

Низкотемпературные материалы и тонкопленочные транзисторы для электроники на гибких подложках

© А. Сазонов^{*†}, М. Мейтин^{*+*}, Д. Страхилев^{*}, А. Nathan^{*}

^{*} Electrical and Computer Engineering Department, University of Waterloo,
ON N2L 3G1 Waterloo, Canada

[†] ATI Technologies Inc.,
L3T 7XG Ontario, Canada

(Получена 24 ноября 2005 г. Принята к печати 21 декабря 2005 г.)

Рассмотрены процессы осаждения и электронные свойства тонкопленочных полупроводников и диэлектриков на основе кремния для производства электронных приборов на гибких пластиковых пленках. Пленки аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$), нанокристаллического кремния ($nc\text{-Si}$) и аморфного нитрида кремния ($a\text{-SiN}_x$), а также тонкопленочные транзисторы (ТПТ) были изготовлены при низких температурах процессов (120°C , 75°C) с использованием существующего промышленного плазмохимического оборудования. Параметры тонкопленочных транзисторов на основе $a\text{-Si:H}$, изготовленных при столь низких температурах, соответствуют своим высокотемпературным аналогам.

PACS: 81.15.Gh, 85.30.Tv

1. Введение

Электронные приборы, изготовленные на гибких пластиковых подложках, или „гибкая электроника“, в последние несколько лет являются объектом бурно развивающихся исследований [1]. Это обусловлено, во-первых, возможностью создания принципиально новых продуктов на основе этой технологии (таких, как гибкие дисплеи или солнечные батареи, интегрируемые в одежду, трехмерные сферические камеры „рыбий глаз“ и т.д.) и, как следствие, расширения рынка электроники. Во-вторых, существенное снижение себестоимости производства таких приборов по сравнению с традиционной технологией производства микросхем на жесткой кремниевой или стеклянной пластине может быть достигнуто за счет использования технологии „roll-to-roll“ — изготовления приборов на движущейся пластиковой ленте, подобно печати газет. В этом случае длина пластиковой ленты может достигать нескольких километров, что гораздо больше, чем максимальный размер подложки в современной планарной технологии, составляющий 25–30 см [2,3]. В настоящее время существуют коммерческие продукты, выпускаемые по такой технологии (солнечные батареи [4,5]), и ряд прототипов (активные матрицы тонкопленочных транзисторов [6], тонкопленочные батареи [7]). Однако очевидно, что мы находимся лишь в начальной стадии развития рынка таких продуктов.

Вследствие низких максимальных рабочих температур большинства дешевых пластиков (температуры стеклования для них находятся в области $80\text{--}150^\circ\text{C}$) предельно допустимые температуры технологического процесса для гибкой электроники лежат в районе $100\text{--}150^\circ\text{C}$. Это делает невозможным использование многих технологий, традиционных для изготовления приборов на кристаллическом кремнии, таких, как термическое окисление,

диффузия или эпитаксия, и вносит жесткие ограничения на использование процессов плазмохимического осаждения, напыления, фотолитографии и т.д. Соответственно ограничен выбор материалов для приборов гибкой электроники.

Чрезвычайно привлекательным кандидатом являются органические полупроводники, особенно на базе полимеров. Полимеры могут наноситься центрифугированием при комнатной температуре, что совместимо с технологией „roll-to-roll“; подвижность носителей в органических полупроводниках (олигомерных) уже сопоставима с аморфным кремнием ($\sim 1\text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) [8]. Однако эти материалы окисляются на воздухе и, как следствие, нуждаются в пассивации, которая возможна лишь в рамках неорганической тонкопленочной технологии [9]. Кроме того, технология органических полупроводников нуждается в улучшении, поэтому в ближайшие 10 лет широкое внедрение этого класса материалов видится маловероятным.

Другим направлением является использование высокотемпературных неорганических материалов на гибких подложках, сохраняющих устойчивость при высоких температурах (гибкое стекло, металлическая фольга [10,11]). Преимуществом этого подхода является возможность использовать существующие технологии неорганических полупроводников с хорошими электронными свойствами, например, поликристаллический кремний с подвижностью носителей более $100\text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Однако вследствие высокой стоимости таких подложек и ряда их особенностей (например, в случае металлической фольги, встроенная емкость между подложкой и приборами, изготовленными на ней) такой подход приемлем лишь для ограниченного числа применений, главным образом продуктов с высокой прибавочной стоимостью (например, гибких дисплеев для цифрового телевидения с высоким разрешением).

Наконец, снижение температур в неорганических тонкопленочных процессах ниже предела дешевых пла-

[†] E-mail: asazonov@venus.uwaterloo.ca

Таблица 1. Сравнительные характеристики материалов гибкой электроники с точки зрения их применения для изготовления ТПТ

Материалы	Возможность изготовления на гибкой подложке	Технологичность и воспроизводимость	Переключающие свойства	Однородность по току на большой площади	Однородность по напряжению отсечки	Стабильность напряжения отсечки
Органические	В ближайшем будущем	Потенциально хорошая	Низкая подвижность — требуется большая величина W/L ; p -канал	Плохая — требуется программирование по току	Плохая	Плохая
Неорганические высокотемпературные (поликремний)	В будущем	Плохая	Высокая подвижность — малая величина W/L ; n -канал и p -канал	То же	»	Лучше, чем у a -Si:H
Неорганические низкотемпературные (a -Si:H)	В ближайшем будущем	Очень хорошая	Низкая подвижность — требуется большая величина W/L ; n -канал	» »	Хорошая	Плохая

стикových подложек является направлением, которому посвящена данная статья. Снизив температуру процесса, мы получаем возможность использовать более широкую номенклатуру материалов подложек, включая дешевые (бумага, ткань); большее количество материалов с низкой термической стойкостью может быть интегрировано в технологический процесс (например, адгезивы, полимеры, биологические субстанции); снижаются термические деформации подложки и термические напряжения между материалами подложки и приборов (типичные коэффициенты термического расширения для пластиковой подложки и для неорганических тонкопленочных материалов на основе кремния составляют около 10^{-5} и 10^{-6} K^{-1} соответственно); материаловедение, физика приборов и технология в этом случае достаточно хорошо развиты (например, для аморфного кремния). Таким образом, адаптация существующих тонкопленочных технологий на основе аморфного, нанокристаллического или поликристаллического кремния к технологии гибкой электроники за счет снижения температуры процесса представляется наиболее перспективным решением в ближайшем будущем.

Насколько применим тонкопленочный кремний для коммерческой электроники? Табл. 1 характеризует применимость материалов — потенциальных кандидатов для одного из наиболее распространенных приборов гибкой электроники — тонкопленочных транзисторов (ТПТ), — которые применяются в качестве пиксельных переключателей в интенсивно разрабатываемых в последнее время дисплеях на основе органических светоизлучающих диодов (OLED). За исключением подвижности и стабильности напряжения отсечки, аморфный кремний превосходит своих конкурентов. Низкая подвижность может быть компенсирована более высоким отношением ширины канала ТПТ (W) к его длине (L), W/L , а нестабильность напряжения отсечки — использованием схем ее компенсации или применением

нанокристаллического кремния в качестве активного слоя ТПТ [12]. На рис. 1 показаны области применения аморфного и поликристаллического кремния для OLED-дисплеев. Даже при использовании довольно консервативных параметров технологии можно использовать a -Si:H в активных матрицах дисплеев разрешением 800 на 600 точек (super video graphics array, SVGA) и диагональю свыше 40 дюймов (100 см), что соответствует рынку компьютерных мониторов и рекламных дисплеев.

Наш подход к разработке приборов гибкой электроники основан на использовании низких температур осаждения (ниже 150°C), совместимых с дешевыми пластиковыми подложками, на применении технологии тонкопленочного кремния и использовании существующей

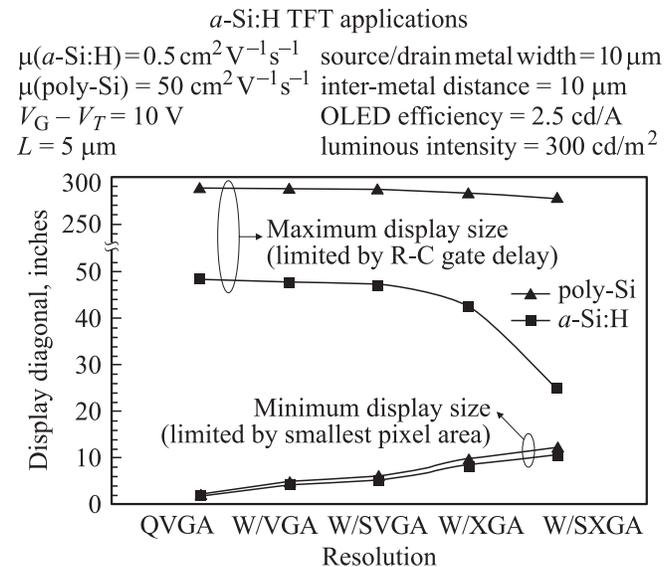


Рис. 1. Области применения аморфного и поликристаллического кремния для OLED-дисплеев (M. Hack, J. Brown, Information Display, July 2002).

Таблица 2. Свойства аморфного кремния, осажденного при температурах 260, 120 и 75°С

Температура осаждения, °С	Темновая проводимость $10^{-11} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	Оптическая ширина запрещенной зоны, эВ	Параметр Урбаха, мэВ	Концентрация водорода, ат%	Микроструктурный параметр R
260	1	1.75	50	10	~ 0
120	4.2	1.92	50	10.9	~ 0
75	9.0	1.90	55	9.5	~ 0

шего технологического оборудования, а именно, плоскопараллельных реакторов плазмохимического осаждения на частоте 13.56 МГц. Температуры осаждения (T_s) были выбраны в силу их совместимости с наиболее распространенными оптически прозрачными пластиковыми пленками: полиэтилен нафталат (PEN, $T_s = 120^\circ\text{C}$) и полиэтилен терефталат (PET, $T_s = 75^\circ\text{C}$).

2. Низкотемпературные тонкопленочные материалы на основе кремния

Что происходит с тонкопленочными материалами на основе кремния при уменьшении температуры осаждения ниже 150°C ? Увеличивается концентрация дефектов (оборванных связей), которые являются ловушками носителей заряда; увеличивается концентрация водорода в пленках, главным образом за счет ди- и полигидридов, а также водородных цепочек, что коррелирует с ухудшением электронных свойств; снижается плотность пленок, материалы становятся пористыми; снижается эффективность легирования [13]. В литературе это объясняется более низкой подвижностью радикалов, осаждаемых на поверхности пленки, вследствие снижения термической энергии в поверхностном слое (зоне роста) [14]. Известно, что поверхностная подвижность может быть увеличена за счет селективного повышения энергии частиц на поверхности роста с помощью методов иных, нежели термические („мягкая“ бомбардировка легкими ионами (H^+ , He^+) с энергией менее 50 эВ, экзотермические поверхностные химические реакции) [14,15]. Наши эксперименты были основаны на управлении параметрами осаждения таким образом, чтобы увеличить высвобождение энергии в поверхностном слое без нагрева всей подложки, и таким образом обеспечить там условия осаждения, сходные с высокотемпературными.

В табл. 2 представлены свойства аморфного кремния, осажденного при температурах 120 и 75°C . Для сравнения приведены типичные свойства материала „приборного“ качества, осажденного при более высокой температуре (260°C). Как видно, все три пленки обладают темновой проводимостью ниже $10^{-10} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, оптической шириной запрещенной зоны между 1.7 и 1.9 эВ, краем Урбаха около 50 мэВ, концентрацией водорода около 10 ат%, микроструктурным параметром R (отношение концентрации одиночных связей Si-H и полигидридов Si-H_{*n*}, $n > 1$, которое коррелирует с электронными

свойствами пленок $a\text{-Si:H}$; чем ниже R , тем лучше пленки) около нуля. Следовательно, $a\text{-Si:H}$, осажденный при низкой температуре, по своим основным характеристикам является материалом, годным для применения в электронных приборах [16,17].

В табл. 3 представлены структурные и электронные свойства пленок нанокристаллического кремния толщиной 100 нм, осажденных при температуре 75°C , и типичные свойства материала „приборного“ качества, осажденного при более высокой температуре (250°C), а также свойства сильно легированного нанокристаллического кремния n -типа, осажденного при 75°C и используемого в качестве контактного слоя к стоку и истоку тонкопленочных транзисторов. Низкотемпературный материал сопоставим по свойствам с высокотемпературным аналогом, а его темновая проводимость на порядок ниже, что предположительно связано с низким уровнем активации примесей (прежде всего, кислорода) в $nc\text{-Si}$ [18]. Таким образом, тонкопленочные транзисторы на основе такого материала могут обладать более низкими токами утечки.

В качестве подзатворного диэлектрика в ТПТ на основе $a\text{-Si:H}$ традиционно применяется плазмохимический аморфный нитрид кремния, а в ТПТ на поликристаллическом кремнии — плазмохимический оксид [19]. При снижении температуры осаждения ниже 200°C токи утечки через оксид существенно возрастают вследствие снижения плотности пленки (материал становится пористым) [20,21]. Качество оксида может быть улучшено при его осаждении в плазме высокой плотности (например, в установках электронного циклотронного резонанса) [22]. Однако максимальная площадь осаждения в таких установках ограни-

Таблица 3. Структурные и электронные свойства нанокристаллического кремния, осажденного при температурах 250 и 75°C , и свойства сильно легированного нанокристаллического кремния n -типа, осажденного при 75°C

Температура осаждения, °С	Толщина пленки, нм	Темновая проводимость, $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	Кристалличность, %	Средний размер кристаллита, нм
250	100	10^{-6}	82	—
75 (нелегированный)	100	$3 \cdot 10^{-7}$	75	20
75 (n^+)	60	0.3	72	20

Таблица 4. Свойства плазмохимического нитрида кремния, осажденного при температурах 260, 120 и 75 °С

Температура осаждения, °С	Плотность, г/см ³	Стресс, МПа	Диэлектрическая постоянная	Сопротивление при 1 МВ/см, Ом·см	Пробивное поле, МВ/см
260	3	-200	6	~ 10 ¹⁵	5
120	2.1	-173	6.2	2 · 10 ¹⁵	5.5
75	2.57	-221	5.6	2 · 10 ¹⁵	10.8
75	2.44	-44	5.8	2 · 10 ¹⁴	7.4

чена 25–30 см², что плохо совместимо с технологией „roll-to-roll“. Поэтому в наших экспериментах главным образом использовался плазмохимический нитрид кремния.

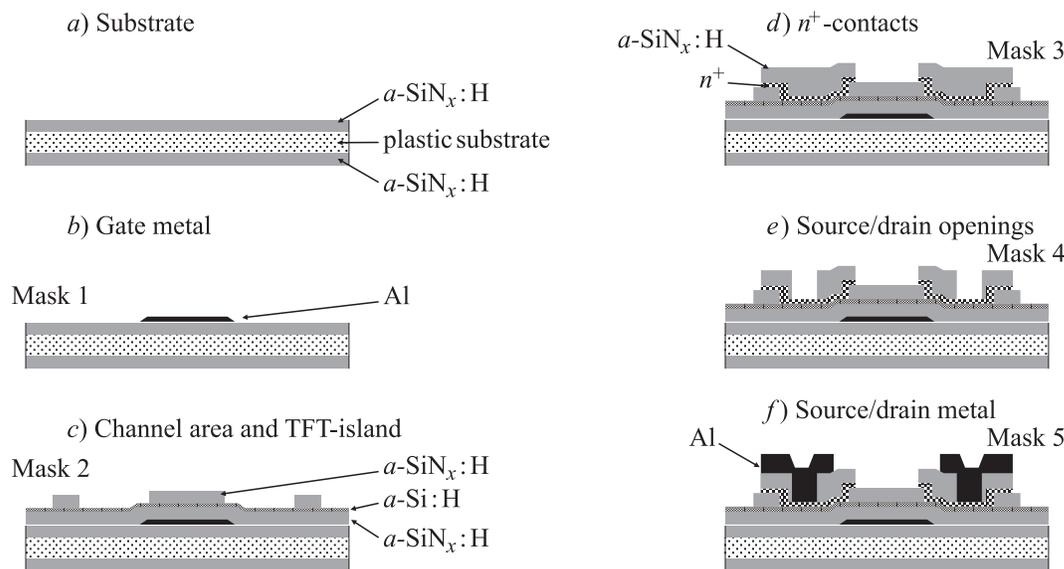
В табл. 4 представлены свойства плазмохимического нитрида кремния, осажденного при температурах 120 и 75 °С, и типичные свойства материала „приборного“ качества, осажденного при более высокой температуре (260 °С). Как видно из таблицы, изменяя параметры осаждения (мощность разряда, состав газовой смеси), мы имеем возможность контроля свойств материала в широких пределах при низкой температуре подложки, при этом получая пленки с высоким электрическим сопротивлением и пробивным напряжением, что необходимо для подзатворного диэлектрика. В то же время нитрид сохраняет высокую плотность и обладает малой величиной собственных механических напряжений, что важно для обеспечения механической целостности приборов [23].

Таким образом, ухудшение свойств тонкопленочных материалов на основе аморфного и нанокристаллического кремния при снижении температуры подложки до 100 °С и ниже может быть скомпенсировано путем оптимизации параметров осаждения в рамках существующей промышленной плазмохимической технологии.

В результате экспериментов мы получили набор материалов (*a*-Si:H, *nc*-Si, *n*⁺-*nc*-Si, *a*-SiN_x), достаточный для изготовления тонкопленочных транзисторов при низких температурах осаждения, используя пластиковые пленки в качестве подложек.

3. Низкотемпературные ТПТ

Схема технологического процесса для ТПТ на пластиковой подложке представлена на рис. 2 [16]. После отмывки подложка покрывается с обеих сторон полумикронным слоем нитрида кремния. Функция этого покрытия заключается в предотвращении контакта материала подложки с химикатами, используемыми в технологическом процессе, а также в улучшении адгезии последующих слоев. Кроме того, более низкий коэффициент термического расширения нитрида по сравнению с пластиком снижает величину ошибки совмещения при фотолитографии. Затем наносится пленка алюминия толщиной 100–120 нм с помощью высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления при комнатной температуре подложки и с помощью фотолитографии и жидкостного травления формируются затворные электроды. После этого подложки загружаются в установку плазмохимического осаждения, где оса-

**Рис. 2.** Схема технологического процесса для ТПТ на пластиковой подложке.

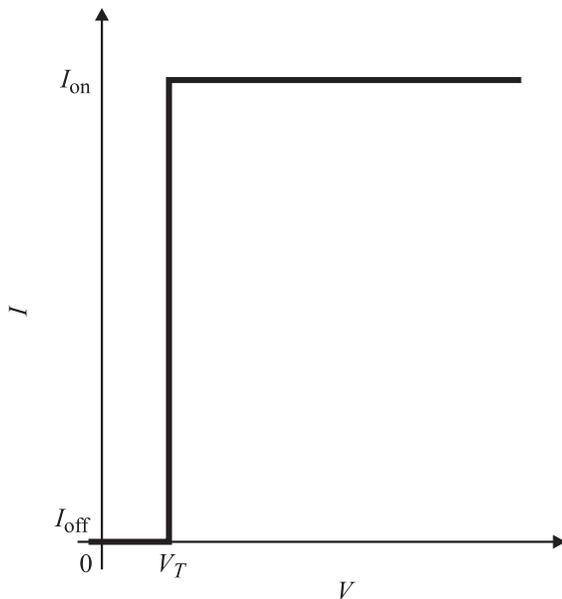


Рис. 3. Идеальная переходная характеристика ТПТ.

ждается трехслойная структура „подзатворный диэлектрик/полупроводник/пассивирующий диэлектрик“. В нашем случае осаждались пленки $a\text{-SiN}_x$ (250 нм)/ $a\text{-Si:H}$ (50 нм)/ $a\text{-SiN}_x$ (300 нм). Затем в пассивирующем нитриде фотолитографически открывались окна для нанесения контактов к стоку и истоку. Затем подложки вновь загружались в установку плазмохимического осаждения, где осаждалась двухслойная структура „ n^+ -кремний (50–60 нм)/пассивирующий нитрид (300 нм)“. Далее слои кремния вытравливаются вокруг транзисторов, чтобы электрически изолировать их друг от друга, и в нитриде открываются окна к стоку, истоку и затвору для металлизации. Наконец, наносится пленка алюминия толщиной 500–1000 нм с помощью ВЧ магнетронного распыления при комнатной температуре подложки и с помощью фотолитографии и жидкостного травления формируются металлические контакты.

ТПТ изготавливались с разной длиной и шириной канала (от 25 до 200 мкм). Выходные и переходные характеристики транзисторов измерялись и анализировались с извлечением из них основных параметров приборов (подвижность, напряжение отсечки, контактное сопротивление).

На рис. 3 показана идеальная переходная характеристика ТПТ. Поскольку ТПТ используется в качестве переключателя, его идеальная переходная характеристика представляет собой „ступеньку“: при напряжении на затворе ниже напряжения отсечки ток через затвор отсутствует, а как только напряжение на затворе достигает напряжения отсечки (V_T), через ТПТ протекает ток, ограничиваемый сопротивлением нагрузки. В реальности, в закрытом состоянии через ТПТ протекает ток утечки (I_{off}), ток открытого состояния (I_{on}) ограничен проводимостью канала, а переключение происходит в

диапазоне напряжений на затворе, и характеризуется крутизной переходной характеристики в подпороговом режиме, $S = \left[\frac{\partial(\log I_D)}{\partial V_G} \right]^{-1}$ [24].

Переходная характеристика ТПТ описывается уравнением для тока стока (I_d) полевого транзистора [24]:

$$I_d = \mu C(W/2L)(V_G - V_T)^2, \quad (1)$$

где μ — подвижность ТПТ, C — емкость структуры металл-оксид-полупроводник (МОП), W и L — ширина и длина канала, V_G — напряжение на затворе. В идеале подвижность прибора определяется подвижностью носителей заряда (в $a\text{-Si:H}$, $\mu_e \approx 10 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$); в ТПТ, однако, любые отклонения от идеальной модели транзистора (дефекты на границе раздела „полупроводник–диэлектрик“, отличия размеров транзистора от идеальных, сопротивление контактов) изменяют величину подвижности. В качественных ТПТ на основе $a\text{-Si:H}$ подвижность примерно равна $1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [12].

На рис. 4 показаны типичные выходные (рис. 4, а) и переходные (рис. 4, б) характеристики ТПТ на основе $a\text{-Si:H}$, изготовленных при температуре осаждения 260°C на стеклянной подложке [12]. Рассмотрим их более подробно. Прибор характеризуется низкими токами утечки ($< 0.1 \text{ пА}$), током открытого состояния

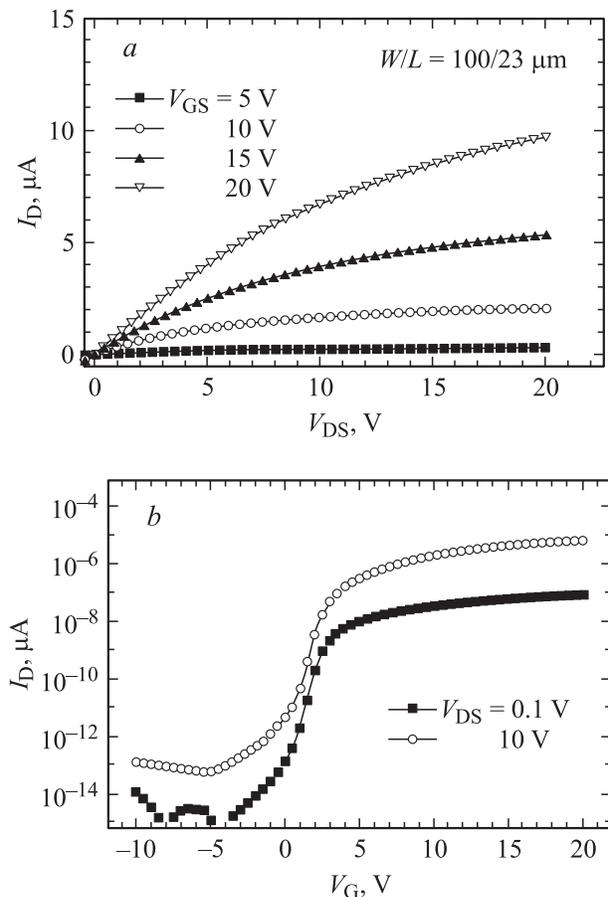


Рис. 4. Типичные выходные и переходные характеристики ТПТ на основе $a\text{-Si:H}$, изготовленных при температуре осаждения 260°C на стеклянной подложке [12].

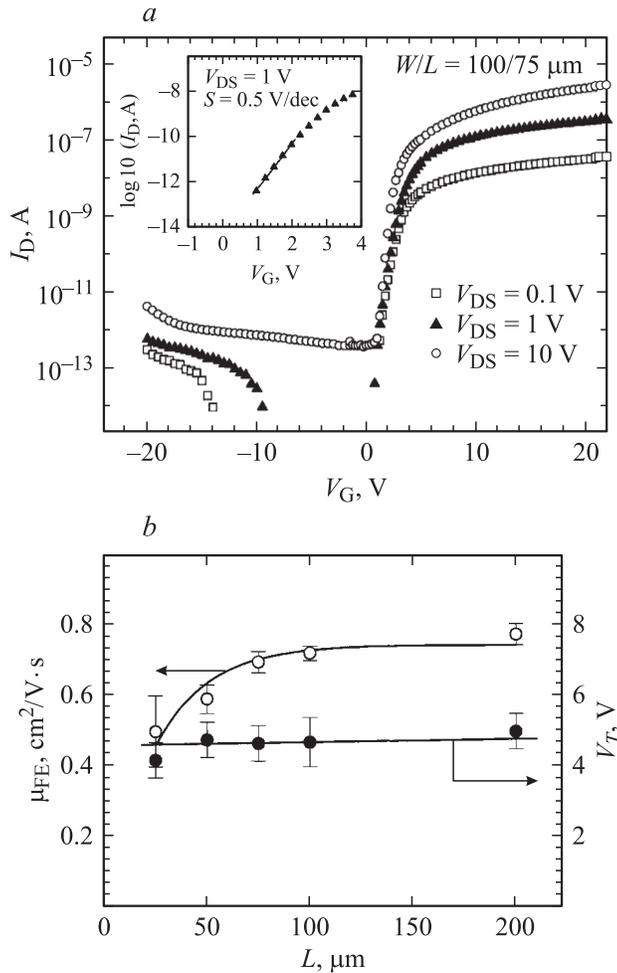


Рис. 5. Типичная переходная характеристика ТПТ на основе *a*-Si:H, изготовленных при температуре подложки 120°C (а), и зависимость величин напряжения отсечки и подвижности от длины канала (b) [25].

более 5 мА, низким напряжением отсечки (2.5 В) и высокой крутизной переключения (0.3 В/декаду). Как следствие, подвижность ТПТ, полученная из переходной характеристики, соответствует стандартным величинам, публикуемым для таких приборов (1 см²/(В·с)).

На рис. 5 показана типичная переходная характеристика ТПТ на основе *a*-Si:H, изготовленных при температуре подложки 120°C (рис. 5, а), а также зависимость величин напряжения отсечки и подвижности от длины канала (рис. 5, б) [25]. Величины тока утечки, а также напряжения отсечки остались теми же, что и в случае 260°C. Крутизна характеристики, однако, уменьшилась, что в литературе связывается с ухудшением состояния границы раздела „полупроводник–диэлектрик“, и подвижность уменьшилась до 0.8 см²/(В·с). Ток открытого состояния также снизился, и отношение I_{on}/I_{off} уменьшилось до 10^6 . Следует обратить внимание на зависимость подвижности и напряжения отсечки от длины канала: в короткоканальных транзисторах ($L < 75$ мкм) эти величины снижены по сравнению с длинноканаль-

ными, что объясняется увеличивающимся вкладом последовательного сопротивления контактов стока и истока. Если представить ТПТ в открытом состоянии как последовательность сопротивлений канала (R_{ch}), стока и истока и объединить сопротивление стока и истока величиной R_{ds} :

$$V_{ds} = I_d(R_{ch} + R_{ds}) = I_d R_m, \quad (2)$$

то, очевидно, сопротивление контактов является величиной, не зависящей от длины канала:

$$R_m = R_{ds} + R_{ch} = R_{ds} + A \cdot L, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{2}{k} \frac{V_{ch}}{(V_G - V_T) W}, \quad (4)$$

V_{ch} — падение напряжения на канале.

В длинноканальном транзисторе $R_{ch} \gg R_{ds}$, и погрешность определения μ невелика. В короткоканальном транзисторе величины R_{ch} и R_{ds} сравнимы, что приводит к некорректному определению μ . Из зависимости $R_m(L)$ можно рассчитать R_{ds} . Результаты расчетов приведены в табл. 5 для ТПТ с одинаковой шириной канала ($W = 100$ мкм). Видно, что уменьшение температуры подложки увеличивает R_{ds} , предположительно, вследствие снижения эффективности легирования. Этим в свою очередь объясняется снижение тока открытого состояния.

На рис. 6 показана переходная характеристика ТПТ на основе *a*-Si:H, изготовленных при температуре подложки 75°C (рис. 6, а), а также зависимость величин напряжения отсечки и подвижности от длины канала (рис. 6, б) [26]. Величина тока утечки по-прежнему находится ниже 1 пА; ток открытого состояния, однако, упал почти на 2 порядка, напряжение отсечки выросло до 10 В, а крутизна снизилась до 2.1 В/декаду. Как следствие, подвижность упала до 0.03 см²/(В·с). Увеличение V_T обычно объясняется большим встроенным зарядом в диэлектрике, а высокое значение S — дефектной границей раздела „полупроводник–диэлектрик“ [24]. Кроме того, если обратить внимание на зависимость подвижности от длины канала, то можно заметить, что подвижность растет с длиной канала даже в случае длинноканальных транзисторов, т.е. сопротивление канала и контактов все еще сравнимы. Проведенные расчеты показали, что сопротивление контактов $R_{ds} = (93.2 \pm 3.73)$ МΩ почти на 4 порядка выше, чем

Таблица 5. Контактное сопротивление стока и истока ТПТ при ширине канала $W = 100$ мкм и температурах подложки 260 и 75°C

Температура осаждения, °C	$R_{sd}W$, кОм·см
260	0.229
75	932

при 260°C, что приводит к некорректному определению подвижности канала ТПТ (ее значения получаются заниженными) [26].

Таким образом, снижение температуры подложки ведет к увеличению последовательного сопротивления контактов к стоку и истоку ТПТ вследствие снижения эффективности легирования и к ухудшению крутизны вследствие более дефектной границы раздела „полупроводник–диэлектрик“.

Снижение контактного сопротивления может быть достигнуто путем использования сильно легированного нанокристаллического кремния ($n^+nc\text{-Si}$) [27]. На рис. 7 представлены переходные характеристики ТПТ с n^+ -контактами на основе $nc\text{-Si}$. За счет увеличения проводимости на 4 порядка I_{on} увеличился на 1 порядок, а I_{off} снизился на 1 порядок, таким образом увеличив $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ на 2 порядка [28].

Улучшение состояния границы раздела „полупроводник–диэлектрик“ при низкой температуре осаждения может быть достигнуто путем плазменных обработок

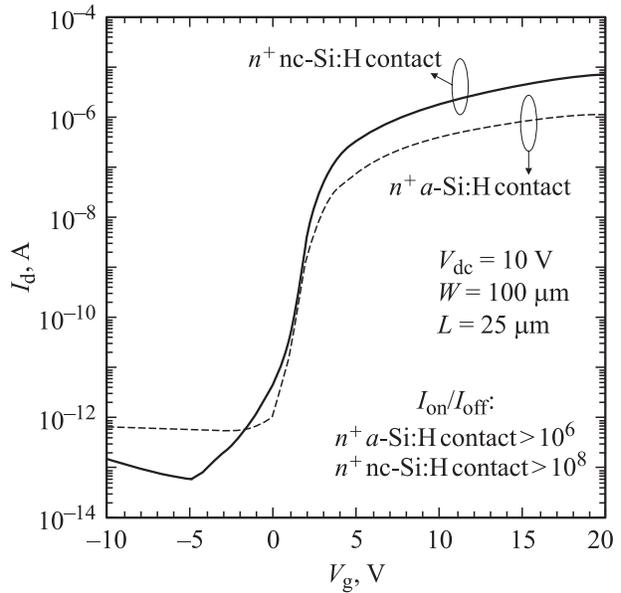


Рис. 7. Переходные характеристики ТПТ с n^+ -контактами на основе $a\text{-Si:H}$ и $nc\text{-Si}$.

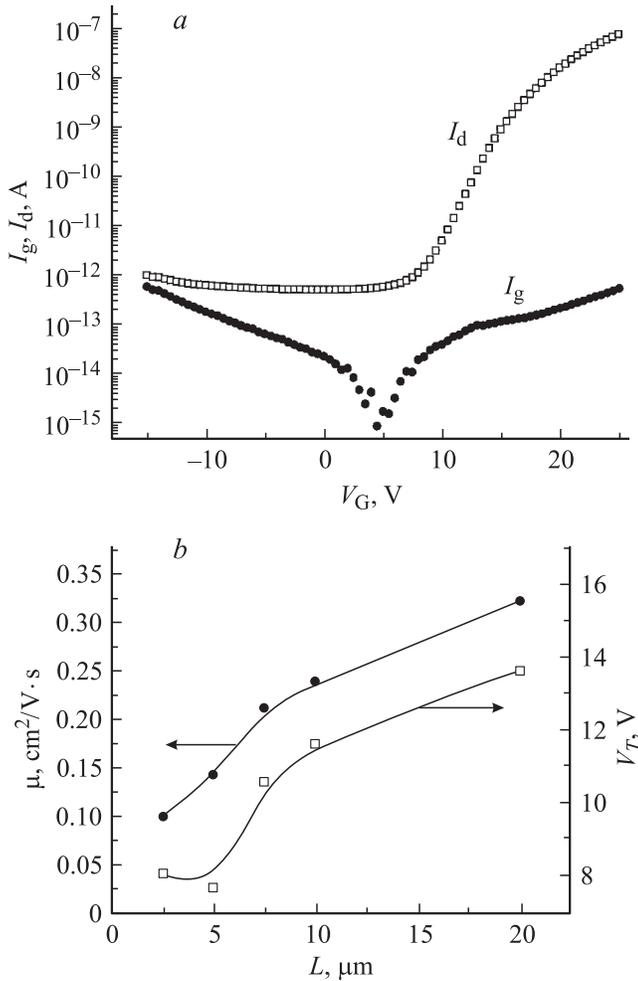


Рис. 6. Типичная переходная характеристика ТПТ на основе $a\text{-Si:H}$, изготовленных при температуре подложки 75°C (а), и зависимость величин напряжения отсечки и подвижности от длины канала (б) [26].

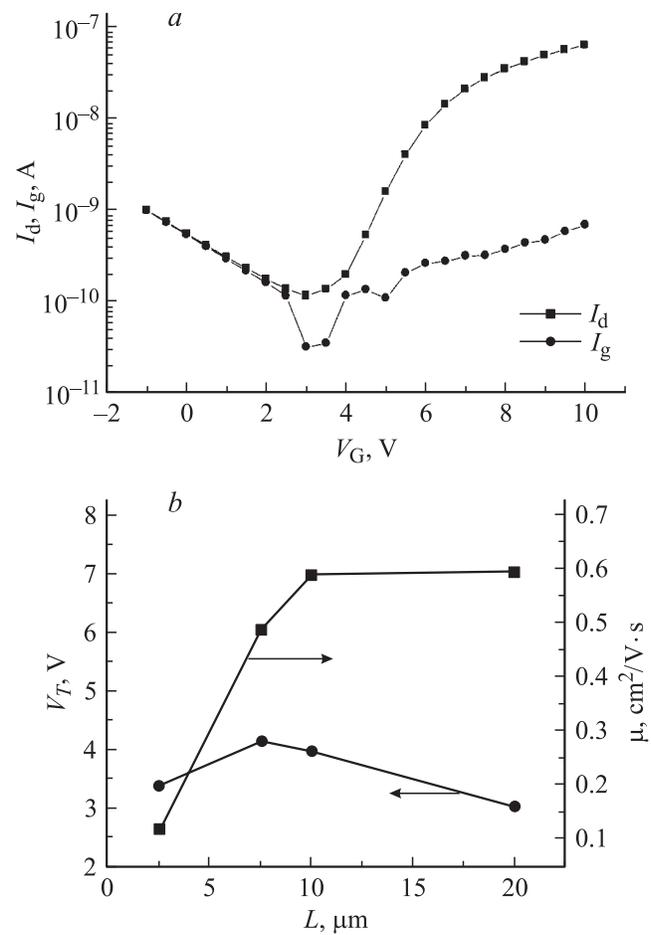


Рис. 8. Переходная характеристика ТПТ на основе $a\text{-Si:H}$, изготовленных при температуре подложки 75°C с $a\text{-SiO}_x$ в качестве подзатворного диэлектрика (а), и зависимость величин напряжения отсечки и подвижности от длины канала (б) [20].

поверхности подзатворного диэлектрика перед нанесением полупроводника, либо путем использования окисла вместо нитрида в качестве подзатворного диэлектрика (плотность поверхностных состояний в пленках оксида примерно на порядок ниже, чем у нитрида). На рис. 8 представлены переходная характеристика ТПТ на основе $a\text{-Si:H}$, изготовленных при температуре подложки 75°C с $a\text{-SiO}_x$ в качестве подзатворного диэлектрика (рис. 8, *a*), а также зависимость величин напряжения отсечки и подвижности от длины канала (рис. 8, *b*) [20]. Несмотря на высокие токи утечки, связанные с низкой плотностью материала, крутизна характеристики улучшилась до 1 В/декаду, а напряжение отсечки упало до 3 В. Подвижность возросла до $0.6\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ — результат, сопоставимый с ТПТ, изготовленным при 260°C . Как следует из зависимости подвижности от длины канала (рис. 8, *b*), контактное сопротивление существенно ниже, чем у канала, при длине канала свыше 100 мкм, что было достигнуто за счет использования нанокристаллических контактных слоев.

4. Заключение

Таким образом, наши исследования показали, что тонкопленочные транзисторы „приборного“ качества могут быть изготовлены на гибких пластиковых подложках на основе технологии аморфного и нанокристаллического кремния при температуре около 100°C с использованием стандартного плазмохимического оборудования. ТПТ, изготовленные при 120°C , по своим характеристикам полностью соответствуют своим высокотемпературным аналогам и пригодны для применения в OLED-дисплеях. Максимальная температура технологического процесса может быть снижена до 75°C , и сходные характеристики могут быть получены.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследований следующим организациям: Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC); Canada Foundation for Innovation (CFI); Ontario Innovation Trust (OIT); Ontario Premier's Research Excellence Award (PREA); Communications and Information Technology Ontario (CITO); Materials and Manufacturing Ontario (MMO); IGNIS Innovation, Inc.

Список литературы

- [1] *Flexible Electronics 2004 — Materials and Device Technology*, N. Fruehauf, B.R. Chalamala, B.E. Gnade, J. Jang (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2004, **814**.
- [2] J.R. Sheats. Proc. SPIE, **4688**, 240 (2002).
- [3] K. Allen. In: *Flexible Electronics 2004 — Materials and Device Technology*, N. Fruehauf, B.R. Chalamala, B.E. Gnade, J. Jang (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2004, **814**, p. I1.1.1.
- [4] Y. Ischikawa, T. Yoshida, T. Hama, H. Sakai, K. Harashima. Sol. Energy Mater. and Solar Cells, **66**, 107 (2001).
- [5] M. Fromm. The Washington Times, July 11, 2004.
- [6] B.S. Kim, M. Hong, Y.U. Lee, M.S. Ryu, T.Y. Choi, J.M. Huh, J.H. Seo, W.J. Lee, A.N. Park, S.G. Rho, S.I. Kim, J.S. Lim, K. Chung, S.H. Won, J.K. Chung, J.H. Ahn, J. Jang, S.-B. Kwon, W.S. Kim, K.S. Min, M.S. Choi, H.S. Kim. *SID 2004 International Symposium Digest* (May 23–28, 2004, Seattle, WA, USA) p. 19.
- [7] J. McDermott, P.C. Brantner. In: *Electronics on Unconventional Substrates — Electrotiles and Giant-Area Flexible Circuits*, M.S. Shur, P.M. Wolson, R. Urban (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2003, **736**, p. D5.1.1.
- [8] T.W. Kelley, D.V. Muires, P.F. Baude, T.P. Smith, T.D. Jones. In: *Organic and Polymeric Materials and Devices*, P.W.M. Blom, N.C. Greenham, C.D. Dimitrakopoulos, C.D. Frisbie (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2003, **771**, p. L6.5.1.
- [9] J.S. Lewis, M.S. Weaver. IEEE J. Select. Topics. Quant. Electron., **10**, 45 (2004).
- [10] A. Plichta, A. Weber, A. Habeck. In: *Flexible Electronics — Materials and Device Technology*, N. Fruehauf, B.R. Chalamala, B.E. Gnade, J. Jang (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2003, **769**, p. H9.1.1.
- [11] T. Afentakis, M.K. Hatalis, A.T. Voutsas, J.W. Hartzell. Proc. SPIE, **5004**, 122 (2003).
- [12] A. Nathan, P. Servati, K.S. Karim, D. Striakhilev, A. Sazonov. In: *Thin Film Transistors, Materials and Processes*, ed. by Y. Kuo (Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004) v. I, p. 79.
- [13] A. Sazonov, A. Nathan, R.V.R. Murthy, S. Chamberlain. In: *Flat Panel Displays and Sensors — Principles, Materials and Processes*, F.R. Libsch, B. Chalamala, R. Friend, T. Jackson, H. Ohshima (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2003, **558**, p. 375.
- [14] J. Robertson. In: *Amorphous and Heterogeneous Silicon Thin Films — 2000*. R.W. Collins, H.M. Branz, S. Guha, H. Okamoto, M. Stutzmann (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2000, **609**, p. A1.4.1.
- [15] J. Perrin. In: *Plasma Deposition of Amorphous-Based Materials*, ed. by G. Bruno, P. Capezzuto and A. Madan (Academic Press, San Diego, 1995) p. 177.
- [16] A. Sazonov, A. Nathan. J. Vac. Sci. Technol. A, **18**, 780 (2000).
- [17] A. Sazonov, D. Striakhilev, A. Nathan. J. Non-Cryst. Sol., **266–269**, 1329 (2000).
- [18] C.H. Lee, A. Sazonov, A. Nathan. In: *Amorphous and Nanocrystalline Silicon Science and Technology — 2004*, G. Ganguly, M. Kondo, E.A. Schiff, R. Carius, R. Biswas (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2004, **808**, p. A4.17.1.
- [19] Y. Kuo. In: *Thin Film Transistors, Materials and Processes*, ed. by Y. Kuo (Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004) v. I, p. 241.
- [20] M. Meitine, A. Sazonov. In: *Flexible Electronic — Materials and Device Technology*, N. Fruehauf, B.R. Chalamala, B.E. Gnade, J. Jang (eds.), Mater. Res. Soc. Sump. Proc., Pittsburgh, PA, 2003, **769**, 165.
- [21] A. Kattamis, I.-C. Cheng, S. Allen, S. Wagner. In: *Flexible Electronics 2004 — Materials and Device Technology*, N. Fruehauf, B.R. Chalamala, B.E. Gnade, J. Jang (eds.), Mater. Res. Soc. Sump. Proc., Pittsburgh, PA, 2004, **814**, p. I10.14.1.

- [22] R. Rashid, A.J. Flewitt, D. Grambole, U. Kreibig, J. Robertson, W.I. Milne. In: *Advanced Materials and Devices for Large-Area Electronics*, J.S. Im, J.H. Werner, S. Uchikoga, T. Felter, T. Voutsas, H.J. Kim (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2001, **695E**, p. D13.1.1.
- [23] C. McArthur, M. Meitine, A. Sazonov. In: *Flexible Electronic — Materials and Device Technology*, N. Fruehauf, B.R. Chalamala, B.E. Gnade, J. Jang (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2003, **769**, p. 303.
- [24] B.G. Streetman, S. Banerjee. *Solid State Electronic Devices* (Prentice Hall, Upper Saddle River, 2000) p. 286.
- [25] D. Stryahilev, A. Sazonov, A. Nathan. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **20**, 1087 (2002).
- [26] A. Sazonov, C. McArthur. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **22**, 2052 (2004).
- [27] T. Charania, A. Sazonov, A. Nathan. In: *Thin Film Transistor Technologies V*, J. Kuo (ed.), Proc. 198th Meeting Electrochem. Soc. Phoenix, Arizona, USA, **2000–31**, p. 54 (2000).
- [28] M. Meitine, A. Sazonov. In: *Flexible Electronics 2004 — Materials and Device Technology*, N. Fruehauf, B.R. Chalamala, B.E. Gnade, J. Jang (eds.), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Pittsburgh, PA, 2004, **814**, p. 16.12.1.

Редактор Л.В. Беляков

Low Temperature materials and Thin Film Transistors for Flexible Electronics

A. Sazonov*, M. Meitine*⁺, D. Striakhilev*, A. Nathan*

* Electrical and Computer Engineering Department,
University of Waterloo,
Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canada

⁺ ATI Technologies Inc.,
L3T 7XG Ontario, Canada

Abstract This paper deals with the low-temperature deposition processes and electronic properties of silicon based thin film semiconductors and dielectrics to enable the fabrication of electronic devices on mechanically flexible plastic foils. Device quality amorphous hydrogenated silicon ($a\text{-Si:H}$), nanocrystalline silicon ($nc\text{-Si}$), and amorphous silicon nitride ($a\text{-SiN}_x$) films and thin film transistors (TFTs) were fabricated using existing industrial plasma deposition equipment at the process temperatures as low as 75°C and 120°C. The $a\text{-Si:H}$ TFTs fabricated perform similarly to their high temperature counterparts.