

УДК 532+548

ФИЗИКА

А. А. Дургарян

**Спектр релаксации термоактивационного движения
дислокаций в условиях ультразвукового нагружения**

(Представлено академиком АН Армянской ССР Г. С. Саакяном 17/XII 1982)

Термоактивационные процессы, протекающие в кристаллах, достаточно хорошо исследованы; выявлен спектр релаксации процессов, обусловленных не дислокациями (¹). Однако несмотря на многочисленные работы по исследованию дислокационного поглощения ультразвука до сих пор не было установлено наличие характерного спектра релаксации термоактивационного движения дислокаций в условиях ультразвукового нагружения. Разработанный нами метод исследования поглощения ультразвука (^{2,3}) и проведенные этим методом систематические исследования динамики дислокаций в кристаллах с различной природой сил связи при ультразвуковом воздействии в килогерцевом диапазоне частот позволили установить спектр релаксации процессов, обусловленных дислокациями.

На основе этих исследований (⁴⁻¹⁴) установлено, что на частотной шкале (при $T = \text{const}$) максимумы поглощения образуют спектр релаксации, единый для кристаллов с различной природой сил связи. На этом спектре выделяются четыре полосы поглощения, в пределах которых располагаются максимумы, обусловленные релаксационными процессами дислокационного происхождения одного типа.

В спектре релаксации для 500°K (рисунок, таблица) в окрестности частот 10^{10} с⁻¹ располагаются максимумы, обусловленные дефектами в поверхностном слое кристаллов. Такие максимумы обнаружены в кристаллах с ковалентными связями (Ge, Si). В интервале частот $5 \cdot 10^6$ — 10^8 с⁻¹ располагаются максимумы типа Бордони (в Si, Ge, SiO₂, Bi₂Te₃). Эти максимумы расщеплены на два компонента (кроме максимума для SiO₂), один из которых обусловлен движением перегибов на винтовых дислокациях (или преимущественно винтовой компонентой), а другой—движением на краевых дислокациях (или преимущественно краевыми компонентами). В эту область частот попадают также пики Бордони, наблюдаемые в Au, Pt, Pd, Cu (¹⁵) и др. (таблица). В наиболее широкую область частот ($7 \cdot 10^5$ — $3 \cdot 10^3$ с⁻¹) попадают максимумы поглощения, обусловленные взаимодействиями дислокаций с точечными дефектами, а точнее, движением геометрических и тепловых перегибов в поле точечных дефектов. В эту группу входят максимумы, наблюдаемые в кристаллах Pb, Zn, Bi, LiF, Ge, Si, SiO₂. Их энергии активации лежат между 0,2—0,6 эВ. В эту область частот попадают также пики, наблюдаемые в Ge (^{16,17}),

Nb, Mo, W (¹⁸) и др. В область низких частот ($1-10^2$ Гц) на спектр релаксации попадают максимумы поглощения, обусловленные образованием (Ge, $H=0,8$ эВ) и движением геометрических перегибов (Si, $H=0,86$ и $H=1,1$ эВ, а также Ge, $H=1,1$ эВ (¹⁶)). Таким образом, в спектре релаксации максимумы дислокационного поглощения располагаются по механизмам процессов, обуславливающих эти пики независимо от материала, и едины для всех кристаллов с различной природой сил связи. Следовательно, спектр релаксации является универсальной шкалой, позволяющей определить механизмы процессов, обуславливающих дислокационно-релаксационные максимумы поглощения ультразвука в данном кристалле.

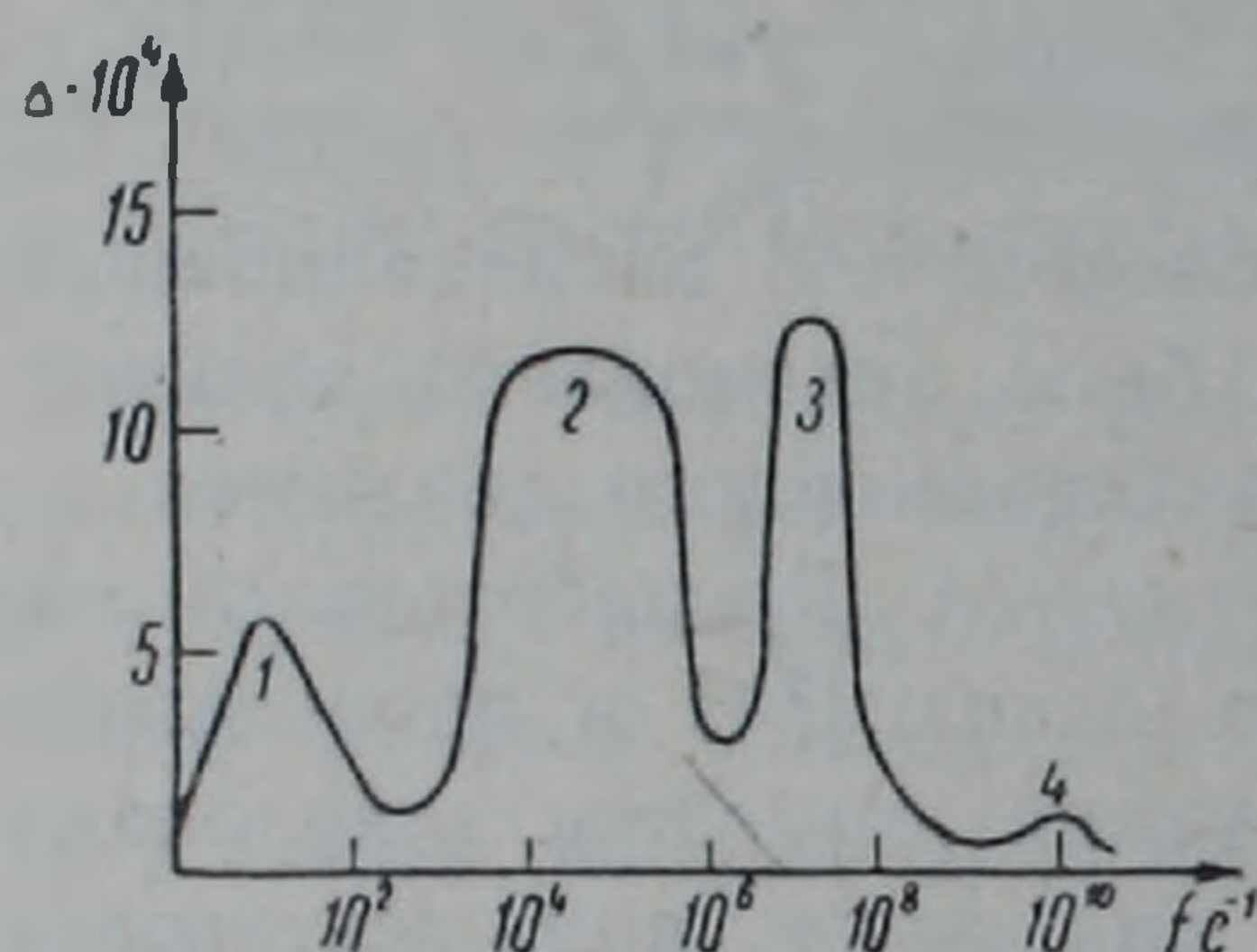


Рис. 1. Спектр релаксации дислокационных максимумов поглощения ультразвука ($T=500^\circ\text{K}$): 1—пики, обусловленные образованием и движением перегибов; 2—пики, обусловленные взаимодействием дислокаций с точечными дефектами; 3—пики типа Бордони; 4—пики, обусловленные дефектами поверхностного слоя

В кристаллах Ge и Si наблюдаются серии пиков поглощения с энергиями активации процессов от 0,04 до 1,1 эВ, которые объясняются движением геометрических перегибов, тогда как согласно оценкам Лабуша потенциал Пайерлса второго рода для винтовых дислокаций в кремнии составляет 0,047 эВ, а в германии—0,04 эВ. Это говорит о том, что энергия активации наблюдаемых пиков поглощения реальных кристаллов не всегда соответствует высоте барьера Пайерлса второго рода. Как следует из спектра релаксации, энергии активации скорее всего характеризуют высоту барьера Пайерлса реального кристалла. Она зависит от типа дислокаций, а также примесного состава внедрения и замещения, меняющего ширину перегибов, а следовательно, и напряжение перестройки атомов при движении перегибов. Мы считаем, что вышеуказанные причины приводят к появлению серии дислокационно-релаксационных максимумов поглощения, обусловленных движением перегибов с различными энергиями активации в кристаллах Ge и Si. По-видимому, этим и можно объяснить наблюдаемые в литературе расхождения в значениях энергий активации движения перегибов.

Распределение дислокационно-релаксационных максимумов поглощения по механизмам процессов в спектре релаксации

Элемент	Пики, обусловленные дефектами поверхностного слоя		Пики Бордони		Пики, обусловленные взаимодействиям дислокаций с точечными дефектами		Пики, обусловленные образованием и движением перегибов	
	с^{-1}	НэВ	с^{-1}	НэВ	с^{-1}	НэВ	с^{-1}	НэВ
Si	$9,5 \cdot 10^9$	0,49	$7 \cdot 10^7$ $1,3 \cdot 10^8$	0,08 0,12	$7,2 \cdot 10^4$	0,38	16	0,86
Ge	$9,3 \cdot 10^9$	0,35	$7 \cdot 10^7$ $3 \cdot 10^7$ $2,3 \cdot 10^7$ $4 \cdot 10^8$	0,2 0,047 0,08 0,15	$2,2 \cdot 10^4$	0,64	1,2 $2,9 \cdot 10^2$	1,1 0,8
Pb	—	—	—	—	$1 \cdot 10^4$ $3 \cdot 10^3$ $1 \cdot 10^6$ $1 \cdot 10^4$ $6,8 \cdot 10^4$	0,15 ⁽¹⁶⁾ 0,25 ⁽¹⁶⁾ 0,62 ⁽¹⁷⁾ 0,85 ⁽¹⁷⁾ 0,18		
Zn	—	—	—	—	$2,6 \cdot 10^4$ $2,9 \cdot 10^5$	0,33 0,4		
Bi	—	—	—	—	$3,7 \cdot 10^5$	0,2		
LiF	—	—	—	—	$3,2 \cdot 10^4$ $3,6 \cdot 10^4$ $6,5 \cdot 10^4$ $6,1 \cdot 10^5$	0,2 0,25 0,36 0,6		
Bi ₂ Te ₃	—	—	$1,4 \cdot 10^7$ $4 \cdot 10^6$	0,22 0,13				
SiO ₂	—	—	$5 \cdot 10^7$	0,06	$5,7 \cdot 10^4$ $3,4 \cdot 10^3$ $7 \cdot 10^3$	0,4 0,5 0,6		
Au	—	—	$9 \cdot 10^8$	0,16 ⁽¹⁵⁾				
Pd	—	—	$9 \cdot 10^8$	0,26 ⁽¹⁵⁾				
Pt	—	—	10^7	0,19 ⁽¹⁵⁾				
Cu	—	—	$2,4 \cdot 10^8$	0,13 ⁽¹⁵⁾				
W(α_1)	—	—	$7,5 \cdot 10^7$	0,21 ⁽¹⁸⁾				
W(α_2)	—	—	$2 \cdot 10^7$	0,17 ⁽¹⁸⁾				
W(β_1)	—	—	—	—	$1 \cdot 10^5$	0,6 ⁽¹⁸⁾		
Nb(α_1)	—	—	$3 \cdot 10^8$	0,25 ⁽¹⁸⁾				
Nb(α_2)	—	—	$2,9 \cdot 10^8$	0,35 ⁽¹⁸⁾				
Nb(β_2)	—	—	—	—	$1,4 \cdot 10^6$	0,48 ⁽¹⁸⁾		
Nb(β_3)	—	—	—	—	$6,5 \cdot 10^3$	0,66 ⁽¹⁸⁾		
Mo(β_2)	—	—	—	—	6 · 10	0,46 ⁽¹⁸⁾		
Ta(α_1)	—	—	$3 \cdot 10^8$	0,25 ⁽¹⁸⁾				

Из спектра релаксации следует, что в ГЦК и ГПУ металлах и в ионных кристаллах не наблюдаются пики, обусловленные образованием перегибов. Последнее объясняется тем, что уже при гелиевых температурах имеется достаточное количество двойных перегибов, лимитирующих движение дислокаций. В ионных кристаллах не наблюдаются также пики типа Бордони. Как видно из табл. 1, серия β -пигов поглощения в ОЦК металлах (W, Nb, Mo), обусловленных движением дислокаций в поле точечных дефектов, располагается в соответствующем диапазоне частот. α -пики в ОЦК металлах на спектре релаксации соответствуют пикам типа Бордони. Без какого-либо доказательства такое предположение ранее было высказано Чамберсом ⁽¹⁸⁾. γ -пики в ОЦК металлах при 500°К наблюдаются на частотах $1\text{—}10^2 \text{ с}^{-1}$, т. е. на спектре релаксации в том интервале частот, где пики поглощения обязаны образованию и диффузному движению перегибов. В ОЦК металлах, по-видимому, должны также наблюдать-

ся максимумы поглощения, обусловленные поверхностными дефектами, так как в этих кристаллах появляются направленные связи.

Таким образом, в установленный спектр релаксации хорошо вписываются не только наблюдаемые нами релаксационные максимумы дислокационного происхождения, но и максимумы поглощения, наблюдаемые другими авторами (¹⁵⁻¹⁸).

Из этого следует, что динамика дислокаций при ультразвуковом воздействии в кристаллах с различной природой сил связи подчиняется общим закономерностям несмотря на существующие особенности их движения в этих кристаллах.

Следовательно, спектр релаксации является основой для ультразвуковой релаксационной спектроскопии термоактивационного движения дислокаций и распределения барьеров, взаимодействующих с дислокациями.

Ереванский государственный университет

Ա. Հ. ԴՈՒՐԳԱՐՅԱՆ

Ուլտրաձայնի ազդեցության տակ դիսլոկացիաների թերմոակտիվացված շարժման ռելաքսացիոն սպեկտրը

Սիստեմատիկ ուսումնասիրությունները հնարավորություն տվեցին հաստատելու, որ հաստատուն ջերմաստիճանում դիսլոկացիոն բնույթ ունեցող ուլտրաձայնի կլանման մաքսիմումները կազմում են ռելաքսացիոն սպեկտր, որը միասնական է տարբեր բնույթի քիմիական կապեր ունեցող բյուրեղների համար:

Սպեկտրի հաճախային սանդղակի վրա առանձնանում է չորս կլանման շերտ, որոնցից յուրաքանչյուրի տիրույթում ընկնում են միևնույն բնույթի ռելաքսացիոն մաքսիմումներ: $T=500$ К-ի համար ռելաքսացիոն սպեկտրում 10^{10} հց հաճախությունների տիրույթում ընկնում են բյուրեղի մակերևույթի խանգարումներով պայմանավորված մաքսիմումները, 10^6-10^8 հց տիրույթում՝ Բորդոնի տիպի մաքսիմումները, 10^3-10^5 հց տիրույթում՝ դիսլոկացիաների և կետային խանգարումների փոխազդեցությամբ պայմանավորված մաքսիմումները, $1-10^2$ հց տիրույթում ընկնող կլանման մաքսիմումները պարտական են դիսլոկացիաների վրա ծովածքների առաջացմանը և նրանց շարժմանը: Ռելաքսացիոն սպեկտրի հայտնաբերումը ուղի է բացում ուլտրաձայնի ազդեցության տակ դիսլոկացիաների թերմոակտիվացված շարժման սպեկտրոսկոպիայի ստեղծմանը:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ К. Зинер, в кн.: Упругость и неупругость металлов, ИЛ, М., 1980. ² Е. Г. Швидковский, А. А. Дургарян, Науч. докл. высшей школы (физ.-мат. науки), вып. 5 (1958). ³ А. А. Дургарян, В. В. Есаян, А. Г. Егиазарян, ПТЭ, вып. 4 (1975). ⁴ Е. Г.

Швидковский, А. А. Дургарян, Науч. докл. высшей школы (физ.-мат. науки), вып. 5 (1958). ⁵ А. А. Тадевосян, А. А. Блистанов, А. А. Дургарян, Изв. АН АрмССР. Физика, т. 8, вып. 5 (1973). ⁶ А. А. Дургарян, М. С. Саканян, Р. С. Гардиян и др., Изв. АН АрмССР. Физика т. 9, вып. 5 (1974). ⁷ С. В. Карапетян, А. А. Дургарян, Изв. АН АрмССР. Физика, т. 14, вып. 2 (1979). ⁸ А. А. Дургарян, В. В. Есаян, Изв. АН АрмССР. Физика, т. 11, вып. 3 (1976). ⁹ А. А. Дургарян, М. А. Фахем, Изв. АН АрмССР. Физика, т. 11, вып. 2 (1976). ¹⁰ А. А. Дургарян, М. А. Фахем, Изв. АрмССР. Физика, т. 12, вып. 1 (1977). ¹¹ А. А. Дургарян, Р. С. Гардиян, ФТТ, т. 20, вып. 10 (1978). ¹² Р. С. Гардиян, А. А. Дургарян, Дислокационное поглощение ультразвука в кристаллах Ge и Si, Ереван, 1979—15 с (препринт) ЕГУ—ФТТ-17. ¹³ А. А. Дургарян, Р. С. Гардиян, Р. П. Вардапетян, ФТТ, т. 22, вып. 6 (1980). ¹⁴ В. В. Есаян, А. А. Дургарян, А. Г. Саркисян, ФизТПП, т. 15 вып. 12 (1981). ¹⁵ Ниблетт, в кн.: Физическая акустика, т. 3А, под ред. У. Мэзона, Мир, М., 1969. ¹⁶ F. Calzuchi, R. Gondi, S. Mantovani, J. Appl. Phys., v. 40 (1969). ¹⁷ K. Ohori, K. Sumino, Phys. stat. Sol. (a), v. 14 (1972). ¹⁸ Р. Чамберс. в кн.: Физическая акустика, т. 3А, под ред. Ч. Мэзона, Мир, М. 1969.