активноматричных жидкокристаллических дисплеев. Проведен анализ технологических операций при создании тонкопленочных полевых транзисторов.

В **третьей главе** исследована конструкция, режимы работы идеальной модели, а так же эффекты, возникающие при работе реальных ТПТ. Проведено моделирование ТПТ, получены результаты и сделаны выводы.

В **заключении** изложены основные результаты магистерской диссертации, основные выводы теоретической части и приведены основные результаты исследований электрофизических параметров тонкопленочных транзисторов.

В **приложении** приведена краткая презентация основных результатов магистерской диссертации.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения моделирования электрофизических параметров ТПТ были построены графики зависимости тока стока  $I_D$  от напряжения на затворе  $V_G$  тонкопленочного полевого транзистора при различных напряжениях на стоке  $V_D$ . В качестве материала канала был рассмотрен как аморфный кремний, так и поликристаллический. Моделирование производилось с помощью ПО «VMwar», запускающего виртуальную операционную систему «CentOS», в которой в свою очередь запускали ПО «SilvacoAtlas®».

При моделировании характеристик ТПТ наибольшее внимание необходимо уделять качеству поверхности тонких пленок и электрофизическим характеристикам канала (концентрация носителей заряда). Кроме этого следует учитывать существование в канале не только индуцированного сопротивления, но и сопротивления в объеме и на поверхности тонкой пленки активной области. Утечки тока через затвор могут быть устранены подбором высококачественного диэлектрика.

Для моделирования электрофизических свойств ТПТ, в котором в качестве канала используется аморфный кремний, был разработан код, описанный в Приложении А.

В первом подразделе рассматриваются конструкция и режимы работы идеальной модели. Во втором подразделе описаны значения характеристик, необходимые для моделирования ТПТ. В третьем подразделе демонстрируются результаты моделирования ТПТ и делаются выводы.

Найдены электрофизические параметры, которые в значительной степени влияют на работу ТПТ. У ТПТ с поликристаллическим каналом значительно выше выходной ток, т.е. ток стока  $I_D$ . Это объясняется рядом факторов, зависящих как от структуры материала канала, так и от его электрофизических параметров, таких как:

Первый – это подвижность. В канале из аморфного кремния она значится в диапазоне от 0,1 до 1  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , а в канале из поликремния от 50 до 200  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Подвижность носителей заряда в свою очередь объясняется структурой материала (в нашем случае либо аморфного, либо поликристаллического), его порядком, шероховатостью, наличием дефектов, температурой вещества канала и т.д.

Второй фактор – шероховатость. Увеличение шероховатости поверхностей снижает подвижность носителей заряда в канале ТПТ, следовательно, значительно уменьшается протекающий ток стока, характеристики транзистора ухудшаются.

Третий фактор – ловушки зарядов. Учет влияния ловушек на изменение характеристик ТПТ показывает, что при увеличении их концентрации

выходная характеристика становится более пологой с менее выраженным насыщением.

Четвёртый фактор – последовательные сопротивления границ исток-канал и сток-канал. Учет влияния возникающих последовательных сопротивлений исток-канал и сток-канал показывает, что ток стока уменьшается, а крутизна характеристик снижается.

Пятый фактор – начальная концентрация. Слишком высокая начальная концентрация носителей заряда в канале приводит к тому, что выходные характеристики ТПТ вырождаются до характеристик, присущих резистору (отсутствует переход между областями обогащения и насыщения, зависимость тока стока от напряжения сток-исток – прямая линия). Оптимальные значения начальной концентрации носителей заряда в канале – не более  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Шестой фактор – превышение длины канала. При напылении канала длиной  $L$ , большей  $L_{\text{eff}}$ , ток стока  $I_D$  (обратно пропорциональный длине канала) растёт, а перенапряжение сток-исток уменьшается, следовательно, ТПТ перестает выходить на насыщение и ВАХ спрямляется.

При моделировании характеристик ТПТ наибольшее внимание необходимо уделять качеству поверхности тонких пленок и электрофизическим характеристикам канала (концентрация носителей заряда). Кроме этого следует учитывать существование в канале не только индуцированного сопротивления, но и сопротивления в объеме и на поверхности тонкой пленки активной области. Утечки тока через затвор могут быть устранены подбором высококачественного диэлектрика.