

марганца в кремнии заметно влияет на процесс радиационного дефектообразования. С увеличением концентрации марганца уменьшается скорость изменения электрических параметров кремния, т. е. скорость накопления радиационных дефектов при облучении (кривые 2, 3). В исходных (нелегированных) образцах время жизни носителей заряда после облучения дозой  $\sim 10^{15}$  эл/см<sup>2</sup> составляло 5—10 % от его значения до облучения, а удельное сопротивление при дозе  $1.5 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup> увеличивалось в 2—3 раза. В то же время для легированных марганцем образцов облучение электронами с такой дозой практически не меняет величины начальных параметров.

Анализируя кривые, можно заметить различие в устойчивости к действию электронного облучения перекомпенсированных (кривая 4) и легированных (кривые 2, 3) образцов. В перекомпенсированном образце электрические параметры оказались более устойчивыми к действию электронного облучения. Это связано с тем, что в перекомпенсированных материалах атомы марганца образуют комплексы с атомами бора Mn—B [<sup>5</sup>], а также кластеры Mn<sub>4</sub> [<sup>6</sup>], которые, по-видимому, играют роль центров захвата и аннигиляции радиационных дефектов.

Автор выражает благодарность М. К. Бахадырханову за полезные дискуссии.

#### Список литературы

- [1] Болтакс Б. И., Бахадырханов М. К., Городецкий С. М., Куликов Г. С. Компенсированный кремний. Л., 1972. 122 с.
- [2] Бахадырханов М. К., Турсунов А. А., Азизов К. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 1. С. 12—14.
- [3] Комар Е. Г. Основы ускорительной техники. М., 1975. 368 с.
- [4] Городецкий С. М., Литовский М. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 580.
- [5] Бахадырханов М. К., Аскарлов Ш. И., Турсунов А. А. // ДАН УзССР. 1981. № 10. С. 25—28.
- [6] Фистуль В. И., Казакова В. М., Бобровников Ю. А., Рябцев А. В., Абдурахманов К. П., Зайнабидинов С., Камиллов Т. С., Утамурадова Ш. Б. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 5. С. 939—942.

Ташкентский государственный университет  
им. В. И. Ленина

Получено 6.05.1989  
Принято к печати 8.02.1990

ФТП, том 24, вып. 8, 1990

## НАКОПЛЕНИЕ ДИВАКАНСИЙ В КРЕМНИИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ НЕЙТРОНАМИ

Жуковский П. В., Канторов С. Б., Стельмах В. Ф., Тадеуш Н. Н.,  
Шилагарди Г.

Аморфизации кремния при внедрении легких ионов предшествует накопление собственных точечных дефектов. Доминирующими дефектами являются дивакансии [<sup>1</sup>], а концентрации других дефектов при малых дозах на несколько порядков меньше [<sup>2</sup>]. Аналогичная картина наблюдается и при малых флюенсах нейтронов [<sup>3, 4</sup>]. Такое сходство вызвано, по-видимому, тем, что собственные точечные дефекты создаются атомами отдачи кремния, энергии которых близки для обоих видов облучения.

При увеличении дозы облучения ионов и флюенса нейтронов появляются различия в кинетиках накопления собственных дефектов. В ионно-имплантированном кремнии концентрации дефектов достигают максимума, а спаду соответствует начало аморфизации [<sup>1, 2</sup>]. При облучении нейтронами концентрации дефектов выходят на насыщение [<sup>3, 4</sup>], даже при флюенсе  $10^{21}$  см<sup>-2</sup> сплошной аморфизации нет.

Выяснение причин, приводящих к столь существенным различиям кинетик накопления собственных точечных дефектов при ионном и нейтронном облуче-

нии, необходимо для определения роли разных типов дефектов в аморфизации кремния.

Одной из причин уменьшения скорости накопления собственных дефектов при больших флюенсах нейтронов может быть, по нашему мнению, их термический отжиг, вызванный длительным пребыванием кристаллов при повышенных ( $\sim 60-100^\circ\text{C}$ ) температурах в канале реактора.

Для выяснения роли отжига дефектов непосредственно в процессе облучения были проведены изотермические отжики кремния, облученного флюенсом  $\Phi=10^{17}\text{ см}^{-2}$  с интенсивностью  $I=(10\pm 2)\cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Методом инфракрасного поглощения по полосе 1.8 мкм определялась концентрация дивакансий (рис. 1). Из начальных участков кривых отжига ( $N/N_0=0.7$ ), полученных при  $T=190$  и  $160^\circ\text{C}$ , определены методом сечений энергия активации отжига

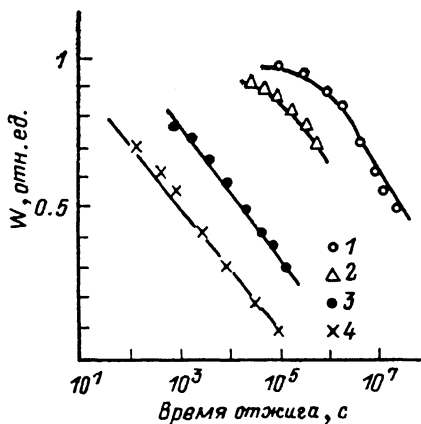


Рис. 1. Изохронные отжики кремния, облученного быстрыми реакторными нейтронами флюенсом  $10^{17}\text{ см}^{-2}$ .

Температура отжига,  $^\circ\text{C}$ : 1 — 80, 2 — 105, 3 — 160, 4 — 190.

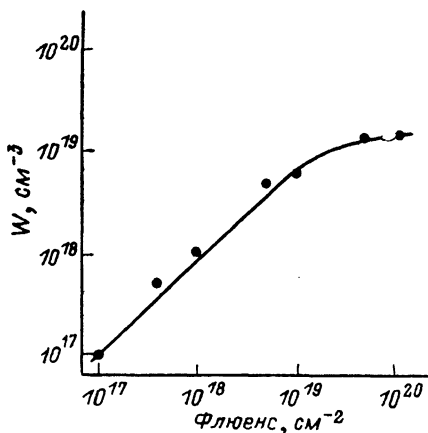


Рис. 2. Зависимость концентрации дивакансий от флюенса быстрых реакторных нейтронов.

$E_m=(1.25\pm 0.05)$  эВ и частота прыжков  $r_0=(10\pm 4)\cdot 10^{10}\text{ с}^{-1}$ . Отжики кристаллов при  $T=105$  и  $80^\circ\text{C}$  показали, что при температурах, соответствующих условиям в канале реактора, происходит уменьшение концентрации дивакансий, описываемое тем же уравнением кинетики химических реакций, что и для более высоких температур.

По данным ИК поглощения построена зависимость концентрации дивакансий от флюенса нейтронов (рис. 2, точки). Облучение разными флюенсами проводилось в идентичных условиях. В работе [5] получено и решено уравнение, описывающее накопление дефектов при облучении и одновременном их отжиге,

$$N_i(\Phi, T, I) = (K_i I / D_i(T)) [1 - \exp(-\Phi D_i(T) / I)], \quad (1)$$

где  $K_i$  — коэффициент введения дефекта,  $D_i(T) = r_0 \exp(-E_m/kT)$  — его кинетический коэффициент отжига,  $k$  — постоянная Больцмана. Остальные обозначения приведены выше.

Коэффициент введения дивакансий, равный  $(1.0\pm 0.2)\text{ см}^{-1}$ , определен по начальному участку зависимости концентрации дивакансий от флюенса нейтронов (рис. 2).

Анализ формулы (1) показывает, что при малых флюенсах нейтронов (дозах ионов) она переходит в зависимость

$$N_i(\Phi) = K_i \Phi, \quad (2)$$

характерную для собственных точечных дефектов на начальных этапах облучения.

При больших флюенсах (дозах) концентрация дефектов стремится к насыщению:

По формуле (1) проведены расчеты зависимости концентрации дивакансий от флюенса нейтронов для разных температур облучения. Оказалось, что количественное согласие расчетной зависимости с экспериментальными данными достигается при температуре облучения  $(88 \pm 20)^\circ\text{C}$ . Погрешность определения температуры получена при учете всех погрешностей входящих в формулу (1) величин. Сплошная кривая на рис. 2 получена при использовании средних значений входящих в формулу (1) величин.

Таким образом, моделирование условий облучения нейтронами путем отжига облученных образцов при температурах, соответствующих условиям в канале реактора ( $80$  и  $105^\circ\text{C}$ ), и сравнение зависимости концентрации дивакансий от флюенса нейтронов с расчетной кинетикой их накопления при температуре облучения  $88^\circ\text{C}$  (рис. 2, сплошная линия) показали, что выход на насыщение концентрации дивакансий в кремнии, облученном нейтронами, обусловлен, по-видимому, отжигом части дивакансий непосредственно в процессе облучения.

#### Список литературы

- [1] Stein H. J., Beezhold W. // J. Appl. Phys. Lett. 1970. V. 17. N 10. P. 442—444.
- [2] Brower K. L., Vook F. L., Borders J. A. // J. Appl. Phys. Lett. 1970. V. 15. N 7. P. 208—210.
- [3] Newman A. C., Totterdell D. M. J. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1975. V. 8. N 22. P. 3944—3954.
- [4] Антоенко А. Х., Двуреченский А. В., Смирнов Л. С., Харченко В. А. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 11. С. 2018—2021.
- [5] Жуковский П. В., Стельмах В. Ф., Ткачев В. Д. // Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Минск, 1978. Т. 2. С. 76—79.

Белорусский государственный университет  
им. В. И. Ленина  
Минск

Получено 21.06.1989  
Принято к печати 26.02.1990

Монгольский государственный университет  
МНР, Улан-Батор

ФТП, том 24, вып. 8, 1990

## АМОРФИЗАЦИЯ КРЕМНИЯ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ $\text{Ag}^+$ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР $150\text{—}400\text{ K}$

Жуковский П. В., Канторов С. Б., Кицак К., Мочка Д.,  
Стельмах В. Ф.

Первые попытки интерпретации температурной зависимости процесса аморфизации кремния при ионной бомбардировке основывались на предположении, что главную роль в нем играют моновакансии [1]. Их миграцией из каскадов смещений объяснялись температурные зависимости дозы аморфизации при имплантации ионов разных масс.

В работах [2, 3] были теоретически и экспериментально исследованы зависимости дозы аморфизации кремния от температуры и интенсивности имплантации в предположении возможного участия нескольких типов дефектов в процессе аморфизации. При облучении Si в интервале температур  $300\text{—}500\text{ K}$  ионами  $\text{O}^+$  с  $E=5\text{ кэВ}$  установлено, что зависимости дозы аморфизации от температуры и интенсивности имеют немонотонный характер, а в процессе принимают участие междоузельные комплексы и дивакансии.

Целью данной работы было исследование температурной зависимости дозы аморфизации в области температур ниже комнатной. Для измерения степени дефектности и определения момента перехода в аморфное состояние нами модифицирована методика измерения коэффициента отражения света от поверх-