

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА
ПОЛУПРОВОДНИК—ДИЭЛЕКТРИК
В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ ТРАНЗИСТОРЕ НА ОСНОВЕ
СТРУКТУРЫ SiO_2 — α -Si(H)—ПЛЕНКА ЛЕНГМЮРА—БЛОДЖЕТТ**

В. И. Антоненко, Д. А. Знаменский, С. М. Калугин, В. Н. Леванович,
Ю. Н. Моисеев, В. И. Панов, П. А. Тодуа, В. Н. Уласюк, Р. Г. Юсупов

Всесоюзный научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума,
117334, Москва, Россия
(Получена 16.06.1992. Принята к печати 2.07.1992)

Создан двухсторонний тонкопленочный полевой транзистор (ТПТ) на основе структуры SiO_2 — α -Si(H)—пленка Ленгмюра—Блоджетт (ЛБ) холестеринсодержащего гребнеобразного полимера. Установлено, что подвижность эффекта поля в проводящем канале ТПТ вдоль поверхности ЛБ пленки в 30 раз выше, нежели вдоль поверхности SiO_2 . Значения энергий активации проводимостей в каналах ТПТ составляют 0.44 и 0.65 эВ соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой плотности состояний на границе раздела α -Si(H)— SiO_2 по сравнению с интерфейсом α -Si(H)—ЛБ пленка, что связано с методами их формирования. На SiO_2 аморфный гидрогенизированный кремний наносился плазмохимическим методом, тогда как ЛБ пленка на α -Si(H) осаждалась путем переноса высокоупорядоченного квазидвумерного жидкого кристалла с поверхности воды. Высокое совершенство ЛБ слоев подтверждается их изображением в сканирующем атомно-силовом микроскопе.

Введение. Прогресс электронных приборов больших площадей, в частности жидкокристаллических дисплеев с активной матричной адресацией, непосредственно связан с развитием технологии тонкопленочных полевых транзисторов (ТПТ) на основе аморфного гидрогенизированного кремния. В процессе отработки технологии создания структуры таких ТПТ, как правило, используется термически окисленный монокристаллический кремний с последующим плазмохимическим осаждением α -Si(H) для формирования структуры ТПТ обращенного типа. При этом подвижность эффекта поля в таком канале может быть существенно ниже рекордных значений, составляющих $0.4 \div 1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, что является отражением физико-химических свойств интерфейса [1]. Типичные значения толщины пленки α -Si(H) на SiO_2 -подложке составляют 0.1 мкм, при этом состояние ее открытой поверхности затрудняет исследование параметров проводящего канала [2].

В данной работе проведена пассивация открытой поверхности α -Si(H) вторым подзатворным диэлектриком, выполненная по методу Ленгмюра—Блоджетт, и проведено сравнение характеристик границ раздела α -Si(H)— SiO_2 и α -Si(H)—пленка Ленгмюра—Блоджетт (ЛБ). Метод Ленгмюра—Блоджетт [3, 4] позволяет формировать при комнатной температуре на поверхности полупроводника контролируемые по толщине двумерно-упорядоченные моно- и мультимолекулярные слои органических поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые могут быть использованы в качестве подзатворного диэлектрика. Существенное отличие ленгмюровской технологии — отсутствие переходного «нарушенного» слоя, характерного, например, для термически окисленных поверхностей. Как показано в [5], характеристики ленгмюровских МДП транзисторов, выполненных на основе монокристаллического кремния, в том числе такие, как подвижность эффекта

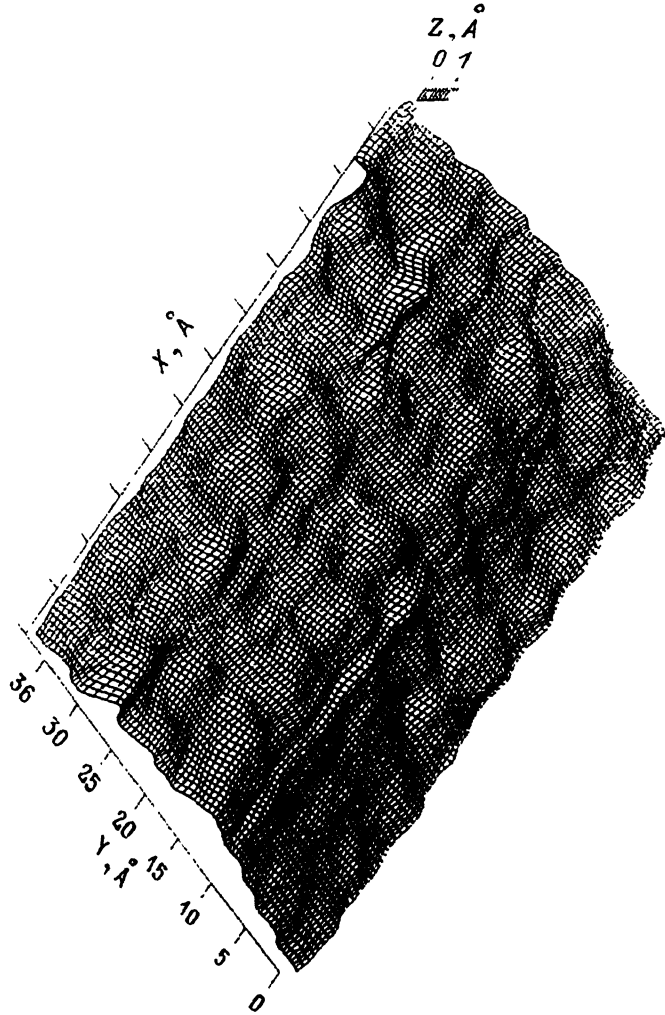


Рис. 1. Изображение поверхности ЛБ пленки ПХА-10, сформированной на подложке α -Si(H), в атомно-силовом микроскопе. Размер кадра $40 \times 60 \text{ \AA}$.

поля, могут быть выше соответствующих характеристик МОП транзисторов, выполненных на том же кремнии по традиционной технологии. Этой причиной обусловлено использование нами ЛБ пленок для сравнения характеристик проводящих каналов в геометрии двухстороннего α -Si(H) ТПТ вдоль поверхности ЛБ пленки и SiO_2 .

Методика

Пленки α -Si(H) наносились на предварительно окисленную поверхность монокристаллического кремния ориентации $\langle 100 \rangle$ с удельным сопротивлением $\rho \sim \sim 4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ методом плазмохимического осаждения путем разложения силана в ВЧ плазме тлеющего разряда. Концентрация водорода в пленке достигала 2 процентов (по данным ИК спектроскопии). Омические контакты в области стока и истока формировались путем термического напыления Al в вакууме не хуже $10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$

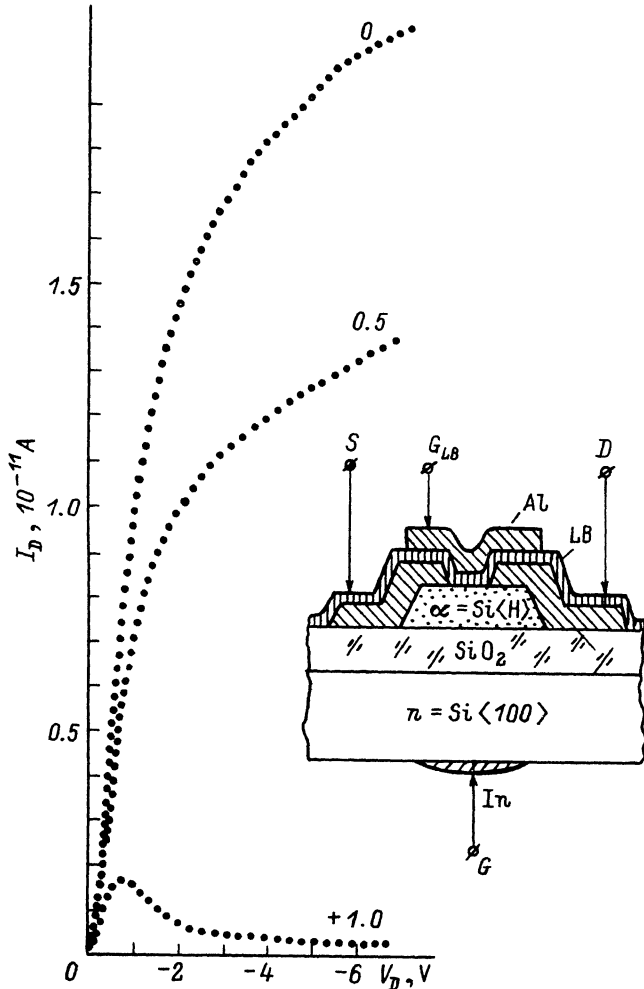


Рис. 2. Выходные характеристики ЛБ ТПТ. Цифрами указано напряжение на ЛБ затворе. На вставке — схематичное изображение двухстороннего ТПТ.

В качестве ПАВ для формирования ЛБ пленки подзатворного диэлектрика использован гребнеобразный жидкокристаллический холестерический полимер (ПХА-10) [6]. Известно, что полимерные жидкокристаллические ПАВ образуют однородные бездефектные ЛБ слои на различных твердых подложках [7, 8], в частности, на гидрофобных подложках с высокой концентрацией гидрофильных групп на поверхности (дифильные поверхности), каковыми являются поверхности α -Si(H).

Слой полимера наносили на поверхность α -Si(H) на установке Jouce Loeb по методу Ленгмюра—Блуджетт [9]. Полимер ПХА-10 растворялся в хлороформе и впрыскивался на поверхность чистой деионизованной воды. После испарения хлороформа слой полимера поджимался подвижной рамкой до образования монослоя, который наносился на поверхность α -Si(H) путем вертикального перемещения образца через границу раздела вода—монослой со скоростью 2 мм/с при постоянном поверхностном давлении 30 мН/м. Таким образом, на поверхность α -Si(H) было нанесено 20 монослоев, что при толщине монослоя 33.4 Å (по

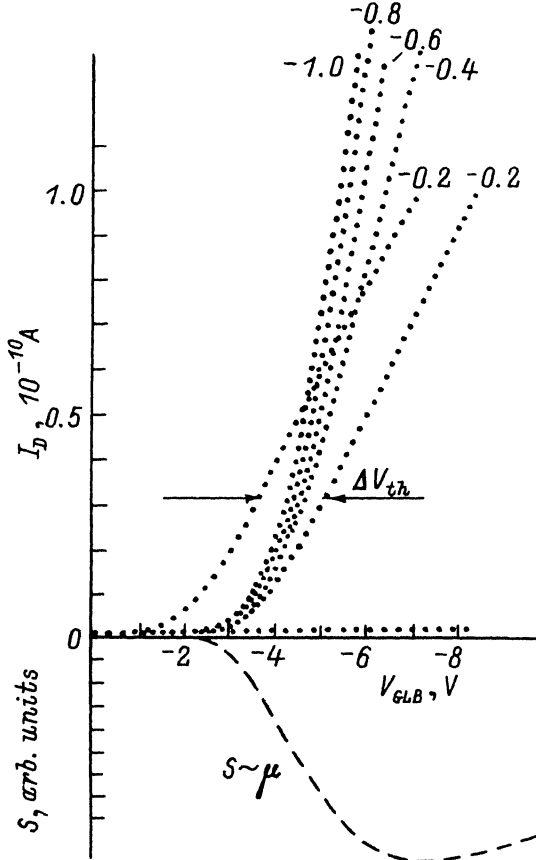


Рис. 3. Сток-затворные характеристики ЛБ ТПТ. ΔV_{th} — дрейф порогового напряжения. Цифрами указано напряжение на стоке в вольтах. В нижней части рисунка — крутизна $S = \partial I_D / \partial V_{GLB}$, полученная аналоговым дифференцированием при $V_D = -1В$.

данном малоуглового рентгеновского рассеяния) составило 67 нм. О высокой структурной упорядоченности и бездефектности полученных слоев свидетельствуют их изображения (рис. 1), выполненные методом сканирующей атомно-силовой микроскопии [10, 11]. Металлический контакт к ЛБ пленке (ЛБ затвор) получали термическим напылением Al в вакууме не хуже 10^{-6} мм рт. ст.

Далее приведены основные геометрические параметры двухсторонних интегральных ТПТ (см. вставку на рис. 2) с различной комбинацией длины L и ширины W каналов. Толщины: SiO_2 — 0.17, $\alpha-Si(H)$ — 0.1, ЛБ пленка — 0.067 мкм. $L = 10, 15$ мкм; $W = 100, 200$ мкм. Удельные емкости: SiO_2 -затвор — $c = 20.8$; ЛБ затвор — $c_{LB} = 35$ нф/см².

Измерения характеристик ТПТ проводились в диапазоне температур 80—500 К. Для измерения температурных зависимостей характеристик ТПТ использовался нагрев с постоянной скоростью $0.1 \div 0.3$ К/с для уменьшения систематических погрешностей, связанных с непостоянством скорости изменения температуры.

Обсуждение

На рис. 2—4 показаны типичные транзисторные квазистатические ВАХ двухстороннего ТПТ, в котором поочередно реализовывались проводимости обоех

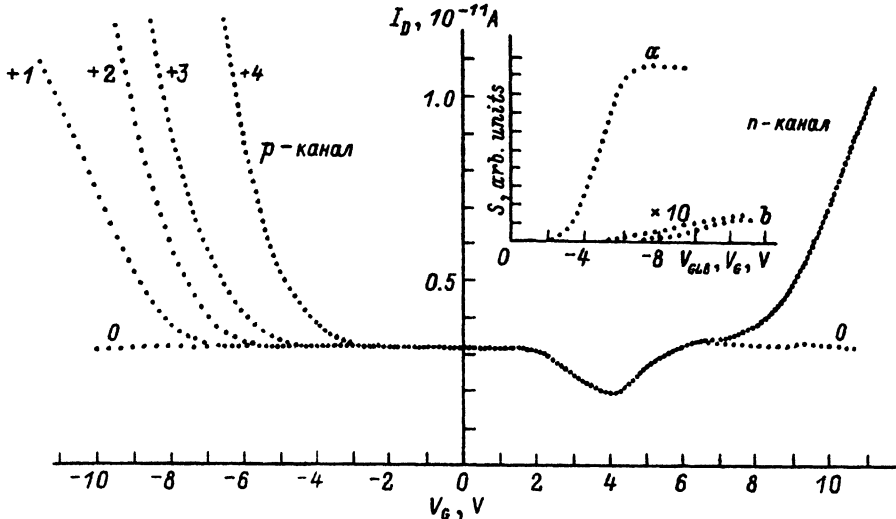


Рис. 4. Сток-затворные характеристики SiO_2 ТПТ. Цифры у кривых — V_D , В. На вставке — зависимость крутизны S от напряжения смещения на затворе для ЛБ ТПТ (а) и SiO_2 ТПТ (б).

каналов — вдоль поверхности ЛБ пленки (ЛБ канал) или SiO_2 (SiO_2 -канал) путем заземления соответствующего затвора: $V_G = 0$, изменяется V_{GLB} или $V_{GLB} = 0$, изменяется V_G . На границе ЛБ пленка — $\alpha\text{-Si(H)}$ образовывался p -канал с пороговым напряжением $V_{th} \approx 4$ В. На границе раздела SiO_2 — $\alpha\text{-Si(H)}$ реализовывались каналы n - и p -типа с величиной порогового напряжения $V_{th} > 8$ В. Следует отметить, что образование n -канала проводимости в ЛБ ТПТ затруднено из-за большого порогового напряжения $V_{th} > 12$ В. Не все ЛБ пленки выдерживали такое смещение (напряженность поля в диэлектрике выше $2 \cdot 10^6$ В/см) в результате возникновения электрического пробоя.

Интересно отметить, что в исходном состоянии в ЛБ ТПТ наблюдался встроенный p -канал с поверхностной плотностью заряда в канале $N_s \approx 2 \cdot 10^{11}$ см^{-2} (для его исчезновения на ЛБ затвор подавалось положительное смещение 1 В). В результате полевой тренировки пороговое напряжение стабилизировалось на уровне $V_{th} \approx 4$ В (рис. 3). Можно предположить, что первоначально на границе раздела $\alpha\text{-Si(H)}$ — ЛБ пленка присутствовал встроенный заряд $Q_s = \Delta V_{th} c_{LB} WL \approx 2 \cdot 10^{-12}$ Кл с плотностью $N_s = \Delta V_{th} c_{LB} / q \approx 10^{12}$ см^{-2} , где q — элементарный заряд.

Изменение пороговых напряжений характерно и для SiO_2 ТПТ: в случае p -канала $\Delta V_{th} = 1.2$, в случае n -канала $\Delta V_{th} = 0.7$ В. Этот процесс обратим и указывает на типичную инжекцию носителей заряда в SiO_2 со стороны $\alpha\text{-Si(H)}$.

На вставке к рис. 4 представлены также зависимости крутизны $S(V_G) = \partial I_D / \partial V_G$ (в случае однородного канала, т. е. для малых значений V_G для обоих каналов двухзатворного ТПТ). Исходя из соотношения $\mu = IS / cV_D$, где c — удельная емкость затвора, S — крутизна, рассчитанные значения подвижности эффекта поля в ЛБ канале $\mu_{LB}^p = 0.6 \cdot 10^{-3}$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ в 30 раз превышают соответствующее значение для SiO_2 -канала $\mu_{\text{SiO}_2}^n \approx \mu_{\text{SiO}_2}^p = 0.2 \cdot 10^{-4}$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Более высокая подвижность носителей заряда в ЛБ канале свидетельствует о меньшей плотности локализованных состояний на границе $\alpha\text{-Si(H)}$ — ЛБ пленка по сравнению с границей $\alpha\text{-Si(H)}$ — SiO_2 .

Этот вывод подтверждает и анализ температурной зависимости тока стока $I_D(1/T)$ в области температур 200—350 К (рис. 5). Для ЛБ ТПТ характерен

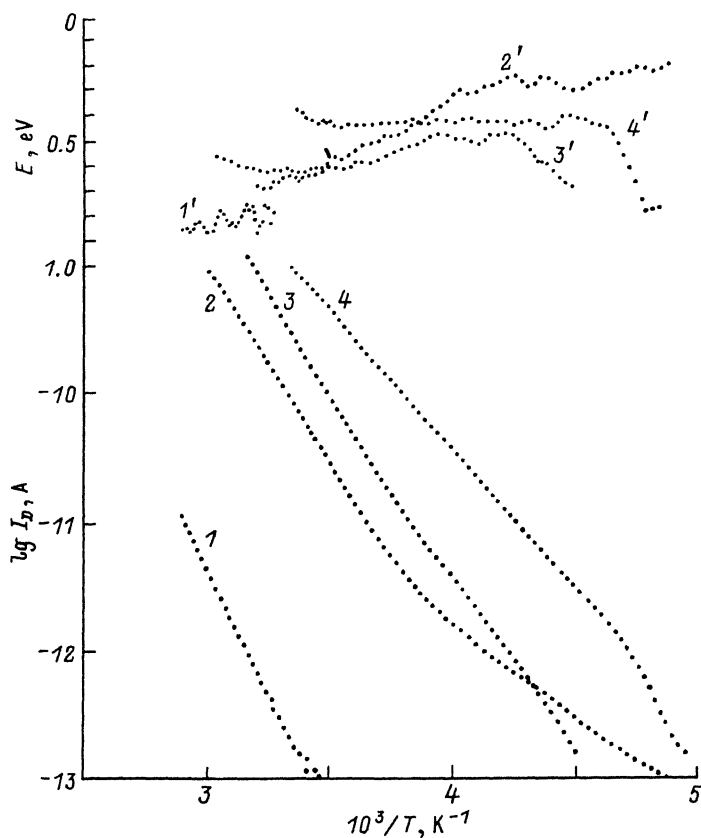


Рис. 5. Температурные зависимости тока стока I_D и соответствующие значения энергии активации E в области температур $200 \div 350$ К. 1, 1' — собственная проводимость α -Si(H) ($V_G = V_{GLB} = 0$, $V_D = +1$ В); 2, 2' — p -канал ЛБ ТПТ ($V_{GDB} = -4$, $V_G = 0$, $V_D = -1$ В); 3, 3' — p -канал SiO₂ ТПТ ($V_G = -20$, $V_{GLB} = 0$, $V_D = -1$ В); 4, 4' — n -канал SiO₂ ТПТ ($V_G = +15$, $V_{GLB} = 0$, $V_D = +1$ В). Скорость нагрева $\partial T/\partial t = 0.25$ К/с.

активационный рост тока I_D по мере нагрева с энергией $E = 0.44$ эВ. В то время как для p - и n -каналов ТПТ на границе α -Si(H)—SiO₂, получено значение энергии активации $E = 0.65 \div 0.7$ эВ. В отсутствие поля ($V_G = V_{GLB} = 0$) $E \approx 0.85$ эВ, что соответствует собственной проводимости объема пленки. Это коррелирует с данными оптических измерений (ИК спектроскопии) ширины запрещенной зоны аморфного гидрированного ($\approx 2\%$ водорода) кремния $E_{opt} = 1.59$ эВ.

Заключение. Электронные свойства границ раздела α -Si(H)—SiO₂ и α -Si(H)—ЛБ пленка в двухстороннем ТПТ характеризуются различной плотностью локализованных состояний. Она максимальна на границе α -Si(H)—SiO₂ по сравнению с границей α -Si(H)—ЛБ пленка, что связано с различием в методах их формирования. В результате подвижность эффекта поля в канале ТПТ вдоль ЛБ пленки в 30 раз выше, нежели вдоль поверхности SiO₂, что свидетельствует о перспективности применения ЛБ метода для формирования подзатворных диэлектриков в тонкопленочных полупроводниковых приборах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M. J. Powell. IEEE Trans. Electron. Dev., 36, 2753 (1989).
- [2] G. John, S. Hack, M. Hack J. Appl. Phys., 65, 2124 (1989).

- [3] G. L. Gaines. Insoluble Monolayers at Liquid—Gas Interfaces. N. Y. (1966).
- [4] П. А. Годуа, Е. Ф. Шестакова. Перспективы применения сверхтонких пленок в твердотельной электронике, 47. М. (1989).
- [5] G. I. Larkins, G. D. Fung, S. E. Rickert. Thin Sol. Films, 180, 217 (1989).
- [6] Y. S. Freidzon, V. P. Shibaev, A. V. Kharitonov, N. A. Plate, In «Advances in Liquid Crystal Research and Applications» (ed. by L. Bata), 899, Budapest (1980).
- [7] H. Ringsdorf, G. Schmidt, J. Schneider. Thin Sol. Films, 152, 207 (1987).
- [8] R. H. Tredgold. Thin Sol. Films, 152, 223 (1987).
- [9] В. Т. Ел'тазаров, А. Н. Георгобяни, Н. Г. Рамбиди, Р. А. Тодуа. Molecular Electronics, 4, 49 (1988).
- [10] С. И. Васильев, В. Б. Леонов, Ю. Н. Моисеев, В. И. Панов. Письма ЖТФ, 14, 727 (1987).
- [11] Ю. Н. Моисеев, В. И. Панов, С. В. Савинов, И. В. Яминский. Электронная промышленность, вып. 3, 39 (1991).

Редактор В. В. Чалдышев
