

УДК 621.383.832

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Ge_{1-x}Si_x$ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРООТРАЖЕНИЯ

И.М.АЛИЕВ, Р.А.РАГИМОВА

*Институт физики АН Азербайджана
370143 г.Баку, пр.Г.Джавида, 33*

Методом электроотражения и послойного удаления материала исследованы имплантированные поверхностные слои твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$. Изучено влияние имплантации ионов B^+ на состояние поверхности и определения профиля распределения радиационных напряжений. Установлено, что в результате имплантации в направлении [111] ионами B^+ с энергией 120кэВ и дозой $3 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$ при 300К образуется сильнодефектный слой толщиной около 0,9мкм.

Ионная имплантация является эффективным методом легирования полупроводниковых материалов. Глубина внедрения ионов при имплантации определяется не только их энергией, но также массой внедряемых ионов и атомов полупроводника. Концентрация внедренных атомов примеси имеет распределение по глубине, которое описывается в общем случае Гауссовым распределением со средним проецированным пробегом R_p . Однако сопутствующие эффекты, такие, как диффузия, каналирование и др., делают реальный профиль проникновения сильно отличающимся от теоретически предсказываемого. Особенно эти отличия касаются глубины проникновения имплантируемых атомов, которая в реальности оказывается большей. Все эффекты, связанные с имплантацией, ограничены поверхностным слоем, глубину которого можно менять вариацией ускоряющего напряжения. Это позволяет применять ионную имплантацию для модификации поверхности и свойств приповерхностного слоя.

При имплантации в результате бомбардировки тяжелыми частицами в полупроводниках образуются радиационные дефекты, возникновение которых значительно меняет свойства материала. Сами имплантированные атомы занимают в решетке нерегулярные положения и остаются электрически не активными. Послеимплантационный отжиг может в определенной степени восстановить кристаллическую решетку и перевести внедренные атомы в электрически активные положения в решетке. Количество радиационных повреждений зависит от массы внедряемых ионов, а также от энергии и дозы ионов, температуры и термообработки (температура, время).

Для исследования имплантированных слоев чаще всего применяются методы измерений эффекта Холла, электронного спинового резонанса, ЭПР, коэффициента отражения.

В последнее время для исследования ионно-легированных слоев полупроводниковых материалов и структур успешно применяется модуляционная спектроскопия электроотражения [1-7].

В настоящей работе методом спектроскопии электроотражения (ЭО) в сочетании с послойным удалением материала исследованы имплантационные поверхностные слои кристаллов твердого раствора $GeSi$ с целью изучения влияния

имплантации на состояние поверхности, определения профиля распределения радиационных напряжений в результате имплантации и послеимплантационного отжига.

Эксперимент проведен на кристаллах $Ge_{0,95}Si_{0,05}$ p- типа проводимости с концентрацией свободных носителей заряда $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при 77К. В направлении [111] имплантировались при 300К ионы B^+ с энергией $E=120 \text{ кэВ}$ и дозой $D=3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Послеимплантационный термический отжиг образцов проводился в вакууме при температуре 510°C в течение 40 мин.

Изменения спектров ЭО, вызванные эффектами имплантации и отжига, анализировались по структуре спектра E_1 в области энергий фотонов $1,9 \dots 2,5 \text{ эВ}$. Для имплантации предварительно были отобраны образцы с практически неизменной концентрацией дефектных центров по глубине съема материала. Исследуемый образец делился на две части, обе части подвергались имплантации, а отжигалась затем только одна часть образца. На каждом этапе исследований имплантационных и отожженных после имплантации слоев удалялся слой материала толщиной $\sim 0,05 \text{ мкм}$.

При анализе спектров ЭО считалось, что изменения параметра уширения Γ по глубине имплантационного слоя отображают пространственное распределение внедренной примеси и радиационных нарушений, а изменения амплитуды доминирующего пика спектра демонстрируют изменения состояния поверхности, в частности, величины поверхностного потенциала (в рамках линейризованного ЭО).

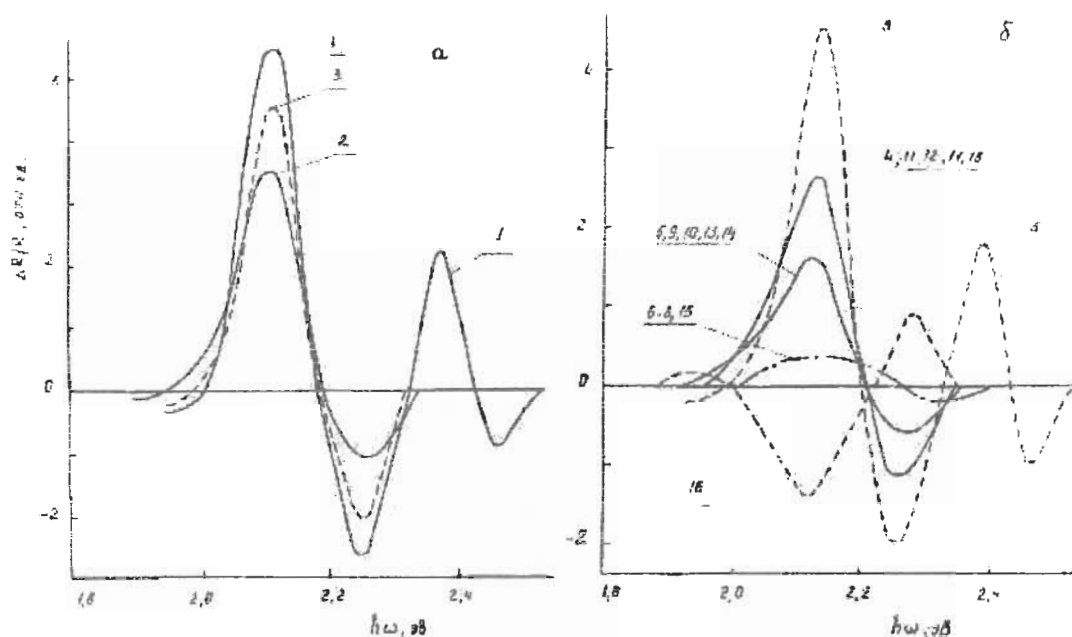


Рис.1

Спектры ЭО (структура E_1) ионно-легированных монокристаллов p- $Ge_{0,95}Si_{0,05}$ (а: 1- исходная поверхность, 2-облученная, 3-отжиг после имплантации; б: 4-18-последовательное сравнение с шагом $0,05 \text{ мкм}$). Имплантация ионами B^+ с энергией 120 кэВ , дозой $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при 300 К ; отжиг при 510°C в вакууме в течение 40 мин; запись спектров ЭО при $U_{\text{смещ}} = 0,3 \text{ В}$ и $U_{\text{модул}} = 0,4 \text{ В}$.

На Рис.1 представлены спектры ЭО $p\text{-Ge}_{0,95}\text{Si}_{0,05}$, полученные от поверхностей исходного, облученного и отожженного после имплантации кристаллов (а), а также измеренные на разных глубинах имплантационного слоя отожженного кристалла (б). Спектры, снятые на разных глубинах имплантационного слоя неотожженного кристалла (на Рис.1 не показаны), имеют малую амплитуду $\Delta R/R$ и меняют полярность после травли слоя $\sim 0,15\text{ мкм}$, причем отрицательная полярность $\Delta R/R$ сохраняется почти по всей глубине пробега ионов, и лишь на глубине $0,75\text{ мкм}$ начинается быстрое восстановление полярности $\Delta R/R$ (Рис.2, кривая 2).

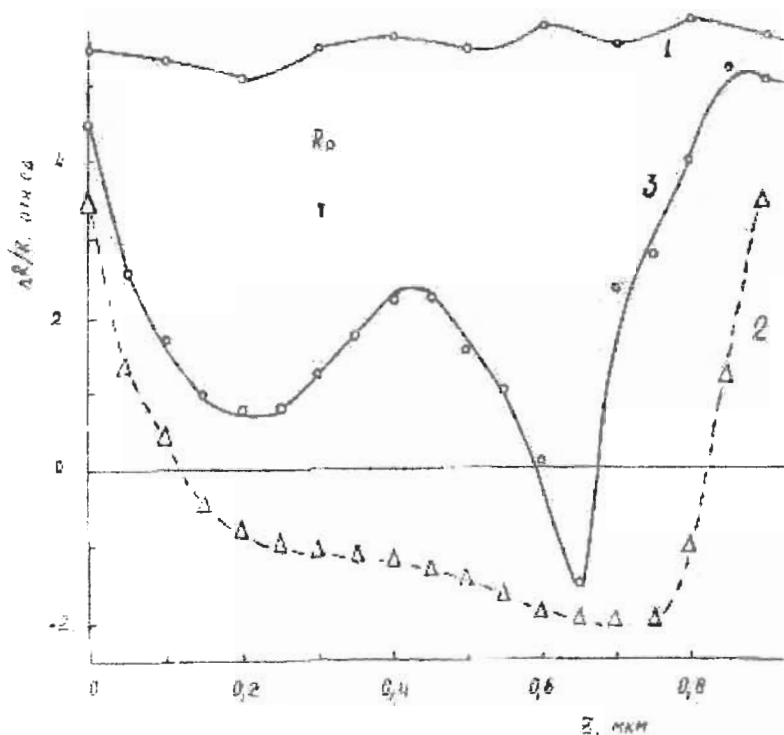


Рис.2

Распределение амплитуды основного пика структуры E_1 спектра ЭО по глубине ионно-легированного кристалла $p\text{-Ge}_{0,95}\text{Si}_{0,05}$: 1-исходный необлученный кристалл; 2-имплантация ионов B^+ с энергией 120 кэВ , дозой $3 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$ при 300 К ; 3-послеимплантационный отжиг в вакууме при 510°C в течение 40 мин

Зависимость параметра уширения Γ от глубины травления облученного неотожженного кристалла изображена на Рис.3 (кривая 2). Характер этой кривой показывает, что созданный имплантацией сильнодефектный слой простирается на глубинах $\sim 0,05 \dots 0,8\text{ мкм}$, и степень разупорядочения в этом диапазоне глубин меняется слабо. Стрелкой на рис.2,3 указано теоретическое значение среднего проецированного пробега R_p ионов бора с энергией 120 кэВ , вычисленное для чистого германия в работе [8].

Довольно большое отклонение наблюдавшихся пробегов ионов ($0,9\text{ мкм}$) от расчетного значения ($0,3\text{ мкм}$) обусловлено эффектом каналирования ионов. Интенсивное проявление каналирования связано с тем, что имплантация

производилась без поворота образца, т.е. в направлении [111] кристалла, являющемся одним из направлений каналирования. Еще одним возможным вкладом в реальный пробег ионов является радиационно-стимулированная диффузия в процессе имплантации. Отметим, что значительные отклонения реальных пробегов от теоретических наблюдались при имплантации бора с низкими энергиями (10 и 20 кэВ) в направлениях [111] и [110] чистого германия [9].

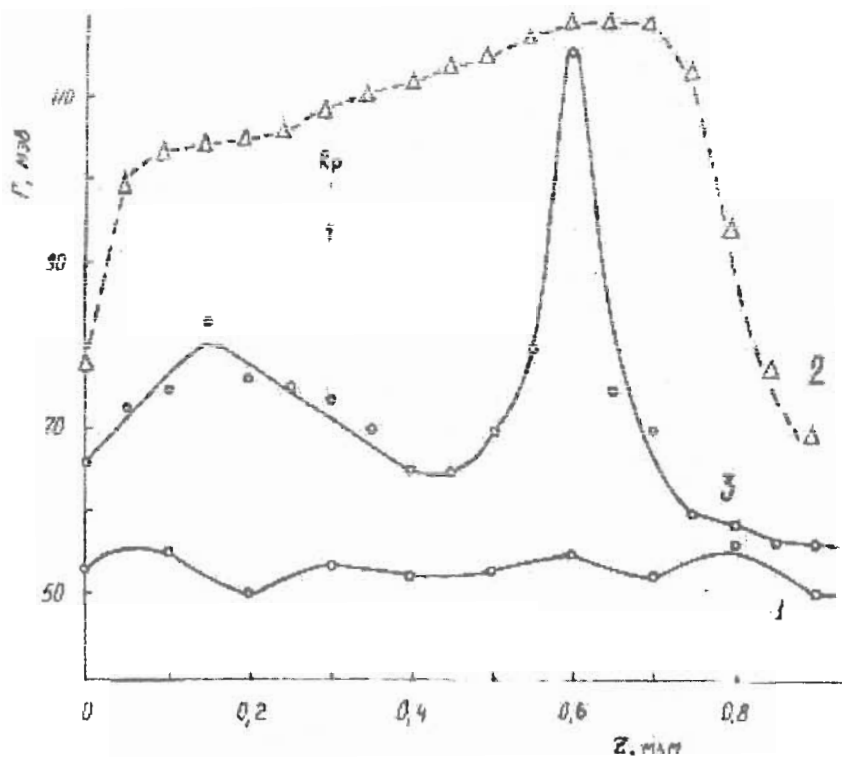


Рис.3

Распределение значений параметра уширения Γ структуры E_1 спектра ЭО по глубине ионно-легированного кристалла $p\text{-}Ge_{0,95}Si_{0,05}$:

1-исходный необлученный кристалл, 2-имплантация ионов B^+ с энергией 120кэВ, дозой $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при 300К; 3- послеимплантационный отжиг в вакууме при 510°C в течение 40 мин.

Термический отжиг приводит к уменьшению параметра уширения Γ спектров ЭО, измеренных на различных глубинах имплантационного слоя (см. Рис.3, кривая 3), что свидетельствует о существенном уменьшении числа дефектов, созданных имплантацией. Сравнение кривых 2 и 3 (см. Рис.3) демонстрирует сужение области сильного структурного разупорядочения при отжиге — имеет место эпитаксиальная рекристаллизация, происходящая преимущественно со стороны поверхности и частично со стороны объема кристалла.

Коррелируют с изменениями параметра уширения Γ изменения амплитуды $\Delta R/R$ спектра ЭО. Кривая 3 (см. Рис.2) представляет собой профиль $\Delta R/R$ по глубине пробега имплантируемых ионов, полученный после термического отжига кристалла. Широкий диапазон глубин z , в котором после имплантации формируются

отрицательные значения $\Delta R/R$ (кривая 2), в результате отжига резко сужается (кривая 3). В узкой области ($z \approx 0,6 \dots 0,68 \text{ мкм}$) отожженного кристалла наблюдается двойная инверсия полярности доминирующего пика структуры E_1 . Этой же области значений z ($z \approx 0,6 \text{ мкм}$) принадлежит и положение максимума концентрации дефектных центров, оставшихся не отожженными после термообработки. Учитывая, что спектры записывались при неизменных напряжениях смещения и модуляции, можно считать, что наблюдавшиеся изменения величины и знака $\Delta R/R$ по глубине внедрения ионов связаны с изменениями изгиба зон на поверхности, происходящими под влиянием радиационных нарушений.

Для исходных необлученных кристаллов характерен положительный знак $\Delta R/R$ при отрицательных и нулевом смещениях на образце, а величина $\Delta R/R$ растет с увеличением смещения (в рамках низкополевого эффекта). Учитывая это, а также уменьшение $\Delta R/R$ и смену его знака при имплантации, можно утверждать, что вклады электрического поля отрицательного смещения и радиационных дефектов в формирование поверхностного изгиба зон противоположны. Исходя из результатов эксперимента, можно считать, что под влиянием радиационных дефектов поверхностный изгиб зон на всех глубинах имплантационного слоя от $z \approx 0,15 \text{ мкм}$ до $z \approx 0,8 \text{ мкм}$ имеет знак, противоположный исходному (см. рис.2, кривая 2), который после отжига сохраняется лишь для узкой области $z \approx 0,6 \dots 0,68 \text{ мкм}$. По-видимому, области формирования отрицательных значений $\Delta R/R$ в условиях эксперимента должны соответствовать областям образования n-слоя.

Таким образом, в монокристаллах $\text{Ge}_{0,95}\text{Si}_{0,05}$ в результате имплантации в направлении $[111]$ B^+ с энергией 120кэВ и дозой $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при 300К образуется сильнодефектный слой, толщина которого ($\sim 0,9 \text{ мкм}$) значительно превышает средний пробег ионов бора данной энергии ($\sim 0,3 \text{ мкм}$). Этот факт может быть объяснен эффектом каналирования ионов, поскольку имплантация проводилась в направлении $[111]$ кристалла, являющимся одним из направлений каналирования.

Послеимплантационный термический отжиг в вакууме при 510°C в течение 40 минут вызывает эпитаксиальную рекристаллизацию, происходящую преимущественно со стороны поверхности и частично со стороны объема кристалла. В итоге на глубине 0,65 мкм образуется p-n-p переход с толщиной n-слоя около 0,08 мкм.

1. В.А.Тягай, В.С.Лысенко, А.Н.Красико, А.М.Евстигнеев, М.М.Локшин. *Письма в ЖТФ*, 4 (1978) 95.
2. Э.И.Велиюлин, Р.Х.Ляпин. *Труды совещания социалистических стран по физическим проблемам оптоэлектроники*, Баку, (1989) 144.
3. Г.Б.Галиев, В.В.Канаев, В.Г.Мокеров. *Поверхность*, №7 (1986) 143.
4. H.Herzer, S.Kalbitzer. *Ion implantation in semiconductors*. Berlin-Heidelberg-New York 1971.
5. J.P.Ponpon, J.J.Grob, R.Stuck, P.Burger, P.Siffert. *Application of ion beams to metals*, №4 (1974) 420.
6. K.Schmidt, H.Kranz, H.Ryssel, W.Muller, J.Dathe. *Phys. status solidi (a)*, 23 (1974) 523.
7. D.Sigard, G.Fladda, L.Eriksson, K.Bjorkguist. *Radiation effects*, 3 (1970) 145.

8. J.F.Gibbons, W.S.Johnson, S.W.Myroie. *Projected Range Statistics*. Strondsburg, USA, 1975.
9. Х.Риссел, И.Руге. *Ионная имплантация*, Москва, Наука, (1983) 360.

$Ge_{1-x}Si_x$ MONOKRİSTALLARI SƏTHİNİN ELEKTRİKƏKSETMƏ ÜSULU İLƏ TƏDQIQI

I.M.ƏLİYEV, R.Ə.RƏHİMOVA

$Ge_{1-x}Si_x$ bərk məhlul kristallarında elektrikəksetmə və qat-qat çıxarılma üsulu ilə implantasiya olunmuş səth təbəqələri öyrənilmişdir. V^+ ionları implantasiyasının səth halına təsiri və radiasiya gərginliklərinin paylanma profili tədqiq olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, [111] istiqamətində 300K temperaturunda, 120keV enerjili və $3 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$ dozalı V^+ ionlarının implantasiyası nəticəsində 0,9 mkm qalınlığında yüksəkdefektli təbəqə yaranır.

INVESTIGATION OF SURFACE $Ge_{1-x}Si_x$ SINGLE CRYSTALS BY ELECTROREFLECTANCE METHOD

I.M.ALIYEV, R.A.RAGIMOVA

The implantation surface layer of $Ge_{1-x}Si_x$ solid solution by electroreflectance method and layer removed materials was investigated. The influence of B^+ ions implantation on surface condition and determine the profile of section distribution of radiation stresses was studied. It was found that in results of implantation B^+ ions with 120 keV energy and $3 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$ dose at 300K in [111] direction strongdefects layer is formated, which has about 0,9 mu thinness.