

УДК 621.794.44:537.543

Влияние режимов ионного травления на параметры фоторезисторов из CdHgTe

*А. В. Филатов, В. И. Лукша, Г. Э. Поповян, Ю. С. Трошкин,
Ю. П. Шаронов*

ГНЦ РФ ГУП «НПО «Орион»», Москва, Россия

Исследовалось влияние ионного травления при температуре жидкого азота на эффективное время жизни носителей заряда в толстых (~1 мм) и тонких (~0,01 мм) образцах CdHgTe n-типа проводимости. Получено, что использование в технологии фоторезисторов ионного травления при криогенных температурах позволяет снизить скорость рекомбинации на боковых гранях фоточувствительных элементов и за счет этого увеличить вольтовую чувствительность классических фоторезисторов и время накопления сигнала в фоторезисторах типа SPRITE. Приведены параметры фотоприемников.

Ионное травление широко применяется в микроэлектронике, так как позволяет повысить точность обеспечения заданной топологии приборов по сравнению с химическим травлением. При этом низкоэнергетический (100—1000 эВ) коллимированный ионный пучок бьет по мишени и распыляет поверхностные атомы, разрушая силы, связывающие атомы вещества. Фотоэлектрические свойства обрабатываемого материала очень чувствительны к ионному воздействию, так как практически во всех случаях создаются электрически активные дефекты. Исследованию влияния низкоэнергетического воздействия ионов аргона на свойства твердого раствора CdHgTe посвящено большое количество работ [1—6].

В технологии фоторезисторов на основе твердого раствора CdHgTe (КРТ) ионное травление на глубину до 15 мкм используется для формирования чувствительных элементов с созданием между ними зазоров шириной 5—50 мкм и образования n^+ -слоя в контактной области полупроводника [7—10].

Эффективное время жизни неосновных носителей заряда является наиболее показательным и практически используемым параметром, характеризующим частотные свойства фоторезисторов, их чувствительность и технологические возможности реализации объемного времени жизни неосновных носителей заряда исходного полупроводникового материала.

Цель данной работы — исследование влияния ионного травления КРТ при криогенных температурах на эффективное время жизни неосновных носителей заряда классических фоторезисторов и фоторезисторов с внутренним накоплением сигнала (ВНС) типа SPRITE [11].

Предполагалось, что за счет снижения концентрации образующихся в данном процессе радиационных дефектов можно существенно уменьшить скорость рекомбинации носителей на боковых гранях фоточувствительных элементов фоторезисторов (ФЧЭ).

Чувствительные элементы фоторезисторов на спектральный диапазон 8—12 мкм изготавливались по разработанной ранее технологии [9, 10] из КРТ электронного типа проводимости с объемным временем жизни не менее 0,5 мкс для классических фоторезисторов и не менее 2 мкс — для фоторезисторов с ВНС. Эксперименты проводились также на толстых (~2 мм) и тонких (~0,01 мм) образцах КРТ.

Ионное травление осуществлялось коллимированным пучком ионов аргона при ускоряющем напряжении 1 кэВ в установке IM/SID-I фирмы Хеппоп (Австрия) с доработанным охлаждаемым жидким азотом держателем образцов. Оптимальная плотность ионного тока составила $(0,2 \pm 10\%)$ мА/см². Остаточное давление 10^{-6} торр.

Специально разработанная технология маскирования толстыми пленками фоторезиста (0,5—1,0 мкм) тонких образцов КРТ с нанесенными на них металлическими и диэлектрическими покрытиями устраняла разрушение этих пленок при низких температурах из-за несогласованности с коэффициентами температурного расширения находящихся под ними материалов.

Эффективное время жизни неосновных носителей заряда в пластинах КРТ измерялось бесконтактным методом по спаду СВЧ-проводимости при импульсной засветке светодиодом с длиной волны излучения 0,9 мкм с разрешением ~1 см² и точностью 10 %. Измерения проводились на образцах не позже чем через 30 мин после обработки. Измерение постоянной эффективного времени жизни неосновных носителей заряда ФЧЭ проводилось в вакуумных криостатах с входным окном из просветленного германия, длина волны излучения используемых для этого импульсных светодиодов составляла 2,09 мкм.

Толщина толстых образцов, предназначенных для ионного травления, после удаления химико-механической полировкой нарушенного слоя составляла 0,5—0,6 мм. В табл. 1 приведены экспериментальные результаты влияния на эффективное время жизни неосновных носителей заряда ионного травления поверхности пластин КРТ при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Толщина удаляемого ионным травлением слоя КРТ составляла 4—5 мкм. Как видно из полученных результатов, воздействие на КРТ ионного пучка при комнатной температуре приводит к резкому снижению эффективного времени жизни (больше чем на порядок) за счет возрастания скорости поверхностной рекомбинации.

Таблица 1

Влияние ионного травления на эффективное время жизни неосновных носителей заряда толстых пластин КРТ

№ п/п	Состав образца, мольная доля CdTe	Значение эффективного времени жизни, мкс		Температура образцов при ионном травлении
		исходное	после ионного травления	
1	$x \approx 0,3$	3,2	3,5	Жидкий азот
2			$\leq 0,1$	
3	$x \approx 0,2$	1,0	1,0	То же
4			$\leq 0,1$	

Исследование влияния рекомбинации на боковых гранях ФЧЭ проводилось с помощью прямоугольных элементов КРТ состава $x \approx 0,2$ толщиной 7–10 мкм, длиной 700 мкм, объединенных в группы по четыре полоски, имеющие ширину 160, 80, 40 и 20 мкм с одним общим контактом. Они изготовлялись по типовой технологии фоторезисторов на сапфировой подложке [9, 10]. На фронтальной и нижней поверхностях формировался собственный анодный окисел толщиной 700–800 Å [12]. Используя фотошаблоны и стандартные фотолитографические методы, пластины ионным травлением боковых граней разделялись на элементы (тип 1 ФЧЭ). На образцы, предназначенные для ионного травления при пониженной температуре, наносился более тонкий слой фоторезиста, поэтому с их фронтальной поверхности при этом удалялись анодный окисел и часть образца КРТ (тип 2 ФЧЭ). Экспериментальные результаты влияния ионного травления тонких пластин КРТ на эффективное время жизни неосновных носителей заряда при комнатной температуре и температуре жидкого азота приведены в табл. 2. Причем значения эффективного времени жизни носителей заряда на тонких пластинах этих образцов до окисления было 0,5 мкм на каждом и 1,5 и 1,3 мкс — после, соответственно.

Таблица 2

Влияние ионного травления на эффективное время жизни неосновных носителей заряда тонких пластин КРТ

№ п/п	Ширина полоски, мкм	Значение эффективного времени жизни, мкс	
		ионное травление при комнатной температуре (тип 1 ФЧЭ)*	ионное травление при температуре жидкого азота (тип 2 ФЧЭ)**
1	160	1,5	0,9
2	80	1,0	0,6
3	40	0,25	0,5
4	20	$\leq 0,1$	0,4

* Эффективное время жизни носителей до травления 1,5 мкс.

** То же, 1,3 мкс.

Исходя из полученных результатов оценим скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда, создаваемой ионной обработкой фронтальной поверхности пластин. Воспользуемся известной формулой для эффективного времени жизни в тонких образцах (порядка диффузионной длины)

$$1/\tau_{эф} = 1/\tau_{об} = 2s/d,$$

где $\tau_{эф}$ — эффективное время жизни носителей заряда;

$\tau_{об}$ — объемное время жизни носителей заряда;

s — скорость поверхностной рекомбинации;

d — толщина образца.

При расчете принималось, что ионная обработка при комнатной температуре дает $\tau_{эф}$ на более 0,1 мкс, а при температуре жидкого азота — не менее 0,9 мкс. За $\tau_{об}$ принималось время, измеренное до ионной обработки. Толщина образцов 10 мкм. Учитывая, что обработке подвергалась только одна поверхность, получим в случае ионного травления при комнатной температуре s не менее 10 000 см/с, а для ионного травления при температуре жидкого азота — не более 500 см/с.

Для сравнения отметим, что химико-механическая полировка КРТ на алмазном порошке с размером зерна 1 мкм ухудшает $\tau_{эф}$ до 0,2 мкс [13]. А самая низкая скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда (400—600 см/с) достигнута с помощью анодного окисления химически полированной поверхности КРТ [12]. При этом фиксированный положительный заряд имеет величину $6 \cdot 10^{11} \div 10^{12}$ см⁻² за счет положительно заряженных вакансий кислорода в анодном окисле [14].

Как видно из приведенных экспериментальных результатов, уменьшение ширины элементов приводит к уменьшению эффективного времени жизни носителей заряда и, следовательно, к уменьшению чувствительности за счет увеличивающегося вклада рекомбинации носителей на боковых гранях. Аналогичное явление происходит в ФЧЭ с ВНС, где ширина чувствительного элемента составляет 62,5 мкм, и ФЧЭ классических фоторезисторов при сопоставимой (и меньшей) ширине чувствительных площадок.

С использованием ионного травления при температуре жидкого азота были изготовлены ФЧЭ классических многоэлементных фоторезисторов и фоторезисторов с ВНС. Собранные на их основе фоторезисторы имели вакуумную конструкцию и работали при охлаждении ~78 К. В табл. 3 приведены параметры изготовленных многоэлементных фоторезисторов с размером чувствительной площадки 35×35 мкм с асимметричным расположением теневого контакта для увеличения времени пролета носителей заряда [9]. Значения вольтовой чувствительности приведены в режиме согласованной нагрузки. Тепловыделение одного канала линейки, как правило, не превышало 2,0 мВт.

Таблица 3

Параметры 96-площадочных фоторезисторов с размером чувствительной площадки 35×35 мкм и плоским углом зрения $2\varphi = 30^\circ$

№ п/п	Средняя удельная обнаружительная способность, $D^* (\lambda_{max}, 1200, 1) \cdot 10^{10}, \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$	Средняя вольтовая чувствительность $S_{\lambda_{max}} \cdot 10^5, \text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$	Средний ток смещения $I_{см}, \text{мА}$
1	8,7	1,2	3,7
2	9,9	1,3	3,0
3	11,0	1,4	5,3

На рисунке приведена типичная зависимость постоянной времени фотоответа от тока смещения ФЧЭ. Оценка величины амбиполярной подвижности носителей заряда в данном случае равна подвижности тяжелых дырок (μ_h) в условиях пролета носителей между контактами ФЧЭ по формуле

$$\mu_h = L / E \tau_{эф},$$

где L — расстояние между электродами, 110 мкм;

E — напряженность электрического поля, дает значение $\mu_h = 370\text{—}500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Это хорошо согласуется с величинами дрейфовой подвижности тяжелых дырок [15—16] для используемого нами состава КРТ.



Типичная зависимость постоянной времени фотоответа от тока смещения ФЧЭ с размером чувствительной площадки 35x35 мкм с асимметричным расположением теневого контакта:

- 1 — при подаче отрицательного потенциала к ближнему электроду;
- 2 — к дальнему электроду

В табл. 4 приведены параметры изготовленных многоэлементных ФЧЭ фоторезисторов с ВНС, при этом реализовано время накопления 2,0—2,4 мкс.

Таблица 4

Параметры 8-площадочных фоторезисторов с ВНС с размером чувствительной площадки 62,5x62,5 мкм и плоским углом зрения $2\varphi = 30^\circ$

№ п/п	Средняя удельная обнаружительная способность, $D^* (\lambda_{\max}, 10 \text{ кГц}) \cdot 10^{11}, \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$	Средняя вольтовая чувствительность, $S_{\lambda_{\max}} \cdot 10^3, \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$	Скорость сканирования, см/с
1	2,8	950	160

Заключение

Использование в технологии фоторезисторов ионного травления при криогенных температурах в сравнении, когда травление проводят без специального охлаждения, позволяет снизить скорость рекомбинации на боковых гранях фоточувствительных элементов. За счет этого реализовано эффективное время жизни неосновных носителей заряда твердого раствора CdHgTe не менее 0,5 мкс для многоэлементных малоразмерных фоторезисторов и не менее 2 мкс — для фоторезисторов с ВНС на спектральный диапазон 8—12 мкм с предельно высокими пороговыми параметрами.

Положительные результаты по ионному травлению КРТ при низких температурах могут оказаться полезными в технологии фотодиодов из этого материала, так как природа и механизм образования собственных электрически активных радиационных дефектов, образующихся при низкоэнергетическом воздействии (ионное травление аргоном с энергией) и высокоэнергетическом воздействии (ионная имплантация), могут быть схожи. Поэтому использование специального охлаждения в процессе ионной имплантации может быть перспективным для получения фотодиодных структур с электрически активными имплантированными атомами в материале p- и n-типов проводимости.

Литература

1. Baker G., Finkman E.//J. Vac. Sci. Technol. 1989. V P. A7. № 2. P. 348.
2. Brogowski P., Mucha H., Piotrowski J.//Phys. stat. sol. (a), 1989. V. 114. K37.
3. Solzbach U., Richter H. J.//Surface Science. 1980. V. 97. P. 191.
4. Margalit S., Nemirovsky Y., Rotstein I.// J. Appl. Phys. 1979. V. 50. № 10. P. 6386.
5. Lunn M. A., Dobson P. S.//J. of Crystal Growth. 1985. V. 73. P. 379.
6. Wotherspoon J. T. M.//UK Patent GB 2095898. 1981.
7. Ashley T., Elliot C. T., Harkir A. T.//Infrared Phys. 1986. V. 21. № 5. P. 303.
8. Shacham-Diamond Y. J., Kidron I.//Ibid, 1981. V. 21. № 2. P. 105.
9. Трошкин Ю. С., Филатов А. В., Алексеевичева В. С., Гусаров А. В., Корицунова А. П., Поповян Г. Э., Посевин О. П.//Прикладная физика. 1999. № 2. С. 63.
10. Поповян Г. Э., Трошкин Ю. С., Филатов А. В., Филачев А. М., Хитрова Л. М.// Свидетельство на полезную модель. RU 11938, 1999.
11. Blackburn A. et al.//Infrared Phys. 1982. V. 22. P. 57.
12. Catagnus P. C., Baker C. T.//US Patent № 3977018. 1976.
13. Kannan P. J., Murasaka R., Briere T.//J. Electrochem. Soc. 1982. V. 129. № 3. P. 656.
14. Stahle C. M. et al.//J. Vac. Sci. Technol. 1989. V. A7. № 2. P. 474.
15. Dennis P. N. J., Elliot C. T., Jones C. L.//Infrared Phys. 1986. V. 22. P. 167.
16. Shachev-Diamond Y. J., Kidron I.//J. Appl. Phys. 1984. V. 56. № 4. P. 1104.

The Influence of the ion etching on parameters of the CdHgTe photoconductors

A. V. Filatov, V. I. Looksha, G. E. Popovyan, U. S. Troshkin,
U. P. Sharonov

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The influence of the ion etching was investigated at temperature of liquid nitrogen on effective time of life of the ion carriers of a charge in thick (~ 1 mm) and thin (~ 0.01 mm) samples CdHgTe n-type conductivity. Is received, that use of the ion etching at cryogenic temperatures allows to lower recombination speed on lateral sides of photoresistors and at the expense of it to increase volt sensitivity of classical photoresistors and time of accumulation of a signal in SPRITE receivers. The parameters of photodetectors are given.