

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА,
А. П. КУТРАКОВ, И. В. ПАВЛОВСКИЙ

Украина, г. Львов, НУ “Львовская политехника”
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
31.05 2007 г.

Оппонент д. ф.-м. н. С. И. КОЗЛОВСКИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Разработаны преобразователи давления жидкого азота и жидкого гелия с тензорезисторами на основе использования классического и неклассического тензорезистивного эффекта в кремнии.

В настоящее время для различных отраслей науки и техники, таких как авиакосмическая техника, криоэнергетика и др., необходимы датчики механических величин, работоспособные при криогенных температурах, в частности, датчики для измерения давления криогенных сред (жидкого азота и жидкого гелия). Датчики давления жидкого азота с проводочными тензорезисторами имеют, в отличие от полупроводниковых тензорезистивных датчиков, невысокую чувствительность. Известны криогенные датчики давления на основе структур «кремний-на-изоляторе», серийно изготавливаемые фирмой Kulite Semiconductor Products Inc. [1], но их интервал рабочих температур ограничен температурой жидкого азота. На основе структур «кремний-на-сапфире» в России выпускаются тензорезистивные датчики давления криогенных сред, работоспособные в интервале температур 2—400 К [2]. Принцип действия этих датчиков основан на использовании классического (смиттовского) тензорезистивного эффекта в полупроводниках [3].

Целью работы было создание полупроводниковых преобразователей давления криогенных жидкостей не только на основе классического, но и неклассического тензорезистивного эффекта в кремнии (последний проявляется только при гелиевых температурах при определенном уровне легирования кремния). В качестве чувствительных элементов первичных преобразователей давления использовались тензорезисторы на основе нитевидных кристаллов (НК) кремния *p*-типа проводимости, легированных бором, которые хорошо зарекомендовали себя для создания различных датчиков механических величин, работоспособных в экстремальных условиях эксплуатации [4].

Проведенные нами исследования тензорезистивного эффекта в легированных НК *p*-Si в диапазоне температур 4,2—300 К показали, что при гелиевых температурах в кремнии с концентрацией бора вблизи перехода «металл—диэлектрик» с диэлектрической стороны наблюдается гигантский неклассиче-

ский тензорезистивный эффект [5], вызванный изменением механизма переноса носителей тока при криогенных температурах. В этом случае величина коэффициента тензочувствительности НК *p*-Si при 4,2 К достигает значений $K_{4,2K} \approx 5,7 \cdot 10^5$ при одноосной деформации сжатия, что на 2—3 порядка превышает тензочувствительность кремния при этих температурах.

Использование неклассического тензорезистивного эффекта открывает возможности создания высокочувствительных датчиков механических величин для криогенных температур [6]. Чтобы оценить возможность создания таких датчиков, проводилось экспериментальное моделирование их работы путем исследования характеристик тензорезисторов на основе легированных НК *p*-Si, закрепленных на упругих элементах (консольных балках), при низких температурах. Диапазон деформаций консольной балки составлял $\epsilon = 0 \dots \pm 1,2 \cdot 10^{-3}$, что соответствует области деформаций упругих элементов тензорезистивных датчиков механических величин (давления, усилия, ускорения и др.). Консольные балки изготавливались из инварного сплава 36Н, температурный коэффициент расширения которого близок по величине к значению для кремния при низких температурах [7].

Для исследования отбирались тензорезисторы на основе сильнолегированных НК *p*-Si с удельным сопротивлением $\rho_{300K} = 0,005$ Ом·см и на основе НК *p*-Si с $\rho_{300K} = 0,013$ Ом·см, соответствующим концентрации бора вблизи перехода «металл—диэлектрик» с диэлектрической стороны.

Консольная балка с тензорезисторами помещалась в гелиевый криостат, в котором осуществлялось ступенчатое деформирование балки с помощью специально разработанного устройства. Питание тензорезисторов осуществлялось постоянным током 1—100 мкА. При измерениях в диапазоне температур 4,2—300 К одновременно автоматически регистрировались показания сенсора температуры и падение напряжения на исследуемых тензорезисторах. Измерения проводились в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур во Вроцлаве (Польша).

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные зависимости относительного изменения сопротивления $\Delta R/R_0$ исследованных тензорезисторов от деформации балки при фиксированных температурах —

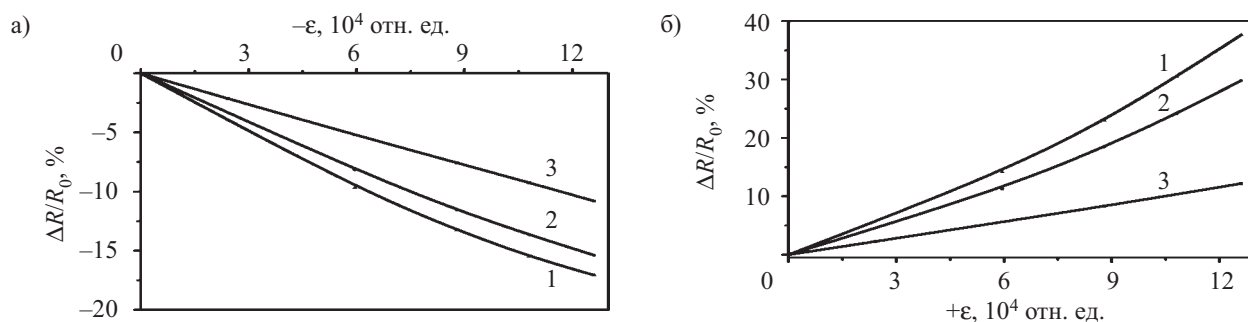


Рис. 1. Тензорезистивные характеристики НК *p*-Si с $\rho_{300\text{K}}=0,005$ Ом·см на балке из инвара при деформации сжатия (а) и растяжения (б) при разных температурах: 1 — 4,2 К; 2 — 77 К; 3 — 300 К

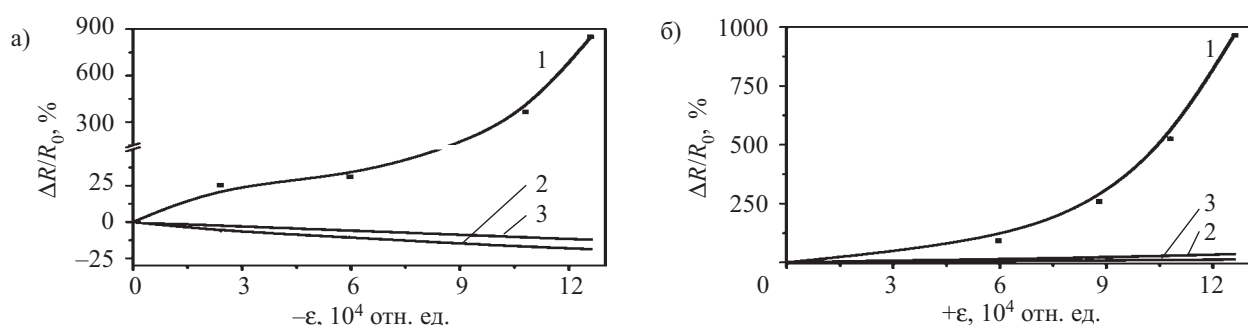


Рис. 2. Тензорезистивные характеристики НК *p*-Si с $\rho_{300\text{K}}=0,013$ Ом·см на балке из инвара при деформации сжатия (а) и растяжения (б) при разных температурах: 1 — 4,2 К; 2 — 77 К; 3 — 300 К

4,2, 77 и 300 К. Как видно из **рис. 1**, для тензорезисторов на основе сильнолегированных НК *p*-Si с $\rho_{300\text{K}}=0,005$ Ом·см для всего исследованного диапазона температур наблюдается классический тензорезистивный эффект (сопротивление тензорезисторов возрастает при деформации растяжения и уменьшается при деформации сжатия). Для этих тензорезисторов, закрепленных на балке из инварного сплава, коэффициент тензочувствительности составляет $K_{77\text{K}}=220$ и $K_{4,2\text{K}}=270$ при деформации растяжения $\epsilon=1 \cdot 10^{-3}$ и соответственно $K_{77\text{K}}=127$ и $K_{4,2\text{K}}=120$ при деформации сжатия $\epsilon=-1 \cdot 10^{-3}$.

Для тензорезисторов на основе НК *p*-Si с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}}=0,013$ Ом·см классический тензорезистивный эффект наблюдается при комнатной температуре и температуре жидкого азота (**рис. 2**, кривые 2 и 3), а при температуре жидкого гелия сопротивление тензорезисторов увеличивается при деформации сжатия (рис. 2, а, кривая 1), что свидетельствует о появлении неклассического тензорезистивного эффекта. При этом величина коэффициента тензочувствительности при 4,2 К достигает значения $K_{4,2\text{K}} \approx 1 \cdot 10^4$ при деформации сжатия $\epsilon=-1 \cdot 10^{-3}$, а при деформации растяжения $\epsilon=1 \cdot 10^{-3}$ $K_{4,2\text{K}} \geq 6400$, причем зависимость относительного изменения сопротивления тензорезисторов от деформации $\Delta R/R_0=f(\epsilon)$ в области гелиевых температур становится нелинейной.

Таким образом, из проведенных исследований вытекает, что тензорезисторы на основе сильнолегированных НК *p*-Si можно использовать для создания первичных преобразователей механических ве-

личин, работоспособных в широком диапазоне температур (4,2—300 К), а для повышения чувствительности таких преобразователей в области гелиевых температур целесообразно использовать тензорезисторы на основе НК *p*-Si с концентрацией бора вблизи перехода «металл—диэлектрик» с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}}=0,013$ Ом·см.

Разработана универсальная конструкция тензорезистивного преобразователя давления криогенных жидкостей (**рис. 3**). Основу конструкции первичного преобразователя давления составляет тензомодуль 3, который представляет собой кольцевой элемент с консольной балочкой 4 с закрепленными на ней тензорезисторами на основе НК Si. Прогиб мембраны

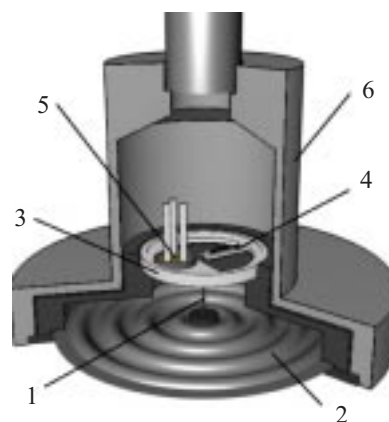


Рис. 3. Первичный преобразователь давления криогенных жидкостей:

1 — шток; 2 — мембрана; 3 — тензомодуль; 4 — консольная балка с тензорезисторами; 5 — контактный узел; 6 — корпус

2 под действием давления передается через шток 1 на консольную балочку, вызывая ее прогиб и, соответственно, деформацию закрепленных на ней тензорезисторов, включенных в мостовую схему. Изменяя размеры мембраны (толщину и диаметр), можно легко переходить на разные диапазоны измеряемых давлений, а используя НК Si с различным удельным сопротивлением, можно получить оптимальные характеристики первичного преобразователя давления в заданном диапазоне температур. В качестве материала упругого элемента преобразователя давления использовался инварный сплав 36Н.

Создан первичный преобразователь давления жидкого азота на диапазон 0...2,5 кПа, в котором использовались тензорезисторы на основе НК *p*-Si с $\rho_{300K}=0,02$ Ом·см. Градуировочная характеристика такого преобразователя давления приведена на рис. 4. Чувствительность преобразователя давления жидкого азота составляет 46 мВ/кПа при питании тензорезисторов постоянным током 10 мА. Разработанный преобразователь давления можно также использовать для измерения уровня жидкого азота; его чувствительность ≈ 4 мВ/мм.

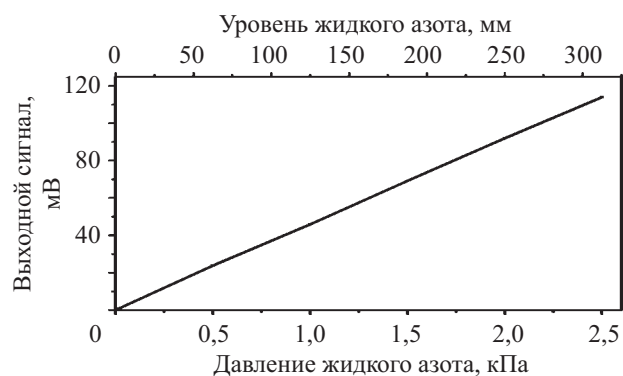


Рис. 4. Градуировочная характеристика первичного преобразователя давления (уровня) жидкого азота

Разработан также первичный преобразователь давления жидкого гелия на диапазон 0—10 МПа для циркуляционных трубопроводов установки ТОКАМАК (рис. 5). На рис. 6. приведены градуировочные характеристики этого преобразователя давления при использовании тензорезисторов на основе сильнолегированных НК *p*-Si с $\rho_{300K}=0,005$ Ом·см, соединенных в мостовую схему, и одиночного тензорезистора на основе НК *p*-Si с $\rho_{300K}=0,013$ Ом·см. Как видно из приведенных графиков, применение крем-



Рис. 5. Первичный преобразователь давления жидкого гелия

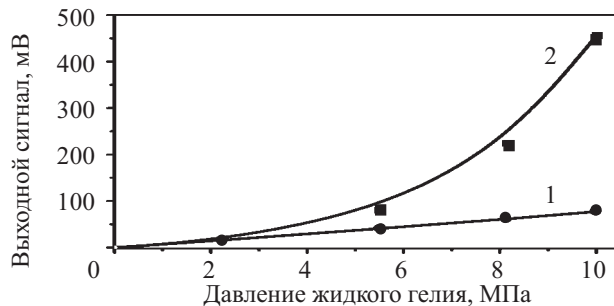


Рис. 6. Выходной сигнал первичного преобразователя давления жидкого гелия:

1 — мостовая схема с двумя активными тензорезисторами на основе НК *p*-Si с $\rho_{300K}=0,005$ Ом·см, ток через тензорезистор $I=10$ мА; 2 — схема с одним активным тензорезистором на основе НК *p*-Si с $\rho_{300K}=0,013$ Ом·см и источником тока $I=100$ мкА

ниевых тензорезисторов, в которых при 4,2 К проявляется неклассический тензорезистивный эффект, позволяет существенно увеличить чувствительность таких преобразователей давления: их выходной сигнал достигает примерно 470 мВ (без усиления) при токе через тензорезистор 100 мкА, однако при этом возникает необходимость линеаризации выходной характеристики преобразователя давления.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что использование тензорезисторов из сильнолегированного кремния *p*-типа (в нашем случае на основе НК *p*-Si с $\rho_{300K}=0,005$ Ом·см) позволяет создать первичные преобразователи давления криогенных жидкостей (жидкого азота и жидкого гелия) на основе классического тензорезистивного эффекта в кремнии.

Значительное увеличение чувствительности первичного преобразователя давления жидкого гелия может быть достигнуто при использовании тензорезисторов, изготовленных из кремния с концентрацией акцепторной примеси (бора) вблизи перехода «металл—диэлектрик» с диэлектрической стороны (в нашем случае на основе нитевидных кристаллов *p*-Si с $\rho_{300K}=0,013$ Ом·см), в котором при гелиевых температурах проявляется гигантский неклассический тензорезистивный эффект.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. <http://www.kulite.com>
2. Бушев В. В., Николайчук О. Л., Стучебников В. М. Серия электронных датчиков давления МИДА // Датчики и системы.— 2000.— № 1.— С. 21—27.
3. Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках.— М.: Наука, 1972.
4. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. Полупроводниковые сенсоры механических величин на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // Микросистемная техника.— 2001.— № 9.— С. 3—8.
5. Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Pavlovskyy I. V., Palewski T. Piezoresistive properties of boron-doped silicon whiskers at cryogenic temperatures // Functional Materials.— 2004.— Vol. 11, N 2.— P. 268—272.
6. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В. О возможности создания высокочувствительных пьезорезистивных сенсоров механических величин для криогенных температур // Датчики и системы.— 2005.— № 7.— С. 17—21.
7. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел.— М.: Наука, 1974.