

Эффект сверхлинейного роста тока КЗ от уровня излучения солнечных элементов из литого поликристаллического кремния

Максуджон УМАРОВ
Валерий ГРУЗИНЕНКО
Борис АБДУРАХМАНОВ
Абдулахат КАДЫРОВ
Павел МИЛЕНИН

Впервые выявлен диапазон концентрированного солнечного излучения (КСИ), в пределах которого на солнечных элементах (СЭ) из вторичного литого поликристаллического кремния (ВЛПК) обнаруживается эффект сверхлинейного роста тока короткого замыкания с ростом уровня солнечного излучения. Показано, что интенсивность проявления эффекта сверхлинейности зависит от размера зерен ВЛПК и степени их водородной пассивации. Использование концентраторных СЭ дает прирост всех энергетических характеристик СЭ.

Для экономически оправданного преобразования солнечного излучения в электрическую с помощью СЭ целесообразно использование концентрирующих систем, которые, имея более низкую стоимость, чем сам полупроводник, снижают затраты дорогостоящего кремния и тем самым повышают эффективность системы в целом. Поэтому использование КСИ позволяет снизить стоимость «солнечного электричества» и представляется перспективным. В настоящей работе исследуется влияние КСИ на ток короткого замыкания СЭ на основе ВЛПК.

Слитки ВЛПК для СЭ получали на базе установок типа ДМЦК-3ТХ методом литья, более простого по сравнению с методами Чохральского и Степанова. Операция подготовки плавок включает в себя выборку из сырья *p*-типовых отходов по знаку термо-ЭДС, а также подлегирование до заданного номинала добавкой *p*-типовых сильнолегированных эпитаксиальных слоев. Температурный режим должен обеспечивать получение зерен не менее 1–3 мкм. Максимальные размеры слитка — 320×220×120 мм. Затем слитки разрезаются на пластины.

По данным электрофизических измерений в технологию СЭ допускаются слитки ВЛПК с удельным сопротивлением 1–5 Ом·см и холловской подвижностью ~30 см²/с. Подложки для СЭ из ВЛПК изготавливают резкой с последующей шлифовкой заготовок на пластины толщиной ~400 мкм. *p-n*-переход создается методом диффузии из газовой фазы с использованием РС1 при температуре около 850 °С. Контакты фронтальной и тыльной сторон СЭ формируются вакуумным напылением через

маски на установках типа УВН-75М слоев Ti, Cu и Ni с последующим облуживанием под слоем глицерина в расплаве ПОС-40. В качестве просветляющего покрытия успешно используются напыленные пленки окиси кремния SiO₂ [1]. Электрофизические измерения проводились при концентрированном излучении по типовой методике на испытательном стенде «ЛУЧ-С» Института электроники им. У. А. Арифова АН Республики Узбекистан.

Фотоэлектрические преобразователи, предназначенные для работы на КСИ, относятся к особому классу СЭ, которые существенно отличаются во многих отношениях

от элементов, применяемых в плоских планарных солнечных батареях.

С точки зрения физики в СЭ с идеальной диодной характеристикой увеличение КСИ вызывает прямо пропорциональное увеличение тока короткого замыкания $I_{кз}$. При высоких значениях КСИ в кремниевых СЭ возникает ряд эффектов, обуславливающих новую зависимость $I_{кз}$ от уровня освещения [2]. В работе [3], посвященной исследованию ионно-легированных преобразователей солнечной энергии, изготовленных из ПК различной зернистости, были получены очень необычные результаты. У таких преобразователей, начиная с некоторого уровня освещения, наблюдалась сверхлинейная зависимость тока короткого замыкания $I_{кз}$ от интенсивности освещения P . В ряде последующих работ, например [4], была выдвинута концепция о процессах рекомбинационно-стимулированной реструкции (РСР) центров рекомбинации в ПК при повышенном уровне фотовозбуждения, обусловленном КСИ. Многочисленные эксперименты [5, 6] показали, что устойчивый эффект проявляется только на мелкозернистом поликристаллическом кремнии (ПК), попытка его получения на крупнозернистом ПК (размер зерен ≥200–300 мкм) была впервые реализована нами на СЭ из ВЛПК.

На рисунке приведена зависимость тока короткого замыкания СЭ от интенсивности излучения для ВЛПК (кривая 3), где для сравнения показаны аналогичные зависимости на монокремнии (кривая 1) и на поликремнии из мелкозернистого эпитаксиального слоя (кривая 2).

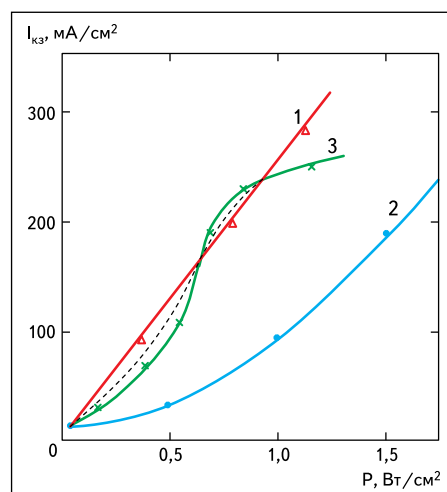


Рисунок. Зависимость тока короткого замыкания СЭ от интенсивности излучения:
1 — МК;
2 — мелкозернистый эпитаксиальный слой;
3 — ВЛПК

На рисунке видно, что уже при уровне фотовозбуждения 4–5 крат (1 крат = 850 Вт/м²) появляется резкий сверхлинейный рост тока короткого замыкания, который, пересекая кривую монокремния, затем выходит на некоторое насыщение при $K > 10$. На образцах СЭ из ВЛПК, прошедших предварительную водородную пассивацию, эффект сверхлинейного роста практически отсутствует, и кривая зависимости максимально приближается к кривой СЭ из монокристалла (пунктирная линия на рисунке).

Обеспечение устойчивого проявления эффекта сверхлинейности у МК СЭ на практике осуществляется только при высоких, около 100 крат, уровнях КСИ. В ряде случаев обнаруживалось, что эффект сверхлинейности проявлялся при меньших уровнях КСИ у СЭ из МК, у которых наблюдались специфические дефекты (примеси, дислокации, сколы, трещины и т. д.), априори влияющие на снижение КПД при освещении однократным излучением.

Воздействие КСИ на такие СЭ приводило к более резкому росту тока короткого замыкания, чем у бездефектных СЭ, однако, несмотря на более быстрый рост КПД с ростом КСИ, его величина все же не превышала КПД бездефектных СЭ при тех же уровнях КСИ.

Исходя из того, что поликристаллические кремниевые СЭ изначально обладают дефектностью материала, обусловленной границами зерен и дислокацией, их поведение на КСИ проявляется более четко.

Повышение уровня КСИ оказывает влияние практически на все энергетические параметры СЭ. Это обусловлено изменением соотношения концентраций, генерированных излучением неравновесных носителей и основных равновесных носителей тока, как в базе, так и в легированном слое.

При уровнях КСИ, когда концентрация неравновесных носителей все-таки меньше, чем равновесных, в базе к прежней линейной составляющей $I_{кз}$ добавляется квадратичная по уровню КСИ составляющая, обусловленная увеличением времени жизни носителей тока и возникновением в базе СЭ тянущих полей — омического и поля Дембера. В условиях, когда концентрация неравновесных носителей намного превышает концентрацию равновесных, в базе вновь наблюдается линейный ход зависимости $I_{кз}$ от уровня КСИ.

Таким образом, при исследовании СЭ из ВЛПК при концентрированном излучении обнаружен новый эффект — сверхлинейный рост зависимости тока короткого замыкания от уровня КСИ, который обуслов-

лен рекомбинационно-стимулированной реструкцией локальных уровней, расположенных в середине запрещенной зоны. Концентраторные СЭ перспективны, экономически выгодны и дают прирост всех энергетических характеристик СЭ. ■

Литература

1. Абдурахманов Б. М., Ачилов Т. Х., Кадыров А. Л. и др. Технология производства литого поликристаллического кремния и солнечных элементов на его основе // Гелиотехника. 1992. № 4.
2. Абдурахманов Б. М., Байдаков С. Г., Соловейчик В. И., Чирва В. П. Модули и элементы солнечных фотоэлектрических станций с концентрацией излучения. Ташкент: Фан, 1993.
3. Абдурахманов Б. М., Алиев Р., Саидов Н. С., Чирва В. П. Преобразователи солнечной энергии, изготовленные из поликристаллического кремния различной зернистости // Гелиотехника. 1985. № 2.
4. Kurokawa K. Progr. Batteries and Sol // Cells. 1984. V. 5.
5. Aliev R., Abdurakhmanov B. M., Bilyalov R. R. Polycrystalline Silicon S-diode fabricated using phosphorus thermal diffusion along Grain Boundaries. Interface Science, 1996.
6. Алиев Р. Применение кремниевых фотоэлектрических приемников для измерения мощности ИК-излучения. ПТЭ, 1996.