

Фотостимулированная релаксация внутренних механических напряжений в эпитаксиальных КНС-структурах

© З.В. Джибути, Н.Д. Долидзе, Г.Л. Эристави

Тбилисский государственный университет им. Ив. Джавахишвили,
0179 Тбилиси, Грузия
E-mail: nugo42@mail.ru

(Поступило в Редакцию 18 октября 2007 г.)

Исследована природа и оценены величины внутренних механических напряжений в тонких эпитаксиальных пленках КНС-структур („кремний на сапфире“). Показано, что внутренние механические напряжения величиной $\sim 10^9$ Па имеют характер сжатия. Исследовано влияние импульсного лазерного и лампового отжига на процессы релаксации внутренних механических напряжений, показано, что при определенных режимах отжига релаксация может достигнуть 90%. Предложен электронный механизм отжига структурных дефектов, основанный на изменении квантового состояния электронной подсистемы кристалла при импульсном фотонном отжиге.

PACS: 61.72.-y, 78.20.-e, 61.80.B

Серьезной проблемой, сопутствующей формированию полупроводниковых структур, используемых в электронике, являются внутренние механические напряжения. Эти напряжения связаны как с технологическими дефектами на границах раздела в гетеро- или гомоэпитаксиальных системах [1,2], так и с созданием областей разупорядочения при использовании радиационных технологий (ионная имплантация, высокоэнергетические электроны, нейтроны) [3]. Так как внутренние механические напряжения оказывают значительное влияние на поверхностное натяжение, на структурное совершенство и равномерное распределение электрофизических характеристик пленок по пластине [4], разработка методов оценки характера и величин этих напряжений и их минимизация является одной из важных задач электроники.

В настоящей работе эксперименты проводились на структурах „кремний на сапфире“ (КНС) с гетероэпитаксиальным слоем n -Si толщиной $d = 3$ и $0.6 \mu\text{m}$, концентрацией носителей заряда $n = 7 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ с подвижностью $\mu = 450 \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$.

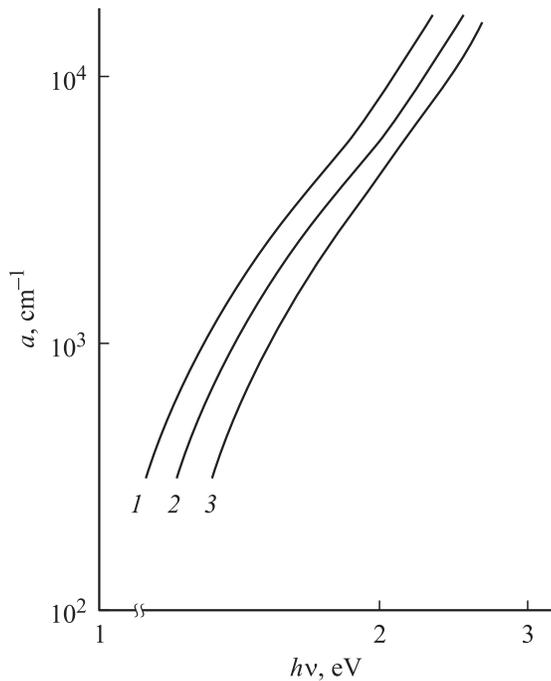
Как известно, при изготовлении КНС-структур высокая температура осаждения ($\sim 1000^\circ\text{C}$) приводит к появлению в слоях Si напряжения сжатия из-за различия коэффициентов линейного расширения кремния и сапфира. Этому способствуют так же дислокации и структурные дефекты, возникающие в эпитаксиальных пленках Si (особенно в приконтактной области) [2]. Для уменьшения внутренних механических напряжений нами проводились отжики: термически — до $T = 1200^\circ\text{C}$ в инертной среде; импульсными лазерами ($\lambda = 0.69 \mu\text{m}$) в миллисекундном ($\tau = 5 \text{ms}$, $E = 50 \text{J/cm}^2$) или наносекундном ($\tau = 20 \text{ns}$, $E = 1.2 \text{J/cm}^2$) режимах; ламповые — на оригинальной установке импульсного фотонного отжига с галогенными лампами накаливания, позволяющей изменять длительность импульса в пределах $\tau = 0.1\text{--}10 \text{s}$ и плотность мощности — до $W = 190 \text{W/cm}^2$. Облучение фотонами проводилось как

со стороны Si, так и со стороны сапфира. Оптически прозрачная сапфировая подложка позволяла непосредственно воздействовать на переходную, дефектную область сапфир–кремний.

Исследовались электрофизические параметры (n, μ) гетероэпитаксиального слоя кремния и оптический — коэффициент поглощения (α) в области края фундаментального поглощения. Измерения проводились при комнатной температуре. Исследование оптических спектров в области края фундаментального поглощения позволяет оценить величины и природу внутренних механических напряжений, созданных дефектами в полупроводнике [3]. Проводились также рентгеноструктурные исследования КНС-структур на установке ДРОН-3М. Измерения проводились до и после отжигов.

Как показали эксперименты, миллисекундное лазерное воздействие приводит к увеличению подвижности носителей на $\sim 20\%$. Проведенный рентгеноструктурный анализ переходного слоя КНС-структур показал, что лазерное облучение заметно уменьшает блочность структуры, наблюдаемой на исходных образцах. Значительно уменьшается и эффект разориентировки между блоками.

Наносекундный лазерный отжиг приводит к увеличению подвижности в 2 раза и к почти полному исчезновению блочности структуры переходного слоя КНС-структур. Последнее, должно быть, связано с уменьшением дефектности эпитаксиальной пленки кремния [5]. Теоретическая оценка температуры нагрева кристалла показала, что в условиях эксперимента при миллисекундном лазерном отжиге она может достигать 1000°C , а при наносекундном лазерном отжиге — 1200° . Тогда как термический отжиг при $T = 1200^\circ\text{C}$ в течение 30 min не приводит к заметному изменению электрофизических и структурных свойств КНС-структур. Для определения влияния ионизационного фактора в процессе лазерного отжига была оценена концентрация



Влияние импульсного фотонного отжига на спектры поглощения КНС-структур: 1 — до облучения, 2 — после облучения, 3 — монокристаллический Si.

генерированных светом неравновесных носителей заряда, которая составила: при миллисекундном лазерном отжиге — $\Delta n \approx 4 \cdot 10^{18}$, при наносекундном — $\Delta n \approx 6.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

В случае лампового импульсного отжига наилучшие результаты наблюдаются при $W = 100 \text{ W/cm}^2$ и $\tau = 5 \text{ s}$. При этом достигается увеличение подвижности в 2 раза и уменьшение дефектности структуры аналогично наблюдаемому при наносекундном лазерном отжиге. Следует отметить, что как лазерные, так и ламповые отжики не приводят к значительному изменению концентрации носителей (n). При ламповом отжиге температура образцов не превышала 300°C (за счет теплоотвода), концентрация неравновесных носителей заряда по оценке составила $\Delta n \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

На рисунке показан спектр края фундаментального поглощения КНС-структуры (кривая 1) и монокристаллического Si (кривая 3). Как видно из рисунка, спектр края поглощения КНС-структуры смещен в сторону меньших, по сравнению со спектром монокристаллического Si, энергий. Ламповый, как и наносекундный лазерный, отжиг (кривая 2) в условиях эксперимента приводит к сдвигу спектра поглощения в сторону больших энергий. Как уже отмечалось выше, в пленках Si при эпитаксиальном росте появляются напряжения сжатия. Известно также [6], что с давлением ширина запрещенной зоны Si уменьшается (в отличие от Ge и GaAs) $dE_s/dp = -2.4 \cdot 10^{-6} \text{ eV/kg} \cdot \text{cm}^2 = -2.5 \cdot 10^{-11} \text{ eV/Pa}$. Снятие этих напряжений должно привести к увеличению ширины запрещенной зоны и

сдвигу края поглощения в сторону больших энергий, что и наблюдается при эксперименте — величина сдвига составляет 0.014 eV .

Исходя из этого оценена величина деформационных напряжений, снимаемых фотонным облучением, которая составляет $P \approx 6 \cdot 10^8 \text{ Pa}$. Сравнение со спектром поглощения монокристаллического Si показало, что в условиях эксперимента уменьшение значения механических напряжений составляет до 90% от исходного. Так как одновременно наблюдаются увеличение подвижности (сильно зависящей от дефектности кристалла) и улучшение структурных свойств эпитаксиальной пленки Si, можно предположить, что фотонное воздействие приводит к значительному отжигу или перестройке дефектов кристалла.

Как видно, результаты экспериментов по импульсному фотонному отжигу невозможно объяснить только термическим нагревом. Очевидно, в процессе импульсного фотонного отжига играет роль и ряд атермических факторов. Переход электрона из валентной зоны в зону проводимости можно рассматривать как переход со связывающей орбитали на антисвязывающую, приводящий к ослаблению и изотропизации связей вплоть до „плавления“ [7–11]. Однако, чтобы произошло „плавление по электронному механизму“, степень ослабления и изотропизации химических связей между атомами кристалла должна достичь определенного критического значения (n_{cr}). Оцененное в работах [10,11] значение n_{cr} для Si составляет $n_{cr} \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, что хорошо согласуется с результатами экспериментов по лазерному отжигу.

В случае широкоспектрального лампового отжига такой высокий уровень фотоионизации не наблюдается, однако присутствует фактор селективного поглощения фотонов на дефекты, вызывающий также разрыв химических связей и значительно способствующий отжигу дефектов в твердофазном режиме [12]. Эксперименты показали, что сторона облучения КНС-структур не влияет на эффективность отжига, что, должно быть, связано с тем, что толщина эпитаксиальных пленок значительно меньше диффузионной длины электрона ($\sim 0.11 \text{ cm}$). Наблюдаемая в работе [1] радиационно-стимулированная релаксация внутренних механических напряжений в гомоэпитаксиальных пленках GaP, по-видимому, связана с сопровождающей γ -радиацию высокой степенью ионизации в кристалле.

Список литературы

- [1] Генцарь П.А. // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 9. С. 1051.
- [2] Светлов С.П., Чалков В.Ю., Шенгуров В.Г. // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 1. С. 15.
- [3] Джибути З.В., Долидзе Н.Д., Цеквава Б.Е., Эристави Г.Л. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 13. С. 26.
- [4] Береништейн Г.В., Дьяченко А.М. // ФТП. 1987. Т. 21. Вып. 1. С. 164.
- [5] Kobayashi Yutaka, Suzuki Takaya and Tamura Masao // Jpn. J. of Appl. Phys. 1981. Vol. 20. N 4. P. 1249.

- [6] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 455 с. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. A Wiley-Interscience Publication. N.Y.; Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. John Wiley & Sons, 1981.
- [7] Конаев В.В., Конаев Ю.В., Молотков С.Н. // Микроэлектроника. 1983. Т. 12. Вып. 6. С. 499.
- [8] Гвердцители И.Г., Герасимов А., Джибути З.В., Пхакадзе М.Г. // Поверхность (физика, химия, механика). 1985. Вып. 11. С. 132.
- [9] Конаев Ю.В., Меняйленко В.В., Молотков С.Н. // ФТТ. 1985. Т. 27. Вып. 11. С. 3288.
- [10] Dolidze N.D., Jibuti Z.V., Mordkovich V.N., Tsekvava B.E. // GEN. 2005. N 4. P. 84.
- [11] Авсаркисов С.А., Джибути З.В., Долидзе Н.Д., Цеквава Б.Е. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 6. С. 55.
- [12] Джибути З.В., Долидзе Н.Д., Нарсия Г.Ш., Эреста-ви Г.Л. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 19. С. 26.