

УДК 539.67

Физика

М. С. САКАНЯН, А. А. ДУРГАРЯН

### ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМИРОВАННЫХ И ГАММА-ОБЛУЧЕННЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

В работе исследуются временные зависимости поглощения ультразвука и удельного сопротивления в деформированных и облученных кристаллах кремния. Показано, что после облучения с течением времени удельное сопротивление и поглощение ультразвука уменьшаются, а коэффициент торможения дислокаций возрастает. Приводятся объяснения наблюдаемых явлений.

Такие физические свойства элементарных полупроводниковых кристаллов, как упругость, пластичность, электропроводность, существенно зависят от их дефектной структуры.

В настоящее время существует ряд работ, посвященных действию дислокаций и ионизирующего излучения на электрические и механические свойства кристаллов со структурой алмаза [1—3].

Целью настоящей работы являлось исследование временной зависимости электрических и механических характеристик деформированных и гамма-облученных кристаллов кремния.

Динамика дислокаций исследовалась эхо-импульсным методом на частоте 20 МГц, а электропроводность—четырёхзондовым методом.

Образцы вырезались из бездислокационных слитков n-кремния с удельным сопротивлением  $\rho \sim 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  в виде брусков прямоугольной формы с длинным ребром вдоль оси [111], а с двумя другими—вдоль [110] и [112]. Предварительно определялись удельное сопротивление и скорость распространения и поглощения ультразвука в бездислокационных необлученных кристаллах. В дальнейшем образцы деформировались четырехточечным изгибом под нагрузкой  $10 \text{ кг/мм}^2$  при температуре  $800^\circ\text{C}$ , после чего изучались возврат скорости и поглощения ультразвука, а также удельного сопротивления образцов.

Как видно из рис. 1, поглощение ультразвука после деформации ( $N_d \sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ ) увеличивалось почти в 2,5 раза относительно поглощения в бездислокационном кристалле. С течением времени поглощение уменьшалось и после  $\sim 60$  часов достигало своего равновесного значения. Скорость ультразвука после деформации уменьшалась на 6% и, увеличиваясь со временем, достигала своего равновесного значения в течение  $\sim 60$  часов (рис. 1).

Если после пластической деформации поглощение и скорость ультразвука меняются монотонно, то после облучения образцов от источника  $\text{Co}^{60}$  дозой  $2 \cdot 10^3 \text{ Р}$  монотонность изменения поглощения нарушается: на первом этапе скорость изменения поглощения составляет  $4 \cdot 10^{-7} \text{ сек}^{-1}$ , а на втором— $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ сек}^{-1}$ .

Эти результаты говорят о том, что радиационные дефекты сначала

приводят к значительному увеличению поглощения ультразвука, которое затем резко понижается в результате их быстрого отжига.

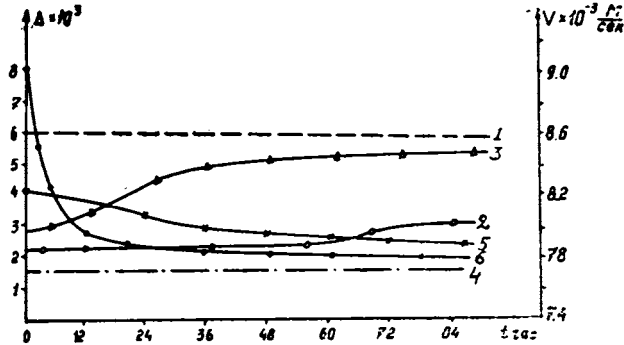


Рис. 1. Временная зависимость скорости ультразвука (1—до деформации, 2—после деформации, 3—после облучения) и его поглощения (4—до деформации, 5—после деформации, 6—после облучения).

Известно, что при облучении в кристаллах кремния образуются дефекты двух типов: близкие пары Френкеля, которые легко рекомбинируют, и дефекты, разделенные расстояниями, превышающими радиус действия сил притяжения, вызванных искажением решетки и электростатическим взаимодействием.

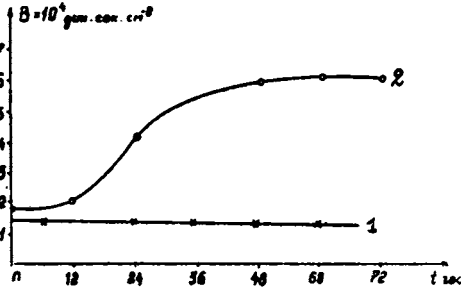


Рис. 2. Временная зависимость коэффициента торможения дислокаций: 1—до облучения, 2—после облучения.

Последние совершают беспорядочное движение до тех пор, пока не окажутся в пределах сферы захвата вакансий [4]. По-видимому, этим и обусловлены разные скорости изменения поглощения ультразвука с течением времени.

Известны три механизма восстановления поглощения и скорости ультразвука в деформированных и облученных кристаллах:

аннигиляция, перераспределение и закрепление дислокаций.

Так как барьер Пайерлса в кристаллах с ковалентными связями достаточно велик и при комнатной температуре дислокации малоподвижны, первый и второй механизмы старения маловероятны. Предполагая, что старение происходит с помощью третьего механизма, из временной зависимости дефекта модуля мы рассчитали изменение длин дислокационных сегментов, которые принимают свое равновесное значение через  $\sim 60$  часов. За такое же время поглощение ультразвука также достигает своего равновесного значения. При этом длина дислокационных сегментов уменьшается от  $2,8 \cdot 10^{-4}$  до  $0,73 \cdot 10^{-4}$  см, т. е. плотность точек закрепления на единицу длины дислокации меняется от  $0,36 \cdot 10^4$  до  $1,36 \cdot 10^4$  см $^{-1}$ . По теории Гранато-Хиката-Люкке [5] рассчитано число дефектов, мигрирующих к дислокациям в течение 60 часов. Получено: на единицу длины дислокации число точек закрепления должно увеличиться на  $8 \cdot 10^3$  см $^{-1}$ , что по порядку величины соответствует изменению плотности точек закрепления за время установления равновесного состояния системы.

Как следует из вышеприведенных результатов, при старении уменьшается длина дислокационных сегментов, увеличивается скорость и уменьшается поглощение ультразвука. При этом, согласно теории [5], должен изменяться также коэффициент торможения дислокаций. Из-

вестно, что в кристаллах с ковалентными связями движение дислокаций лимитируется движением геометрических перегибов, причем при комнатной температуре в амплитуднонезависимой области поглощения ультразвука двойные перегибы не образуются (энергия образования двойных перегибов равна 2,2 эВ). Из этого следует, что торможение дислокаций в кристаллах кремния обусловлено вязким движением перегибов. Исходя из этого и пользуясь условием  $a \cdot \rho_0 \sim 0,05$  [6] ( $\rho_0$ —плотность перегибов,  $a$ —параметр решетки), получаем, что  $\rho_0 = 1,25 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ .

Подвижность перегибов была рассчитана по формуле  $\mu = \frac{1}{B a \rho_0}$  [6, 7],

где  $B$ —коэффициент вязкости.

С другой стороны, при больших плотностях перегибов теории КГЛ и геометрических перегибов для поглощения ультразвука [6, 7] дают одинаковые значения с точностью до 0,15%. С учетом этого обстоятельства рассчитан коэффициент торможения дислокаций до и после облучения.

Как видно из рис. 2, до облучения коэффициент торможения со временем почти не меняется, т. е. старение существенно не влияет на коэффициент торможения, а после облучения коэффициент торможения увеличивается со временем, что обусловлено уменьшением длины дислокационных сегментов и подвижностью перегибов (подвижность перегибов уменьшается почти в 3 раза). Из этих результатов можно заключить, что изменение коэффициента торможения с течением времени после облучения контролируется изменением подвижности геометрических перегибов. Так как поглощение и скорость ультразвука измерялись при постоянной температуре, изменение коэффициента торможения нельзя объяснить фоновым механизмом. Сопоставление полученных результатов с теорией КГЛ [8] показывает, что изменение коэффициента торможения после облучения обусловлено подвижными точечными дефектами, связанными с дислокациями.

После гамма-облучения кристаллов кремния удельное сопротивление увеличивается в 2 раза. Это обусловлено уменьшением плотности основных носителей и их подвижности. Измерения удельного сопротивления в зависимости от температуры до и после облучения показали, что после облучения в кристалле образовался дефектный уровень 0,22 эВ. Это и привело к увеличению удельного сопротивления от 180 до 400 Ом.см. Если предположить, что отжиг радиационных дефектов происходит за счет рекомбинации точечных дефектов, то при равновесном состоянии согласно [7] из числа образовавшихся после облучения дефектов отожглось  $\approx 27\%$ .

Из изменения скорости ультразвука и длин дислокационных сегментов следует, что при равновесном состоянии доля закрепляющих дефектов составляет  $\sim 0,04\%$ , а это слишком мало по сравнению с долей рекомбинированных дефектов. Так как после облучения с течением времени удельное сопротивление не достигает своего первоначального значения, можно предположить, что после облучения в кристалле осталось достаточно дефектов с акцепторными уровнями, которые составляют  $\sim 40\%$  от всех образовавшихся дефектов. Эти оценки верны при условии, что подвижность носителей заряда при введенном количестве радиационных дефектов ( $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) существенно не меняется. Остальные  $\sim 30\%$  дефектов не влияют на электропроводимость и скорость ультразвука.

Данные результаты позволяют предположить, что старение в кристаллах кремния происходит не только за счет миграции дефектов к дислокациям, но и за счет образования комплексов и аннигиляций френкелевских пар.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кайпназаров Д. К., Хизниченко Л. П. В кн.: Радиационные нарушения в твердых телах и жидкостях. Ташкент: ФАН, 1967, с. 39—41.
2. Сирота Н. Н., Березина Т. М. В кн.: Радиационная физика кристаллов и р-он переходов. Минск.: Наука и техника, 1972, с. 40—43.
3. Кайпназаров Д. К., Доморяд И. А. В кн.: Радиационные нарушения в твердых телах и жидкостях. Ташкент: ФАН, 1967, с. 29—31.
4. Mac-Kay J., Klontz E. I. Appl., Phys., 1959, v. 30 pp. 1269, 1278.
5. Granato A., Hikata A. and Lücke K. Acta Metallurgica, 1958, v. 6, pp. 470—480.
6. Southgate P. and Attard A. J. Appl. Phys., 1960, v. 34. № 4, Part 1.
7. Гранатто А., Люкке К. Физическая акустика. Под ред. Мезона, V, 1969, т. 4, ч. А, с. 261—319.

## Մ. Ս. ՍԱՔԱՆՅԱՆ, Ա. Հ. ԳՈՒՐԳԱՐՅԱՆ

ԳԵՏՈՐԿԱՅՎԱԾ ԵՎ ԳԱՄՄԱ ՃԱՌԱԳԱՅՅՓՄԱՆ ԵՆԹԱՐԿՎԱԾ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ  
ԷԼԵԿՏՐՈՎԱՆ ԵՎ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ  
ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ԿԱԽՈՒՄԸ

## Ա մ փ ո փ ու մ

Աշխատանքում ուսումնասիրվում են ուլտրաձայնի կլանման և տեսակարար դիմադրության ժամանակային կախումները դեֆորմացված և ճառագայթված սիլիցիումի բյուրեղներում: Ստացված է, որ ճառագայթումից հետո տեսակարար դիմադրությունը և ուլտրաձայնի կլանումը ժամանակի ընթացքում նվազում են, իսկ դիսլոկացիաների արգելակման գործակիցն աճում է: Տված է դիսլոկո էրեուլյթների բացատրությունը: