

Существенное влияние процесс ударной ионизации оказывает на ВАХ диода при напряжениях между электродами больших 1,5 В. Отметим, что аналогичное исследование для n-канального глубокосубмикронного МОП-транзистора было выполнено нами в [5], результаты которого также выявили сильную зависимость ВАХ этого прибора от интенсивности процесса межзонной ударной ионизации.

На рисунке 2б в качестве примера приведены зависимости плотности тока в канале диода от времени вместе с ее средними установившимися значениями для напряжений  $V$  между электродами 1, 2 и 3 В (большему значению напряжения соответствует большее среднее значение плотности тока).

Анализ рассчитанных зависимостей показал, в частности, что имеет место значительный рост величины дисперсии плотности тока в случае учета процесса ударной ионизации по отношению к величине дисперсии, рассчитанной без учета этого процесса. Для более детального количественного анализа влияния процесса ударной ионизации на флуктуации тока диодов необходим расчет других важных параметров, таких как, например, корреляционные функции, что является предметом дальнейших исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Gonzalez, T.* Monte Carlo simulation of noise in electronic devices: limitations and perspectives / T. Gonzalez [et al.] // Unresolved Problems of Noise and Fluctuations: UPoN 2002: Third International Conference. 2003. Vol. CP665. P. 496.
2. *Rengel, R.* A microscopic interpretation of the RF noise performance of fabricated FDSOI MOSFETs / R. Rengel [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. 2006. Vol. 53. No 3. P. 523.
3. *Muscato, O.* Electrothermal Monte Carlo validation of a hydrodynamic model for sub-micron silicon devices / O. Muscato, V. Di Stefano // Journal of Physics: Conference Series. 2009. Vol. 193. P. 1.
4. *Борздов, В. М.* Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубокосубмикронном кремниевом n-канальном МОП-транзисторе / В. М. Борздов [и др.] // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 3. С. 188.
5. *Speransky, D.* Impact ionization process in deep submicron MOSFET / D. Speransky, A. Borzdov, V. Borzdov // International Journal of Microelectronics and Computer Science. 2012. Vol. 3. No 1. P.21.

#### УМЕНЬШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРЕМНИЕВЫХ СЛОЯХ СТРУКТУР КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИМПУЛЬСАМИ БЕЛОГО СВЕТА СО СТОРОНЫ САПФИРОВОЙ ПОДЛОЖКИ

А. Б. Герасимов<sup>1</sup>, Г. Д. Чирадзе<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Грузинский технический университет, департамент физики,

<sup>2</sup>Госуниверситет Акакия Церетели, департамент физики,

*gogichiradze@yahoo.com*

Использование гетероструктур кремний на сапфире (КНС) является одним из перспективных с целью изготовления высокочастотных интегральных схем с высокой плотностью элементов. Приборы, изготовленные на основе этой структуры, более долговечны, имеют высокую стойкость к радиации и потребляют меньше энергии по сравнению со структурами, изготовленными на массивном кремнии.

КНС-структуры создаются обычно методом газофазного осаждения. В настоящее время для производства микросхем выращиваются кремниевые пленки с толщинами ~300 нм. Однако для изготовления современных электронных приборов желательно иметь толщину кремниевого слоя не более 100 нм. Проблема получения таких тонких слоев заключается в том, что в начале эпитаксиального роста (из-за различия параметров кристаллической решетки кремния и сапфира, островкового роста на начальном этапе, значительного превосходства коэффициента теплового расширения сапфира над аналогичной величиной для кремния) именно в этом слое возникает большое количество структурных дефектов (дислокации, дефекты упаковки, различные кристаллические несовершенства, механические напряжения). Наличие таких дефектов является существенным препятствием для производства интегральных схем на основе КНС-структур [1].

В работе [2] в результате исследования фотомеханического эффекта в кремниевых слоях разных толщин КНС структур, как на исходных, так и облученных импульсами белого света со стороны кремниевой пленки (импульсный фотонный отжиг - ИФО) было показано, что фотостимулированное уменьшение механических напряжений, и тем самым повышение структурного совершенства кремниевых слоев в результате ИФО происходит из-за снижения дефектности кристаллической части кремниевого слоя, а переходной слой вблизи границы раздела кремний-сапфир остается почти неизменным. Структура КНС состоит не только из монокристаллического слоя кремния и сапфировой подложки, но и переходного слоя кремния толщиной до 300 нм на границе раздела [3]. Исходя из этого возрастание величин ФМЭ в кремниевых слоях КНС структур и его сравнительно высокие значения с ростом толщины кремниевого слоя по сравнению с исходными образцами, должна быть связана с уменьшением дефектности в монокристаллической части эпитаксиального кремниевого слоя в результате ИФО.

Известно, что сапфир является оптически прозрачным в диапазоне от 180 нм до 5500 нм [4], это дает возможность в случае ИФО со стороны сапфировой подложки воздействовать непосредственно на переходной слой вблизи границы раздела кремний-сапфир.

В настоящей работе приводятся результаты сравнительных исследований ФМЭ на образцах КНС с разной толщиной кремниевого слоя, как на исходных, так и подвергнутых ИФО со стороны сапфировой подложки.

Исследовались образцы КНС структур с толщиной кремниевого слоя  $d = 600, 1000, 2000$  и  $3000$  нм с ориентацией поверхности (100), n-типа проводимости, с концентрацией носителей  $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , полученные эпитаксиальным осаждением на поверхность сапфировой подложки методом кристаллизации из газовой фазы.

Методика измерения микротвердости (МТ) в темноте и при освещении белым светом описаны в работе [5]. Нагрузка на индентор выбиралась равной 25 г, при которой в случае образца с толщиной кремниевого слоя 600 нм глубина вдавливания индентором не выходила за рамки эпитаксиального слоя. Во всех измерениях большая диагональ пирамиды Кнупа была ориентирована вдоль направления  $\langle 100 \rangle$  в исследуемой (100) плоскости.

ИФО осуществлялся на установке импульсного фотонного отжига, оснащенной галогенными лампами в режиме длительности импульса 3 сек при плотности мощности  $92 \text{ Вт/см}^2$ .

На рис.1 приведены результаты исследований, отражающие зависимости темновых и световых МТ КНС структур от толщины кремниевого слоя для исходных и подвергнутых ИФО образцов.

Видно, что с уменьшением толщины кремниевого слоя, значения МТ возрастают, однако при этом значения световых МТ нарастают быстрее, чем темновая МТ, поэтому величина ФМЭ с уменьшением толщины кремниевого слоя уменьшается, рис.2.

Величина ФМЭ выражена в относительных единицах  $\Delta N/N$ , где:

$\Delta N = N - N_{\text{св}}$ ,  $N$  и  $N_{\text{св}}$  – соответствующие значения темновых и световых МТ.

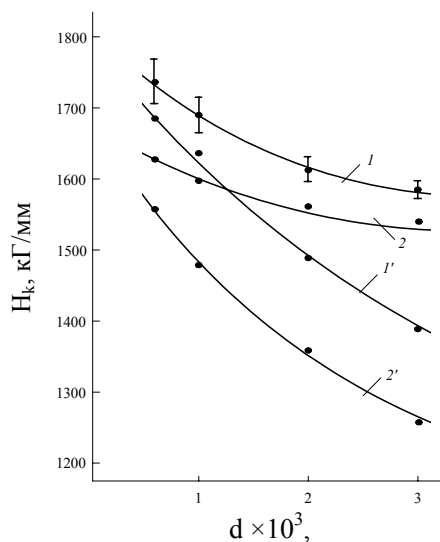


Рис.1. Зависимость значений темновых (1,2) и световых МТ ( $N_k$ ) от толщины ( $d$ ) кремниевого слоя КНС структур (1,1 – до, 2,2 – после ИФО) [2]  
Погрешность измерения, указанная для данной толщины кремниевого слоя, сохраняется в случае ИФО и при ФМЭ

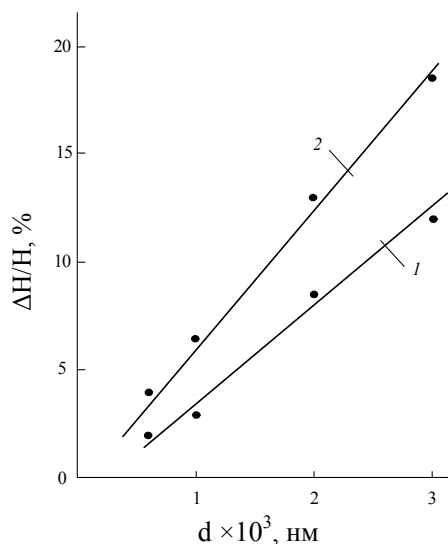


Рис. 2. Изменение величин ФМЭ в зависимости от толщины кремниевых слоев КНС структур (1 – исходные образцы, 2 – подвергнутые ИФО) [2]

Если провести экстраполяцию зависимостей приведенных на рис.2 в сторону толщин меньших 600 нм, ФМЭ становится неизмеримой начиная с толщины кремниевого слоя 300 нм и меньше. Это хорошо согласуется с существующими в литературе данными, согласно которым структура КНС состоит не только из монокристаллического слоя кремния и сапфировой подложки, но и переходного слоя кремния толщиной до 300 нм на границе раздела.

Исходя из этого возрастание величин ФМЭ в кремниевых слоях КНС структур и его сравнительно высокие значения с ростом толщины кремниевого слоя (рис.2) по сравнению с исходными образцами, связана с уменьшением дефектности в монокристаллической части эпитаксиального кремниевого слоя в результате ИФО.

Исходя из данных, приведенных на рис.2, видно, что если провести экстраполяцию в сторону меньших толщин, то ФМЭ становится неизмеримым. Сравнивая данные, полученные в [2] и приведенные на рис.2 настоящей работы следует, что ФМЭ становится неизмеримым для образцов, подвергнутых ИФО со стороны сапфировой подложки, сравнительно высокими при малых толщинах кремниевой пленки, чем в случае образцов подвергнутых ИФО со стороны кремниевой пленки. Этот факт указывает на уменьшения влияния переходного слоя на кремниевую пленку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Панков В.С.* Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе / В. С. Попков, М.: Энергия, 1979, 88с.
2. *Чирадзе Г. Д.* Фотомеханический эффект в кремниевых слоях структур кремний на сапфире: сб. Научных трудов V Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» / Г. Д. Чирадзе, 10-11 октября 2012. Минск. С.101.
3. *Воротынцев В. М.* Применение имплантации ионов кремния для формирования структурно-совершенных слоев кремния на сапфире / В. М. Воротынцев, Е. Л. Шолобов, В. А. Герасимов // ФТП. 2011. Т.45. №12. С.1662.
4. *Афанасьев В.А.* Оптические измерения / В. А. Афанасьев, М.: Высшая школа, 1981. 229 с.
5. *Герасимов А. Б.* Исследование физической природы фотомеханического эффекта / А. Б. Герасимов, Г. Д. Чирадзе, Н. Г. Кутивадзе // ФТП. 2001. Т.35. №1. С.70.

### ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{CuInSe}_2$

**В. Д. Живулько, С. В. Леончик**

---

*ГНПО «НПЦ по материаловедению НАН Беларуси», vad.zhiv@gmail.com*

Полупроводниковое соединение  $\text{CuInSe}_2$  является основой для создания тонкопленочных солнечных элементов с высокой эффективностью, достигающей ~ 12 %. Ширина прямой запрещенной зоны соединения  $\text{CuInSe}_2$  при комнатной температуре составляет ~ 1.03 эВ [1]. Введение атомов Ga в кристаллическую решетку  $\text{CuInSe}_2$  в концентрации до 6 – 20 ат. % способствует смещению края фундаментального поглощения в область до 1.15 – 1.25 эВ и более эффективному фотопреобразованию солнечной энергии в тонкопленочных солнечных элементах. К настоящему времени на основе твердых растворов  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  созданы солнечные элементы с к.п.д. ~ 20.8 % [2]. Дальнейшее улучшение эффективности солнечных элементов на основе твердых растворов  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  возможно при детальном установлении природы ростовых дефектов в базовом соединении  $\text{CuInSe}_2$ .

В настоящей работе исследования проводились на монокристаллах  $\text{CuInSe}_2$ , выращенных вертикальным методом Бриджмена. Элементный состав по данным рентгеноспектрального микроанализа с волновой дисперсией оказался близким к идеальной стехиометрии и составил: Cu ~ 25.2, In ~ 24.9 и Se ~ 49.9. На рис. 1а показаны спектры фотолюминесценции монокристаллов  $\text{CuInSe}_2$ , вырезанных из различных высококачественных слитков. Спектры регистрировались в условиях высокого спек-