

СТРУКТУРА И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ InSb, СФОРМИРОВАННЫМИ ВЫСОКОДОЗНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ

Ф. Ф. Комаров, И. А. Романов, Л. А. Власукова, О. В. Мильчанин,
И. Н. Пархоменко

Белорусский государственный университет, Минск
E-mail: u235rv@gmail.com

В последние годы активно ведутся разработки структур на основе кремния со встроенными квантовыми точками полупроводников A^3B^5 , способных излучать свет в ближнем ИК диапазоне, что дает возможность использовать их в системах оптоволоконной связи. Одним из способов создания нанокластеров (НК) A^3B^5 в кремнии является высокодозная ионная имплантация в сочетании с термообработками. В работах [1-2] сообщается о низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) систем «Si + нанокристаллы A^3B^5 ». Природа люминесценции таких систем до конца не выяснена. Одни авторы связывают ФЛ с квантово-размерным эффектом в НК- A^3B^5 , другие – с присутствием атомов примеси или дефектов в кремниевой матрице.

Целью настоящей работы является формирование светоизлучающей структуры «НК InSb в кремнии» методом высокодозной ионной имплантации и термообработок и выяснение природы ФЛ.

Образцы монокристаллического Si кристаллографической ориентации (100) имплантировались последовательно ионами Sb^+ и In^+ с энергиями 350 кэВ и дозами $3,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при температуре 500°C. Повышенная температура имплантации использовалась для предотвращения аморфизации кремния. Пост-имплантационные отжиги проводились в печи сопротивления в атмосфере аргона при 1100°C в течение 30 минут. Дозы и энергии имплантации выбирались на основании моделирования (SRIM'2008) так, чтобы получить одинаковую концентрацию примесей III и V групп (5–6) ат.% на глубинах 120 – 150 нм в кремнии.

Структурно-фазовые превращения исследовались с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе Hitachi H-800 с ускоряющим напряжением 200 кэВ в геометрии «plan-view».

Химический и фазовый состав имплантированных образцов исследовался методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) на установке RAMANOR U-1000. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировались при температуре жидкого гелия. Для возбуждения ФЛ использовался аргоновый лазер ($\lambda = 514.5 \text{ нм}$).

Рис. 1 иллюстрирует структуру кремния, имплантированного Sb и In после термообработки. Данные ПЭМ и электронной дифракции не подтверждают аморфизации приповерхностного слоя кремния после горячей имплантации, хотя уровень повреждения имплантированных образцов является существенным. Кристаллический характер преципитатов подтверждается наличием муарового контраста (не приводится). Размер преципитатов колеблется от 2 до 50 нм.

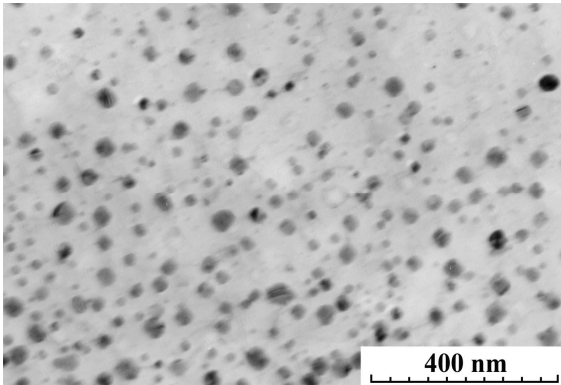


Рис. 1. Светлопольное ПЭМ изображение образца кремния после горячей имплантации Sb и In и отжига при 1100°C в течение 30 мин

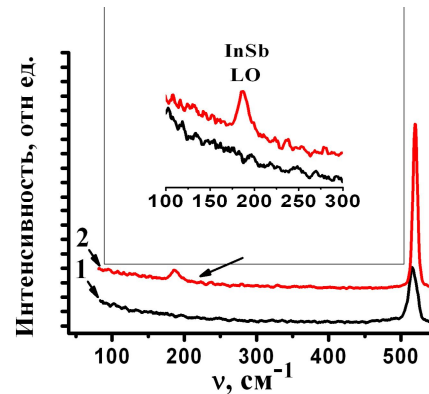


Рис. 2. Спектры КРС образца кремния после горячей имплантации Sb и In (кривая 1), и отжига при 1100°C в течение 30 мин. (кривая 2)

На рис. 2 показаны спектры КРС исходных и отожженных имплантированных образцов. В спектре исходного образца полоса с максимумом при 516 см^{-1} соответствует рассеянию на кристаллическом кремнии. Наличие этого пика в спектре подтверждает кристаллическое состояние кремниевой матрицы после высокодозной «горячей» имплантации. После отжига интенсивность «кремниевой» полосы возрастает, максимум сдвигается к 519 см^{-1} . На наш взгляд этот сдвиг указывает на существование механических деформаций внутри имплантированного слоя. Полоса малой интенсивности при 187 см^{-1} подтверждает наличие нанокристаллов InSb в отожженном образце. Эту полосу можно приписать LO-фононному рассеянию кристаллической фазы InSb [1, 2].

На рисунке 3 показан спектр низкотемпературной ФЛ имплантированного и отожженного образца. Приведенный спектр ФЛ характеризуется наличием узкой линии экситонного излучения кремния при 1,09 эВ и широкой интенсивной полосы в интервале 0,75–1,05 эВ. Подобная полоса наблюдалась ранее в спектрах ФЛ нанокристаллов InAs и InSb, выращенных на пластинах Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии или синтезированных методом высокодозной ионной имплантации (In+As) и (In+Sb) в Si [1, 2]. Эта полоса приписывалась свечению НК InAs и InSb. Однако стоит отметить, что положение максимума данной полосы прак-

тически не зависит от размеров НК. Это является аргументом против квантово-размерной природы наблюдаемого свечения. На наш взгляд, основной вклад в люминесценцию в интервале 0,75–1,05 эВ вносит переход «зона проводимости-Si – акцептор-In», причем пик при 0,95 эВ соответствует переходу с излучением поперечного оптического фонона, а пик при 0,99 эВ – переходу с излучением поперечного акустического фонона [3].

В высокоэнергетической области спектра регистрируются узкие линии (показаны стрелками на вставке). Похожие узкие линии были обнаружены ранее в кристаллах кремния, легированных In и As и приписывались рекомбинации донорно-акцепторной пары носителей заряда между In-акцептором и As-донором [1].

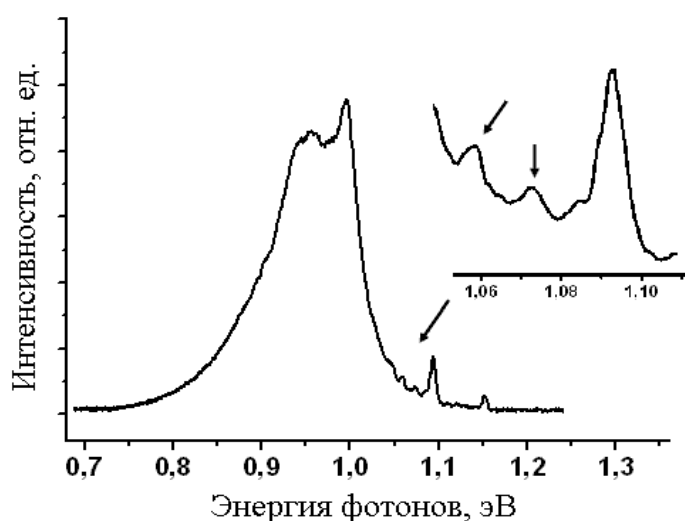


Рис.3. Снятый при 4,2 К спектр ФЛ образца кремния после горячей имплантации Sb и In и отжига при 1100°С в течение 30 мин

Таким образом, установлено, что высокодозная имплантация в кремний ионов Sb^+ и In^+ с энергиями 350 кэВ дозами $3,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с последующим отжигом при 1100°С приводит к формированию нанокристаллов InSb в кремниевой матрице. Спектр ФЛ характеризуется наличием узкой линии экситонного излучения кремния при 1,09 эВ и широкой интенсивной полосы в интервале 0,75–1,05 эВ. Предположительно, полоса фотолюминесценции в интервале 0,75–1,05 эВ соответствует переходам «зона проводимости-Si – акцептор-In».

1. Komarov F., Vlasukova L., Milchanin O. // Acta Physica Polonica A. 2011. Vol. 120, № 1. P. 0–3.
2. Komarov F., Vlasukova L., Greben M. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2013. Vol. 307, P. 102-106.
3. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985. 392 с.