

¹ доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики, ГВУЗ «ДГПУ»

² доктор физико-математических наук, советник ректора, ГВУЗ «ДГПУ»

e-mail: fiziksgpu@ya.ua

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ p-n-ПЕРЕХОДОВ С ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРЫ

Структурные исследования ковалентных полупроводников, деформированных при низких температурах, показали важную роль вакансий в пластичности приповерхностных слоев. Дислокационные петли, возникающие под действием деформации в области объемного заряда p-n-перехода кремния, значительно снижают время жизни неравновесных носителей заряда, инжектируемых в базу. На вольтамперных характеристиках p-n-перехода с дислокациями обнаруживается резкое возрастание обратного тока.

Ключевые слова: механические напряжения, деформация, германий, кремний, дислокации, релаксация напряжений, p-n-переход

Введение

В процессе изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем пластины полупроводниковых материалов подвергаются различным механическим и термическим воздействиям: шлифовке и полировке, окислению, диффузии примесей, разделению на заготовки, содержащие полупроводниковые структуры. При этом в поверхностных слоях создаются значительные механические напряжения, вследствие чего возникают условия для зарождения дислокаций. В алмазоподобных полупроводниках германия и кремния в интервале низких температур 77–600 К этот процесс реализуется при весьма малых напряжениях порядка $20 \div 100$ МПа [1–4]. Источниками дислокаций могут быть частицы выделений типа SiO_x или GeO_x для кремния и германия соответственно [2], а процесс зарождения дислокаций представляется по механизму Эшби-Джонсона [5]. Среди ряда причин, обуславливающих при низких температурах проявление микропластичности в ковалентных полупроводниках Ge и Si исключительно в приповерхностных слоях, отмечалась возможная роль вакансий [2]. Получены новые результаты структурных исследований, которые подтверждают определенную роль точечных дефектов в процессе зарождения и движения дислокаций и позволяют объяснить физическую природу низкотемпературной микропластичности материалов с

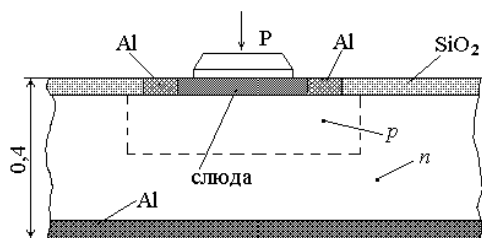


Рис. 1

Рис. 1: Схема деформирования кремниевого $p-n$ -перехода.

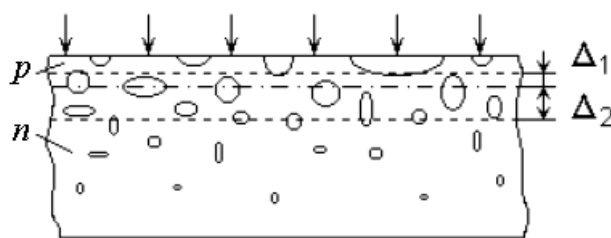


Рис. 2

Рис. 2: Распределение дислокаций под нагружающей площадкой после деформации. С увеличением расстояния от поверхности размеры дислокационных петель уменьшаются. Глубина залегания $p-n$ -перехода составляет ~ 8 мкм.

высоким потенциальным рельефом Пайерлса [3]. В данной работе исследовано влияние линейных дефектов структуры, создающих значительные токи обратно-смещенных $p-n$ -переходов.

Основная часть

Переходы изготовлялись по планарной технологии на основе монокристаллического Si, выращенного методом зонной плавки с удельным сопротивлением $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и малым содержанием кислорода ($< 10^{15} \text{ см}^3$). Выбор такого материала облегчает идентификацию электрических параметров $p-n$ -переходов, содержащих деформационные структурные дефекты. Омические контакты создавались напылением алюминия на подлегированные p^+ и n^+ слои. Деформирование перехода в ступенчатом режиме нагружения осуществлялось через тонкую слюдяную шайбу (рис. 1). Поверхностные утечки исключались окислом SiO_2 . Площадь деформируемой поверхности составляла 18 мм^2 . Деформирование осуществлялось при различных температурах в низкотемпературном интервале $300\text{--}650 \text{ К}$. Глубина залегания $p-n$ -перехода составляла 8 мкм . До и после деформации для каждого объекта определялось время жизни неравновесных дырок, инжектированных в базу, и снимались вольтамперные зависимости обратного тока.

Дислокации в области $p-n$ -перехода (рис. 2) являются эффективными центрами генерации-рекомбинации, поскольку создают в запрещенной зоне глубокие энергетические уровни [10]. Толщина поверхностного слоя, в котором зарождаются дислокации, увеличивается с ростом температуры. После деформации при 77 К время жизни, измеренное методом модуляции проводимости в точечном контакте непосредственно на поверхности, снижается от 250 до $20\div 30 \text{ мксек}$. При температуре 300 К заметное снижение τ_p , найденное из анализа переходных процессов переключения из прямого в обратное включе-

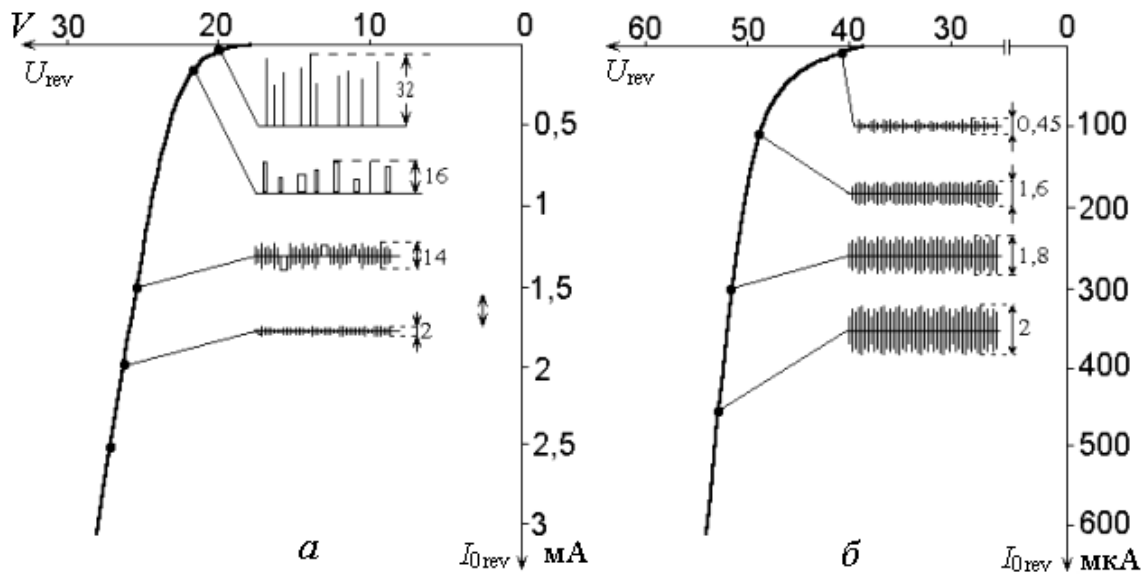


Рис. 3: Вольтамперные характеристики обратного тока опорного диода Д816А (а) и кремниевого p - n -перехода с дислокациями (б). Импульсные и шумовые составляющие обратного тока указаны в микроамперах

ние, наблюдается в p - n -переходах глубиной 2–5 мкм. В данных исследованиях использовались p - n -переходы глубиной ~ 8 мкм и шириной области объемного заряда при отсутствии внешнего напряжения $\Delta_1 + \Delta_2 = 5,5$ мкм. Для них снижение τ_p от 250 мкс до 100 мкс возникало при температуре деформации ≥ 450 К. После введения дислокаций при 650 К на вольтамперных зависимостях p - n -переходов (рис. 3, б) появляется участок резкого возрастания обратного тока. Вид этой кривой подобен характеристике стабилитрона (рис. 3, а). Однако процессы нарастания тока в областях малых его значений существенно различны. Так, начало нарастания тока кремниевого стабилитрона сопровождается дискретными импульсами пробоя микроплазм, связанных с микронеоднородностями кремния в области объемного заряда. (В работе [11] показано, например, что микроплазменные явления могут происходить на частицах SiO_2 , возникающих при распаде пересыщенного твердого раствора кислорода).

Амплитуды импульсов порядка 30–40 мкА, длительность несколько микросекунд, распределение длительности и скважности носит хаотический характер. С увеличением величины обратного тока средняя длительность импульсов возрастает, амплитуда их уменьшается, и при дальнейшем росте постоянной составляющей переменная составляющая в интервале $10^4 - 10^6$ Гц имеет характер «белого» шума с флуктуациями в пределах 2 мкА. В дислокационном p - n -переходе рост тока уже в самом начале сопровождается появлением «белого» шума с очень малым среднеквадратичным значением

тока. Среднеквадратичное значение шумового сигнала затем растет и постепенно достигает приблизительно такого же уровня, как в стабилитроне при постоянной составляющей 2–3 мА.

Выводы

Возникающая при низкотемпературной деформации алмазоподобных кристаллов микропластичность протекает с участием диффузионных процессов. Принципиальным отличием механизма диффузионной микропластичности от обычного дислокационного является тот факт, что для начала пластического течения по первому механизму не требуется, чтобы напряжение превышало какую-либо критическую величину, в то время как для реализации обычного дислокационного скольжения требуется некоторая стартовая величина напряжений.

Созданные в процессе низкотемпературной деформации Si дефекты снижают время жизни неравновесных носителей заряда. Введение дислокаций в область кремниевых *p-n*-переходов вызывает рост обратного тока, что необходимо учитывать при производстве полупроводниковых приборов.

Литература

1. Шоршоров М.Х., Надточий В.А., Нечволод Н.К., Алехин В.П., Калимбет А.З., Вареза В.П. Низкотемпературная деформация в монокристаллах Ge и Si. Монокристаллы тугоплавких и редких металлов, сплавов и соединений. — М.: Инст-т металлургии им. А.А. Байкова, 1992. — 190 с.
2. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. — М.: Наука, 1983. — 280 с.
3. Nadtochiy V., Nechvolod N., Golodenko N. Microplasticity and electrical properties of subsurface layers of diamond - like semiconductors strained at low temperatures // *Functional Materials*. — 2003. — V.10, № 4. — P. 702–706.
4. Nadtochiy V., Zhikcharev I., Golodenko N., Nechvolod N. Structure changes caused by the stress gradient in subsurface layers of germanium single crystals // *Solid State Phenomena*. — 2003. — V.94. — P. 253–256.
5. Ashby M.F., Jonson L. On the generation of dislocations at misfitting particles in a ductile matrices // *Phil. Mag.* — 1969. — V.20, № 167. — P. 1009–1022.
6. Степанов Ю.Н., Алехин В.П., Гуров К.П. Диффузионная релаксация вакансий при циклическом нагружении металлов // *ФММ*. — 1991. — № 4. — С. 42-46.

7. Степанов Ю.Н., Гуров К.П. Влияние циклических нагрузок на дислокационные петли в монокристаллах // Физика и химия обработки материалов. — 1993. — № 5. — С. 107-111.
8. Степанов Ю.Н. Закономерности диффузионно-дислокационных процессов и особенности разрушения кристаллов кремния и германия при высокочастотном механическом воздействии: Дис. ... доктора физ.-мат. наук: М., ИМЕТ им. А. Байкова. — 2002. — 310 с.
9. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. — М.: Мир, 1974. — 464 с.
10. Родес Р.Г. Несовершенства и активные центры в полупроводниках Ge, Si. — М.: Металлургия, 1968. — 371 с.
11. Бабич В.М., Блецкан Н.И., Венгер Е.Ф. Кислород в монокристаллах кремния. — Киев: Интерпресс ЛТД, 1997. — 240 с.

Nadtochiy Viktor A., Nechvolod Nikolay K.

Donbas State Teachers' Training University, Sloviansk, Ukraine.

The electrical properties of silicon p-n-junctions with structural defects

Structural studies of covalent semiconductors, deformed at low temperatures, have shown the important role of vacancies in the surface layers of plasticity. Dislocation loops arising under the influence of the deformation in the space charge region p-n-junction silicon significantly reduces the lifetime of the non-equilibrium carriers injected into the base. In the current-voltage characteristics of the p-n-junction with dislocations observed a sharp increase in the reverse current.

Keywords: *mechanical stress, deformation, germanium, silicon, dislocations, stress relaxation, p-n- junctions.*
