

- [1] Смирнов В. И. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л.: Наука, 1981. 235 с.
 [2] Владимиров В. И., Кусов А. А. ФТТ, 1976, т. 18, № 6, с. 1523—1528.
 [3] Wiedersich H. J. Appl. Phys., 1962, vol. 33, N 3, p. 854—858.

Физико-технический институт
 им. А. Ф. Иоффе АН СССР
 Ленинград

Поступило в Редакцию
 17 декабря 1987 г.
 В окончательной редакции
 26 мая 1988 г.

УДК 535.37

Физика твердого тела, том 30, в. 10, 1988
 Solid State Physics, vol. 30, № 10, 1988

СИСТЕМАТИКА ЛИНИЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРЕМНИИ

А. Н. Изотов, Э. А. Штейнман

В 1976 г. в пластически деформированных образцах кремния обнаружен характерный спектр дислокационной фотолюминесценции (ДФЛ) [1] в области 0.8—1.0 эВ. Наиболее стабильно в спектре ДФЛ воспроизводятся четыре линии, обозначенные в [1] Д1—Д4 с энергиями соответственно 0.807, 0.870, 0.935, 1.0 эВ. В дальнейшем было обнаружено, что распределение интенсивности в спектре ДФЛ в значительной мере зависит от условий деформации: температуры деформации, скорости охлаждения после деформации, наличия и величины деформирующего напряжения в процессе охлаждения [2].

Электронно-микроскопическое исследование структуры образцов, подвергнутых разным режимам деформации, обнаружило существенное влияние режима деформации на структуру дислокаций. В частности, понижение температуры деформации приводит к выпрямлению сегментов дислокаций, расположенных вдоль эквивалентных направлений $\langle 110 \rangle$ в плоскости скольжения [3]. Исследование микроструктуры ядра дислокаций показало, что практически все дислокации в кремнии имеют расщепленную конфигурацию, причем величина расщепления также зависит от режима деформации [4, 5].

Наиболее эффективное воздействие на структуру дислокаций оказывает режим так называемой двухстадийной деформации [3], заключающийся в предварительном введении дислокаций при повышенных температурах и последующей деформации при низких температурах и высоких напряжениях. Такая процедура мало меняет электрические свойства дислокаций, однако приводит к разительным изменениям в спектрах ДФЛ. Особенно заметные превращения испытывает линия Д4, которая как бы расщепляется на две компоненты: длинноволновую и коротковолновую, положение которых зависит от величины напряжения во второй стадии деформации [6]. Линия Д3 испытывает аналогичные Д4 изменения, однако ее интенсивность резко падает, что затрудняет ее исследование. Линии Д1 и Д2 не испытывают сколько-нибудь заметного сдвига или расщепления, однако в некоторых образцах после второй стадии деформации их интенсивность заметно падает [6].

Важно отметить, что длинноволновая компонента Д4, обозначенная нами Дх, в своем смещении в зависимости от нагрузки проходит ряд дискретных положений [6]. Спектроскопическое исследование этой линии с большим разрешением показало, что она представляет суперпозицию узких линий [7]. Таким образом, изменение положения линии означает постепенную последовательную перекачку интенсивности из одних компонент в другие.

Коротковолновая компонента линии Д4 остается размытой вплоть до предельных нагрузок, достижимых во второй стадии деформации, при которых она стягивается в относительно узкую полосу, занимающую самое коротковолновое положение (1.013 эВ) и обозначенную нами Д0 [6]. Можно предположить, что линия Д0 является границей дискретных состояний, на которые расщепляется линия Д4. Именно такое поведение линий обнаружено нами ранее в спектре ДФЛ германия [8].

Положение максимумов линий;
рассчитанных по формуле (1), — E^*
и их экспериментальные значения — E

Номер линии	E^* , мэВ	E , мэВ	Обозначение
H7	525.4	540 [9]	
H6	581.8		
H5	631.8		
H4	675.9		
H3	715	709 [9]	
H2	749.5		
H1	780	780	
1	807	807	Д1
2	831		
3	852		
4	871	870	Д2
5	887	887	} [7] Дх
6	902	904	
7	915	910	
8	926	925	
9	936	935	Д3
10	945	947	} [7] Дх
11	953	953	
12	960	960	
13	966	965	
14	971	971	
15	976	976	
16	980	980	
17	984	984	
18	988	988	
19	991		
24	1002	1000	Д4
∞	1013	1013	Д0

Примечание. Линии с номерами, начинающимися с буквы Н, предсказаны по формуле (1) в длинноволновой части спектра; их номера не имеют отношения к показателю степени в формуле (1).

Используя данные о положении линий тонкой структуры, приведенные в [7], мы получили эмпирическую формулу, описывающую их положение и имеющую вид, аналогичный формуле, полученной для германия [8]

$$E_n = E_0 - \alpha/\beta^n \quad (1)$$

E_n — положение максимума линии с номером n ; E_0 — значение граничной энергии, к которой сходятся линии. В нашем случае E_0 совпадает с положением ранее обнаруженной линии Д0. $\beta = 1.131$, а α зависит от того, какой линии приписать номер 1. В таблице приведены значения энергий линий, рассчитанные по формуле (1) из предположения, что $E = 807$ мэВ ($\alpha = 233$ мэВ), и экспериментальные значения энергий линий, полученные разными авторами. Из этой таблицы видно, что формула (1) хорошо описывает и первоначально обнаруженные линии Д1—Д4.

Это показывает, что дислокационные оптические центры (ДОЦ), ответственные за линии (ДФЛ), связаны с различными структурными дис-

локационными конфигурациями, отличающимися некоторым дискретным параметром. Каждый ДОЦ характеризуется определенной величиной параметра, кратной его минимальному значению. Степень кратности связана с номером линии ДФЛ.

Не все структурные конфигурации являются стабильными. Как уже говорилось выше, часть из них можно создать в процессе двухстадийной деформации и затем «заморозить», охлаждая образец под нагрузкой [6]. Отжиг образцов с такими нестабильными дислокациями при температуре $\geq 265^\circ\text{C}$ приводит к обратной релаксации структуры в исходные состояния и частичному восстановлению исходных спектров ДФЛ. Это относится главным образом к компонентам расщепленной линии Д4. Что касается линий Д1 и Д2, то их интенсивность, если она уменьшилась в процессе второй стадии деформации, не восстанавливается в процессе отжига при 265°C . Для их восстановления необходим высокотемпературный отжиг при 600°C [6].

Из таблицы видно, что некоторые из предсказанных формулой (1) линий отсутствуют в эксперименте. Однако исследование большого числа различных образцов кремния показывает, что в ряде случаев имеются слабые размытые линии в соответствующих областях спектра. Поскольку их появление носит случайный характер, эти линии не включены в таблицу. Кроме того, формула (1) позволяет предсказать ряд новых линий с длинноволновой стороны от Д1. Одна из этих линий (780 мэВ) возникает достаточно часто в сильно деформированных образцах. В работе [9] приведены спектры образцов кремния, деформированных кручением при высоких температурах, которые содержат ряд длинноволновых линий. Положение этих линий удовлетворительно согласуется с предсказанным формулой (1).

Таким образом, все сказанное позволяет предположить, что принципиально возможен ряд структурных конфигураций дислокаций, имеющих общую природу, которым соответствуют определенные линии в спектре ДФЛ. Внутри этого набора возможны обратимые структурные переходы из одних конфигураций в другие. Часть из этих конфигураций более стабильна, чем другие. Таким стабильным конфигурациям соответствуют, в частности, линии Д1—Д4.

Л и т е р а т у р а

- [1] Дроздов Н. А., Патрин А. А., Ткачев В. Д. Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 23, № 11, с. 651—653.
- [2] Осипьян Ю. А., Ртищев А. М., Штейнман Э. А. ФТТ, 1984, т. 26, № 6, с. 1772—1776.
- [3] Wessel B., Alexander H. Phil. Mag., 1977, vol. 35, p. 1523—1536.
- [4] Ray I. L. F., Cockayne D. J. H. Phil. Mag., vol. 22, p. 853—856.
- [5] Alexander H., Eppenstein H., Gottschalk H., Wendler S. J. Microscopy, 1980, vol. 11B, p. 13—21.
- [6] Izotov A. N., Steinman E. A. Phys. St. Sol. (a), 1987, vol. 104, p. 277—284.
- [7] Sauer R., Weber J., Stolz J. et al. Appl. Phys., 1985, vol. A36, p. 1—13.
- [8] Изотов А. Н., Колубакин А. И., Шевченко С. А., Штейнман Э. А. ДАН СССР, 1988, в печати.
- [9] Gwinner D., Labush R. Phys. St. Sol. (a), 1981, vol. 65, p. K99—K101.

Институт физики твердого тела АН СССР
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
2 июня 1988 г.