

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  $(88 \pm 20)$  °С. 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 °С), и сравнение зависимости концентрации дивакансий от флюенса нейтронов с расчетной кинетикой их накопления при температуре облучения 88 °С (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 $Ag^+$ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 150—400 К

Жуковский П. В., Канторов С. Б., Кицак К., Мянча 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—500 К ионами  $O^+$  с  $E=5$  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-

ности имплантированных образцов, предложенная в [4]. Измерение интенсивности отраженного света ранее широко использовалось для определения степени дефектности и момента перехода из кристаллического состояния имплантированного кремния в аморфное [4-6]. Проведение измерений непосредственно

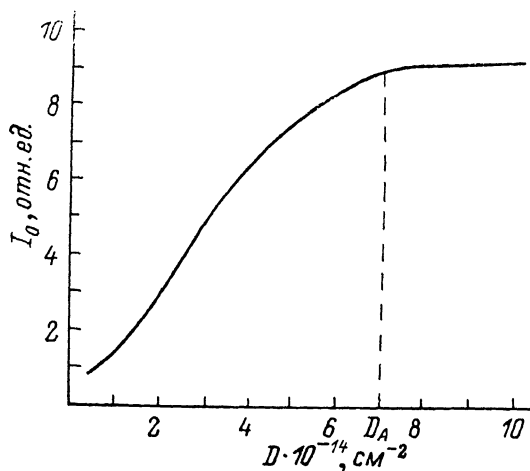


Рис. 1. Зависимость интенсивности света, отраженного имплантированной поверхностью кремния, от дозы имплантации.

$T=298 \text{ K}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $E=90 \text{ кэВ}$ ,  $j=0.5 \text{ мкА/см}^2$ .

в процессе имплантации позволило получать в отличие от [4-6] непрерывные зависимости накопления дефектов от дозы (рис. 1) и тем самым повысить точность определения дозы аморфизации при сокращении объема экспериментов. Держатель образцов позволял поддерживать температуру в интервале 150-400 К с точностью  $\pm 1 \text{ K}$ .

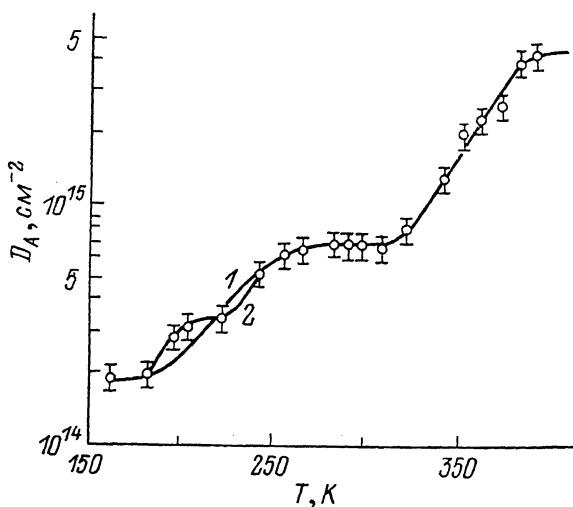


Рис. 2. Температурная зависимость дозы аморфизации кремния.

Ионы  $\text{Ag}^+$ ,  $E=90 \text{ кэВ}$ ,  $j=0.5 \text{ мкА/см}^2$ .

Электроннографические исследования в сочетании с анодным окислением кремния, имплантированного дозами  $7 \cdot 10^{14}$  при  $T=298$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при  $T=373 \text{ K}$ , показали наличие сплошного аморфного слоя до глубины, примерно равной проективному пробегу ионов. Таким образом, выход на насыщение интенсивности отраженного света соответствует переходу в аморфное состояние всего имплантируемого слоя. Зависимость дозы аморфизации кремния от тем-

пературы при имплантации ионов  $Ag^+$  с  $E=90$  кэВ,  $j=0.5$  мкА/см<sup>2</sup> приведена на рис. 2. Видно, что температурная зависимость дозы аморфизации является немонотонной с тремя участками возрастания в интервалах температур 180—250, 285—295 и 330—380 К. Третий участок возрастания совпадает с обнаруженным ранее при облучении кремния низкоэнергетическими ионами кислорода и соответствует стадии отжига междоузельных комплексов [3]. Низкотемпературная часть кривой была проанализирована на основании модели, допускающей участие нескольких типов дефектов в процессе аморфизации Si, которая количественно [2, 3] описывала полученные ранее результаты. Если предполагать, что стадии 180—250 К соответствует отжиг дефектов одного типа (рис. 2, кривая 1), то их термодинамические характеристики получают следующими: энергия активации отжига  $E_m=0.135$  эВ, частота прыжков  $r_0=30$  с<sup>-1</sup>. Столь низкая частота прыжков не характерна для кремния. Для дефектов вакансионного типа частота прыжков близка к собственной частоте колебаний решетки и составляет  $\sim 10^{11}$ — $10^{13}$  с<sup>-1</sup> [7], а для междоузельных комплексов на несколько порядков ниже [8]. Такое различие может быть обусловлено локальными колебаниями в элементарной ячейке с избыточными атомами.

На низкотемпературном участке возрастания были выделены две стадии: I — 180—200, II — 225—250 К (рис. 2, кривая 2); проведены соответствующие оценки: I —  $E_m=(0.34 \pm 0.02)$  эВ,  $r_0=10^{11}$  с<sup>-1</sup>, II —  $E_m=(0.7 \pm 0.1)$  эВ,  $r_0=10^{12}$  с<sup>-1</sup>. Энергии активации и частоты прыжков при этом находятся в разумном соответствии с физическими представлениями о процессах отжига и стабильности радиационных дефектов, а именно с увеличением температуры отжига возрастает энергия активации: I стадия —  $T_{отж} \sim 190$  К,  $E_m=(0.34 \pm 0.02)$  эВ, II —  $T_{отж} \sim 240$  К,  $E_m=(0.7 \pm 0.1)$  эВ, IV —  $T_{отж} \sim 360$  К,  $E_m=(0.75 \pm 0.1)$  эВ (что совпадает с результатами [3] и интерпретировано нами как отжиг междоузельных комплексов), V [3] —  $T_{отж} \sim 450$  К,  $E_m=(1.34 \pm 0.3)$  эВ (отжиг дивакансий).

Нам представляется, что на I стадии происходит отжиг моновакансий, для которых в нейтральном зарядовом состоянии энергия активации отжига  $E_m=(0.33 \pm 0.03)$  эВ [7], на II — отжиг либо неориентирующихся (находящихся вблизи других дефектов) дивакансий [7], либо междоузельных дефектов [8], на III (285—295 К) — отжиг дефектов с большим коэффициентом введения, так как при этом возрастает доза аморфизации в 2.5 раза. Однако определить термодинамические характеристики дефекта по результатам эксперимента не представляется возможным из-за узости интервала отжига.

Таким образом, проведенные исследования температурной зависимости дозы аморфизации кремния в интервале температур 150—400 К служат подтверждением того, что она носит немонотонный характер, определяемый отжигом четырех дефектов, причем стадия отжига 330—380 К в точности соответствует обнаруженной ранее при облучении низкоэнергетическими ионами кислорода [3].

#### Список литературы

- [1] Morehead F. F., Crowder B. L. // Rad. Eff. 1970. V. 6. N 1. P. 27—32.
- [2] Жуковский П. В., Стельмах В. Ф., Ткачев В. Д. // Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Минск, 1978. Т. 2. С. 76—79.
- [3] Zhykovskii P. V., Stelmach V. F., Tkachev V. D. // Phys. St. Sol. (a). 1979. V. 52. N 1. P. K85—K87.
- [4] Гусев В. М., Стрельцов Л. Н., Старинин К. В., Хайбуллин И. Б. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 6. С. 1191.
- [5] Баранова Е. К., Гусев В. М., Мартыненко Ю. В., Старинин К. В., Хайбуллин И. Б. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Некоторые проблемы физики твердого тела. М., 1974. С. 3—14.
- [6] Masakobu M., Takao M., Takasini T. // Japan. J. Appl. Phys. 1978. V. 17. P. 955.
- [7] Watkins G. D. // Inst. Phys. Conf. Ser. N 23. London—Bristol, 1975. P. 1—22.
- [8] Lee Y. H., Gerasimenko N. N., Corbett J. W. // Phys. Rev. B. 1976. V. 14. N 10. P. 4506—4511.

Белорусский государственный университет  
им. В. И. Ленина

Минск

Университет им. М. Кюри-Складовской  
ПНР, Люблин

Получено 21.06.1989

Принято к печати 26.02.1990