

## ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ НЕУПОРЯДОЧЕННОГО КРЕМНИЯ

ГОРДИЕНКО Ю.Е., ЯКОВЛЕВ Д.Р.

Обобщаются и развиваются основные вопросы теории и технологии тонкопленочных аморфных и поликристаллических кремниевых транзисторов. Описана квазидвумерная модель для анализа статических характеристик транзистора. Предлагается технология, позволяющая с помощью лазерной рекристаллизации интегрировать на одной подложке a-Si : H и poly-Si ТПТ.

### 1. Введение

В последнее время интерес к аморфным и поликристаллическим полупроводникам возрос в связи с открывающимися перспективами их использования для производства ряда специализированных интегральных схем и микроэлектронных устройств. Во-первых, дальнейшее повышение степени интеграции не может быть осуществлено на основе монокристаллов, так как и максимальный размер выращиваемых кристаллов, и минимальный размер элементов близки к предельным. Использование же неупорядоченных полупроводников позволяет снять ограничения на размеры устройства (которые накладывались размерами монокристалла), открывая возможность повышения степени интеграции. Во-вторых, интерес к исследованию неупорядоченных полупроводников повысило появление полупроводниковых устройств, площадь которых намного превосходит площадь выращиваемых монокристаллов (панели для сканеров изображений, ксероксов, жидкокристаллических дисплеев и т.д.). Это привело к появлению целой отрасли микроэлектроники – “электроники больших площадей” (ЭБП). Основными активными элементами ЭБП являются полевые тонкопленочные транзисторы (ТПТ). На их основе строятся активные матрицы для жидкокристаллических мониторов, трехмерные интегральные схемы, блоки электрически перепрограммируемой Flash-памяти (EEPROM) и др.

Изготовление устройств на основе ТПТ может быть особенно перспективно в условиях нынешнего состояния микроэлектронной промышленности Украины. Это объясняется относительной дешевизной используемых материалов и возможностью применения уже имеющегося на большинстве специализированных предприятий оборудования для тонкопленочной технологии. Поэтому актуальным кажется опубликование статьи, в которой обобщены и развиты представления о современном физи-

ческом моделировании интегральных устройств на ТПТ, а также обоснованы варианты оптимальных конструкций ТПТ и технологии их формирования.

### 2. Теория ТПТ

Неупорядоченные полупроводники характеризуются отсутствием зоны запрещенных уровней энергии, т. е. энергетическое распределение плотности состояний (ПС) является непрерывным. При этом полупроводниковые свойства таких материалов объясняются наличием области энергии, попадая в которую носители локализируются и становятся неподвижными. Эта область получила название щели подвижности. Состояния в щели делят на глубокие и в хвостах зон, которые отличаются природой. Так, глубокие состояния появляются из-за наличия дефектов (в аморфном кремнии – это в основном оборванные связи атомов в неупорядоченной сетке, а в поликристаллическом кремнии – оборванные связи на границах зерен). Состояния в хвостах – это состояния в зоне проводимости и валентной зоне, расширенные и локализованные в результате отсутствия дальнего порядка. Энергетическое распределение ПС в щели подвижности неупорядоченных полупроводников является суперпозицией плотности состояний донороподобного и акцептороподобного типа (рис. 1).

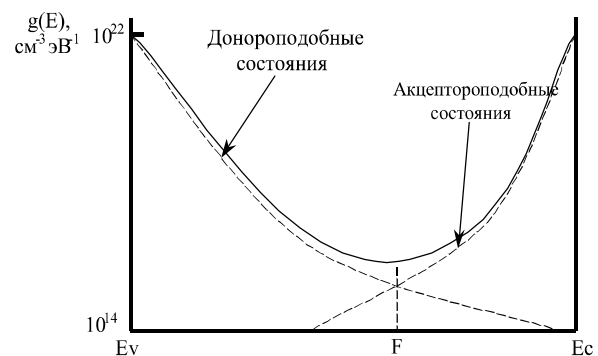


Рис. 1. Энергетическое распределение плотности локализованных состояний в щели a-Si : H

Одна из основных причин, ограничивающих применение устройств на основе неупорядоченных полупроводников, – их малое быстродействие, которое является следствием большой ПС в щели. Уменьшение ПС достигается пассивацией незаполненных связей одновалентными атомами, чаще всего атомами водорода. Вследствие этого распределение ПС критически зависит от технологии осаждения полупроводниковых пленок.

Описанные особенности неупорядоченных полупроводников меняют физику работы ТПТ, заметно отличающуюся от физики работы МДП-транзистора на основе монокристаллического полупроводника. Так, все динамические характеристики ТПТ определяются захватом и эмиссией носителей на энергетические состояния в щели подвижности. Другое отличие состоит в том, что дебаевская длина экранирования в ТПТ определяется концентрацией локализованных носителей, а не концентрацией

свободных носителей, как это имеет место в МДП-транзисторе. Пороговое напряжение также определяется плотностью глубоких локализованных состояний.

Учитывая то, что в большинстве случаев длина канала  $L$  (десятки мкм) намного больше толщины пленки активного слоя  $d_s$  (десятки нм), можно пренебречь краевыми эффектами. Поэтому статические характеристики можно получить с помощью квазидвумерного анализа [1] структуры ТПТ (рис. 2). При таком подходе электростатический потенциал в любой точке поверхностного слоя объемного заряда представляется суммой продольного и поперечного полей, т. е.

$$\varphi(x, y) = \varphi_0(y) + u(x, y), \quad (1)$$

здесь  $\varphi_0(x, y)$  – потенциал на краю слоя объемного заряда, где выполняется условие  $\partial u / \partial x = 0$ ;  $u(x, y)$  – величина изгиба зон у поверхности.

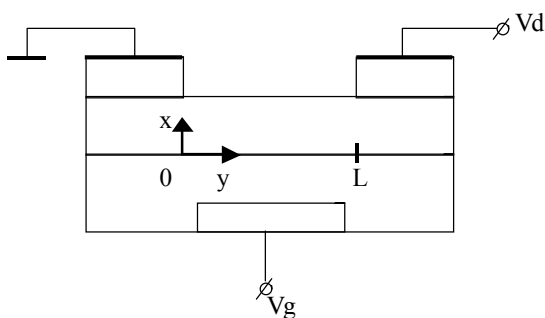


Рис. 2. Структура транзистора, используемая для получения статических характеристик

Поверхностное искривление зон удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x, y)}{\epsilon_s}, \quad (2)$$

где  $\rho(x, y)$  – объемная плотность заряда;  $\epsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость материала активного слоя.

Плотность заряда в случае неупорядоченного полупроводника в общем случае определяется плотностями свободных и локализованных носителей, а также концентрацией примеси:

$$\rho(x, y) = e[p(x, y) - n(x, y) + P(x, y) - N_D(x, y) + N_A(x, y)], \quad (3)$$

здесь  $e$  – заряд электрона;  $p, n$  – концентрации свободных носителей;  $P, N$  – концентрации локализованных носителей;  $N_D, N_A$  – концентрации ионизированных примесей.

Концентрации свободных носителей можно представить с помощью известных соотношений Больцмана. Концентрации же захваченных носителей необходимо определять, исходя из фермиевского

распределения вероятности заполнения локализованных состояний, т. е.

$$N = \int_F^{E_C} g_n(E) \cdot f_n(E) \cdot dE, \quad (4)$$

где интегрирование ведется по области щели от уровня Ферми  $F$  до края зоны проводимости  $E_C$ ;

$g_n(E)$  – функция распределения плотности акцептороподобных состояний в щели проводимости;  $f_n(E)$  – функция Ферми-Дирака для вероятности заполнения электронами акцептороподобных состояний. Концентрация дырок в донороподобных состояниях  $P$  описывается выражением, подобным (4). В большинстве применений используются ТПТ с собственным кремнием в качестве пленки активного слоя, поэтому влияние концентрации ионизированных примесей на плотность объемного заряда можно не учитывать.

Основные характеристики ТПТ определяются распределением плотности локализованных состояний  $g(E)$ . Как уже упоминалось, распределение ПС в щели подвижности неупорядоченного кремния определяется технологией осаждения пленки и поэтому разнится от случая к случаю. Как и в [2], использовалась следующая аппроксимация этого распределения:

$$g(E) = g_{nt} \cdot \exp\left(\frac{E - E_C}{E_{nt}}\right) + g_{nd} \cdot \exp\left(\frac{E - E_C}{E_{nd}}\right) + g_{pt} \cdot \exp\left(\frac{E_V - E}{E_{pt}}\right) + g_{pd} \cdot \exp\left(\frac{E_V - E}{E_{pd}}\right), \quad (5)$$

где  $g_{ij}$  и  $E_{ij}$  – характеристические ПС и энергия. При этом индексы  $n$  и  $p$  означают принадлежность к акцептороподобному или донороподобному типу дефектов, а  $p$  и  $d$  – соответственно к состояниям в хвостах зон или к глубоким состояниям. Значения характеристических величин могут быть определены опытным путем. Существует целый ряд экспериментальных методов определения ПС: релаксационная спектроскопия глубоких уровней; метод токов, ограниченных объемным зарядом [3]; метод постоянной фотопроводимости [4], но наиболее удобным для практического использования стоит признать метод полевого эффекта. Несмотря на то, что этому методу свойственны некоторые недостатки (например, невозможность разделения объемных и поверхностных состояний), он не требует дополнительного оборудования, учитывает особенности конструкции тонкопленочного транзистора, позволяет использовать его для анализа спектра ПС в активном слое ТПТ. Описываемая дрейфовая модель может служить основой для расчета спектра ПС по вольт-амперным характеристикам ТПТ.

Подобно [3] можно получить выражение для тока через канал транзистора в виде:

$$I_D = \frac{W}{L} \left[ d_s \sigma_0 V_D + \int_0^{V_D} \int_{\varphi_s(\varphi_0)}^0 \sigma(\varphi) \times \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^{-1} d\varphi \cdot d\varphi_0 \right], \quad (6)$$

где  $W$  и  $L$  – ширина канала ТПТ;  $\sigma_0 = e(\mu_n n_0 + \mu_p p_0)$  – объемная проводимость неупорядоченного кремния;  $V_D$  – потенциал электрода стока;  $\varphi_s(\varphi_0)$  – зависимость поверхностного потенциала от положения вдоль канала;  $\sigma(\varphi) = e \cdot (\mu_n(\varphi) \cdot n(\varphi) + \mu_p(\varphi) \cdot p(\varphi))$  – неравновесная проводимость в приповерхностном слое.

Зависимость  $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$  от  $\varphi$  можно найти интегрированием уравнения Пуассона (2):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_s} \int_{\varphi}^0 \rho(\zeta) d\zeta}. \quad (7)$$

Поле на границе раздела полупроводника и подзатворного диэлектрика может быть получено как из (7), так и из закона Гаусса:

$$\frac{\epsilon_i}{\epsilon_s} \frac{V_G - \varphi_0}{d_i} = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_s} \int_{\varphi_s}^0 \rho(\zeta) d\zeta}, \quad (8)$$

где  $\epsilon_i$  и  $d_i$  – соответственно диэлектрическая проницаемость и толщина пленки подзатворного диэлектрика;  $V_G$  – потенциал электрода затвора. Решая (8), можно определить зависимость  $\varphi_s(\varphi_0)$ .

Наличие значительного по величине локализованного заряда приводит к его влиянию на подвижность свободных носителей заряда, т. е. к сильной зависимости эффективной подвижности от потенциала затвора. Согласно определению эффективной подвижности, можно записать:

$$\mu_n = \mu_{n0} \cdot \frac{n}{n + N}, \quad (9)$$

где  $\mu_{n0}$  – подвижность электронов в зоне проводимости.

ТПТ на основе неупорядоченного кремния показывают некоторую нестабильность, выражающуюся в изменении порогового напряжения после значительного (по длительности или амплитуде) смещения. Это объясняется появлением неподвижных зарядов в полупроводнике (разрыв связей Si – Si и Si – H) и диэлектрике.

В настоящее время применяются ТПТ на основе как аморфного, так и поликристаллического кремния. Несмотря на то, что поликремниевые ТПТ обладают большим быстродействием, их применение ограничено большими токами утечки в закрытом

состоянии, которые являются следствием эффектов усиленного электрическим полем туннелирования носителей через барьер межзеренных границ. Предлагаемые пути уменьшения токов утечки связаны с изготовлением ТПТ с распределенным по длине канала пороговым напряжением, чего можно добиться неоднородным распределением положительных зарядов в диэлектрике, неоднородным легированием канала либо применением затвора сложной формы [5,6]. Однако такое усложнение процесса изготовления ТПТ не адекватно улучшению его характеристик, что в настоящее время не позволяет полностью отказаться от a-Si ТПТ.

### 3. Технология ТПТ

Специфика использования ТПТ приводит к тому, что иногда на одной подложке должны быть интегрированы как аморфные (a-Si : H) ТПТ, так и поликремниевые (poly-Si) ТПТ. Так, в панелях ТПТ для жидкокристаллических дисплеев (ЖКД) в периферийных цепях используются poly-Si ТПТ (т. к. a-Si : H ТПТ не удовлетворяют требованию по быстродействию), а в качестве коммутаторов пикселей применяют a-Si : H ТПТ. Использование поликремниевых транзисторов, как уже отмечалось, затруднено из-за довольно больших токов утечки в закрытом состоянии, что приводит к недопустимо низким значениям отношения  $I_{ON} / I_{OFF}$ .

Хотя на практике используются четыре типа структуры ТПТ (рис. 3), выбор следует остановить на инвертированной ступенчатой структуре. К ее достоинствам можно отнести:

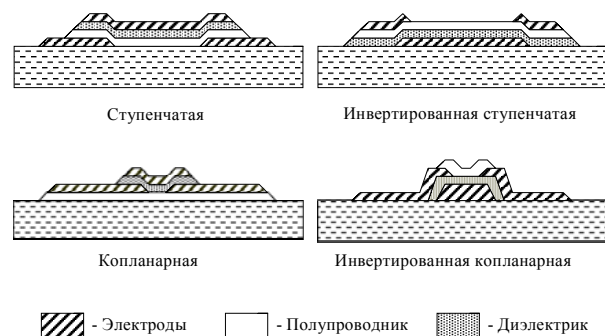


Рис.3. Типы структур ТПТ

– наилучшее качество границы раздела активного слоя с подзатворным диэлектриком вследствие того, что пленка активного слоя осаждается после диэлектрика (это приводит к понижению токов утечки и повышению подвижности носителей заряда);

– расположение затвора позволяет использовать его в качестве защиты от светового излучения в ЖКД, либо в качестве маски при необходимости достижения самосовмещения в короткоканальных ТПТ, как, например, в [7].

Получение аморфного кремния возможно лишь при его осаждении при низких температурах (меньше 300°C). Поликристаллический же кремний можно получать либо непосредственно из газовой фазы

при более высоких температурах (до 600 °С), либо путем рекристаллизации аморфной кремниевой пленки. Вторым путем является единственно возможным для достижения интеграции poly-Si и a-Si: H ТПТ. Кроме того, при рекристаллизации получаются пленки более высокого качества. В [8] описана технология изготовления рекристаллизованного эксимерным XeCl лазером ТПТ инвертированной ступенчатой структуры. Однако, как отмечалось, достичь лучших характеристик можно используя инвертированную структуру. Предлагаемая структура ТПТ показана на рис. 4. Использование в качестве подложки стекла вызвано тем, что его можно применять как при изготовлении интегральных схем, так и в оптоэлектронных приложениях. Низкие температуры технологических процессов позволяют использовать довольно дешевое стекло, основными требованиями к которому являются: шероховатость не ниже 13–14 классов обработки, химическая инертность и достаточно высокая механическая прочность. Выбор материала для электрода затвора определяется его адгезией к материалу подложки. Наилучшей адгезией к стеклу обладает хром.

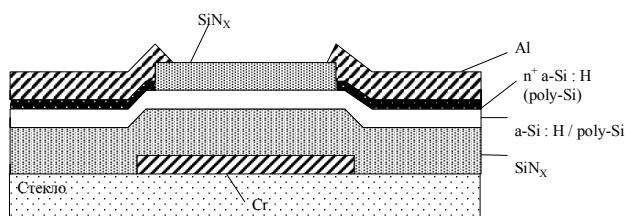


Рис. 4. Предлагаемая структура ТПТ

В качестве подзатворного диэлектрика используются пленки оксида и нитрида кремния. Получение SiO<sub>2</sub> связано с высокотемпературными процессами и применимо только при изготовлении поликремниевых ТПТ. Поэтому необходимо использование нитрида кремния SiN<sub>x</sub>, тем более, что он может осаждаться в едином технологическом процессе с пленкой активного слоя. Толщина 300 нм является компромиссной для порогового напряжения, емкости и тока утечки.

Толщина активного слоя определяется дебаевской длиной экранирования, которая, как отмечалось, у неупорядоченных полупроводников определяется локализованными состояниями в щели подвижности. Так, у a-Si: H она имеет порядок 30 – 40 нм, а у поликремния – до 200 нм. Исходя из этого, была выбрана толщина пленки активного слоя 150 нм.

Для обеспечения омического контакта пленки активного слоя с металлизацией истока и стока используется n<sup>+</sup> - слой с низким удельным сопротивлением. Достаточно, чтобы толщина этой пленки была 50 нм.

В качестве материала для металлизации электродов стока и истока удобно использовать алюминий, который имеет достаточно низкое удельное сопротивление, невысокую стоимость (по сравнению, например, с медью, рассматриваемой как перспективный материал для межсоединений). Кроме того,

технология “алюминий на кремнии” достаточно отработана.

Для повышения стабильности поверхность активного слоя в области канала нуждается в пассивации. По уже рассмотренным причинам в качестве материала для пассивации используется нитрид кремния SiN<sub>x</sub>.

Пленки a-Si: H целесообразно осаждать одним из плазмохимических методов. Опыт показал [9], что высококачественные пленки получаются при разложении силана SiH<sub>4</sub> при скорости нанесения меньше 0,3 нм / с и минимальной ВЧ мощности, достаточной для поддержания разряда. Исходя из этого, можно рекомендовать следующие параметры осаждения (в случае использования системы с частотой разряда 13,56 МГц):

- скорость потока SiH<sub>4</sub> – 45 см<sup>3</sup> / мин;
- температура подложки – 260 °С;
- мощность разряда – 4 Вт;
- давление 0,2 – 0,6 мм рт. ст.

Пленки нитрида кремния осаждаются из смеси силана и аммиака. Можно рекомендовать следующие параметры осаждения:

- скорости потока NH<sub>3</sub> – 50 см<sup>3</sup> / мин, SiH<sub>4</sub> – 5 см<sup>3</sup> / мин;
- температура подложки – 320 °С;
- мощность разряда – 25 Вт;
- давление 0,5 мм рт. ст.

Легирование аморфного кремния проводится добавлением в газовой фазе PH<sub>3</sub> в силан. Для обеспечения необходимого удельного сопротивления следует смешать газы в пропорции 1% PH<sub>3</sub> и 99% SiH<sub>4</sub>. Параметры осаждения:

- скорость потока PH<sub>3</sub> : SiH<sub>4</sub> – 4 см<sup>3</sup> / мин;
- скорость потока H<sub>2</sub> – 76 см<sup>3</sup> / мин;
- температура подложки – 260 °С;
- мощность разряда – 20 Вт;
- давление 0,5 мм рт. ст.

Преимуществом использования плазмохимического оборудования является возможность его применения для процессов травления при проведении фотолитографических процессов. Так, кремнийсодержащие пленки можно травить в плазме газов CHF<sub>3</sub> и O<sub>2</sub>:

- скорость потока CHF<sub>3</sub> – 45 см<sup>3</sup> / мин;
- скорость потока O<sub>2</sub> – 5 см<sup>3</sup> / мин;
- температура подложки – 45 °С;
- мощность разряда – 1 кВт;
- давление 0,025 мм рт. ст.

При этом скорость травления составляет 22 нм / с.

В плазме кислорода также можно травить фоторезист:

- скорость потока  $O_2$  – 120...1000  $cm^3$  / мин;
- мощность разряда – 300...1200 Вт;
- давление (1000 Па) мм рт. ст.

Для получения структуры ТПТ применяется техника обычной фотолитографии. При этом необходимо использовать фоторезист с разрешающей способностью не ниже 100 лин / мм.

Как уже отмечалось, poly-Si активный слой предлагается получать путем лазерной рекристаллизации пленки a-Si : H. Как и в [8], для этих целей можно использовать XeCl эксимерный лазер с длиной волны 308 нм. В случае инвертированной ступенчатой структуры (рис. 4) рекристаллизацию проводят после осаждения  $n^+$ -слоя. Величина зерен контролируется мощностью излучения.

Последовательность формирования структуры приведена на рис.5. На очищенную стеклянную подложку осаждается 100 нм пленка хрома и методом фотолитографии формируется конфигурация электрода затвора. Далее в едином технологическом цикле последовательно осаждаются пленки нитрида кремния (300 нм), a-Si : H (150 нм) и  $n^+$  a-Si : H (50 нм).

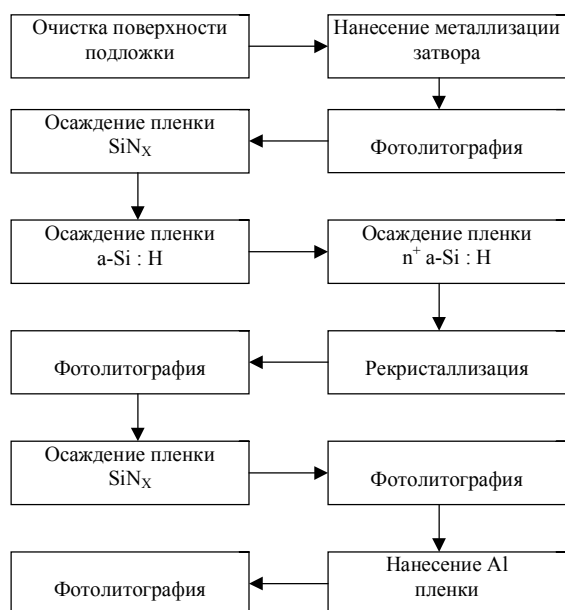


Рис. 5. Последовательность формирования структуры ТПТ

После этого при необходимости с помощью лазерного отжига проводится рекристаллизация аморфного гидрогенизированного кремния. Затем в процессе фотолитографии в плазме вытравливаются участки  $n^+$  - пленки, не участвующие в образовании омического контакта, после чего осаждаются и формируется пассивирующий слой нитрида кремния. В заключение напыляется алюминиевая пленка и с помощью фотолитографии определяется конфигурация электродов стока, истока и трасс разводки.

#### 4. Заключение

Недостатками ТПТ являются низкое быстродействие и нестабильность во времени порогового напряжения. При этом поликремниевые ТПТ при

большем, по сравнению с a-Si : H ТПТ, быстродействии из-за усиленных полей туннельных эффектов через границы зерен имеют значительные токи в закрытом состоянии. Это является основной причиной ограничения использования poly-Si ТПТ. Дальнейшее развитие ТПТ на неупорядоченном кремнии должно быть связано с разработкой технологии, позволяющей получать активные слои с как можно меньшим числом дефектов. Перспективно направление, связанное с разработкой новых структур ТПТ, позволяющих снизить напряженность электрического поля в слое проводимости.

Метод полевого эффекта может быть основой определения спектра ПС по экспериментальным характеристикам. Основой этого метода может служить простая дрейфовая модель, полученная в квазидвумерном приближении.

Описана доступная технология изготовления инвертированной ступенчатой структуры ТПТ, с помощью которой возможно получение как a-Si : H ТПТ, так и поликремниевых ТПТ за счет рекристаллизации лазером аморфной кремниевой пленки активного слоя.

**Литература:** 1. Ричман П. Физические основы полевых транзисторов с изолированным затвором. М.: Сов. радио, 1971. 142 с. 2. Holly Claudia Slate, Michael S. Shur. Analysis of bias stress on unpassivated hydrogenated amorphous silicon thin-film transistors // IEEE Trans. on ED. 1998. Vol.35, №7. P. 1548-1553. 3. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников. 4. Коуэя К.В., Теруков Е. И., Трапезникова И.Н. Распределение по энергиям локализованных состояний в аморфном гидрогенизированном кремнии //ФТП – 2000. Т. 34. Вып. 1. С. 81-85. 5. Masakiyo Matsumura, Cees Van Berkel, Yasutaka Ushida. Analysis of distributed threshold voltage transistors // IEEE Trans. on ED. 1989. Vol.36. №12. P. 2965-2970. 6. Luigi Colalongo, Maria Valdinoci, Giorgio Baccarani. Investigation on anomalous leakage currents in poly-TFT including dynamic effects // IEEE Trans. on ED. 1997. Vol.44. №11. P. 2106-2112. 7. Heinz H. Busta, Jay E. Pogemüller, Robert W. Standley, Kenneth D. Mackenzie. Self-aligned bottom-gate submicrometer-channel-length a-Si : H thin-film transistors // IEEE Trans. on ED. 1989. Vol.36. №12. P. 2883-2887. 8. Kenji Sera, Fujio Okumura, Hiroyuki Ushida, Shinji Iton, Setsuo Kaneko, Kazuaki Hotta. High-performance TFT's fabricated by XeCl excimer laser annealing of hydrogenated amorphous-silicon film // IEEE Trans. on ED. 1989. Vol.36, №12. P. 2968-2972. 9. Физика гидрогенизированного аморфного кремния. Вып. 1. Структура, приготовление, приборы / Под ред. Дж. Джоупопулоса. М.: Мир, 1987. 368 с.

Поступила в редколлегию 12.12.2000

**Рецензент:** д-р физ.мат. наук, проф. Ажажа В.М.

**Гордиенко Юрий Емельянович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. : (0572) 409-362, 321-276.

**Яковлев Дмитрий Рудольфович**, стажер-исследователь кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: тонкопленочные приборы на неупорядоченных полупроводниках. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 409-362, 937-184.