

УДК 621.592

Особенности формирования p - n -структур в пленочном поликристаллическом кремнии

Р. Алиев, Э. Мухтаров

Сопоставлены вольт-амперные характеристики электронно-дырочных структур, сформированных с использованием методов выращивания пленок p -типа проводимости, термической диффузии и ионной имплантации атомов бора в n -типный слой поликристаллического кремния. Выявлена S -образная характеристика исследованных структур, обусловленная изменением проводимостей базы и границ зерен при термической обработке.

PACS: 85.30.-z

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, поликристаллический кремний, пленочный, p - n -структуры.

Введение

Границы зерен (ГЗ) в поликристаллическом кремнии (ПК) характеризуются высокой плотностью поверхностных состояний (ПС), специфическим спектром глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне и степенью их заполнения зарядами.

Высокотемпературные обработки, являющиеся неизбежными в процессе подготовки базовых пластин и изготовления на их основе приборов электронной техники, приводят к изменению всех трех вышеуказанных характеристик ГЗ. Такие изменения, в свою очередь, оказывают существенное влияние на процессы генерации-рекомбинации неравновесных носителей заряда и их разделение на контактно-барьерных полях, служащих основанием любого электронного прибора. Исследовательская практика показывает, что наиболее значимыми факторами, влияющими на процессы переноса носителей заряда в приборных структурах, являются режимы термической обработки (ТО) пластин, проводимой при формировании на них эффективного p - n -перехода.

В связи с этим представляет интерес исследование процесса переноса носителей заряда в пленочных ПК-структурах при формировании на них p - n -перехода методами, различающимися усло-

виями высокотемпературных операций, что и является основной целью данной работы.

Исследование направлений оптимизации высокотемпературных операций

Рассмотрим результаты экспериментального анализа процессов переноса носителей заряда в структурах, полученных на основе p^+ - и n^+ -пленок ПК. Базовый n -слой с удельным сопротивлением $\rho \sim 0,1$ Ом-см и толщиной 40 мкм был получен водородным восстановлением тетраоксида кремния при температуре $T = 1200$ °С в вертикальном реакторе на n^+ -подложках из металлургического кремния [1] с удельным сопротивлением $\rho \sim 0,01$ Ом-см. Размеры зерен в поликристаллической подложке превышали 300 мкм, а выращенный n -слой повторял структуру подложки, причем размеры зерен в нем колебались уже в пределах 300—2000 мкм.

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

- осаждением из газовой фазы p^+ -слоя толщиной ~ 2 мкм при температуре 1200 °С;
- термодиффузией атомов бора на глубину 0,5—1,5 мкм при температуре 1100 °С;
- ионной имплантацией атомов бора с энергией 75 кэВ с последующим отжигом при 800 °С, что давало конечную глубину залегания p - n -перехода на уровне 0,75 мкм.

Уровень легирования p^+ -слоя во всех случаях обеспечивался примерно одинаковым и контролировался поверхностным сопротивлением $R_0 \sim 50 \pm 5$ Ом/□. На полученных структурах с размерами 5×5, 2×2 и 1×1 мм в идентичных условиях формировали омические контакты к n^+ - и p^+ -областям и прово-

Алиев Райимжон, проректор по науке.

Мухтаров Эркин, аспирант.

Андижанский государственный университет.

Узбекистан, 710000, г. Андижан, ул. Университетская, 129.

Тел. 8 (99874) 225-30-62.

E-mail: alievuz@yahoo.com erkinand@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 22 июня 2009 г.

дили термостатированные измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-емкостных характеристик (ВЕХ) на частоте $f = 100$ кГц.

Темновые ВАХ p^+-n-n^+ -структур площадью 5×5 мм 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 (из 1200 шт.) в пределах 0,65—1,2 В.

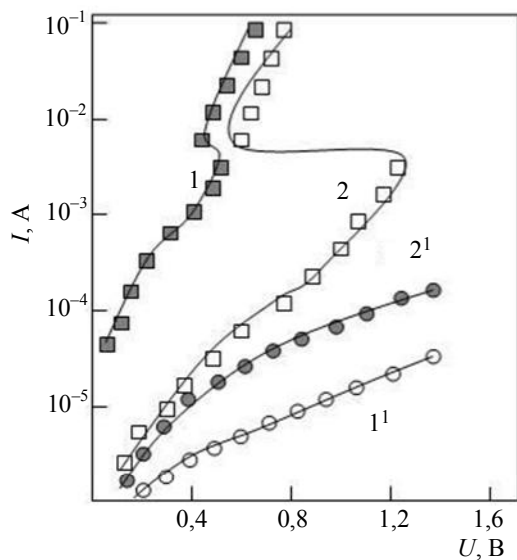


Рис. 1. ВАХ поликристаллических кремниевых p^+-n-n^+ -структур с $p-n$ -переходами, сформированными эпитаксией (кривые 1 и 1') и диффузией (кривые 2 и 2'). Кривые 1 и 2 — прямые ветви ВАХ, кривые 1' и 1' — обратные

Наблюдаемый эффект обусловлен, очевидно, следующим: в пленочных ПК-структурах $p-n$ -переход шунтируется дополнительным n^+ -каналом, образующимся 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 бора в кремнии в 2—3 раза выше, чем у фосфора [3] и, во-вторых, коэффициент диффузии фосфора по ГЗ в 3,5—3,8 раз превышает значение, характерное для объема, т. е. внутри зерна [4].

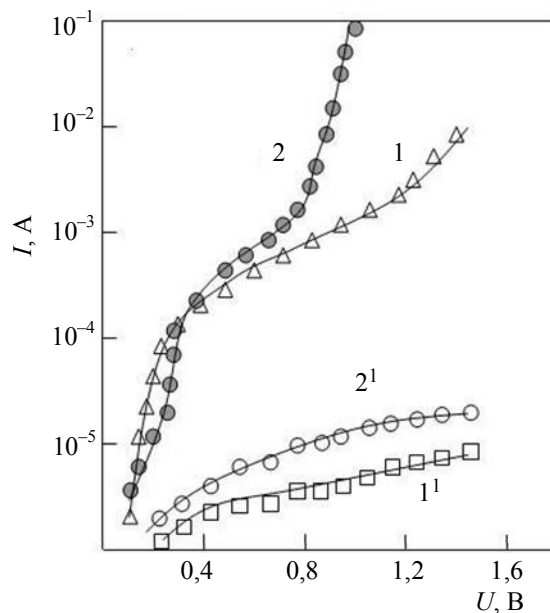


Рис. 2. ВАХ p^+-n-n^+ -структур с ионно-имплантированным $p-n$ -переходом. Кривые 1 и 2 — прямые ветви ВАХ, кривые 1' и 2' — обратные

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 ПК 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 роста проводимости n -слоя с увеличением тока.

В результате на ВАХ исследуемой структуры образуется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением в прямом направлении смещения.

Известны различные модели возникновения S -образной ВАХ диодных структур [6], большинство из которых объясняет этот эффект увеличением времени жизни инжектированных носителей заряда в компенсированном глубокими примесями центрами полупроводнике. Предполагалось, что и в исследуемых структурах имела место

диффузия примесей, дающих глубокие уровни из n^+ -подложки в n -слой, поэтому авторами проводились измерения ВЕХ структур в диапазоне температур 77—300 К.

Результаты указали на отсутствие или, по крайней мере, незначительную концентрацию глубоких примесных центров ($N_T \leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Обнаруженный непрерывный спектр уровней в интервале энергии $E_c - E = -0,2$ 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 пленочных ПК-структурах. Однако основной причиной возникновения S -образной ВАХ, по мнению авторов, являются шунтирующие p - n -переход каналы вдоль ГЗ [7].

Подтверждением правомочности предложенного механизма являются результаты измерений пленочных ПК p^+-n-n^+ -структур с ионно-имплантированным p - n -переходом, которые намеренно подвергали длительному отжигу при $T = 800$ °С. Как видно из графика на рис. 3, на прямых ветвях ВАХ p - n -перехода образуется n -канал, шунтирующий p - n -переход, а S -образная ВАХ наблюдается почти на всех ионно-имплантированных образцах (кривые 3 и 4). Данный p - n -переход получался ионным внедрением бора с энергией $E = 75$ КэВ и дозой $D = 10^3$ мкКл/см² в $n-n^+$ -структуру и последующей термической обработкой при температуре $T_{отж} = 800$ °С с длительностью отжига более 60 мин.

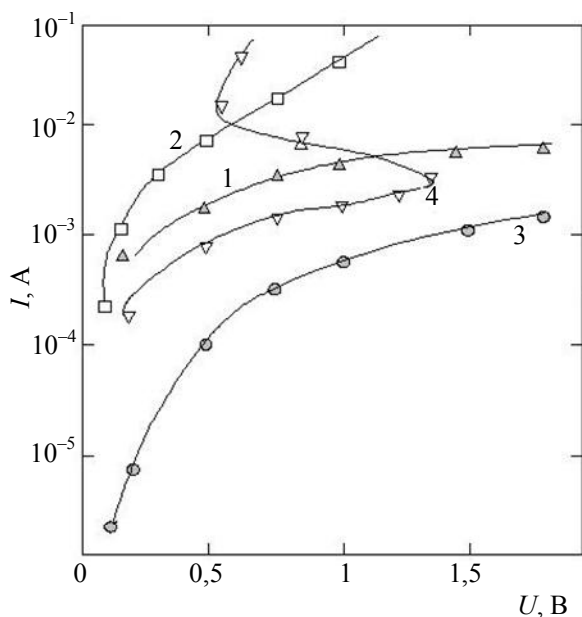


Рис. 3. Прямые ветви ВАХ p - n -перехода, полученного ионным внедрением бора с энергией $E = 75$ кэВ и дозой $D = 10^3$ мкКл/см² в $n-n^+$ -структуру. $T_{отж} = 800$ °С. Длительность отжига: 1 — без отжига; 2 — 5 мин; 3 — 60 мин; 4 — 120 мин

В поддержку предложенного механизма можно привести и факт отсутствия S -образных ВАХ у образцов малого размера (≤ 1 мкм), в которых ГЗ по микроскопическим наблюдениям либо отсутствуют, либо имеют малую плотность.

С применением методики анализа ВАХ в области объемного заряда, описанной в [8], на исследуемых структурах оценивали эффективную скорость поверхностной рекомбинации $S_{эф}$ носителей заряда. Так, на структурах с p - n -переходом, сформированным методом выращивания пленок с разнотипной проводимостью, значение $S_{эф}$ составляло до $5 \cdot 10^4$ см/с, а на диффузионных структурах $\sim 10^3$ см/с. Более высокое значение $S_{эф}$ у структур с p - n -переходом, сформированным осаждением из газовой фазы, связано, видимо, с более высокой степенью заполнения ПС электронами. Это вызвано, соответственно, более высокой температурой операции создания p - n -перехода. На структурах с ионно-имплантированным p - n -переходом $S_{эф}$ составляет до отжига радиационных дефектов величину $2,7 \cdot 10^4$ см/с и после отжига — $5 \cdot 10^2$ см/с. Очевидно, что высокое значение $S_{эф}$ и появление сублинейного участка ВАХ до отжига у этих структур обусловлено именно введением в объем зерна радиационных дефектов на стадии ионной имплантации.

Заключение

Полученные результаты позволяют считать, что для снижения влияния ГЗ на перенос носителей заряда в пленочных ПК-структурах целесообразно формировать p - n -переходы в них ионным легированием с последующим кратковременным отжигом дефектов. Эти результаты указывают также на возможность создания на основе ПК-структур полупроводниковых приборов с S -образной ВАХ, в технологии которых целесообразно применять сочетание термообработок с ионным легированием 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 и т. п.

Литература

1. Абакумов А. А., Карагеогий-Алкалаев П. М., Каримова И. З. // В кн. "Физические явления в полупроводниковых структурах с глубокими уровнями и оптоэлектроника". — Т.: Фан, 1977. С. 3—23.

2. Мўминов Р. А., Ахмедов Ф. А., Қасимова Т. М. // Гелиотехника. 1985. № 1. С. 67.

3. Георгиев В. К. и др. // Поверхность. 1990. № 9. С. 5.

4. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов/Пер. с англ. — М.: Энергия, 1973.

5. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Советское радио, 1980.

6. Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Стафеев В. И. // ФТП. 2008. Т. 42. № 1. С. 113.

7. Алиев Р. // ФТП. 1997. Т. 31. № 4. С. 425.

8. Саидов М. С., Абдурахманов Б. М., Кондратьев А. Н. // Гелиотехника. 1984. № 1. С. 54.

Particularities of forming the p - n -structures in the film polycrystalline silicon

R. Aliev, E. Mukhtarov

Andijan State University, 129 University str., Andijan, 710000, Uzbekistan

E-mail: alievuz@yahoo.com

The volt-ampere characteristics of the structures with p - n junction were investigated. These structures have been formed by means of growing the p -type conductivity films, thermal diffusion and ion implantation of boron atoms into the n -type polycrystalline silicon layers. The S-form of volt-ampere characteristics was revealed for the investigated structures. This effect is determined by changing the conductivities of the base and grain boundaries under thermal processing.

PACS: 85.30.-z

Keywords: volt-ampere characteristic, polycrystalline silicon, film, p - n -structures.

Bibliography — 8 references.

Received June 22, 2009

* * *