

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГОМАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

© 2013 г. П. Б. Лагов, А. С. Дренин, Е. С. Роговский, А. М. Леднев
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Проанализированы возможные технологические варианты утонения полупроводниковых подложек. Проведена экспериментальная оценка эффективности плазмохимического травления подложек монокристаллического германия с кристаллографической ориентацией (100), применяемых для выращивания гетероэпитаксиальных структур многокаскадных солнечных элементов на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$. Травление выполнено на установке реактивно-ионного травления с источником высокоплотной плазмы индукционного типа в газовой смеси ($SF_6 : Ar = 2 : 1$) через различные фоторезистивные маски. Для масок на основе фоторезиста ФП-383 с шириной окна 2, 4 и 6,5 мкм травление выполнено на глубину 20 мкм. Для маски на основе фоторезиста ФН-11 с шириной окна 95 мкм травление выполнено на глубину 58 мкм. Отмечено уменьшение толщины маски на основе ФП-383 с 1,5 до 0,87 мкм, а также толщины маски на основе ФН-11 с 10 до 8 мкм. Установлено, что скорость травления, значения которой составили 2,1—3,3 мкм/мин, снижается с увеличением ширины окна маски по степенному закону. Сделан вывод о перспективности применения плазмохимического травления на заключительной стадии технологического процесса изготовления многокаскадных солнечных элементов традиционной и метаморфной конструкций для улучшения энерго-массовых характеристик.

Ключевые слова: германий, многокаскадный солнечный элемент, плазмохимическое травление, скорость травления.

Введение

Наиболее эффективными преобразователями солнечного излучения в электричество являются многокаскадные солнечные элементы (МСЭ) на основе полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$. МСЭ представляют собой последовательно включенные $p-n$ -переходы, сформированные в эпитаксиальных слоях с различной шириной запрещенной зоны. Соединение отдельных каскадов ($p-n$ -переходов) обеспечивается с помощью туннельных $p-n$ -переходов [1, 2].

По данным лаборатории NREL на июнь 2013 г. рекордные значения эффективности для 5-каскадного МСЭ на уровне 37,8 % в условиях неконцентрированного излучения достигнуты компанией Spectrolab (Boeing) и для 3-каскадного МСЭ на уровне 44 % в условиях концентрированного (942 \times) излучения — компанией Solar Junction [3].

Для коммерчески доступных 3-каскадных МСЭ при цене 250—400 долл./Вт значения эффективности составляют 29,5 и 28,3 % в зависимости от варианта исполнения. Площадь, занимаемая одним элементом, составляет 26,62 или 29,85 см². Один такой МСЭ вырабатывает мощность 1 Вт при напряжении 2,3 В, спектре АМ0 и температуре 28 °С [4].

Толщина солнечного элемента с учетом контактов — ~160 мкм. При этом 150 мкм толщины составляет германиевая подложка, на которой выращивается много-

слойная гетероэпитаксиальная структура толщиной ~5 мкм. Повысить эффективность МСЭ и улучшить его энерго-массовые характеристики представляется возможным за счет уменьшения толщины подложки в конце технологического цикла после выращивания гетероэпитаксиальной структуры. Для этой цели могут быть использованы различные процессы: химико-механическая подшлифовка, жидкостное травление, плазмохимическое травление, аналог процесса SmartCut [5]. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и ограничения. Подшлифовка не позволяет получить слишком тонкие структуры, жидкостное травление характеризуется подтравом боковой поверхности при использовании маски (примерно на 2/3 от глубины травления [6]), «протонная резка» с последующим «термосколом» в данном случае требует больших значений энергии при малом разбросе флюенса протонов и, как следствие, сложного ускорительного оборудования. В связи с этим перспективным представляется применение плазмохимического травления (ПХТ), обеспечивающего высокую производительность и управляемость процесса глубокого анизотропного травления. Этот процесс в последние годы активно развивается, и успешно апробирован при создании наноразмерных кремниевых структур [6, 7]. Отдельные работы выполнены по травлению германия [8].

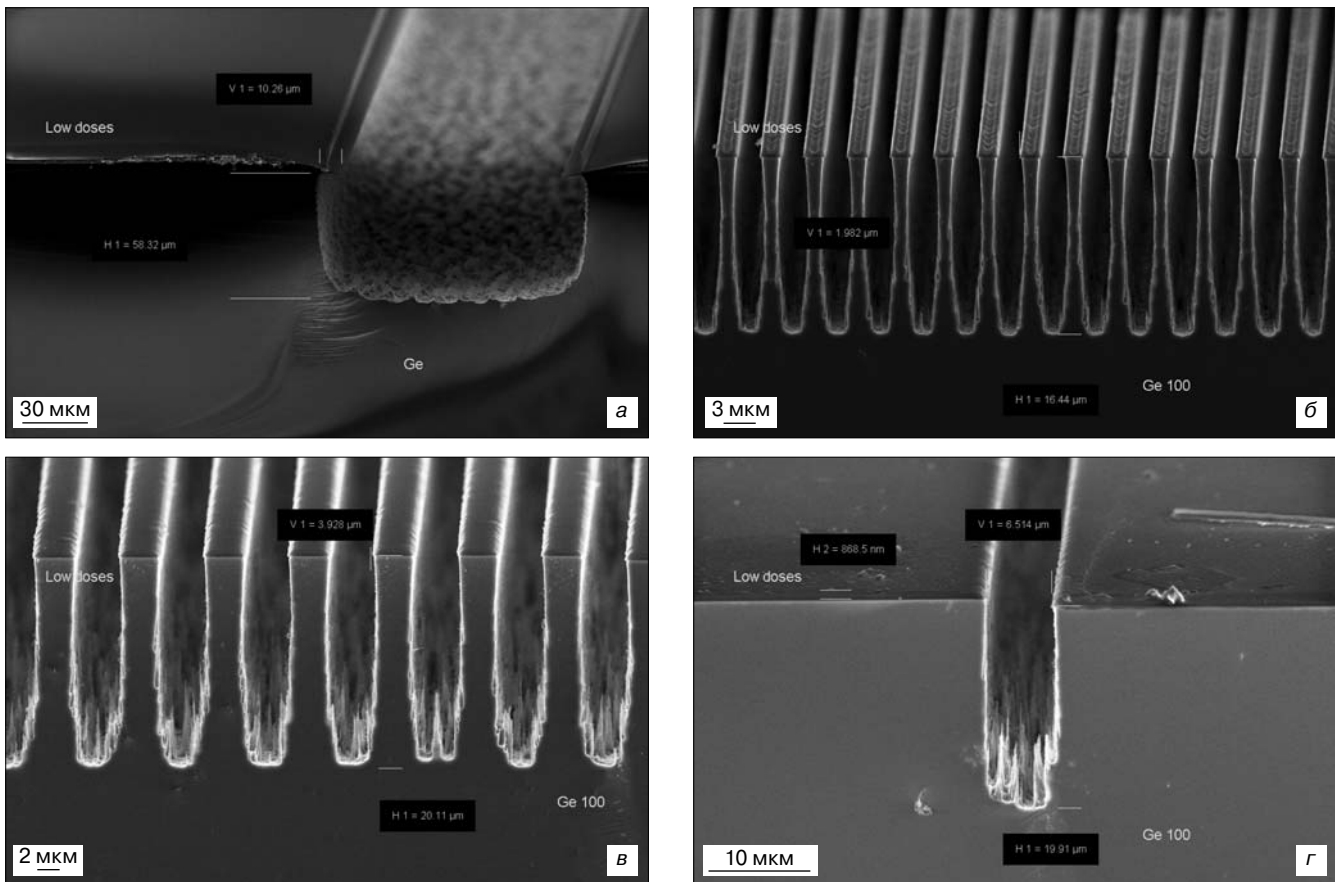


Рис. 1. Изображения сколов микроструктур образцов германия после ПХТ:

а — образец 1, $W = 95$ мкм; б — образец 2, $W = 2$ мкм; в — образец 2, $W = 4$ мкм; г — образец 2, $W = 6,5$ мкм

Процесс ПХТ перспективен при создании так называемых метаморфных МСЭ [2], которые отличаются тем, что сначала на поверхности подложки выращивается широкозонный каскад, а затем каскады на основе соединений с меньшей шириной запрещенной зоны (так называемый обратный рост). Далее структура помещается на гибкий носитель, а исходную подложку удаляют, открывая таким образом наиболее широкозонный каскад солнечному излучению. Создание качественного омического контакта к широкозонным материалам — это сложная технологическая задача, и наиболее интересным вариантом является гетероструктурный контакт на основе германия типа $n\text{-GaAs}-n^+\text{-Ge}-\text{Au}$ [9], который может быть сформирован с применением ПХТ.

Цель работы — определение скорости процесса травления монокристаллического германия и оценка возможности его применения в технологии изготовления многокаскадных солнечных элементов.

Образцы и методы исследования

В качестве образцов при проведении экспериментов использовали подложки монокристаллического германия диаметром 100 мм толщиной 150 мкм с кристаллографической ориентацией (100). На образец германия 1 был нанесен фоторезист ФН-11 толщиной 10 мкм, на образец 2 — фоторезист ФП-383

толщиной 1,5 мкм. Затем с помощью фотолитографии на образце 1 были сформированы окна шириной $W = 95$ мкм, а на образце 2 — окна шириной 2, 4 и 6,5 мкм. ПХТ было реализовано на установке реактивно-ионного травления с источником высокоплотной плазмы индукционного типа «Плазмаком-203». В качестве технологического газа была использована смесь Ar и SF_6 в соотношении 2 : 1.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Изображения сколов микроструктур образцов 1 и 2, полученные на электронном микроскопе Zeiss, представлены на рис. 1.

Из полученных изображений следует, что глубина канавки у образца 1 — 58,3 мкм. Длительность процесса травления — 12 мин (без учета загрузки-выгрузки и откачки), откуда можно заключить, что скорость травления составляет ~4,8 мкм/мин. Отметим, что толщина фоторезиста при этом уменьшилась до 8 мкм.

Как следует из полученных результатов, с уменьшением ширины окна от 6,5 до 2 мкм усиливается травление боковой поверхности стенок германия. Кроме того, наблюдается уменьшение толщины фоторезиста с 1,5 до 0,87 мкм (см. рис. 1, г). Экспериментальные результаты, включая расчетную ско-

**Экспериментальные результаты
по плазмохимическому травлению
образцов германия**

Ширина области травления, мкм	Глубина травления, мкм	Длительность травления, сек	Скорость травления, мкм/мин
1,982	16,44	300	3,29
3,928	20,11	400	3,02
6,514	19,91	420	2,84
95	58,32	1650	2,12

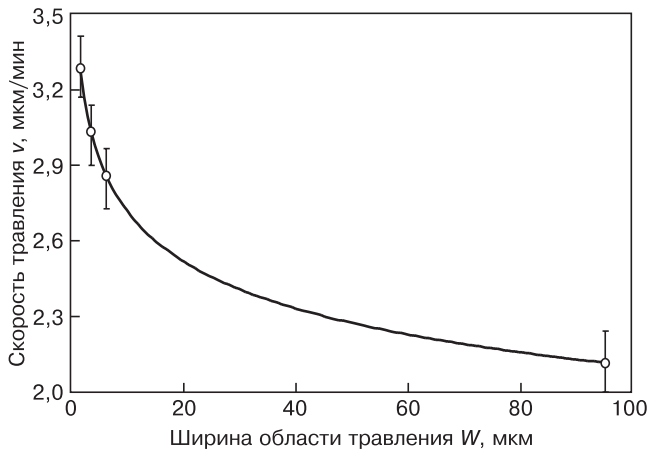


Рис. 2. Зависимость скорости травления германия от ширины окна фоторезистивной маски

рость травления, сведены в таблицу. Зависимость скорости травления германия от ширины окна маски представлена на рис. 2.

Из полученных результатов следует, что ПХТ германия является достаточно хорошо управляемым процессом и характеризуется высокой скоростью травления. Следовательно, после некоторой доработки технологических режимов его можно использовать для утонения подложек после формирования многослойной эпитаксиальной структуры МСЭ на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, т. е. на завершающей стадии технологического процесса.

Применение технологии утонения подложек позволит значительно улучшить энергомассовые характеристики МСЭ. Так, например, уменьшение толщины германиевой подложки МСЭ со 150 до 50 мкм

позволит уменьшить массу 1 м² МСЭ не менее чем на 0,5 кг. Скорость сплошного травления (без применения маски) на основе полученных результатов можно оценить на уровне 2 мкм/мин. Таким образом, для удаления 100 мкм потребуется ~50 мин чистого травления без учета загрузки–выгрузки, что также приемлемо для технологического применения.

Заключение

В результате экспериментальной оценки эффективности ПХТ монокристаллического германия установлено, что скорость травления, значения которой составили 2,1–3,3 мкм/мин, снижается с увеличением ширины окна маски по степенному закону. Отмечено уменьшение толщины маски на основе ФП–383 с 1,5 до 0,87 мкм при травлении германия на глубину 20 мкм и толщины маски на основе ФН–11 с 10 до 8 мкм при травлении на глубину 58 мкм. В связи с этим ПХТ перспективно для использования в технологии изготовления многокаскадных солнечных элементов традиционной и метаморфной конструкций с целью улучшения их энергомассовых характеристик.

Библиографический список

1. Fraas, L. M. Design of high efficiency monolithic stacked multijunction solar cells. / L. M. Fraas, R. C. Knechtli // 13th IEEE Photovoltaic Specialist Conf. Conf. Rec. — Washington (D. C.), 1978. — P. 886–891.
2. King, R. R. 40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells / R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson // Appl. Phys. Lett. — 2007. — V. 90, N 18. — P. 3516.
3. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
4. <http://www.spectrolab.com/faqs-space.htm>
5. US Pat. 5882987 A. Smart-cut process for the production of thin semiconductor material films / K. V. Srikrishnan. Mar 16, 1999.
6. May, G. S. Fundamentals of semiconductor fabrication / G. S. May, S. M. Sze. — N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
7. Averkin, S. N. A microwave high-density plasma source for submicron silicon IC technology / S. N. Averkin, K. A. Valiev, V. A. Naumov, A. V. Kalinin, A. D. Krivospitskii, A. A. Orlikovskii, A. A. Rylov // Russian Microelectronics. — 2001. — T. 30, N 3. — P. 155–159.
8. Taek Sung Kim. Dry etching of germanium using inductively coupled Ar/CCl₂F₂/Cl₂ plasma / Taek Sung Kim, Sang-Sik Choi, Mi Im Shin, Tae Soo Jeong, Sukil Kang, Chel-Jong Choi, Kyu-Hwan Shim // Electron. Mater. Lett. — 2010. — V. 6, N 1. — P. 35–39.
9. Ballingall, J. M. Electron transport across the abrupt Ge–GaAs n–n–heterojunction / J. M. Ballingall, R. A. Stall, C. E. C. Wood, L. F. Eastman // J. Appl. Phys. — 1981. — V. 52. — P. 4098.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы». (ГК № 14.516.11.0007).