

# Зондирование многослойной структуры Si/SiGe потоком неравновесных акустических фононов

© А.И. Шарков, Т.И. Галкина, А.Ю. Клоков

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
Москва, Россия

E-mail: shark@lebedev.ru

(Поступила в Редакцию 28 января 2009 г.)

Двойные квантовые ямы Si/Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub>/Si, выращенные на подложке кремния, зондировались потоком неравновесных акустических фононов терагерцевых частот при использовании метода тепловых импульсов в геометрии „на отражение“. Сопоставление зарегистрированных сигналов прихода фононов с аналогичными измерениями для образца кремния без структуры квантовых ям позволяет выделить составляющую, обусловленную именно отражением фононов от квантовых ям. Обнаружена сильная анизотропия этого отраженного сигнала.

Работа поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 08-02-01012), а также программой Президиума РАН „Квантовые наноструктуры“.

PACS: 66.70.-f, 63.20.-c

## 1. Введение

Интерес к взаимодействию акустических фононов с тонкими гетерослоями и сверхрешетками обусловлен модификацией фононного спектра в квантово-размерных структурах. Исследования взаимодействия неравновесных акустических фононов с объектами, содержащими многослойные структуры, проводятся достаточно давно. Однако большая часть этих работ выполнена на сверхрешетках на основе соединений III–V, например In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/AlAs. Так, в [1] было проведено экспериментальное исследование распространения неравновесных фононов через сверхрешетки, содержащие 40 периодов In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As/AlAs толщиной  $d_A = d_B = 20$  и  $15$  Å, в геометрии „на прохождение“. Было обнаружено, что в отдельных направлениях, определяемых условиями брэгговского отражения, поток фононов сквозь сверхрешетку находит. Теоретическое рассмотрение этого эффекта для сверхрешеток различной структуры проводилось в работах [1–4].

К настоящему времени работы по исследованию взаимодействия акустических фононов со структурами на основе соединений группы IV, например Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub>, являются теоретическими [5–8] или касаются измерения теплопроводности сверхрешеток [6–10].

В последние годы исследования поведения фононов (главным образом когерентных) в сверхрешетках проводятся с использованием пикосекундного возбуждения [11].

Нам представляется, что изучение эффектов, связанных с возможными когерентными процессами распространения неравновесных фононов, хорошо было бы предварять исследованием взаимодействия потока фононов с отдельными слоями, образующими многослойные структуры разного типа.

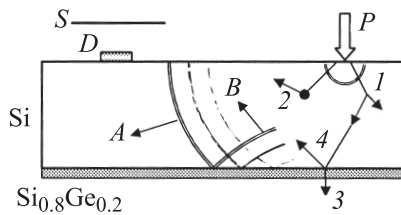
Целью настоящей работы было зондирование границы кремния и квантовых ям SiGe со стороны кремния

потоком неравновесных акустических фононов. Предполагалось изучить влияние на распространение фононов двойных квантовых ям, а также определить, существенно ли влияние слоев кремния и их границ. С этой целью для экспериментов были выбраны структуры, включающие одинаковые двойные квантовые ямы и встроенные слои существенно разного состава.

## 2. Эксперимент

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в университете им. И. Кеплера (г. Линц, Австрия) и представляли собой двойные квантовые ямы, образованные слоями твердого раствора Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> толщиной 18 и 25 Å, на подложке высокоомного ( $\rho \sim 1$  кΩ·см) кремния ориентации (001) толщиной 490 μm. Были изготовлены два образца (№ 953 и 954) следующего состава: № 953 — буфер Si толщиной 1000 Å, первый слой Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> толщиной 18 Å, барьерный слой кремния толщиной 35 Å, второй слой Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> толщиной 25 Å, покровный слой Si толщиной 500 Å; № 954 — буфер Si толщиной 1000 Å, слой легированного бором Si с концентрацией  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> толщиной 30 Å, разделительный слой Si толщиной 100 Å, первый слой Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> толщиной 18 Å, барьерный слой кремния толщиной 35 Å, второй слой Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> толщиной 25 Å, разделительный слой Si толщиной 100 Å, слой легированного бором Si с концентрацией  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> толщиной 30 Å, покровный слой Si толщиной 500 Å.

Таким образом, структура квантовых ям в этих образцах одинакова, однако образец № 954 содержит дополнительные слои кремния, в том числе δ-слои, легированные примесью бора. Ранее нами было исследовано распространение акустических фононов через эти структуры при пикосекундном возбуждении и обнаружено аномальное поведение как продольных, так и поперечных фононов [12].



**Рис. 1.** Схема эксперимента и основные процессы, связанные с распространением неравновесных фононов.  $P$  — импульсное возбуждение,  $D$  — тонкопленочный сверхпроводниковый болометр,  $S$  — экран; 1 — спонтанный ангармонический распад фононов, 2 — рассеяние фононов на точечных дефектах, 3 — выход фононов из образца в жидкий гелий, 4 — отражение фононов от границы образца;  $A$  — фронт падающих,  $B$  — отраженных фононов.

Исследование распространения неравновесных фононов в данных структурах проводилось в геометрии „на отражение“, в которой генератор и детектор фононов расположены по одну сторону от образца, а исследуемая структура находится на противоположной его стороне и зондируется потоком уже более низкочастотных (вследствие распада) фононов. Такая геометрия позволяет регистрировать поток фононов, отраженных от противоположной стороны образца.

Общая схема эксперимента и основные процессы, связанные с распространением неравновесных фононов, показаны на рис. 1. Неравновесные акустические фононы генерируются в образце в результате импульсного возбуждения ( $P$ ); в данном случае использовались два способа генерации неравновесных фононов: фотовозбуждение поверхности образца импульсами азотного лазера ЛГИ-21 ( $\lambda = 337 \text{ nm}$ ,  $\tau_p = 10 \text{ ns}$ ) либо нагрев этими импульсами золотой пленки толщиной  $120 \text{ nm}$ , нанесенной на поверхность образца. Эти два случая различаются спектром испускаемых фононов: в первом случае генерируются в основном продольные акустические фононы частотой  $7.5 \text{ THz}$ , а во втором — фононы всех мод в широком диапазоне частот (в зависимости от энергии лазерного импульса).

Далее фононы распространяются по образцу, испытывая в объеме кремния процессы спонтанного ангармонического распада (1) и упругого рассеяния на точечных (изотопы, атомы примесей) дефектах (2). Времена свободного пробега неравновесных акустических фононов относительно этих процессов зависят от частоты фононов  $\nu$  как  $\nu^{-5}$  и  $\nu^{-4}$  соответственно, и их значения определяют режим распространения фононов, вид и длительность фонованного импульса. При достижении падающим фронтом фононов ( $A$ ) структуры квантовых ям, находящихся на противоположной стороне образца, возможен широкий круг процессов, определяемых многослойной структурой границы. Фононы могут пройти сквозь нее и выйти в окружающий гелий (3), а могут отразиться обратно в кремний (4). На границах же слоев возможно обратное отражение фононов. Причем отражение может быть зеркальным или диффузным,

происходить как с сохранением исходной поляризации, так и с конверсией моды. В слоях, содержащих большое число дефектов (в данном случае это слои легированного кремния и слои  $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ ), возможно упругое рассеяние. Отраженные фононы формируют фронт ( $B$ ), распространяющийся от тыльной границы.

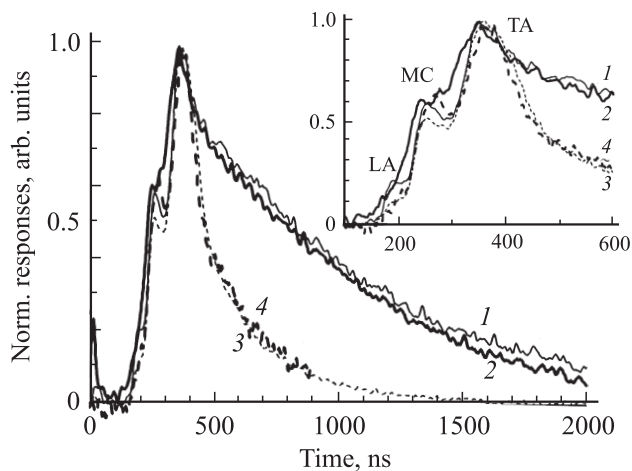
Регистрация временных зависимостей прихода неравновесных фононов осуществлялась тонкопленочным сверхпроводниковым болометром ( $D$ ) из гранулированного алюминия в форме мостика с размерами детектирующей части  $50 \times 70 \mu\text{m}$ , прикрытым экраном ( $S$ ) для уменьшения паразитной засветки излучением лазера. Образец был погружен в жидкий гелий при температуре  $1.7 \text{ K}$  для минимизации отражения фононов от границ образца, особенно от тыльной стороны пластины. Установка позволяла сканировать лучом лазера поверхность образца, исследуя тем самым распространение фононов при разной ориентации линии генератор–детектор относительно кристаллографических направлений образца.

### 3. Результаты и обсуждение

Детектируемый сигнал имеет довольно сложный вид, поскольку его формируют как фононы, испытавшие процессы отражения на исследуемых границах раздела, так и рассеянные в объеме образца. В результате упругого рассеяния в объеме образца информация о поляризации и направлении распространения исходного фонона теряется, поэтому основную информацию о процессах на границах раздела несут фононы, которые после отражения на границе достигают детектора без рассеяния, баллистически. Такие фононы, имеющие длины свободного пробега, сравнимые с толщиной образца, формируют более или менее резкие пики. Более высокочастотные фононы, имеющие меньшие длины свободного пробега, достигают детектора после многократного рассеяния в объеме образца и формируют более длительный и плавный сигнал квазидиффузионного типа. Кроме того, на распространение фононов в кристалле оказывает влияние „фононная фокусировка“, что приводит к зависимости регистрируемого сигнала не только от расстояния между генератором и детектором, но и от ориентации линии генератор–детектор относительно кристаллографических направлений образца.

В результате регистрируемые отклики имеют вид „горба“, сформированного объемно-рассеянными фононами, на фоне которого могут проявляться пики, формируемые отраженными фононами. Для иллюстрации на рис. 2 показаны отклики, зарегистрированные на исследованных структурах при генерации фононов фотовозбуждением поверхности кремния (кривые 1 и 2) и при нагреве пленки золота, нанесенной на поверхность кремния (кривые 3 и 4), в случае, когда область генерации располагалась на расстоянии  $1000 \mu\text{m}$  от болометра в направлении [100]. Можно отметить следующее.

1) На откликах, зарегистрированных на обоих образцах, содержащих квантовые ямы, для направления линии



**Рис. 2.** Нормированные отклики при фотовозбуждении (1, 2) и нагреве пленки золота (3, 4) для образцов № 953 (1, 3) и 954 (2, 4). Расстояние от области генерации до болометра  $1000 \mu\text{m}$  в направлении  $[100]$ .

генератор–детектор, близкого к  $[100]$ , на переднем фронте отклика и вблизи максимума отчетливо разрешаются отдельные резкие пики или перегибы.

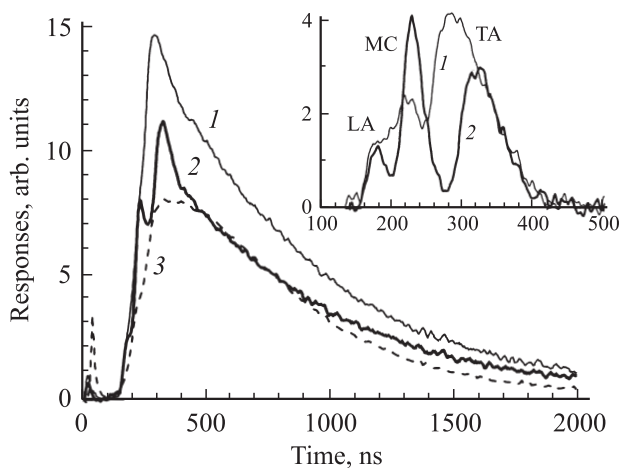
2) Составляющая откликов, обусловленная рассеянием фононов в объеме кремния, при фотовозбуждении больше, чем для металлического генератора, из-за больших частот генерируемых фононов и соответственно более интенсивного их рассеяния.

3) Отклики, зарегистрированные на обеих структурах, практически полностью совпадают. Это свидетельствует о том, что как  $\delta$ -слои, так и другие встроенные слои не влияют на отражение фононов.

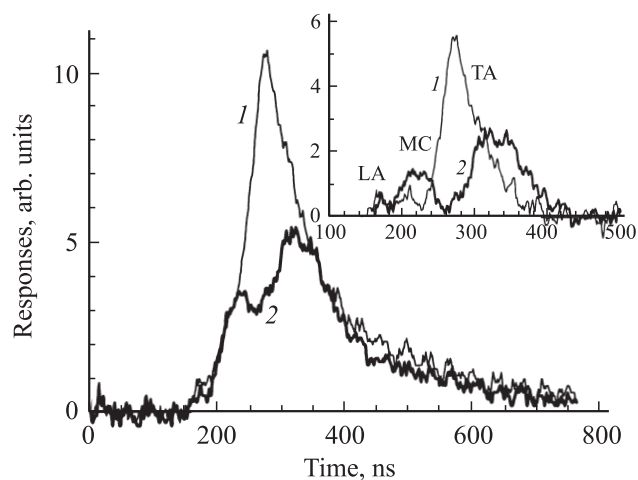
Оказывается, что форма откликов сильно зависит не только от расстояния между генератором и детектором, но и от ориентации линии генератор–детектор. На рис. 3 показаны отклики, регистрируемые в образце № 953 при фотовозбуждении поверхности кремния в случаях, когда генерация фононов производится на расстоянии  $800 \mu\text{m}$  от детектора в направлениях  $[110]$  (кривая 1) и  $[100]$  (кривая 2). На вставке к рис. 3 представлены те же отклики после вычитания составляющей, обусловленной фононами, рассеянными в объеме кремния. Три отчетливо различающихся пика при временах 150, 200 и  $240\text{--}270 \text{ ns}$  соответствуют приходу фононов, отраженных от тыльной поверхности образца, на которой находится структура квантовых ям. Первый и третий соответствуют продольным (LA) и поперечным (TA) фононам, отраженным от тыльной поверхности без конверсии моды. Промежуточный пик соответствует приходу фононов, испытавших на тыльной поверхности конверсию моды (MC) LA→TA или TA→LA. Резкость этих пиков по сравнению с откликами в целом указывает на то, что они сформированы в основном сравнительно низкочастотными фононами. Отметим, что отклик, зарегистрированный на образце кремния, не имевшем на поверхности квантовых ям, был довольно гладким

(кривая 3), а если в нем и присутствуют пики отраженных фононов, то во много раз меньшей величины (заметим, что у используемого для сравнения образца кремния качество финишной полировки было хуже, чем у подложки с квантовыми ямами). Этот результат означает, что влияние на отраженный сигнал частично аморфизованного приповерхностного слоя кремния, граничащего с жидким гелием, сравнительно невелико, а регистрируемые нами отклики (кривые 1 и 2) определяются преимущественно отражением фононов от границы кремния с квантовыми ямами  $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ .

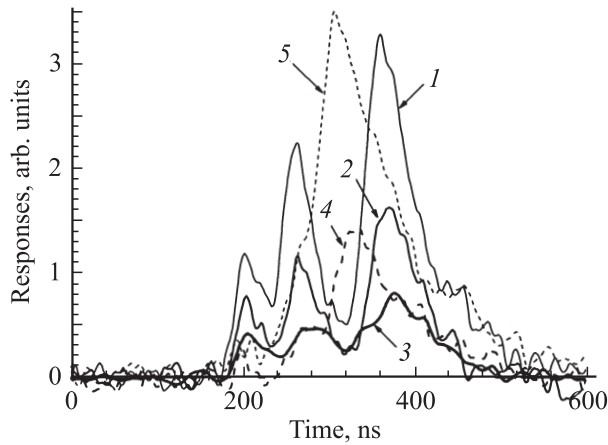
Похожая картина имеет место и при использовании металлического генератора фононов (рис. 4), и на образце № 954. На рис. 4 показаны отклики, регистрируемые



**Рис. 3.** Отклики при фотовозбуждении образца № 953, область генерации находится на расстоянии  $800 \mu\text{m}$  от болометра в направлениях  $[110]$  (1) и  $[100]$  (2). 3 — отклик, полученный на образце кремния без структуры квантовых ям на расстоянии  $800 \mu\text{m}$  от болометра в направлении  $[100]$ . На вставке показан вклад отраженных фононов.



**Рис. 4.** Отклики для случая металлического генератора (образец № 953), область генерации находится на расстоянии  $800 \mu\text{m}$  от болометра в направлениях  $[110]$  (1) и  $[100]$  (2). На вставке показан вклад отраженных фононов.



**Рис. 5.** Отклики при фотовозбуждении образца № 953, область генерации находится на расстоянии  $1000\ \mu\text{m}$  от болометра в направлении  $[100]$  (1), под углами  $9^\circ$  (2),  $23^\circ$  (3),  $37^\circ$  (4) к направлению  $[110]$  и в направлении  $[110]$  (5).

в образце № 953 в тех же точках, что и на рис. 3, но при импульсном нагреве золотой пленки, напыленной на поверхность кремния, в направлениях  $[110]$  (кривая 1) и  $[100]$  (кривая 2). На вставке к рис. 4 представлены те же отклики после вычитания составляющей, обусловленной фононами, рассеянными в объеме кремния.

Из бросающихся в глаза различий отраженных сигналов для этих двух способов генерации фононов необходимо упомянуть уменьшение относительных амплитуд пиков LA и особенно конверсионных фононов для случая металлического генератора, т.е. для фононов меньших частот. Так, если амплитуду пика TA фононов принимать за единицу, то для направления  $[100]$ , в котором отдельные пики разрешаются наиболее отчетливо, при фотовозбуждении амплитуда пика LA фононов будет составлять около 0,5, а пика конверсионных фононов 1,3 (см. вставку на рис. 3). Для металлического генератора отношение пиков иное — LA:MC:TA = 0,3:0,6:1 (см. вставку на рис. 4). Это позволяет говорить о меньшей вероятности конверсии моды при отражении фононов меньших частот.

В регистрируемых откликах имеется резкая зависимость формы отраженного сигнала от ориентации линии генератор–детектор, в то время как форма сигнала, обусловленного фононами, рассеянными в объеме, практически одинакова по всем направлениям. На рис. 5 показаны отклики, сформированные приходом отраженных фононов для разных ориентаций линии генератор–детектор при расстоянии  $1000\ \mu\text{m}$  от генератора до детектора. Видно, что величина пиков максимальна в направлениях  $[100]$  (кривая 1) и  $[110]$  (кривая 5), соответствующих фокусировке медленных и быстрых поперечных (STA и FTA) фононов, а в промежуточных направлениях она падает в несколько раз.

Такая резкая зависимость формы отраженных сигналов от направления распространения потока фононов позволяет предположить, что для исследованных струк-

тур зеркальное отражение фононов от границы доминирует над диффузным. Диффузное отражение может происходить либо от поверхности, шероховатость которой сравнима с длиной волны фононов характерных частот (0,5–2,5 THz), либо (предположительно) как следствие рассеяния на точечных дефектах в квантовых ямах  $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ . Зеркальное отражение может происходить на протяженных гладких границах раздела слоев, различающихся акустическим сопротивлением. В данном случае это может быть граница кремния и квантовых ям  $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ . Таким образом, предположение о доминировании зеркального отражения согласуется со сделанным выше выводом о том, что в данных экспериментах мы регистрируем действительно отражение фононов от квантовых ям.

## 4. Заключение

В работе представлены результаты экспериментов по зондированию структур, содержащих двойные квантовые ямы, потоком неравновесных фононов со стороны подложки кремния. Обнаружено отражение акустических фононов разных поляризаций от многослойной структуры ( $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ , Si), выращенной на подложке кремния. Проведено сравнение регистрируемых фононных импульсов для разных способов генерации фононов и для разных направлений распространения потока фононов относительно кристаллографических направлений образца. Показано, что отраженный сигнал имеет сильную анизотропию.

Авторы благодарны М. Рзаеву за предоставление образцов.

## Список литературы

- [1] S. Tamura, D.C. Hurley, J.P. Wolfe. Phys. Rev. B **38**, 2, 1427 (1988).
- [2] S. Tamura, J.P. Wolfe. Phys. Rev. B **35**, 2528 (1987).
- [3] S. Tamura, J.P. Wolfe. Phys. Rev. B **36**, 6, 3491 (1987).
- [4] S. Tamura, J.P. Wolfe. Phys. Rev. B **38**, 8, 5610 (1988).
- [5] S. Mizuno. Phys. Rev. B **63**, 035 301 (2000).
- [6] S. Tamura, Y. Tanaka, H.J. Maris. Phys. Rev. B **60**, 4, 2627 (1999).
- [7] A.A. Kiselev, K.W. Kim, M.A. Stroschio. Phys. Rev. B **62**, 11, 6896 (2000).
- [8] A. Ward, D.A. Broido. Phys. Rev. B **77**, 245 328 (2008).
- [9] S.M. Lee, D.G. Cahill, R. Venkatasubramanian. Appl. Phys. Lett. **70**, 2957 (1997).
- [10] Nen-Wen Pu. Phys. Rev. B **72**, 115 428 (2005).
- [11] Y. Ezzahri, S. Grauby, J.M. Rampnoux, H. Michel, G. Pernot, W. Claeys, S. Dilhaire, C. Rossignol, G. Zeng, A. Shakouri. Phys. Rev. B **75**, 195 309 (2007).
- [12] А.И. Шарков, А.Ю. Клоков, Т.И. Галкина, В.А. Цветков. ФТТ **50**, 8, 1359 (2008).