



УДК 538.975, 621.382.323

Е. Ю. Плотникова, А. В. Арсентьев, А. А. Винокуров, С. И. Рембеза
Воронежский государственный технический университет

Эволюция технологии и материалов тонкопленочных полевых транзисторов

Рассматриваются основные этапы развития технологии тонкопленочных полевых транзисторов, начиная с первого патента Лилиенфельда, зарегистрированного в 1933 г., и до современных экспериментальных и промышленных приборов. Представлены наиболее значимые, с точки зрения тонкопленочной электроники, разработки на полупроводниковых солях (CdS и др.), элементарных полупроводниках (Si) и оксидах металлов (ZnO , SnO_2 и др.). В качестве перспективной разработки выделено исследование возможностей создания прозрачных тонкопленочных транзисторов.

Структура, материалы тонкопленочных полевых транзисторов, технология, металлооксиды

Отправной точкой в истории развития тонкопленочных полевых транзисторов (*thin-film transistor*, TFT), согласно зарубежным источникам, следует считать патент Ю. Э. Лилиенфельда (1933) [1], в котором был предложен принцип работы полевого прибора (рис. 1). Патент содержал схему и материалы, из которых следует изготавливать структуру. Так, полупроводниковым активным слоем стал Cu_2S , диэлектриком – Al_2O_3 , металлическим управляющим электродом – Al . Однако автор продемонстрировал непонимание физики действия полупроводников, и патентная формула противоречила представленным примерам. Также не был создан и рабочий прототип. Тем не менее, следуя инструкциям, можно было изготовить работающую структуру.

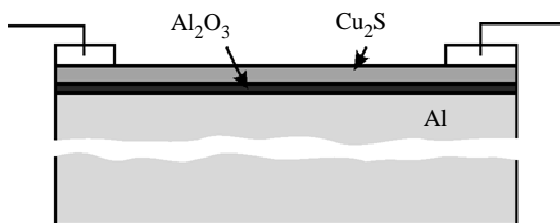


Рис. 1

О. Хейл в патенте на полевой прибор (1935) привел более полное описание, по которому авторство TFT логичнее было бы присвоить ему. Хейл продемонстрировал знание и понимание

сути полупроводников, в том числе, существование полупроводников *p*-типа (названных им «зонными»). В качестве материалов использовались Te , CuO , V_2O_5 и I (йод). Из этого ряда теллур оказался наиболее подходящим для дальнейшей разработки.

Патенты Хейла и Лилиенфельда по своей сути являлись концептуальными и на тот момент не были реализованы на практике.

Следующий заметный шаг в развитии полевых приборов сделал У. Шокли из «Bell Labs» (США). Его оригинальное решение (1939) было основано на принципах работы диода Шотки, т. е. контакта металл–полупроводник. Он предположил, что граница между металлом и полупроводником обедняется подвижными носителями заряда, и что протяженность области обеднения зависит от приложенного напряжения. Используя знание принципа действия вакуумных ламп, Шокли предложил конструкцию триода, в котором сетка, встроенная в полупроводниковый материал, служила для обеднения области между катодом и анодом и, тем самым, отключала ток в приборе. Эта идея легла в основу первого полевого транзистора с управляющим переходом металл–полупроводник (MESFET). Изобретение Шокли было реализовано только в конце 1960-х гг. С. А. Мидом.

После войны, возвращаясь к идее полевого прибора, У. Шокли отказался от структуры со встроенным барьером, посчитав ее слишком

сложной для реализации. Вместо этого он предложил новую структуру, предполагающую приложение электрического поля к полупроводниковой пленке через диэлектрик при помощи управляющих электродов.

Заслуга Шокли состоит в том, что кроме уже изученных полупроводниковых соединений, он попытался задействовать элементарные полупроводники – германий и кремний. Так, для создания тонкопленочного полевого прибора была использована пленка из германия. Это был большой рывок в развитии материалов полевых приборов.

В 1948 г. Шокли, проанализировав структуры с $p-n$ -переходами, предложил полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом, известный сейчас как JFET, а в 1952 г. была опубликована первая работа о них [2]. В работе были использованы термины, впоследствии ставшие каноническими. Так, отрицательно заряженная область приборов с электронной проводимостью или положительно заряженная для приборов с дырочной проводимостью стала называться «истоком», а область с обратным истоку знаком – «стоком». Изолированный электрод, названный О. Хейлом «управляющим электродом», стал «затвором». Анализ тока насыщения между истоком и стоком в зависимости от напряжения сток–исток привел к появлению понятия «отсечка», т. е. точка между истоком и стоком, в которой плотность тока стремится к нулю. На рис. 2 показано схематичное изображение JFET.

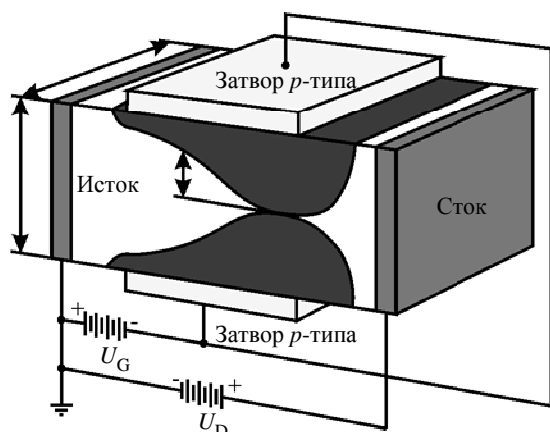


Рис. 2

Настоящая история развития тонкопленочных полевых транзисторов TFT началась с работ П. К. Веймера из «RCA Laboratories» (США) в 1962 г. В этот период многие лаборатории сконцентрировали внимание на исследовании TFT. Интерес был вызван возможностью создания тех-

нологии малозатратной электроники по низким ценам с характеристиками, сравнимыми с электроникой по кремниевой технологии, поскольку стекло было дешевле кремния, и при напылении тонких пленок требовалось меньше материалов. Веймер использовал тонкие пленки поликристаллического CdS, объединенные с диэлектрическими пленками SiO₂ в послойную структуру, в которой контакты истока и стока располагались с противоположной стороны от затвора относительно диэлектрика. Такая конфигурация показана на рис. 3.

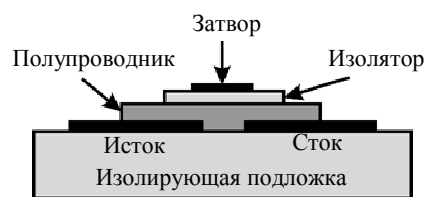


Рис. 3

На стеклянной подложке напылением золота в вакууме через теньевую маску сформированы контакты истока и стока. Далее также через теньевую маску напылена пленка CdS, за которой следует напыление SiO₂ и, наконец, второе напыление золота для затвора. Параметры этого прибора: крутизна характеристики порядка 25 мА/В при емкости затвора около 50 пФ. Максимальные значения крутизны, полученные Веймером, соответствовали подвижности 140 см²/(В · с).

Следующим этапом развития TFT была разработка в 1964 г. Веймером p -канального транзистора, изготовленного с использованием теллура в качестве материала активного слоя. Такие приборы, подвижность носителей в которых достигала порядка 200 см²/(В · с), имели очень тонкий активный слой (около 150 Å), обеспечивающий работу в режиме обогащения, т. е. при $U = 0$ токи через прибор прекращались или были малы. Разработка p -канального транзистора на основе Те в качестве материала активного слоя была необходима для создания комплементарных схем с малым энергопотреблением.

Однако с появлением в 1962 г. полевого транзистора с изолированным затвором (IGFET), сейчас известного как МОП-транзистор (MOSFET), и повышением уровня интеграции схем преимущество технологии TFT при создании малозатратной электроники стало исчезать, что в конце 1960-х гг. привело к падению темпов развития TFT.

В приборах на кристаллическом кремнии снижение себестоимости достигается за счет миниатюризации, а так как в некоторых случаях необхо-

димы большие массивы дешевых дискретных приборов, то в 1970-х гг. открылись новые перспективы развития TFT-технологии. Статья, которая вернула интерес к тонкопленочной технологии, была опубликована Б. Лехнером в 1971 г. [3].

Жидкокристаллические дисплеи (ЖК-дисплеи) были изобретены еще в 1960-х гг., но не нашли широкого применения в мониторах или телевизорах. При расположении в матрицах дисплеев жидкие кристаллы давали слишком сильные перекрестные помехи: изменение состояния в одной ячейке приводило к срабатыванию других. Лехнер предложил использовать в пересечениях матрицы ЖК-дисплея нелинейный элемент управления, что позволило избавиться от наводок. В качестве такого элемента был применен блок, состоящий из TFT и конденсатора, который накапливал и хранил заряд для каждой жидкокристаллической ячейки (рис. 4).

Т. Б. Броди из «Westinghouse Electric» (США) в 1973 г. продемонстрировал ЖК-дисплей, использующий в схеме управления TFT на CdSe. Имея длину канала 50 мкм и ширину 25 мкм, транзисторы давали крутизну порядка 5...6 мкСм при $U = 5$ В. Они сохраняли свою подвижность в пределах $20 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Для использования в ЖК-технологии проводимость TFT во включенном состоянии была более чем достаточна, но в состоянии выключения протекали большие токи (порядка 100 нА), требующие использования конденсатора для каждого пикселя.

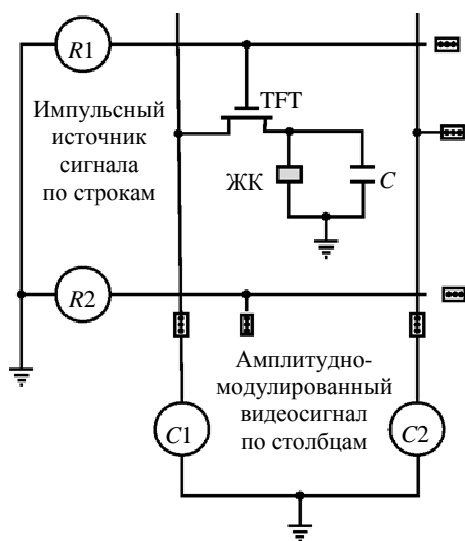


Рис. 4

В 1978 г. Броди увеличил разрешение своих дисплеев, при этом емкость конденсатора каждо-

го пикселя уменьшилась, что потребовало понижения тока в состоянии выключения до 1 нА. Это было достигнуто путем высокотемпературного отжига TFT и увеличения длины канала до 75 мкм. Но такой важный параметр ЖК-дисплеев, как уровень переключения по току стока, все еще был меньше 10^5 .

Помимо уже известного CdSe предпринимались попытки использовать иные типы материалов активного слоя TFT. В 1975 г. Й. Крамер представил дисплей, управляющие элементы в котором были изготовлены на PbS. К сожалению, этот материал не позволил достичь высоких значений характеристик TFT.

В 1979 г. П. ЛеКомбером, У. Спиром и А. Гейтом [4] в качестве материала активного слоя TFT был предложен аморфный кремний (α -Si). Гидрогенизированный аморфный кремний, в отличие от чистого аморфного кремния, может быть обогащен донорами или акцепторами для получения n - или p -типа проводимости. Гидрогенизация пассивирует большое число уровней, связанных с оборванными связями в аморфной структуре кремния в центре запрещенной зоны. Такое поведение аморфного кремния подобно поведению кристаллического кремния. Этот факт позволил группе ЛеКомбера создать TFT с нанесенными в тлеющем разряде диэлектриком Si_3N_4 и активным слоем из аморфного Si. Полученный TFT мог дать ток во включенном состоянии порядка нескольких микроампер и в выключенном около 1 нА и уже быть использованным как управляющий элемент в ЖК-дисплее. Как и в случае Шокли в 1940-х гг., разработчики предпочли использовать элементарные полупроводники, а кремний к тому времени был уже достаточно изучен, имел воспроизводимые параметры и мог быть нанесен на большие поверхности. В частности, аморфный кремний использовался в солнечных элементах [5].

Сравнивая CdSe и α -Si, отметим, что CdSe позволяет получить более высокую подвижность, но является поликристаллическим соединением: характеристики его зависят от размера зерна, состояния межзеренных границ, стехиометрии и т. п. Кроме того, CdSe чувствителен к условиям окружающей атмосферы (особенно к парам H_2O и кислороду), тогда как аморфный кремний не имеет границ зерен и является самопассивирующимся.

Наряду со значительными успехами, полученными на α -Si, к 1980 г. стал заметен прогресс в реа-

лизации TFT на CdSe. Так, М. Дж. Ли в «Imperial College» (Великобритания) представил CdSe-TFT со значительно улучшенными характеристиками: подвижность носителей порядка $140 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, уровень переключения до 10^6 , токи в выключенном состоянии менее 3 нА и стабильность при постоянном напряжении на затворе. Структура была реализована посредством инвертирования слоев транзистора, как показано на рис. 5. Подзатворный диэлектрик был нанесен методом высокочастотного распыления SiO_2 , использованы контакты из Cr, пленки отжигались в атмосфере N_2 при 380°C в течение 1.5 ч. Пороговое напряжение составило около 2 В, а влияние быстрых ловушек в слое CdSe в режимах работы длительностью порядка 1 мкс не было заметным. Полученные выходные характеристики демонстрировали постоянную подвижность и отличное насыщение до 12 В.

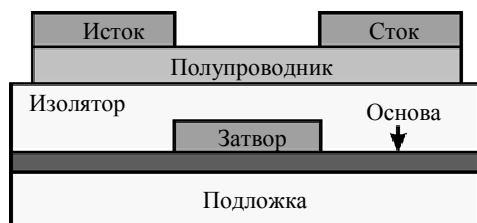


Рис. 5

Группа Ф. К. Луо из «Хегох» (США) в 1980 г. [6] представила CdSe-TFT с токами утечки порядка 2 пА при напряжении на затворе 0 В. Для достижения таких результатов они использовали структуру с двойным затвором (рис. 6), контактами In/Au и комбинированием Al_2O_3 и SiO_2 в подзатворном диэлектрике. Оптимальная толщина активного слоя оказалась менее 100 \AA . Этот TFT был разработан специально для управления пикселем в ЖК-дисплеях. Подвижность носителей составила всего $18 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, по всей видимости, из-за плотности ловушек более 10^{18} см^{-3} . Поскольку режим выключенного прибора достигался при $U_G = 0$, то при работе в ЖК-дисплее транзистор вел себя стабильно.

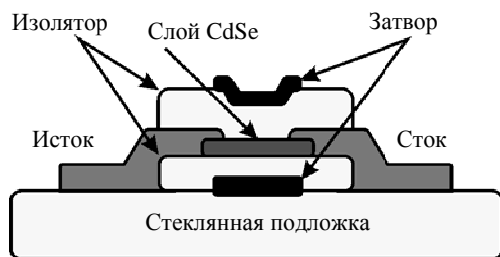


Рис. 6

Если предыдущие разработки для нанесения слоев использовали маску, то лаборатория Луэдера в 1979–1981 гг. предложила использовать фотолитографию для изготовления контактов стока и истока, самосовмещенных с затвором. Такое решение позволило уменьшить ошибки зарядки пикселя в ЖК-дисплее из-за паразитных емкостей затвора-истока. Была предложена конструкция, использующая анодированный Ta_2O_5 в качестве подзатворного диэлектрика в структуре с двумя затворами, как показано на рис. 7. Применение анодированного оксида как самосовмещенного бездырочного диэлектрика получило широкое распространение в 1980-х гг. в технологии $\alpha\text{-Si-TFT}$, где он обычно использовался совместно со вторым слоем, осажденным из вакуум-плазмы.

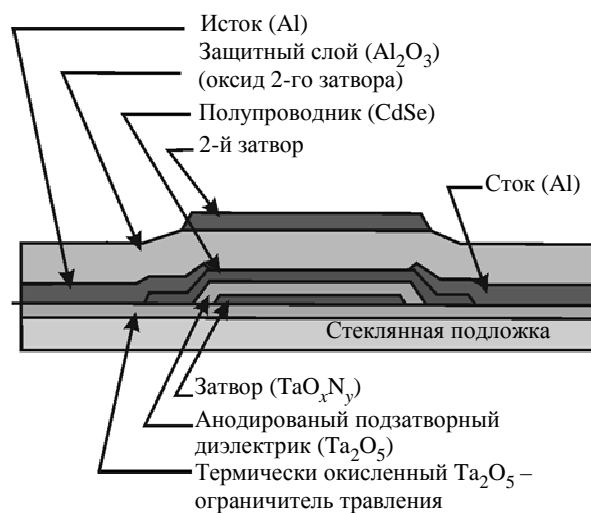


Рис. 7

В том же 1980 г. С. У. Депп из «IBM» (США) предложил в качестве активного слоя использовать поликристаллический кремний, нанесенный химическим осаждением из парогазовой фазы. Добившись подвижности порядка $50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, исследователи смогли создать кольцевой генератор с задержкой 2 мкс на 1 период. В таких поликремниевых тонкопленочных транзисторах в качестве подзатворного диэлектрика использовался SiO_2 , выращенный термическим окислением при 1050°C . Недостатком технологии было то, что прибор требовал применения высокотемпературной подложки, например, кварца.

В 1982 г. для улучшения подвижности и уменьшения пороговых напряжений была использована лазерная рекристаллизация поли-Si [7], благодаря которой значение подвижности электронов увеличилось до $400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что

позволило использовать TFT в схемах управления пикселем.

Устройства, где в качестве активного слоя использовался Te (рис. 8), были разработаны группой М. Матеуры [8] из «Sharp Corporation» (Япония). Но их характеристики из-за высоких значений токов в режиме выключения подходили только для дисплеев с низкой плотностью пикселей. Однако эти структуры продемонстрировали превосходную нечувствительность к освещению.

В это же время группа И. Окубо из «Canon» (Япония) предложила реализацию α -Si-TFT, которая смогла продемонстрировать уровень переключения порядка 10^6 и подвижность $0.3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Этого оказалось достаточно для управления массивами элементов размером 240×240 пикселей.

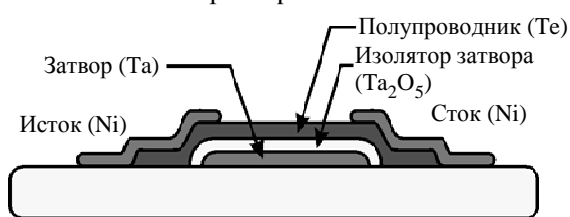


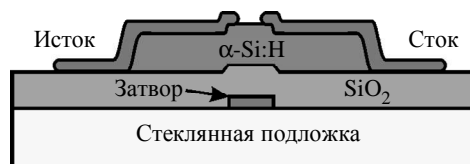
Рис. 8

Группа Т. Каваи из «Fujitsu» (Япония) также представила α -Si-TFT/ЖК-дисплей с низкой плотностью пикселей. Уровень переключения в них был хуже, чем в аналогах, но в конструкции использовалась защита прибора, необходимая из-за значительной фотопроводимости α -Si, в результате которой прибор при работе сильно подсвечивался (рис. 9). На рис. 9 представлены транзисторы: *a* – с открытым каналом, *b* – с пассивацией поверхности для защиты от влияния окружающей среды,

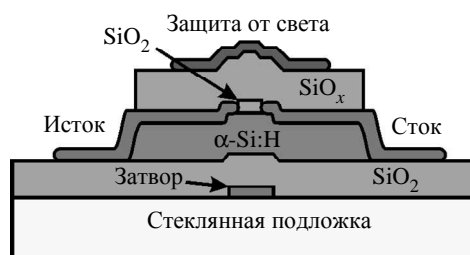
В 1983 г. лаборатория «Fujitsu» представила новую самосовмещенную структуру на α -Si, в которой использовались подходы, примененные ранее Луэдером для CdTe. Уровень переключения в этих приборах был значительно увеличен (более 10^8) частично за счет отжига при 300°C . На той же конференции группа К. Сузуки [9] из «Toshiba» (Япония) представила информацию о матрице 220×240 пикселей на α -Si, уровень переключения транзисторов в которой был порядка $5 \cdot 10^6$, порог переключения 3 В, подвижность $0.3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Эти транзисторы относились к структурам с обратным каналом. В них контакты были изготовлены нанесением легированного n^+ α -Si на поверхность нелегированного α -Si. После формирования металлических стока и истока между ними стравливался n^+ -слой (рис. 10).

Исследуя поли-Si, группа С. Морозуми [10] из «Suwa Seiko» представила TFT с двумя затворами. На рис. 11 представлены: *a* – сечение схемы транзистора с двумя затворами, *b* – топология этой схемы. Транзисторы были сформированы на кварцевой подложке с использованием высокотемпературных процессов. Такая конструкция продемонстрировала прекрасную стабильность, но по сравнению со стеклом возросла стоимость подложки.

В 1986 г. группа Ф. Фунады [11] из «Sharp» (Япония) использовала трехслойную структуру с обратным затвором, в которой слой, изолирующий расположенный снизу канал из α -Si, наносился в том же процессе химического осаждения из парогазовой фазы (PECVD), что и активный слой (рис. 12). При этом достигалась подвижность носителей $0.3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и уровень переключения более 10^6 .



a



b

Рис. 9

Группа Й. Хотта из «Matsushita» (Япония) также докладывает об уровнях переключения больше 10^6 и подвижности $0.9 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Здесь используется метод стравливания обратного канала, при котором контактный слой наносится в основном процессе.

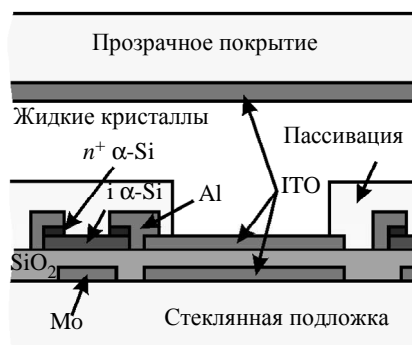


Рис. 10

На таком уровне развития технологии TFT становится ясно, что проще изготовить хороший контакт, если применять вытравливание нижнего канала, а контроль токов утечки проще реализовать использованием трехслойной структуры. Наиболее оптимальная технология создания трехслойной структуры – нанесение двух изолирующих слоев и активного слоя в одном процессе. Такой процесс дает минимальное загрязнение межслойных границ (рис. 13). Идея была реализована группой Х. Морийамы [12] из «NEC» (Япония).

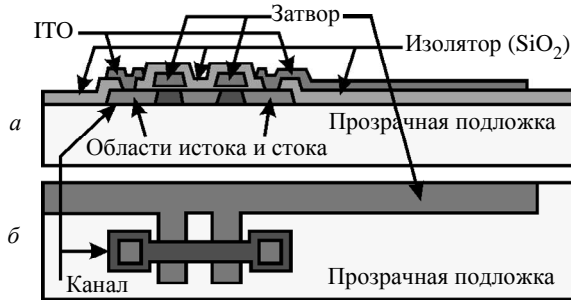


Рис. 11

Для приборов на CdSe в середине 1980-х гг. Ванфлетерном и Ван Калстером была предложена технология изготовления TFT, которая объединила преимущества TFT, создаваемых вакуумным способом с использованием теневых масок и изготовленных с применением фотолитографии. От первой технологии взяли высокие электрические характеристики, а от второй – точность создания структур.

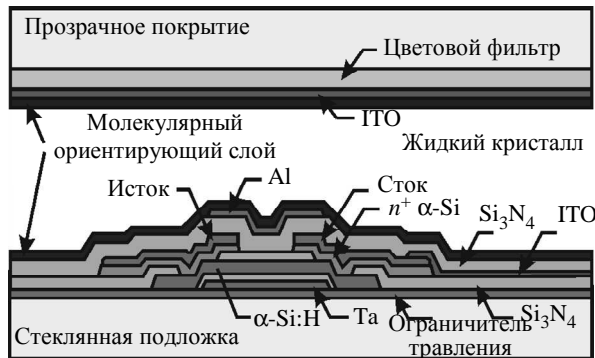


Рис. 12

Согласно исследованиям, из-за фотолитографии происходит загрязнение рабочей поверхности остатками фоторезиста или травящих реактивов. В структуре, предложенной на рис. 14, слой CdSe, легированный Zn, помещается между двумя слоями Al₂O₃ в одном процессе взрывной литографии в вакууме, что позволяет контролировать состояние поверхностей, как и в случае трехслойной структуры TFT на α-Si.

В таком методе верхняя изоляция стравливается для нанесения In/Au/Ni-контактов. Далее наносятся подзатворный диэлектрик и затвор. В результате получается плоская конфигурация с верхним расположением затвора.

Но для использования в ЖК-дисплеях параметры этого TFT оказались недостаточны: ток в режиме выключения составил порядка 5 нА, порог переключения $3 \cdot 10^3$, хотя подвижность $50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ могла бы обеспечить быстрое переключение (менее 200 нс).

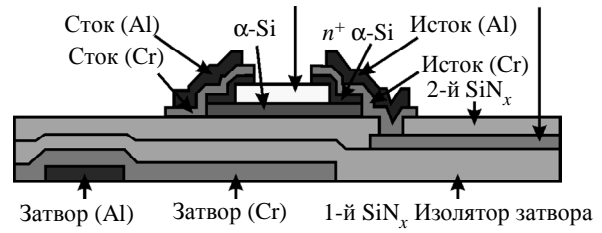


Рис. 13

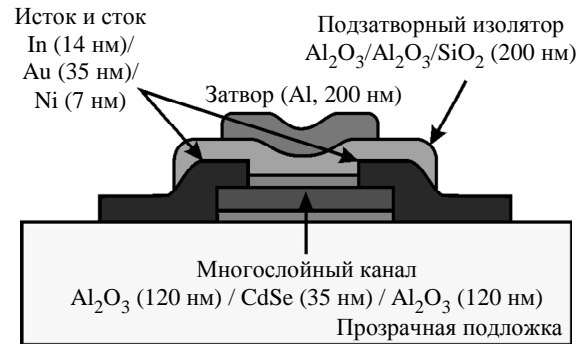


Рис. 14

Первые тонкопленочные транзисторы с малыми токами утечки и высоким уровнем переключения без снижения подвижности были разработаны на основе CdSe и предложены группой Спечменна из университета Штутгарта. Их параметры составили: ток в выключенном состоянии менее 1 пА, уровень переключения более 10^8 и подвижность носителей $102 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Эти TFT имели нижнее расположение затвора (контакты сверху) и были изготовлены методом фотолитографии.

Высокие значения характеристик были получены только после нескольких циклов отжига и очистки подзатворного диэлектрика (Ta₂O₅) перед нанесением CdSe и ионно-лучевого напыления пассивирующего слоя из Al₂O₃. Даже в этом случае при пороговом напряжении более 10 В образовывалась большая плотность поверхностных состояний. Кроме того, TFT имели длину канала 30 мкм, так что добротность μ^2/L мало

отличалась от большинства α -Si-TFT, разработанных в это же время.

В конце 1980-х гг. многие компании предлагали варианты изготовления α -Si-TFT с малыми значениями тока утечек (менее 1 пА), достаточным уровнем переключения (более 10^7), приемлемой подвижностью ($0.5 \dots 1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) и высокой стабильностью. Акцент был сделан на групповых характеристиках (проводимость шины затворов) и количестве технологических операций (количестве маскировок, задействованных в процессе). Затвор из Ta, используемый из-за хороших свойств анодного окисла, но имеющий довольно большое сопротивление, был сначала заменен на более проводящие Al/Cr и Mo/Ta, а впоследствии на алюминий.

Высокотемпературный поли-Si-TFT мог бы стать оптимальным управляющим элементом ЖК-дисплеев. В 1990 г. группа Е. Ступпа [13] из «Philips» (Голландия) предложила прибор, имеющий ток утечки 0.1 пА, уровень переключения 10^{10} и подвижность электронов $\mu_n = 35 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Эти результаты были достигнуты рекристаллизацией нанесенного аморфного кремния поли-Si для формирования активного слоя в приборах с верхним расположением затвора (впоследствии изготовленного из гидрогенизированного α -Si). Гидрогенизация позволила уменьшить ток в выключенном и увеличить во включенном состояниях. К сожалению, высокая стоимость, связанная с использованием кварцевых подложек, а также высокотемпературные процессы сделали эту разработку экономически невыгодной для интеграции в дисплеи большой площади.

Низкотемпературным поли-Si-TFT потребовалось немного времени, чтобы сравняться по характеристикам с высокотемпературными. В 1991 г. группа Литтла из «Seiko-Epson» (Япония) представила TFT с током утечки 0.1 пА, уровнем переключения $3 \cdot 10^8$ и подвижностью носителей более $20 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Результаты были получены благодаря использованию твердофазной рекристаллизации при 600°C α -Si, нанесенного при 550°C . В качестве подзатворного диэлектрика использовался SiO_2 , нанесенный химическим осаждением из паро-газовой фазы при атмосферном давлении (APCVD). Поскольку множество типов стекол выдерживают отжиг при температурах около 500°C , эта технология могла использоваться для создания дисплеев большой площади. В такой ситуации технология низкотемпературных поли-Si-TFT ста-

ла конкурировать с уже занявшей рынок ЖК-дисплеев технологией α -Si-TFT.

В 1993 г. появились новые разработки CdSe TFT, представленные на международной конференции в Страсбурге во Франции. Так группа М. Дж. Ли предложила TFT с подвижностью более $250 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, работающий на частотах 140 МГц в схеме кольцевого генератора. Группа Доблера описала прибор с подвижностью $400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, позволяющий изготовить ЖК-дисплей с хорошими характеристиками. На конференции также был представлен вариант дисплея на CdSe-TFT, изготовленный «Litton System Canada».

Таким образом, разработки TFT начались на двухкомпонентных составных полупроводниках типа CdS и CdSe, продолжились на Te и в итоге пришли к элементарным полупроводникам типа α -Si и поли-Si. Ни один из материалов для тонкопленочных транзисторов не смог сравниться с α -Si по капиталовложениям в исследования. Здесь основную роль сыграла экономика, а не физика. Только α -Si обеспечивал широкую доступность, когда практически любое предприятие могло достать необходимое оборудование и быстро получить воспроизводимые характеристики с использованием малого числа технологических операций. Приборы на поли-Si и CdSe более чувствительны к изменению технологии изготовления и обработки пленок, – настолько, что нередко невозможно воспроизвести результаты исследования. Таким образом, α -Si оказался наиболее экономически выгодным материалом для изготовления хороших дискретных TFT на стекле или пластике.

Однако в 2000-х гг. фокус исследований опять сместился. Стали востребованы не просто тонкопленочные транзисторы, но прозрачные тонкопленочные транзисторы. Материалом для таких TFT первоначально послужили ZnO, а в последствии более сложные соединения типа IGZO (In-Ga-Zn-Oxide), т. е. исследования опять вернулись к многокомпонентным полупроводникам. Прозрачные TFT открывают интересные возможности. К примеру, создание полностью прозрачных мониторов, когда на прозрачном стекле воспроизводится картинка с достаточной четкостью. Этот эффект можно было бы использовать как элемент навигации на лобовых стеклах автомобилей или как информационные маркеры в очках солдат.

Рождением прозрачной электроники можно считать выход в 1997 г. доклада о высокопроводящем прозрачном оксиде p -типа CuAlO_2 [14], а развитием – три одновременных доклада о прозрачных TFT с каналом из ZnO в 2003 г. [15]–[17].

Группа С. Масуды использовала технологию импульсного лазерного нанесения тонких пленок в кислороде при температуре 450 °С для формирования канала ZnO с малой концентрацией носителей (менее $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) в прозрачных TFT с нижним расположением затвора. Если предыдущих транзисторах использовалось нанесение структуры на непрозрачную кремниевую подложку [15], то прозрачный TFT был изготовлен на стеклянной подложке с использованием ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$) в качестве затвора, двухслойного $\text{SiO}_2\text{-SiN}_x$ -подзатворного диэлектрика (нанесенного методом PVD), канала из ZnO толщиной 250 нм и контактов IZO-($\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$) к истоку и стоку. SiN_x наносился на ZnO канал. Двухслойная конструкция изоляции минимизировала утечки тока через диэлектрик, которые возникали при использовании одинарного слоя SiO_2 . Прозрачность этого TFT составила более 80 % в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Его электрические параметры были значительно хуже, чем у непрозрачных TFT, изготовленных на кремнии; прибор работал в режиме обеднения, не выходил на полное насыщение и полностью не выключался при уменьшении напряжения на затворе. Для сравнения: TFT на кремнии мог работать в режиме обеднения или в режиме обогащения в зависимости от концентрации носителей в канале, проявлять резкое обогащение и близкую к идеальной зависимость тока стока от напряжения сток–исток. Дрейфовая подвижность непрозрачного TFT составила 0.031 и 0.97 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для прибора в режиме обогащения и обеднения соответственно. Холловская подвижность ZnO-TFT была порядка 0.7 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Уровень переключения тока стока для ZnO-TFT на кремнии был равен 10^5 . Одной из причин, почему характеристики прозрачного TFT были хуже, чем у TFT на кремнии, являлось то, что границы пленки диэлектрика были шероховатыми (шероховатость порядка 5.591 нм для стеклянной подложки и 0.157 нм для кремниевой).

Группа Р. Л. Хоффмана в своей разработке прозрачных TFT использовала в качестве материала канала пленки ZnO толщиной 100 нм, полученные ионно-лучевым распылением [16]. Здесь применялась ступенчатая конструкция с нижним расположением затвора. В качестве затвора, истока и стока был взят ИТО из оксида алюминия-титана (АТО); с помощью эпитаксии атомных слоев был изготовлен подзатворный диэлектрик.

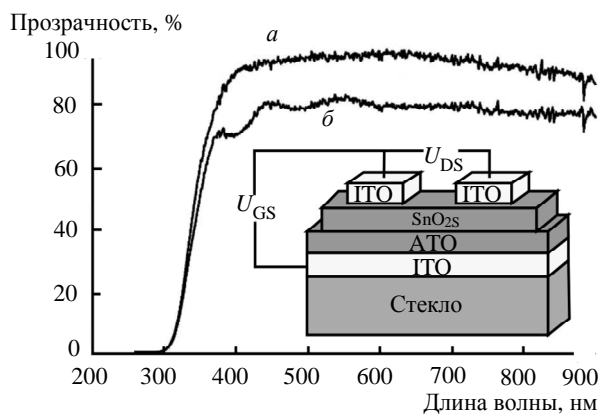
После напыления были выполнены два отжига. Ускоренный отжиг (RTA) при 600...800 °С в атмосфере кислорода сразу после нанесения ZnO канала проводился для увеличения упорядоченности структуры, а отжиг при 300 °С повышал прозрачность ИТО-слоя. Оптическая прозрачность этих TFT (вместе с подложкой) в видимом диапазоне составила около 75 %. Зависимость тока стока от напряжения сток–исток показала, что прибор работает в режиме обогащения с пороговым напряжением порядка 10...20 В. Однако перестроенная в логарифмический масштаб передаточная характеристика продемонстрировала, что напряжение на затворе порядка –10 В практически полностью выключает прибор (обозначается как напряжение включения U_{ON} в отличие от порогового напряжения U_{T}). Дрейфовая подвижность составила 0.3...2.5 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, уровень переключения тока стока 10^7 .

Группа П. Ф. Карсиа использовала высокочастотное магнетронное распыление пленок ZnO при комнатной температуре, чтобы изготовить ZnO-TFT на кремнии [17]. Наиболее важным в работе было применение низкотемпературных процессов, при которых ZnO-TFT могут быть использованы для разработки гибких микросхем на чувствительных к температуре подложках. В качестве затвора в послойной структуре TFT с нижним расположением затвора использовался сильнолегированный кремний толщиной 100 нм, термически окисленный в области подзатворного диэлектрика; исток и сток были изготовлены из Ti–Au. Хотя пленка ZnO и наносилась при комнатной температуре без специального отжига подложки, электрические характеристики такого ZnO-TFT были весьма высокими: выходные характеристики близки к идеальным, дрейфовая подвижность более 2 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и уровень переключения тока стока более 10^6 .

Через несколько месяцев после публикаций Масуды, Хоффмана и Карсии группой Й. Нишии был представлен ZnO-TFT с улучшенным значением дрейфовой подвижности до 7 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при условии изготовления прибора при 300 °С [18]. Подвижность в канале транзистора составила порядка 2 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при температуре изготовления прибора 150 °С. Канал из ZnO и CaHfO_x – буферный подзатворный диэлектрик – были изготовлены методом PVD. Нитрид кремния использовался в качестве подзатворного диэлектрика. Структура

TFT, его геометрические размеры, материалы пленок и максимальная температура изготовления аналогичны используемым в коммерческих TFT на α -Si-аморфном кремнии для активных матриц жидкокристаллических дисплеев. Отличием было использование ZnO и CaHfO_x . Эта работа показала, что прозрачные TFT с каналом из ZnO и улучшенными характеристиками могут быть легко интегрированы в AMLCD (активные матрицы жидкокристаллических дисплеев) вместо α -Si-транзисторных ключей.

Группа Р. Е. Пресли предложила вариант послойной структуры прозрачного TFT с нижним расположением затвора на основе SnO_2 , использованием АТО подзатворного диэлектрика и ИТО в качестве затвора, истока и стока [19]. Канал из SnO_2 наносился высокочастотным магнетронным напылением с последующим термическим отжигом в кислороде при 600°C . Предложенный прибор работал в режиме обогащения, начиная с $U_T = +10\text{ В}$, но отказывал при значениях $U_{ON} = -20\text{ В}$. Уменьшением толщины канала до 10–20 нм можно было уменьшить сопротивление в канале, таким образом увеличивая шунтирующее сопротивление и облегчая работу транзистора. Главными характеристиками прибора стали среднее пропускание в видимом диапазоне, соответствующее коэффициенту пропускания порядка 90 % (рис. 15), максимальная дрейфовая подвижность $2\text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и отношение тока в состоянии включения к состоянию выключения 10^5 . На графике рис. 15 кривая *a* – коэффициент пропускания; кривая *b* – полное пропускание через всю структуру, включая подложку. На вложенном в рисунок блоке показана структура прозрачного TFT с нижним расположением затвора и управляющие напряжения.



Группа П. Гёрна изготовила полностью прозрачный интеллектуальный пиксель наложением OLED на прозрачный α -ZTO-TFT [20]. Транзистор имел слоистую структуру с нижним расположением затвора. В качестве затвора был выбран ИТО, а диэлектрик АТО. Нанесенный PLD-методом при температуре подложки 350°C α -ZTO использовался как слой канала; исток и сток – ZnO/Al. Дрейфовая подвижность прибора составила $11\text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, пороговое напряжение от -1 до 1 В , уровень переключения по току порядка 10^5 . В передаточных характеристиках отсутствовал гистерезис. OLED был 9-слойной структурой, изготовленной молекулярно-лучевой эпитаксией органических веществ, нанесенной непосредственно на поверхность электрода стока. Верхним контактом OLED был ИТО. Дефекты, возникшие при нанесении пленок, снизили эффективность OLED. Полученный интеллектуальный пиксель был достаточно прозрачным (более 70 %) в видимом диапазоне длин волн.

Таким образом, на сегодняшний день перед исследователями стоит задача найти дешевые доступные материалы, доступную технологию изготовления и легкую в изготовлении структуру прозрачного TFT.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lilienfeld J. E. Device for Controlling Electric Current. US Pat. № 1 900 018 (1933) // Патенты: электронный справ. URL: <http://www.google.com/patents/US1900018>.
2. Shockley W. A Unipolar 'Field-Effect' Transistor // Proc. IEEE. 1952. Vol. 40. P. 1365–1376.
3. Liquid Crystal Matrix Displays/ B. J. Lechner, F. J. Marlowe, E. O. Nester, J. Tufts // Proc. IEEE. 1971. Vol. 59. P. 1566–1579.
4. LeComber P. G., Spear W. E., Ghaith A. Amorphous Silicon Field-Effect Device and Possible Application // Electron. Lett. 1979. Vol. 15, iss. 6. P. 179–181.
5. Carlson D. E., Wronski C. R. Amorphous Silicon Solar Cell // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 28. P. 671–673.
6. Luo F. C., Chen I., Genovese F. A Low-Leakage-Current Thin-Film Transistor for Flat-Panel Displays // Biennial Display Research Conference: тез. конф. / IEEE. New York, 1980. С. 111.
7. Thin-Film Polysilicon Devices for Flat Panel Display Circuitry / A. Juliana, S. W. Depp, B. Huth, T. Sedgwick // Digest 1982 SID Int. Symp. / Soc. for Inf. Display. San Jose, 1982. P. 38.
8. A Liquid Crystal Display Device with Thin-Film Transistors / M. Matsuura, Y. Takafuji, K. Nonomura,

F. Funada, T. Wada // Digest 1982 SID Int. Symp. / Soc. for Inf. Display. San Jose, 1982. P. 34.

9. High-Resolution Transparent type α -Si TFT LCDs / K. Suzuki, T. Aoki, M. Ikeda, Y. Okada, Y. Zohta, K. Ide // Digest 1982 SID Int. Symp. / Soc. for Inf. Display. San Jose, 1982. P. 146.

10. B/W and Color LC Video Displays Addressed by PolySi TFTs / S. Morozumi, K. Oguchi, S. Yazawa, T. Kodaira, H. Ohshima, T. Mano // Digest 1982 SID Int. Symp. / Soc. for Inf. Display. San Jose, 1982. P. 156.

11. An Amorphous-Si TFT Addressed 3.2-in. Full-Color LCD. / F. Funada, Y. Takafuji, K. Yano, H. Take, M. Matsuura // Digest 1986 SID Int. Symp. / Soc. for Inf. Display. San Jose, 1986. P. 293.

12. 12-in. Full-Color α -Si:H TFT with Pixel Electrode Buried in Gate Insulator / H. Moriyama, H. Uchida, S. Nishida, H. Nakano, Y. Hirai, S. Kaneko, C. Tani // Digest 1989 SID Int. Symp. / Soc. for Inf. Display. San Jose, 1989. P. 144.

13. Polysilicon TFT-LCD for Full-Resolution Color Video Projector / E. Stupp, U. Mitra, A. Carlson, H. Sorkin, M. Venkatesan, B. A. Khan, P. Janssen, M. Stroemer // Proc. 10th Int. Disp. Res. Conf. "Eurodisplay '90" / Soc. for Inf. Display. San Jose, 1990. P. 52.

14. P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO_2 / H. Kawazoe, M. Yasukawa, H. Hyodo, M.

Kurita, H. Yanagi, H. Hosono // Nature. 1997. Vol. 389. P. 939–942.

15. Transparent thin film transistors using ZnO as an active channel layer and their electrical properties / S. Masuda, K. Kitamura, Y. Okumura, S. Miyatake, H. Tabata, T. Kawai // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. P. 1624–1630.

16. Hoffman R. L., Norris B. J., Wager J. F. ZnO-based transparent thin-film transistors // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 733–735.

17. Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering / P. F. Carcia, R. S. McLean, M. H. Reilly, G. Nunes // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 1117–1119.

18. High mobility thin film transistors with transparent ZnO channels / J. Nishii, F. M. Hossain, S. Takagi, T. Aita, K. Saikusa, Y. Ohmaki, I. Ohkubo, S. Kishimoto, A. Ohtomo, T. Fukumura, F. Matsukura, Y. Ohno, H. Koinuma, H. Ohno, M. Kawasaki // Jpn. J. Appl. Phys. 2003. Vol. 42, iss. 4a. P. 347–349.

19. Presley R. E., Munsee C. L., Park C-H., Hong D., Wager J. F., Keszler D. A. Transparent tin oxide thin-film transistors // J. Phys. D. 2004. Vol. 37. P. 2810–2813.

20. Fully transparent smart pixels/ P. Görn, M. Sander, J. Meyer, M. Kruger, E. Becker, H.-H. Joannes, Kowalsky, T. Riedl // E-MRS, Nice, RIX-03. 2006. Vol. 18. P. 738–741.

E. Y. Plotnikova, A. V. Arsentev, A. A. Vinokurov, S. I. Rembeza
Voronezh State Technical University

EVOLUTION OF TECHNOLOGY AND MATERIALS OF THIN FILM TRANSISTORS

The paper examines the main stages in the development of thin-film field-effect transistors technology, starting first with registered in 1933 Lilienfeld's patent, up to modern experimental and industrial equipment. It provides the most important from the viewpoint of thin film electronics devices on the semiconductor salts (CdS etc.), on elementary semiconductors (silicon), and metal oxides (ZnO , SnO_2 , etc.). As future development allocated study the feasibility of establishing transparent thin-film transistors.

Structure, materials, thin-film field-effect transistors, technology, metal oxide