

06;12

Оптические свойства субмонослойных включений германия в кремниевую матрицу, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии

© Г.Э. Цырлин, P. Werner, G. Gösele,
Б.В. Воловик, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов

Макс-Планк-Институт микроструктурной физики, Халле, Германия
Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург, Россия
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия
Технический университет, Берлин, Германия

Поступило в Редакцию 4 сентября 2000 г.

Исследованы оптические свойства субмонослойных включений Ge в матрицу Si, полученных методом субмонослойной молекулярно-пучковой эпитаксии. Показано, что при повышенной температуре роста структуры (750°C) в оптических спектрах появляется набор новых линий, связываемых нами с образованиями нанометровых островков германия.

1. Введение. Кремний в настоящее время занимает лидирующие позиции на рынке микроэлектронных приборов, однако его применение в оптоэлектронике затруднено в силу не прямой структуры зон, что приводит к значительному снижению эффективности люминесценции Si. Тем не менее интеграция кремниевой микроэлектронной технологии с оптическими средствами передачи данных на одном чипе является актуальной задачей (в первую очередь в области разработки светоизлучающих приборов на основе кремния (СИПК)), для решения которой предпринимаются значительные усилия. Рассматривается несколько подходов к реализации СИПК. Среди них необходимо выделить использование пористого кремния [1], квантовых точек Ge/Si и GeSiC/Si, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [2], легирование кремния редкоземельными примесями [3], встраивание наноструктур InAs в кремниевую матрицу [4] и т.д. Несмотря на достигнутый прогресс в этой области, предлагаемые подходы пока не нашли промышленного применения, что стимулирует поиск альтернативных

подходов к решению проблемы получения СИПК. В данной работе рассматривается один из возможных подходов — внедрение субмонослойных (СМС) включений Ge в кремниевую матрицу и исследуются оптические свойства подобных гетероструктур. Предлагаемый подход основан на предположении, что СМС покрытия Ge могут привести к образованию ансамбля достаточно малых островков (с латеральными размерами, меньшими чем боровский радиус дырки), что вызовет частичное изменение правил отбора для излучательной рекомбинации и возможности образования экситона при взаимодействии электрона с локализованной дыркой, стабильного вплоть до комнатной температуры. Подобная ситуация возможна в том случае, если энергия кулоновского притяжения окажется для электрона сильнее отталкивающего потенциала из-за потенциального барьера, создаваемого СМС внедрением Ge в зоне проводимости, что может приводить к пространственному разделению электронов и дырок в случае квантовых точек большого размера и квантовых ям сравнительно большой ширины [5]. Кроме того, узкая линия фотолюминесценции (ФЛ), характерная для СМС в других гетероэпитаксиальных системах [6–8], должна способствовать увеличению коэффициентов поглощения (усиления) в подобной структуре. Увеличение интенсивности ФЛ может быть также достигнуто за счет многократного складирования слоев с СМС включениями Ge, разделенными барьерами (спейсерами) Si. При этом вероятность образования дислокаций и структурных дефектов невелика вследствие относительно небольшого напряжения в подобной гетероструктуре.

2. Эксперимент. Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber SIVA 45 на подложках Si(100) *n*-типа (проводимость $3 \Omega \cdot \text{cm}$, легирование фосфором). Использовались подложки диаметром 5 дюймов производства фирмы "ОКМЕТИС". Подложки подготавливались химически по следующей методике: 1) кипячение в растворе $\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{SO}_4$ (1:1, 10 min) для удаления органических соединений тяжелых металлов, 2) удаление окисного слоя в растворе $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ (1:10, 1 min, комнатная температура), 3) удаление щелочных металлов, Al, Fe и Mg в растворе 80°C $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:6) в течение 10 min, 4) восстановление окисного слоя в растворе 80°C $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (0.5:1:5) в течение 10 min. После каждой процедуры подложки промывались в деионизованной воде; первая процедура повторялась дважды. Химически подготовленные подложки высушивались в потоке аргона чистоты 6.0 и загружались

в камеру перезарядки установки МПЭ. Подобная методика позволяла удалять окисный слой с поверхности Si в ростовой камере при температуре 840°C путем радиационного нагрева. При росте использовалось вращение нагревателя образца, неравномерность температурного поля по поверхности подложки составляла ~ 5%.

Для получения СМС германия использовалась субмонослойная методика, применяемая ранее нами для выращивания СМС соединений A_3B_5 и A_2B_6 [9–11]. Структуры состояли из буферного слоя Si толщиной 1000 Å, сверхрешетки Ge (0.7 Å)/Si (35 Å) (99 пар) и прикрывающего слоя кремния 200 Å. Скорости роста для кремния и германия составляли 0.5 и 0.05 Å/s соответственно. Постоянство скоростей напыления обеспечивалось с помощью двух масс-спектрометров с обратной связью, настроенных на 28 (Si) и 74 (Ge) массы. Температуры подложки для двух образцов составляли 500°C (образец 1) и 750°C (образец 2). Давление остаточных паров атмосферы во время роста было не хуже $5 \cdot 10^{-9}$ Торр. Состояние поверхности контролировалось *in situ* с помощью дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Фотолюминесценция возбуждалась Ag^+ -лазером ($\lambda = 514.5$ nm, максимальная плотность возбуждения ~ 500 W/cm²). Люминесценция детектировалась охлаждаемым Ge фотодиодом.

Во время роста всей структуры картины ДБЭО не претерпевали каких-либо существенных изменений по сравнению с начальной реконструкцией (2×2) вне зависимости от температуры роста. Таким образом, даже на верхних слоях сверхрешетки поверхность оставалась атомарно-гладкой, и образования трехмерной структуры вследствие релаксации напряжений не наблюдалось.

3. Результаты и обсуждение. Оптические измерения показали, что спектры ФЛ для подложки и образца 1 практически не отличаются друг от друга. Для образца 2 спектры ФЛ характеризуются набором новых линий, не наблюдаемых ни в подложке, ни в образце 1. На рис. 1 для сравнения приведены спектры низкотемпературной ФЛ для подложки и образца 2, полученных при одинаковой плотности возбуждения. Спектр образца 2 обладает интегральной интенсивностью, сравнимой с интенсивностью ФЛ подложки, и характеризуется набором дополнительных линий ФЛ, обозначенных SL (NP, TA, TO, TO + O), отсутствующих в спектрах подложки, при этом линия NP — бесфононная ФЛ, и остальные линии соответствуют излучению с участием соответствующих фононов. Следует отметить, что при как очень высоких, так и сверхнизких

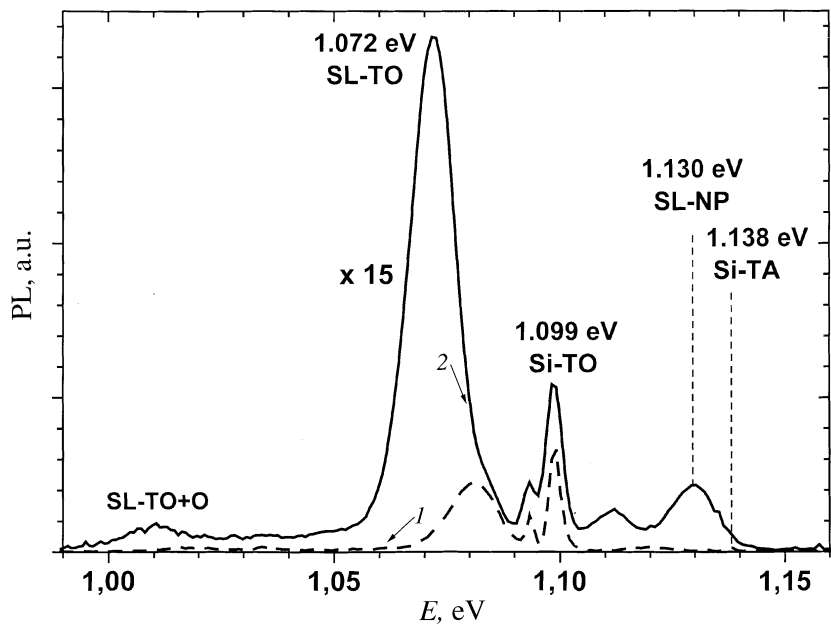


Рис. 1. Спектры ФЛ для Si подложки (1) и структуры 2 (2), снятые при 10 К. Плотность возбуждения 5 W/cm^2 .

уровнях возбуждения Si подложки ФЛ пиков, по своему положению соответствующих L-линиям, не наблюдалось. Линии, характерные для кремниевой подложки, обозначены Si (NP, TA, TO + O). Таким образом, мы связываем наблюдаемую линию SL с излучением экситонов, локализованных на Ge островках, в СМС сверхрешетке.

Соотношение интенсивности пиков СМС сверхрешетки Ge/Si и кремния существенно зависит от плотности возбуждения. На рис. 2 приведены спектры ФЛ, снятые при различных плотностях оптического возбуждения. При увеличении плотности возбуждения наблюдается увеличение соотношения интенсивностей Si-TO/SL-TO линий, однако даже при высоких уровнях возбуждения интегральное соотношение этих пиков сравнимо, а при низких в спектре доминирует SL-TO. Полная ширина на половине высоты линии ФЛ составляет порядка 15 meV .

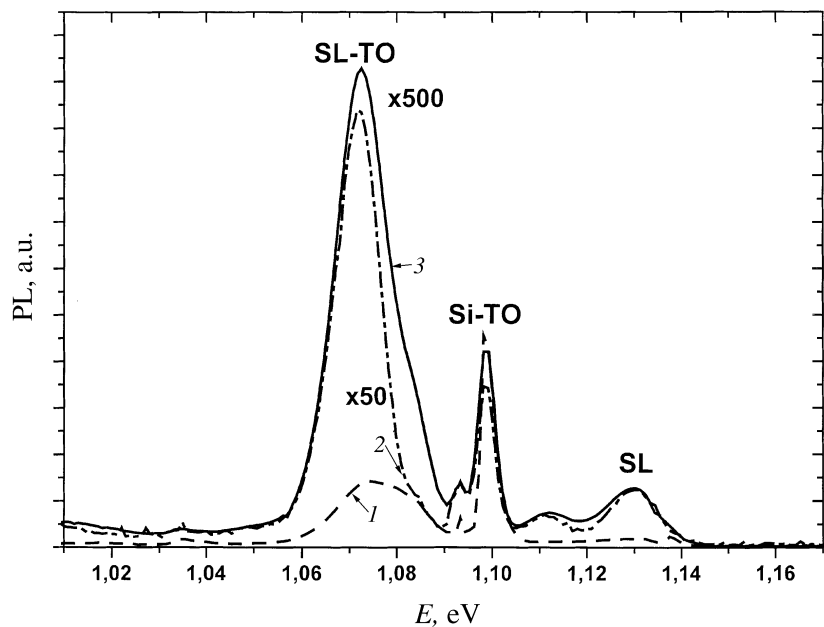


Рис. 2. Спектры ФЛ для структуры 2, снятые при 10 К, для разных плотностей возбуждения; $I_0 = 500 \text{ W/cm}^2$: 1 — $0.5I_0$; 2 — $0.05I_0$; 3 — $0.005I_0$.

При изменении плотности возбуждения не наблюдается сдвига SL–ТО линии. В работе [12] сообщается об образовании квантовых проволок на вицинальной поверхности Si (100) при осаждении малого (до 0.5 МС) количества Ge и последующем зарощивании кремнием при газофазной МПЭ. Согласно выводам [12], наблюдаемое поведение положения пика SL–ТО может быть объяснено образованием в такой системе плотности состояний, характерной для латерально-ограниченной конфигурации. Положение ТО пика для 0.12 МС Ge в работе [12] и характер зависимости интенсивности ФЛ соответствуют нашим данным для пика, обозначенного SL–ТО.

На рис. 3 приведены температурные зависимости спектров ФЛ, снятые при плотности возбуждения 500 W/cm^2 , для образца 2. Несмотря на довольно существенное падение интегральной интенсивности, не на-

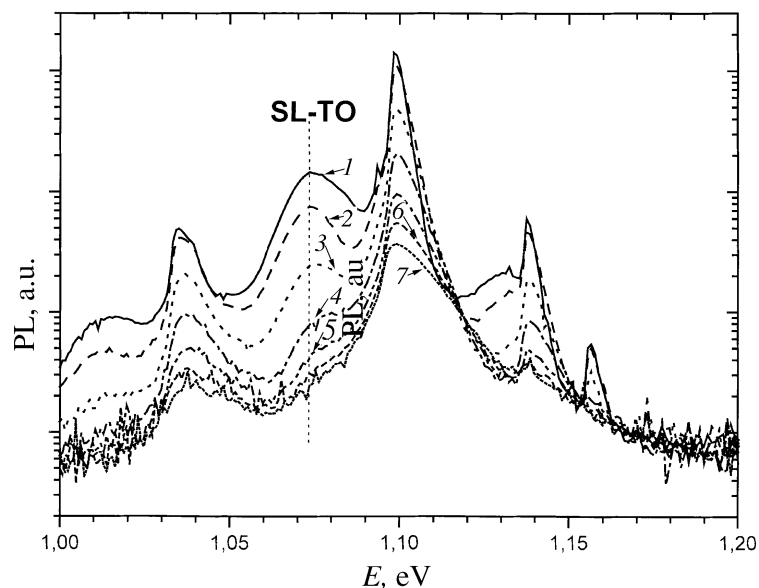


Рис. 3. Спектры ФЛ для структуры 2, снятые при разных температурах наблюдения. Плотность возбуждения 500 W/cm^2 : 1 — 10; 2 — 20; 3 — 30; 4 — 40; 5 — 50; 6 — 60; 7 — 70 К.

блюдается смещения максимума линии SL–TO. Смещение в коротковолновую область при повышении температуры наблюдалось, например, в гетероэпитаксиальной системе InAs/Si [13], что было объяснено II типом гетероперехода. Таким образом, наши данные свидетельствуют об ином, нежели типичный для гетероперехода II рода, характере наблюдаемых SL линий.

Отсутствие в оптических спектрах образца 1 характерных особенностей, обнаруженных в спектрах образца 2, скорее всего, может быть связано с образованием двумерных островков большего диаметра, чем боровский радиус дырки, что приводит к делокализации дырок в данной геометрии. Для прояснения этого предположения необходимо проведение детального исследования данных образцов методом трансмиссионной электронной микроскопии высокого разрешения. Отметим, что

эффект увеличения латеральных размеров с уменьшением температуры эпитаксии наблюдался, например, для системы СМС InAs/GaAs.

Таким образом, в гетероэпитаксиальной системе Ge субмонослойных включений в кремниевую матрицу нами обнаружен набор пиков ФЛ, отличающихся от типичного спектра Si. Анализ оптических данных позволяет заключить, что за появление данных линий ответственны СМС включения Ge с характерными латеральными размерами, меньшими боровского радиуса дырки. При превышении этого размера подобных пиков в спектрах ФЛ не наблюдается. Система СМС включений в матрицу Si может рассматриваться как один из возможных вариантов создания СИПК.

Авторы выражают благодарность РФФИ и программе "Физика твердотельных наноструктур" за частичную поддержку данной работы.

Список литературы

- [1] Cullis A.G., Canham L.T., Calcott P.D. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. P. 909.
- [2] Eberl K., Brunner K., Winter W. // Thin Solid Films. 1997. V. 294. P. 98.
- [3] Coffa S., Franzo G., Priolo F. // MRS Bulletin. 1998. V. 23 (4). P. 25.
- [4] Cirlin G.E., Dubrovskii V.G., Petrov V.N., Polyakov N.K., Korneeva N.P., Demidov V.N., Golubok A.O., Masalov S.A., Kurochkin D.V., Gorbenko O.M., Komyak N.I., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Koush A.R., Maximov M.V., Tsatusul'nikov A.F., Volovik B.V., Zhukov A.E., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Grundmann M., Bimberg D. // Semicond. Sci. Technol. 1998. V. 13. P. 1262.
- [5] Ledentsov N.N., Krestnikov I.L., Maximov M.V., Ivanov S.V., Sorokin S.L., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Bimberg D., Sotomayor Torres C.M. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 1343.
- [6] Ledentsov N.N., Tsatusul'nikov A.F., Egorov A.Yu., Kop'ev P.S., Koush A.R., Maximov M.V., Ustinov V.M., Volovik B.V., Zhukov A.E., Alferov Zh.I., Krestnikov I.L., Bimberg D., Hoffmann A. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 74. P. 161.
- [7] Belousov M.V., Ledentsov N.N., Maximov M.V., Wang P.D., Yassievich I.N., Faleev N.N., Kozin I.A., Ustinov V.M., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 14346.
- [8] Wang P.D., Ledentsov N.N., Sotomayor Torres C.M., Kop'ev P.S., Ustinov V.M. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 1526.
- [9] Цырлин Г.Э., Голубок А.О., Тупицев С.Я., Леденцов Н.Н., Гурьянов Г.М. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 1697.

- [10] Cirlin G.E., Petrov V.N., Golubok A.O., Tapissev S.Ya., Dubrovskii V.G., Guryanov G.M., Ledentsov N.N., Bimberg D. // Surf. Sci. 1997. V. 377–379. P. 895.
- [11] Sunamara H., Usami N., Shiraki Y., Fukatsu S. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 1847.
- [12] Heitz R., Ledentsov N.N., Bimberg D., Egorov A.Yu., Maximov M.V., Ustinov V.M., Zhukov A.E., Alferov Zh.I., Cirlin G.E., Soshnikov I.P., Zakharov N.D., Werner P., Gösele U. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 1701.