

СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПРЕССИОННЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

¹Мудрый А. В., ¹Бородавченко О. М., ¹Живулько В. Д.,

²Асташинский В. М., ²Кудактин Р. С., ³Леоненя М. С., ³Яблонский Г. П.

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»,
г. Минск, Беларусь, E-mail: mudryi@physics.by

²Институт тепло- и массообмена им А. В. Лыкова НАН Беларуси»,
г. Минск, Беларусь

³Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Монокристаллический кремний является одним из основных наиболее востребованных материалов современной полупроводниковой опто-, микро- и наноэлектроники [1]. Поэтому научный интерес к изучению физических свойств этого полупроводника в последние годы только усиливается и идёт поиск новых направлений его практического применения. Недавно были опубликованы работы по изучению влияния воздействия компрессионных плазменных потоков на модификацию физических свойств монокристаллического [2,3] и пористого [4] кремния. В настоящей работе приводятся новые данные по изучению оптических и структурных характеристик монокристаллического Si, подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков.

Исследования проводились на монокристаллическом кремнии р-типа проводимости с удельным сопротивлением 4.5 Ом·см. Обработка пластинок кремния с размерами 8x8 мм² осуществлялась в плазме азота с давлением ~400 Па при плотности ~ 10¹⁷ см⁻³ в течение 100 мсек. Энергия плазмы составляла ~5–9 Дж·см⁻².

На рисунке 1 представлены изображения поверхности от нескольких участков кремниевой пластинки после компрессионной плазменной обработки в атмосфере азота, снятые с разрешением 20–100 мкм. Изображения были получены с помощью оптического микроскопа Olympus G-41 с использованием широкополосных окуляров, обеспечивающих резкое изображение в светлом и тёмном поле с увеличением до 1000 крат.

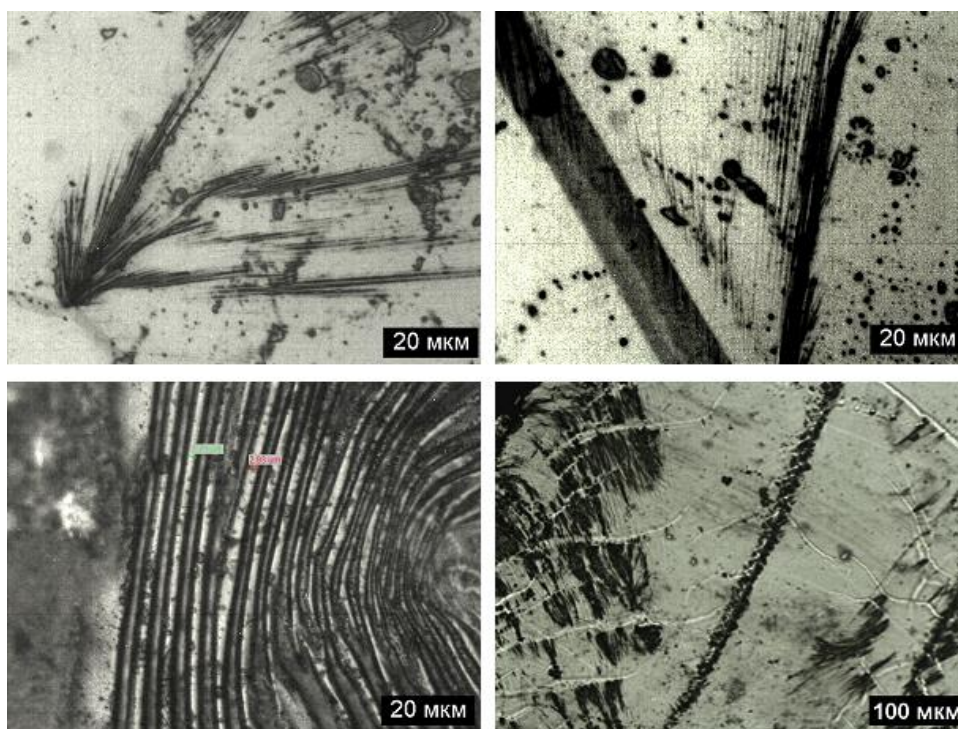


Рисунок 1 – Изображения поверхности от нескольких участков кремниевой пластинки после компрессионной плазменной обработки, снятые с разрешением 20 – 100 мкм

Как видно, после плазменного воздействия проявляется микрорельеф поверхности кремния с аксессуарами различного типа, которые отражают эффект расплавления и перекристаллизации поверхности. В частности, наблюдаются различные выступы и впадины, перекристаллизованные фигуры, слоисто ступенчатые разветвляющиеся образования и т.д. На поверхности отчетливо видны локальные области зарождения волнообразных или линейных фронтов плавления и перекристаллизации кремния. Все эти поверхностные микрообразования обусловлены высокой скоростью расплавления и перекристаллизацией поверхностных слоёв. Микрорельеф поверхности кремния неоднороден, что может быть связано с неравномерностью распределения плотности мощности компрессионного плазменного потока, падающего на исходную полированную и протравленную поверхность.

На рисунках 2,а и 2,б приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) Si после компрессионного плазменного воздействия, снятые для двух образцов 1 и 2 при температуре жидкого гелия ~ 4.2 К и азота ~ 78 К, соответственно. Спектры ФЛ зарегистрированы при возбуждении Si твердотельным лазером, работающим на длине волны ~ 532 нм.

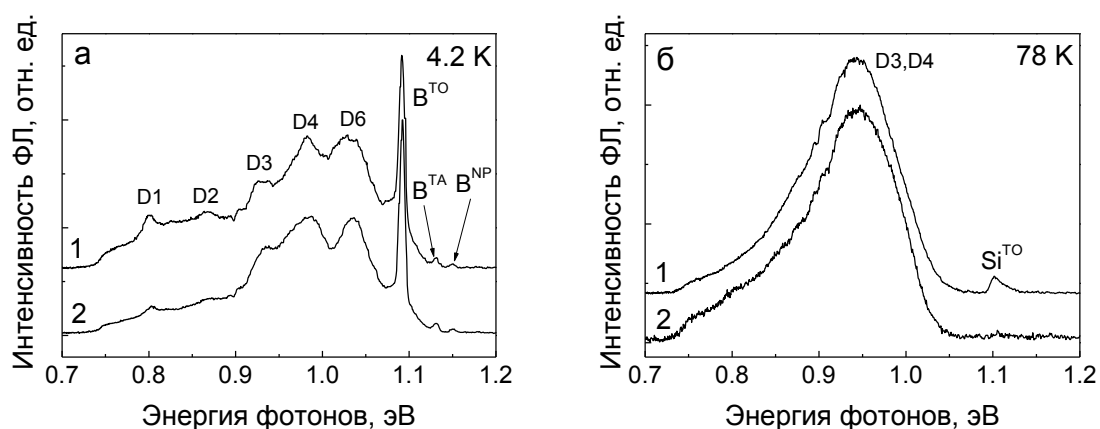


Рисунок 2 – Спектры ФЛ кремния после компрессионного плазменного воздействия

В спектрах ФЛ при 4.2 К присутствует узкая линия $B^{NP} \sim 1.15$ эВ, относящиеся к бесфононной излучательной рекомбинации экситонов, локализованных на атомах бора, как основной легирующей примеси кремния, рисунок 2,а. Линии $B^{TA} \sim 1.133$ эВ и $B^{TO} \sim 1.093$ эВ являются её фонными повторениями (символы TA и TO обозначают поперечные акустические и оптические фононы с энергиями ~ 18 мэВ и 58 мэВ). Широкие полосы ФЛ с максимумами в спектральной области $D1 \sim 0.801$, $D2 \sim 0.868$, $D3 \sim 0.934$, $D4 \sim 0.983$ и $D6 \sim 1.033$ эВ могут быть отнесены к излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда на дислокациях [4,5]. Необходимо отметить, что в спектрах ФЛ исходного Si до компрессионной плазменной обработки наблюдались только узкие линии от экситонов, связанных на атомах бора: B^{NP} , B^{TA} и B^{TO} . В спектрах ФЛ исходного Si в области энергий 0.70–1.05 эВ никаких дополнительных полос обнаружено не было.

После компрессионной плазменной обработки в спектрах ФЛ Si при 78 К наблюдается широкая дислокационная полоса $D3, D4 \sim 0.943$ эВ и высокоэнергетическая полоса $Si^{TO} \sim 1.10$ эВ, обусловленная излучательной рекомбинацией свободных экситонов с испусканием поперечных оптических фононов $TO \sim 58$ мэВ в монокристаллическом Si.

На рисунке 3 приведены спектры ФЛ, снятые при 78 К, для трёх других образцов Si после компрессионного плазменного воздействия. Как видно на рисунке 3, для каждого образца характерен свой набор полос дислокационной люминесценции, различающихся спектральной формой и энергетическим положением. Например, для образца 1 характерно наличие четырёх дислокационных полос $D1 \sim 0.818$, $D2 \sim 0.860$, $D3 \sim 0.933$ и $D4 \sim 0.992$ эВ с наиболее интенсивной полосой D1. Как правило, такое

соотношением относительных интенсивностей полос дислокационной люминесценции наблюдается для пластически деформированного кремния [4].

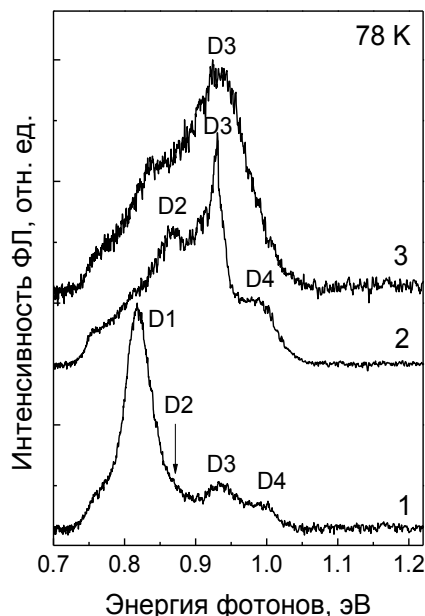


Рисунок 3 – Спектры ФЛ трёх образцов Si

Для образца 2 положение полос составляло D2~0.868, D3~0.930 и D4~0.983 эВ, а для образца 3 наблюдалась широкая полоса D3,D4~0.933 эВ. Эксперименты показали, что энергетическое положение полос дислокационной люминесценции, их интенсивность и спектральная форма могут изменяться при сканировании возбуждающего лазерного луча по поверхности образцов. Разброс спектрального положения полос дислокационной люминесценции в разных образцах составлял ~3–20 мэВ. Это свидетельствует о разном преимущественном типе создаваемых дислокаций, их разной концентрации и неоднородном характере распределения в поверхностных слоях Si после воздействия компрессионным плазменным потоком. Причиной этого может являться неравномерное распределение плотности энергии плазменного пучка на поверхности кремниевой пластинки. Физическая причина разброса энергетических уровней дислокаций в запрещенной зоне Si может быть связана с разной величиной внутренних напряжений вблизи локализации соответствующих дислокаций. Кроме этого при компрессионном плазменном воздействии расплавление монокристаллического Si может приводить к сегрегации кислорода и углерода, как остаточных технологических примесей, на дислокациях и изменять их энергетические состояния.

Список литературы:

1. E. Galla. Crystal Growth and Evolution of Silicone for VLSI and ULSI. CRC Press. Taylor and Francis Group, New York, 2014.
2. V. V. Uglov, N. T. Kvasov, R. S. Kudakstin, Yu. A. Petukhou, V. M. Astashinski, A. M. Kuzmitski. Energy Procedia 44, 10 (2014).
3. N. G. Galkin, D. T. Yan, E. A. Chusovitin, A. B. Rasin, K. N. Galkin, M. V. Bozhenko, V. V. Mararov, V. M. Astashinsky, A. M. Kuzmitsky. Solid State Phenomena 213, 90 (2014).
4. N. A. Drozdov, A. A. Patrino, V. D. Tkachev. Письма в ЖЭТФ 23, 597 (1976).
5. R. Sauer, J. Weber, J. Stolz. Appl. Phys. A36, 1 (1985).