

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ Si-Ge СПЛАВОВ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ АНАЛИЗА НА ПУЧКАХ ПРОТОНОВ

В.В. Левенец, А.А. Щур, Б.М. Широков

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ
Украина*

Поступила в редакцию 22.06.2010

Исследованы возможности определения массового содержания, толщины и профилей концентрации кремния и фосфора в тонких пленках изготовленных по газо-фторидной технологии. Разработана методика неразрушающего анализа поверхностных пластов и переходного пласта между бинарной Si-Ge пленкой и подложкой из кремния на основе регистрации рентгеновского и γ -излучение возбуждаемого ускоренными протонами. Проведены исследования серии изделий, отличающихся материалом подложки, технологией изготовления и массовым содержанием. Сделаны выводы относительно возможности применения подобных аналитических методов для изучения физических процессов, связанных с изготовлением многослойных полупроводниковых структур.

Ключевые слова: газо-фторидные технологии, германий, кремний, фосфор, допунания, определение профилей концентрации, ХРВ, МВЯР, ядерные резонансы, рентгеновское излучение, γ -излучение, протоны, ускоритель

Досліджено можливості визначення масового вмісту, товщини та профілів концентрації кремнію та фосфору у тонких плівках виготовлених за газо-фторидною технологією. Розроблено методику неруйнівного аналізу поверхневих шарів та перехідного шару між бінарною Si-Ge плівкою та підложкою з кремнію на основі реєстрації рентгенівського та γ -випромінювання збуджуваного прискореними протонами. Проведено дослідження серії виробів, що відрізнялися матеріалом підложки, технологією виготовлення та масовим вмістом. Зроблено висновки щодо можливості застосування подібних аналітичних методів для вивчення фізичних процесів, пов'язаних із виготовленням багат шарових напівпровідникових структур.

Ключові слова: газо-фторидні технології, германий, кремний, фосфор, допунання, визначення профілів концентрації, ХРВ, МВЯР, ядерні резонанси, рентгенівське випромінювання, γ -випромінювання, протони, прискорювач

The possibilities were studied of the determination of mass content, thicknesses and depth profiles of silicon and phosphorus in thin films which were made using CVD-technique. The method was developed of non destructive analysis of the surface layers and transition layer between of binary Si-Ge-film and the Si-backing using PIXE and PIGE. The studying was made of series of samples with various materials of the backing, technology of production and mass content. The conclusions about the application of the such methods to the studying of physical processes associated with the fabrication of multilayer semiconductor structures were drawn.

Keywords: CVD-technique, germanium, silicon, phosphorus, doping, depth profiles determination, PIXE, PIGE, nuclear resonance, X-rays, γ -rays protons, accelerator

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых полупроводниковых материалов и структур допированных контролируемые примесью для создания высокотехнологичных элементов микроэлектронных устройств стало одним из основных направлений современной электроники. Промышленному производству подобных материалов и приборов на их основе предшествует этап проведения научно-исследователь-

ских и технологических разработок, включающих собственно выбор и отработку технологии изготовления, и контроль технологических процессов, а также анализ элементного состава и структурных свойств конечных изделий [1 – 4]. Одним из возможных направлений аналитического сопровождения в области создания новых полупроводниковых приборов на основе сплавов кремния и германия являются ядерно-физические

методы анализа химического состава вещества и пространственного распределения отдельных компонентов, основанные на использовании ускоренных протонов от электростатических ускорителей [5–6]. Для исследования элементного состава и однородности исследуемых объектов целесообразно использовать совокупность ядерно-физических методов основанных на использовании пучков ускоренных ионов, каждый из которых может быть реализован параллельно с другими. Наиболее употребляемые из таких методов ХРИ (характеристическое рентгеновское излучение), МИЯР (мгновенное γ -излучение из ядерных реакций) и ОРР (обратное Резерфордское рассеяние). Для решения исследуемой задачи наиболее оптимальным оказалось использование двух первых методов.

Метод анализа элементного состава ХРИ, основан на регистрации характеристического рентгеновского излучения атомов, сопровождающего заполнение вакансий во внутренних электронных оболочках электронами вышедших оболочек. Первичные вакансии возникают в результате взаимодействия ускоренных протонов с электронами оболочек ближайших к ядру атома. Метод МИЯР основан на использовании мгновенного γ -излучения из ядерных реакций и позволяет в ряде случаев кроме определения элементного состава пробы получать информацию о распределении отдельных элементов по глубине без разрушения объекта исследования. Настоящая работа посвящена вопросам исследования элементного состава и пространственного распределения отдельных компонентов допированных фосфором Si-Ge пленок, получаемых с использованием газо-фторидных технологий, на основе регистрации характеристического рентгеновского излучения х.р.и. атомов и γ -излучения ядер, возбуждаемого при облучении вещества пучками ускоренных протонов.

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АНАЛИЗА

Экспериментальные исследования выполнены на электростатическом ускорителе, входящем в состав аналитического ядерно-физического комплекса (АЯФК) “Сокол” ННЦ ХФТИ [7]. Для измерений использовался ка-

нал ХРИ и ядерных реакций. Облучение исследуемых образцов протонами происходило в вакуумной камере при давлении 10^{-5} торр. Энергия протонов и ток пучка варьировались при измерениях от 10 нА до 1,5 мкА, а энергия пучка от 300 до 1760 кэВ. Протоны падали на поверхность мишени по нормали к поверхности. Рентгеновское и γ -излучение использовавшееся для исследования элементного состава и пространственной однородности исследовавшихся образцов регистрировалось полупроводниковыми детекторами, расположенными за пределами камеры облучения. Для вывода из камеры облучения мягкого рентгеновского излучения К-серии кремния, фосфора и германия с энергиями в диапазоне 1,74–9,85 кэВ использовалось окно из бериллиевой фольги толщиной 25 мкм. Регистрация х.р.и. осуществлялась Si-Pin-детектором с Пельтье-охлаждением, расположенным под углом 135° по отношению к направлению движения протонов на расстоянии 45 мм от облучаемой мишени. Энергетическое разрешение детектора составляло 160 эВ по линии 5,95 кэВ. Для регистрации высокоэнергетичного γ -излучения из ядерных реакций с энергиями до 100 кэВ до 10 МэВ использовался Ge(Li)-детектор с объемом кристалла и разрешением 2,5 кэВ по линии с энергией 1332 кэВ. Ось кристалла детектора располагался под углом 0° по отношению к направлению пучка протонов на расстоянии 25 мм от облучаемой мишени. Толщина крышки камеры из нержавеющей стали в месте расположения чувствительного объема детектора составляла 2 мм, и практически не влияла на интенсивность прохождения излучения от мишени в детектор.

Исследуемые образцы. Исследуемые образцы представляли собой пластины либо диски размерами от 5–20 до 40 мм. Исследуемое вещество было изготовлено из пленки толщиной от десятых долей до нескольких микрон, нанесенной на подложки из различных материалов. В качестве материала подложки использовались углерод, кремний, сплав тантала и ниобия. Исследованы несколько серий образцов отличающихся толщиной и составом покрытия, а также материалом подложки

Стандартные образцы сравнения. Для проведения количественного анализа использовались стандартные образцы (СО) сравнения. Массовое содержание кремния, и германия в различных СО изменялось от 10% Ge – 90% Si, до 50% Ge 50% Si с шагом 10%. Использовались также СО из чистого кремния и германия. Для определения содержания фосфора были изготовлены стандарты на основе преимущественно кремниевой матрицы, в которых содержание фосфора составляло 1 – 7%.

Условия проведения анализа. Для определения массового содержания кремния, фосфора и германия использовалось х.р.и. К-серии, с энергиями 1,74 кэВ, 2,015 кэВ и 9,885 кэВ. Сечения возбуждения х.р.и. К-серии $\sigma_{Кх}$ зависят от энергии протонов (меняется по степенному закону $\sigma_{Кх} \sim E^n, n = 3 \div 4$) и атомного номера элемента – Z (экспоненциально спадает с увеличением $\sigma_{Кх} \sim \exp(-kZ)$). Совокупность этих факторов приводит к тому, что для энергий протонов 300, 500, 1000 и 1760 кэВ отношение величин сечений возбуждения х.р.и. кремния и германия изменяется как 1200, 700, 170, 60. Собственная эффективность детектора для этих линий составляла 0,74; 0,81 и 0,97 соответственно. Как показали предварительные исследования, большинство исследуемых образцов имело незначительное – менее 1% масс. содержание фосфора, а массовое содержания германия варьировалось от нескольких единиц до 10 – 20%. Содержание кремния соответственно составляло от 100% до 80%. Глубина анализируемого слоя вещества для исследуемых образцов при изменении энергии протонов меняется от 3 до 35 мкм. При проведении анализа следовало принимать во внимание следующие факторы:

- интенсивности излучения аналитических линий кремния и германия в спектрах х.р.и. не должны отличаться более чем 1 – 2 порядка;
- интенсивность излучения не должна быть высокой настолько, чтобы спектрометрический тракт не успевал обрабатывать импульсы;
- пробег протонов в веществе мишени, величина которого определяется энергией

протонов, не должен превышать толщину анализируемой пленки, либо при вычислении содержания анализируемых компонентов анализируемая мишень должна рассматриваться как “полутонкая”.

С учетом вышеизложенного была проведена серия измерений, во время проведения которых варьировались энергия, ток пучка протонов, поглотители и коллиматоры рентгеновского излучения, располагавшиеся между мишенью и детектором.

Для исследования пространственного распределения отдельных компонентов исследуемых образцов использовали метод МИЯР. В доступном диапазоне энергий протонов для определения фосфора и кремния могут быть использованы ядерные реакции, параметры которых приведены в табл. 1 и на рис 1, 2 [8 – 11].

Таблица 1

Характеристики ядерных реакций на изотопах фосфора и кремния

Реакция	Распростр. изотопа, %	$E_{рез}$, кэВ	E_{γ} , МэВ	$\Gamma_{рез}$, эВ
$^{31}P(p, \gamma)^{32}S$	100	541	2,23	
$^{31}P(p, \gamma)^{32}S$	100	811	7,42	< 420
$^{31}P(p, \gamma)^{32}S$	100	1438	3,64; 1,62	45
$^{29}Si(p, \gamma)^{30}P$	4,67	414	5,6	~100
$^{30}Si(p, \gamma)^{31}P$	3,1	620	7,9	68

Указанные ядерные реакции имеют узкие резонансы в зависимости сечения от энергии протонов, что позволяет измерить распределение фосфора и кремния на поверхности об-

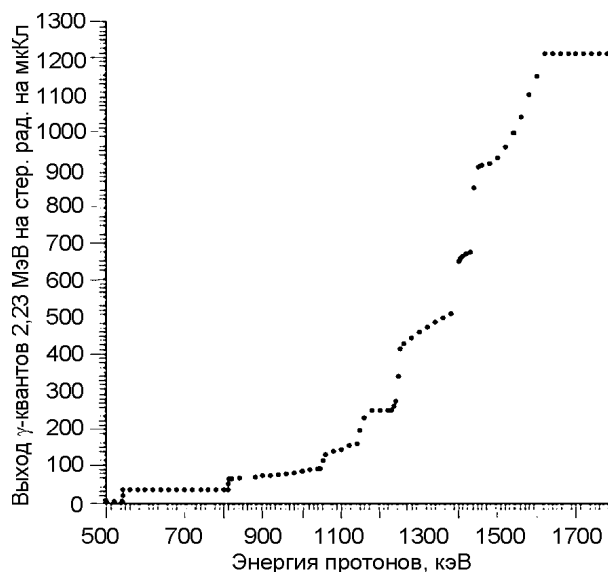


Рис. 1. Функция возбуждения γ -излучения с энергией 2,23 МэВ из реакции $^{31}P(p, \gamma)^{32}S$ [8].

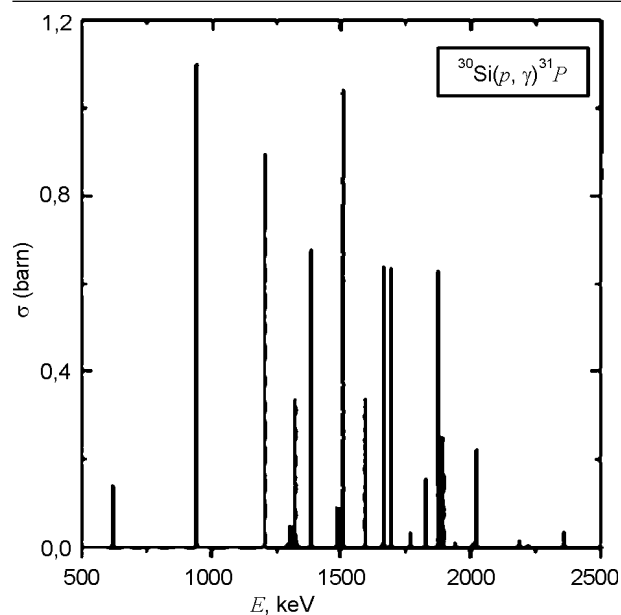


Рис. 2. Сечение возбуждения γ -излучения с энергией 7,9 МэВ из реакции $^{30}\text{Si}(p, \gamma)^{31}\text{P}$ [9].

разца с пространственным разрешением 10 и 15 нм соответственно.

Для определения макросостава образцов Si-Ge пленок, нанесенных на кремниевую подложку, методом ХРИ были выбраны следующие параметры работы ускорителя и детектирующей системы.

Энергия протонов для трех серий измерений составляла 450, 500 и 700 кэВ соответственно, ток пучка варьировался от 700 до 200 нА, заряд протонов при измерении спектров изменялся от 300 – для энергии протонов 450 кэВ до 30 мкКл – для энергии протонов 700 кэВ. Перед детектором был установлен поглотитель из акрила толщиной 100 мкм и коллиматор с диаметром отверстия 2,5 мм. Такой выбор экспериментальных условий позволил проводить измерения с оптимальной загрузкой спектрометра, без использования сменных поглотителей, обеспечить высокую экспрессность анализа, избежав при этом высоких тепловых и радиационных нагрузок на исследуемые образцы. Выбранные энергии протонов обеспечивали также изменение толщин анализируемых пленок в пределах 5 – 10 мкм, что позволило оценить влияние вклада в выход аналитической линии кремния от подложки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследуемые образцы № 1 и № 2 представляли собой диски из кремния диаметром 40 мм, на которые были нанесены пленки из соеди-

нения кремния германия. На рис. 3 приведены фотографии анализируемой поверхности этих образцов.

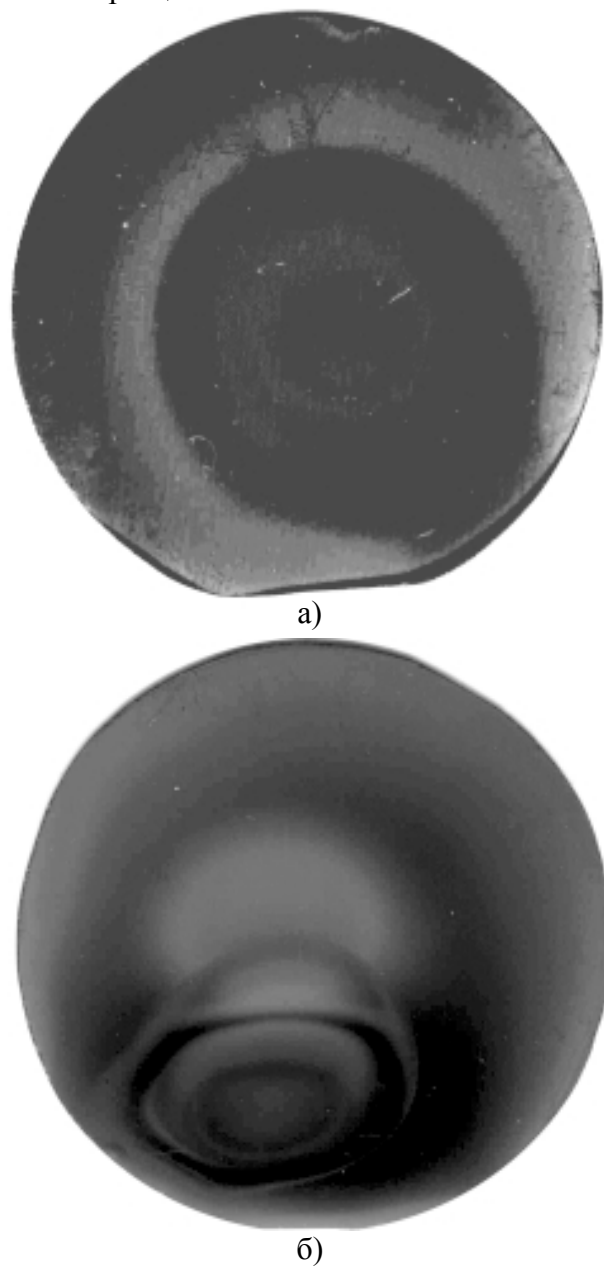


Рис. 3. Распределение зон в образцах: а) – № 1; б) – № 2.

В каждом образце присутствовало несколько зон в виде центрального круга и концентрических колец, процесс формирования пленки в которых отражал определенные изменения в технологических параметрах. Образец № 3 был изготовлен в виде кремниевой пластины размером 10×20 мм, на который был нанесен слой исследуемого соединения со стационарными технологически условиями. Благодаря оптимизации экспериментальных параметров был достигнут режим измерений, при котором удалось измерять за ко-

роткое время аналитические пики основных матричных элементов с умеренной температурной и радиационной нагрузкой, без искажения формы спектральных линий, избежать перегрузки спектрометрического тракта и существенно нивелировать различие в интенсивности х.р.и. кремния и германия, обусловленное различием в атомных номерах.

На рис. 4. показан типичный вид спектра х.р.и. от Si-Ge пленки.

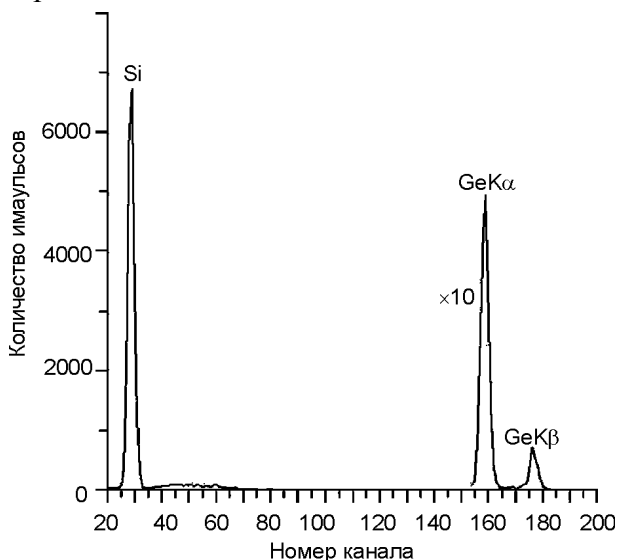


Рис. 4. Типичный вид спектра х.р.и. от Si-Ge пленки.

Обработку рентгеновских спектров выполняли с использованием кода WinQXAS [12]. Для вычисления содержания кремния и гер-

мания использовали метод внешнего стандарта. Отличия в матричном составе стандартов и исследуемых образцов были учтены поправочными коэффициентами, рассчитанными с использованием компьютерного кода Gurixwin [13]. Результаты вычислений массового содержания кремния и германия приведены в табл. 2.

Для каждой точки выполнялось по три параллельных измерения, в табл. 2 приведены усредненные данные. Нумерация зон началась от центра образца. Для образца № 3 выполнены измерения в трех точках с целью исследования однородности состава осаждаемых пленок, по поверхности. Как видно из приведенных данных, с увеличением энергии протонов и для некоторых точек наблюдается увеличение содержания кремния, что может быть объяснено вкладом от кремниевой подложки, возрастающим с ростом толщины анализируемого слоя за счет увеличения энергии протонов. С увеличением энергии протонов также увеличивается эффективная толщина анализируемого слоя, из которого выходит практически все регистрируемое излучение.

Для образца № 1 в центральной части была выполнена оценка толщины пленки с использованием методики описанной в [14]. Толщина слоя t (мкм), содержащего Ge определена по формуле:

Таблица 2

Содержание основных компонентов в образцах Si-Ge пленки на Si-подложке, %масс.

№ образ.	Место анализа	$E_p = 450$ кэВ		$E_p = 500$ кэВ		$E_p = 700$ кэВ	
		Si	Ge	Si	Ge	Si	Ge
№ 1	Центр	88,18 ± 0,03	11,82 ± 0,09	89,03 ± 0,26	10,97 ± 0,26	93,41 ± 0,01	6,59 ± 0,01
	2 зона	94,99 ± 0,02	5,01 ± 0,21	95,73 ± 0,08	4,27 ± 0,08	96,82 ± 0,06	3,18 ± 0,06
	3 зона	96,09 ± 0,03	3,91 ± 0,05	96,94 ± 0,13	3,06 ± 0,13	97,69 ± 0,04	2,31 ± 0,04
	4 зона	99,51 ± 0,02	0,49 ± 0,03	98,90 ± 0,07	1,10 ± 0,07	99,71 ± 0,02	0,29 ± 0,02
№ 2	Центр	99,87 ± 0,02	0,13 ± 0,02	99,91 ± 0,02	0,09 ± 0,005	99,94 ± 0,02	0,06 ± 0,02
	2 зона	99,79 ± 0,03	0,21 ± 0,03	99,53 ± 0,04	0,47 ± 0,04	99,89 ± 0,00	0,11 ± 0,00
	3 зона	96,09 ± 0,03	1,16 ± 0,10	97,96 ± 0,02	2,04 ± 0,02	99,40 ± 0,03	0,60 ± 0,03
	4 зона	95,88 ± 0,04	4,12 ± 0,04	94,34 ± 0,16	5,66 ± 0,16	97,67 ± 0,08	2,33 ± 0,08
	5 зона	89,05 ± 0,11	10,95 ± 0,11	86,91 ± 0,21	13,09 ± 0,21	93,85 ± 0,04	6,15 ± 0,04
№ 2	Центр	99,76 ± 0,02	0,24 ± 0,01	99,78 ± 0,03	0,22 ± 0,03	99,73 ± 0,01	0,27 ± 0,01
	Левый край	—	—	—	—	99,71 ± 0,03	0,29 ± 0,03
	Правый край	—	—	—	—	99,72 ± 0,02	0,28 ± 0,02

$$t = 2 \cdot \frac{E_1 \cdot \sqrt[3]{Y_2/Y_1} - E_2}{S_1 \cdot \sqrt[3]{Y_2/Y_1} - S_2} \quad (1)$$

где E_1 и E_2 , Y_1 и Y_2 , S_1 и S_2 соответственно энергии протонов, выходы х.р.и. Ge и тормозные потери протонов в веществе мишени для указанных энергий протонов, b – величина, характеризующая зависимость сечения возбуждения х.р.и. К-серии Ge σ_{Kx} от энергии протонов ($\sigma_{Kx} \sim E^b$). Были измерены выходы х.р.и. Ge для указанного образца при энергиях протонов 1200 и 1100 кэВ. Для вычислений использованы данные о тормозных потерях, рассчитанные с использованием программы SRIM 2006 [15]. Величина b получена в результате подгонки экспериментальных данных о сечениях х.р.и., полученных с использованием эмпирической формулы [16]. Толщина пленки составила $0,83 \pm 0,11$ мкм.

Для образцов Si-Ge-сплавов, нанесенных на подложку из фольги на основе сплава NbTa было определено содержания Si по глубине образца в поверхностном слое толщиной до 1500 А. Использован резонанс при энергии 620 кэВ из реакции $^{29}\text{Si}(p, \gamma)^{30}\text{P}$. Для каждого образца была проведена серия измерений выходов γ -излучения при энергиях протонов начиная ниже резонансной до энергии, при которой резонанс достигается на 1500 А. При расчете глубин использована программа SRIM 2006 [15]. Спектры измерялись при токе 1,0 мкА до набора заряда 1500 мкКл. Для определения кремния использовали γ -кванты с энергией 7,9 МэВ из реакции $^{30}\text{Si}(p, \gamma)^{31}\text{P}$. Результаты определения содержания кремния приведены на рис. 5. Погрешность определения содержания составляла 7 – 10% и включала погрешность определения суммы пика и измерения заряда. Для учета возможного вклада в выход γ -излучения кремния резонансов при более низких энергия протонов выполнены измерения спектров при энергиях ниже 620 кэВ, формально соответствующих глубинам –0,04 и –0,01 мкм. Пониженное содержание кремния на поверхности может быть объяснено, разбросом энергии протонов в пучке составляющим порядка 0,1% начальной энергии протонов, а также естественной шириной используемого резонанса.

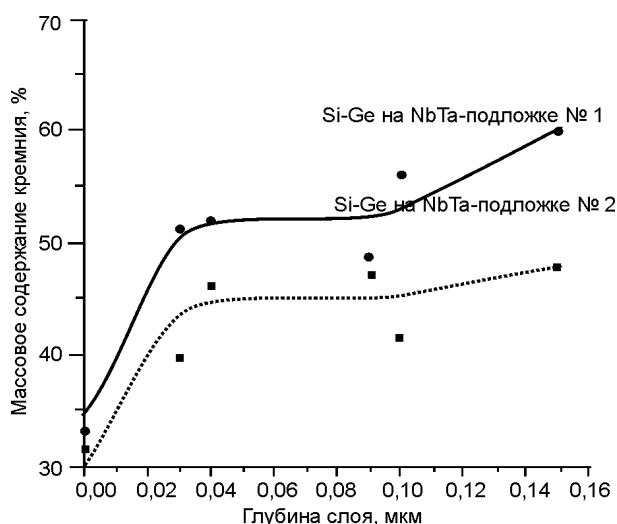


Рис. 5. Профиль концентрации кремния. Прерывистые линии – результат подгонки экспериментального набора данных полиномами 4^{го} порядка.

Как видно из приведенной информации, распределение кремния в исследованном диапазоне глубин близко к постоянному.

Для двух образцов пленок на NbTa-подложке были также исследованы возможности анализа распределения фосфора по глубине с использованием резонансов из ядерной реакции $^{31}\text{P}(p, \gamma)^{32}\text{S}$ при энергиях протонов 1247,8 кэВ и 1438 кэВ. Для определения фосфора использовали γ -кванты с энергией 2,23 МэВ. Спектры измерялись при токе 1,5 мкА до набора заряда 3000 мкКл. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Определение содержания фосфора по резонансам из реакции $^{31}\text{P}(p, \gamma)^{32}\text{S}$

Глубина, мкм	Энергия резонанса	Содержание масс., %	
		Si-Ge(NbTa)№1	Si-Ge(NbTa)№2
0,2	1438 кэВ	0,87	–
0,3	541 кэВ	0,34	–
0,5	1247,8 кэВ	0,71	0,66

Для изучения распределения кремния в переходном слое между Si-Ge-пленкой и Si-подложкой был выбран узкий резонанс при энергии 414 кэВ с шириной около 100 эВ из реакции $^{29}\text{Si}(p, \gamma)^{30}\text{P}$, что позволило с хорошим пространственным разрешением получить профиль распределения кремния на границе двух сред. Предполагалось, что изотопный состав кремния в пленке и подложке совпадает. При содержании в 4,67% изотопа ^{29}Si в естественном кремнии, подобная аналити-

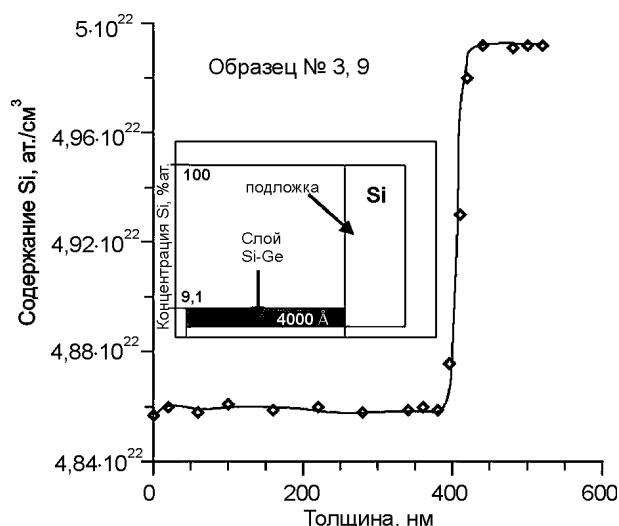


Рис. 6. Использование реакции $^{29}\text{Si}(p, \gamma)^{30}\text{P}$ для исследования перехода эпитаксиальная Si-Ge-пленка – Si-подложка.

ческая методика позволяет определять кремний до уровня концентраций $\sim 10^{20}$ ат./см³.

Из полученного распределения кремния видно, что глубина переходного слоя пленка-подложка составляет около 400 Å.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в работе позволяют сделать вывод о том, что совокупность ядерно-физических методов анализа состава и пространственного распределения компонентов Si-Ge сплавов, позволяет получить достоверную информацию относительно влияния разнообразных технологических приемов на формирование подобных структур. Показано, что при выборе одного из резонансов в сечении реакции $^{31}\text{P}(p, \gamma)^{32}\text{S}$ при энергиях 541; 1247,6 или 1438 кэВ возможно получить информацию о распределении фосфора по глубине для диапазона массовых содержаний от десятых долей до единиц процентов. Проведенные исследования являются важным подготовительным этапом к исследованию распределения принудительно внедренных примесей P и B в переходных зонах, возникающих между поверхностной пленкой и кремниевой подложкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Simola R., Mangelinck D., Portavoce A., Bernardini J., Fornara P. Boron Redistribution During Crystallization of Phosphorus Doped Amorphous Silicon//16th Intern. Conf. on Ion Implan-

2. Fangqing Zhang, Guanghua Chen, Deyan He. Hydrogen and boron concentrations in doped hydrogenated amorphous silicon-carbon films measured by nuclear reaction analysis//Appl. Phys. Lett. – 1989. – Vol. 54, № 20. – P. 1995-1996.
3. Cho B., Bareno J., Foo Y.L., Hong S., Spila T., Petrov I. and Greene J.E. Phosphorus incorporation during Si(001):P gas-source molecular beam epitaxy: Effects on growth kinetics and surface morphology//Journ. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 103. – P. 123530-1-123530-10.
4. Jin-Hong Park, TadaMunehiro, Jung Woo-Shik, Wong H.-S. Philip and Saraswat Krishna C. Metal-induced dopant boron and phosphorus activation process in amorphous germanium for monolithic three-dimensional integration//Journ. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 106. – P. 074510-1-074510-6.
5. Левенец В.В., Щур А.А., Омельник А.П., Ковальчук И.К., Пистряк В.М., Широков Б.М. Определение равномерности распределения Ge в образце сплава SiGe, полученного методом CVD//Труды XVII межд. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. Алушта.–2006.– С. 311-312.
6. Pruppers M., Zijderhand F., Maessen K., Bezeemer J., Habraken F., Van der Weg W. Incorporation of phosphorus and boron in amorphous silicon measured with (p, γ) resonant reactions//Nucl. Instr. Meth.–1986.–Vol. 15B.– P. 512-515.
7. Бондаренко В.Н., Глазунов Л.С., Гончаров А.В., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Левенец В.В., Омельник А.П., Пистряк В.М., Сухоставец В.И., Усиков Н.П., Щур А.А. Аналитический ядерно-физический комплекс ННЦ ХФТИ “Сокол”//Int. conf. Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy Book of Abstracts. – 2006. – P. 163.
8. Demortier G. and Bodart F. Quantitative analysis of phosphorus by (p, γ) reactions//Jorn. Rad. Chem. – 1972. – Vol. 12. – P. 209-219.
9. Endt P.M., Van Der Leun C. Energy levels of $A = 21 - 44$ nuclei (VI)//Nucl. Phys. – 1978. – Vol. A310. – P. 17-51.
10. Paine B.M. and Sargood D.G.V. (p, γ) resonance strength in s-d shell//Nucl. Phys. – 1979. – Vol. A331. – P. 389-397.
11. Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei $A = 11-12$ //Nucl. Phys. – 1985. – Vol. A433. – P. 1-157.
12. <http://www.iaea.or.at>
13. <http://pixe.physics.uoguelph.ca/gupix/>

14. Benka O., Geretschlдger M., Paul H. Determination of the depth of impurity atoms in bulk material by proton-induced x rays//J. Appl. Phys. – 1976. – Vol. 47. – P. 5090-5093.
15. <http://www.srimorg.org>
16. Paul H., Sacher J. Fitted empirical Reference Cross Sections for K-Shell Ionization by Protons//At. Data Nucl. Data Tables.–1989.–Vol. 42. – P. 105-156.