

# Фотопроводимость структур Si/Ge/SiO<sub>x</sub> и Si/Ge/Si с квантовыми точками германия

© О.А. Шегай, А.Ю. Березовский, А.И. Никифоров, В.В. Ульянов

Объединенный институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: shegai@thermo.isp.nsc.ru

Обнаружено немонотонное поведение латеральной фотопроводимости (ФП) при изменении интенсивности межзонного света в структурах Si/Ge/Si и Si/Ge/SiO<sub>x</sub> с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ) германия, когда наряду со ступенчатым ростом ФП наблюдается и ступенчатое уменьшение ФП. Изучено влияние температуры измерений и тянущего поля на данные особенности ФП для структур обоих типов с наибольшей номинальной толщиной слоя Ge ( $N_{Ge}$ ). Полученные результаты обсуждаются в рамках теории протекания неравновесных носителей заряда, локализованных в различных областях структуры: электронов в матрице кремния и дырок в КТ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-02-16466, 03-02-16468).

## 1. Введение

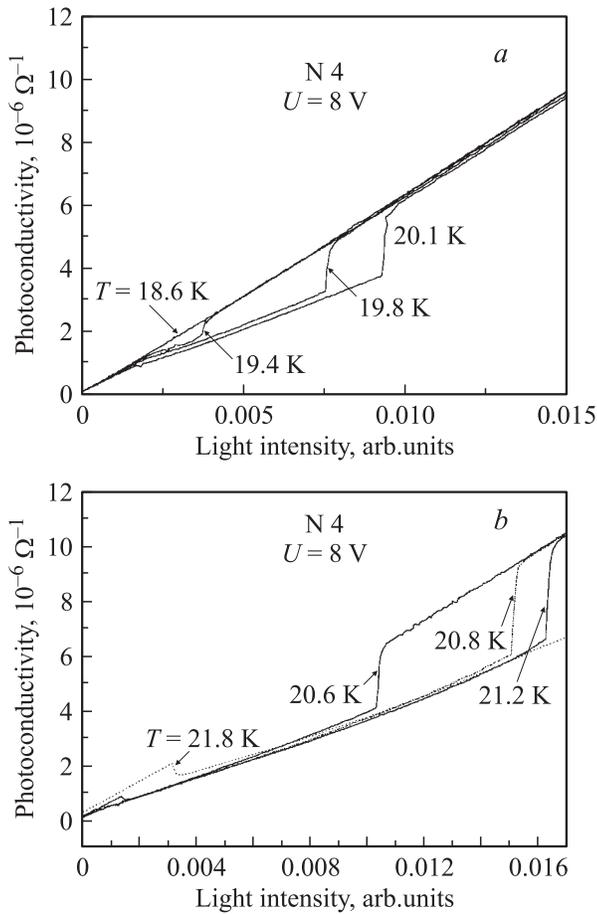
Изучение механизмов межзонной фотопроводимости (ФП) в структурах Si/Ge с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ) Ge актуально в связи с возможностью создания на их основе новых фотоэлектрических устройств [1]. В отличие от объемных полупроводников межзонная ФП в данных структурах при увеличении интенсивности подсветки имеет пороговый характер, обусловленный протеканием неравновесных носителей заряда (электронов) через неупорядоченные локализованные состояния [2]. При относительно малых значениях  $N_{Ge}$  (расстояние между КТ больше размера основания КТ) протекание происходит по локализованным между КТ состояниям электронов. Эти состояния появляются при учете пространственной релаксации механического напряжения вокруг КТ [2]. При этом вклад ФП, связанный с проводимостью неравновесных дырок, локализованных в основном в состояниях в КТ, мал. При возрастании  $N_{Ge}$  происходит увеличение размеров КТ и уменьшение области локализации электронов. Это означает, что вклад в ФП, связанный с протеканием дырок по состояниям в КТ, может конкурировать с вкладом в ФП, обусловленным протеканием электронов. Обнаружению этого эффекта и посвящена данная работа. Изучались структуры Si/Ge/Si и структуры Si/Ge/SiO<sub>x</sub> с КТ при достаточно больших значениях  $N_{Ge}$ . Отметим, что в структурах Si/Ge/SiO<sub>x</sub> смачивающий слой отсутствовал, а концентрация КТ увеличивалась. Измерения показали, что наряду с ранее изученным ступенчатым ростом ФП [2] обнаружен ступенчатый спад ФП в структурах с КТ. Подробно прослежен процесс зарождения данных особенностей и их поведение при изменении температуры и тянущего поля.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

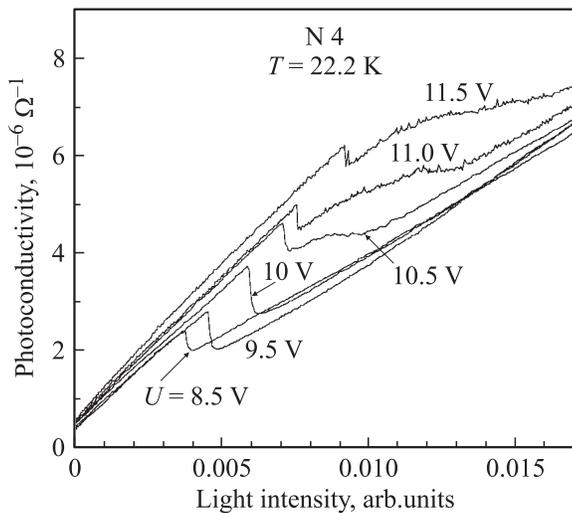
Синтез структур Si/Ge/Si с КТ описан в [1]. Структуры Si/Ge/SiO<sub>x</sub> с КТ германия были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. На подложке Si (001) выращивался буферный слой Si толщиной  $\sim 50$  nm, поверхность которого подвергалась окислению. Затем для каждой из структур выращивался слой Ge с  $N_{Ge} = 0, 0.3, 0.5$  и  $1$  nm соответственно, который покрывался слоем кремния толщиной около 10 nm. Наличие самоорганизующихся КТ подтверждалось структурными исследованиями, из которых следует, что типичный размер основания КТ составляет 8–10 nm, высота КТ 2–2.5 nm, концентрация КТ  $\sim 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>. Для измерения ФП из шайбы вырезались образцы размером приблизительно  $2 \times 4$  mm, индиевые линейные контакты наносились на поверхность вдоль короткой стороны структуры таким образом, что расстояние между ними составляло около 2 mm.

Для структур Si/Ge/SiO<sub>x</sub> с КТ ( $N_{Ge} = 0.3$  и  $0.5$  nm) при  $T = 4.2$  K был обнаружен ступенчатый рост ФП. Рост тянущего поля приводил к сдвигу ступеньки в область меньших интенсивностей света, как и для структур, выращенных на Si-подслое [2,3].

На рис. 1 показаны зависимости ФП от интенсивности света  $I$  для структуры с  $N_{Ge} = 1$  nm (образец № 4) при различных температурах. Из этого рисунка видно, что ступенчатый рост ФП появляется начиная с  $T = 18.6$  K, что существенно выше температуры ( $T = 4.2$  K), при которой ранее наблюдались такие зависимости ФП от  $I$  для структур Si/Ge/Si с КТ Ge [2,3]. Рост температуры приводит к сдвигу ступеньки в область больших интенсивностей (рис. 1, а). При дальнейшем увеличении



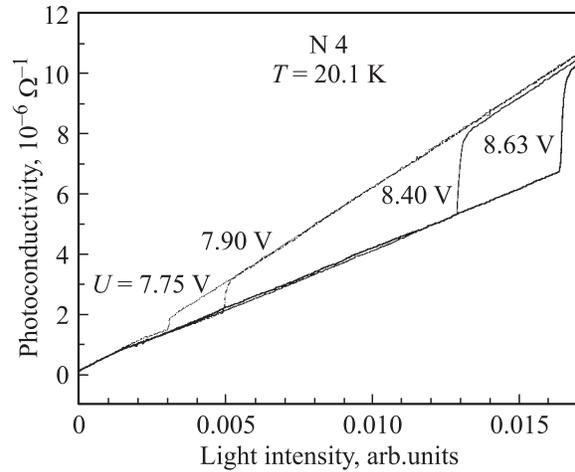
**Рис. 1.** Появление ступеньки (a) и провала (b) на зависимости ФП от интенсивности межзонного света при увеличении температуры измерений для структуры Si/Ge/SiO<sub>x</sub> с КТ (номинальная толщина слоя Ge 1 nm) при  $U = 8$  V.



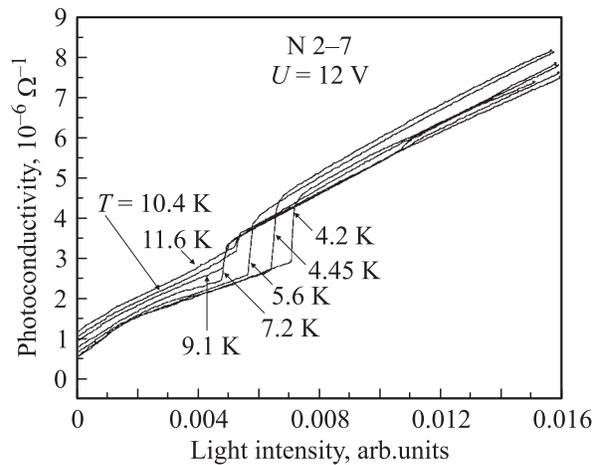
**Рис. 2.** Влияние тянущего поля на положение ступенчатого уменьшения ФП для структуры Si/Ge/SiO<sub>x</sub> с КТ (номинальная толщина слоя Ge 1 nm) при  $T = 22.2$  K,  $U = 8.5$ – $11.5$  V.

температуры на зависимости ФП появляется участок ступенчатого уменьшения (рис. 1, b), а затем наблюдаемые особенности исчезают. На рис. 2 показано влияние тянущего поля на положение ступенчатого спада ФП. Анализ показал, что с ростом  $U$  наблюдаемая особенность линейно смещается в область больших  $I$ . Аналогичным образом тянущее поле влияет и на положение ступеньки на кривой ФП (рис. 3).

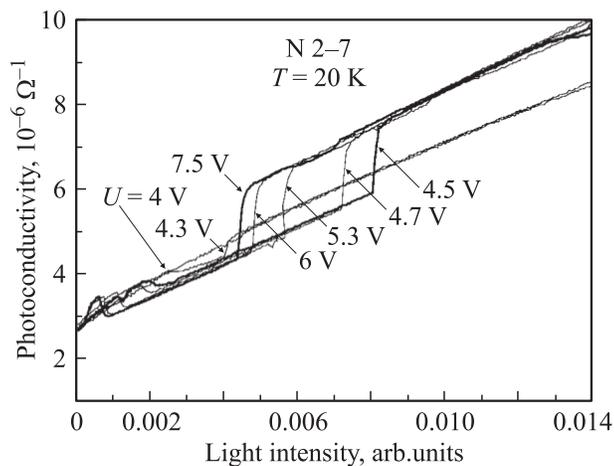
На рис. 4 представлены кривые зависимости ФП от  $I$  для структур Si/Ge/Si с КТ (образец № 2-7 с  $N_{\text{Ge}} = 11$  ML) при  $U = 12$  V и различных температурах. Как видно из рисунка, с ростом температуры ступенька смещается в область меньших  $I$ , а ее амплитуда при этом уменьшается. На рис. 5 показаны кривые при температуре 20 K, на которых при увеличении  $U$  больше 4 V на зависимостях ФП наряду со ступенькой проявляется ступенчатый спад. Начиная с  $U = 4.5$  V



**Рис. 3.** Влияние тянущего поля на положение ступеньки на зависимости ФП для структуры Si/Ge/SiO<sub>x</sub> с КТ (номинальная толщина слоя Ge 1 nm) при  $T = 20.1$  K,  $U = 7.75$ – $8.63$  V.



**Рис. 4.** Влияние температуры на положение ступеньки на зависимости ФП для структуры Si/Ge/Si с КТ ( $N_{\text{Ge}} = 11$  ML) при  $U = 12$  V.



**Рис. 5.** Влияние тянущего поля на положение ступеньки на зависимости ФП для структуры Si/Ge/Si с КТ ( $N_{Ge} = 11 \text{ ML}$ ) при  $T = 20 \text{ K}$ ,  $U = 4\text{--}7.5 \text{ V}$ .

обе особенности сдвигаются в область меньших  $I$  с ростом тянущего поля. Таким образом, для структур обоих типов (Si/Ge/SiO<sub>x</sub> и S/Ge/Si) с КТ Ge на кривых наблюдается ступенчатый рост и ступенчатый спад ФП, однако зависимость их положения от температуры и тянущего поля различна.

### 3. Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов основывается на предложенной нами ранее модели протекания неравновесных носителей заряда по локализованным в разных областях структуры состояниям: электронов в матрице Si и дырок в КТ Ge. По мере увеличения интенсивности межзонной подсветки происходит увеличение заселенности этих состояний; появление особенностей ФП изучаемых структур связано с достижением уровня протекания неравновесными носителями в локализованных состояниях.

По мере возрастания  $N_{Ge}$  происходит увеличение размеров КТ, и соседние КТ начинают перекрываться. Увеличение области пересечения КТ способствует уменьшению порога протекания для дырок. Для электронов с ростом  $N_{Ge}$  имеет место обратный эффект: размер области локализации электронов уменьшается, а порог протекания возрастает. С ростом  $N_{Ge}$  изменяется также и механизм локализации электронов. При малых значениях  $N_{Ge}$  он связан с релаксацией механического напряжения вокруг КТ, а при больших  $N_{Ge}$  электроны локализованы барьерами КТ (гетерограницей Si/Ge).

Наблюдаемые особенности ФП отсутствовали при низкой температуре ( $T = 4.2 \text{ K}$ ). Это связано с недостаточной интенсивностью имеющегося источника межзонного света для того, чтобы неравновесные носители могли достичь уровня протекания. Поскольку в рассматриваемых в данной работе структурах толщина слоя Ge

максимальна, максимален и рельеф. При увеличении температуры приблизительно в 5 раз протекание неравновесных носителей становится возможным. Проводимость электронов и дырок в исследуемых структурах можно рассматривать в рамках континуальной задачи теории протекания по „белым“ и „черным“ участкам [4]. Кроме того, необходимо учитывать кулоновское взаимодействие, приводящее на границе „белого“ и „черного“ к понижению разделяющего их барьера, способствующему их взаимной рекомбинации. Следствием этого является уменьшение числа носителей заряда, что проявляется в эксперименте как спадающий участок на кривой ФП. Мы полагаем, что большему значению проводимости на рисунках отвечает проводимость электронов выше порога протекания, а меньшему — ниже этого порога. Тогда ступенчатое уменьшение сигнала ФП связано с достижением уровня протекания локализованными в КТ дырками, а ступенчатый рост ФП, как и ранее [2], с достижением уровня протекания локализованными в матрице Si электронами. Рекомбинация у гетерограницы Si/Ge приводит к уменьшению заселенности неравновесными электронами локализованных состояний (т.е. к своеобразному понижению электронной температуры). Для того чтобы электроны могли вновь достичь уровня протекания, необходима большая интенсивность света.

Сдвиг обеих наблюдаемых особенностей в область больших интенсивностей при увеличении температуры (рис. 1) для структуры Si/Ge/SiO<sub>x</sub> мы связываем с уменьшением заселенности локализованных состояний неравновесными носителями заряда, которые за счет тепловой энергии смогли преодолеть порог протекания и затем рекомбинировать. Поведение данных особенностей (рис. 2 и 3) с ростом тянущего поля объясняется уменьшением заселенности локализованных состояний из-за роста туннелирования носителей заряда через гетерограницу Si/Ge с дальнейшей их рекомбинацией.

В структурах Si/Ge/Si с КТ концентрация КТ приблизительно на порядок меньше, чем в структурах Si/Ge/SiO<sub>x</sub>. Это означает, что в них характерный размер локализованных состояний электронов больше. Часть дырок, находясь в смачивающем слое Ge, локализуется между КТ с образованием экситонных состояний. Поведение особенностей ФП для структур Si/Ge/Si с КТ объясняется наличием этих состояний. Рост температуры и тянущего поля приводит к увеличению заселенности локализованных состояний за счет разрушения экситонных состояний, и уровень протекания достигается электронами при меньшей интенсивности света.

### 4. Заключение

Таким образом, в структурах Si/Ge/Si и Si/Ge/SiO<sub>x</sub> с самоограничивающимися КТ обнаружены участки ступенчатого роста и уменьшения сигнала ФП, зависящие от интенсивности межзонного света. С ростом тянущего

поля и температуры обнаруженные особенности сдвигаются в область больших интенсивностей света для структур Si/Ge/SiO<sub>x</sub> и в противоположную сторону для структур Si/Ge/Si. Анализ результатов проводится в рамках теории протекания неравновесных носителей заряда, локализованных в различных областях структуры.

## Список литературы

- [1] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. ФТП **34**, 1281 (2000).
- [2] O.A. Shegai, V.A. Markov, A.I. Nikiforov, A.S. Shaimuratova, K.S. Zhuravlev. Phys. Low-Dim. Struct. *1/2*, 261 (2002).
- [3] О.А. Шегай, К.С. Журавлев, В.А. Марков, А.И. Никифоров, А.Ш. Шаймуратова. Изв. РАН. Сер. физ. **67**, 192 (2003).
- [4] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. Наука, М. (1979). С. 145.