

УДК 537.66

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ КРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЙ, ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

АББАСОВ Ш.М.

Сектор РИ НАН Азербайджана

Среди веществ, обладающих тензоэффектом, особое место принадлежит полупроводниковым материалам. Исследованиями [1-3] установлено, что полупроводниковые тензометры сопротивления обладают целым рядом преимуществ по сравнению с проволочными.

Проводимость твердого кристаллического тела изменяется от деформации из-за увеличения или уменьшения (растяжение, сжатие) межатомных расстояний, приводящего к изменению концентрации и подвижности носителей. Концентрация носителей заряда может стать меньше или больше вследствие изменения ширины энергетических зон кристалла и смещения примесных уровней, что, в свою очередь, ведет к изменению энергии активации носителей заряда и изменению их эффективных масс, входящих в выражения для концентрации носителей.

$$p_0 \approx \sqrt{N_a} \sqrt{\frac{(2\pi m_p^* kT)^{3/2}}{h^3}} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{2kT}\right)$$

$$E_F = -\frac{kT}{2} \ln \frac{2N_c}{N_D} + \frac{E_d + E_C}{2}$$

$$n_0 \approx \sqrt{N_c} \sqrt{\frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{h^2}} \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{2kT}\right)$$

m_n^* и m_p^* - эффективные массы электронов и дырок;

$\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} = N_c$ - эквивалентное число уровней единицы объема

полупроводника в свободной зоне (проводимости), энергия которых приведена к нижнему уровню свободной зоны E_C ; Подвижность носителей заряда меняется из-за уменьшения или увеличения амплитуды колебаний атомов при их сближении или удалении.

Для большинства полупроводников основным является изменение концентрации носителей заряда, определяемое энергией активации. Так как ширина запрещенной зоны может увеличиваться и уменьшаться при сближении атомов, то у различных полупроводников одна и та же деформация может вызывать как увеличение, так и уменьшение проводимости.

Величиной, численно характеризующей изменение удельной проводимости (или удельного электросопротивления) полупроводников при определенном виде деформации, является тензочувствительность, которая представляет собой отношение

$$K = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta L/L},$$

относительного изменения удельного электросопротивления полупроводника к относительной деформации в данном направлении.

Наиболее широко применяемыми полупроводниковыми материалами в тензодатчиках и преобразователях являются германий и кремний, обладающие значительным тензоэффектом [4-6]. Успешное использование тензорезисторов в различных областях науки и техники обуславливает необходимость дальнейшего изучения тензометрических свойств не только германия и кремния, но и твердых растворов германий-кремний, тензометрические свойства которых изучены в [2-3]. Здесь изучены нитевидные монокристаллы Ge-Si. Из работ [2-3] следует, что систематическое исследование твердых растворов Ge-Si не проводилось. Очевидно, для выявления всех преимуществ твердого раствора Ge-Si необходимы дальнейшие исследования в этом направлении.

В настоящей работе исследовались тензометрические свойства монокристалла твердого раствора Ge-Si p-типа, с содержанием 5; 10; 15 ат.% Si.

Были изготовлены тензодатчики из исследуемых кристаллов. Для этого из образца вырезался участок, перпендикулярно либо параллельно оси кристалла [111], и затем производилось нарезание кристалла на пластинки толщиной 200 мкм. Образцы после шлифовки имели толщину 30-40 мкм, а длину 2 мм.

Поскольку предельная деформация полупроводниковых кристаллов возрастает с убывью их диаметра [3-5], а также поверхностные участки несколько повреждаются при резке, образцы травились в плавиковой кислоте. В качестве контактного материала применялась золотая микропроволока, выдержанная заранее в парах сурьмы. Качество контактов проверялось по их вольтамперным характеристикам.

Для исследования использовалась установка, разработанная в [3]. Для определения коэффициента тензочувствительности тензорезистор прикрепляли к упругому элементу, которому задавали известную величину деформации. При этом использовалась зависимость между деформацией и прогибом. Эта зависимость для изгиба определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{Mh}{2EJ} = \frac{h}{2\rho} = \frac{4hy}{l^2 + 4y^2}$$

где l – расстояние между опорами, y – величина прогиба, M – изгибающий момент, h – толщина упругого элемента (балки), E – модуль упругости, J – момент инерции, ρ – радиус кривизны

Зависимость изменения сопротивления от деформации (ε) представлены на рис. 1.

Образцы отличаются базой, что привело к тому, что их градуировочные характеристики не совпадают, хотя они вырезаны из одного и того же образца твердого раствора Ge-Si. В случае, если ось тензорезистора твердого раствора Ge-Si параллельна плоскости (111), коэффициент тензочувствительности равен 0, в отличии от тензорезисторов, ориентированных в направлении (111), когда коэффициент тензочувствительности велик и градуировочные кривые характеризуются линейной зависимостью.

Для исследования механических свойств тензорезисторов, исследуемых в твердых растворах Ge-Si, применялся метод деформации растяжением.

Деформация и напряжение упругой области рассчитывались из формул:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l^2 / 3r} \quad \sigma = \frac{F}{\pi r^3 / 2l}$$

где ε – относительная деформация, σ – напряжение, r – радиус, l – длина образца, δ – стрела пролета.

Таким образом, тензометры из твердого раствора Ge-Si имеют высокий коэффициент тензочувствительности, зависимость изменения сопротивления от изменения деформации в исследуемой области деформаций линейная, отсутствует гистерезис, минимально влияние различных физических факторов на работу

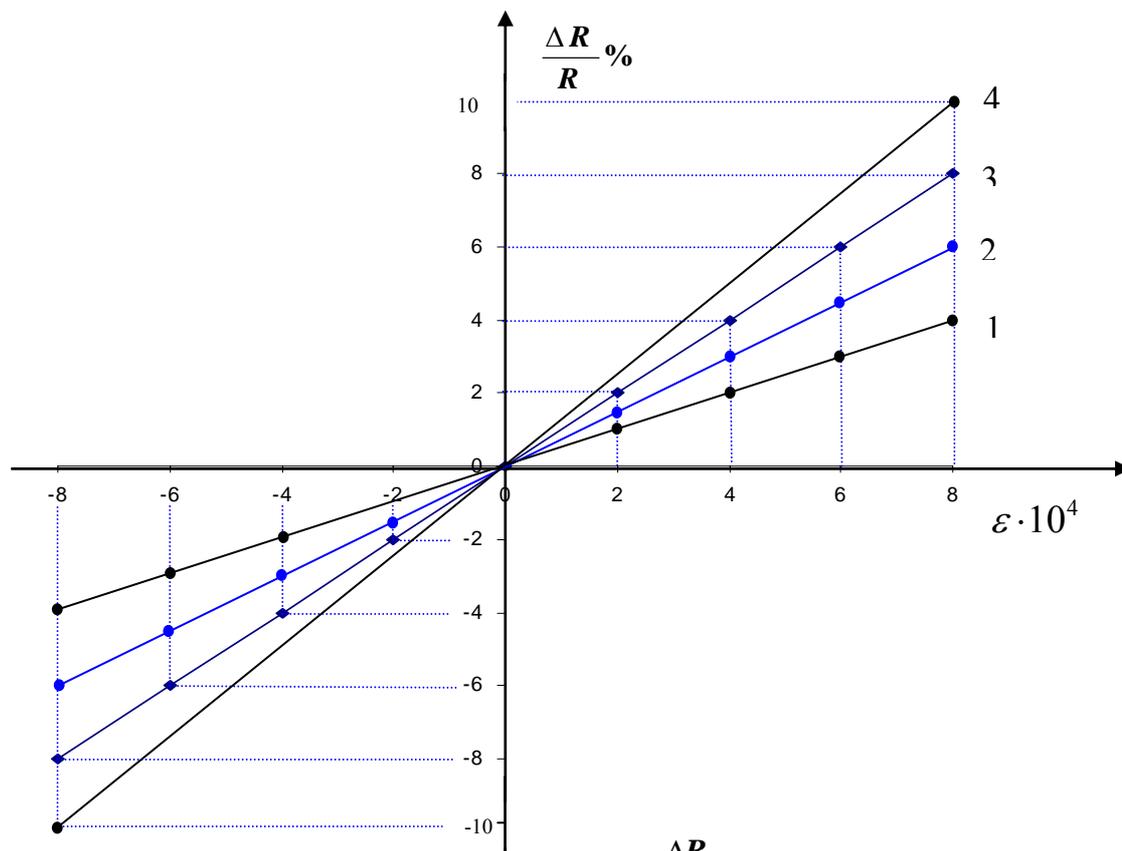


Рис. 1. Зависимость изменения сопротивления ($\frac{\Delta R}{R}$) кристаллов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ от деформации (ϵ), при значениях x : 1-0; 2-0,05; 3-0,10; 4-0,15.

тензометров, поэтому указанные образцы могут быть рекомендованы в качестве тензорезисторов.

Облучение образцов проводилось на линейном ускорителе электронов типа ЭЛУ-6 с номинальной энергией на выходе 4,5МэВ. Ускоритель работал на частоте 50 Гц с длительностью импульса 2,5мсек. При этом средний ток ускоренных электронов, которыми облучался образец, равнялся 2 мкА.

При исследовании характера изменения прочности в зависимости от содержания Si в Ge установлено, что в этих зависимостях наблюдаются две характерные области: сильного разупрочнения и малого изменения механических параметров. При содержании Si до 15 ат. % механическая прочность $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ растет, по сравнению с более высоким содержанием Si и хорошо согласуется с результатами работ [1]. Видно, что при наиболее резких изменениях и выходе на насыщение величин микродефектности при разных дозах хорошо подтверждает вышесказанное, т.е. при дозах $10^{15} \div 10^{16}$ эл/см² доминирующую роль играет аннигиляция дефектов, и при 10^{17} эл/см² процесс аннигиляции и микродефектность насыщаются.

Следует учесть, что в исследуемых кристаллах НК $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ существуют локальные неоднородности с линейными размерами ~ 2 и ~ 12 мкм, которые связаны дислокациями [7]. Установлено, что прочность $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ увеличивается с ростом дозы облучения до 10^{16} эл/см², а при больших ($\sim 10^{17}$ эл/см²) дозах – уменьшается. Характер изменения прочности $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, как показано выше, хорошо объясняется взаимодействием точечных дефектов, созданных облучением со структурными дефектами и дислокациями.

Полученную в экспериментах совокупность результатов по исследованию действия потоков ускоренных электронов на механические свойства на основе $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ представляется возможным объяснить [7] предположение, что под действием потоков ускоренных электронов происходят простейшие нарушения кристаллической

структуры, возникающие при облучении и являющиеся дефектами решетки типа «вакансия». Предполагается, что пустой узел (вакансия) и смещенный атом вводят в запрещенную зону набор энергетических уровней. При наличии в кристалле неконтролируемых примесей происходит образование комплексов. Твердый раствор Ge-Si, в отличие от чистых компонентов, является негомогенным материалом и его можно представить в виде двухфазной системы. Исходя из этих соображений, для объяснения радиационных эффектов в $Ge_{1-x}Si_x$ предложена модель, базирующаяся на представлениях о структурных неоднородностях твердых растворов, состоящих из областей, обогащенных либо кремнием, либо германием. Граница раздела между этими областями служит эффективным стоком для междоузельных атомов, образующихся в результате облучения. Интенсивное их поглощение и обогащение объема свободными вакансиями определяет особенности радиационных процессов в $Ge_{1-x}Si_x$ и в приборах на их основе.

1. Сандулова А.В., Богоявленский П.С., Дронюк М.М. Получение из газовой фазы монокристаллов. Докл. АН СССР, 1963, т.153, № 2, с.380.
2. Сб. Полупроводниковые тензодатчики под ред. М. Дика, Москва «Энергия» 1965 г.
3. Колтаков Б.К., Вандышев Б.А., Савицкий. Труды метрологических институтов СССР, Москва. 1974. в.156, 216 с.
4. Аббасов Ш.М., Аббасов Ш.И., Климовская А.И., Байцар Р.И., Островский П.И., Красножонов Е.П. Формы роста нитевидных кристаллов Ge-Si n-типа, полученных методом химических транспортных реакций. Изв. НАН Азерб. Респ. Баку Изд. «Эльм» 2000 г. т.20. № 2, с.117-121.
5. Akhromenko Yu.G., Baitsar R.I., Krasnozhenov E.P. Physical basis of operation of vibro-frequency tensotransformers based on thread-like crystals. Phys. electronika. – Lvov. 1985. Vip 31.
6. Kerimov M.K., Abbasov Sh.M., Abbasov Sh.I. Radiation stable electromechanical transformers on the basis of thread-like monocrystals $Ge_{1-x}Si_x$. J. Fizika. Baku «Elm» 2002, cild 8. №1. p.3-5.
7. Ухин Н.А., Бакиров М., Абиев А.К., Аббасов Ш.М., Гасумов Г.М. Изменение электрических свойств монокристаллов твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$, вызванное их облучением. ФТП, 1983 г., т.18, в 6, с. 981-985.

GERMANIUM-SİLİSIUM BƏRK MƏHLULUNUN HƏCMİ TENZOMETRİK XASSƏLƏRİNƏ SÜRƏTLƏNDİRİLMİŞ ELEKTRON ŞÜALARANIN TƏSİRİ

ABBASOV Ş.M.

Bu işdə elektron şüaları ilə şüalandırılmış 15 at.% Si – qədər olan germanium-silisiyum bərk məhlulun həcmi tenzometrik xassələri öyrənilmişdir. Ona görə də kristalın bərk məhlulunu onun oxuna perpendikulyar və ya paralel olaraq kəsmiş və hər iki halda 200 mkm-dən artıq olmayaraq kəsilmiş plastinkanı 30-40 mkm-na, uzunluğunu isə 2 mm-dək cilalanmış və ondan elektron şüalarına davamlı tenzoçevirici hazırlanmışdır.

TENSOMETRICAL PROPERTIES OF VOLUMETRIC CRYSTALS OF GERMANIUM-SILICON SOLID SOLUTIONS IRRADIATED BY FAST ELECTRONS

ABBASOV Sh.M.

In the present work the tensometrical properties of $Ge_{1-x}Si_x$ solid solution monocrystal contented of up to 15 at. % Si were investigated. The radiation-proof strain gauges of researched crystals were made. For this purpose the site was cutted out from a sample, perpendicularly or in parallel of a crystal [111] axes. After polishing the samples had thickness of 30-40 microns, and length of 2 mm.