

ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕННЫХ ИОНОВ КИСЛОРОДА НА  
КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ГЕРМАНИЯ

И. П. Акимченко, В. В. Краснопевцев, Ю. В. Милотин

УДК 537.311.33' 534 + 542.65 + 548.75

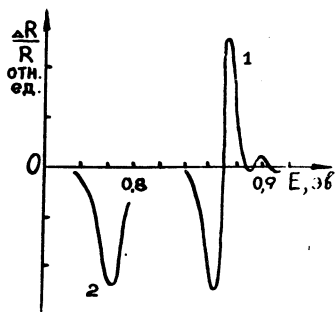
Методом электроотражения исследуется изменение кристаллической структуры германия при ионной имплантации кислорода (энергия ионов 40 кэв, доза до  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , плотность тока ионного пучка не менее 3 мка.см<sup>-2</sup>) и в процессе последующей термообработки при 500°С.

Исследование оптического поглощения аморфных пленок Ge, полученных на различных подложках методами катодного распыления или вакуумного испарения /1-3/, свидетельствует о том, что характер изменения коэффициента поглощения аморфного Ge вблизи края поглощения зависит от присутствия O<sub>2</sub> в атмосфере, окружающей подложку в процессе выращивания пленки /4/. С этой точки зрения представляется интересным проследить за влиянием внедренных атомов O на аморфизацию Ge при ионной имплантации.

Внедрение ионов <sup>16</sup>O с энергией 40 кэв в Ge производилось при комнатной температуре. Доза ионов превышала критическую дозу аморфизации и менялась в пределах  $10^{16}$ - $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ; плотность тока ионного пучка была не ниже 3 мка.см<sup>-2</sup>. Для сравнения часть пластин Ge, вырезанных из того же слитка, подвергалась бомбардировке ионами <sup>40</sup>Ar в тех же условиях. Толщина слоя Ge, содержащего основную долю внедренных атомов O, составляла примерно 500 Å.

Для исследования имплантированных слоев Ge в настоящей работе использовался метод электроотражения (ЭО). Спектры ЭО записывались при 77°К в области энергий фотонов 0,7-1,2 эв. Контрольные спектры снимались на исходных монокристаллах Ge и на аморфных пленках Ge, нанесенных на кварцевую подложку путем вакуумного испарения (рис.1, кривые 1 и 2 соответственно). Кривая 1

в области прямых переходов имеет вид, типичный для монокристалла Ge /5/; в спектре напыленной пленки наблюдается один широкий минимум, смещенный в сторону длинных волн и расположенный при 0,79 эв. Эти два предельные случая дают возможность по характеру спектров ЭО проследить за изменением структуры имплан-

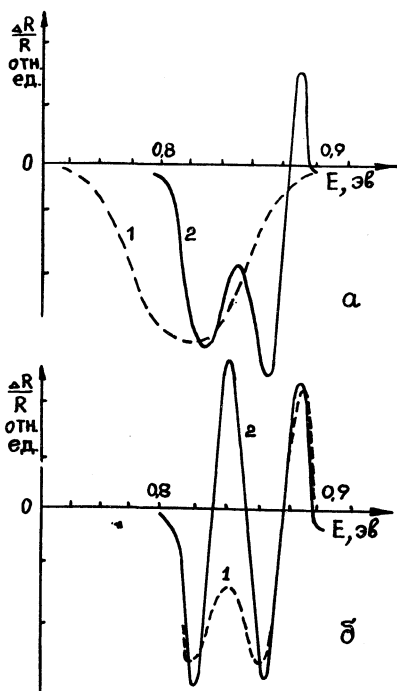


Р и с.1. Спектры электроотражения монокристалла (кривая 1) и аморфной пленки (кривая 2) Ge

тированного слоя в зависимости от условий внедрения ионов и последующей термообработки образца.

На рис. 2а приведены спектры ЭО Ge сразу после внедрения ионов Ar и O (доза около  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ , плотность тока ионного пучка несколько более  $3 \text{ мка. см}^{-2}$ ). Спектральная кривая в случае Ar (кривая 1) обнаруживает один широкий минимум при 0,82 эв. Спектр ЭО Ge, подвергнутого бомбардировке ионами O, имеет более сложную форму, причем в коротковолновой части он практически совпадает со спектром исходного монокристаллического Ge. Существенная разница между обеими кривыми, вероятнее всего, связана с различной степенью разупорядочения слоя в том и другом случаях. Тот факт, что в первом спектре наблюдается всего лишь один минимум ЭО, смещенный в сторону длинных волн, указывает на полную аморфизацию слоя при внедрении Ar. Следует подчеркнуть при этом, что подложка не дает никакого вклада в спектральную кривую. Сложная форма спектра ЭО Ge с внедренным O может служить показателем большего разнообразия структурных модификаций имплантированного слоя. Влияние рекристаллизации аморфного Ge на форму спектра ЭО

имплантированного слоя иллюстрирует рис. 26, где представлены кривые для Ge, подвергнутого бомбардировке ионами Ag (доза около  $10^{16}$  см $^{-2}$ ) с последующим отжигом в вакууме при 500°C в



Р и с.2. а) Спектры электроотражения Ge после внедрения Ag (кривая 1) и O (кривая 2), доза ионов  $10^{16}$  см $^{-2}$ . б) Спектры электроотражения имплантированного Ge: 1 - ионы Ag, доза  $10^{16}$  см $^{-2}$  с последующим отжигом при 500°C в течение 30 мин; 2 - ионы O при дозе  $5 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$

течение 30 мин (кривая 1), а также в случае внедрения O при дозе  $5 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$  (кривая 2). Под действием термообработки спектр ЭО Ge с Ag изменяется и по своей форме становится похожим на кривую ЭО для слоя Ge, имплантированного ионами O. Это обстоятельство указывает на то, что частичная рекристаллизация Ge происходит уже в процессе внедрения O, без дополнительного отжига

при повышенных температурах. При увеличении дозы ионов O до  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  спектр ЭО становится гораздо более четким и в области прямых переходов практически совпадает со спектром исходного кристалла.

Наиболее интересным фактом представляется наличие довольно сложного спектра ЭО для образца, подвергнутого бомбардировке ионами O. Такая гибридная форма спектра говорит, по-видимому, о том, что аморфизация Ge при внедрении ионов O сопровождается рекристаллизацией аморфной фазы. При этом степень рекристаллизации слоя при данной плотности тока ионного пучка возрастает с дозой внедренных ионов, на что указывают сужение минимумов ЭО и появление длинноволнового максимума.

Степень упорядочения решетки при ионном внедрении O, по-видимому, существенно зависит от плотности тока ионного пучка. Так, известно, что полоса оптического поглощения с максимумом при  $856 \text{ см}^{-1}$ , связанная с колебаниями междоузельных атомов O в решетке Ge, наблюдается после внедрения ионов O лишь при дозах до  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  (плотность тока ионного пучка 0,2–2,0 мка.см<sup>-2</sup>) /6/. В случае более высоких доз максимум при  $856 \text{ см}^{-1}$  исчезает вследствие аморфизации Ge. Однако, если плотность тока ионного пучка достигает 3 мка.см<sup>-2</sup> и более, полоса поглощения с максимумом при  $856 \text{ см}^{-1}$  наблюдается в Ge после внедрения O при дозах вплоть до  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  /7/.

Что касается неполного восстановления кристаллической структуры нарушенного слоя при последующем отжиге, то к объяснению этого интересного явления можно, по-видимому, подойти, если обратиться к /8/. В этой работе установлено, что в Si, подвергнутом бомбардировке ионами O с энергией 1 Мэв при дозах  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , после отжига при температуре выше  $1000^\circ\text{C}$  в течение 30 мин образуется так называемая суперрешетка с упорядоченным расположением атомов O в основной матрице и с связями, характерными для гексагональной окиси Si. Можно полагать, что особенная форма кривой ЭО в длинноволновой части спектра для O-имплантированного Ge связана с суперрешеткой O в Ge, образованной при высоких дозах ионов.

Таким образом, полученные результаты позволяют утверждать, что атомы O способствуют рекристаллизации Ge при имплантации в условиях достаточно высокой дозы ионов и плотности тока ионного

лучка. Образованию аморфной фазы препятствует возникновение валентных связей типа Ge-O-Ge, характерных для различных молекулярных комплексов, включающих в себя атомы кислорода и вакансии. Подобная картина наблюдается, по-видимому, и в случае пленок Ge, напыляемых в присутствии  $O_2$ .

Поступила в редакцию  
5 ноября 1975 г.

### Л и т е р а т у р а

1. A. H. Clark. Phys. Rev., 154, 750 (1967).
2. T. M. Donovan, E. J. Ashey, W. E. Spicer. Phys. Lett., 32A, 85 (1970).
3. K. L. Chopra, S. K. Bahl. Phys. Rev., 1E, 2545 (1970).
4. M. Závětová, S. Koc, J. Zemeč. Czechoslovak J. Phys., B22, 429 (1972).
5. I. Namakova, F. A. Germano, P. Handler. Phys. Rev., 167, 703 (1968).
6. H. J. Stein. J. Appl. Phys., 44, 2889 (1973).
7. И. П. Акимченко, В. В. Галкин, В. В. Краснопевцев, В. С. Крашенинников, Ю. В. Милотин. ФТП, 5, 2348 (1971).
8. K. Brack, G. H. Schwuttke. Intern. Conf. on Lattice Defects in semiconductors, Freiburg, 22-25 July 1974, p. 440.