

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.315.5.592.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСЕНСОРА**В.М. КОЛЕШКО¹, А.В. СЕРГЕЙЧЕНКО¹, В.В. НЕЛАЕВ², М.Г. КРАСИКОВ²¹*Белорусский национальный технический университет
пр. Ф. Скорины, 65, Минск, 220027, Беларусь,*²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 25 октября 2004*

Рассмотрена конструкция термически изолированного мембранного микросенсора с теплораспределяющей областью. Проведено моделирование процесса диффузии из окисной пленки, полученной по золь-гель технологии, и получена зависимость распределения примеси в кремниевой подложке от концентрации бора в окисле и времени процесса диффузии. Выбраны оптимальные режимы создания теплораспределяющей области мембранного микросенсора с точки зрения минимизации градиента температуры.

Ключевые слова: технология, моделирование, диффузия, легирование, примеси, мембранный сенсор, теплораспределяющая область.

Введение

Благодаря развитию кремниевой планарной технологии стало возможным создание микросенсоров на мембране, отличающихся повышенной чувствительностью, субмикронными размерами и низкими значениями потребляемой энергии. Многие из таких сенсоров работают при повышенных температурах их чувствительных элементов (ЧЭ): газовые сенсоры, сенсоры потока, ИК сенсоры и т.д. При этом чрезвычайно важным становится точный контроль поддержания определенной температуры ЧЭ. Не менее важным является создание однородного температурного поля по площади ЧЭ. Для нагрева ЧЭ микросенсоров применяются тонкопленочные нагревательные элементы, имеющие обычно форму меандра. Материалы мембран (пленки SiO₂, Si₃N₄ и др. толщиной порядка 1 мкм) обладают низкими значениями коэффициента теплопроводности (1–3 Вт/мК), что, с одной стороны, обеспечивает достаточную теплоизоляцию ЧЭ от подложки, но с другой — приводит к значительному перегреву областей, расположенных в непосредственной близости от элементов меандра и к большим значениям градиента температуры через всю площадь ЧЭ [1]. Чувствительность, металлооксидных газовых сенсоров определяется температурой активного слоя (АС) [2]. Причем значения температур максимальной чувствительности для разных газов могут различаться лишь на 10–20 град. Наличие значительного градиента температуры по площади ЧЭ сводит к нулю попытки достижения какой-либо селективности сенсора.

Наиболее эффективным способом решения проблемы теплораспределения в мембранных микросенсорах является создание теплораспределяющего слоя из материалов с высоким коэффициентом теплопроводности, например, из алюминия (коэффициент теплопроводности

205 Вт/мК) [3]. Обладая низким значением теплового сопротивления, такой слой в системе мембрана — теплораспределяющий слой выступает в роли шунта. Таким образом, тепло от точечных источников, за которые можно принять элементы тонкопленочного нагревателя, относительно равномерно распределяется по всей площади ЧЭ.

Однако формирование дополнительного слоя металлизации требует и создания дополнительных диэлектрических слоев, что существенно усложняет весь технологический процесс. Кроме того, формирование "толстых" (порядка 1–2 мкм) слоев металлизации сопряжено с определенными технологическими трудностями. В то же время монокристаллический кремний, используемый в качестве подложки, также обладает высокой теплопроводностью. Его коэффициент теплопроводности составляет приблизительно 150 Вт/мК. При этом формирование из него локальных областей толщиной в несколько микрометров является относительно простой технологической задачей.

В данной работе приводятся результаты исследования технологических параметров изготовления мембранного микросенсора с теплораспределяющей областью из монокристаллического кремния, формируемого с использованием золь-гель технологии. В частности, исследована зависимость толщины теплораспределяющей области микросенсора от параметров процесса диффузионного легирования кремния.

Конструкция и технология изготовления мембранного микросенсора

Исследуемая конструкция термически изолированного мембранного микросенсора представлена на рис. 1.

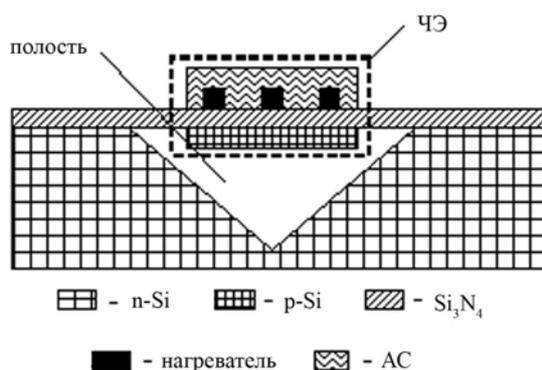


Рис. 1. Конструкция мембранного микросенсора

В качестве подложки микросенсора использован монокристаллический кремний *n*-типа проводимости с ориентацией поверхности (100). Выбор типа проводимости и ориентации кремниевой подложки определяется тем, что в рассматриваемой технологии используется жидкостное щелочное травление для микропрофилирования [4].

На поверхности подложки сформирован диэлектрический слой, например, пленка Si_3N_4 , на котором расположены тонкопленочный нагревательный элемент (ТПНЭ) и активный слой (АС). Тепловая изоляция чувствительного элемента (ЧЭ) мембранного микросенсора осуществляется посредством жидкостного анизотропного травления кремниевой подложки через щели в диэлектрической пленке, в результате чего под мембраной образуется воздушная полость. С обратной стороны мембраны, непосредственно под активным слоем формируется теплораспределяющая область заданной толщины. Эта область представляет собой кремний *p*-типа (*p*-Si), легированный бором до концентрации $\geq 7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, устойчивый к щелочному травлению [4].

Технологический процесс изготовления термически изолированного мембранного микросенсора с теплораспределяющей областью состоит из следующей последовательности операций:

формирование локальных областей окисной пленки, содержащей примесь бора на поверхности кремниевой подложки;

локальное диффузионное легирование кремниевой подложки бором из окисной пленки;

формирование диэлектрической пленки на поверхности кремниевой подложки;

формирование тонкопленочного нагревательного элемента на поверхности диэлектрической пленки;

формирование щелей в диэлектрической пленке;
анизотропное травление кремниевой подложки;
нанесение активного слоя.

Моделирование процесса диффузионного легирования

Важной операцией технологического процесса создания термически изолированного мембранного микросенсора с теплораспределяющей областью является локальное диффузионное легирование подложки из окисной пленки, полученной по золь-гель технологии [5]. Выбор именно такого метода локального легирования обусловлен двумя основными причинами. Во-первых, легирование из окисной пленки осуществляется в одну стадию и позволяет исключить операцию загонки примеси. Во-вторых, применение золь-гель технологии не требует использования дорогостоящего вакуумного оборудования и дорогих исходных материалов. Окисная пленка наносится путем центрифугирования раствора тетраэтоксисилана, содержащего определенное количество борного ангидрида. Локальные области окисной пленки на поверхности кремниевой пластины создаются с использованием операции фотолитографии. Окончательная операция – высокотемпературная диффузия бора из окисла в кремниевую подложку на заданную глубину.

Моделирование процесса диффузионного легирования бором кремниевой подложки проводилось с использованием лицензионного программного пакета SSuprem4 фирмы SILVACO, предназначенного для моделирования и оптимизации технологических процессов изготовления изделий микросистемной техники. В качестве исходных данных моделирования приняты следующие условия: подложка — n -Si ориентации (100) с исходной концентрацией фосфора 10^{16} см^{-3} ; толщина окисной пленки — 0,2 мкм; температура процесса диффузионного легирования — 1150°C [6]. Оптимальные параметры процесса диффузионного легирования определялись посредством варьирования величины концентрации бора в окисной пленке и длительности процесса. В качестве целевой функции была выбрана глубина, на которой концентрация бора оказывалась равной $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — такой концентрации бора в кремнии, начиная с которой легированный кремний не растворяется в анизотропном щелочном травителе (например, в KOH). На рис. 2 представлены рассчитанные профили (соответственно в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях) распределения концентрации примеси бора в кремниевой подложке в результате локального диффузионного легирования из окисной пленки в приближении неограниченного источника.

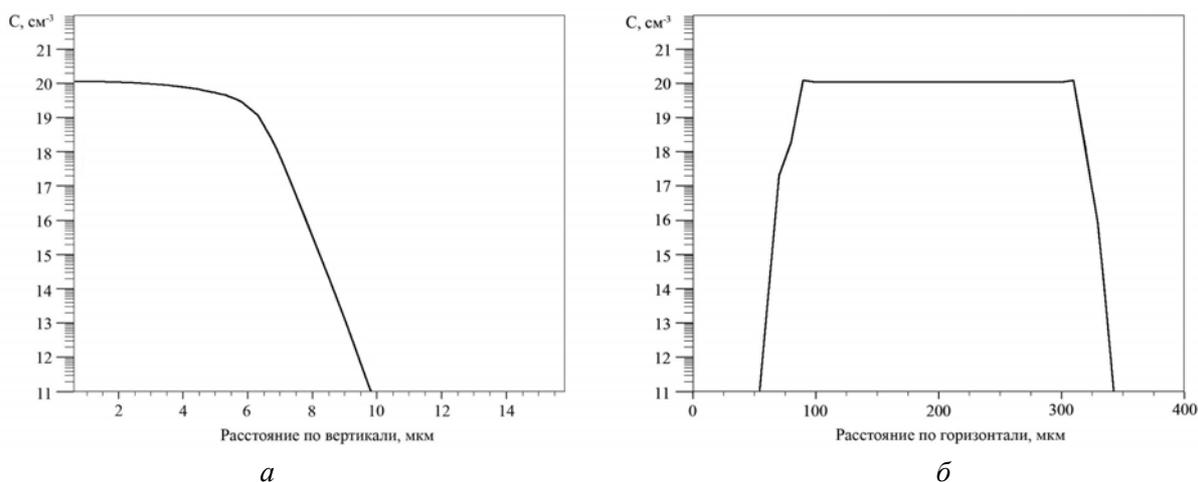


Рис. 2. Распределение бора в кремниевой подложке мембранного сенсора в результате локального диффузионного легирования из окисной пленки в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях

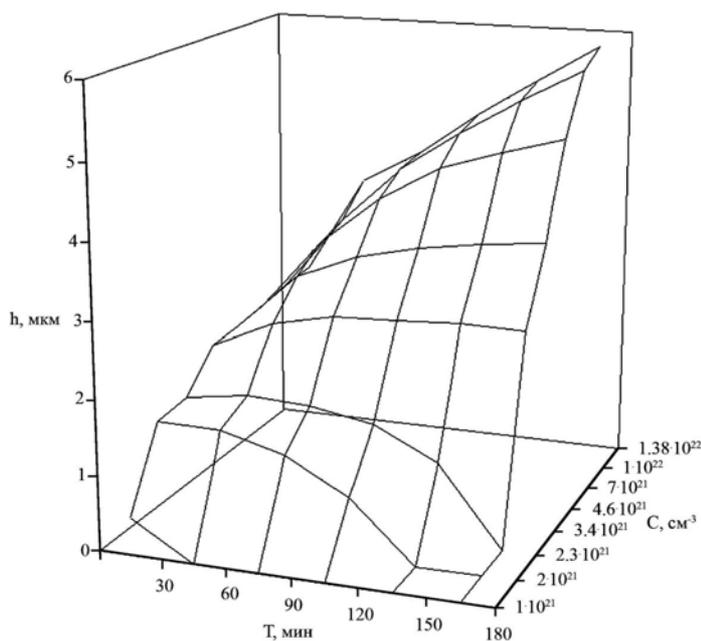


Рис. 3. Глубина залегания легированного слоя в зависимости от концентрации легирующей примеси в окисной пленке и от длительности процесса диффузионного легирования

$7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Результаты моделирования показали, что эта величина составляет 1–1,5 мкм с каждой стороны окисной пленки в зависимости от длительности диффузионного легирования. Такой малый уход примеси в боковом направлении свидетельствует о том, что при исследованных режимах диффузионного легирования снимается необходимость введения соответствующей поправки в размеры фотошаблонов.

Обсуждение результатов и выводы

Как показано в работе [7], градиент температуры по площади ЧЭ зависит от толщины теплораспределяющей области. Результаты обработки данных, приведенных в указанной работе, представлены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что для достижения градиента температуры ΔT , не превышающего 5° , необходимо создание теплораспределяющей области толщиной не менее 4 мкм. Сравнительный анализ результатов моделирования процесса локального диффузионного легирования из окисной пленки бором кремниевой подложки для формирования теплораспределяющей области чувствительного элемента термически изолированного микросенсора с данными рис. 4 приводит к выводу, что для создания теплораспределяющей области, удовлетворяющей указанному выше условию ($\Delta T \leq 5^\circ$), необходимы следующие режимы процесса локального диффузионного легирования бором:

концентрация легирующей примеси в пленке окисла должна составлять не менее $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, что соответствует содержанию 23 мас. % борного ангидрида в пленкообразующем растворе;

длительность процесса локального диффузионного легирования должна составлять не менее 2 ч.

По результатам вариационных расчетов построена зависимость глубины залегания легированного слоя (глубины, на которой концентрация бора достигает значения $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) от концентрации легирующей примеси в окисной пленке и от длительности процесса диффузионного легирования (рис. 3).

Результаты оптимизационных расчетов показали, что минимальное значение концентрации бора в окисной пленке, при котором возможно создание высоколегированных, нерастворимых в щелочных травителях, областей в кремнии, составляет $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Получение "толстых" теплораспределяющих областей, толщиной более 5 мкм, возможно при концентрации бора в окисле более, чем 10^{22} см^{-3} и значительной длительности процесса диффузионного легирования.

Исследовано также диффузионное распространение бора в горизонтальном направлении в приповерхностной области кремниевой подложки за границы окисного слоя вплоть до его концентрации

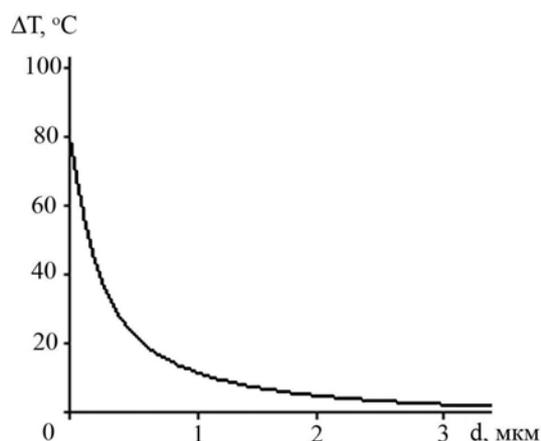


Рис. 4. Зависимость градиента температуры по площади чувствительного элемента микро-сensors от толщины теплораспределяющей области

Описанная конструкция термически изолированного мембранного микросенсора является базовой при создании различных видов сенсоров, работающих при повышенных температурах и чувствительных к градиенту температуры по площади чувствительного элемента.

Использование золь-гель технологии при формировании окисной пленки, содержащей источник легирующей примеси, для дальнейшего формирования высоколегированных областей в кремниевой подложке значительно упрощает технологический процесс создания микросенсора и снижает его себестоимость за счет использования простого технологического оборудования.

Работа выполнена в рамках проекта REASON (IST-2000-30193) программы IST Европейской Комиссии.

SIMULATION OF THE MICROSENSOR ELEMENT TECHNOLOGY WITH HIGH CONCENTRATIONS OF IMPURITIES

V.M. KOLESHKO, A.V. SERGEICHENKO, V.V. NELAYEV, M.G. KRASIKOV

Abstract

Construction of the thermal insulated membrane microsensor with heat-distributed area was investigated. Simulation of the diffusion process from sol-gel oxide film was performed. Dependency of the impurity distribution in the silicon wafer from boron concentration in oxide and diffusion duration was obtained. Optimal conditions for the heat-distributed area formation of the membrane microsensor were selected from the point of view of the temperature gradient minimization.

Литература

1. Козлов А.Г. // Микросистемная техника. 2004. №2. С. 8–13.
2. Колешко В.М., Таратын И.А., Сергейченко А.В. // Машиностроение: Сб. научн. тр.. Вып. 18 / Под ред. И.П. Филонова. Мн., 2002. С. 555–559.
3. Wheeler M.C., Tiffany J.E., Walton R.M. *et al.* // Sensors and Actuators (B). 2001. Vol. 77. P. 167–176.
4. Колешко В.М., Сергейченко А.В. // Машиностроение: Сб. научн. тр. Вып. 19 / Под ред. И.П. Филонова. Мн., 2003. С. 679–689.
5. Прихидько Н.Е., Ченик Л.Ф., Борисенко А.И. *и др.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технология производства и оборудование. Вып. 4. 1970. С. 3–7.
6. Новиков В.В., Прихидько Н.Е., Ченик Л.Ф. *и др.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технология производства и оборудование. Вып. 4. 1970. С. 27–31.
7. D. Briand, M.-A. Gr.tillat, B. van der Schoot and N.F. de Rooij // Technical Proceedings of the 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, US Grant, San Diego, California, USA, March 27–29, 2000. P. 640–643.