

УДК 681.5

**ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ  
НА САПФИРЕ» (КНС) И Si/CaF<sub>2</sub>/Si****А.А. Величко<sup>1</sup>, В.А. Илюшин<sup>1</sup>, Н.И. Филимонова<sup>1</sup>, А.Ю. Крупин<sup>1</sup>,  
А.В. Кацюба<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Новосибирский государственный технический университет*<sup>2</sup>*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова*

В работе представлены результаты исследования параметров тензорезисторов, изготовленных на структурах «кремний на изоляторе» (КНИ): Si/CaF<sub>2</sub>/Si и «кремний на сапфире» (КНС). Структуры КНС были промышленного производства, а слои Si/CaF<sub>2</sub> выращены на подложках Si(100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии в замкнутом технологическом цикле. Тензорезисторы в обоих случаях имели одинаковую толщину и топологию, а их легирование проводилось методом ионной имплантации бором с одинаковыми дозами и энергией. Для активации атомов примеси и устранения радиационных дефектов в эпитаксиальном слое кремния обеих структур был применен быстрый термический отжиг. Впервые показана возможность изготовления кремниевых тензорезисторов на нанометровых структурах Si/CaF<sub>2</sub>. Экспериментальные зависимости сопротивления от приложенной нагрузки носят линейный характер и качественно совпадают с расчетными зависимостями. При одинаковых параметрах тензорезисторов качество слоев Si на CaF<sub>2</sub>/Si и их стоимость существенно ниже, чем КНС.

*Ключевые слова:* тензорезистор, датчики давления, молекулярно-лучевая эпитаксия, CaF<sub>2</sub>, кремний на сапфире, кремний на изоляторе.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-30-39

**Введение**

Современные технические системы отличаются широким использованием различных датчиков, применение которых позволяет управлять свойствами и поведением систем методами автоматизированного регулирования.

Одним из наиболее распространенных типов датчиков являются датчики давления. В большинстве из них используется тензорезистивный принцип преобразования благодаря его высокой точности и относительно простой технической реализации. Принцип работы интегральных тензопреобразователей основан на зависимости сопротивления тензорезистора от приложенной нагрузки. При этом важным является проблема электрической изоляции схемных элементов, отсутствие токов утечки и механических напряжений в исходной структуре.

Важнейшими характеристиками тензорезисторов являются высокие радиационная стойкость и рабочие температуры. Использование структур «кремний на изоляторе» (КНИ) позволяет решить эти проблемы. Преобразователи, основанные на КНИ структурах, отличаются существенно более высокой стойкостью к внешним воздействиям, большей надежностью, меньшей потребляемой мощностью по сравнению с преобразователями, выполненными в монолитном кремнии, также на их основе можно реализовать схему обработки с максимально возможной плот-

---

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 16.4643.2017/7.8.

© 2018 А.А. Величко, В.А. Илюшин, Н.И. Филимонова,  
А.Ю. Крупин, А.В. Кацюба

ностью размещения элементов при объединении в едином изделии собственно датчика и схемы управления (интеллектуальные датчики).

Известны три основных способа получения КНИ структур: «кремний на сапфире» (КНС), SIMOX и SmartCut [1, 2]. В нашей стране коммерческий выпуск тензорезистивных датчиков КНИ-типа осуществлялся только на структурах КНС [3].

К недостаткам структур КНС следует отнести:

- высокую стоимость, определяющуюся применением дорогих сапфировых подложек;
- различие коэффициентов термического расширения (КТР) Si и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [4];
- сложность профилирования сапфировых подложек для получения мембран, на которых располагаются тензорезисторы, а также сложность применения групповой технологии изготовления чувствительных элементов [5];
- значительную плотность дефектов на интерфейсе кремний-диэлектрик в связи с несоответствием типов кристаллических решеток кремния и сапфира, рассогласованием параметров их решеток [6], которые приводят к деградации параметров тензорезисторов с течением времени.

Несмотря на вышеперечисленные недостатки, такие параметры, как высокие рабочие температуры и радиационная стойкость, побуждают осуществлять промышленное производство тензорезисторов на КНС.

Ранее мы показали возможность получения методом МЛЭ слоев  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  в замкнутом технологическом цикле и создание КМОП ИС на их основе [7–9]. В данной работе предлагается технология создания тензорезисторов с использованием нанометровых структур  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ , полученных разработанным в [7–9] методом. Такие структуры в сравнении со структурами КНС имеют существенно более высокую радиационную стойкость [9], на порядок меньшую стоимость, меньшую дефектность кремниевых слоев. Кроме того при производстве тензорезисторов на таких структурах возможно использование стандартных технологических процессов получения мембран и изготовления чувствительных элементов.

Ниже представлены результаты исследования параметров тензорезисторов на  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  и КНС структурах.

### 1. Методика эксперимента

Для изготовления тензорезисторов использовались промышленные КНС структуры с толщиной Si слоя 0,1 мкм и ориентацией поверхности (100). Исходные слои кремния в структурах имели концентрацию доноров  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Структуры  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}(100)$  были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в замкнутом цикле: на очищенную подложку Si(100) осаждался эпитаксиальный слой диэлектрика  $\text{CaF}_2$ , а затем тонкий слой кремния. Толщина диэлектрика в структуре  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  составляла 0,3 мкм, толщина эпитаксиального слоя кремния – 0,1 мкм.

Для создания тензорезисторов использовались слои кремния *p*-типа, которые в обеих структурах получались методом ионной имплантации ионов бора с одинаковой объемной концентрацией  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и энергией 30 кэВ.

После имплантации для активации внедренных атомов и устранения радиационных дефектов в эпитаксиальном слое проводился быстрый термический отжиг слоев Si галогенными лампами в атмосфере инертного газа. Длительность импульса варьировалась от 1 до 20 с, а температура отжига от ~900 до ~1200 °С. Измерение температуры проводилось с помощью оптического пирометра. Для оптимизации режимов отжига после каждого из них проводился контроль сопротивления эпитаксиального слоя кремния четырехзондовым методом.

Из отожженных структур вырезались балки длиной 30 мм, шириной 5 мм и толщиной 0,45 мм. Топология тензорезисторов и латеральные размеры были одинаковы. Исследуемая конструкция представляла собой балку (3) из структур КНС или Si/CaF<sub>2</sub>/Si(100) соответственно, в эпитаксиальном слое кремния которых сформированы тензорезисторы (1) с алюминиевыми контактами (2) (рис. 1, а). Длинная сторона балок ориентировалась вдоль направления [10]. На данных структурах были изготовлены тензорезисторы в виде мезаструктур, ориентированных вдоль [10] направлений кремниевого слоя и расположенных между заземленным концом и серединой балки. Таким образом, изготовленные тензорезисторы были полоскового типа.

Система координат для консольно заземленной балки приведена на рис. 1, б, оси  $x_1x_2x_3$  совпадают с главными кристаллографическими осями Si(100). Линия действия сосредоточенной силы лежит в плоскости  $x_1Ox_3$ .

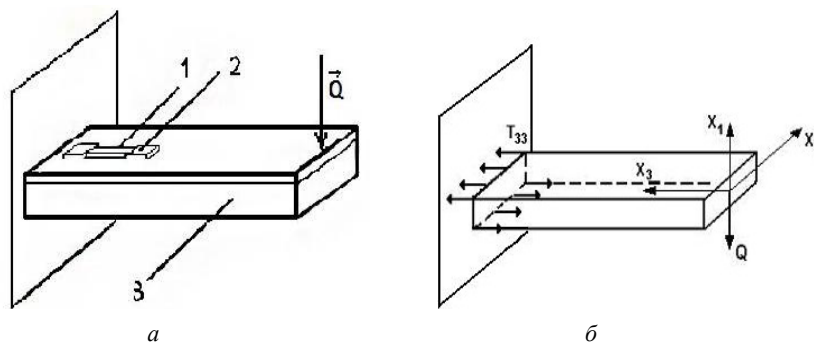


Рис. 1 – Конструкция датчика давления балочного типа (а); система координат и распределение компоненты  $T_{33}$  напряжений в плоскости балки (б)

Fig. 1 – The design of the pressure sensor of the baulk type (a); the coordinate system and the distribution of the component  $T_{33}$  of stresses in the plane of the baulk (b)

Для проведения эксперимента по исследованию изменения сопротивления полупроводника под действием прилагаемой нагрузки была разработана установка, состоящая из устройства заземления и нагружения исследуемых балок посредством точечного приложения силы к консоли балки.

Измерения производились следующим образом: один из концов балки жестко заземлялся. Затем образец нагружался посредством механического устройства точечного приложения силы. Нагружение производилось равными ступенями. На каждой ступени нагружения с помощью микроскопа регистрировалось отклонение конца балки от горизонтали. Текущее значение сопротивления исследуемого тензорезистора определялось с помощью цифрового вольтметра.

## 2. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 приведены зависимости величины сопротивления эпитаксиальных слоев кремния структур КНС и Si/CaF<sub>2</sub>/Si от времени отжига.

Видно, что значение сопротивления кремния в структуре Si/CaF<sub>2</sub>/Si стабилизируется на 3–5 секунде отжига, а в КНС структуре – на 80 с. Такое различие во времени отжига может быть обусловлено различием коэффициентов поглощения теплового излучения кремниевой и сапфировой подложками.

Несмотря на одинаковые дозы ионов бора, минимальные значения сопротивлений, получаемые после отжига, составляли 105 и 34 кОм для структур КНС и

Si/CaF<sub>2</sub>/Si соответственно. Различие в сопротивлениях предположительно связано со значительно меньшей плотностью дефектов в эпитаксиальном слое кремния в структурах Si/CaF<sub>2</sub>/Si по сравнению с эпитаксиальным слоем кремния на сапфире. Сопротивление кремния в структуре Si/CaF<sub>2</sub>/Si меньше в 3 раза, следовательно, подвижность носителей при одинаковых концентрациях должна быть в 3 раза выше. Это было обнаружено еще в работе [10]. Эпитаксия Si на поверхности CaF<sub>2</sub>/Si позволяет получить структуру, в которой, несмотря на различие коэффициентов температурного расширения в слоях кремния и CaF<sub>2</sub>, отсутствуют напряжения. Это делает структуры Si/CaF<sub>2</sub>/Si значительно более привлекательными для изготовления чувствительных элементов датчиков [11].

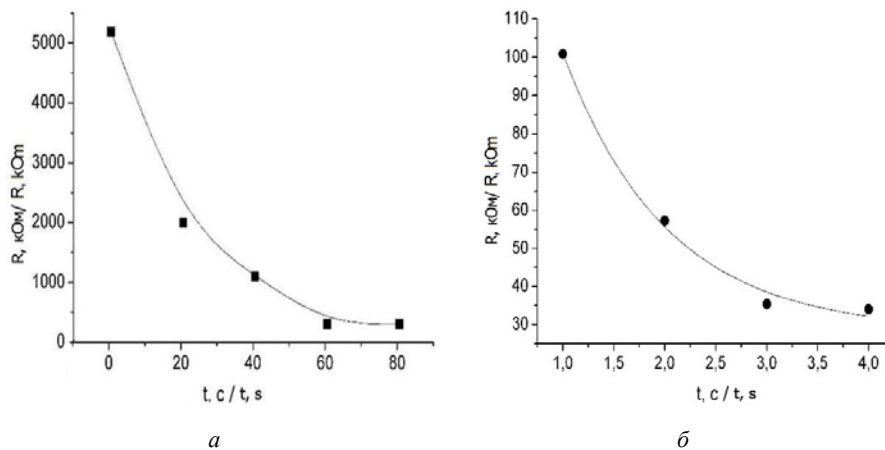


Рис. 2 – Зависимость сопротивления эпитаксиального слоя кремния от времени отжига для структур:

*a* – KHC; *б* – Si/CaF<sub>2</sub>/Si

Fig. 2 – The dependence of the silicon epitaxial layer resistance on the annealing time for structures:

*a* – SOI; *b* – Si/CaF<sub>2</sub>/Si

В случае отжига структур на сапфировых подложках можно предположить также частичную релаксацию механических напряжений в слое кремния. Напряжения возникают в процессе охлаждения структуры от температуры роста до комнатной, посредством пластической деформации.

Система координат для консольно защемленной балки соответствует приведенной в [12]. Расчет тензосопротивления от приложенного напряжения проводился в соответствии с выражением [12].

$$R(u_0) = R_0(1 + \pi T_{\text{уср}}),$$

где  $u_0$  – отклонение конца балки;  $T_{\text{уср}}$  – усредненное по длине значение компоненты

$T_{33} = \frac{12Q}{a^3b} x_1 x_3$  тензора напряжений;  $Q$  – сосредоточенная сила,  $x_1$  и  $x_3$  –

координаты точки, в которой рассчитываются механические напряжения;  $a$  и  $b$  –

толщина и ширина балки;  $\pi_l$  – коэффициент пьезосопротивления.  $\pi_l = \frac{\pi_{44}}{2}$ , так

как известно, что для кремния *p*-типа доминирующий вклад вносит коэффициент  $\pi_{44}$ .

При этом учитывалось, что при ионном легировании концентрация бора  $N_B$  распределяется по толщине пленки по гауссовому закону.

Так как исследуемые тензорезисторы были сформированы методом ионной имплантации, то концентрация легирующей примеси является функцией координаты относительно поверхности полупроводникового слоя. Зависимость от концентрации и координаты удельного сопротивления кремниевого тензорезистора, легированного бором при комнатной температуре, можно аппроксимировать следующим выражением [11]:

$$\rho(X_1) = \frac{1,305 \cdot 10^{16}}{N_B(X_1)} + \frac{1,133 \cdot 10^{17}}{N_B(X_1) \left[ 1 + (2,58 \cdot 10^{-19} N_B(X_1))^{-0,737} \right]},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление;  $N_B(X_1)$  – концентрация атомов бора.

Профиль распределения примеси при ионном легировании  $N_B(X_1)$  можно оценить с помощью выражения [12]

$$N_B(X_1) = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left[ -\frac{(X_1 - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right],$$

где  $N_s$  – поверхностная концентрация, определяемая дозой ионной имплантации;  $R_p$  – средний проекционный пробег ионов бора;  $\Delta R_p$  – среднеквадратичное отклонение пробега ионов [12].

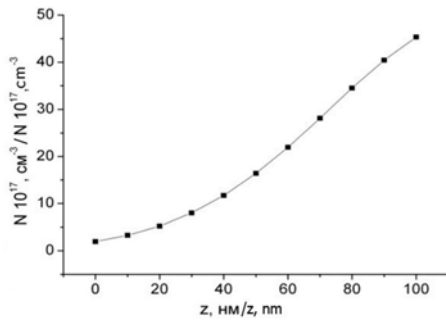


Рис. 3 – Распределение концентрации примеси в эпитаксиальном слое кремния тензорезисторов

Fig. 3 – The distribution of the impurity concentration in the silicon epitaxial layer of the strain gages

На рис. 3 приведено распределение концентрации примеси в структуре при имплантации ионов бора с энергией 30 кэВ и дозой, обеспечивающей максимальную объемную концентрацию атомов  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Тогда интегральную удельную проводимость всего интегрального кремниевого слоя можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{1}{X} \int_0^X \sigma(X_1) dX_1,$$

где  $X$  – толщина эпитаксиального слоя кремния;  $\sigma(X_1)$  – удельная проводимость слоя интегрального резистора на глубине  $X_1$ .

В [11] было показано, что для тензорезистивных слоев  $p$ -типа с уровнем легирования  $N_B \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  коэффициент пьезосопротивления интегрального слоя с гауссовым распределением примеси принимает вид

$$\pi_{44} = C(T) - D(T) \ln \left( N_s \exp \left( -\frac{1}{2} \right) \right).$$

Подстановка соответствующих численных значений дает значение компоненты  $\pi_{44}$  тензора пьезосопротивления  $\sim 96.7 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ .

Интегральная удельная расчетная проводимость кремниевого слоя составила  $\sim 33 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ . С использованием усредненных по толщине проводящего слоя значений проводимости и концентрации была сделана оценка подвижности дырок в слое кремния в структуре  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ , которая при комнатной температуре составила  $\sim 200 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ . Общее сопротивление и коэффициент пьезосопротивления всего

тензорезистора находят путем усреднения по толщине проводящего слоя. Расчетные 1 и экспериментальные 2 зависимости сопротивления  $R$  тензорезистора от смещения консоли балки для КНС и  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  структур представлены на рис.4.

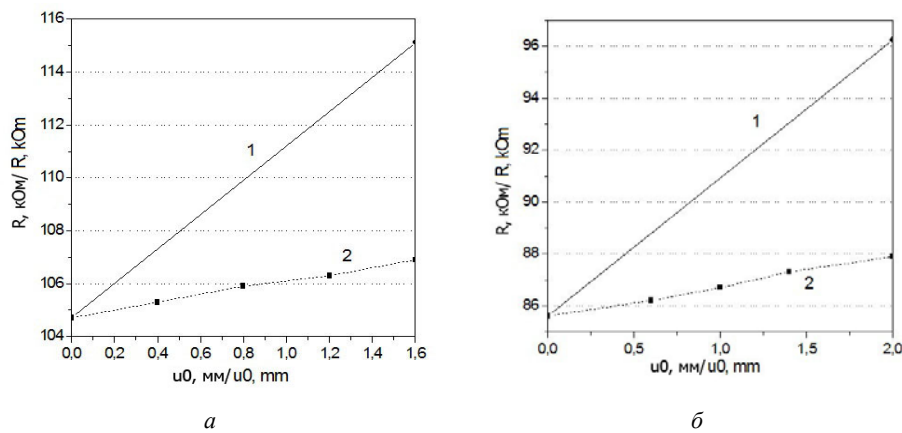


Рис. 4 – Зависимость сопротивления тензорезистора от величины отклонения конца балки  $U_0$ :

$a$  – КНС и  $b$  –  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ ; 1 – расчетные; 2 – экспериментальные зависимости

Fig. 4 – The dependence of the resistance of the strain gage on the deviation value of the end of the baulk  $U_0$ :

$a$  – SOI;  $b$  –  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ . The graph 1 is obtained as a result of the calculations, the graph 2 is experimental

Из рисунков видно, что экспериментальные зависимости  $R$  носят линейный характер и качественно совпадают с расчетными. Однако расчетное изменение сопротивления  $R$  кремниевых тензорезисторов в  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  структурах составило около 10 %, в то время как экспериментальные изменения  $R$  – всего  $\sim 3\%$  в диапазоне изменения смещения 2 мм.

### Закключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- впервые показана возможность изготовления Si тензорезисторов на нанометровых структурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ ;
- обнаружено, что при заданной дозе легирования сопротивление слоев кремния на структурах  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  меньше, чем на структурах КНС. Поскольку отжиг структур  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  проводился менее интенсивно, качество слоев  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  является более высоким;
- показано, что зависимость сопротивления тензорезистора от изгиба балки практически одинакова для обеих структур.

Поскольку стоимость кремниевых пластин существенно ниже стоимости пластин сапфира, структуры Si/CaF<sub>2</sub>/Si являются перспективными для коммерческого производства датчиков давления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кольцов Б.Б.** Разработка технологии КМОП ИС на структурах КНД: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01. – Новосибирск, 2001. – 243 с.
2. Patent US 5374564. Process for the production of thin semiconductor material films / M. Bruehl. – Appl. date 20.12.1994.
3. **Мордкович В.Н.** Структуры «кремний на изоляторе» – перспективный материал микроэлектроники // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 1998. – № 2. – С. 4–7.
4. Совершенствование структур и улучшение технических характеристик датчиков давления на основе микроэлектромеханических систем / В.А. Васильев, С.А. Москалев, И.А. Ползунов, В.А. Шокоров // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 191–194.
5. **Бариннов И.Н.** Полупроводниковые тензорезистивные датчики давления на основе КНД-структуры // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5. – С. 12–15.
6. **Kuo J.B., Lin S.** Low-voltage SOI CMOS VLSI devices and circuits. – New York: Wiley, 2001. – 401 p.
7. Features of the surface morphology of CaF<sub>2</sub>/Si(100) films obtained by solid-phase epitaxy / V.A. Ilyushin, A.A. Velichko, A.Y. Krupin, V.A. Gavrilenko, A.N. Savinov, A.V. Katsuba // Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2016. – Vol. 10, iss. 6. – P. 1192–1196.
8. Особенности статических радиационных воздействий на КМОП ИС Si/CaF<sub>2</sub>/Si / А.А. Величко, В.А. Илюшин, Б.Б. Кольцов, Н.И. Филимонова // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 2. – С. 95–104.
9. **Величко А.А., Кольцов Б.Б.** Электрофизические параметры КМОП транзисторов на основе эпитаксиальной структуры Si/CaF<sub>2</sub>/Si // Микроэлектроника. – 1997. – Т. 2, № 3. – С. 98–105.
10. Use of rapid anneal to improve CaF<sub>2</sub>/Si(100) epitaxy / J. Preffer, J.M. Phillips, T.P. Smith, W.M. Augustuniak, K.W. West // Applied Physics Letters. – 1985. – Vol. 46, N 10. – P. 947–949.
11. **Гриджин В.А., Драгунов В.П.** Физика микросистем. Ч. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 314–322.
12. **Куриосов А.И., Юдин В.В.** Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 207 с.

#### TENZOESISTORS BASED ON SILICON AND Si/CAF<sub>2</sub>/Si ON SAPPHIRE STRUCTURES

**Velichko A.A.<sup>1</sup>, Ilyushin V.A.<sup>1</sup>, Filimonova N.I.<sup>1</sup>, Krupin A. Yu.<sup>1</sup>, Katsyuba A.V.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Semiconductor Physics them. A.V. Rzhanova, Novosibirsk, Russia*

The paper presents the results of an investigation of the parameters of the tensoresistors on the Si/CaF<sub>2</sub>/Si and silicon on sapphire (SOS) structures. The Si/CaF<sub>2</sub>/Si(100) structures were obtained by molecular beam epitaxy in a closed technological cycle. The SOS structures were of industrial production. The tensoresistors were formed in an epitaxial Si layer on the SOS structures and on the Si/CaF<sub>2</sub>/Si structures by implantation of the boron ions. The doping of both structures was carried out with boron with the same doses. In both cases the tensoresistors had the same thickness and topology.

The rapid thermal annealing was applied to activate the impurity atoms and to remove the radiation defects in epitaxial silicon layer of both structures. For the first time, the possibility of

fabricating the Si tensoresistors on a  $\text{CaF}_2/\text{Si}(100)$  substrate with the same sensitivity as the tensoresistors on the SOS structures was shown. The experimental dependences of the resistance on the applied load are linear and qualitatively coincide with the calculated dependences. The quality of the Si layers on  $\text{CaF}_2/\text{Si}$  and their cost is much lower than the Si layers on sapphire (SOS) for the same parameters of tensoresistors.

**Keywords:** tensoresistor (strain gauge), pressure sensors, molecular-beam epitaxy, calcium fluoride, silicon on sapphire, silicon on insulator.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-30-39

#### REFERENCES

1. Kol'tsov B.B. *Razrabotka tekhnologii KMOP IS na strukturakh KND*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of CMOS integrated circuit technology on silicon-on-insulator structures. PhD in eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2001. 243 p.
2. Bruel M. *Process for the production of thin semiconductor material films*. Patent US, no. 5374564, 1994.
3. Mordkovich V.N. Struktury "kremnii na izolyatore" – perspektivnyi material mikroelektroniki [The structures "silicon on insulator" is a promising material of microelectronics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki – Materials of Electronics Engineering*, 1998, no. 2, pp. 4–7.
4. Vasil'ev V.A., Moskalev S.A., Polzunov I.A., Shokorov V.A. Sovershenstvovanie struktur i uluchshenie tekhnicheskikh kharakteristik datchikov davleniya na osnove mikroelektromekhanicheskikh sistem [The perfecting of structures and improvement of technical characteristics of the pressure sensors based on microelectromechanical systems]. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya – Fundamental Problems of Radioelectronics*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 191–194.
5. Barinov I.N. Poluprovodnikovye tenzorezistivnye datchiki davleniya na osnove KND-struktury [The semiconductor tensoresistive pressure sensors based on the SOI structure]. *Komponenty i tekhnologii – Components & Technologies*, 2009, no. 5, pp. 12–15.
6. Kuo J.B., Lin S. *Low-voltage SOI CMOS VLSI devices and circuits*. New York, Wiley, 2001. 401 p.
7. Ilyushin V.A., Velichko A.A., Krupin A.Y., Gavrilenko V.A., Savinov A.N., Katsuba A.V. Features of the surface morphology of  $\text{CaF}_2/\text{Si}(100)$  films obtained by solid-phase epitaxy. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2016, vol. 10, iss. 6, pp. 1192–1196.
8. Velichko A.A., Ilyushin V.A., Kol'tsov B.B., Filimonova N.I. Osobennosti staticheskikh radiatsionnykh vozdeistvii na KMOP IS  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  [Features of static radiation effects on CMOS IC on  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$ ]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2, pp. 95–104.
9. Velichko A.A., Kol'tsov B.B. Elektrofizicheskie parametry KMOP tranzistorov na osnove epitaksial'noi struktury  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  [The electrophysical parameters of CMOS transistors based on the  $\text{Si}/\text{CaF}_2/\text{Si}$  epitaxial structure]. *Mikroelektronika – Russian Microelectronics*, 1997, vol. 2, no. 3, pp. 98–105. (In Russian).
10. Preffer J., Phillips J.M., Smith T.P., Augustuniak W.M., West K.W. Use of rapid anneal to improve  $\text{CaF}_2/\text{Si}(100)$  epitaxy. *Applied Physics Letters*, 1985, vol. 46, no. 10, pp. 947–949.
11. Gridchin V.A., Dragunov V.P. *Fizika mikrosistem*. Ch. 1 [Physics of microsystems. Pt. 1]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004, pp. 314–322.
12. Kurnosov A.I., Yudin V.V. *Tekhnologiya proizvodstva poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem* [Production technology of semiconductor devices and integrated circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 207 p.



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Величко Александр Андреевич** – родился в 1949 году, д-р техн. наук, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нанотехнологии в электронике и оптоэлектронике. Опубликовано более 70 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: velichko@corp.nstu.ru).

**Velichko Aleksandr Andreevich** – Doctor of Sciences (Eng.), professor at Semiconductors and Microelectronics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanotechnology in electronics and optoelectronics. Author of 70 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail: velichko@corp.nstu.ru).



**Илюшин Владимир Александрович** – родился в 1956 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых пленок, многослойных гетероэпитаксиальных систем, наноструктур. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ilval@ngs.ru).

**Ilyushin Vladimir Aleksandrovich** – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at Semiconductors and Microelectronics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on theoretical and experimental investigation of molecular beam epitaxy (MBE) growth processes of semiconductor films, multilayer heteroepitaxial systems, nanostructures. Author of 50 papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail: ilval@ngs.ru).



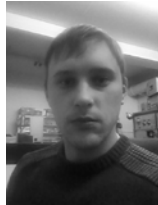
**Филимонова Нина Ивановна** – родилась в 1963 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых пленок, многослойных гетероэпитаксиальных систем, наноструктур. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: filimonova@corp.nstu.ru).

**Filimonova Nina Ivanovna** – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at Semiconductors and Microelectronics department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on theoretical and experimental investigation of molecular beam epitaxy (MBE) growth processes of semiconductor films, multilayer heteroepitaxial systems, nanostructures. He is author of 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail: filimonova@corp.nstu.ru).



**Крупин Алексей Юрьевич** – родился в 1986 году, инженер кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нанотехнологии в электронике и оптоэлектронике. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: krupin@corp.nstu.ru).

**Krupin Aleksey Yurievich** – engineer at the Semiconductors and Microelectronics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanotechnology in electronics and optoelectronics. He is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail: krupin@corp.nstu.ru).



**Кацюба Алексей Владимирович** – родился в 1986 году, младший научный сотрудник Института физики полупроводников им. Ржанова. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых пленок, многослойных гетероэпитаксиальных систем, наноструктур. Опубликовано 15 научных работ. (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13. E-mail: kacuba@ngs.ru).

**Katsyuba Aleksey Vladimirovich** – Junior researcher at the Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics. His research interests are currently focused on theoretical and experimental investigation of molecular beam epitaxy (MBE) growth processes of semiconductor films, multilayer heteroepitaxial systems, nanostructures. He is author of 15 scientific papers. (Address: pr. Lavrentieva 13, Novosibirsk, Russia, 630090. E-mail: kacuba@ngs.ru).

*Статья поступила 17 февраля 2018 г.  
Received February 17, 2018*

---

To Reference:

Velichko A.A., Ilyushin V.A., Filimonova N.I., Krupin A.Yu., Katsyuba A.V. Tenzorezistory na strukturakh kremnii na sapfire (KNS) i Si/CaF<sub>2</sub>/Si [Tenzoresistors based on silicon and Si/CaF<sub>2</sub>/Si on sapphire structures]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 30–39. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-30-39.