

07

## Коррелированное изменение электрических характеристик тонкопленочного полевого транзистора при модификации физических свойств его оксидного полупроводникового канала (InZnO : N)

© А.Б. Черемисин, Н.А. Кулдин

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия  
E-mail: acher612@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 марта 2018 г.

Исследованы изменения передаточной и вольт-фарадной характеристик тонкопленочного полевого транзистора при варьировании физических свойств оксидного полупроводникового слоя (InZnO:N), образующего канал. Для модификации электрических параметров прибора использовался эффект фотоиндуцированного накопления заряда в полупроводнике. Показано коррелированное однообразное изменение наклона и положения на оси напряжений вольт-фарадной ( $C_G - V_G$ ) и передаточной ( $I_D - V_G$ ) кривых устройства при засветке. Полученные результаты подтверждают правомерность совместного использования характеристик  $C_G - V_G$  и  $I_D - V_G$  при анализе особенностей энергетической зонной структуры оксидных полупроводников.

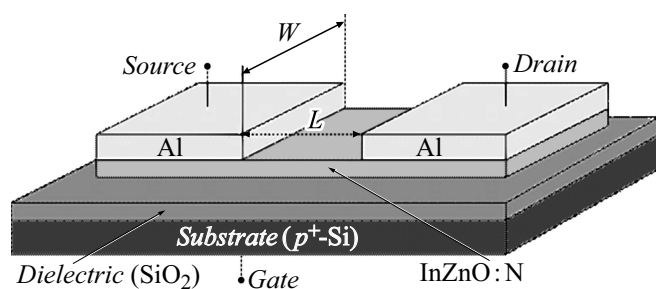
DOI: 10.21883/PJTF.2018.20.46811.17293

Одним из востребованных устройств на рынке электронных компонентов является тонкопленочный полевой транзистор (ТПТ) на основе аморфных оксидных полупроводников. Интерес к этому устройству определяется уникальной комбинацией свойств материала канала: высокая прозрачность в видимой области спектра; аморфная структура, обеспечивающая однородность слоя при нанесении на подложки большой площади; униполярная проводимость с полевой подвижностью носителей заряда более  $10 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ . Благодаря указанным качествам транзистор получил широкое применение в архитектуре активных

матриц дисплеев большой площади как переключающий/управляющий элемент отдельного пикселя [1].

Обеспечение низкого энергопотребления и высокого быстродействия современных мобильных систем требует применения тонкопленочных транзисторов с „крутой“ подпороговой областью передаточной кривой ( $I_D - V_G$ ). Подпороговый участок характеристики расположен в интервале напряжений на затворе ( $V_G$ ) от напряжения включения канла ( $V_{on}$ ) до порогового напряжения ( $V_{th}$ ). Напряжение включения канла как эмпирический параметр широко используется в литературе и соответствует потенциалу затвора, начиная с которого ток в закрытом канале транзистора ( $I_D$ ) начинает возрастать. Пороговое напряжение определяет начало формирования проводящего слоя в аморфном оксидном полупроводнике на границе с диэлектриком. Это состояние транзистора соответствует режиму обогащения. Следует отметить, что в литературе нет единого мнения о физическом смысле  $V_{on}$  и  $V_{th}$  для данного типа транзисторов.

Энергетическая зонная модель аморфного полупроводника отличается от монокристалла существованием отщепленных от разрешенных зон хвостов локализованных состояний (ЛС), простирающихся глубоко в запрещенную зону. Указанная особенность электронной структуры материала существенно влияет на транспорт носителей заряда в канале транзистора, когда он работает в подпороговой области передаточной характеристики. Поэтому определение функции распределения плотности ЛС по энергии необходимо для построения достоверной физической модели устройства и получения основных вольт-амперных характеристик. В соответствии с этой концепцией авторы работы [2] предложили использовать метод низкочастотных вольт-фарадных ( $C_G - V_G$ ) характеристик, чтобы определять профиль плотности ЛС в запрещенной зоне аморфного оксидного полупроводника, образующего канал тонкопленочного полевого транзистора. В настоящее время данный подход и его модифицированные версии с использованием передаточной характеристики транзисторной структуры получили широко распространение в литературе как экспресс-метод оценки профиля распределения ЛС по энергии [3–5]. Однако авторы таких работ не уделяют должного внимания экспериментальному подтверждению устойчивой взаимосвязи вольт-фарадной и передаточной характеристик с физическими свойствами полупроводникового канала



**Рис. 1.** Схематическое изображение архитектуры InZnO:N-транзистора с нижним затвором.

устройства перед их совместным использованием в процедуре экстракции профиля распределения ЛС в материале канала ТПТ.

В одной из наших работ показано, что оксинитрид цинка-индия (InZnO:N) является перспективным материалом для использования в качестве канала при изготовлении ТПТ [6]. Этот полупроводник демонстрирует униполярную проводимость электронного типа и имеет особенность в энергетической зонной структуре на внутренней границе с диэлектриком, а именно залегающий над потолком валентной зоны уровень локализованных состояний. Природа этих центров пока не установлена, но известно, что они не взаимодействуют с зоной проводимости. Зарядовое состояние этих центров можно контролировать, освещая канал монохроматическим излучением с энергией квантов, обеспечивающей генерацию электронно-дырочных пар в материале. При таком селективном воздействии на слой InZnO:N его электронная структура не изменяется.

В настоящей работе на примере InZnO:N-транзистора предлагается проверить следующее: не оказывается ли, что зарядовое состояние центров (а оно плохо контролируется в обычных экспериментах) по-разному влияет на кривые  $I_D - V_G$  и  $C_G - V_G$  устройства. Тогда совместное использование этих кривых в целях анализа электронной структуры стало бы неправомерным.

Для проведения эксперимента был изготовлен ТПТ с нижним затвором и каналом на основе InZnO:N. Детали процесса изготовления устройства описаны в [6]. На рис. 1 представлено схематическое

изображение ТПТ: длина канала ( $L$ ) равна  $100\ \mu\text{m}$ , ширина канала ( $W$ ) —  $700\ \mu\text{m}$ , толщина подзатворного диэлектрика и слоя  $\text{InZnO:N}$  составили  $100$  и  $10\ \text{nm}$  соответственно.

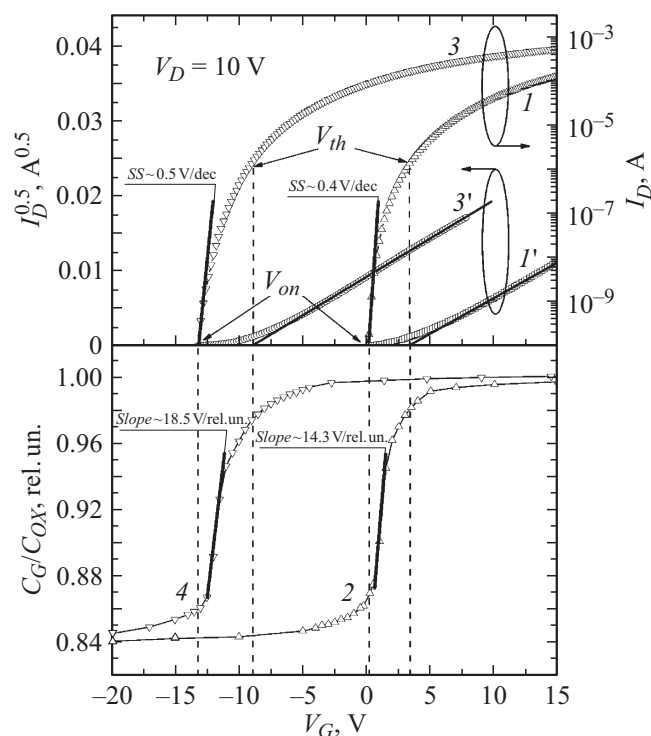
Низкочастотные вольт-фарадные характеристики транзистора измерялись при помощи прецизионного LCR-метра 7600 Quad Tech в трехтерминальной конфигурации. Для измерения емкости структуры ( $C_G$ ) переменный сигнал ( $V_{AC} = 0.1\ \text{V}$ ) вместе с постоянным смещением был приложен к электроду затвора транзистора относительно закороченных между собой контактов истока и стока. Исследование эффекта частотной дисперсии кривых  $C_G - V_G$  показало стабилизирование характеристики на оси напряжений при частоте сканирующего сигнала  $\leq 1\ \text{kHz}$  (далее эта частота использована для всех измерений  $C_G - V_G$ ).

Передаточные характеристики ТПТ измерялись в режиме прямой и обратной развертки по напряжению  $V_G$  с использованием двух источников-измерителей Keithley 2400. Во всех экспериментах напряжение стока устанавливалось равным  $10\ \text{V}$ . Отсутствие гистерезиса на кривых  $I_D - V_G$  свидетельствовало о хорошей электрической стабильности устройства. Для выбранного транзистора с помощью процедуры из работы [6] были определены следующие статические параметры: пороговое напряжение  $V_{th} = 3.4\ \text{V}$ , подвижность  $\mu_{FE} = 15\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , крутизна подпороговой области  $SS = 0.4\ \text{V/dec}$ , отношение токов on/off-состояний  $10^6$ . Полученные значения параметров рассматриваемого ТПТ соответствуют мировому уровню для подобного типа устройств [7].

Спектрофотометрические измерения коэффициента поглощения для  $\text{InZnO:N}$  показали, что его оптическая ширина запрещенной зоны составляет  $\sim 3.0\ \text{eV}$ . На основании этого в качестве источника света был выбран лазер с генерацией на длине волны  $405\ \text{nm}$  ( $3.0\ \text{eV}$ ) и плотностью мощности светового потока  $100\ \text{mW/cm}^2$ .

На рис. 2 показаны измеренный ток стока и нормированная емкость затвора как функции напряжения на затворе ТПТ для двух случаев: в исходном состоянии (кривые 1 и 2) и после засветки в течение  $500\ \text{s}$  с одновременным смещением на затворе  $-30\ \text{V}$  и стоке  $10\ \text{V}$  (кривые 3 и 4). Положения кривых  $I_D - V_G$  и  $C_G - V_G$  на оси напряжений затвора хорошо согласуются между собой в обоих состояниях устройства. Общий вид характеристик соответствует данным из литературы [4,5].

При  $V_G > V_{th}$  канал транзистора находится в режиме обогащения. На его внутренней границе образуется слой с избыточной концентрацией



**Рис. 2.** Согласованный сдвиг передаточной и вольт-фарадной характеристик при эффекте засветки канала InZnO:N-транзистора: 1, 2 — начальное состояние, 3, 4 — после освещения канала в течение 500 с с одновременным электрическим смещением на затворе (−30 V) и стоке (10 V). Плотность мощности монохроматического светового потока (405 nm) составляла 100 мW/cm<sup>2</sup>. I' и 3' — квадратно-коренные зависимости тока стока от напряжения на затворе, полученные из соответствующих передаточных характеристик транзистора (к определению порогового напряжения).

основных носителей тока по отношению к их равновесному значению в объеме InZnO:N. Поверхностные состояния заполняются электронами, а уровень Ферми располагается в зоне проводимости аморфного полупроводника. Полевая подвижность основных носителей заряда достигает максимального значения в канале, а на передаточной кри-

вой наблюдается характерная сублинейная зависимость тока стока от электрического потенциала на затворе. Полная электрическая емкость структуры на этом участке напряжений соответствует геометрической емкости подзатворного диэлектрика, что выражается в характерном плато на вольт-фарадной характеристике.

При  $V_G < V_{on}$  канал транзистора переходит в состояние полного обеднения. Этот процесс сопровождается термически активированным опустошением мелких ловушек электронами с переходом последних в зону проводимости и последующим вытеснением свободных носителей тока из канальной области на контактные площадки. Область пространственного заряда распространяется на всю толщину полупроводникового слоя канала. Ток стока на этом участке напряжений выражен токами утечки в транзисторной структуре и в нашем случае составляет менее  $10^{-10}$  А. Емкость структуры определяется площадью контактных областей и не зависит от электрического потенциала на затворе. Отметим, что глубина модуляции емкости, вычисленная из вольт-фарадной характеристики как разность значений, взятых при напряжении затвора 15 и  $-20$  В, для исходного состояния ТПТ и после засветки составила примерно 0.15 rel. un. (rel. un. — относительные единицы) и хорошо согласуется с уменьшением геометрической площади  $(1 - \frac{(W-L)W}{W^2}) \cong 0.14$  rel. un.) структуры за счет выключения канальной области.

Интервал напряжений  $V_{on} < V_G < V_{th}$  соответствует переходу транзистора из режима обеднения в состояние обогащения канала основными носителями. Физически уровень Ферми, следуя за изменением электрического потенциала на затворе, движется из запрещенной зоны ко дну зоны проводимости InZnO:N. Скорость этого процесса зависит от плотности локализованных состояний на границе диэлектрик/полупроводник и отражается на величине наклона передаточной и вольт-фарадной кривых устройства.

Также на рис. 2 представлены результаты количественной оценки крутизны для каждой из характеристик. Здесь крутизна подпороговой области кривых  $I_D - V_G$  была измерена по наклону касательной прямой, проведенной в точку напряжения включения канала, а наклон кривых  $C_G - V_G$  определялся исходя из прямолинейного участка модуляции емкости в зависимости от напряжения на затворе. Из рисунка видно, что эффект засветки канальной области выражается в синхронном сме-

шении характеристик  $C_G - V_G$  и  $I_D - V_G$  устройства в направлении отрицательных напряжений на затворе со слабой деградацией их наклона. При этом указанные кривые дают одинаковую количественную оценку эффекта, а именно сдвиг по оси напряжений  $\Delta V_{on} \approx -12$  В и увеличение наклона характеристик примерно на 25% от наклона для исходного состояния. Наблюдаемый сдвиг обеих кривых свидетельствует о том, что положительный заряд накапливается преимущественно на внутренней границе подзатворный диэлектрик/полупроводник и действует как фиксированный заряд. Увеличение наклона кривых обусловлено процессом генерации новых дефектов в канале [6].

Полученные результаты подтверждают устойчивую взаимосвязь передаточной и вольт-фарадной характеристик с физическими свойствами полупроводникового канала ТПТ, заключающуюся в однообразном изменении их наклона и положения на оси  $V_G$  при фотоиндуцированной модификации электронной подсистемы канала. Этот факт подтверждает применимость методов вольт-фарадных и передаточных характеристик для определения профиля распределения плотности локализованных состояний в запрещенной зоне оксидного полупроводника, образующего канал тонкопленочного полевого транзистора.

## Список литературы

- [1] *Kwon J.Y., Jeong J.K.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2015. V. 30. N 2. P. 024002 (1–16).
- [2] *Kimura M., Nakanishi T., Nomura K., Kamiya T., Hosono H.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. N 13. P. 133512 (1–3).
- [3] *Park J.-H., Jeon K., Lee S., Kim S., Kim S., Song I., Kim C.J., Park J., Park Y., Kim D.M., Kim D.H.* // *IEEE Electron Dev. Lett.* 2008. V. 29. N 12. P. 1292–1295.
- [4] *Qiang L., Yao R.-H.* // *J. Display Technol.* 2015. V. 11. N 4. P. 325–329.
- [5] *Lee H., Kim J., Choi S., Kim S.K., Kim J., Park J., Choi S.-J., Kim D.H., Kim D.M.* // *IEEE Electron Dev. Lett.* 2017. V. 38. N 2. P. 199–202.
- [6] *Cheremisin A.B., Kuznetsov S.N., Stefanovich G.B.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2016. V. 31. N 10. P. 105011 (1–9).
- [7] *Li M., Lan L., Xu M., Xu H., Luo D., Xiao P., Peng J.* // *Solid-State Electron.* 2014. V. 91. P. 9–12.