

Исследование ИК фотодиодов на основе РbТе, полученных на буферном подслое пористого кремния

© Л.В. Беляков*, И.Б. Захарова, Т.И. Зубкова, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков

Государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 13 марта 1996 г. Принята к печати 25 марта 1996 г.)

Исследовано формирование эпитаксиальных пленок теллурида свинца на кремниевой подложке с буферным подслоем пористого кремния. Несмотря на большое рассогласование постоянных решетки и температурного коэффициента расширения кремния и теллурида свинца, сформированные на основе этих пленок методом ионного легирования вертикальные фотодиоды инфракрасного диапазона характеризуются параметрами, приближающимися к параметрам аналогичных фотодиодов на ориентирующей подложке.

Пленки халькогенидов свинца на кремниевой подложке могут служить основой для формирования широкого класса оптоэлектронных приборов ИК диапазона в сочетании со схемами считывания на основе кремния. Однако серьезным препятствием для роста эпитаксиальных пленок хорошего качества на Si является большое рассогласование постоянных решетки (для теллурида свинца 17%) и температурных коэффициентов расширения халькогенидов свинца и кремния, что приводит к необходимости применения буферных подслоев фторидов кальция и бария. Известно, однако, что пористый кремний (ПК) может использоваться как буферный подслой при выращивании на кремнии полупроводниковых эпитаксиальных пленок. При этом слой пористого кремния выступает как эластичная матрица с наноразмерными порами, которые компенсируют упругие напряжения полиморфного слоя. В работе [1] недавно сообщалось об успешном опыте выращивания на пористом кремнии методом молекулярно-лучевой эпитаксии пленок сульфида свинца с качеством, приемлемым для оптоэлектронных приборов. В данной работе исследуются процессы формирования пленок теллурида свинца при конденсации из газодинамического потока на подслое пористого кремния с различными параметрами и формирование на основе таких слоев методом ионной имплантации вертикальных фотодиодов с высокими фотоэлектрическими характеристиками.

Вертикальные фотодиоды на основе эпитаксиальных пленок РbТе, полученных на ориентирующей подложке ВаF₂, имеют ряд преимуществ перед диодами с планарной геометрией [2] и показывают фоточувствительность в диапазоне 3–5 мкм, близкую к предельной, т.е. к режиму ограничения фоном. Препятствием на пути формирования линеек или матриц таких фотодиодов на кремниевой подложке являются высокие требования к совершенству пленок, так как в случае поликристаллических пленок РbТе границы кристаллитов шунтируют *p-n*-переход, при-

водя к возрастанию токов утечки и т.д. Можно было ожидать, что применение буферного подслоя пористого кремния позволит получить качественные эпитаксиальные пленки РbТе и соответственно высокочувствительные вертикальные ИК фотодиоды на кремниевой подложке.

Слои ПК толщиной 0.5–1.0 мкм были сформированы на подложках кремния *n*-типа, легированного фосфором, с удельным сопротивлением $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и кремния *p*-типа, легированного бором, с удельным сопротивлением 10 Ом·см, с ориентацией [100]. Использовались режимы анодирования с подсветкой и без нее при плотности анодного тока 5–20 мА/см² в электролите 48% HF–изопропиловый спирт в соотношении 1:1. Толщина слоев ПК определялась на интерферометре МИИ-4 после травливания пористого кремния в 5% растворе КОН при температуре 50°C. Структура полученных слоев ПК исследовалась методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для формирования электрического контакта при проведении структурных исследований на поверхность ПК напылялся слой золота толщиной 10 нм. Полученные результаты показали, что на кремнии *n*-типа формируются крупнопористые слои с характерным размером неоднородности 0.5–1 мкм. На *p*-Si при плотности тока до 10 мА/см² в темноте и толщине слоя пористого кремния ~ 1 мкм характерный размер неоднородности, выявляемой методом СТМ, составляет 30–40 нм (рис. 1). Такие слои проявляли интенсивную фотолюминесценцию с широким максимумом в области 600–650 нм при освещении светом 300–400 нм (ртутная лампа с фильтром УФС-1). Наличие такой люминесценции может служить методом экспресс-контроля качества и равномерности слоев ПК и пригодности их для дальнейшей эпитаксии, так как именно на таких подслоях были получены наиболее совершенные слои РbТе.

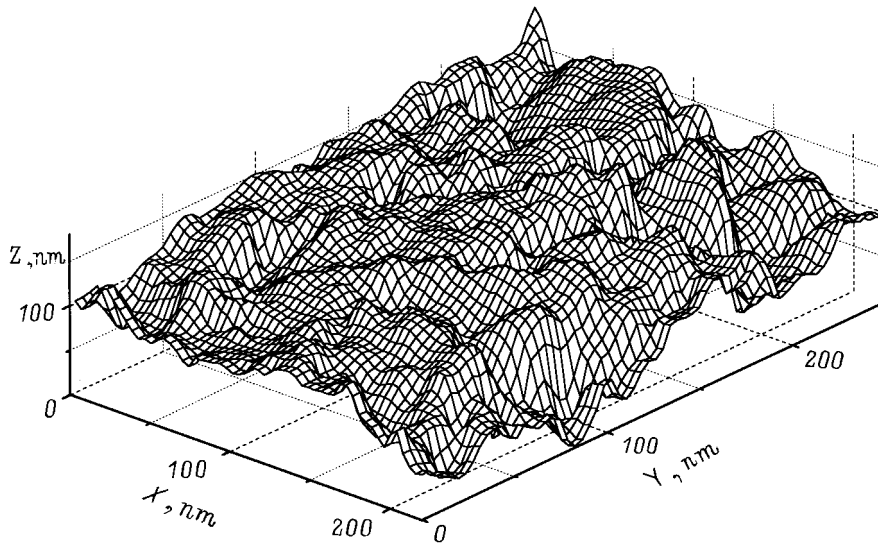


Рис. 1. Морфология буферного подслоя пористого кремния, полученная методом СТМ.

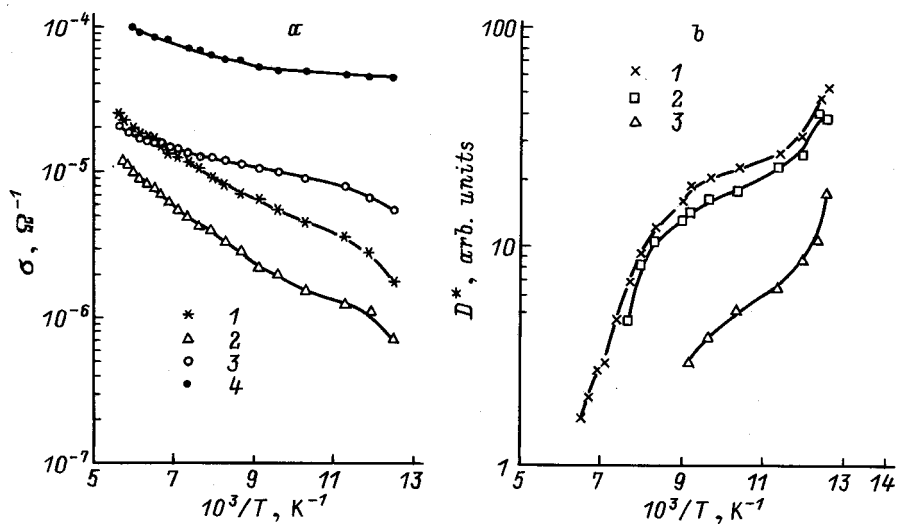


Рис. 2. *a* — температурные зависимости электропроводности пленок РbТе на различных подложках: 1 — на аморфной подложке (фотостекло), 2 — на подслое ПК (на Si *n*-типа), 3 — на подслое ПК (на Si *p*-типа), 4 — на ориентирующей подложке (слюда). *b* — температурные зависимости удельной обнаружительной способности вертикальных ИК фотодиодов на подложках: 1 — слюда, 2 — ПК (*p*-тип Si), 3 — Si.

На обоих типах буферных слоев ПК, а также на контрольных подложках кремния (неориентирующая подложка, которая приводит к конденсации поликристаллических пленок РbТе) и слюды (ориентирующая подложка, на ней формируются совершенные эпитаксиальные пленки РbТе) методом конденсации из газодинамического потока в квазизамкнутом объеме были получены слои компенсированного теллурида свинца толщиной 0.5–0.6 мкм. Режимы получения пленок РbТе и структура пленок на ориентирующей подложке и кремнии описаны в [3]. Измерения температурной зависимости электропроводности пленок теллурида свинца в широком температурном

диапазоне (рис. 2, *a*) позволили определить энергию активации проводимости, по величине которой можно оценить дрейфовые барьеры токопротекания (E_d). У пленок РbТе с буферным подслоем ПК на Si *p*-типа величина $E_d = 13–15$ мэВ и близка к E_d совершенных эпитаксиальных пленок на слюде. С другой стороны, у пленок РbТе на ПК *n*-типа $E_d = 39–40$ эВ и совпадает с E_d пленок на кремнии; такая же величина E_d наблюдалась у поликристаллических пленок компенсированного РbТе на аморфной неориентирующей подложке — фотостекле [3].

Для получения вертикальных фотодиодов использовался метод ионной имплантации. Поскольку соб-

ственные дефекты в халькогенидах свинца являются электрически активными, при ионной имплантации РbTe *p*-типа ионами Ag⁺ за счет образования в имплантированной области собственных дефектов (вакансий халькогена) формируется область устойчивого *n*-типа с концентрациями носителей тока до 10¹⁸ см⁻³ [4]. При этом глубина слоев, в которых наблюдается инверсия типа проводимости, на порядок и более превышает расчетную глубину проникновения имплантированных ионов и составляет 0.2–0.6 мкм при энергии ионов 100 кэВ. В нашем случае применялась ионная имплантация ионов N₂⁺ с энергией 60 кэВ при плотности ионного тока 2 мА/см² и получены вертикальные фотодиоды шириной 1 мм. Оптическая площадь фотодиода определяется длиной собирания носителей тока в *n*- и *p*-областях и составляет (1–2) × 10⁻² мм². Измерения вольт-амперных характеристик полученных структур показали, что при указанных режимах имплантации на всей глубине пленки РbTe (0.5 мкм) формируется *p*–*n*-переход с энергетическим барьером $\varphi \approx 60$ –120 мэВ и величиной сопротивления при нулевом смещении $R_0 \approx 20$ –150 кОм. Наилучшие значения параметров фотодиодов получены для эпитаксиальных пленок РbTe на слюде и ПК. На установке "черное тело" ИЧФР-11А были измерены температурные зависимости удельной обнаружительной способности D^* фотодиодов при наличии фонового облучения с температурой 300 К. Параметры приборов, сформированных на основе совершенных эпитаксиальных пленок РbTe на слюде и на буферном подслое ПК с наноразмерными порами, практически совпадают в широком температурном диапазоне (рис. 2, *b*), в то время как без буферного подслоя ПК фоточувствительность диодов ниже на 1–2 порядка.

В результате проведенных исследований установлены закономерности роста эпитаксиальных пленок теллурида свинца с большим рассогласованием постоянных решетки и температурного коэффициента сопротивления на наноразмерной матрице пористого кремния различной структуры. Показана перспективность использования буферных подслоев ПК для формирования на кремнии структур, чувствительных в инфракрасной области спектра. Методом ионного легирования получены вертикальные фотодиоды ИК диапазона с параметрами, приближающимися к параметрам фотодиодов на ориентирующей подложке.

Авторы выражают глубокую благодарность И.А. Аброяну за проведение ионной имплантации пленок теллурида свинца.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ N 96-02-17200, 96-02-17197 и 96-02-17903.

Список литературы

- [1] В.П. Бондаренко, Н.Н. Воронов, В.В. Дикарева, А.М. Дорофеев, В.И. Левченко, Л.И. Постнова, Г.Н. Троянова. Письма в ЖТФ, **20**, В. 10. 51 (1994).
- [2] З.М. Дашевский, М.П. Руденко. ФТП **27**, 662 (1993).
- [3] И.Б. Захарова, Т.И. Зубкова, С.А. Немов, О.В. Рабизо, В.Н. Выдрик. ФТП **28**, 1802 (1994).
- [4] И.А. Аброян, Б.З. Алиев, С.Д. Имамкулиев, С.А. Казьмин, В.И. Кайданов, Г.Д. Касаманли, А.В. Суворов. ФТП, **17**, 611 (1983).

Редактор В.В. Чалдышев

Investigation of PbTe photodiodes with a buffer porous silicon sublayer

L.V. Belyakov*, I.B. Zakharova, T.I. Zubkova, S.F. Musikhin, S.A. Rykov

State Technical University,
195251 St.-Petersburg, Russia
*A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.-Peterburg, Russia

Abstract Formation of epitaxial lead telluride films on a silicon substrate with a buffer porous silicon sublayer has been investigated. In these structures vertical-type infrared photodiodes were produced using ion doping. Regardless of a great lattice mismatch and temperature expansion factors between silicon and lead telluride, the photodiode parameters are similar to those of the orientating substrates.