

06;12

Формирование сквозных отверстий в кремниевой подложке

© Э.Ю. Бучин, Ю.И. Денисенко, В.И. Рудаков

Институт микроэлектроники и информатики РАН, Ярославль
E-mail: imi.buchin@rambler.ru

Поступило в Редакцию 19 июля 2002 г.

Представлен способ, основанный на избирательном электрохимическом травлении p^+ -областей, сформированных в кремнии n -типа методом термомиграции алюминия. Его особенностью является возможность изготовления сквозных отверстий с поперечным сечением произвольной формы и характерными размерами в диапазоне 20–200 μm .

Монокристаллический кремний находит все более широкое применение в различных изделиях микромеханики благодаря своим электронным и высоким прочностным свойствам. Часто при конструировании отдельных устройств актуальной задачей является формирование отверстий в кремниевой подложке. Для этого могут быть использованы методы лазерного сверления (drilling), травления в высокоплотной плазме, щелочного анизотропного травления кремния ориентации (110), анодного травления в электролитах на основе плавиковой кислоты. Их достоинства и недостатки в целом хорошо известны. В данной работе предлагается новый способ, основанный на использовании метода термомиграции алюминиевой зоны в кремнии n -типа с последующим жидкостным травлением образовавшихся при этом p^+ -областей.

Метод термомиграции или зонной плавки с градиентом температуры, который используется на первой стадии процесса для сквозного локального легирования кремния, потенциально имеет большие прикладные возможности [1]. Схематически процесс представлен на рис. 1 на примере миграции жидкой зоны, состоящей из эвтектического расплава Al–Si, в кремниевой подложке n -типа. Процесс происходит за счет растворения атомов кремния на горячей стороне расплавленной зоны, их диффузионного переноса через нее и кристаллизации на холодной стороне зоны. Концентрация алюминия в перекристаллизованном слое определяется величиной его предельной растворимости

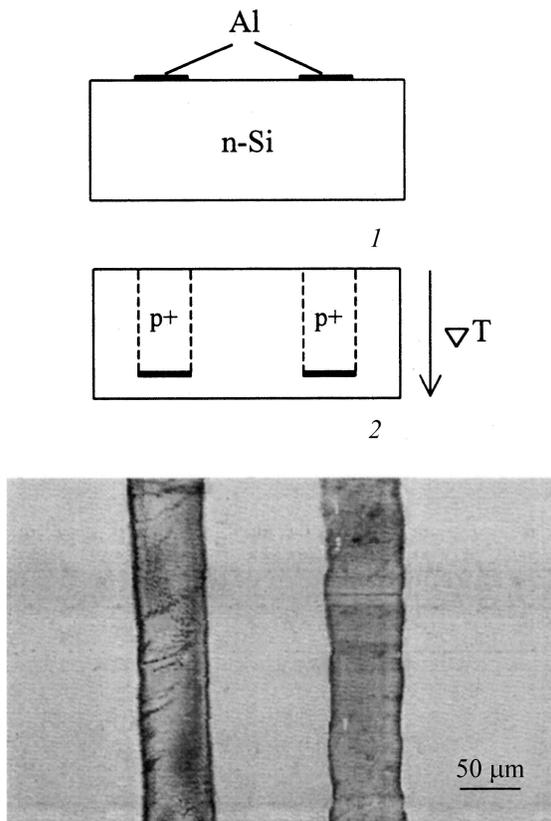


Рис. 1. Схема процесса термомиграции алюминиевой эвтектической зоны расплава в кремнии *n*-типа и фотографическое изображение полученных p^+ -каналов на поперечном сколе кремниевой пластины (1 — охлаждение, 2 — нагрев).

в кремнии, при температуре процесса 1100–1200°С она составляет величину $\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ at/cm}^3$. Жидкая зона продвигается в направлении температурного градиента в глубь подложки с выходом на противоположную поверхность. Скорость термомиграции зоны при этом на 3–5 порядков выше, чем скорость переноса атомов в традиционных

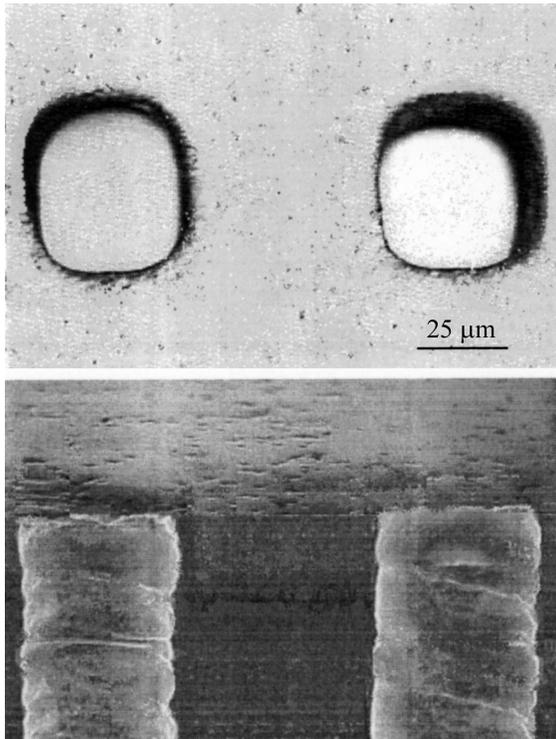


Рис. 2. Сквозные отверстия в кремниевой пластине (вид сверху — фотографическое изображение, поперечное сечение — электронный снимок).

процессах твердотельной диффузии. В кремнии n -типа вдоль траектории прохождения жидкой зоны образуется протяженность p^+ -область. Форма ее поперечного сечения (круг, квадрат, треугольник) задается на стадии нанесения алюминиевых площадок, а глубина области определяется временем процесса при заданной величине градиента температуры ∇T и типе подложки.

Второй этап рассматриваемого процесса заключается в избирательном удалении области p^+ -типа проводимости и формировании в объеме кремниевого образца сквозных отверстий с заданной формой попереч-

ного сечения. Этого можно добиться с помощью жидкостного химического либо электрохимического травления. При химическом травлении для селективного удаления p^+ -области в кремнии n -типа рекомендуют использовать системы $\text{HNO}_3\text{--HF--H}_2\text{O}$ или $\text{HNO}_3\text{--HF--CH}_3\text{COOH}$, причем растворы должны быть сильноразбавленными [2]. Скорость травления при этом низкая (десять доли микрона в минуту). При электрохимическом же процессе (анодировании кремния в электролитах на основе плавиковой кислоты) она может быть в целом на порядок выше. Известно, что необходимым условием для растворения кремния в этом процессе является наличие определенной концентрации дырок на его поверхности, контактирующей с электролитом. В кремнии p -типа дырки являются основными носителями заряда, в то время как в кремнии n -типа их равновесная концентрация мала. Если условия процесса травления выбираются таким образом, чтобы исключить механизмы дополнительной генерации носителей заряда (фотогенерация, лавинное умножение при высоких напряжениях и др.), то при этом может быть обеспечено селективное травление только p^+ -областей. Однако в диапазоне низких электрических напряжений и плотностей тока процесс анодирования кремния проходит в режиме порообразования, поэтому полученную пористую область затем необходимо удалить, например, растворив ее в сильноразбавленном растворе щелочи [3].

В экспериментах использовались кремниевые пластины марки КЭФ-4,5 с ориентацией (100), диаметром 100 мм и толщиной 460 μm . Процесс термомиграции осуществлялся на термоградиентной установке инфракрасного нагрева [4]. Исходная подложка с алюминиевыми прямоугольными площадками размером $60 \times 40 \mu\text{m}$ и толщиной 3 μm , нанесенными электронно-лучевым способом, нагревалась с обратной стороны до температуры 1100°C. При этом лицевая сторона подложки, где осуществлялся вход зоны, имела температуру на 8–10°C ниже за счет кондукции в среде аргона от медного водоохлаждаемого пьедестала. Время процесса термомиграции составляло 25 min, выход зоны фиксировался с помощью пирометра. Затем подложка охлаждалась, вынималась из рабочей камеры и разделялась на фрагменты размером $40 \times 40 \text{ mm}$. На рис. 1 изображена микрофотография сквозного легированного канала на поперечном сколе кремниевой пластины после дополнительного химического декорирования $p\text{--}n$ -перехода.

Избирательное анодное травление полученных образцов проводилось в тефлоновой электрохимической ячейке вертикального типа с платиновым контрэлектродом. В качестве электролита использовалась

смесь концентрированной плавиковой кислоты с изопропиловым спиртом (в объемном соотношении 1 : 1). Воздействие света на процесс было исключено. Травление происходило в гальваностатическом режиме, локальная плотность тока в p -областях составляла 60 mA/cm^2 при напряжении 5–7 В. Скорость травления достигала $5 \mu\text{m}$ в минуту. При изготовлении сквозных отверстий травление осуществлялось не на всю толщину кремниевых образцов, а не доходя $10\text{--}15 \mu\text{m}$ до их тыльной стороны. Образцы промывались в дистиллированной воде и сушились в потоке воздуха, затем их тыльную поверхность сошлифовали на глубину $20 \mu\text{m}$. Пористый кремний из каналов удаляли с помощью 1%-ного раствора гидроокиси калия. На рис. 2 представлено изображение полученных сквозных отверстий прямоугольной формы. При необходимости для обеспечения гладкости внутренних стенок отверстий дополнительно может быть проведено их полирующее химическое травление.

Представленный способ является более дешевым по сравнению с методами плазмохимического сквозного травления или более универсальным по сравнению с остальными вышеперечисленными методами формирования отверстий в кремнии. Однако у данного способа имеются определенные ограничения, обусловленные особенностью процесса термомиграции. Во-первых, форма поперечного сечения сквозных отверстий получается более округлой по сравнению с исходным рисунком алюминиевой площадки. Во-вторых, для характерных размеров поперечного сечения отверстий существует ограничительный диапазон от 20 до $200 \mu\text{m}$. При меньших значениях в процессе термомиграции наблюдаются явления траекторной нестабильности при движении зоны расплава (соответственно „блуждание“ легированного канала), при больших значениях не исключено ее разделение на несколько мелких фрагментов.

Список литературы

- [1] Рудаков В.И., Коледов Л.А. // Науч.-техн. сборник „Зарубежная электронная техника“. М.: ЦНИИ „Электроника“, 1993. С. 27–60.
- [2] Schwartz B., Robbins H. // J. Electrochem. Soc. 1976. V. 123 (12). P. 1903–1909.
- [3] Zhang X.G., Collins S.D., Smith R.L. // J. Electrochem. Soc. 1989. V. 136 (5). P. 1561–1565.
- [4] Мочалов Б.В., Рудаков В.И. // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 2. С. 155–157.