

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В
МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ ПЛЕНОЧНЫХ
СТРУКТУР С P–N-ПЕРЕХОДОМ НА
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КРЕМНИЕВОЙ
ОСНОВЕ**

РАЙИМЖОН АЛИЕВ, Д.Т.Н.,
ЭРКИН МУХТАРОВ

Андижанский Государственный
Университет, Узбекистан

Title: USE PROSPECTS IN MICROELECTRONICS FOR POLYCRYSTALLINE SILICON FILM STRUCTURES WITH p–n JUNCTION

UDC: 621.592

Key words: Polycrystalline silicon, grain boundaries, ion-implantation, microelectronics, negative differential resistance, photodiode, I-V characteristics

Annotation: The paper discusses perspectives of elaborating microelectronic and optoelectronic devices on polycrystalline silicon films. The I-V features of structures with p-n-junction, formed by using methods of p-type conductivity layer grow, thermal diffusion and ion-implantation of boron atoms into n-type polycrystalline silicon layer are compared. The I-V feature with S-form curve of the investigated structures conditioned by changing of the conductivities of base and grain boundaries under thermal processing are revealed.

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 влияющими на процессы переноса носителей заряда в приборных структурах факторами 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 условиями высокотемпературных операций, что является основной целью данной работы.

Рассмотрим результатов экспериментального анализа процессов переноса носителей заряда в структурах, полученных на основе p⁺- и n⁺-пленок ПК. Базовый n-слой с удельным сопротивлением $\rho \sim 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и толщиной 40 мкм был получен водородным восстановлением тетрахлорида кремния при температуре $T=1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в вертикальном реакторе на n⁺-подложках из металлургического кремния (Абакумов и др., 1977) с удельным сопротивлением $\rho \sim 0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Размеры зерен в поликристаллической подложке

составляли $>300 \text{ мкм}$, 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 тремя способами: - осаждением из газовой фазы p⁺-слоя толщиной $\sim 2 \text{ мкм}$ при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$; - термодиффузией атомов бора на глубину $0,5 \div 1,5 \text{ мкм}$ при температуре $1100 \text{ }^\circ\text{C}$; - ионной имплантацией атомов бора с энергией 75 кэВ с последующим отжигом при $800 \text{ }^\circ\text{C}$, что давало конечную глубину залегания p–n-перехода на уровне $0,75 \text{ мкм}$.

Уровень легирования p⁺-слоя во всех случаях обеспечивался примерно одинаковым и контролировался поверхностным сопротивлением $R_0 \sim 50 \pm 5 \text{ Ом/кв.см}$. На полученных структурах с размерами $5 \times 5, 2 \times 2, 1 \times 1 \text{ мм}^2$ в идентичных условиях формировали омические контакты к n⁺- и p⁺-областям и проводили термостатированные измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-емкостных характеристик (ВЕХ) на частоте $f = 100 \text{ кГц}$. Темновые ВАХ p⁺- n⁺-структур площадью $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с p–n-переходами, изготовленными эпитаксией и диффузией, приведены на Рисунке 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 (Рисунок 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⁺-структурах с n-базой, где осуществлена компенсация глубокими примесями (Муминов и др., 1985).

РИСУНОК 1. ВАХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕМНИЕВЫХ P^+-N-N^+ -СТРУКТУР С $P-N$ -ПЕРЕХОДАМИ, СФОРМИРОВАННЫМИ ЭПИТАКСИЕЙ (КРИВЫЕ 1 И 1^1) И ДИФфуЗИЕЙ (КРИВЫЕ 2 И 2^1). КРИВЫЕ 1 И 2 - ПРЯМЫЕ ВЕТВИ ВАХ, КРИВЫЕ 1 И 1^1 - ОБРАТНЫЕ

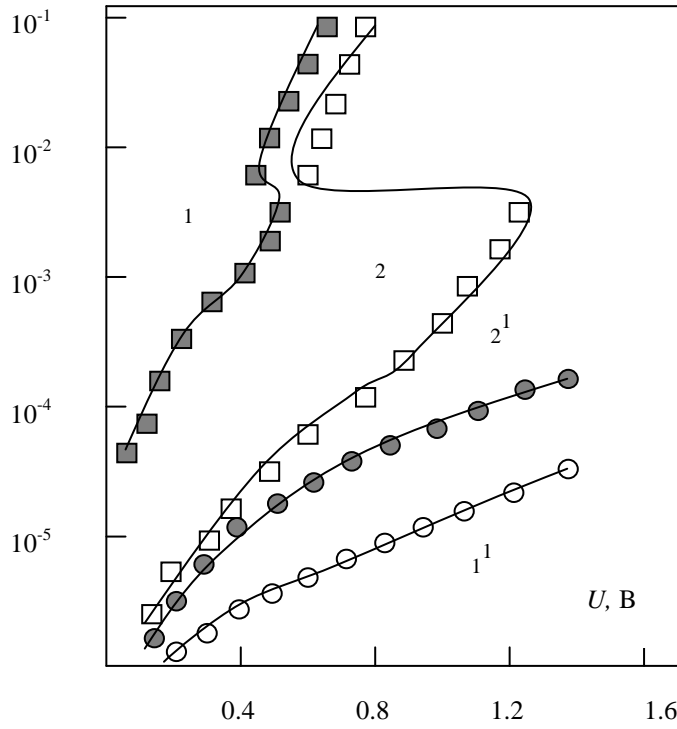
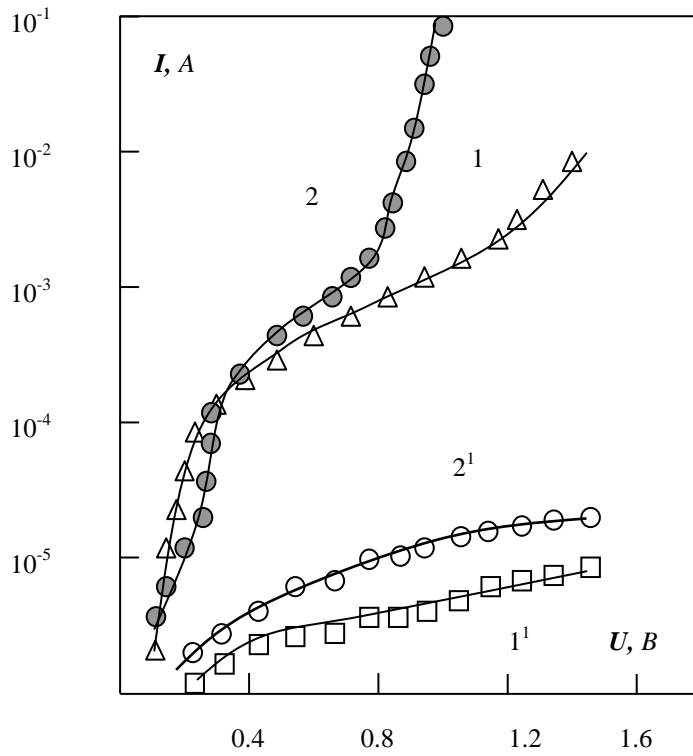


РИСУНОК 2. ВАХ P^+-N-N^+ -СТРУКТУР С ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫМ $P-N$ -ПЕРЕХОДОМ. КРИВЫЕ 1 И 2 - ПРЯМЫЕ ВЕТВИ ВАХ, КРИВЫЕ 1^1 И 2^1 - ОБРАТНЫЕ



В нашем случае сублинейная ВАХ преобразуется в S-образную характеристику с напряжениями срыва, лежащими для большой группы образцов (из 1200 штук) в пределах $0,65 \div 1,2$ В. Наблюдаемый эффект обусловлен, очевидно, следующим: в пленочных ПК структурах p-n-переход шунтируется дополнительным p⁺-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 раз выше, чем у фосфора (Георгиев и др., 1990), и, во-вторых, коэффициент диффузии фосфора по ГЗ в 3,5÷3,8 раз превышает значение, характерное для объема, т.е. внутри зерна (Зи, 1973).

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 (Викулин и Стафеев, 1980), а дифференциальное сопротивление p-n перехода возрастает.

С ростом общего тока через ПК p⁺-n-p⁺-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 (ОДС) в прямом направлении смещения.

Известны различные модели возникновения S-образной ВАХ диодных структур (Викулин и др., 2008), основная из которых объясняет этот эффект увеличением времени жизни инжектированных носителей заряда в компенсированном глубокими примесными центрами полупроводнике. Предполагалась, что и в исследуемых структурах имела место диффузия примесей, дающих глубокие уровни, из p⁺-подложки в n-слой. Поэтому нами проводились измерения ВЕХ структур в диапазоне температур 77÷300 К.

Результаты указали на отсутствие или по крайней мере незначительную концентрацию глубоких примесных центров ($N_I \leq 10^{12}$ см⁻³). Обнаруженный непрерывный спектр уровней в

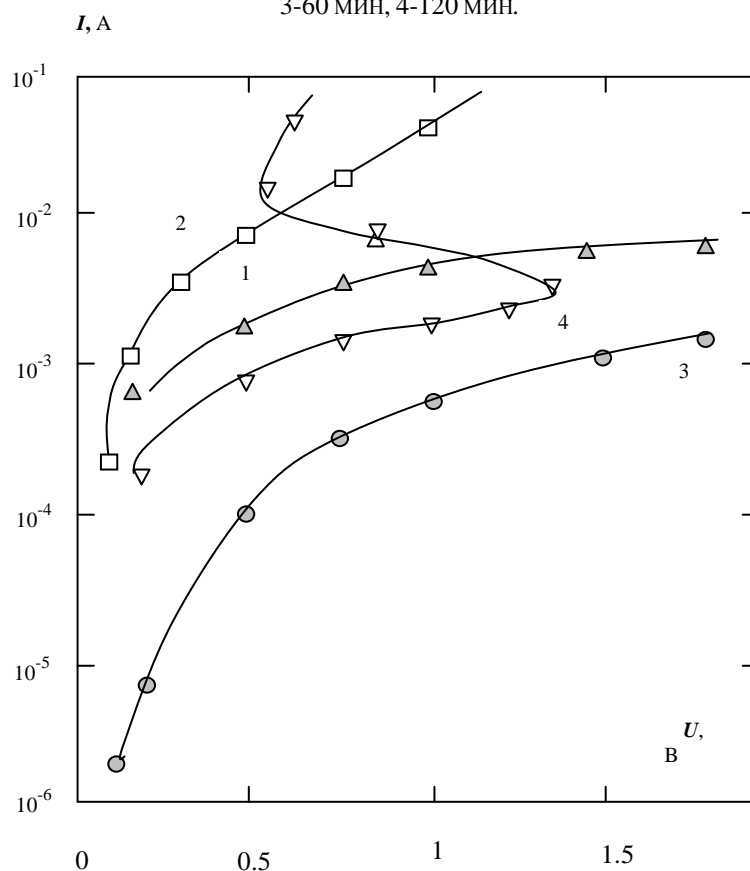
интервале энергии $E_C - E = -0,2$ эВ, связанный наряду с примесными уровнями и с ПС на ГЗ и комплексами дефектов на них, безусловно указывает на их возможный вклад в формирование механизма переноса носителей заряда в пленочных ПК структурах. Однако основной причиной возникновения S-образной ВАХ, по нашему мнению, является шунтирующие p-n-переход каналы вдоль ГЗ (Алиев, 1997).

Подтверждением правомочности предложенного механизма являются результаты измерений пленочных ПК p⁺-n-p⁺-структур с ионно-имплантированным p-n-переходом, которые намеренно подвергали длительному отжигу при $T = 800$ °С. Как видно из графика (Рисунок 3), на прямых ветвях ВАХ p-n-перехода, полученного ионным внедрением бора с энергией $E = 75$ КэВ и дозой $D = 10^3$ мкКл/см² в p-n⁺-структуру и последовательной термической обработки при температуре $T_{отж} = 800$ °С с длительностью отжига ≥ 60 мин (кривые 3 и 4) 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 (≤ 1 мкм), в которых ГЗ по микроскопическим наблюдениям либо отсутствуют, либо имеют малую плотность.

С применением методики анализа ВАХ в области объемного заряда, 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 5×10^4 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 с более высокой степенью заполнения ПС электронами, что 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 $2,7 \times 10^4$ см/с и после отжига 5×10^2 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 операции ионной имплантации.

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.

РИСУНОК 3. ПРЯМЫЕ ВЕТВИ ВАХ P-N ПЕРЕХОДА, ПОЛУЧЕННОГО ИОННЫМ
ВНЕДРЕНИЕМ БОРА С ЭНЕРГИЕЙ $E=75$ КЭВ И ДОЗОЙ $D=103$ МККЛ/СМ² В N-N+
СТРУКТУРУ. ТОТЖ = 800 0С; ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ОТЖИГА: 1-БЕЗ ОТЖИГА, 2-5 МИН,
3-60 МИН, 4-120 МИН.



Полученные 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

- Абакумов, А., Карагеоргий-Алкалаев, П., Каримова, И., 1977. В кн. «Физические явления в полупроводниковых структурах с глубокими уровнями и оптоэлектроника», Ташкент, Фан, С. 3-23.
- Алиев, Р., 1997. «Инжекционное усиление фототока в поликристаллических кремниевых p^+-n-n^+ структурах», Физика и

Техника Полупроводников, 1997, т. 31, N.4.С. 425-426.

Викулин, И., Стафеев, В., 1980. Физика полупроводниковых приборов, Москва, Советское радио.

Викулин, И., Курмашев, Ш., Стафеев, В., 2008. «Инжекционные фотоприемники», Физика и Техника Полупроводников, т. 42, вып. 1, С. 113-127.

Георгиев, В. и др., 1990. «Межкристаллитные границы и свойства поликристаллического кремния», «Поверхность», N 9, С. 5-21.

Зи, С., 1973. Физика полупроводниковых приборов, Пер. с англ., Москва, Энергия.

Мўминов, Р., Ахмедов, Ф., Касимова, Т., 1985. «К диффузии примесей по границам зерен в поликристаллическом кремнии», «Гелиотехника», № 1, С. 67-69.