

06.2; 08

© 1990

ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В ПЛЕНКАХ ρ -Ge

Н.Д. Василенко, В.В. Гордиенко,
В.Л. Корчная, Ю.М. Панков,
Г.Н. Семенова, Л.С. Хазан

Известно [1], что полупроводниковые гетероструктуры с толщиной эпитаксиального слоя, превышающей величину b/f (b — модуль вектора Бюргера характерных дислокаций, f — несоответствие параметров решеток пленка-подложка), находятся, как правило, в неравновесном состоянии с избыточной упругой деформацией. Релаксации этих деформаций препятствуют значительные энергетические барьеры для зарождения и движения дислокаций. Возбуждение гетероструктуры посредством облучения γ -квантами ^{60}Co [2], электронами с энергией 100–400 кэВ [3], импульсами рубинового лазера [4] приводило к уменьшению остаточных деформаций.

Эффективным методом стимуляции релаксации внутренних механических напряжений является ультразвуковая обработка (УЗО) [5], поскольку акустическая деформация непосредственно (динамически) воздействует на дислокации. В этой связи представляет интерес изучение возможности технологического использования УЗО и эффекта акустостимулированной релаксации внутренних механических напряжений для создания высокоэффективных тензопреобразователей на основе гетеросистем.

В настоящей работе приведены исследования влияния акустических колебаний допороговой мощности [6] на тензорезистивные свойства и структуру широко используемых [7] тензодатчиков на основе ρ -Ge/GaAs, а также обсуждаются возможные механизмы взаимодействия ультразвука с напряженными гетеросистемами.

Монокристаллические пленки ρ -Ge толщиной $d_c = 0.2$ –3 мкм получали на подложках (100)GaAs по технологии, описанной в [6]. Исходные параметры пленок при 300 К были следующими: подвижность $\mu \sim 100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, удельное сопротивление $\rho \sim 7.5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, концентрация дырок $p \sim 10^{18}$ – 10^{19} см^{-3} .

УЗО структур осуществлялась с использованием пьезокерамических преобразователей типа ЦТС-23 на двух частотах: 160 кГц и 2.2 МГц с амплитудой акустической деформации $\tilde{a}_{ys} = 1 \cdot 10^{-5}$ – $2 \cdot 10^{-4}$, в процессе отработки температура образца повышалась до 40–45 °С за счет собственного разогрева пьезокерамического преобразователя.

До и после УЗО контролировали:

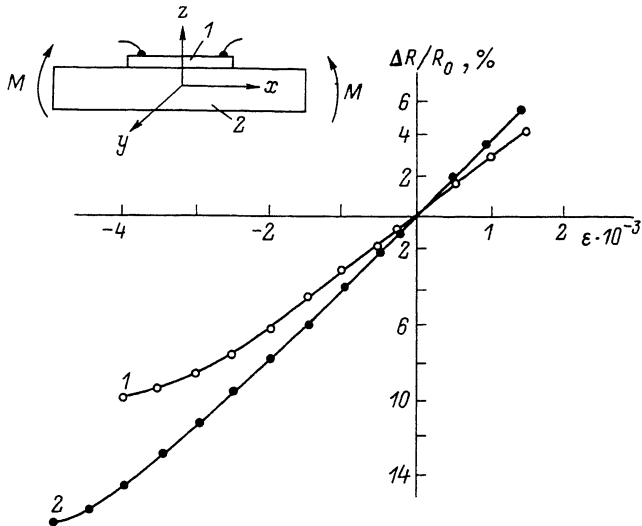


Рис. 1. Зависимость коэффициента тензочувствительности от относительной деформации растяжения (+ ϵ) и сжатия (- ϵ) до (кривая 1) и после (кривая 2) ультразвуковой обработки. Вставка иллюстрирует схему нагружения образца (1) на балке (2). Исходные параметры тензорезистора: $d_c = 1.4$ мкм, $\rho \approx 0.02$ Ом·см.

1. Механические напряжения в гетероструктуре методом фотоупругости на микроскопе МИК-4 с компенсатором Сенармона.
2. Степень структурного совершенства эпитаксиальных структур методом селективного травления и рентгеновской дифракционной топографии (метод Бормана), а также посредством электронной микроскопии на микроскопе *HU-200F*.
3. Изменение продольной компоненты тензосопротивления пленки $\frac{\Delta R}{R_0}$ в направлении $[110]$ ($\vec{j} \parallel \epsilon$, где \vec{j} - плотность тока, ϵ - продольная компонента деформации, прикладываемой к структуре).

На рис. 1 приведены зависимости коэффициента тензосопротивления пленки $\epsilon \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(\epsilon) - R(0)}{R(0)}$ от величины приложенной одноосной деформации растяжения и сжатия до (кривая 1) и после УЗО (кривая 2) с амплитудой относительной акустической деформации $\tilde{\alpha}_{уз} \sim 7 \cdot 10^{-5}$. Видно, что линейный участок на зависимости $\frac{\Delta R}{R_0}(\epsilon)$ до величины одноосного сжатия $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ в исходных образцах расширяется до значений деформации сжатия $\sim 3.5 \cdot 10^{-3}$ после УЗО. Следует отметить степень изменения зависимости

$\frac{\Delta R}{R_0}(\varepsilon)$ от амплитуды акустической деформации $\tilde{\alpha}_{y3}$. Так, расширение линейного участка наблюдалось по мере увеличения $\tilde{\alpha}_{y3}$ до величины $\sim 7 \cdot 10^{-5}$, а при дальнейшем увеличении $\tilde{\alpha}_{y3}$ вплоть до значений $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ характеристика оставалась неизменной.

Согласно [8], в полупроводниках с вырожденной валентной зоной типа $p\text{-Ge}$ нелинейные эффекты в зависимости $\frac{\Delta R}{R_0}(\varepsilon)$

связаны с перестройкой энергетического спектра вблизи точки вырождения $\vec{k} = 0$ при деформации и перераспределением легких и тяжелых дырок между подзонами. Поскольку в исходных пленках $p\text{-Ge}$ на подложках GaAs присутствует нерелаксированная деформация сжатия $\varepsilon \approx f \approx 10^{-3}$ [1], это вносит дополнительную асимметрию в зависимость $\frac{\Delta R}{R_0}(\varepsilon)$: отклонение от линейности при сжатии пленок начинается при меньших внешних деформациях, чем при растяжении. При деформациях растяжения, превышающих $2 \cdot 10^{-3}$, происходило разрушение материала. Степень асимметрии определяется уровнем остаточных деформаций в гетероструктуре.

Наблюдаемое расширение линейного участка зависимости $\frac{\Delta R}{R_0}(\varepsilon)$ после акустической обработки объясняется уменьшением внутренних остаточных деформаций с соответствующим уменьшением асимметрии в зависимости $\frac{\Delta R}{R_0}(\varepsilon)$. Типичная зависимость внутренних напряжений в пленке σ_c от условий УЗО приведена на рис. 2. Видно, что по мере увеличения амплитуды акустической деформации $\tilde{\alpha}_{y3}$ до $(7-8) \cdot 10^{-5}$ в пленке наблюдается уменьшение внутренних механических напряжений, которое в пленках исследованных партий составляло от 10 до 50 %, причем дальнейшее увеличение $\tilde{\alpha}_{y3}$ вплоть до значений 10^{-4} практически не влияло на величину σ_c . При дальнейшем увеличении $\tilde{\alpha}_{y3}$ до $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ в некоторых образцах наблюдался рост механических напряжений, хотя в других величина σ_c оставалась неизменной.

УЗО ($\tilde{\alpha}_{y3} \sim 5 \cdot 10^{-5}$) не привела к заметным изменениям электрофизических характеристик пленок $p\text{-Ge}$. Наблюдавшиеся изменения μ , ρ и ρ не превышало разброс их значений в образцах одной партии.

Рентгеновские топограммы исходных структур Ge/GaAs ($d_c = 1.35$ мкм) показали наличие сетки дислокаций несоответствия (ДН) в межфазной границе. Электронно-микроскопические исследования показали, что сетка ДН в гетерогранице является нерегулярной, фрагментарной и состоит из ортогональных 60-градусных дислокаций несоответствия, лежащих в границе раздела с линейной плотностью значительно ниже равновесной f/b . УЗО образцов с $\tilde{\alpha}_{y3} = 10^{-4}$ не внесла заметных изменений в их рентгеновские топограммы, тогда как на электронно-микроскопических снимках

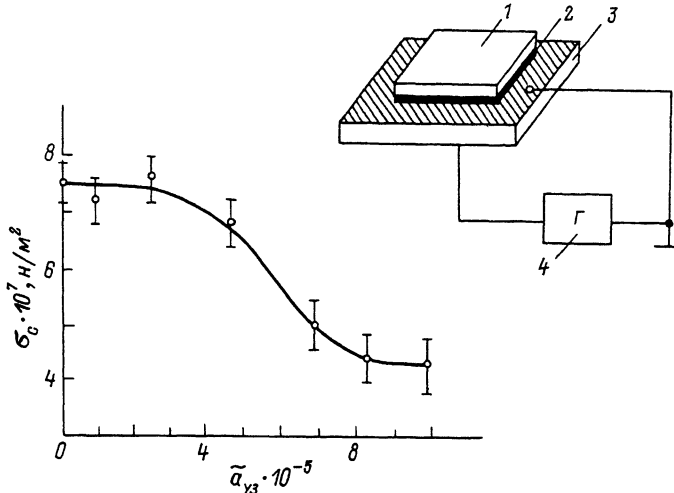


Рис. 2. Зависимость величины механических напряжений σ_c в пленке от величины амплитуды относительной акустической деформации $\tilde{\alpha}_{yz}$. На вставке: 1 – исследуемая гетеросистема, 2 – клей на основе спиртоканифольной смеси, 3 – пьезокерамический преобразователь, 4 – генератор ГЗ-7А.

с исходной сеткой ДН в гетерогранице наблюдалось большое количество длинных прямолинейных дислокаций, содержащих изогнутые участки, выходящие на поверхность пленки. Вблизи выхода дислокационного сегмента на поверхность наблюдалось испускание дислокационных петель.

Наблюдавшееся изменение дислокационной структуры связано со стимулированным ультразвуком скольжением имевшихся в системе дислокационных сегментов, поскольку даже при больших величинах акустической деформации ($\tilde{\alpha}_{yz} = 2 \cdot 10^{-4}$) зарождения новых дислокаций обнаружено не было.

Следует отметить, что вышедший на поверхность участок дислокации при данной толщине пленки (превышающей критическое значение в системе $\text{Ge/GaAs} \approx 0.2$ мкм) является неустойчивым относительно скольжения в поле внутренних напряжений [1], что приводит к образованию новых ДН и эффективной релаксации внутренних напряжений.

Необходимо подчеркнуть, что при обработке гетеросистем ультразвуком допороговой мощности удается достичь значительно более глубокой степени релаксации внутренних напряжений, чем при облучении γ -квантами или электронами при оптимальных режимах. Объясняется это малой величиной сечения неупругого рассеяния частиц дислокациями, необходимого для создания сверхкритического двойного перегиба, обеспечивающего скольжение дислокаций в

высоком рельефе Пайерлса (энергия Пайерлса ≈ 1 эВ). Ультразвуковая же деформация, с одной стороны, воздействует на дислокацию непосредственно в качестве движущей силы, а с другой - периодически во времени модулирует рельеф Пайерлса, приводя в определенные моменты к его эффективному понижению. В принципе, изменением частоты ультразвука можно достичь условий дислокационного резонанса для элементов сетки ДН и существенно увеличить эффективность акустостимулированной релаксации напряжений.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Т х о р и к Ю.А. Дислокации границы раздела и остаточные деформации в эпитаксиальных пленках. В кн.: Проблемы физики поверхности полупроводников. Киев: Наук. думка, 1982. С. 262-280.
- [2] Б р а й л о в с к и й Е.Ю., М а т в е е в а Л.А., С е м е н о в а Г.Н., Т х о р и к Ю.А., Х а з а н Л.С. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1982. Вып. 4 (23). С. 40-41.
- [3] B r a i l o v s k i i E.Yu., M a t v e e v a L.A., S e m e n o v a G.N., K h a z a n L.S., T k h o r i k Yu.A. // Phys. Stat. Sol. (A). 1981. V. 66. N 1. P. K59-K62.
- [4] В л а с е н к о Ю.В., Г р и б н и к о в а Е.З., М а т в е е в а Л.А., С е м е н о в а Г.Н., Т х о р и к Ю.А., Х а з а н Л.С. В кн.: Использование Солнца и других источников лучистой энергии в материаловедении. Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1983. С. 244-247.
- [5] Б р а й л о в с к и й Е.Ю., З д е б с к и й А.П., К о р ч н а я В.Л., С е м е н о в а Г.Н., С к о р о х о д М.Я., Т х о р и к Ю.А., Х а з а н Л.С., Ш е й н к м а н М.К. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13, вып. 21. С. 1310-1313.
- [6] З д е б с к и й А.П., К р о п м а н Д.И., Ш е й н к м а н М.К. // ЖТФ, 1989. Т. 59, № 8. С. 131-134.
- [7] Г о р б а ч у к Н.Т., М и т и н В.В., Т х о р и к Ю.А., Ш в а р ц Ю.М. // УФЖ. 1984. Т. 29, № 2. С. 1850-1854.
- [8] Б и р Г.Л., П и к у с Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука, 1972. 584 с.

Институт полупроводников
АН УССР, Киев

Поступило в Редакцию
3 января 1990 г.