

ВУЗОВСКАЯ НАУКА, ПРОМЫШЛЕННОСТЬ,
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО



МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Сборник научных трудов
III Международной научной конференции

Минск, 25–26 сентября 2008 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мильвидский М. Г., Челдышев В. В. // ФТП. 1998. Т. 32. С. 513–522.
2. Lindström J. L., Murin L. I., Hallberg T. et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B. 2002. Vol. 186. P. 121–125.
3. Мурин Л. И., Маркевич В. П., Медведева И. Ф., Dobaczewski L. // ФТП. 2006. Т. 40. С. 1316–1320.
4. Voronkov V. V., Falster R. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. P. 5802–5810.
5. Baghdadadi A., Bullis W. M. et al. // J. Electrochem. Soc. 1989. Vol. 136. P. 2015–2024.
6. Davies G., Newman R. C. Carbon in monocrystalline silicon // in Handbook on Semiconductors. Vol. 3, ed. by S. Mahajan (Elsevier North Holland, Amsterdam, 1994). Chapter 21. P. 1557–1635.
7. Watkins G D., Corbett J. W. // Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 1001–1014.
8. Lindstrom J. L., Murin L. I., Markevich V. P. et al. // Physica B: Condensed Matter. 1999. Vols. 273-274. P. 291–295.
9. Murin L. I. // Труды 16^{го} Междунар. совещ. «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 3–8 июля 2006); под ред. Г. Г. Бондаренко. М., 2006. С. 447–454.
10. Murin L. I., Svensson B. G. // Сб. докл. Междунар. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела ФТП-2007». Изд. центр БГУ. 2007. Т. 3. С. 165–168.
11. Lee Y.-H., Corbett J. W. // Phys. Rev. B. 1976. Vol. 13. P. 2653–2666.
12. Murin L. I., Svensson B. G., to be published.

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ ПРИ НАНЕСЕНИИ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ

О. М. Михалкович, И. С. Ташлыков

*Белорусский государственный педагогический университет
имени Максима Танка, tashl@bspu.unibel.by*

В настоящей работе обсуждаются результаты изучения композиционного состава, повреждения структуры поверхности (100) Si, модифицированного ионно-ассистированным нанесением Ti, Co покрытий в условиях самооблучения (ИАНПУС), используя метод резерфордовского обратного рассеяния в сочетании с каналированием (РОР/КИ). Установлено, что в состав покрытия входят атомы металла, водорода, углерода, кислорода, кремния. Междоузельные атомы Si, генерируемые радиационным воздействием, диффундируют при нанесении металлосодержащего покрытия, как в глубь кристалла, так и в само покрытие. Обнаружено влияние энергии и интегрального потока ионов He¹ на диффузионные процессы в кремнии.

Для осаждения металлосодержащих (Ti, Co) покрытий на кремний в условиях ионного ассистирования использовали резонансный источник вакуумной дуговой плазмы (вакуум 10⁻² Па) [1]. Элементный послыйный анализ конструкций пленка/кремний выполняли используя резерфордовское обратное рассеяние (РОР) ионов гелия He⁺ с E₀ = 2.0 МэВ и компьютерное моделирование экспериментальных спектров РОР по программе RUMP [2]. Для построения глубинных профилей компонентов изучаемых конструкций мы используем понятие положения исходной поверхности подложки (ПИПП), которое определяли в экспериментах по введению ионной имплантацией в Si пластину Хе маркера с энергией 10, 20, или 40 кэВ интегральным потоком от 1·10¹⁴ см⁻² до 2.7·10¹⁵ см⁻² [3]. Для изучения пространственного распреде-

ления радиационных дефектов, генерируемых в конструкциях покрытие/подложка ассистирующими ионами Ti^+ , Co^+ и при имплантации ионов He^+ , применяли метод РОР/КИ ионов He^+ с энергией 2 МэВ и геометрией рассеяния $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=12^\circ$, $\theta=168^\circ$, где θ_1 , θ_2 и θ – углы влета, вылета и рассеяния соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 показаны профили глубинного распределения компонентов конструкции, получаемой при нанесении кобальтовой пленки на Si, без введенного ксенонового маркера и с ним.

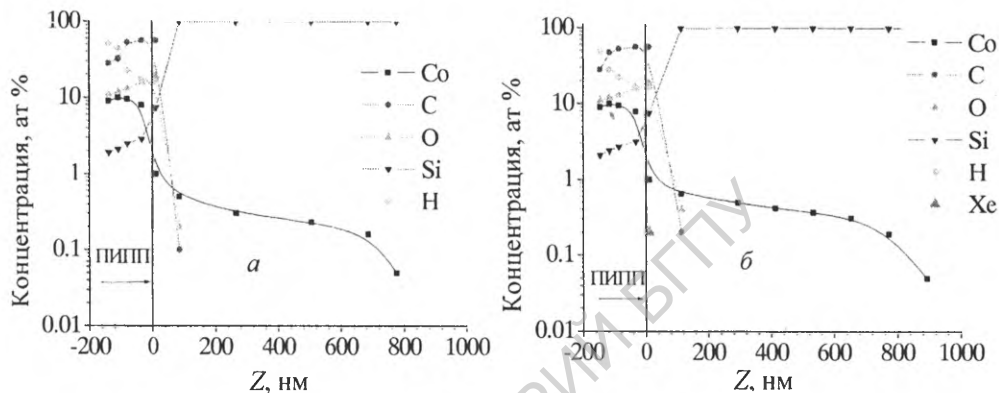


Рис. 1. Распределение элементов по глубине в структурах Co покрытие/Si, сформированных: а – методом ИАНПУС; б – методом ИАНПУС на кремнии с предварительно имплантированным маркером Xe с энергией 10 кэВ и интегральным потоком $3 \cdot 10^{14}$ Xe/см²

Профиль Co характеризуется концентрацией, снижающейся от 9 – 10 ат % на поверхности, до 1 ат % в области межфазной границы системы. Атомы Co идентифицируются в Si на глубине ~ 780 нм с концентрацией ~ 0.05 ат %, что свидетельствует об их радиационно-стимулированной диффузии вглубь в процессе нарастания покрытия под радиационным воздействием ассистирующих ионов. Водород распределен в покрытии неравномерно, и его концентрация спадает от 50.1 ат % на поверхности пленки до 16.6 ат % в области положения исходной поверхности подложки. В кремнии водород не идентифицируется.

Кислород распределен в покрытии неравномерно: его концентрация возрастает с 11 ат % на поверхности покрытия до 19 ат % вблизи ПИПП, а в кремнии на глубине < 100 нм его концентрация снижается в несколько раз до значений порядка десятых долей атомного процента. Профиль С качественно подобен пространственному распределению кислорода в покрытии, однако его концентрация примерно в 2.5 раза выше. В подложке же количество углерода в 2 раза ниже количества кислорода на сопоставимой глубине. Кислород и углерод проникают в подложку на глубину ~ 90 нм. Появление в изучаемых покрытиях O, C, и H мы связываем с осаждением на поверхность покрытия в процессе его роста совместно с атомами Co, углеводородной фракции и O из остаточного вакуума в мишенной камере, откачиваемой диффузионным паромасляным насосом.

Анализируя полученные результаты, рис. 1, а, б, отметим, что атомы углерода и кислорода проникают в кремниевую подложку на ~ 30 нм глубже, если в систему покрытие/подложка предварительно вводился маркер ксенона. Атомы же кобальта проникают в кремний на глубины во много раз большие проективного пробега, рассчитанного по программе TRIM [4], и в разы превышающие проникновение атомов кислорода и углерода в кремний. В пластине Si с предварительно имплантированными ионами Xe^+ глубина проникновения атомов кобальта увеличивается еще на ~ 120 нм. При этом концентрация атомов кобальта на сопоставимой глубине возрастает примерно в 1.5 раза. Такой эффект проникновения можно объяснить радиационно-усиленной диффузией при осаждении покрытий атомов металла в глубь кремния по дефектам, создаваемых ионами ксенона. Значительное увеличение глубины проникновения кобальта в кремний при введении маркера позволяет сделать предположение о междоузельном механизме радиационно-стимулированной диффузии. Заметим, что при предварительной имплантации ионов ксенона в качестве маркера в кремний наблюдается незначительное увеличение концентрации атомов кремния в покрытии, что может также свидетельствовать о роли дефектов в усилении процессов встречной диффузии.

Диффундируя на большую глубину, атомы Со способствуют диффузии атомов кислорода и углерода. Это также можно объяснить тем, что при введении ксенонового маркера в кремниевой подложке образуются дефекты, по которым и происходит усиленное проникновение атомов компонентов покрытия. При этом отметим, что концентрация кислорода и углерода на сопоставимой глубине в кремнии с введенным маркером, как и кобальта, выше, чем в образцах только с покрытием, рис. 1, а, б.

Следует отметить, что физические процессы формирования структур Со покрытие/подложка качественно сопоставимы с процессами, протекающими при нанесении на кремний титановых покрытий.

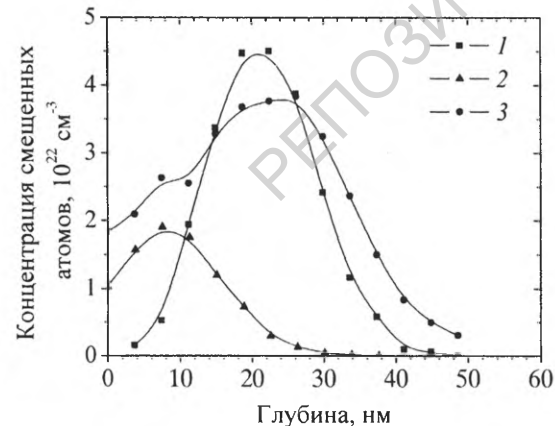


Рис. 2. Распределение концентрации дефектов по глубине в кремнии после: 1 – имплантации ионов Xe^+ с $E = 40$ кэВ и дозой: $D = 9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 2 – только ионно-ассистированного в условиях самооблучения нанесения Ti; 3 – ионно-ассистированного осаждения Ti на кремний с предварительно имплантированным Xe

На рисунке 2 представлены профили распределения по глубине радиационных дефектов в кремнии (междоузельные атомы Si) с введенным Xe маркером (1), с титановым покрытием на исходном Si (2) и на Si с Xe маркером (3).

Глубина максимальной концентрации дефектов, производимых при имплантации ионов ксенона, сравнима с глубиной проникновения ионов Xe^+ с соответствующими энергиями в кремнии, которая рассчитана по программе TRIM. Так для ионов ксенона с энергией 40 кэВ средний проективный пробег и страгглинг пробега составляет $R_p \pm \Delta R_p = 27,1 \pm 7,1$ нм.

Характер повреждения структуры кремния при его модифицировании, отсутствие «полочки» на профиле

дефектов, генерируемых ионами Ti^+ , кривая 2 на рис. 2, свидетельствует о том, что смещенные в междоузлия атомы Si диффундируют на поверхность и далее входят в состав покрытия.

Максимальная концентрация смещенных из узлов атомов кремния, полученная при имплантации ионов He^+ уменьшается при последующем ионно-ассистированном нанесении Ti, Co покрытий в условиях самооблучения, что объясняется нами с активацией миграционных процессов в глубь и к поверхности кремния, что также способствует вхождению атомов кремния в покрытие, с одной стороны, и миграции атомов компонентов покрытия в глубь подложки. О возможности влияния дефектов на диффузионные процессы как в подложке, так и в покрытии при ионно-ассистированном осаждении последних обсуждается в работе [5].

О характере радиационного повреждения кремния ускоренными ионами He^+ , а также при последующем процессе ИАНПУС ионами Ti^+ и Co^+ свидетельствуют данные о зависимости слоевой концентрации дефектов в подложке от дозы ионов маркера с энергией 10 и 40 кэВ при ИАНПУС покрытий на основе титана и кобальта при ускоряющем напряжении $E=7$ кВ, которые приведены на рис. 3.

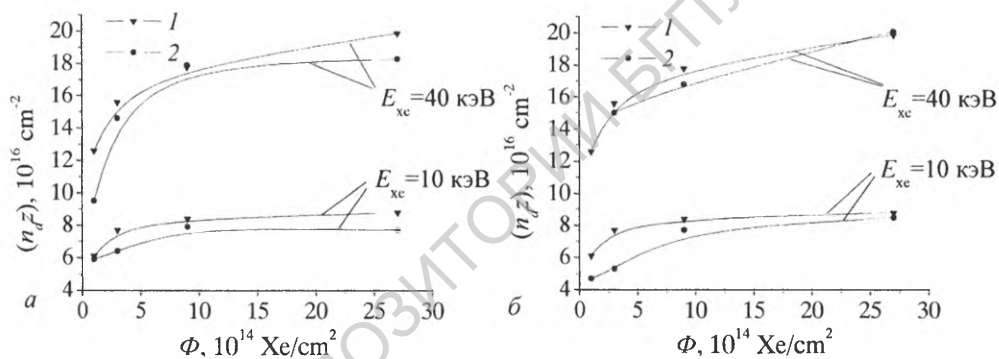


Рис. 3. Дозовая зависимость слоевой концентрации смещенных из узлов атомов кремния: 1 – с маркером ксенона в (100) Si; 2 – с маркером ксенона в (100) Si с последующим нанесением покрытия на основе (а) титана и (б) кобальта

Ход кривых на рис. 3 отражает факт насыщения радиационными дефектами поврежденного ионами He^+ кремния. Однако в процессе облучения ассистирующими ионами Ti^+ и Co^+ наблюдается тенденция уменьшения слоевой концентрации дефектов, созданных в кремнии при имплантации ионов He^+ как с $E = 10$ кэВ, так и с $E = 40$ кэВ. Этот эффект более выражен в системе Ti/Si. По-видимому, под воздействием ионов, ассистирующих нанесение покрытий, происходит частичное восстановление радиационного повреждения кремния в результате протекания диффузионных процессов, которые отражены на рисунке 2. При этом роль ионов Ti^+ по сравнению с ионами Co^+ остается пока не раскрытой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода резерфордского обратного рассеяния в сочетании с каналированием ионов гелия и моделирующей программы RUMP установлено, что концентрация смещенных из узлов атомов кремния увеличивается с увеличением

дозы имплантированных ионов ксенона, используемых в качестве маркера. Концентрация в максимуме профиля смещенных из узлов атомов кремния, полученная при имплантации ионов ксенона, уменьшается в процессе ионно-ассистированного осаждения титановых и кобальтовых покрытий. При этом проявляется тенденция снижения слоевой концентрации радиационных дефектов. Предполагается, что наблюдаемые явления связаны с активацией процессов проникновения компонентов покрытия в глубь кремния, а также процессов миграции дефектов на большие глубины и в покрытия под воздействием облучения формируемых структур ассистирующими ионами. Установлено, что в процессе ионно-ассистированного нанесения тонких пленок титана и кобальта в их состав входят, кроме атомов осаждаемого металла, атомы углерода, кислорода и водорода, а также атомы подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ташлыков И. С., Белый И. М.* Способ нанесения покрытий. Патент РБ №2324. IC1 BY, C23 C4/12, C4/18, C14/16. Оpubл. 1999. Офиц. бюл. гос. пат. ведом. РБ №1.
2. *Doolittle L. R.* //Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. 1985. Vol. B 9. P. 227–231.
3. *Bögh E.* // Canad. J. of Phys. 1968. Vol. 46. P. 653–659.
4. *Zigler J. F., Biersak J. P., Littmark U.* The stopping range of ions in solids Pergamon Press, Oxford. 1985. Vol. 1 P. 321.
5. *Ташлыков И. С., Андреев М. А.* // ФХОМ. 2006. № 3. С.29–32.

MECHANISM OF HYDROGEN-RELATED SHALLOW DONORS FORMATION IN $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ CRYSTALS IMPLANTED WITH PROTONS

**Ju. M. Pokotilo¹, A. N. Petukh¹, V. V. Litvinov¹, V. P. Markevich²,
A. R. Peaker², and N. A. Abrosimov³**

¹*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

²*University of Manchester, Manchester M60 1QD, UK*

³*Institute of Crystal Growth, Berlin, Germany*

It is found that shallow hydrogen-related donors are formed in the proton-implanted dilute $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ alloys ($0 \leq x \leq 0.031$) as well as in Si-free Ge samples upon heat-treatments in the temperature range 225 - 300 °C. The maximum concentration of the donors is about $1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ for a H^+ implantation dose of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Formation and annihilation temperatures of the proton-implantation-induced donors do not depend on the Si concentration in $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ samples. However, the increase in Si content has resulted in a decrease of the concentration of the H-related donors. The possible origin of the H-related donors and mechanisms of Si-induced suppression of their formation are discussed.

1. INTRODUCTION

Hydrogen is a ubiquitous impurity in semiconductors. It is introduced inadvertently during plasma processing, wet etching, polishing and some cleaning processes [1, 2].

Previously [3] we found that heat-treatments of the proton-implanted Ge samples in the temperature range 200–300 °C result in the formation of shallow hydrogen-related donors. The maximum concentration of the donors is about $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ for a H^+ implantation dose of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. An analysis of changes in the spatial distribution of the H-related donors upon isothermal and isochronal anneals has shown that the donors appear in a region which