

- [1] Флёрова С.А., Бочков О.Е. - Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, в. 1, с. 37-40.
- [2] Флёрова С.А., Бочков О.Е. - Кристаллография, 1982, т. 27, в. 1, с. 207-210.
- [3] Попов С.А., Тихомирова И.А., Флёрова С.А. - Кристаллография, 1985, т. 30, в. 3, с. 608-609.
- [4] Nelson D.F., Lax M. - Phys. Rev. Lett., 1973, v. 31, n. 12, p. 763-766.
- [5] Kumada A. - Phys. Lett., 1969, v. 30 A, n. 3, p. 186-187.
- [6] Suzuki K. - Solid St. Commun., 1972, v. 11, n. 8, p. 937-939.
- [7] Kobayashi J., Samoy T., Fukuhata Y. - Phys. Lett., 1972, v. 38 A, n. 5, p. 309-310.

Днепропетровский государственный  
университет им. 300-летия  
воссоединения Украины с Россией

Поступило в Редакцию  
9 июля 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 2

26 января 1988 г.

ИНЖЕКЦИОННЫЙ ОТЖИГ ДЕФЕКТОВ  
*AlGaAs* - СТРУКТУР СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ПРОЦЕССЕ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В.М. Андреев, М.Б. Каган,  
В.С. Калиновский, Л.А. Рассадин,  
В.Р. Ларионов, Т.А. Нуллер,  
В.Д. Румянцев, К.Я. Расулов

Одним из методов уменьшения концентрации дефектов, возникающих при радиационном облучении *AlGaAs - GaAs* - структур солнечных элементов (СЭ) [1, 2], является термический отжиг [3, 4] при температурах, превышающих 200 °С. Этот метод требует разработки конструкций солнечных батарей, выдерживающих значительный перегрев. Кроме того, данный метод отжига радиационных дефектов трудно применим непосредственно в процессе эксплуатации солнечных батарей. Известен также комбинированный термический и инжекционный отжиг радиационных дефектов, созданных в *AlGaAs* -структурах электронами с энергией 1 МэВ [4, 5].

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования процесса восстановления радиационных дефектов в *AlGaAs* -струк-

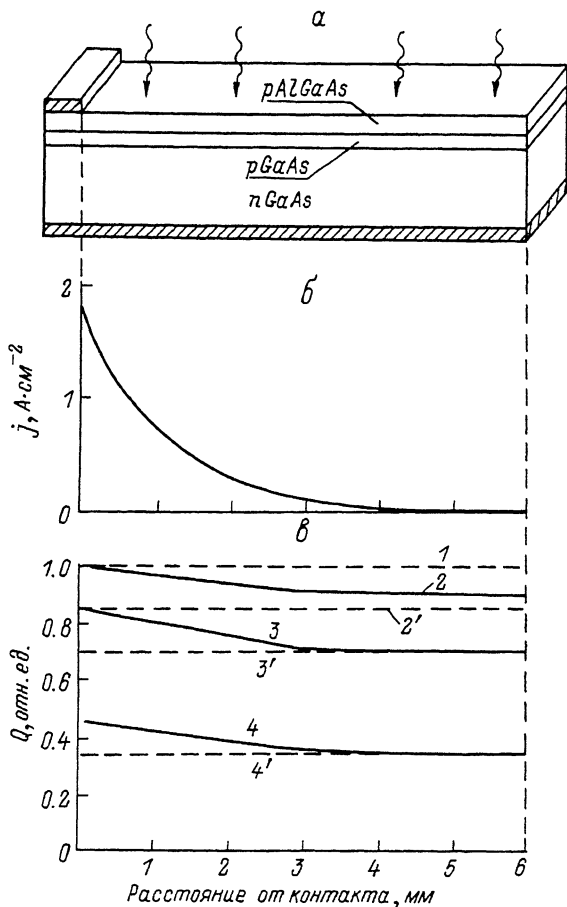


Рис. 1. а - схематическое изображение экспериментальных образцов, б - зависимость плотности тока, проходящего через структуру от расстояния до контакта для одного из образцов, в - зависимость коэффициента собирания фотоносителей от величины расстояния до контакта при различных дозах облучения протонами: 1 - до облучения, 2 - 2' -  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>, 3 - 3' -  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>, 4 - 4' -  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> (с током  $I = 50$  мА - 2, 3, 4; „без тока“ - 2', 3', 4').

турах СЭ при комнатной температуре путем пропускания во время радиационного облучения прямого тока (инжекционного отжига радиационных дефектов).

Радиационное облучение структур производилось моноэнергетическим потоком протонов с энергией 6.7 МэВ. Плотность потока протонов изменялась таким образом, чтобы при изменении дозы облучения в интервале  $10^{10}$  -  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> время облучения, а следовательно и время инжекционного отжига составляло 30-60 мин.

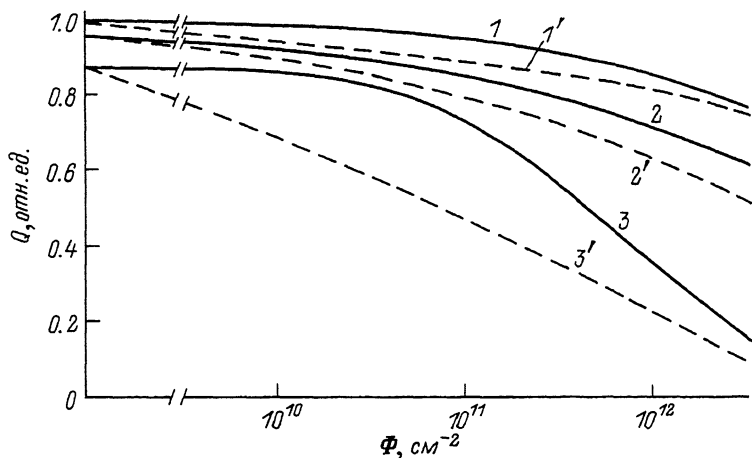


Рис. 2. Зависимость коэффициента собирания  $Q$  фотоносителей при  $\lambda = 0.63$  мкм от дозы облучения протонами  $\Phi$  для трех образцов с различной толщиной слоя  $pGaAs$ : 1 - 1' - 0.7 мкм, 2 - 2' - 0.8 мкм, 3 - 3' - 3 мкм, при пропускании в процессе облучения тока с плотностью 1 А/см<sup>2</sup> (1, 2, 3) и „без тока“ (1', 2', 3').

Объектом исследований являлись образцы СЭ, изготовленных на основе гетероструктур  $nGaAs - pGaAs - pAl_xGa_{1-x}As$  ( $x = 0.7$ ) с толщиной слоя  $pGaAs$  0.7 - 3 мкм. Образцы прямоугольной формы ( $S \approx 0.4-0.5$  см<sup>2</sup>) имели полосковый контакт на фронтальной (облучаемой) поверхности, расположенный вдоль одной из сторон (рис. 1, а). При пропускании тока через структуру действует сопротивление растекания фронтальной области  $p-n$  перехода, так что плотность тока уменьшается с расстоянием от полоскового контакта (рис. 1, б). Распределение плотности тока по поверхности образцов (рис. 1, б) определялось путем сравнения и уравнивания в ИК-микроскопе интенсивностей электролюминесценции в исследуемом участке образца и в изготовленном из этой же структуры образце малой площади с варьируемой плотностью прямого тока и равномерным свечением. Радиационное повреждение структур оценивалось по воздействию дозы протонного облучения на величину коэффициента собирания носителей ( $Q$ ), генерируемых сфокусированным светом  $He - Ne$  лазера ( $\lambda = 0.63$  мкм). Облучению подвергались одновременно пары образцов, изготовленных из одной структуры. Через первый образец пропускался прямой ток, а второй образец (без тока) использовался как контрольный.

На рис. 1, в представлены координатные зависимости коэффициента собирания для одной из пар образцов, облученных протонами. При облучении образца „без тока“ (рис. 1, в, прямые 2', 3', 4') величина  $Q$  уменьшалась с увеличением дозы облучения, оставаясь одинаковой по площади образца. В образце, протонное облучение которого

осуществлялось с пропуском прямого тока  $I = 50$  мА, величина  $Q$  уменьшалась с увеличением расстояния от контакта (рис. 1, в, кривые 2, 3, 4), что является следствием неравномерного протекания тока, пропускаемого через образец, и разной скорости образования дефектов при различной плотности инжекционного тока.

Приведенные на рис. 2 дозовые зависимости коэффициента собирания для трех пар образцов с разной толщиной слоя  $\rho GaAs$  (образцов с током — кривые 1, 2, 3 и контрольных образцов — кривые 1', 2', 3'), позволяют сделать следующие выводы:

1. Структуры, через которые в процессе облучения пропускается прямой ток плотностью  $1$  А/см<sup>2</sup>, при дозах  $5 \cdot 10^{10}$ – $5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> могут выдержать приблизительно на порядок большие дозы облучения по сравнению со структурами без инжекционного тока.

2. Эффективность воздействия инжекционного тока уменьшается с увеличением дозы облучения, при этом максимальный эффект от пропуска тока наблюдается при дозах  $5 \cdot 10^{10}$ – $10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

3. Максимальную радиационную стойкость имеют структуры с минимальной толщиной слоя  $\rho GaAs$  0,7 мкм. В такой структуре при дозе  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>, набираемой в течение 45 минут при одновременном пропуске через структуру тока  $\sim 1$  А/см<sup>2</sup>, снижение коэффициента собирания составляет 10%.

4. С увеличением дозы облучения до значения более  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> эффективность инжекционного отжига снижается, что может быть связано как с увеличением темпа образования дефектов в процессе облучения, так и с увеличением доли дефектов кластерного типа, отжиг которых указанным методом менее эффективен. В проведенных дополнительных экспериментах с долговременным ( $\sim 10$  час) пропуском прямого тока через образцы после протонного облучения дозой  $3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> не было получено заметного восстановления исходной величины коэффициента собирания.

Рассмотренный метод замедления дефектообразования в солнечных батареях на основе мощных гетерофотоэлементов [6, 7] и концентраторов солнечного излучения может обеспечить их более высокую радиационную стойкость в реальных условиях эксплуатации по сравнению с достигнутой в данной работе. Это может произойти в результате значительного естественного увеличения времени облучения и, следовательно, продолжительности отжига инжекционным током, уменьшения плотности потока протонов за счет экранирования элементами конструкции, а также благодаря дополнительному действию фотонного отжига.

Авторы выражают благодарность В.А. Грилихесу за полезные обсуждения, А.А. Алаеву и Г.М. Гусинскому за помощь в эксперименте, Ж.И. Алферову за внимание к данной работе.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Крейнин Л.Б., Григорьева Г.М. Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации. „Исследование космического пространства“. Итоги науки и техники, т. 13, 1979, М.: ВИНТИ, 128 с.

- [2] Григорьева Г.М., Звягина К.Н., Каган М.Б., Любашевская Т.Л. - Гелиотехника. 1983, № 5, с. 14-17.
- [3] Ansprang В.Е., Downing R.C. - Conf. Rec. 15th IEEE Photovoltaic Spec. Conf., Kissimee, Fla, 1981, New York, N.Y., 1981, p. 499-505.
- [4] Loor., Knechtli R.C., Kamath G.S. - Conf. Rec. 15th IEEE Photovoltaic Spec. Conf., Kissimee Fla, 1981, New York, N.Y., 1981, p. 33-37.
- [5] Stevenard D., Bourgoin J.C. IEEE Photovoltaic Spec. Conf. Kissimee, Fla, May 1984. New York, p. 1103-1107.
- [6] Андреев В.М., Румянцев В.Д. В сб.: Фотоприемники и фотопреобразователи. Л., Наука, 1986, с. 181-204.
- [7] Андреев В.М., Румянцев В.Д. - Электротехника, 1986, № 2, с. 3-11.

Поступило в Редакцию  
27 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 2

26 января 1988 г.

## ПРОЯВЛЕНИЕ НЕЭРГОДИЧНОСТИ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ С РАЗМЫТЫМ ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

Н.К. Юшин, С.Н. Дороговцев,  
С.И. Смирнов

До настоящего времени оставалось не ясным, имеет ли размытый фазовый переход в материалах типа магнониобата свинца [1] чисто динамический характер (т.е. размытие происходит лишь на конечных измерительных частотах), или же и в пределе нулевых частот на температурных зависимостях физических характеристик нет резких особенностей. Для окончательного решения вопроса о том, какая из этих возможностей реализуется, нужны измерения статических величин, т.е. в постоянных измерительных полях. В сегнетоэлектрических материалах при нахождении статических поляризации, диэлектрической проницаемости и т.п. приходится сталкиваться с серьезными трудностями [2]. Чтобы их обойти, в данной работе мы исследовали отклик динамической величины - упругого модуля (или скорости звука) на постоянное (с частотой порядка обратного времени эксперимента) внешнее электрическое поле. Таким образом, удалось определить статический отклик, пусть и динамической, величины.

Измерения проводились на кристалле магнониобата свинца  $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$  - типичном сегнетоэлектрике с размытым фазовым