

обработки изображений ввиду большого объема необходимой памяти и возможного сдвига изображения за время измерения фона.

В заключение авторы благодарят Л. Л. Пальцева и А. А. Казакову за изготовление фильтров и В. М. Епихина за полезное обсуждение.

Список литературы

- [1] *Chang I. C.* // Opt. Engin. 1977. Vol. 16. N 5. P. 455—460.
- [2] *Беликов И. Б., Буймистрюк Г. Я., Волошинов В. Б.* и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 20. С. 1225—1229.
- [3] *Епихин В. М., Калинин Ю. К.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 2. С. 160—163.

Всесоюзный научно-исследовательский
институт физико-технических
и радиотехнических измерений
Московская обл.

Поступило в Редакцию
2 декабря 1987 г.

06; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 9, 1989

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ, СНИЖАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

*Н. М. Масленников, Ю. И. Сидоров, Т. П. Фролова,
Л. В. Турикова*

О причинах снижения напряжения пробоя опубликовано большое количество статей и книг (см., например, [1^{—3}]). В одной из последних работ [4] снижение напряжения пробоя объясняется микротрещинами, возникающими на периферии пластин после механической обработки кристаллов кремния. Согласно данным другой работы [5], снижение напряжения пробоя вызвано неконтролируемыми примесями, локально уменьшающими удельное сопротивление ρ пластины кремния, причем дефекты структуры напряжение пробоя не снижают, поскольку в большинстве случаев в местах пробоя они не обнаруживались. Таким образом, результаты даже последних работ оказываются противоречивыми.

В настоящей работе исследовалось влияние термообработки (ТО) на образование дефектов в пластинах кремния и влияние этих дефектов на напряжение пробоя p — n —структур. Применялся кремний, выращенный методом бестигельной зонной плавки (БЗП), и радиационно-легированный кремний (РЛК) с $\rho=100$ —300 Ом·см. Дефекты выявлялись с помощью инфракрасного (ИК) микроскопа, который состоял из источника излучения, столика с пластиной кремния, увеличительной системы и телевизионной установки типа ПТУ-50 с ИК-видикомом.

Недекорированные дефекты наблюдать не удавалось, поэтому проводилось декорирование медью, что давало возможность исследовать развитие дефектов в процессе ТО. Диаметр пластин кремния равнялся 36, 52, 58 и 82 мм, толщина 600—1200 мкм. Всего было обследовано около 200 пластин кремния как отечественных, так и зарубежных марок. При этом было установлено следующее.

До ТО в декорированных пластинах наблюдается какая-либо из разновидностей дефектов: круглые с нечеткими границами, в виде стержней или звезд с характерным размером 10—20 мкм. После ТО (диффузия алюминия и бора при 1250 °С в течение 30 ч) в декорированных пластинах диаметром 36, 52 и 58 мм наблюдаются крупномасштабные петлевидные дефекты протяженностью 200—1000 мкм, которые можно идентифицировать как дислокационные образования (рис. 1). Эти дефекты располагаются в основном на периферии пластины в пределах кольца шириной примерно 10 мм, их максимальная плотность достигает 200 см⁻². Основное количество дефектов расположено на одинаковой глубине вблизи середины пластины. Однако отдельные дефекты лежат под углом к плоскости пластины, пронизывая большую часть ее толщины.

При увеличении диаметра пластин плотность дефектов возрастает. Так, на пластинах диаметром 82 мм наиболее типичными являются протяженные дефекты неопределенной формы

(рис. 2), которые занимают большую часть площади пластины. Это можно объяснить тем, что при увеличении диаметра термические напряжения растут быстрее, чем по линейному закону [6]. О дислокациях большой плотности, возникающих под действием термических напряжений и выявляемых методом металлографии, сообщается в [7, 8].

Чтобы уменьшить величину механических напряжений, край пластины кремния обрабатывается на специальных станках, т. е. создается технологическая фаска (ТФ). На пластинах диаметром 36—52 мм наличие ТФ приводило к тому, что при ТО дефекты не образовывались при любом расположении пластин в печи (вертикальное, наклонное или горизонтальное). На пластинах диаметром 58 мм наличие ТФ и проведение ТО в горизонтальном положении гарантировало отсутствие дефектов. Однако на некоторых слитках и при вертикальном расположении пластин дефекты не образовывались. На пластинах диаметром 82 мм наличие ТФ и проведение ТО в горизонтальном положении способствовало уменьшению числа и размера дефектов. При прочих равных условиях количество дефектов зависело и от исходных свойств того или иного слитка кремния.

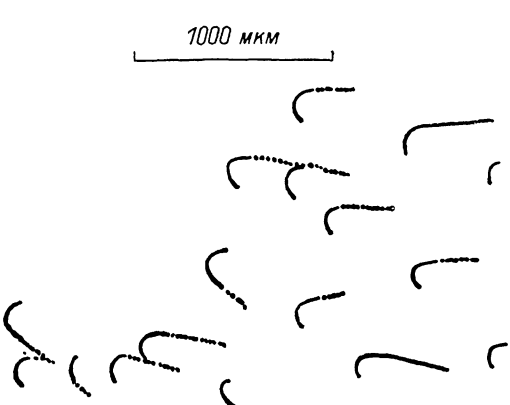


Рис. 1. Форма дефектов в пластине \varnothing 58 мм после ТО при $\rho=95$ Ом·см.



Рис. 2. Форма дефектов в пластине \varnothing 82 мм после ТО при $\rho=300$ Ом·см.

Для выяснения влияния крупномасштабных дефектов на величину напряжения пробоя исследовались $p-n$ -структуры диаметром 52 и 58 мм, имеющие теоретически расчетные и пониженные значения напряжения пробоя. На этих структурах с помощью тепловизора определялись области повышенного тепловыделения, так называемые «горячие точки» (ГТ), после чего проводилось декорирование, а затем снимались ИК топограммы распределения дефектов структуры. При этом было установлено следующее.

На структурах без снижения напряжения пробоя в области ГТ дефектов, описанных выше, не наблюдалось. При пониженных значениях напряжения пробоя в области ГТ неизменно присутствовали дефекты. Какой-либо корреляции между плотностью дефектов, их характерным размером и величиной напряжения пробоя не наблюдалось.

В качестве примера на рис. 3 приведена ИК топограмма дефектов и показано положение ГТ, вблизи которой наблюдалось два петлевидных дефекта длиной 900 мкм каждый.

Было изготовлено несколько партий $p-n$ -структур по обычной технологии (наклонное положение пластин без ТФ) и по бездефектной технологии (горизонтальное расположение пластин с ТФ). Толщина исходных пластин равнялась 750 мкм. После проведения ТО один из p -эмиттеров сошлифовывался. Результаты испытаний изготовленных структур приведены в таблице. Расчетные значения напряжения пробоя U_{BR} взяты из [9].

Технология	Кремний	\varnothing , мм	ρ , Ом·см (исходное)	Число структур	U_{BR} , кВ		U_{BR} , %	U_{BR} , кВ	
					ср.	макс.		расч.	ср.
Бездефектная	БЗП	52	155	23	3.45	3.8	11	4.0	0.86
Обычная	РЛК	58	95	12	2.22	2.65	19	2.7	0.82
Бездефектная	»	58	95	11	2.65	2.8	5	2.7	0.98

В эксперименте измерялось начальное значение напряжения пробоя, при котором начинался заметный рост обратного тока за счет лавинного умножения носителей. Отметим, что при бездефектной технологии выход годных по напряжению структур без учета механического брака равнялся практически 100 %.

Из таблицы видно, что параметры структур, изготовленных по бездефектной технологии, существенно лучше параметров обычных структур: U_{BRcp} больше на 20 %, а разброс напряжений ΔU_{BR} в 4 раза меньше (5 вместо 19 %). Кроме того, ΔU_{BR} на структурах из РЛК меньше, чем из кремния БЗП. Наши результаты существенно отличаются от данных работы [5], в которой авторы не выявили на рентгеновских топограммах дефекты, снижающие напряжение пробоя, ибо не применяли их декорирование.

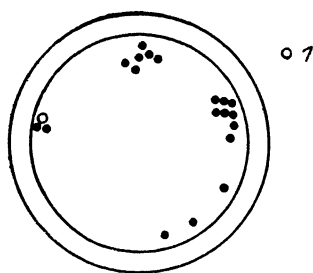


Рис. 3. ИК топограмма дефектов на пластине — $\varnothing 52$ мм после ТО при $\xi=155$ Ом·см.

$U_{BR}=0.6$ Кв; 1 — положение ГТ.

Авторы выражают благодарность Ю. М. Локтаеву за полезные обсуждения, Т. П. Воронцовой и П. Н. Шлыгину за помощь при определении положения ГТ.

Список литературы

- [1] Hill M. J. // IEEE Trans. Electron. Devices. 1976. Vol. ED-23. N 8. P. 839—843.
- [2] Грехов И. В., Серезжин Ю. Н. Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках. Л.: Энергия, 1980. 152 с.
- [3] Евсеев Ю. А. Полупроводниковые приборы для мощных высоковольтных преобразовательных устройств. М.: Энергия, 1978. 192 с.
- [4] Воле В. М., Воронков В. Б., Козлов В. А., Шульпина И. Л. // Электротехн. пром-ть. Сер. Преобразовательная техника. 1982. Вып. 4 (141). С. 17—18.
- [5] Богородский О. В., Воронцова Т. П., Жутова О. С. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 7. С. 1419—1425.
- [6] Мильвидский М. Г., Освенский В. В. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М.: Металлургия, 1984. 256 с.
- [7] Morizane K., Gleim R. S. // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. N 10. P. 4104—4107.
- [8] Елисеев В. В., Боронин К. Д., Добровенский В. В. // Электротехн. пром-ть. Сер. Преобразовательная техника. 1980. Вып. 6. С. 1—3.
- [9] Van Overstraeten R., De Man H. // Sol. St. Electron. 1970. Vol. 13. N 5. P. 583—608.

Всесоюзный электротехнический институт
им. В. И. Ленина
Москва

Поступило в Редакцию
16 февраля 1988 г.
В окончательной редакции
13 сентября 1988 г.

ДВОЙНАЯ ИОНИЗАЦИЯ АТОМА ГЕЛИЯ УДАРОМ БЫСТРОГО МНОГОЗАРЯДНОГО ИОНА

Р. А. Алимов, В. И. Матвеев

Неупругие процессы при столкновениях быстрых многозарядных ионов со сложными атомами являются в настоящее время объектом интенсивных исследований. Сильное поле многозарядного иона не позволяет, как правило, использовать при расчетах борновское приближение, которое применимо, если $Z/v \ll 1$, Z — заряд иона, v — относительная скорость столкновения (здесь и ниже используются атомные единицы). Для многозарядных ионов $Z \gg 1$ даже при $v \gg 1$ часто оказывается, что $Z/v \approx 1$. В таких случаях многоэлектронные возбуждения (в том числе двух- и более кратную ионизацию) сложного атома при ударе многозарядного иона следует объяснять на основе так называемого прямого механизма возбуждения атома полем многозарядного иона (см., например, [1]), основанного на том, что в течение