

## ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ДОНОРОВ В СПЛАВАХ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ

Ю.М. Покотило<sup>1)</sup>, В.Г. Цвырко<sup>1)</sup>, О.А. Кирщенья<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белгосуниверситет, физический факультет,  
пр. Независимости, 4, 220050 Минск, Беларусь [pokotilo@bsu.by](mailto:pokotilo@bsu.by)

<sup>2)</sup> УП "Транзистор", инженер

Исследовалось образование водородсодержащих доноров в кристаллах сплавов SiGe. Установлено образование неперестраивающихся водородсодержащих доноров. Обнаружен DLTS-пик А-центра. Обсуждается смещение DLTS-пиков А, Е-центра в зависимости от содержания германия в SiGe.

### Введение

В настоящей работе исследовалось образование водородсодержащих доноров в кристаллах сплавов кремния с германием ( $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ) с различным содержанием германия. Кристаллы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  выращены методом Чохральского и легированы фосфором до уровня  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в процессе роста. Образцы диодов Шоттки изготавливались путем напыления круглого контакта из золота диаметром 1 мм и толщиной примерно 0,5 мкм. Облучение ионами атомарного водорода  $\text{H}^+$  с энергией 300 кэВ осуществлялось при комнатной температуре с планарной стороны через Au контакт в базу диода. Доза облучения сплавов протонами  $110^{15} \text{ см}^{-2}$ . Отжиг облученных образцов проводился в кварцевой трубе на воздухе.

### Образование водородсодержащих доноров в SiGe

На рисунке 1 представлены профили распределения электронов проводимости для кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ,  $x=1,4+5,5\%$ . Концентрация доноров нелинейно зависит от содержания Ge в сплаве. Концентрация доноров в SiGe в несколько раз меньше, чем в чистом кремнии, облученном такой же дозой протонов [1]. Для сравнения следует отметить, что концентрация в SiGe, облученном потоком протонов  $110^{15} \text{ см}^{-2}$ , соответствует концентрации водородных доноров в чистом кристаллическом кремнии, облученном потоком протонов  $110^{13} - 110^{14} \text{ см}^{-2}$ .

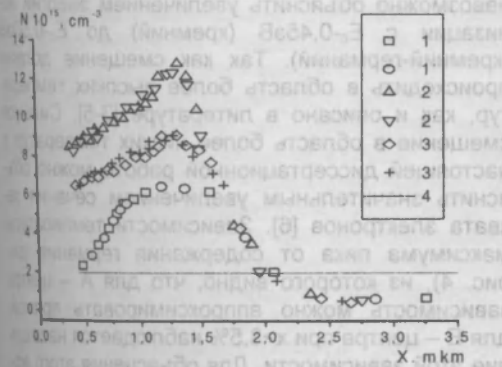


Рис.1. Профили распределения водородсодержащих доноров в сплавах SiGe, облученных протонами потоком  $110^{15} \text{ см}^{-2}$ . 1 - 5,5% Ge, 350°C 20 мин., 1' - 100°C 6 час., 2 - 2,6% Ge, 350°C 20 мин., 2' - 100°C 6 час., 3 - 1,4% Ge, 350°C 20 мин., 3' - 100°C 6 час. 4 - уровень легирования фосфором.

Для установления термической перестройки водородсодержащих доноров проведен многочасовой отжиг при температуре 100°C (см. рис. 1). Установлено, что доноры в SiGe являются неперестраивающимися.

### Образование и свойства глубоких центров при имплантации ионов $\text{H}^+$ в SiGe

На рис. 2 представлены спектры DLTS, а на рис.3 – зависимости Аррениуса для SiGe, облученного ионами водорода с энергией 300 кэВ потоком  $110^{15} \text{ см}^{-2}$ . Низкоэнергетический пик соответствует (см. таблицу) А – центру – комплексу вакансии – кислород [2]. Энергия ионизации и сечение захвата для второго пика значительно превышают таковые для Е – центра (комплекса легирующий фосфор – вакансии) в чистом кремнии, но температура отжига 150°C указывает на Е – центр [2].

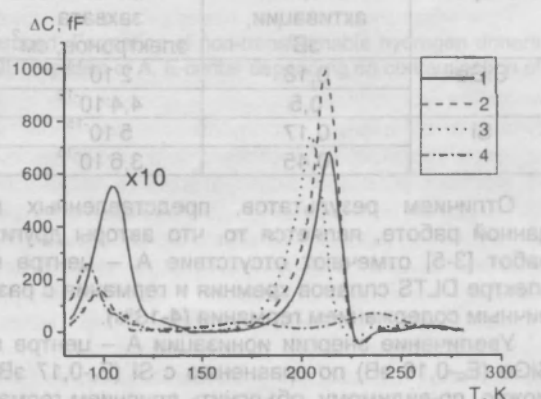


Рис.2. Спектры DLTS для SiGe и Si. 1 - 5,5% Ge, 2 - 2,6% Ge, 3 - 1,4% Ge, 4 - чистый кремний. Интенсивность низкотемпературных пиков увеличена в 10 раз.  $\tau=5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ .

Е – центр в SiGe смещен по сравнению с кремнием в область более низких температур (см. рис. 2-3). Что несколько противоречит ранее известным результатам [3, 4]. Положение доминирующего пика, обусловленного Е – центром, смещается в SiGe в область более высоких температур по сравнению с чистым кремнием. Увеличивается и энергия ионизации [3, 4]. Причем энергия ионизации центра зависит от содержания германия в сплаве [5]. Следует также отметить, что в литературе указывается, что доминирующий пик Е – центра в 2 раза меньше в SiGe по

сравнению с Si [4, 5]. В нашем же случае интенсивность E – центра в SiGe более чем в 2 раза превышает интенсивность E – центра в чистом кремнии (см. рис. 2).

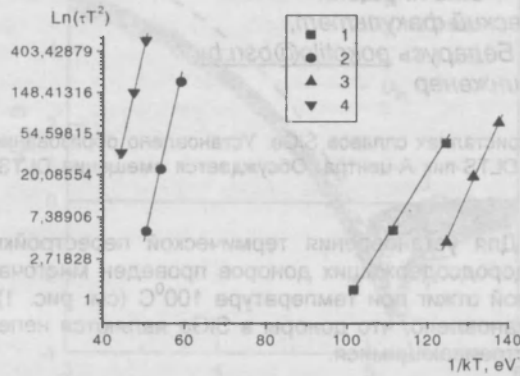


Рис.3. Зависимости Аррениуса для двух пиков DLTS. 1, 2 – для SiGe (5,5% Ge), 3, 4 – для Si.  $\tau=5 \cdot 10^{-4}$  с.

В спектре DLTS (см. рис. 2) также наблюдается A – центр. Из рисунка 3 и таблицы также видно, что энергия ионизации увеличилась по сравнению с A – центром в кремнии, а пик смещен в более высокотемпературную область. Насыщения же смещения с увеличением процентного содержания германия в сплаве не наблюдается (см. рис. 4а).

Параметры DLTS – пиков, полученные из кривых Аррениуса, для сплава кремния с германием и чистого кремния.

Материал	Энергия активации, эВ	Сечение захвата электронов, см <sup>2</sup>
SiGe	0,18	$2 \cdot 10^{-14}$
	0,5	$4,4 \cdot 10^{-12}$
Si	0,17	$5 \cdot 10^{-15}$
	0,45	$3,6 \cdot 10^{-16}$

Отличием результатов, представленных в данной работе, является то, что авторы других работ [3-5] отмечают отсутствие A – центра в спектре DLTS сплавов кремния и германия с различным содержанием германия (4-13%).

Увеличение энергии ионизации A – центра в SiGe ( $E_c=0,18$  эВ) по сравнению с Si ( $E_c=0,17$  эВ) можно, по-видимому, объяснить влиянием германия на кристаллическую структуру кремния. Так как размер атома Ge много больше Si, то при встраивании их в решетку вблизи узла создается поле упругих напряжений. Эти поля могут существенно изменять структуру энергетических зон и энергию ионизации, а также сечение захвата электронов. Причем установлено из экспериментов по гидростатическому давлению в кремнии [5], что энергия ионизации и сечение захвата электронов увеличиваются с возрастанием полей упругих напряжений.

Температурное смещение A – центра в SiGe в сравнении с чистым Si объясняется полем упругих напряжений в кристаллической решетке и увеличением энергии ионизации центра примерно на  $0,1 \pm 0,2$  эВ. Сечение захвата электронов в сплаве соответствует таковому в чистом мате-

риале. Соответственно происходит смещение пика в область более высоких температур.

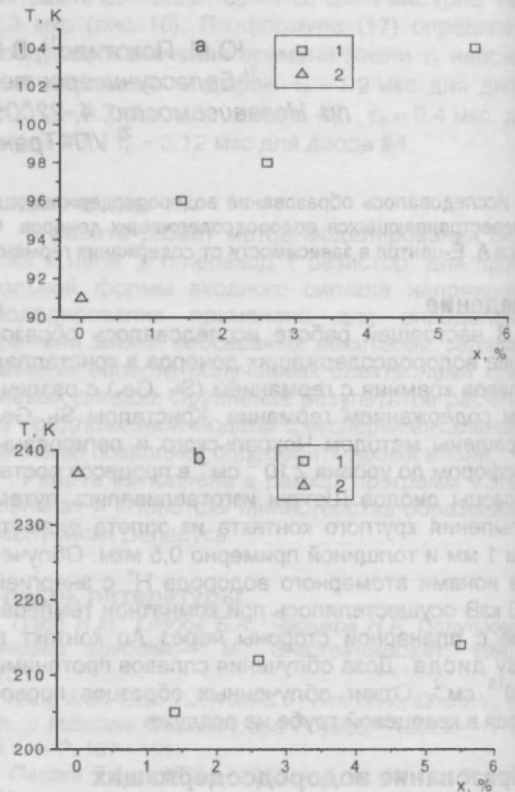


Рис.4. Зависимость температуры DLTS пика от процентного содержания германия в сплаве. 1 – SiGe, 2 – Si. а – пик A – центра, б – пик E – центра.

Однако, дать подобное объяснение смещению в область более низких температур DLTS пика (см. рис. 4б) и изменению энергии ионизации E – центра невозможно. Поле упругих напряжений в кристаллической решетке может изменить энергию ионизации центра на  $\sim 0,1$  эВ. Смещение от  $E_c=0,45$  до  $E_c=0,50$  эВ для E – центра напряжениями объяснить сложно [4].

Температурное смещение E – центра в сплаве невозможно объяснить увеличением энергии ионизации с  $E_c=0,45$  эВ (кремний) до  $E_c=0,50$  эВ (кремний-германий). Так как смещение должно происходить в область более высоких температур, как и описано в литературе [3-5]. Сильное смещение в область более низких температур в настоящей диссертационной работе можно объяснить значительным увеличением сечения захвата электронов [6]. Зависимости температуры максимума пика от содержания германия (см. рис. 4), из которого видно, что для A – центра зависимость можно аппроксимировать прямой, для E – центра при  $x > 3,5\%$  наблюдается насыщение этой зависимости. Для объяснения этого эффекта требуются дальнейшие исследования.

## Выводы

1. Установлено образование водородсодержащих доноров в кристаллах сплавов  $Si_{1-x}Ge_x$ . Концентрация доноров нелинейно зависит от процентного содержания германия сплава. Тем-

пература образования водородсодержащих доноров  $350^{\circ}\text{C}$ . Показано, что доноры в сплавах на основе кремния (SiGe) являются неперестраиваемыми.

2. Обнаружено, что в облученном низкоэнергетическими протонами сплаве SiGe помимо E-центра [2] присутствует и A-центр. Однако в отличие от чистого кремния отсутствует A-центр с присоединенным к нему атомом водорода (VOH-комплекс).

3. Показано, что в сплавах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  не наблюдается эффекта связывания водорода с радиационными дефектами и пассивации, так как интенсивность DLTS пиков в сплаве SiGe значительно выше, чем в чистом Si и отсутствует VOH-комплекс.

4. Обнаружено температурное смещение в DLTS спектре пиков рациональных дефектов в зависимости от содержания германия в сплаве SiGe. Установлено увеличение энергии ионизации A и E-центра. Смещение A-центра в SiGe происходит в более высокотемпературную область по сравнению с Si и линейно зависит от процентного содержания германия в сплаве. Смещение E-центра в SiGe относительно Si происходит в область более низких температур. При содержании Ge в SiGe 3,5% и более наблюдается насыщение зависимости. Температурное смеще-

ние A-центра и увеличение энергии ионизации объясняется тем, что при встраивании большего по сравнению с атомом кремния атома германия в кристаллическую решетку кремния вблизи узла создается поле упругих напряжений. С возрастанием полей упругих напряжений может существенно изменяться структура энергетических зон, энергия ионизации может увеличиваться примерно на  $0,1+0,2$  эВ, а также изменяется сечение захвата электронов. Для установления причины температурного смещения в зависимости от содержания Ge в SiGe и насыщения этой зависимости, а также изменения энергии ионизации и сечения захвата электронов, требуются дополнительные исследования.

#### Список литературы:

1. Покотило Ю.М., Петух А.Н., Литвинов В.В., Цвырко В.Г. // ФТП. - 2005. - № 7. - С.802.
2. Markevich, V.P. et al. // J. Appl. Phys. - 1994. - Vol. 76. - P. 7347.
3. Kuznetsov A.Yu. et al. // Mat. Sci. in Semicond. Proc. - 2001. - Vol. 4. - P. 217.
4. Monakhov E.V., Kuznetsov A Yu., Svensson B.G. // J. Appl. Phys. - 2000. - Vol. 87. - P. 4629.
5. Monakhov E.V., Kuznetsov A Yu., Svensson B.G. // Phys. Rev. B. - 2001. - Vol. 63. - P. 245322.
6. Brotherton P. et al. // J. Appl. Phys. - 1982. - Vol. 53. - P. 5720.

### FORMATION OF HYDROGEN DONORS IN SILICON – GERMANIUM ALLOYS

Yu.M. Pokotilo<sup>1)</sup>, V.G. Tsvyrko<sup>1)</sup>, O.A. Kirshchenya<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>BSU, physical department, Nezavisimosty av., 4, 220050 Minsk, Belarus [pokotilo@bsu.by](mailto:pokotilo@bsu.by)

<sup>2)</sup>engineer UP "Tranzistor"

Formation of hydrogen donors in crystal of SiGe alloys are researched. Formation of non-transformable hydrogen donors are determined. DLTS-peak of A-center is revealed. Displacement of DLTS-peaks of A, E-center depending on contamination of germanium in SiGe alloy is discussed.