

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛОКАЛЬНЫХ ДИСЛОКАЦИОННЫХ СТРУКТУР

О.А. АГЕЕВ, А.Ш. МЕХТИЕВ, Н.М. МУРАДОВ

*Азербайджанское Национальное Аэрокосмическое Агентство
370106, Баку, пр. Азадлыг, 159*

В.В. ПЕТРОВ, М.О. ПОХОДИЙ

*Таганрогский Государственный Радиотехнический Университет,
пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А, Таганрог, Ростовская обл., Россия*

В работе рассматриваются вопросы, связанные с формированием локальных разупорядоченных структур и подтверждением их дислокационной природы.

Выполнена оценка влияния режимов обработки на структуру локальных дислокационных структур (ЛДС).

Проведенный анализ закономерностей пластической деформации в кремниевой подложке позволил разработать методику, с помощью которой были определены электрофизические параметры ЛДС.

До последнего времени развитие микроэлектронной технологии шло по пути получения и использования в ИС полупроводниковых материалов, содержащих минимальную концентрацию дефектов и дислокаций, что обеспечивало максимальную стабильность и надежность параметров.

Однако в последнее время заметно возрос интерес к изучению свойств дефектных структур. С одной стороны это обусловлено тем, что исследование таких структур дает возможность расширить существующие представления о физических механизмах протекающих в них процессов. С другой стороны, сложность и многообразие явлений и эффектов в этих структурах позволяют создавать на их основе активные приборы и, тем самым, увеличивать функциональные возможности единицы объема микроэлектронных устройств.

Особый интерес с этой точки зрения представляют структуры, содержащие локальные дислокационные или дефектные области, чередующиеся с бездислокационными участками, содержащими минимальное количество дефектов. Использование таких структур позволяет получать функциональное устройство на дислокационной части структуры и схему обработки и усиления сигнала на ее бездислокационных участках. Немаловажным фактором при этом является повышенная радиационная стойкость неупорядоченных структур.

Ограничения в использовании таких структур связаны с возможностью их получения по приемлемому технологическому маршруту и с воспроизводимостью характеристик. Условно воспроизводимости результатов, прежде всего, отвечают линейные несовершенства монокристалла – дислокации, вследствие их весьма большой стабильности, а также значительного влияния на электрические свойства в объеме кристалла.

В качестве способов получения локальных дислокационных структур (ЛДС) ранее использовались методы трехточечного изгиба и локальной пластической деформации с помощью индентора. Основным недостатком этих способов введения дислокаций в полупроводниковый кристалл является их несовместимость со стандартным технологическим процессом изготовления полу-

проводниковых интегральных схем. Новым методом, позволяющим получить локальные дислокационные структуры и не имеющим указанного выше недостатка, является метод быстрой термической обработки (БТО), локально окисленных кремниевых пластин.

Сущность технологии формирования ЛДС с помощью БТО заключается в следующем. При быстрой термической обработке системы пленка SiO_2 -подложка, из-за несоответствия физических характеристик материалов (температурный коэффициент линейного расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона) и наличия температурного градиента в системе возникают термоупругие напряжения. Кроме того, неровности поверхности пленки (края, ступеньки, места изгибов) являются концентраторами механических напряжений. Механические напряжения в подложке релаксируют с образованием дислокаций в случае превышения предела пластичности [1]. Таким образом, изменяя режимы БТО локально маскированных подложек, можно воздействовать на параметры ЛДС (плотность дислокаций, локализацию).

Для формирования ЛДС использовались кремниевые пластины КЭФ-4,5 ориентации (100) со слоем термического окисла толщиной 0,5 мкм, в котором с помощью фотолитографии был создан набор тестовых ячеек. Их топология, привязанная к кристаллографическим направлениям на поверхности пластины, схематически изображена на рис. 1.

После этого методом БТО на установке ИТО-18МВ [2] были сформированы локальные дефектные структуры. Термическая обработка проводилась в различных режимах при температуре БТО 800–1300 °С.

Детальные исследования проводились на элементах тестовой ячейки 4 и 10 (300x90 мкм² и 290x90 мкм² соответственно), исходя из следующих соображений: геометрические размеры структур должны быть одинаковыми и структуры должны быть расположены взаимноперпендикулярно. Остальные элементы тестовой ячейки использовались для изучения влияния ориентации элемента, его геометрических размеров и формы на плотность дислокаций с помощью металлографии.

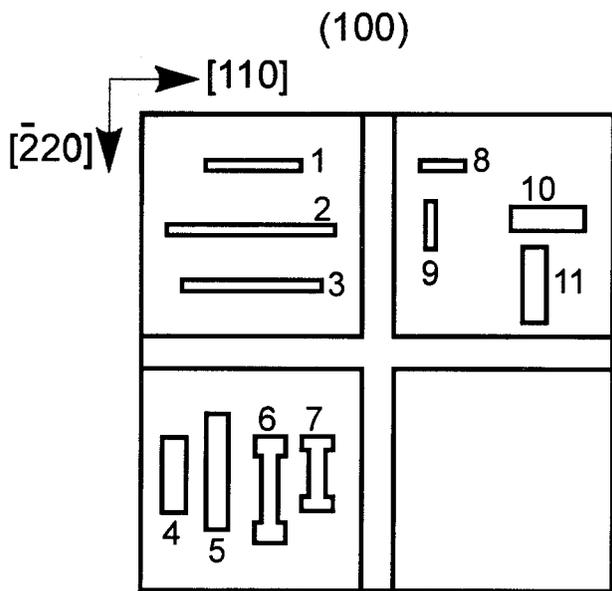


Рис. 1. Топология тестовой ячейки.

Вольт-амперные характеристики ЛДС измерялись с помощью прижимных вольфрамовых зондов на установке, позволяющей изменять температуру в диапазоне (+20 – +100) °С.

С помощью метода металлографии было установлено, что плотность дислокаций возрастает с увеличением температуры обработки, однако, одновременно с этим увеличивается их расползание в области, покрытые окисной пленкой. С этой точки зрения оптимальным является режим БТО $T=1000$ °С, поскольку именно этот режим позволяет получить наибольшую плотность дислокаций $2 \cdot 10^7$ см⁻² при локализации их строго в окнах пленки окисла. Именно образцы, прошедшие обработку по этому режиму, и исследовались в дальнейшем.

Измеренные при комнатной температуре вольт-амперные характеристики структур 4 и 10, подвергнутых БТО по оптимальному режиму, представлены на рис. 2.

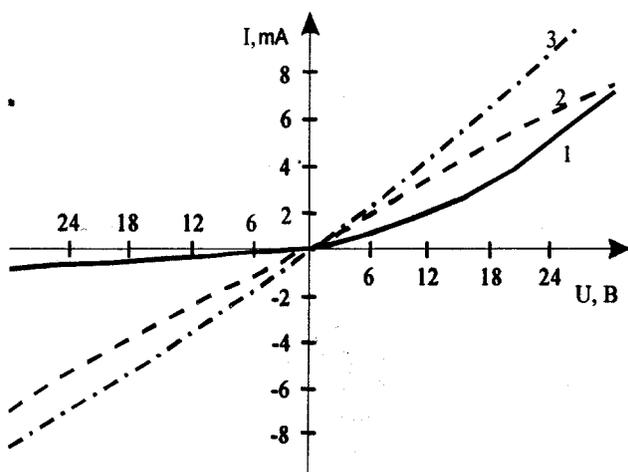


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структур 4 и 10: 1 – структура 4; 2 – структура 10; 3 – ВАХ бездислокационного кремния КЭФ-4,5.

ВАХ структуры 4 имеет барьерный характер, а ВАХ структуры 10 – омический характер. При этом сопротивление структур 4 и 10 выше, чем у бездислокационного кремния, что говорит о захвате основных носителей заряда и акцепторном действии структурных несовершенств.

Это подтверждает предположение о дислокационной природе дефектов, вводимых с помощью БТО, и согласуется с известными представлениями [3,4] об анизотропии проводимости при наличии в кристалле преимущественно ориентированных дислокаций.

Известно, что кремний обладает анизотропией свойств, и дефекты дислокационного типа расположены в кристаллографической плоскости (111) в кристаллографическом направлении $\langle 110 \rangle$ [4]. Это, в сочетании с ориентацией плоскости кремниевой пластины – (100), и кристаллографическими направлениями длинных граней тестовых структур ($[110]$ и $[\bar{2}20]$), позволяет сделать вывод, что дислокации присутствуют в объеме ЛДС в виде полупетель разного диаметра, лежащих преимущественно в плоскости (111). Особенности формирования таких дислокационных конфигураций подробно рассмотрены в [5].

Таким образом, анализ кристаллической структуры ЛДС позволяет предположить, что они представляют собой квазиполикристаллические локальные области, или области с набором барьеров, сформированных преимущественно 60° дислокациями [4].

Используя это предположение, для анализа ВАХ структуры 4, линии тока в которой направлены преимущественно поперек дислокационных трубок, применялась методика, изложенная в [6,7], что позволило определить ряд электрофизических параметров ЛДС.

Методика основана на анализе ВАХ набора бикристаллов с барьерными слоями типа Шоттки, обусловленных полным заполнением акцепторных ловушечных состояний на границах зерен. Теоретическая ВАХ такой структуры предполагает наличие двух областей: линейной ($qU < xkT$) и экспоненциальной ($qU \geq xkT$), где x – число барьерных слоев. Причем экспоненциальная зависимость наблюдается в координатах

$$\ln(I/(1 - 4a^2U^2)) = f(U - aU^2), \text{ где } a = \frac{q}{8\phi_0x},$$

а ϕ_0 – высота потенциального барьера границы зерен.

Анализ экспериментальной ВАХ элемента 4 по приведенной методике позволил определить значение высоты барьера, вносимого дислокацией, которое оказалось равным $9,7 \cdot 10^{-3}$ эВ, что хорошо согласуется с результатом, полученным в [5].

Для оценки плотности пограничных состояний на барьерах N_s и концентрации основных носителей заряда в объеме ЛДС N_D в [8] предлагается использовать независимые значения подвижности основных носителей заряда μ , в объеме ЛДС. Полагая $\mu = 1450$ см²·В⁻¹·с⁻¹ [5] получаем $N_s = 5 \cdot 10^9$ см⁻², $N_D = 2,8 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Поскольку в исходном кремнии $N_D = 3 \cdot 10^{15}$ см⁻³, то полученные значения явно указывают на обеднение объема ЛДС основными носителями заряда за счет их захвата на пограничные состояния, плотность которых велика.

Оценка тока насыщения ($\approx 9 \cdot 10^{-6}$ А) и проводимости в омической области ВАХ ($\approx 2 \cdot 10^{-4}$ см) указывает на шунтирование ЛДС объемом кремниевой подложки.

Проводя дальнейший анализ, можно определить степень заполнения f , энергетический уровень, вносимый дислокациями в запрещенную зону кремния E_D и скорость рекомбинации носителей V_F [5]. Эти значения

составили $f = 1,5 \cdot 10^{-2}$, $E_D = 0,39$ эВ, $V_P = 8 \cdot 10^4$ см/с, и полностью коррелируют с приведенными в [5].

Оценка тока насыщения ($\approx 0,5$ мА) и проводимости в омической области ВАХ ($\approx 0,02$ Ом $^{-1}$) указывает на шунтирование ЛДС объемом кремниевой подложки.

Таким образом, расчет и анализ фундаментальных физических параметров ЛДС подтверждает их дислокационную природу, и полностью согласуется с существующей

теорией заряженных дислокаций в полупроводниковых кристаллах [8].

Из отношения сопротивлений взаимно-перпендикулярных структур можно оценить плотность дислокаций [3] в ЛДС: она составила $3,34 \cdot 10^7$ см $^{-2}$, что согласуется с данными металлографических исследований.

Температурная зависимость проводимости структур 4 и 10 (рис.3) обнаруживает рост проводимости с увеличением температуры, что связано с наличием глубоких уровней захвата в запрещенной зоне кремния [4]. В бездислокационном кремнии для исходной пластины КЭФ-4,5 с ростом температуры в этом интервале должно наблюдаться снижение проводимости, связанное с уменьшением подвижности при рассеянии на фонах решетки [4].

Расчет энергии активации уровней захвата по наклону

зависимости $\ln \sigma = f \left(\frac{1}{T} \right)$ дал значение 0,4 эВ, что

соответствует полученному ранее из анализа ВАХ.

Освещение локальных дислокационных областей белым светом приводит к незначительному увеличению тока при прямом смещении (на $\sim 3\%$), а при обратном смещении величина тока либо остается неизменной, либо уменьшается (на $\sim 2\%$). Это также подтверждает наличие барьерных слоев в ЛДС и глубоких уровней захвата, которые, заполняясь генерируемыми светом носителями тока, повышают величину барьера, снижая тем самым обратный ток [6].

Проведенные исследования полностью подтвердили дислокационную природу вводимых дефектов (анизотропия проводимости, барьерный характер вольт-амперных характеристик, аномальная температурная зависимость проводимости, значения фундаментальных параметров ЛДС). Это позволяет утверждать, что отработана технология получения локальных дислокационных структур, которая максимально совместима со стандартной микроэлектронной технологией и позволяет формировать ЛДС с необходимой конфигурацией и параметрами.

Благодаря этому, локальные дислокационные структуры могут быть использованы в технологии ИС как боковая изоляция элементов, радиационно-стойкие сопротивления, сенсоры различных неэлектрических величин, границы с повышенной скоростью рекомбинации, в качестве областей для локального геттерирования точечных дефектов из рабочих структур ИС и т. д., что может значительно повысить функциональные возможности ИМС.

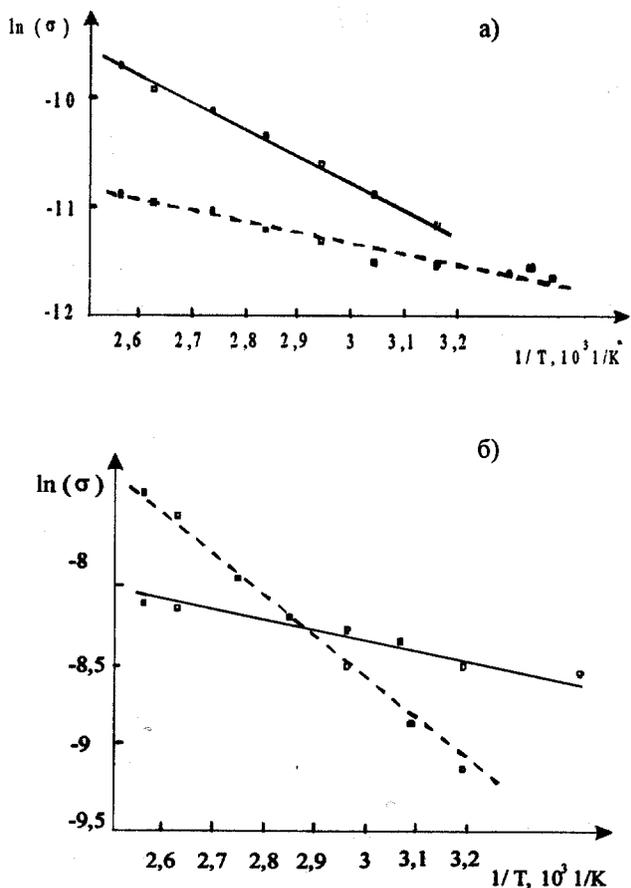


Рис.3. Зависимость проводимости ЛДС от температуры (сплошная линия – при положительном смещении; пунктирная – при отрицательном смещении): а) для структуры 4; б) для структуры 10.

- [1] J. Vanhellemont, S. Amelinckx, C. Claeys. J. Appl. Phys., 1987, v. 61, № 6, p. 2170–2188.
- [2] А.М. Светличный, Д.А. Сеченов, В.М. Бурштейн, П.В.Воронцов, В.В.Поляков, С.И. Соловьев, О.А. Агеев. Электронная промышленность, № 3, 1991, с. 6-7.
- [3] К. Рейви. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М.: "Мир", 1984, с. 475.
- [4] Г. Матаре. Электроника дефектов в полупроводниках. М.: "Мир", 1974, с.464.
- [5] С.А. Шевченко. ЖЭТФ, 1971, т.61, в.6(1), с.2330–2336.
- [6] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан. ФТП, 1976, т. 10, № 10, с. 1839–1845.
- [7] Е.И. Гольдман, И.Б. Гуляев, А.Г. Ждан, В.Б. Сандомирский. ФТП, 1976, т. 10, № 11, с. 2089–2092.
- [8] В.Б. Шикин, Ю.В. Шикина. УФН, 1996, т. 165, №6, с. 887–917.

O.A. Aqeyev, A.Ş. Mehdiyev, N.M. Muradov, V.V. Petrov, M.O. Poxodi

LOKAL DİSLOKASIYA STRUKTURLARININ ELEKTROFİZİKİ XASSƏLƏRİNİN TƏDQIQI

İşdə lokal nizamsız strukturların, onların dislokasiya təbiətinin təsdiqi ilə formalaşması məsələlərinə baxılır.

Lokal dislokasiya strukturlarının (LDS) strukturuna işlənmə rejiminin tə'siri qiymətləndirilmişdir.

Silisium təbəqələrində plastik deformasiyanın qanunauyğunlaşdırılmış analizi, metodika hazırlamağa imkan vermişdir ki, bunun da sayəsində LDS-nin elektrofiziki parametrləri tə'yin edilmişdir.

O.A. Ageyev, A.Sh. Mekhtiev, N.M. Muradov, V.V. Petrov, M.O. Pokhodi

INVESTIGATION OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF THE LOCAL DISLOCATION STRUCTURES

In this article the problems connected with formation the local defects structures and confirmation their dislocations nature are considered.

The evaluation of influence of modes of processing on a structure of local dislocations structures (LDS) is executed.

The conducted analysis of regularities of plastic deformation in a silicon substrate has been allowed to apply to the analysis of the volt-ampere characteristics LDS a technique, with the help of which electrophysical parameters LDS have been obtained.

Дата поступления: 25.09.98

Редактор: М.И. Алиев