

ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕМНИЕВЫХ p - n -СТРУКТУРАХ

© М.С.Саидов, Б.М.Абдурахманов, Р.Алиев, А.С.Саидов

Институт электроники им.У.А.Арифова
Академии наук Республики Узбекистан,
700143 Ташкент, Узбекистан

(Получена 28 июля 1994 г. Принята к печати 29 марта 1995 г.)

Исследованы процессы переноса заряда в p - n -структурах на основе поликристаллического кремния. Образцы изготавливались тремя способами: осаждением из газовой фазы p^+ -слоя, термодиффузией бора и ионной имплантацией бора в тонкий n -слой на n^+ -подложке промышленного кремния. Установлено, что вольт-амперные характеристики структур имеют область отрицательного дифференциального сопротивления и это связано со свойствами границ зерен.

Поверхности раздела, окружающие отдельные кристаллы в поликристаллическом материале, так называемые границы зерен (ГЗ), оказывают существенное влияние на электропроводность. Вовлечение в производство солнечных элементов и приборов электронной техники пленочных поликристаллических кремниевых (ППК) структур требует детального изучения процессов переноса носителей заряда в указанном материале.

Как известно, ГЗ характеризуются плотностью поверхностных состояний (ПС), специфическим спектром глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне кремния и степенью их заполнения зарядами.

Высокотемпературные обработки, являющиеся неизбежными в процессе изготовления приборов электронной техники, приводят к изменению всех трех вышеуказанных характеристик ГЗ. В связи с этим представляет интерес исследование процесса переноса носителей заряда в ППК структурах при формировании в них p - n -перехода методами, различающимися условиями высокотемпературных операций.

В данной работе приведены результаты экспериментальных оценок процесса переноса носителей заряда в ППК p^+ - и n^+ -структурах. Базовый n -слой с удельным сопротивлением $\rho \simeq 0.1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и толщиной $\sim 40 \text{ мкм}$ был получен водородным восстановлением тетраоксида кремния при температуре 1200°C в вертикальном реакторе на

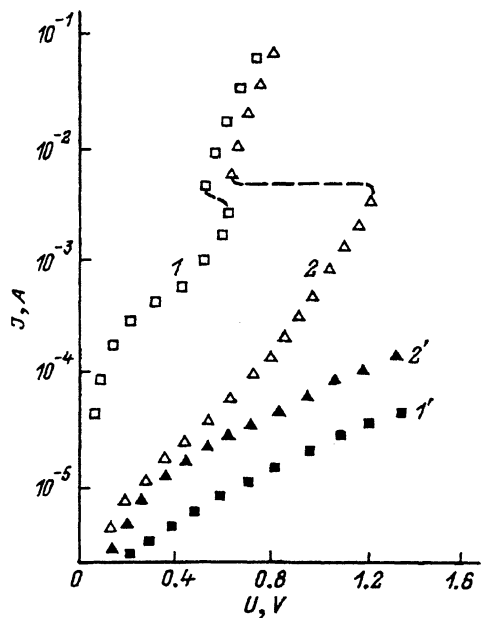


Рис. 1. Темновая ВАХ ППК $p-n$ -структур, сформированных выращиванием n - и p -слоев (1, 1') и диффузией бора в n -слой (2, 2').

1, 2 — прямое смещение; 1', 2' — обратное смещение.

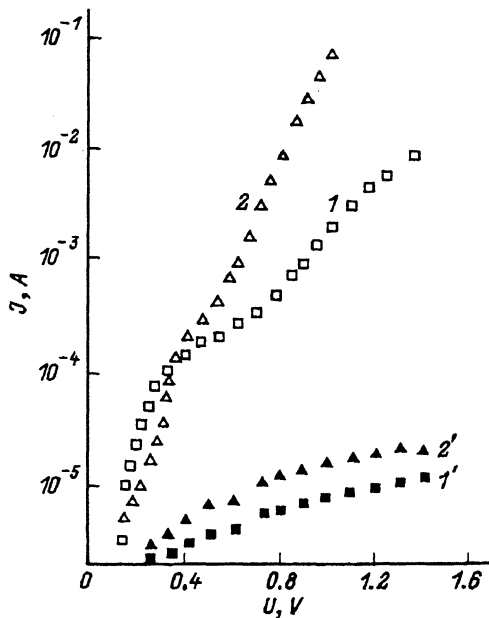


Рис. 2. Темновая ВАХ ионно-легированных $p-n$ -структур на ППК до (1, 1') и после (2, 2') термического отжига.

1, 2 — прямое смещение; 1', 2' — обратное смещение.

n^+ -подложках из металлургического кремния [1] с удельным сопротивлением $\rho \approx 0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Размеры зерен в поликристаллической подложке составляли не менее 300 мкм, а выращенный n -слой повторял структуру подложки, и размеры зерен в нем колебались в пределах $300 \div 2000 \text{ мкм}$.

Формирование p^+-n -перехода в образцах осуществлялось:

— осаждением из газовой фазы p^+ -слоя толщиной $\sim 2 \text{ мкм}$ при температуре 1200°C ;

— термодиффузией бора на глубину $\sim 1.5 \text{ мкм}$ при температуре 1100°C ;

— ионной имплантацией B^+ с энергией 75 кэВ с последующим отжигом при 800°C , что давало конечную глубину залегания $p-n$ -перехода на уровне $\sim 0.75 \text{ мкм}$.

Уровень легирования p^+ -слоя во всех случаях обеспечивался примерно одинаковым и контролировался поверхностным сопротивлением $R_0 \approx 50 \pm 5 \text{ Ом}$. На полученных структурах с размерами 5×5 , 2×2 , $1 \times 1 \text{ мм}^2$ в идентичных условиях формировали омические контакты к n^+ - и p^+ -областям и проводили термостатированные измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарядных характеристик (ВФХ) на частоте $f = 100 \text{ кГц}$. Темновые ВАХ p^+-n-n^+ -структур площадью $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с $p-n$ -переходами, изготовленными эпитаксией и диффузией, приведены на рис. 1. Видно, что в области смещений $20 < qU/kT < 50$ в пропускном направлении у обоих образцов имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением

(ОДС). На ВАХ структур с ионно-имплантированным $p-n$ -переходом (рис. 2) участок с ОДС отсутствует. Отметим, что эти образцы до отжига радиационных дефектов характеризуются наличием сублинейного участка ВАХ. Сублинейный участок ВАХ в пропускном направлении наблюдается обычно в $p^+ - n - n^+$ -структурах с n -базой, где осуществлена компенсация глубокими примесями [2]. В нашем случае сублинейная ВАХ преобразуется в S -образную характеристику с напряжениями срыва, лежащими для большой группы образцов (1200 штук) в пределах $0.65 \div 1.2$ В.

Наблюдаемый эффект обусловлен, очевидно, следующим: в ППК структурах $p-n$ -переход шунтируется дополнительным n^+ -каналом, образуемым на ГЗ за счет сегрегации примеси фосфора, которой легирован n -слой, на высокотемпературной операции создания $p-n$ -перехода. Это происходит потому, что, во-первых, коэффициент сегрегации фосфора в кремнии в $4 \div 5$ раз выше, чем у бора [3], и, во-вторых, коэффициент диффузии фосфора по ГЗ в $3.5 \div 3.8$ раз превышает значение, характерное для объема, т.е. внутри зерна [4].

При небольших величинах приложенного напряжения сопротивление этого канала намного меньше сопротивления $p-n$ -перехода и ток протекает преимущественно по ГЗ. Немаловажную роль при этом играют ПС — электронные ловушки на ГЗ в n -слое. Высокотемпературная обработка приводит к увеличению степени заполнения ПС, что сопровождается увеличением объема области обеднения вплоть до размеров, сопоставимых с объемом зерна. В такой ситуации с ростом подаваемого напряжения уменьшается концентрация носителей заряда в объеме полупроводника за счет их эксклюзии [5], а дифференциальное сопротивление $p-n$ -перехода возрастает.

С ростом общего тока через ППК $p^+ - n - n^+$ -структуру сопротивление $p-n$ -перехода уменьшается и происходит перераспределение токов, протекающих по каналу на ГЗ и через $p-n$ -переход. Это сопровождается резким увеличением инжекции носителей заряда в n -слой, и возникающая положительная обратная связь по току [6] создает условия сверхлинейного роста проводимости n -слоя с увеличением тока.

В результате на ВАХ исследуемой структуры образуется участок с ОДС.

Известны различные модели возникновения S -образных ВАХ диодных структур [6], основная из которых объясняет этот эффект увеличением времени жизни инжектированных носителей заряда в компенсированном глубокими примесными центрами полупроводнике. Предполагалось, что и в исследуемых структурах имела место диффузия примесей, дающих глубокие уровни, из n^+ -подложки в n -слой. Поэтому нами проводились измерения ВФХ структур в диапазоне температур $77 \div 300$ К. Результаты указали на отсутствие или по крайней мере незначительную концентрацию глубоких примесных центров ($N_{DC} \leq 10^{12}$ см⁻³). Обнаруженный непрерывный спектр уровней в интервале энергий $E_c - E = 0 \div 0.2$ эВ, связанный наряду с примесными уровнями и с ПС на ГЗ и комплексами дефектов на них, безусловно указывает на их возможный вклад в формирование механизма переноса носителей заряда в ППК структурах. Однако основной причиной возникновения S -образной ВАХ, по нашему мнению, является шунтирующие $p-n$ -переход каналы на ГЗ.

Подтверждением правомочности предложенного механизма являются результаты измерений ППК p^+-n-n^+ -структур с ионно-имплантированным $p-n$ -переходом, которые намеренно подвергали длительному отжигу или 800°C . При длительности отжига таких структур ≥ 3 ч образуется n -канал, шунтирующий $p-n$ -переход, и S -образная ВАХ наблюдается почти на всех ионно-имплантированных образцах.

В поддержку предложенного механизма можно привести и факт отсутствия S -образных ВАХ у образцов малого размера ($\leq 1\text{ мм}^2$), в которых ГЗ по микроскопическим наблюдениям либо отсутствуют, либо имеют малую плотность.

С применением методики анализа [7] ВАХ в области объемного заряда на исследуемых структурах оценивали эффективную скорость поверхностной рекомбинации S_{eff} носителей заряда. Так, на структурах с $p-n$ -переходом, сформированным эпитаксией, значение S_{eff} составляло $\sim 5 \cdot 10^4\text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, а на диффузионных структурах $\sim 10^3\text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$. Более высокое значение S_{eff} у структур с $p-n$ -переходом, сформированным осаждением из газовой фазы, связано с более высокой степенью заполнения ПС электронами, что вызвано соответственно и более высокой температурой операции создания $p-n$ -перехода. На структурах с ионно-имплантированным $p-n$ -переходом S_{eff} составляет до отжига радиационных дефектов величину $2.7 \cdot 10^4\text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ и после отжига $5 \cdot 10^2\text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$. Очевидно, что высокое значение S_{eff} и появление сублинейного участка ВАХ до отжига у этих структур обусловлено именно введением в объем зерна радиационных дефектов на операции ионной имплантации.

Полученные результаты позволяют считать, что для снижения влияния ГЗ на перенос носителей заряда в ППК структурах целесообразно формировать $p-n$ -переходы в них ионным легированием с последующим кратковременным отжигом дефектов.

Полученные результаты указывают также на возможность создания на основе ППК структур полупроводниковых приборов с S -образной ВАХ, в технологии которых целесообразно применять сочетание термообработок с ионным легированием, радиационным облучением и другие приемы, приводящие к управляемому изменению проводимости ГЗ и зарядовых состояний, а также к компенсации ПС. Очевидно, что на пленочных кремниевых поликристаллических структурах возможно изготовление S -диодов, инжекционных фотоприемников, оптоэлектронных фильтров.

Список литературы

- [1] М.С. Саидов и др. Гелиотехника, вып. 1, 54 (1984).
- [2] А.А. Абакумов и др. В кн.: *Физические явления в полупроводниковых структурах с глубокими уровнями и оптоэлектроника* (Ташкент, 1977) с. 3.
- [3] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: Теория и эксперимент* (М., 1987).
- [4] Р.А. Муминов и др. Гелиотехника, вып. 1, 67 (1985).
- [5] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., 1973).
- [6] И.М. Викулин, В.И. Стафеев. *Физика полупроводниковых приборов* (М., 1980).
- [7] С.А. Азимов и др. Гелиотехника, вып. 5, 3 (1984).

Charge transport in polycrystalline silicon $p-n$ -structures

M.S.Saidov, B.M.Abdurakhmanov, R.Aliev, A.S.Saidov

Institute for Electronics, 700143 Tashkent, Uzbekistan

The processes of charge transport in $p-n$ structures on the basis of polycrystalline silicon films have been studied. The samples were prepared by epitaxial deposition of p^+ -layer, boron thermodiffusion and boron ion implantation into a thin n -layer on n^+ -substrate from a commercial silicon. It was found that current-voltage characteristics of the structures have negative differential resistance connected with properties of grain boundaries.
