

06;12

## **Кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией, полученные вертикальным анизотропным травлением**

© *Е.Г. Гук, А.Г. Ткаченко, Н.А. Токранова, Л.С. Границына,  
Е.В. Астрова, Б.Г. Подласкин, А.В. Нащекин,  
И.Л. Шульпина, С.В. Рутковский*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

*Поступило в Редакцию 21 декабря 2000 г.*

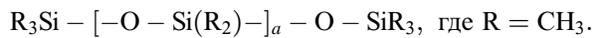
Получены и исследованы КСДИ-структуры с вертикальными изолирующими стенками для многоэлементных устройств, в которых требуются глубокие карманы монокристаллического кремния и высокая плотность упаковки элементов. Технология получения структур базируется на анизотропном травлении кремния ориентации (110) и заполнении полученных канавок кремниевой суспензией на основе кремнийорганического полимера.

Технология кремния с диэлектрической изоляцией (КСДИ) в настоящее время прочно занимает свое место в ряду традиционных процессов полупроводниковой технологии и широко применяется для изготовления целого класса полупроводниковых приборов, конструкция которых предусматривает высокое качество изоляции отдельных элементов [1]. К таким приборам относятся, в частности, многоэлементные фотоприемники, позиционно чувствительные детекторы ядерных частиц и другие приборы, в которых требуется значительная глубина монокристаллического слоя. Но в традиционной КСДИ-технологии увеличение глубины карманов ведет к существенному увеличению площади, занимаемой изоляцией. Кроме того, одним из основных недостатков КСДИ технологии следует считать большие временные и энергозатраты, требуемые для операции заполнения V-образных канавок поликристаллическим кремнием. Эта операция является и наиболее вредной с экологической точки зрения.

В данной работе рассматривается метод изготовления КСДИ-структур, основанный на использовании анизотропного травления кремния ориентации (110) [2], позволяющего формировать канавки с вертикальными стенками большой глубины в сочетании с разработанной нами

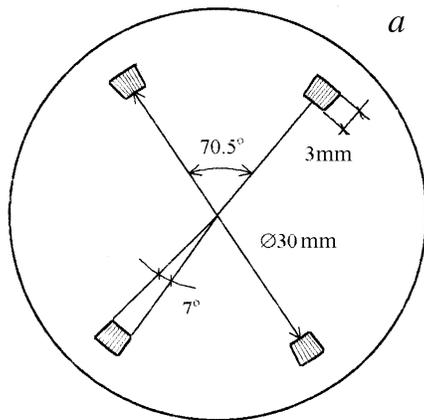
технологией заполнения этих канавок суспензией на основе кремнийорганического полимера.

На принципиальную возможность использования глубоких ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) вертикальных канавок для получения диэлектрической изоляции указывалось в [3]. Однако ее практическая реализация осложняется проблемами, связанными с заполнением глубокого рельефа методом газофазного осаждения поликристаллического кремния (уже в начале процесса поликремний закрывает верхнюю часть канала задолго до его полного заполнения, и значительная часть канала до его дна остается пустой) [4]. Предлагаемый нами метод заполнения канавок любой глубины и формы позволяет избежать указанных недостатков и упростить получение КСДИ-структур. В основе нашей технологии заполнения канавок мелкодисперсным кремнием лежит формирование в них однородной массы наполнителя за счет использования в качестве связующего вещества кремнийорганического полимера. В качестве такого полимера применялся обладающий хорошей растворимостью и пленкообразующими свойствами диметилсилоксановый каучук (СКТ)



Термоокислительная деструкция СКТ приводит к его разложению, продуктами которого являются в основном  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ . Термоокисление сопровождается структурированием формирующейся двуокиси кремния за счет межмолекулярной конденсации образующихся боковых силанольных групп [5]. Однако заполнять канавку непосредственно этим окислом невозможно, так как из-за газовыделения термодеструкция сопровождается существенным уменьшением объема твердой фазы. Поэтому для сохранения исходного объема наполнителя в канавках, в растворе кремнийорганического полимера были диспергированы частицы измельченного кремния (размер частиц  $3-5 \mu\text{m}$ ). Последующее окисление мелкодисперсного кремния внутри канавок приводит к увеличению его объема. Таким образом возможно подбирать состав с оптимальным соотношением кремния и полимера, позволяющий сохранить исходный объем твердой фазы, заполняющей канавку.

Эксперимент проводился на полированных пластинах  $n$ -Si (КЭФ-7) толщиной  $500 \mu\text{m}$ , ориентированных в плоскости (110). Для формирования глубоких канавок с вертикальными стенками была использована методика щелочного анизотропного травления [6]. В отличие от анизотропного травления кремния ориентации (100), при котором не



**Рис. 1.** Схема процесса изготовления КСДИ-структур с помощью вертикального анизотропного травления: *a* — расположение знаков совмещения, использованных для прецизионной ориентации рисунка фотошаблона вдоль следа плоскостей (111); *b* — травление глубоких канавок; *c* — окисление; *d* — заполнение канавок; *e* — вскрытие дна канавок; *f* — удаление периферийных частей пластины.

требуется высокая точность ориентации вытравливаемого рельефа относительно осей кристалла, точность ориентирования фигур травления для кремния ориентации (110) должна составлять несколько минут во избежание значительных боковых растратов. По этой причине нами был разработан способ прецизионной ориентации длинной стороны формируемых канавок параллельно следу плоскостей (111) в плоскости (110). Для этого использовалась дополнительная технологическая операция формирования и последующего травления специальных знаков совмещения. Эти знаки представляли собой 4 серии окон, вскрытых в защитной маске окисла. Они располагались на пластине попарно под углом  $70.5^\circ$ , как показано на рис. 1, *a*. Каждая серия состояла из 180 полос шириной  $5\ \mu\text{m}$  и длиной 3 mm, расположенных радиально через каждые 2 угловые минуты. В результате анизотропного травления на глубину  $300\ \mu\text{m}$  из 180 элементов оставалось приблизительно 20, среди которых практически нерастравленными в боковом направлении сохранялось лишь 2–3 элемента. Остальные полностью исчезали из-

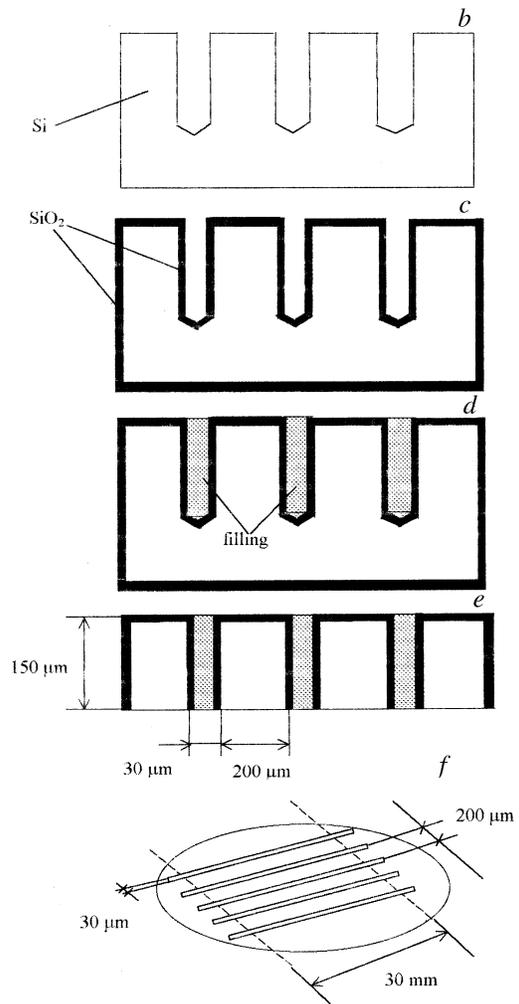
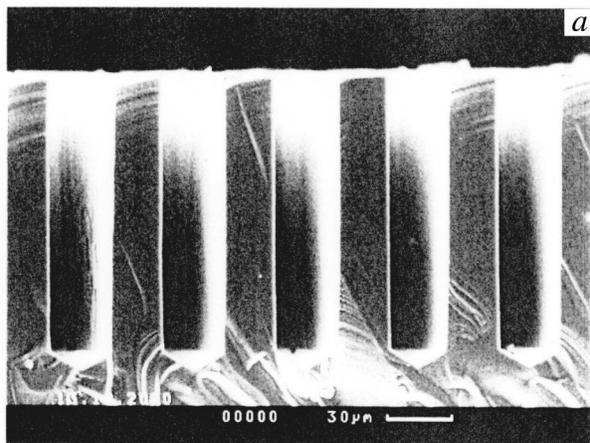


Рис. 1 (продолжение).



**Рис. 2.** Изображения структур, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (*a – c*) и рентгеновской топографии (*d*): *a* — поперечное сечение образца после травления глубоких канавок; *b* — готовая заполненная канавка с вертикальными стенками; *c* — V-образная заполненная канавка (поперечное сечение); *d* — участок готовой структуры (съемка сверху). Рефлекс 151, брэгговская асимметричная геометрия в  $\text{CuK}\alpha_1$ -излучении. Канавки — черные полосы, дислокации изображаются в белом контрасте. Черные точки появились в результате травления фигур совмещения, которые не имеют отношения к обсуждаемому процессу. Неравномерный фон топограммы указывает на изгиб пластины.

за сильного бокового подтрав. Далее на кремниевой пластине вновь формировалась защитная маска и рисунок рабочего фотошаблона ориентировался с помощью полученных вспомогательных знаков совмещения. Анизотропное травление рабочих структур осуществлялось в 44% растворе КОН при  $T = 60^\circ\text{C}$  в течение 250 min.

В результате на пластинах были получены параллельные канавки глубиной  $150\ \mu\text{m}$ , шириной  $30\ \mu\text{m}$  и длиной 35 mm (рис. 1, *b* и 2, *a*). Пластины с вытравленными канавками были окислены в атмосфере водяного пара при  $1000^\circ\text{C}$  до образования окисла толщиной  $0.6\ \mu\text{m}$  (рис. 1, *c*). Затем на центрифуге канавки заполнялись мелкодисперсной суспензией кремния в 5%-ном растворе СКТ в толуоле. После предварительной сушки для удаления растворителя проводились термодеструкция при

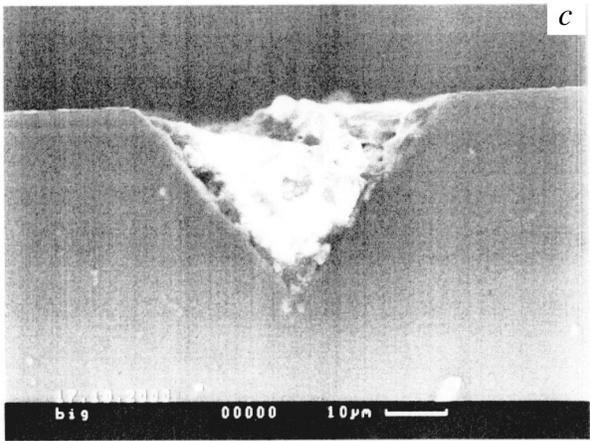
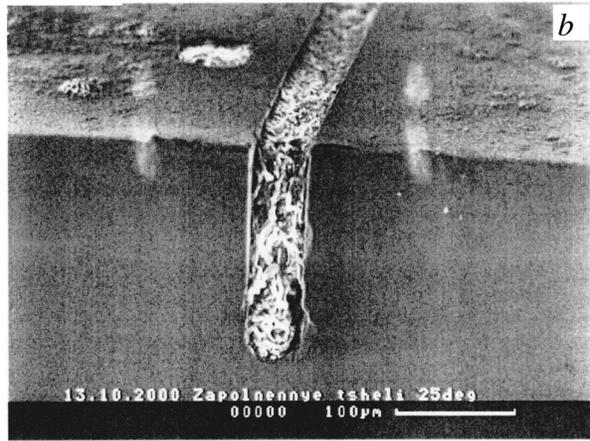


Рис. 2 (продолжение).

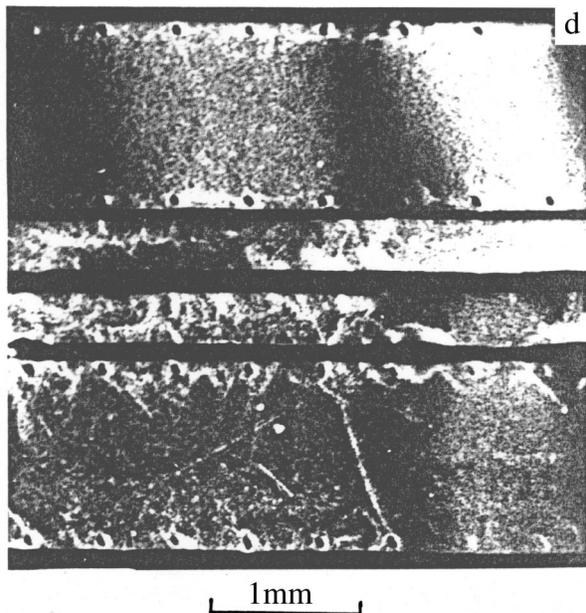


Рис. 2 (продолжение).

200°C и окисление в парах воды при 900°C в течение часа (рис. 1, *d*). Скол, выполненный перпендикулярно канавкам, продемонстрировал их полное заполнение до самого дна (рис. 2, *b*). Следует отметить, что эта суспензия также может быть использована для заполнения канавок и V-образной формы (рис. 2, *c*). На заключительном этапе тыльная часть пластины, содержащая заполненные канавки с вертикальными стенками, удалялась полировкой до вскрытия дна канавок (рис. 1, *e*). После отделения периферийных частей вскрытой структуры скрайбированием с целью раскоротить карманы (рис. 1, *f*) был получен набор изолированных областей.

Сформированная структура представляла собой изолированные полосы монокристаллического кремния длиной 30 mm разной ширины: 200  $\mu\text{m}$  и 2 mm, прочно соединенные наполнителем в виде спекшегося и окисленного мелкодисперсного кремния. Для предотвращения утечек

по местам реза структуры были дополнительно окислены при 1000°С в течение 2 h в парах воды. Над монокристаллическими областями структуры были вскрыты окна в окисле и проведены электрические измерения. Значение тока утечки между изолированными монокристаллическими областями, измеренное в темновой камере с помощью электрометра, составило  $2 \cdot 10^{-10}$  А при напряжении 10 V. Оценки показали, что эта величина определяется диэлектрическими свойствами изолирующего термического окисла.

Для контроля структурного совершенства участков монокристаллического кремния были проведены рентгенотопографические исследования с помощью метода обратного отражения от верхней поверхности пластин. При этом использовались асимметричные рефлексы 151, 333 и 331 в  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучении. Исследования обнаружили изгиб готовых структур и генерацию дислокаций на границах канавок, обусловленную релаксацией механических напряжений (рис. 2, *d*). Однако оптимизируя состав наполнителя и режим термообработок, можно уменьшить механические напряжения в формируемых структурах, что в принципе позволит избежать деформации кремниевых пластин и снизить вероятность появления дефектов и дислокаций в рабочем слое монокристаллического кремния.

Таким образом, продемонстрированы возможности нового метода получения глубоких КСДИ-структур, представляющих интерес для различного рода полупроводниковых приборов матричного типа.

Работа выполнена при поддержке Программы Миннауки "Физика твердотельных наноструктур" (№ гранта 99–1107).

## Список литературы

- [1] Брюхно Н.А., Жарковский Е.М., Концевой Ю.А. и др. // Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. 1987. В. 4. 40 с.
- [2] Kendall D.L. // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. P. 195–203.
- [3] Bean K.E., Runyan W.R. // J. Electrochem. Soc. 1979. V. 124. N 1. P. 5C–12C.
- [4] Ottow S., Lehmann V., Foll H. // J. Electrochem. Soc. 1996. V. 143. N 1. P. 385–390.
- [5] Warrick E.L. et al. // Rubber Chem. Techn. 1979. V. 52. N 3. P. 437–525.
- [6] Kendall D.L. // Ann. Rev. Mater. Sci. 1979. V. 9. P. 373–403.