

шетки подложки и пленки; приводит к индуцированным деформациями изменениям температуры перехода и спонтанной поляризации, знак которых зависит от значений конкретных упругих и электрострикционных констант.

Подобные эффекты были обнаружены для пленок  $\text{BaTiO}_3$  на различных подложках [9]. В [10] показано, что если параметр решетки подложки отличается от параметра решетки пленки, а толщина пленки больше некоторого критического значения, то деформации в пленке могут частично релаксировать путем образования дислокаций несоответствия. При отсутствии такой релаксации, например, для пары  $\text{BaTiO}_3/\text{MgO}$  реализуется ситуация “расширения” пленки, относительная деформация пленки за счет эпитаксиального рассогласования при комнатной температуре может составлять величину порядка 5%. При такой величине деформации температура фазового перехода может возрасти до 700 К [11].

1. R. Zuleeg, H.H. Wieder. // Sol. St. Electron., 9, 657 (1966).
2. David E. Sawyer. // Appl. Phys. Lett. 13, 392 (1968).
3. Hunter D., Lord K., Williams T. M., Zhang K., Pradhana A. K., Sahu D. R. and J.-L. Huang. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 092102.
4. Lanzhong H., Qingzhong X., Xili G., Qun L., Qingbin Z., and Keyou Y. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 212105.
5. Guo-zhen L., Kui-juan J., Jie Q., Meng H., Hui-bin L., Jie Xing, Yue-liang Z., and Guo-zhen Y. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 252110.
6. Fridkin V.M. Ferroelectric semiconductors. New York: Consultants Bureau, 1980. 318 p.
7. S.V. Baryshnikov, E.V. Charnaya, A.Y. Milinskii, Y.A. Shatskaya, D. Michel. //Physics of the Solid State 54, 636 (2012).
8. C.L. Wang, Y. Xin, X.S. Wang, W.L. Zhong. // Phys. Rev. B 62, 11423 (2000).
9. K. J. Choi, M. Biegalski, Y. L. Li, A. Sharan, J. Schubert, R. Uecker, P. Reiche, Y. B. Chen, X. Q. Pan, V. Gopalan, L.-Q. Chen, D. G. Schlom, C. B. Eom. // Science 306, 1005 (2004).
10. J.S. Speck, W. Pompe. // J. Appl. Phys. 76, 466 (1994).
11. B.-K. Lai, I.A. Kornev, L. Bellaiche, G.J. Salamo. //Appl. Phys. Lett. 86, 132 904 (2005).

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРОВ С ТОНКИМИ ПЛЕНКАМИ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ НА КРЕМНИИ-(111) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ MINIMOS-NT

Векслер М.И.<sup>1</sup>, Илларионов Ю.Ю.<sup>1,2</sup>, Тягинов С.Э.<sup>1,2</sup>, Соколов Н.С.<sup>1</sup>, Федоров В.В.<sup>1</sup>, Grasser Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербург, Россия, Физико-технический институт РАН

<sup>2</sup>Вена, Австрия, Institute for Microelectronics (TU Wien)  
shulekin@mail.ioffe.ru

Фторид кальция ( $\text{CaF}_2$ ) – перспективный кристаллический изолятор, обладающий удачным сочетанием важнейших параметров (Рис. 1), в том числе высокими барьерами на границе  $\text{CaF}_2/\text{Si}$  и большим значением эффективной массы, что способствует снижению туннельных токов [1]. Близость постоянных решеток фторида (0.546 нм) и кремния (0.543 нм) позволяет когерентно выращивать  $\text{CaF}_2$  на подложках  $\text{Si}(111)$  методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Недавно удалось [2] изготовить структуры металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) с тонкими (1-3 нм) слоями  $\text{CaF}_2$  приборного качества, что сделало реальными применение фторида в устройствах функциональной электроники (например, резонансно-туннельных диодах  $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$  [3]) и возрождение идеи использования его как подзатворного изолятора в полевых транзисторах [4].

Получение высококачественных слоев  $\text{CaF}_2$  резко повышает требования к методам моделирования процессов переноса заряда в соответствующих структурах. Если ранее было достаточно использовать прототипы симуляторов, написанные под конкретные задачи в лабораторных условиях, то на новом этапе уже целесообразно вос-

пользоваться промышленными симуляторами, адаптируя их к новому диэлектрическому материалу. В настоящей работе используются такие всемирно признанные программы, как MINIMOS-NT и Vienna SHE [5]. Их применение является существенным шагом вперед в технике моделирования приборов на основе пленок фторида кальция.

Параметры CaF <sub>2</sub>	
Band-gap	12.1 eV
Electron affinity	1.67 eV
Relative permittivity	8.43
Breakdown field	~ 10 <sup>7</sup> V/cm
Surface state density	~ 10 <sup>12</sup> cm <sup>-2</sup>
C-band offset to Si	2.38
C-band effective mass	1.0m <sub>0</sub>

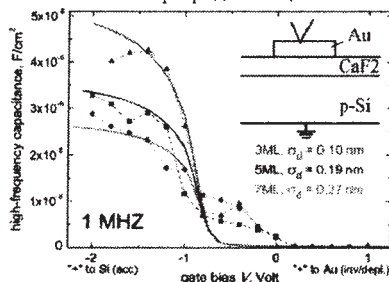


Рис. 1. Таблица параметров фторида кальция. Измеренные и рассчитанные вольтфарадные кривые с структур Au/CaF<sub>2</sub>/pSi(111) с номинальной толщиной фторида 3ML (треугольники), 5ML (квадраты) и 7ML (кружки)

Рассматриваемая в работе адаптация симулятора затрагивает два аспекта. Первый – это проблема сохранения поперечного волнового вектора электрона при туннелировании в непрямозонный полупроводник или из него, актуальная для ориентации кремния (111), но применительно к приборам с SiO<sub>2</sub> обычно не рассматриваемая должным образом. Второй аспект касается подвижности носителей на границе CaF<sub>2</sub>/Si(111). Часть расчетных данных дополнена нашими экспериментальными результатами – детали технологии изложены в статье [2]; наиболее принципиальным моментом выступает низкая температура роста: 250 °C. Полученные пленки CaF<sub>2</sub> в несколько монослоев (1 ML = 0.315 nm) отличаются весьма умеренной пространственной флуктуацией толщины  $\sigma_d$  (Рис. 1).

Традиционным способом первичной диагностики МДП-структур является измерение и анализ вольтфарадных характеристик (ВФХ). На Рис. 1 показаны высокочастотные ВФХ структур с CaF<sub>2</sub> и результаты моделирования с учетом приповерхностного квантования; высота барьера на границе Au/CaF<sub>2</sub> положена равной 2.63 эВ. Соответствие теоретических зависимостей измеренным говорит об адекватности выбора параметров и состоятельности расчетной процедуры в целом. Некоторая деформация экспериментальных кривых связана с наличием поверхностных состояний; их плотность  $N_H$  оценивается как ~ 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>.

Формула для вычисления электронного туннельного тока через тонкий диэлектрик, имплементированная в симулятор, имеет вид

$$j_e = \frac{4\pi q v_1 m_1}{h^3} \int_{E_{c0}}^{\infty} \xi(E) (f_s(E) - f_m(E)) \int_0^E T^*(E, E_1) dE_1 dE, \quad (1)$$

где  $m_1$  – масса частицы в кремнии в плоскости структуры,  $v_1$  – кратность вырождения,  $\xi(E)$  – корректирующая функция, учитывающая квантование,  $f_m$  и  $f_s$  – суть функции Ферми для металла и Si, а  $E_1$  – «поперечная» часть полной энергии электрона  $E$ . Вероятность туннелирования обозначена как  $T^*$ ; звездочка указывает на отличие вероятности от той, которая непосредственно находится по квазиклассической формуле. Вообще говоря, при расчете для системы CaF<sub>2</sub>/Si(111) сохранение поперечного волнового вектора  $k_{\perp}$  требует обращения к формулам с интегрированием по  $E$  и  $k_{\perp}$  или же предварительного усреднения вероятности туннелирования по состояниям с заданной парой  $E$ ,

$E_1$  [2]. Оба эти способа сложны для промышленного симулятора. Поэтому предлагается эмпирическое выражение

$$T(E, E_s) = \exp\left[-2\hbar^{-1} \int \sqrt{2m_e(E_{cl}(z) - E + m_e^{-1}E_s + m_0 m_e^{-1} \Delta E(E))} dz\right]. \quad (2)$$

Здесь  $m_e$  – масса электрона в  $\text{CaF}_2$ ,  $E_{cl}$  – энергия края зоны проводимости фторида,  $\Delta E(E)$  – эффективный сдвиг энергии туннелирующих носителей, оцениваемый как  $\Delta E_0 \cdot \exp(-E/E_s)$ , где максимальный сдвиг  $\Delta E_0$  составляет 2.44 эВ, а  $E_s$  – подгоночный параметр, подбор которого базируется на двух упомянутых выше способах (левый Рис. 2). Оптимальным оказывается значение  $E_s = 1.0$  эВ.

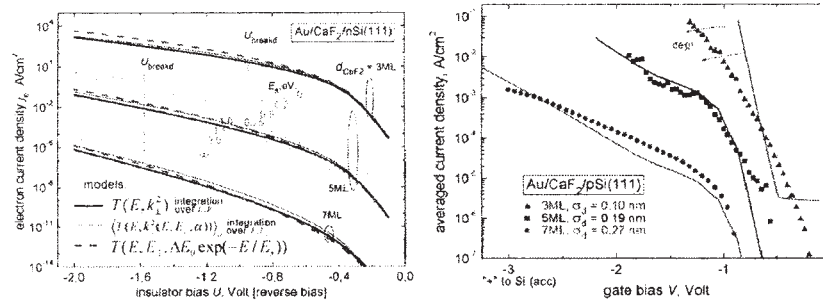


Рис. 2. Подбор параметра, характеризующего сдвиг энергии туннелирующих в Si(111) электронов. Пример расчета тока утечки через МДП-структуру с  $\text{CaF}_2$ , в сопоставлении с экспериментальными данными

На Рис. 2, справа, аккумуляционные ветви МДП-структур на p-Si, рассчитанные с помощью симулятора MINIMOS-NT, сопоставлены с данными измерений. Рассматривался обычный МДП-конденсатор, а не транзистор промышленной конфигурации. Можно констатировать неплохое согласие соответствующих кривых.

Имея в виду перспективу применения  $\text{CaF}_2$  в полевом транзисторе (MISFET), мы выполнили расчет выходных характеристик (ток стока в зависимости от напряжения сток-исток,  $I_d V_d$ ) транзистора со слоем фторида. Сначала в качестве «опорного» прибора был взят MISFET компании *imes* с длиной затвора 65 нм и подзатворным слоем SiON. Его архитектура была смоделирована с использованием симулятора технологических процессов Sentaurus Process [6]. Для расчета  $I_d V_d$  характеристик данного транзистора симулятор MINIMOS-NT был откалиброван так, чтобы воспроизвести экспериментальные  $I_d V_d$ - и  $I_d V_g$ - кривые. Для учета снижения подвижности из-за эффектов квантования и рассеяния использована модель Хенша [5, 7]. Расчет  $I_d V_d$ -характеристик MISFET'a с  $\text{CaF}_2$  проведен аналогично с заменой параметров SiON на значения для  $\text{CaF}_2$ .

Наличие состояний с достаточно высокой концентрацией  $N_{it}$  на интерфейсе с фторидом приводит к заметному снижению подвижности носителей в канале. Данный эффект описывается стандартной моделью, уже имплементированной в MINIMOS-NT [8]:

$$\tilde{\mu} = \frac{\mu_0}{1 + \alpha N_{it} \exp(-r/r_{ref})}, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – подвижность при идеальной границе, а  $\alpha$  и  $r_{ref}$  – параметры, определяющие величину эффекта и длину, на которой носитель, находящийся на расстоянии  $r$  от интерфейса, «чувствует» ловушку. Пример расчета  $I_d V_d$ -характеристик транзисторов на основе традиционных диэлектриков  $\text{SiO}_2$ , SiON и изучаемого материала –  $\text{CaF}_2$  – приведен на Рис. 3.

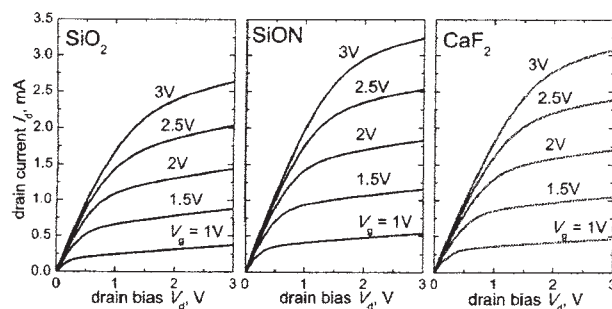


Рис. 3. Пример расчета семейств выходных характеристик транзисторов идентичной архитектуры, отличающихся выбором подзатворного диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiON}$  и  $\text{CaF}_2$ ). Толщина диэлектрика 2.5 нм

Транзистор с  $\text{CaF}_2$  по новой технологии пока не изготовлен. Однако это не является чем-то малореальным: уже в статье [4] сообщалось о получении MISFET'ов с фторидом, хотя качество роста в то время было явно ниже. Преимущества фторида как элемента MISFET ранее обсуждались и в контексте создания трехмерных интегральных схем, так как поверх  $\text{CaF}_2$  могут быть выращены слои Si и силицидов.

Таким образом, в работе была впервые проведена имплементация «опции  $\text{CaF}_2$ » в промышленный симулятор. Теперь возможен расчет с этим перспективным диэлектриком на том же математическом уровне, что и с другими материалами, используемыми в современной микроэлектронике. При этом существенная часть расчетных результатов подкреплена измерениями, которые иллюстрируют прогресс в технологии фторида.

1. W. Hayes [eds.], "Crystals with the fluorite structure..." – Oxford: Clarendon (1974).
2. Y. Y. Ilarionov, M. I. Vexler., S. M. Sutorin et al., *Microelect. Eng.* 88 (2011) 1291.
3. M. Watanabe, T. Funayama, T. Teraji, N. Sakamaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* 39 (2000) L716.
4. T. P. Smith, P. J. Stiles, J. M. Phillips, W. M. Augustyniak, *Appl. Phys. Lett.* 45 (1984) 907.
5. Institute for Microelectronics, TU Wien, MINIMOS-NT Device and Circuit Simulator.
6. Synopsis, Sentaurus Process, Advanced Simulator for Process Technologies.
7. S. Selberherr, W. Haensch, M. Seavey, J. Slotboom, *Solid State Electron.* 33 (1990) 1425.
8. S. Tyaginov et al., in "Silicon Nitride, Silicon Dioxide, and Emerging Dielectrics", *ECS Trans.* (2011) 321.

### АНТЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Волошин А.А., Руда Н.А., Прокопенко Ю.В., Поплавко Ю.М.  
 Киев, Украина, Национальный технический университет Украины «Киевский Политехнический Институт»  
 poplavko@voliacable.com

Стремительное развитие и миниатюризация средств мобильной связи усилило интерес к антенным системам, способным легко размещаться в корпусе любой формы и размера. В то же время использование нескольких стандартов беспроводной связи в одном устройстве приводит к увеличению числа поддерживаемых частотных диапазонов. Исходя из этих требований, появляется необходимость в проектировании многодиапазонных или перестраиваемых антенн малых размеров.

Двумя наиболее подходящими кандидатами на роль такого типа антенн являются