

сти между параметрами подвижности узлов сети и средней пропускной способностью каналов связи. В разделе 2 представлены результаты моделирования и их анализ.

Литература

1. *Andras Varga*. «OMNeT++ Discrete Event Simulation System» «Version 3.0» «User Manual» – 2004.
2. *Charles E. Perkins, Elizabeth M. Belding-Royer, Samir R. Das*. «Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing» – 2002.
3. *Chiasserini C.-F., Garetto M.* «Modeling the Performance of Wireless Sensor Networks» – «IEEE Infocom» – 2004.
4. *Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, Stephen Wicker*. «Modelling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks» – «IEEE Infocom» – 2002.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР Si/SiGe

А. А. Дмитрук

ВВЕДЕНИЕ

Кремний является непрямозонным материалом и, поэтому, имеет лишь ограниченное применение в оптоэлектронике. Вместе с тем, развитие микро- и нанoeлектроники стимулирует поиск новых методов увеличения излучательной способности Si и Si-совместимых материалов. Известно [1], что дефекты и неоднородности структуры могут приводить к существенному изменению оптических свойств полупроводников. Так, дислокации в кремнии приводят к появлению характерного спектра фоллюминесценции (ФЛ) [2], состоящему, как правило, из четырех спектральных линий: D1 (0.81 эВ), D2 (0.87 эВ), D3 (0.94 эВ) и D4 (1 эВ).

В настоящее время известно, что линия D4 обусловлена рекомбинацией носителей вблизи прямых участков 60° дислокаций. Спектральная линия D3 – точная фоновая копия линии D4, хотя отношения между их интенсивностями является изменяющимся, потому что вероятность взаимодействия «электрон – фонон» зависит от длины прямого дислокационного сегмента. Природа линий D1 и D2 менее понятна. В работе [3] предполагалось, что возможной причиной ФЛ в области линий D1 и D2 являются геометрические особенности дислокационных линий (петли, ступени), примесные атмосферы, дислокации определенных типов (дислокации Ломера) или результаты дислокационных реакций в местах их пересечений. Поскольку длина волны излучения, соответствующего линии D1, попадает в окно прозрачности оптоволоконных линий, исследо-

вания ФЛ от дефектов дислокационного типа имеют не только фундаментальное, но и практическое значение для оптоэлектроники. Поэтому особый интерес вызывают методы управления процессами формирования и развития дислокационной структуры.

Известно [4], что при выращивании эпитаксиальных слоев материалов, имеющих различные параметры кристаллической решетки (например Si и SiGe), на границе раздела происходит формирование дислокационных сеток. Эти дислокационные сетки служат для компенсации напряжений несоответствия кристаллических решеток и, поэтому, называются дислокационными сетками несоответствия (ДСН). Изменяя состав и толщину эпитаксиальных слоев, а также температурные условия их осаждения и последующей термообработки, можно изменять объемную плотность, морфологию, тип, протяженность дислокаций внутри ДСН и, следовательно, их люминесцентные характеристики.

Целью настоящей работы являлось исследование выхода ФЛ от ДСН гетероэпитаксиальной структуры Si/SiGe в зависимости от температуры дополнительной термообработки.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве исходных подложек применялись пластины (001)-Si n-типа проводимости, на которых выращивались эпитаксиальные слои сплавов SiGe с различным химическим составом: Si_{0.55}Ge_{0.45} – образцы серии А и Si_{0.70}Ge_{0.30} – образцы серии В. Эпитаксиальный рост проводился на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Semicon V80, оснащенной двумя электронными пушками для испарения Si и Ge. Для сопряжения кристаллических решеток Si и Si_{1-x}Ge_x, на первом этапе выращивались буферные слои переменного состава с изменением x от 0 до 0,3 (образцы серии В) или 0,45 (образцы серии А). Буферные слои выращивались послойно со ступенчатым изменением концентрации Ge, как это описано в работе [5]. Изменение концентрации в каждом новом слое буфера составляло 5–7 ат.%. После МЛЭ образцы серии А дополнительно имплантировали ионами Ge⁺ с энергией 328 кэВ до дозы $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что приводило к дополнительному увеличению количества дислокаций по сравнению с образцами серии В. Для управления параметрами дислокационной структуры в слоях Si/SiGe образцов А и В был использован термический отжиг в атмосфере сухого кислорода при различных температурно-временных условиях ($800 < T < 1100 \text{ }^\circ\text{C}$; $15 < t < 30 \text{ мин}$). Измерения выхода ФЛ проводились при температуре 4,2 К, возбуждение осуществлялось аргоновым лазером с длиной волны 488 нм и мощностью 6 мВт.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 представлены основные результаты исследования ФЛ от образцов А ($\text{Si}/\text{Si}_{0.55}\text{Ge}_{0.45}$) и образцов В ($\text{Si}/\text{Si}_{0.70}\text{Ge}_{0.30}$) после их выращивания с помощью МЛЭ и последующего термического отжига при различных температурах. Обнаружено, что температура отжига оказывает сильное влияние на выход ФЛ. В частности, из рис. 1 (в, г) следует, что при увеличении температуры отжига происходит непрерывное увеличение интенсивности основных линий ФЛ. Так, по сравнению с исходным образцом, интенсивность линии D1 возрастает в 2–3 раза после отжига при 800 – 900 °С и почти в 15 раз после отжига при температуре 1000–

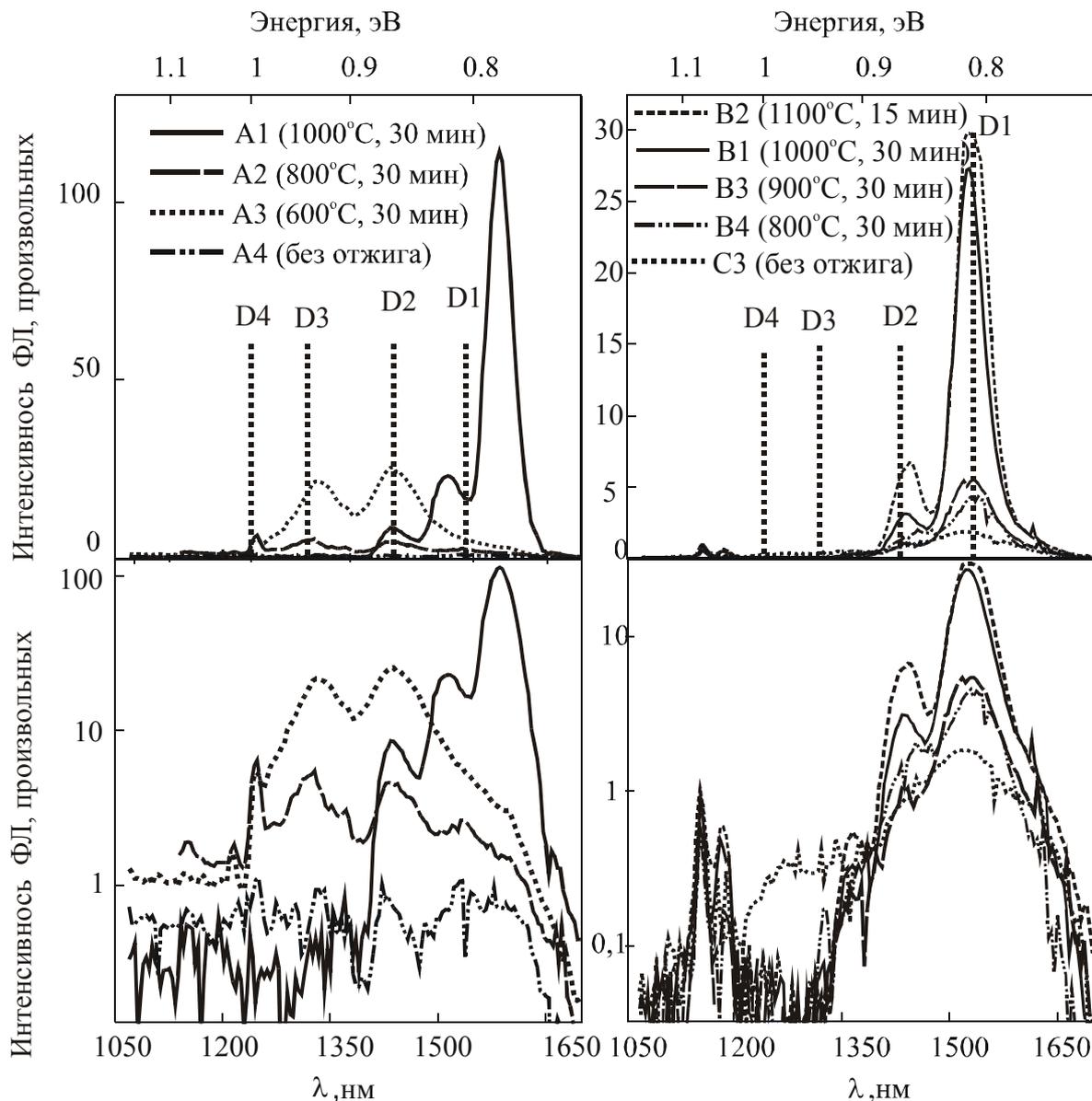


Рис. 1. Выход ФЛ для образцов серии А и В в линейном а, в и полулогарифмическом б, г масштабах

1100°C. Аналогичный рост имеет место и для линии D2. Интенсивность линий D3 и D4 слабее зависит от температуры отжига, хотя и в этом случае имеется заметный рост интенсивности. Классический вид картины ФЛ, зарегистрированной в образцах серии В (рис. 1 в, з) существенно нарушается в случае образцов серии А (рис. 1 а, б). В частности обнаружено, что исходные образцы (до отжига) имеют весьма низкий (сравнимый с фоном) выход ФЛ во всем диапазоне спектра, что можно объяснить аморфизацией приповерхностного слоя SiGe при имплантации ионов Ge. В зависимости от температуры, отжиг образцов А приводит к разнонаправленному изменению пиков на спектре ФЛ. Так, низкотемпературный отжиг при T=600°C сопровождается появлением достаточно интенсивных пиков ФЛ, соответствующих линиям D3 и D4. Однако, при увеличении температуры отжига (T=800°C), интенсивность указанных линий резко уменьшается вплоть до исчезновения (линия D3) при 1000°C. Одновременно происходит появление и резкое усиление новой линии ФЛ в области 0,781 эВ. Указанная линия сдвинута относительно обычного положения линии D1 [2] в область меньших энергий. В настоящее время неясно, является ли новая линия 0,781 эВ результатом сдвига линии D1 в область низких энергий или это новая линия дислокационного спектра ФЛ. Для выяснения природы такого сдвига линии D1 требуются более подробные исследования влияния условий имплантации и отжига сплавов SiGe на спектры ФЛ. В любом случае, принимая во внимание различия в режимах обработки образцов А и В, можно сделать вывод, что обнаруженные различия в спектрах ФЛ (рис. 1а и в) являются следствием имплантационных дефектов, локализованных в приповерхностной области образцов А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе исследована фотолюминесценция из гетероэпитаксиальных структур Si/SiGe, содержащих ДСН и имплантационные дефекты. Установлено, что положение пиков ФЛ и их интенсивность зависит как от условий приготовления образцов (выращивания, состава SiGe сплава, имплантации ионов Ge), так и от температуры последующего отжига. Обнаружен резкий рост интенсивности основных пиков дислокационно-ассистированной ФЛ при увеличении температуры отжига.

Литература

1. Gillard G.D. Photoluminescence spectroscopy of crystalline semiconductors // Mat. Sci. Eng. V. R. 18, 1997, P.417–454.
2. Дроздов Н. А., Патрин А. А., Ткачев В. Д. Рекомбинационное излучение на дислокациях в кремнии // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23. С. 651–653.

3. *Steinman E.A., et al.* Dislocation structure and photoluminescence of partially relaxed SiGe layers on Si (001) substrates // *Semicond. Sci. Technol.* №14. 1999. P. 582–588.
4. *Fitzgerald E. A.* GeSi/Si nanostructures // *Annu. Rev. Mater. Sci.* 1995, v 25, P. 417–454.
5. *Gaiduk P. I., Nylandsted Larsen A., Lundsgaard Hansen J.* Strain-relaxed SiGe/Si heteroepitaxial structures of low threading-dislocation density // *Thin Solid Films.* №367. 2000. P. 120–125.