

УДК 621.382.133 : 66.084

© 1991

СТИМУЛИРОВАННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОМ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В НАПРЯЖЕННЫХ ГЕТЕРОСИСТЕМАХ

*В. Ф. Бритун, Н. Я. Горидько, В. А. Корчная,
Г. Н. Семенова, М. Я. Скороход, Ю. А. Тхорик,
Л. С. Хазан, М. К. Шейнкман*

Изучалось взаимодействие знакопеременной акустической деформации $\bar{a}_{уз} = 1 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$ на частоте 160 кГц с гетеросистемой Ge—GaAs. Методом просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской топографии установлен микро-механизм акустостимулированной релаксации внутренних механических напряжений в гетеросистеме.

Динамические процессы взаимодействия акустических колебаний допороговой мощности [1] с полупроводниковыми материалами [2], гетеросистемами [3] и приборами на их основе [4] интенсивно изучаются в последнее время. Особенно интересно влияние ультразвуковой деформации на гетероэпитаксиальные полупроводниковые структуры, существенной особенностью которых является наличие внутренних механических напряжений и специфических дислокаций несоответствия (ДН) [5]. Установление возможности акустостимулированной релаксации напряжений в полупроводниковых гетеросистемах [3] усилило практический интерес к данным исследованиям.

Тем не менее микромеханизмы взаимодействия знакопеременной акустической деформации с напряженными гетеросистемами остаются в наше время еще не выясненными, важным представляется также сопоставление наблюдаемых структурных преобразований с изменениями электрофизических свойств гетероструктур. Этим вопросам и посвящена настоящая работа.

Исследования были выполнены на гетеросистемах Ge—GaAs, дислокационной структурой которой и уровнем остаточных деформаций можно управлять изменением технологических режимов осаждения [6], поскольку значение исходного несоответствия параметров решеток для нее $f \approx 8 \cdot 10^{-4}$ относительно невелико.

Пленки Ge наносились на подложки полуизолирующего и высоколегированного (100) арсенида галлия ионно-плазменным распылением [7] при температуре 500 °С. Выбор температуры осаждения был обусловлен возможностью получения пленок с максимальной тензочувствительностью [8] и заданной дислокационной структурой [6]. Толщина пленок d_2 составила 0.2—5 мкм, толщина подложек $d_1 \approx 280$ мкм. Из одной пластины получали по 10—12 образцов с геометрическими размерами $0.3 \times 6.0 \times 12.0$ мм. Концентрация свободных дырок в пленках $1.0 \cdot 10^{18} - 1.0 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Ультразвуковая обработка проводилась по методике, аналогичной описанной в [9]. Для сопоставления с ранее исследованной радиационно-стимулированной релаксацией напряжений [10] отдельные образцы облучали γ -квантами Co^{60} потоком $\leq 8 \cdot 10^{18}$ кВ/см². Дислокационная морфо-

логия структур изучалась методами селективного травления, рентгеновской дифракционной топографии (метод Бормана) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на электронном микроскопе «Hitachi 200F» при ускоряющем напряжении 175—200 кВ. Наряду с этим измерялись механические напряжения σ методом фотоупругости [11] и микротвердость H [12].

Рентгеновская топография исходных образцов гетеросистемы Ge—GaAs ($d_2=1.35$ мкм) с сеткой дислокаций несоответствия в границе раздела слой — подложка приведена на рис. 1, а. Однако ПЭМ показала (рис. 1, б), что, хотя в этих образцах сетка ДН плоская и состоит из взаимно ортогональных полных 60-градусных дислокаций, лежащих в межфазной границе, она является нерегулярной (фрагментарной), не покрывает всю площадь интерфейса, дислокации в ней неэквидистантны и линейная плотность их значительно ниже равновесного значения $N_D \approx f/b$, равного $\sim 2 \cdot 10^4$ см $^{-1}$ для этой системы. Часть ДН, составляющих сетку, образовалась при размножении пересекающихся в узлах дислокаций по механизму Хагена—Струнка [13], который был для данной гетеросистемы проанализирован в [14]. Типичная конфигурация неустойчивого узла, способного генерировать ДН, показана на рис. 1, в.

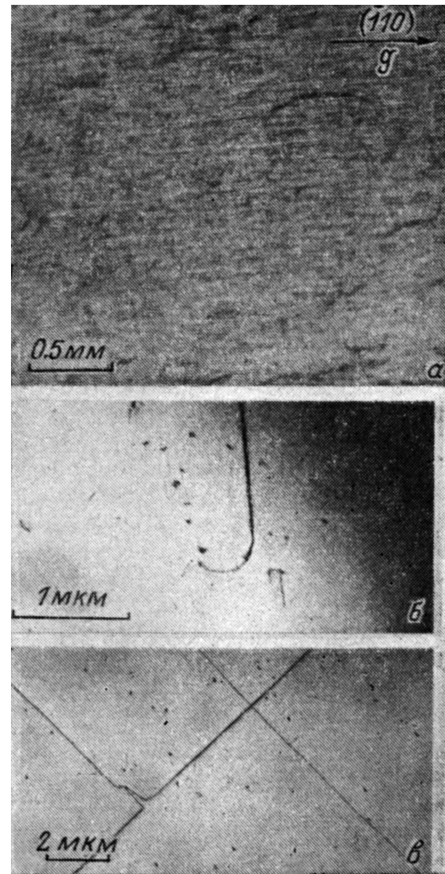


Рис. 1. Топограмма гетеросистемы Ge/(001)—GaAs после УЗО (а), электронно-микроскопическое изображение фрагмента сетки дислокаций несоответствия в гетеросистеме (б), дислокационная конфигурация с цепочкой петель после УЗО (в).

а: (220) — отражение, $\text{CuK}\alpha$ -излучение; g — вектор дифракции.

Рентгеновские топограммы образцов после УЗО в течение 3 ч с амплитудой акустической деформации $\bar{a}_{УЗ} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ выявляют аналогичную предыдущему случаю сетку из протяженных ДН, пересекающих весь

Изменение величины внутренних механических напряжений в пленках германия от величины сигнала, подаваемого при УЗО и потока Φ γ -квантов Co^{60}

$U_{Зг}, \text{В}$	$\frac{\sigma_c - \sigma_0}{\sigma_0}, \%$	$\Phi, \text{кВ}\cdot\text{см}^2$	$\frac{\sigma_\Phi - \rho_0}{\sigma_0}, \%$
2	2	$1.6 \cdot 10^{17}$	2
5	15.7	$8 \cdot 10^{17}$	8
10	17	$1.6 \cdot 10^{18}$	10
15	25	$8 \cdot 10^{18}$	19
17	39	$8.6 \cdot 10^{18}$	20

Примечание. $(\sigma_c - \sigma_0)/\sigma_0$, $(\sigma_\Phi - \rho_0)/\sigma_0$ — относительные изменения в образцах в результате УЗО и после γ -облучения соответственно.

образец. Дополнительно рассмотрены особенности, по данным рентгеновской топографии, установлено не было, что отличает УЗО от действия сверхпорогового γ -излучения Co^{60} , при котором наблюдалось интенсивное переполнение дислокаций с соответствующим изменением сеток ДН [15].

На рис. 2 приведена зависимость микротвердости пленок H от их толщины. Уменьшение микротвердости при толщинах, меньших 1.0 мкм, связано с влиянием подложки, микротвердость которой ~ 7 ГПа [16] значительно ниже, чем у пленки. Облучение γ -квантами Co^{60} потоком $\leq 8 \cdot 10^{18}$ кВ/см², как и обработка ультразвуком в течение 3 ч при $\bar{a}_{уз} \sim 1 \cdot 10^{-4}$, не приводило к заметному изменению микротвердости. В то же время следует особо подчеркнуть, что облучение таких пленок электронами с энергией ~ 200 кэВ потоком $\sim 1 \cdot 10^{16}$ эл./см², при котором на дислокациях образуется большое число двойных перегибов и происходит интенсивное скольжение дислокаций [17], уменьшает микротвердость на $\geq 20\%$

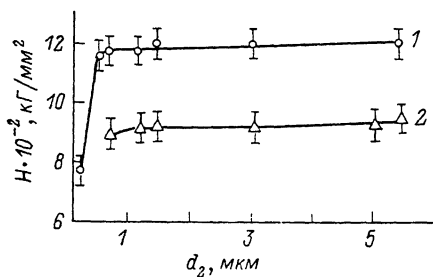


Рис. 2. Зависимость микротвердости H пленок Ge от их толщины d_2 для нагрузок 5 (1) и 10 Г (2).

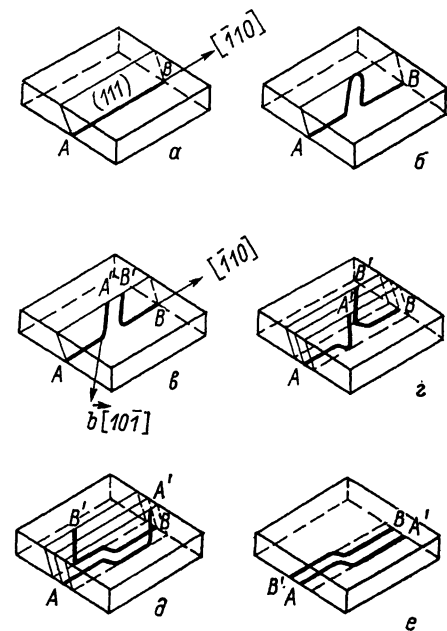


Рис. 3. Схематическое изображение этапов акустостимулированного механизма движения дислокаций, предложенного в работе.

[18]. По-видимому, существенной пластификации пленок Ge после обработки ультразвуком допороговой интенсивности не происходит и значительного числа двойных перегибов на всем протяжении дислокаций не образуется. Однако измерение внутренних напряжений методом фотоупругости (см. таблицу) показывает, что их релаксация при УЗО происходит примерно вдвое интенсивнее, чем при γ -облучении. Результаты таблицы получены для амплитуды акустической деформации $\bar{a}_{уз}$ (пропорциональной величине напряжения $U_{зг}$, подаваемого на звуковой генератор), которая составляла от $1 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$. Релаксация на 40 % была максимальной, дальнейшее увеличение $\bar{a}_{уз}$ практически не влияло на величину внутренних напряжений; аналогично облучение потоком $> 8.6 \cdot 10^{18}$ кВ/см² не приводило к дальнейшей релаксации. Большая степень релаксации при УЗО показывает, что должно происходить существенное изменение дислокационной морфологии.

Действительно, на электронно-микроскопических снимках этих же образцов после УЗО наряду с ранее существовавшими ДН, аналогичными приведенным на рис. 1, б, были обнаружены прямолинейные ДН, содержащие участки, выходящие на поверхность пленки Ge (рис. 1, в). Вблизи выхода дислокационного сегмента на поверхность часто наблюдалась характерная цепочка дислокационных петель. Дислокационные конфигурации такого типа отсутствовали в исходных образцах. При этом вплоть до максимальной амплитуды акустической деформации $\bar{a}_{уз} = 2 \cdot 10^{-4}$ зарождения новых дислокаций обнаружено не было, четко прослеживается

генетическая связь вновь образованных дислокационных конфигураций с ранее существовавшими дислокациями. Таким образом, в нерелаксированной гетероструктуре происходит стимулированное ультразвуком скольжение и размножение уже имеющихся дислокаций с последующей эволюцией продуктов размножения в поле напряжений гетерограницы.

Предлагаемый нами механизм стимулированного размножения дислокаций схематически представлен на рис. 3, где первоначально прямолинейная 60-градусная дислокация несоответствия AB (a), лежащая в гетерогранице, под действием знакопеременной ультразвуковой деформации образует в своей плоскости скольжения дислокационный диполь (b), вершина которого в случае достижения поверхности пленки разрывается (c), в результате чего возникают винтовые участки на образовавшихся дислокационных конфигурациях AA' и BB' . Эти участки под действием напряжений несоответствия совершают поперечное скольжение (z), после чего скользят в параллельных исходной плоскостях скольжения (θ), удлиняя участки дислокаций несоответствия в гетерогранице, что приводит к релаксации напряжений несоответствия. При выходе винтовых участков на торцевые поверхности пленки образуется окончательная картина дислокаций несоответствия AA' и BB' (e), каждая из которых в дальнейшем может вновь участвовать в описанном выше процессе.

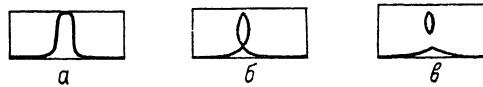


Рис. 4. Схематическое изображение зарождения дислокационной конфигурации, приведенной на рис. 1, e .

Такой механизм стимуляции релаксации напряжений специфичен именно для ультразвуковой знакопеременной деформации, которая входит в динамическое уравнение движения дислокаций $v = B\sigma b$ и действует на дислокацию в целом. Здесь v — скорость дислокаций; b — модуль вектора Бюргерса; σ — полное напряжение, представляющее собой сумму напряжения несоответствия σ_0 , инерционного члена, пропорционального ускорению дислокаций \dot{v} , члена, связанного с линейным натяжением дислокации, пропорционального удлинению (кривизне) дислокационной линии, и напряжения $\sigma_- = \sigma_1 \exp(i\omega t)$, индуцируемого ультразвуковой волной. Последнее, кроме того, входит и в подвижность дислокации B в виде $\exp(\sigma_- \Omega/kT)$ (Ω — активационный объем), приводя к эффективному «проваливанию» барьера Пайерлса и увеличению подвижности. При радиационной же стимуляции активация движения дислокаций происходит либо путем переползания (при сверхпороговом облучении за счет образованных точечных дефектов), либо скольжением (при подпороговом облучении) за счет локального хаотического возбуждения двойных перегибов.

Описанное возбуждение дислокационных диполей дислокацией, колеблющейся в ультразвуковом поле, позволяет объяснить также наблюдавшиеся вблизи выходящих на поверхность дислокационных сегментов цепочки дислокационных петель — среди них наблюдались вакансионные и скользящие. Первые возникают по механизму, подобному [19], когда в интервал времени, соответствующий ультразвуковой деформации растяжения, дислокационный диполь подходит к обогащенной при такой деформации вакансиями поверхности пленки (не выходя на нее) и захватывает их. При смене знака деформации диполь движется от поверхности пленки, перенося вакансии в объем (такой процесс повторяется с периодом ультразвуковой деформации). Скользящие дислокационные петли образуются при схлопывании не дошедшего до поверхности дислокационного диполя при смене знака деформации (рис. 4). Соотношение между числом размножившихся дислокаций (вершина диполей которых

успевает выйти на поверхность пленки и разорваться за время соответствующего полупериода ультразвуковой деформации) и дислокаций, диполи которых являются генераторами дислокационных петель, зависит в первую очередь от толщины пленки, амплитуды и частоты ультразвуковой деформации. Определенную роль играют также величина несрелаксированной части напряжений несоответствия и дислокационное окружение колеблющейся дислокации, способствующее ее движению в случае пересекающих дислокаций или ослабляющее способность винтовых отрезков разорвавшегося диполя к поперечному скольжению, в случае параллельных.

Список литературы

- [1] Здебский А. П., Кропман Д. И., Шейнкман М. К. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 8. С. 131—134.
- [2] Здебский А. П., Остапенко С. С., Савчук А. У., Шейнкман М. К. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 20. С. 1243—1247.
- [3] Брайловский Е. Ю., Здебский А. П., Корчная В. Л., Семенова Г. Н., Скороход М. Я., Тхорик Ю. А., Хазан Л. С., Шейнкман М. К. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 21. С. 1310—1313.
- [4] Здебский А. П., Лисянский М. И., Лукьянчикова Н. Б., Шейнкман М. К. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 16. С. 1009—1013.
- [5] Панков Ю. А., Хазан Л. С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах. Киев: Наукова думка, 1983. 304 с.
- [6] Тхорик Ю. А., Проблемы физики поверхности полупроводников. Киев: Наукова думка, 1981. С. 262—286.
- [7] Панков Ю. М. // Физическая электроника. Республ. межведомственный сборник. Львов: Выща школа, 1987. В. 31. С. 69—82.
- [8] Горбачук Н. Т., Митин В. В., Тхорик Ю. А., Шварц Ю. М. // УФЖ. 1984. Т. 29. № 12. С. 1850—1954.
- [9] Василенко Н. Д., Гордиенко В. В., Корчная В. Л., Панков Ю. М., Семенова Г. Н., Хазан Л. С. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 9. С. 32—36.
- [10] Brailovskii E. Yu., Matveeva L. A., Semenova G. N., Tkhorik Yu. A., Khazan L. S. // Phys. Stat. Sol. 1981. V. 66. N 1. P. K59—K61.
- [11] Инденбом В. Л., Никитенко В. И. Напряжения и дислокации в полупроводниках. М.: Наука, 1982. С. 8—32.
- [12] Горицько Н. Я., Кузьменко П. П., Новиков Н. Н. // ФТТ. 1961. Т. 3. № 12. С. 3650—3656.
- [13] Hagen W., Strunk H. // Electron. Microscopy. 1985. V. 4. N 2. P. 379—390.
- [14] Vdovin V. I., Matveeva L. A., Semenova G. N., Skorohod M. Ya., Tkhorik Yu. A., Khazan L. S. // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. V. 92. N 2. P. 379—390.
- [15] Brailovskii E. Yu., Matveeva L. A., Melnikov G. D., Mikhailov Y. F., Semenova G. N., Tkhorik Y. A., Khazan L. S., Zaichter V., Červenák Y. // Cryst. Res. Technol. 1986. V. 21. N 3. P. 413—421.
- [16] Концевой Ю. А., Литвинов Ю. М., Фаттахов Э. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
- [17] Вдовин В. И., Семенова Г. Н., Тхорик Ю. А., Хазан Л. С. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 20. С. 1260—1263.
- [18] Алексин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
- [19] Конакова Р. В., Семенова Г. Н., Хакимов Т. М., Тхорик Ю. А., Филатов М. Ю. // Изв. АН УзССР, сер. физ.-мат. наук. 1989. № 2. С. 77—81.

Институт полупроводников
АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
25 июля 1990 г.

В окончательной редакции
12 февраля 1991 г.