Получение эпитаксиальных кремниевых структур для солнечных элементов с применением оборотных технологий

Б.М. Абдурахманов[1], М.М. Адилов[1], Ш.К. Кучканов[1,*], Х.Б. Ашуров[1], Б.К. Исмайлов[2]

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова АН РУз, ул. Дормон йўли, 33, 100125, Ташкент, Узбекистан
[2]Ташкентский государственный технический университет имени И.А. Каримова, ул. Университетская, 4, 100095, Ташкент, Узбекистан

Получена 08.06.2022, revised 21.08.2022

* Corresponding author: e-mail sher.kurbonov@inbox.ru, Phone: +998 977 44 40 79

Показана целесообразность применения в процессах газофазного получения эпитаксиальных структур кремния для солнечных элементов оборотных технологий, ранее хорошо зарекомендовавших себя в хлоридном производстве кремния-сырца, что привело к значительному удешевлению материала и соответственно «солнечного электричества». Приведены математические модели операций газового травления, наращивания эпитаксиальных слоёв и опорных слоёв поликристаллического кремния, применимые на любом типе технологического ростового оборудования, при обеспечении заданных значений линейной скорости парогазовой смеси в зоне осаждения, а также избыточных давлений в испарителе с тетрахлоридом кремния и в реакторе, зависящих от расхода пропускаемой парогазовой смеси. Обсуждаются преимущества газофазной эпитаксии в сочетании с оборотными технологиями и перспективы ее применения в производстве солнечных элементов на подложках из мультикремния и преобразователей с повышенной чувствительностью в ИК области солнечного спектра.

Ключевые слова: поликристаллический кремний, газофазная эпитаксия, оборотная технология, тетрахлорид кремния, парогазовая смесь, солнечный элемент.

The expediency of use of returning technologies in the processes of gas-phase production of silicon epitaxial structures for solar cells, which previously proved themselves well in the chloride production of raw silicon, which led to a significant reduction in the cost of the material and "solar electricity", is shown. Mathematical models of gas etching operations, growth of epitaxial layers and support layers of polycrystalline silicon are presented, which are applicable to any type of technological growth equipment provided that the necessary values of the linear velocity of the vapor-gas mixture in the deposition zone, as well as the overpressure in the evaporator with silicon tetrachloride and in the reactor, depending on flow rate of the passed vapor-gas mixture. The advantages of gas-phase epitaxy combined with returning technologies and the prospects for its application in the production of solar cells on multisilicon substrates and converters with increased sensitivity in the IR region of the solar spectrum are discussed.

Keywords: polycrystalline silicon, gas-phase epitaxy, returning technology, silicon tetrachloride, gas-vapor mixture, solar cell.

DOI: PACS number(s): 00.00.Xx, 00.00.Xx Copyright line will be provided by the publisher

I. Введение

Изготовление солнечных элементов (СЭ) на основе кремниевых эпитаксиальных n-n^+ или p-p^+ структур соответственно с n- или p-типной пле-

ночной базовой областью привлекательно тем, что в таких структурах независимо от технологии p-n перехода возникает встроенное электрическое поле, увеличивающее собирание носителей заряда, а значит и эффективность СЭ [1]. Кроме того, такие СЭ обладают более высокой радиационной стойкостью. Однако стоимость пленочных СЭ неизмеримо выше, поскольку операция эпитаксиального наращивания плёнок даже в самом распространённом в промышлен-ности процессе водородного восстановления тетрахлорида кремния в его классическом варианте является дорогостоящей и экологически неблагополучной. Широкое внедрение в производство кремния-сырца оборотных технологий, резко уменьшивших вредные выбросы и затраты на его производство, привело к удешевлению единицы мощности солнечного электричества до уровня ~0.5 $ за 1 Вт и ниже [2] и возродило интерес к пленочным СЭ с точки зрения возможности переноса в их технологию результатов чрезвычайно эффективного опыта, накопленного в сфере модернизированного производства Si-сырца. Действительно, наращивание пленочных структур ведётся в аналогичном хлоридном процессе, отличающемся разве что меньшими температурами подложек, и, как и в случае классической технологии Si-сырца, из применяемых парогазовых смесей (ПГС) тетрахлорида кремния с водородом извлекается только малая часть кремния. Наши инструментальные оценки с применением ИК спектрофотометрии газовых отходов эпитаксии показали, что исходный $SiCl_4$ на 85-90% переходит в трихлорсилан ($SiHCl_3$) и, судя по количеству образовавшегося хлористого водорода (HCl), извлечение из ПГС собственно кремния не превышает 6% [3]. Применение оборотных технологий, несомненно, приведёт к существенному снижению стоимости продукта и откроет возможности для изготовления пленочных СЭ на разных видах подложек. Использование оборотных технологий в этой сфере уже показано в [4], причём в простейшем варианте, когда к системе удаления газовых отходов производства эпитаксиальных плёнок для микроэлектроники подключается система вторичного использования отработанных ПГС, в которой температуру эпитаксии намеренно выбирают более высокой, чем в основном производстве, а давление в реакторе меньшим. Таким образом, даже без удаления из отработанных ПГС хлористого водорода, что предусмотрено новыми оборотными технологиями [2], удаётся получать структуры n-n^+ и p-p^+ для СЭ с КПД, не уступающим таковому в СЭ из монокристаллического Si с аналогичными просветляющим покрытием и диффузионным или ионно-имплантированным p-n переходом.

II. Методика и результаты эксперимента

Заданные электрофизические параметры и качество поверхности эпитаксиальных слоёв в n-n^+ или p-p^+ структурах для СЭ могут быть обеспечены за счёт контроля состава ПГС, общим расходом ПГС через реактор, линейной скоростью в зоне осаждения, о чем особо будет сказано ниже, и температурой эпитаксии. Это требует также знания кинетики осаждения кремния из газовой фазы, выявления лимитирующих стадий и привязки результатов эксперимента к конкретной технологической аппаратуре, отличающейся большим разнообразием. Для оптимизации решения этой задачи рекомендуем строить анализ и управление технологическим процессом исключительно по прямым показателям и использовать регрессионные, математические модели отдельных операций технологического процесса, позволяющие вычленять из обширного диапазона варьируемых параметров оптимальный. А оптимальными режимами операций, по нашему мнению, являются те, при которых обеспечивается достаточно высокая производительность и имеет место ее минимальная чувствительность к изменению условий ведения процесса.

В качестве примера приводим построенные нами математические модели операций:

– газового травления (ГТ) кремниевых подложек непосредственно в реакторе смесью H_2 с хлористым водородом;

– наращивания кремниевых однослойных эпитаксиальных структур (КОЭС) с заданными характеристиками пленки, используемых в дальнейшем в качестве базовой области СЭ;

– наращивания толстых опорных поликристаллических слоев кремния, используемых обычно в кремниевых структурах с диэлектрической изоляцией (КСДИ), а в нашем случае применимых для создания широкой гаммы поликристаллических СЭ или пригодных в качестве подложек для пленочных СЭ на основе аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si-H), создаваемого пиролизом моносилана [5].

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

Приведённые ниже модели позволяют прогнозировать скорости этих операций в системах (H_2-HCl и H_2-$SiCl_4$) на различном, а при выполнении оговорённых нами ниже условий – практически любом технологическом оборудовании, что экспериментально проверено их применением при выпуске продукции на существенно различающихся конструкцией промышленных установках УНЭС-2ПКА с кварцевым реактором и внешним индуктором ВЧ нагрева и УНЭС–2ПКА с металлическим реактором и индуктором, встроенным в полости пьедестала-подложкодержателя.

Для построения модели операции ГТ на пьедестал загружали ранее наращенные КОЭС Ø 76 мм типа n-n^+, n–p с толщиной эпитаксиального слоя ~45 мкм. Диапазон варьирования основных параметров процесса ГТ выбирали в следующих пределах: расход парогазовой смеси (x_1) – 80÷120 л/мин; концентрация безводного HCl в ПГС (x_2) 1.0÷2.5% об; температура поверхности подложек (x_3) – 1200–1300°C. Для указанного диапазона путем реализации матрицы планирования эксперимента типа 2, 3 с трехкратным дублированием опытов построена регрессионная модель операции ГТ, имеющая в натуральных переменных вид:

$$V=-1.3761129+0.0287763X_1-1.2592666X_2+ +1.0731\times10^{-3}X_3+5.6374\times10^{-3}X_1X_2- -2.76\times10^{-5}X_1X_3+9.645\times10^{-4}X_1X_3. \quad (1)$$

Модель (1) с точностью ±5% описывает скорость ГТ кремния и может быть положена в основу построения номограмм этой операции в диапазоне скоростей ГТ 0.3÷2.5 мкм/мин.

Из сопоставления скоростей ГТ на УНЭС-2ПКА и УНЭС-2ПВМ обычно следует, что при кажущихся одинаковых условиях проведения операций, включая температуру процесса, концентрация HCl в водороде и расход этой ПГС, скорость ГТ на установке УНЭС-2ПКА ниже. Однако, если обеспечить неодинаковые расходы ПГС, а именно, ее сопоставимые линейные скорости в рабочей зоне реактора, то скорости ГТ на обеих установках становятся одинаковыми, как и однородность обработки пластин по высоте пьедестала-подложкодержателя, несмотря на указанную выше существенную разницу конструкций их реакторного узла.

К аналогичным результатам приводит и сопоставление кинетики роста эпитаксиальных слоев, которые исследовали по результатам измерений металлургической толщины пленок, выращенных на подложках КЭС-0.01 и КДБ-10 Ø 76 мм в диапазоне варьирования исходных параметров: расход ПГС – 50÷200 л/мин; концентрация $SiCl_4$ в смеси – 0.25÷2.5 %об; температура эпитаксии – 1150÷1310°C. Установлено, что характер зависимости скорости роста слоев от указанных параметров на обеих установках практически совпадает, а абсолютные значения скорости роста становятся сопоставимы, если обеспечено равенство линейных скоростей ПГС в реакторе и, что очень важно, равенство давлений в реакторе – физической величины, впервые рассматриваемой нами в качестве независимого параметра технологического процесса эпитаксии, что иллюстрируется данными табл. 1 и рис. 1.

Таблица 1. Сравнение скоростей роста эпитаксиальных слоёв на промышленных установках УНЭС-2ПКА и УНЭС-2ПВМ при сопоставимых значениях линейных скоростей ПГС и избыточного давления в реакторе.

C $SiCl_4$, % об.	$U_{лин.}$, см/с	T,°C	Скорость роста, мкм/мин.	
			УНЭС-2ПКА, V_1	УНЭС-2ПВМ, V_2
1.6	8.5	1150	1.05	1.0
1.6	8.5	1200	1.1	1.1
1.6	8.5	1250	1.18	1.2
1.8	8.5	1300	1.1	1.2

В таблице 1 приведены только данные, касающиеся условий ведения процесса, обеспечивающие скорость роста слоёв ~1 мкм/мин, считающуюся оптимальной величиной.

Отметим, что реализация процесса на УНЭС-2ПКА выявляет более слабую чувствительность скорости осаждения к температуре эпитаксии, что свидетельствует о смещении газофазных технологических реакций в диффузионную область, где скорость роста лимитируется в большей степени массопереносом. Из сопоставления производительности обеих установок следует, что коэффициент извлечения кремния из ПГС на установке УНЭС-2ПКА в 1.5 раза выше, чем на УНЭС-2ПВМ. Доля кремния, осаждаемого на подложках, составляет относительно всего извлекаемого из ПГС кремния величину ~0.6 для обеих установок, практически вне зависимости от диаметра подложек. Разброс толщины слоев по пластине и

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

в партии одновременно наращиваемых структур ниже на УНЭС-2ПКА по сравнению с УНЭС-2ПВМ и для ряда режимов может быть стабилизирован на уровне ±5% и ±7% от средних значений, соответственно.

Для диапазона условий наращивания, перекрывающих обычно реализуемые в промышленных условиях, построена регрессионная модель скорости роста:

$$V=1.93–0.373\cdot10^{-2}X_1–0.828X_2–0.108\cdot10^{-2}X_3+ +1.9\cdot10^{-3}X_1X_2+1.6\times10^{-6}X_1X_3+7.58\cdot10^{-4}X_2X_3 \quad (2)$$

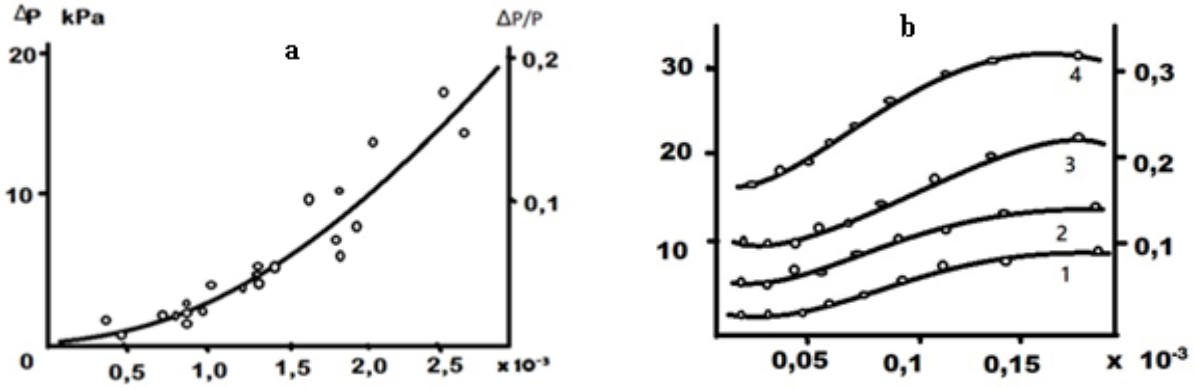


Рисунок 1. Влияние расхода ($м^3с^{-1}$) H_2 и ПГС на избыточное давление в реакторе (а) и испарителе (б) при разбавляющем потоке H_2: *1* – 0.75, *2* – 1.3; *4* – 2.83 $м^3/с\times10^3$; давление в помещении – 98.1 кПа.

Она описывает экспериментальные данные с точностью не хуже ±2% в пределах следующего диапазона варьирования параметров: расход ПГС (X_1) – 60÷120 л/мин; концентрация $SiCl_4$ в смеси (X_2) – 1.37÷2.28 %об; температура эпитаксии (X_3) – 1210÷1310°С.

Модель (2) может использоваться для прогнозирования скорости роста или выбора режимов наращивания слоев, обеспечивающих скорость роста в диапазоне 0.7÷1.5 мкм/ мин.

Кинетика роста толстых опорных слоев поликристаллического кремния в хлоридном процессе с точностью ±15% описывается моделью:

$$V=–1.077–1.583\times10^{-7}\,X_1X_2X_3\,–2.242–10^{-6}\,X_3+ +3.972\times10^{-2}X_2+5.373\times10^{-4}\,X_3. \quad (3)$$

где X_1 – температура осаждения 1240÷1300°С, X_2 – расход водорода через испаритель, находящийся при температуре 20°С, 60÷100 л/мин, X_3 – расход водорода в основной линии 20÷60 л/мин.

Модель (3) охватывает диапазон концентраций $SiCl_4$ в ПГС от 2 до 12 %об и позволяет прогнозировать среднюю скорость роста слоев в партии одновременно наращиваемых структур от 1 до 3.2 мкм/мин.

Максимальная скорость роста наблюдается при содержании $SiCl_4$ в ПГС ~5 %об, максимальном из испытанных расходе ПГС и температуре 1270°С. Толщина слоев уменьшается по ходу потока смеси, причем максимальная неоднородность толщины слоев в партии наблюдается в процессах, режим которых соответствует максимальной скорости роста слоев.

Одним из факторов, понижающих скорость роста слоев, а также увеличивающих разброс их параметров между партиями и вызывающих повышенный уровень брака по качеству поверхности, является избыточное давление в реакторе, увеличивающееся при повышении расхода ПГС от 0.5×10^{-3} $м^3$/сек до 3×10^{-3} $м^3$/сек на 20 кПа при давлении в помещении P_0 = 98.1 кПа (рис. 1а). Этот фактор необходимо, по нашему мнению, тщательно учитывать, рассматривая его в качестве одного из основных независимых параметров процесса. Обеспечение одинакового давления в реакторах группы установок, находящихся в одном цеху предприятия, но находящихся на разных расстояниях от системы утилизации отходящих газов (скруббера) позволяет избежать обычно наблюдаемую

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

разницу между параметрами продукции, изготавливаемой не только на разных по конструкции установках, но и на одинаковом оборудовании. Кроме всего, учёт этого фактора исключает достаточно трудоемкую и экономически затратную операцию индивидуальной «настройки» каждой ростовой установки на выпуск, меняющейся в зависимости от задач, продукции, отличающейся толщиной и удельным сопротивлением наращиваемой эпитаксиальной пленки.

Интересно отметить, что учёт давления в испарителе с тетрахлоридом кремния и в реакторе, а вернее, впервые организованный нами инструментальный контроль и учёт изменений этих параметров (рис. 1 а,б) позволил не только повысить качество продукции на конкретном предприятии, но и объяснить причины различий скоростей роста и удельных сопротивлений эпитаксиальных слоёв, наращиваемых на однотипных установках эксплуатируемых, казалось бы, в одинаковых условиях, но находящихся в различных географических точках, отличающихся высотой местности над уровнем моря, а также повышенный уровень брака КОЭС по указанным параметрам на предприятии в дни, когда в течение рабочего дня резко меняется атмосферное давление.

III. Выводы и рекомендации

Важным фактором, влияющим на качество поверхности КОЭС, то есть на плотность различных ростовых дефектов, негативно влияющую на скорость поверхностной рекомбинации фотогенерированных носителей заряда при использовании пленки в таких КОЭС в качестве базовой области СЭ, кроме уже описанного выше избыточного давления в реакторе, как оказалось, является температура поверхности внутренних стенок реактора, непосредственно контактирующих с ПГС. Высокая теплопроводность водоохлаждаемых металлических стенок реактора УНЭС-2ПКА приводит к снижению температуры ПГС у поверхности стенок и соответственно к повышению вероятности образования в ПГС полихлоридов – микроразмерных аморфных образований, появляющихся при определенных температурах непосредственно в ПГС за счёт химических реакций тетра- или трихлорсилана с остаточными парами воды, имеющимися в водороде после прохождения им палладиевых фильтров и служащими одним из источников дефектообразования в процессе роста КОЭС. Отсюда следует, что получение КОЭС в одинаковых условиях, включая одинаковую чистоту исходного H_2 по остаточному содержанию паров воды, сопровождается на УНЭС–2ПКА повышенным уровнем брака по качеству поверхности в сравнении с продукцией, изготавливаемой на УНЭС–2ПВМ. Эксперименты с введением теплового экрана в реактор УНЭС-2ПКА однозначно подтверждают изложенное. Качество структур и выход годных неизменно повышаются. Более того, существует возможность увеличения на 20÷30% скорости роста слоев при выполнении поверхности экрана специальной конфигурации и покрытии его рабочей поверхности тонким слоем двуокиси кремния. Полученные результаты определяют пути совершенствования конструкции реакторного узла установок УНЭС-2ПКА (включая наряду с применением кварцевых, и графитовых тепловых экранов) при использовании серийных реакторов, разработку реакторов с регулируемым теплоотводом от стенок, в которых могут быть созданы условия, снижающие образование полихлоридов в зоне осаждения.

Применение оборотных технологий для изготовления пленочных структур для СЭ является, на наш взгляд, одной из немногих возможностей использования результатов разработок в сфере прямого металлургического передела технического кремния в мультикремний для СЭ [6]. Дело в том, что внедрение оборотных технологий для получения Si-сырца сделало эти технологии нерентабельными, поскольку металлургическая очистка кремниевого сырья от примесей оказалась более сложной, более затратной и требующей более сложной аппаратуры, чем химическая очистка хлорсиланов и последующий их многократный возврат в аппаратуру наращивания Si-сырца электронной чистоты, а уровень необходимой чистоты материала по примесям, приемлемый для изготовления базовой области эффективных СЭ, так и не был достигнут. В предлагаемом нами варианте газофазного изготовления плёночной базы, то есть узла СЭ, действительно требующего применения высокочистого кремния с максимально возможным временем жизни носителей заряда, это решается очисткой применяемого

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

хлорсилана, а требования к примесной чистоте подложки, на которую ведётся осаждение пленки, не критичны. То есть в качестве подложечного материала может быть применена широкая линейка дешёвых кремниевых материалов, включая вторичный литой поликристаллический кремний [7], изготавливаемый переплавкой отходов кремниевого производства, забракованных в сфере производства изделий микроэлектроники Si подложки и структуры, а также, в первую очередь, и упомянутый мультикремний, изготавливаемый металлургическим переделом технического кремния [6, 8]. При этом вместо очистки этого подложечного материала до уровня электронной чистоты в него, наоборот, необходимо ввести до предела растворимости одну или несколько мелких примесей, дающих n^+- или p^+-тип проводимости, а при наращивании *n*- или *p*-типной пленки, используемой затем в качестве базы СЭ, применять известные и эффективные методы подавления автолегирования или даже управлять этим процессом для получения заданного распределения автолегирующей примеси в эпитаксиальном слое, обеспечивающем оптимальную конфигурацию встроенного электрического поля.

Необходимо также отметить ещё одно важное обстоятельство, касающееся весьма перспективной возможности изготовления Si СЭ с диапазоном спектральной чувствительности, расширенным в ИК область. Разработка этой научной идеи принадлежит академику М.К. Бахадырханову, который совместно с коллегами провёл также и серию экспериментов, давших новые многообещающие результаты [9, 10]. Так, было предложено кремниевые *p*-*n* структуры, идущие на изготовление СЭ, дополнительно легировать примесями Ni, дающими в кремнии глубокие энергетические уровни, но одновремен-но не ухудшающими значения подвижности носителей тока в них и, что самое главное, их время жизни. В результате удалось не только несколько повысить КПД Si СЭ, но и наметить очертания нового научного направления, связанного, как это ни парадоксально, с применением в солнечной вольтаической энергетике кремния, специально легированного примесями, дающими глубокие энергетические уровни. Введение примеси никеля проводили диффузией как с фронтальной, так и с тыльной стороны заготовок для СЭ, на поверхность которых с этой целью наносили слой металлического никеля. Однако опыт показывает, что подобный приём часто сопровождается ухудшением совершенства поверхности подложки и ее локальным загрязнением следами химических веществ, применяемых при никелировании, что может быть критичным при проведении диффузии с фронтальной стороны, поскольку от совершенства структуры зависит скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда, а значит, и возможное ухудшение КПД таких СЭ. Оптимальное решение этой задачи возможно с применением пленочных технологий, например, метода [11], предусматривающего осаждение эпитаксиального слоя, в нашем случае создания базы СЭ на подложке с предварительно нанесённым слоем никеля. На операции отжига подложки в водороде, обязательно проводимой согласно регламента при температуре ~1200÷1250^{o}C быстро диффундирующая примесь никеля полностью растворяется в подложке, а на последующей операции газового травления, также обязательной при осаждении эпитаксиальных плёнок из газовой фазы, стравливаются не только следы никеля, но и все дефекты, которые связаны с операцией никелирования поверхности исходной подложки. Таким образом, на операцию собственно эпитаксиального наращивания попадает подложка, являющаяся источником быстро диффундирующей примеси никеля для наращиваемой пленки с чистой и свободной от дефектов поверхностью осаждения. Выбирая скорость осаждения, сопоставимую, или наоборот, намного превышающую диффузию никеля в растущей пленке, можно регулировать распределение примеси никеля по толщине пленки от равномерного до уменьшающегося от металлургической границы до свободной поверхности структуры. А в случае нанесения слоя никеля на тыльную или на обе стороны Si подложки сочетание выбора соотношения между скоростью осаждения и диффузией с управлением автолегированием позволяет получать и более сложные профили распределения примеси никеля по толщине эпитаксиального слоя, например, с некоторым увеличением концентрации Ni к свободной поверхности наращиваемой пленки.

Метаданные (English)

Obtaining of epitaxial silicon structures for solar cells using returning technologies

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

B.M. Abdurakhmanov[1], M.M. Adilov[1], Kh.B. Ashurov[1], Sh.K. Kuchkanov[1*], B.K. Ismailov[2]

[1]Arifov Institute of Ion Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Dormon Yuli str., 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan
[2]Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, University str. 4, 100095 Tashkent, Uzbekistan

The expediency of use of returning technologies in the processes of gas-phase production of silicon epitaxial structures for solar cells, which previously proved themselves well in the chloride production of raw silicon, which led to a significant reduction in the cost of the material and, accordingly, "solar electricity", is shown. Mathematical models of gas etching operations, growth of epitaxial layers and support layers of polycrystalline silicon are presented, which are applicable to any type of technological growth equipment provided that the necessary values of the linear velocity of the vapor-gas mixture in the deposition zone, as well as the overpressure in the evaporator with silicon tetrachloride and in the reactor, depending on flow rate of the passed vapor-gas mixture. The advantages of gas-phase epitaxy in combination with returning technologies and the prospects for its application in the production of solar cells on multisilicon substrates and converters with increased sensitivity in the IR region of the solar spectrum are discussed.

Keywords: polycrystalline silicon, gas-phase epitaxy, returning technology. silicon tetrachloride, gas-vapor mixture, solar cell.

Литература (References)

[1] M.M. Koltun. Optika i Metrologiya Solnechnih Elementov (Moskow, Nauka, 1985).
[2] A.B. Naumov, S.I. Plehanov. Tsvetnaya Metallurgiya № 6, 70-76 (2013).
[3] B.M. Abdurahmanov, S.G. Soloveychik, V.P. Chirva. Moduli i Elementi Solnechnikh Fotoelektricheskikh Stantsiy s Consentrasiey Izlucheniya. Monografiya (Izd-vo Fan, Tashkent, 1993).
[4] B.M. Abdurahmanov. Sposov Polucheniya Kremniya. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1464529, 1989.
[5] P.K. Kashkarov, A.G. Kazanskiy, P.A. Forsh, A.V. Emel'yanov. Tonkoplenochniy Solnechniy Element v Proshlom i Budushem. Priroda №12, 56-64 (2013).
[6] V.V. Zadde, V.V. Stenin, D.S. Strebkov. Patent RF № 2385291. Prioritet 21.06.2008.
[7] A.L. Kadirov. Poluchenie i Svoistva Vtorichnogo Litogo Polikristallicheskogo Kremniya (Izd-vo Nuri Marifat, Hudjanda, 2019).
[8] G.A. Kolobov, T.V. Kritskaya, Yu.V. Moseyko, A.V. Karpenko, K.A. Pecherisa. Rafinirovanie Metallurgicheskogo Kremniya Do Chistoty Sorta. Solnechnaya Metallurgiya **32**, No.2, 118-126 (2014).
[9] M.K. Bakhadirkhanov, X.M. Iliev, S.A.Tachilin, S.S. Nasriddinov, B.A. Abdurahmanov. Geliotekhnika No.2, 88-91 (2008).
[10] M.K. Bakhadirkhanov, S.B. Isamov, Z.T. Kenzhaev, D. Melebaev, Kh.F. Zikrillaev, and G.A. Ikhtiyarova. Silicon Photovoltaic Cells with Deep p–n Junction. Applied Solar Energy **56**, No.1, 13-17 (2020).
[11] B.M. Abdurahmanov, V.I. Shopen. Sposob Polucheniya Epitaksialnykh Sloyov Kremniya. Avtorskoe Svidetel'stvo SSSR № 911923, 1980.

Тескари технологиялардан фойдаланган холда қуёш элементлари учун эпитаксиал кремнийли структураларни олиш

Б.М. Абдурахманов[1], М.М. Адилов[1], Ш.К. Кучканов[1], Х.Б. Ашуров[1], Б.К. Исмайлов[2]

[1]У.А. Арифов номидаги Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, ЎзРФА, Дўрмон йўли кўчаси 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон
[2] Тошкент давлат техника университети, Университет кўч, 4, 100095, Тошкент, Ўзбекистон

Қуёш элементлари учун кремний эпитаксиал тузилмаларини газ фазали ишлаб чиқариш жараёнларида тескари технологиялардан фойдаланиш-нинг мақсадга мувофиқлиги, илгари хом кремнийнинг хлорли жараёнда ишлаб чиқаришда ўзини яхши кўрсатди, бу эса материалларини нархини сезиларли даражада пасайишига олиб келди ва шунга мос "қуёш электр энергияси" кўрсатилган. Поликристалл кремнийнинг эпитаксиал қатламлари ва қўллаб-қувватловчи қатламларнинг ўсиши, чўкиндидаги буғ-газ аралашмасининг чизиқли тезлигининг белгиланган қийматлари шарти билан хар қандай турдаги технологик ўсиш ускунасига тегишли бўлган газни тозалаш операцияларининг математик моделлари келтирилган зонаси, шунингдек кремний тетрахлоридли ва реактордаги ортиқча босим, ўтган буғ-газ аралашмасининг оқим тезлигига боғлиқ. Газ фазали эпитаксиянинг тескари технологиялар билан биргаликда афзалликлари ва уни кўп кремнийли субстратлар ва қуёш спектрининг инфра-қизил худудида сезгирлиги ИҚ минтақасида сезгирлиги юқори бўлган конверторларда қуёш батареяларини ишлаб чиқаришда қўллаш истиқболлари муҳокама қилинади.

Калит сўзлар: поликристалл кремний, газ фазали эпитаксия, тескари технология, кремний тетрахлорид, буғ-газ аралашмаси, қуёш элементи.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.