

1. Свиридов А. Н., Мартынов С. Н. Фотоприемные устройства с CO<sub>2</sub>-квантовыми усилителями// Там же. С. 67—71.

2. Горелик Л. И., Креопалов В. И., Куликов К. М., Мартынов С. Н., Свиридов А. Н. Экспериментальные исследования пороговых потоков фотоприемных устройств с CO<sub>2</sub>-квантовыми усилителями// Там же. С. 59—62.

3. Sviridov A. N.//Proceedings of SPIE, 17<sup>th</sup> International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. 2002. V. 5126. P. 301—317.

4. Свиридов А. Н. Расчет предельных параметров активной системы видения на основе несканирующего тепловизора// Прикладная физика. 2003. № 1. С. 143—152.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

## Calculation of utmost parameters of reception devices with the CO<sub>2</sub>-quantum amplifiers, intended for laser locators and active systems of vision

A. N. Sviridov

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*Calculations of utmost thresholds of sensitivity of receiver devices with CO<sub>2</sub> quantum amplifiers (RD with QA), intended for laser locators and active systems of vision are carried out. At calculations dependences of thresholds of sensitivity RD with QA from parameters QA, characteristics of receivers used in them and methods (electric or visual) registration of signals were taken into account. The opportunity and expediency of construction of active system of vision on basis CO<sub>2</sub>—QA and non-scanning thermal imager is shown.*

УДК 621.383.4/5

## Создание внутреннего геттера для современных ПЗС

Е. В. Костюков, М. А. Поспелова, Т. Ф. Русак  
ФГУП «НПП “Пульсар”», Москва, Россия

С. В. Трунов, Т. А. Облыгина, Г. И. Никитина  
ОАО “НИИМЭ и МИКРОН”, Москва, Россия

*Исключение отжига при температуре 700—800 °С, считающегося необходимым для формирования и стабилизации зародышей преципитатов, не влияет ни на общее падение концентрации межузельного кислорода в ходе всего цикла, ни на плотность и распределение микродефектов. Это позволяет использовать для производства приборов пластины, прошедшие только отжиг при 1150 °С. Уменьшение времени отжига при 1150 °С с 6 ч до 5 мин мало влияет на общую убыль кислорода и на плотность геттера в объеме пластины, но сильно изменяет приповерхностную область.*

Для улучшения параметров полупроводниковых приборов и увеличения выхода годных более двадцати лет назад был разработан трехстадийный процесс создания внутреннего геттера. Первой его стадией являет-

ся высокотемпературный отжиг для образования в местах расположения приборов зоны, свободной от дефектов.

Во время такого отжига из приповерхностной области

пластины за счет аутодиффузии удаляется кислород. При последующих отжигах технологических циклов изготовления приборов в этой области дефекты не образуются из-за обеднения кислородом. Вторая стадия — отжиг при температуре 650—800 °С для образования и стабилизации зародышей преципитатов в объеме пластины; третья — рост преципитатов при температуре 1000—1050 °С. В последующие годы было проведено много работ по исследованию и оптимизации этого процесса [1—4]. Сейчас многие иностранные фирмы стали проводить только высокотемпературный отжиг для создания зоны, свободной от дефектов, считая, что геттер образуется во время термических отжигов при изготовлении приборов [5—7].

В работе [8] показано, что при разработанном трехстадийном процессе убыль концентрации кислорода и плотность образующихся при этом микродефектов сильно зависят от начальной концентрации кислорода. Была обнаружена корреляция между плотностью микродефектов и убылью концентрации кислорода. Оптимальная для создания внутреннего геттера концентрация кислорода в кремниевых пластинах лежит в узких пределах:  $(7,5—9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Эффективный геттер получается при убыли концентрации кислорода большей, чем  $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Такой геттер позволил нам изготовить линейные фоточувствительные приборы с зарядовой связью, имеющие при времени накопления 1 мс неравномерность темнового сигнала меньше 0,2 %.

Цель данной работы — выяснить, что происходит в пластинах во время последовательного проведения высоко- и низкотемпературных обработок и можно ли запускать на производство приборов пластины, прошедшие только один высокотемпературный отжиг. Работа проводилась на пластинах марки КДБ20 с ориентацией (100), изготовленных в 1986 и 1990 гг. из кремния, выращенного методом Чохральского. Содержание углерода в пластинах была меньше чем  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Концентрация кислорода в пластинах измерялась по ИК-спектрам пропускания на ИК-Фурье-спектрометре ФСМ1201 с использованием коэффициента пересчета  $2,45 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Прибор снабжен двухкоординатным измерительным столом и позволяет в автоматическом режиме измерять параметры кремниевых пластин в заданных точках. В сочетании с небольшим диаметром светового пятна (10 мм) это позволило измерять изменение концентрации кислорода в данной точке пластины [8].

Отжиги пластин проводили на заводе "Микрон" в стандартных термодиффузионных печах, в которых проводится обработка серийной продукции. Пластины с измеренной начальной концентрацией межзельного кислорода подвергались отжигу при 1150 °С в атмосфере азота, измерялась концентрация оставшегося межзельного кислорода и проводились оптическое наблюдение и подсчет микродефектов на травленных сколах пластин. Перед отжигом на поверхности пластин выращивался защитный окисел [8].

Оказалось, что после 6-часового отжига при 1150 °С в атмосфере азота, проводящегося, согласно теории

[1—4], только для создания свободной зоны, наблюдается значительное падение концентрации межзельного кислорода. В результате на стадию образования зародышей пластины поступают с концентрацией кислорода, меньшей, чем  $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Как было показано ранее [8], для применяемого цикла такого количества кислорода недостаточно для создания эффективного геттера. Это позволило предположить, что зародыши преципитатов образуются и стабилизируются уже при проведении первого высокотемпературного отжига, и стадию образования зародышей преципитатов — отжиг при 700—800 °С — можно исключить. Для проверки такой возможности пластины, на которых был проведен только высокотемпературный отжиг, были разделены на две группы. На пластинах первой группы было проведено обычное окончание процесса геттерирования — отжиги при 700—800 °С (6 ч) и при 1000—1050 °С (3 ч). На пластинах второй группы отжиг при 700—800 °С был заменен отжигом при 1000 °С (4 ч). На рис. 1 данные для пластин первой группы обозначены контурами значков, а данные для пластин второй группы заполненными значками. На том же рисунке представлена убыль концентрации кислорода после проведения обычного трехстадийного отжига. Видно, что исключение отжига при 700—800 °С не сказывается на общей убыли концентрации межзельного кислорода для любых начальных концентраций последнего. Рис. 1 также показывает, что уменьшение времени первого отжига при 1150 °С с 6 ч до 5 мин мало влияет на общую убыль концентрации кислорода в ходе всего цикла отжигов.

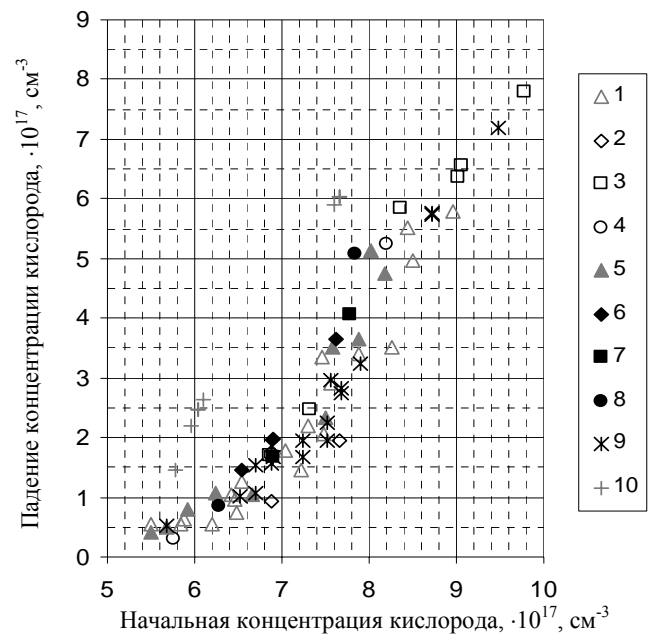


Рис. 1. Падение концентрации межзельного кислорода после проведения цикла отжигов:

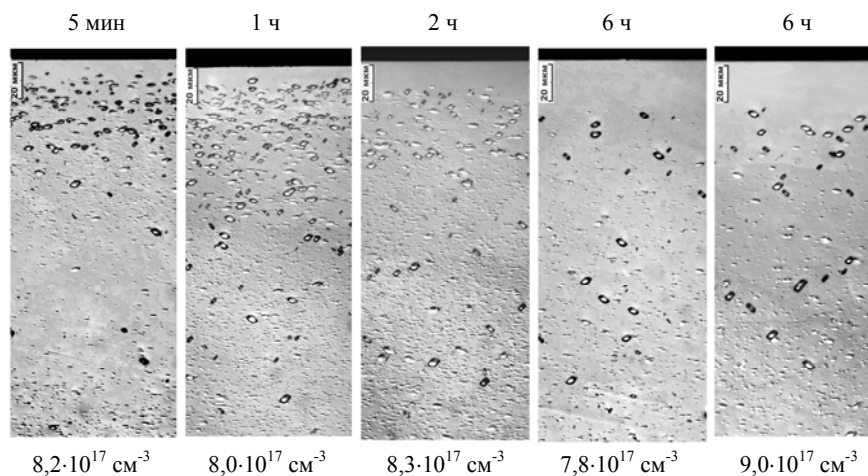
- 1—4 (контур значков) — циклы включают отжиг при 700—800 °С; 5—8 (заполненные значки) — отжиг при 700—800 °С исключен; время начального отжига при 1150 °С:
- 1 и 5 — 6 ч; 2 и 6 — 4 ч; 3 и 7 — 2 ч; 4 и 8 — 5 мин; 9 и 10 — обычный трехстадийный отжиг;
- 10 — концентрация углерода завышена

Отжиг при температуре 650—800 °С считается [1—4] необходимым для образования и стабилизации зародышей преципитатов. Для разработки стандартного ASTM метода определения способности кремниевых пластин к образованию преципитатов кислорода были проведены работы по измерению падения концентрации кислорода после двух видов термических обработок: 16 ч при 1050 °С (тест А) и 4 ч при 750 °С + 16 ч при 1050 °С (тест В). Четыре лаборатории получили близкие зависимости падения концентрации кислорода от начальной концентрации кислорода для пластин, полученных от разных производителей. Оказалось, что включение предварительного отжига при 750 °С вызывает преципитацию в пластинах со значительно меньшей начальной концентрацией кислорода [4].

Для исследуемых пластин после проведения высокотемпературного отжига при 1150 °С включение следующего за ним отжига при 700—800 °С не влияет на преципитацию ни при каких начальных концентрациях кислорода. Пластины при охлаждении находятся какое-то время при 700—800 °С, кроме того, выгрузка пластин происходит при 700 °С, но все это занимает не более получаса, а не 4 ч, как считается необходимым в литературе. Возможно, что использованные нами пла-

стины содержали зародыши, образовавшиеся в процессе изготовления слитка (ростовые дефекты). Тем не менее, отжиг при 1150 °С оказывается необходимым, поскольку его исключение уменьшает общее падение концентрации межзельного кислорода, особенно если проводятся отжики только при 1000—1050 °С, и, кроме того, делает результаты невоспроизводимыми.

Качество геттера контролировалось оптическим наблюдением и подсчетом фигур травления, образовавшихся на сколах пластин после травления их в хорошо известном травителе Wright. На рис. 2, а и б представлены микрофотографии участков поперечных сколов пластин, прошедших цикл создания внутреннего геттера, включающий отжиг при 700—800 °С (см. рис. 2, а) и без отжига при 700—800 °С (см. рис. 2, б). На рис. 3 приведена вычисленная плотность микродефектов, образовавшихся в верхней части пластины непосредственно под свободной зоной. Сопоставление рис. 2, а и б показывает, что замена окончания процесса не влияет на плотность и распределение микродефектов. Как видно из рис. 3, на плотность дефектов исключение отжига при температуре 700—800 °С также не влияет.



а

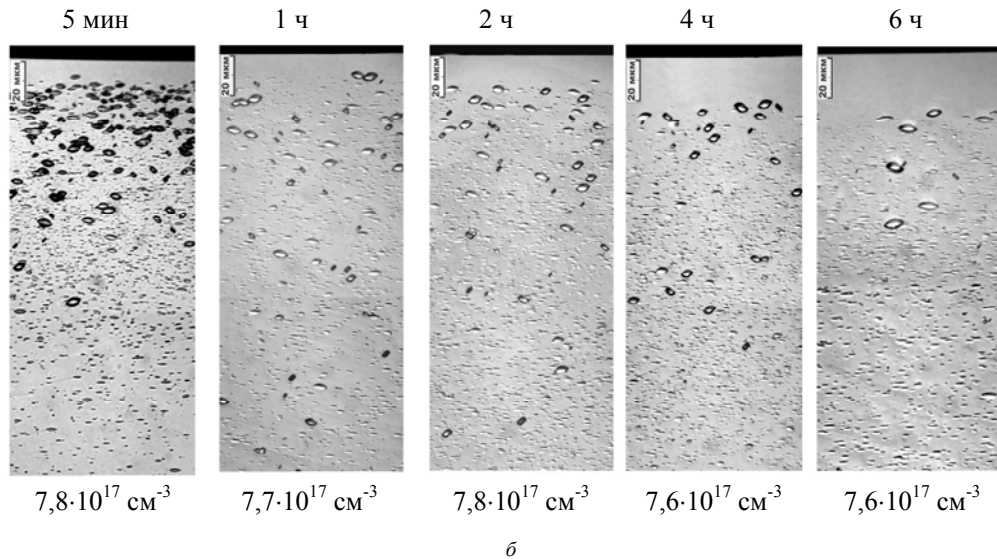


Рис. 2. Микрофотографии участков поперечных сколов пластин, прошедших цикл создания внутреннего геттера: (время отжига при 1150 °С указано над рис., концентрация кислорода указана под рис.): а — включающий отжиг при 700—800 °С; б — без отжига при 700—800 °С

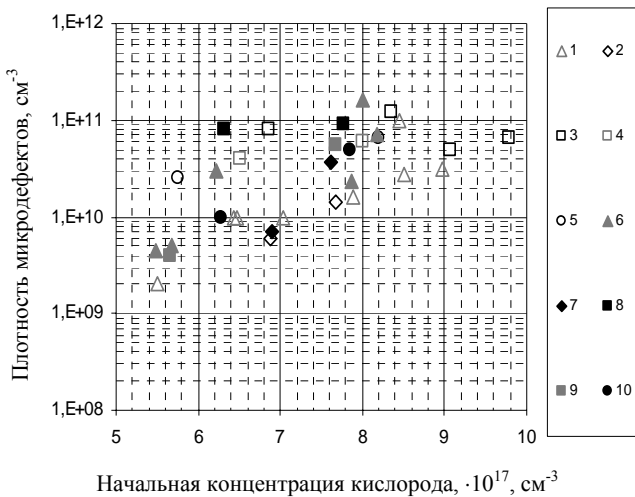


Рис. 3. Плотность микродефектов, образовавшихся в верхней части пластины после проведения цикла отжигов: 1—5 (контуры значков) — циклы включают отжиг при 700—800 °С; 6—10 (заполненные значки) — отжиг при 700—800 °С исключен; время начального отжига при 1150 °С: 1 и 6 — 6 ч; 2 и 7 — 4 ч; 3 и 8 — 2 ч; 4 и 9 — 1 ч; 5 и 10 — 5 мин

Представленные данные позволяют заключить, что можно запускать для производства приборов пластины, прошедшие только один высокотемпературный отжиг, не заботясь о том, чтобы технологический цикл изготовления приборов начинался с отжига при 700—800 °С.

Обычный трехстадийный отжиг был проведен на нескольких пластинах с завышенным содержанием углерода ( $15 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Как видно из рис. 1, повышение содержания углерода увеличивает убыль концентрации кислорода, причем это особенно сказывается при малых начальных концентрациях кислорода. Содержание углерода в процессе отжига также падает до  $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Как уже было отмечено, сокращение времени первого отжига при 1150 °С с 6 ч до 5 мин мало влияет на

общее падение концентрации кислорода после всего цикла отжигов (см. рис. 1). Общая картина геттера в объеме пластины изменяется при этом также незначительно (см. рис. 2, а, б). По-видимому, при 1150 °С зародыши очень быстро образуются или преобразуются из ростовых дефектов и успевают стабилизироваться за время охлаждения.

Ширина свободной зоны при сокращении отжига при 1150 °С уменьшается, что согласуется с имеющимися в литературе экспериментальными данными [2—5] и теоретическими расчетами [4]. Как видно из рис. 2, а, б, уже после 5 мин отжига ширина свободной зоны становится около 8 мкм и изменение времени первого отжига при 1150 °С сильно изменяет картину геттера в приповерхностной области пластины. При уменьшении времени отжига дефекты скапливаются непосредственно под свободной зоной. Особенно увеличивается плотность крупных дефектов. Подсчет плотности дефектов подтверждает, что в центре пластины плотность меньше, чем в приповерхностной области. Для 6-часового отжига это явление наблюдается в меньшей степени.

У специалистов нет четкого мнения о том, каким должен быть внутренний геттер, какой должна быть ширина свободной зоны. Есть теория [9], что геттер состоит из мелких преципититов  $\text{SiO}_2$ . Чем они мельче, тем больше общая площадь их поверхности и тем эффективнее геттерируются металлические примеси. На основании этой теории проведены расчеты [10] способности внутреннего геттера конкурировать с нарушениями структуры, вызванными формированием приборов. Считается, что при каждом отжиге все металлические примеси покидают геттер и диффундируют по пластине, а при охлаждении снова геттерируются на ближайшем захватывающем центре, которым может оказаться преципитат или прибор. По этой теории ширина свободной зоны должна быть возможно меньше, в расчетах она принимается равной 4 мкм.

Авторы работ [2, 4] считают, что геттером являются дислокационные петли и поля напряжений, образующиеся вокруг крупных преципитатов. Такие крупные дефекты, возможно, могут связывать точечные дефекты (собственные и примесные) так, что и при нагреве до достаточно высокой температуры точечные дефекты остаются связанными.

Для того чтобы нежелательные примеси удерживались внутренним геттером, а не нарушениями структуры, вызванными формированием приборов, энергия связи примеси с геттером должна быть больше, чем с приборными нарушениями. Естественно предположить, что чем сильнее дефект искажает кристаллическую решетку кремния, тем больше будет энергия связи с ним, и достаточно крупные преципитаты, окруженные дислокационными петлями и полями напряжений, будут связывать примеси сильнее, чем приборы. Однако поскольку плотность крупных дефектов не может быть высокой, они не обеспечат ровную границу свободной зоны, и расстояние до них окажется больше, чем до приборов. Мелкие преципитаты могут образовать ровную границу свободной зоны, расположенную на небольшом расстоянии от приборов (4 мкм). При охлаждении после каждого отжига нежелательные примеси будут захватываться и преципитатами (крупными и мелкими) и приборами. Во время подъема температуры следующего отжига примеси покинут мелкие преципитаты и приборы, но останутся на крупных преципитатах и связанных с ними дислокационных петлях и полях напряжений. Таким образом, после каждого следующего отжига все большая часть примесей окажется связанной крупными преципитатами.

Полученные данные показывают, что изменяя технологию создания внутреннего геттера, например время отжига, можно изменять вид образующихся дефектов и расположение их по толщине пластины. Как видно из рис. 2, *a* и *b*, после коротких отжигов при 1150 °С крупные дефекты концентрируются непосредственно под свободной от дефектов зоной, ширина которой больше 8 мкм. В дальнейшем планируется найти связь между технологией создания внутреннего геттера, природой и расположением образующих его дефектов и эффективностью геттера для современных приборов с зарядовой связью.

#### **Заключение**

## **Internal getter forming for modern charge-coupled devices**

*E. V. Kostjukov, M. A. Pospelova, T. F. Rusak*  
"Pulsar" Science Research Institute, Moscow, Russia

*S. V. Trounov, T. A. Oblygina, G. I. Nikitina*  
Corporation "Mikron", Moscow, Russia

Исследование отработанного нами ранее процесса создания внутреннего геттера в стандартных термодиффузионных печах завода "Микрон" показало, что в результате отжига при 1150 °С образуются и стабилизируются зародыши преципитатов. Согласно общепринятой теории при таком отжиге происходит только удаление кислорода из приповерхностной области пластины.

Исключение отжига при температуре 700—800 °С, считающегося необходимым для формирования и стабилизации зародышей преципитатов, не влияет ни на общее падение концентрации межзельного кислорода в ходе всего цикла, ни на плотность и распределение микродефектов, образующихся в объеме пластины.

Уменьшение времени отжига при 1150 °С с 6 ч до 5 мин мало влияет на общее падение концентрации межзельного кислорода в ходе всего цикла и на общую картину геттера в объеме пластины, но сильно изменяет приповерхностную область.

Таким образом, можно запускать на производство приборов пластины, прошедшие только один высокотемпературный отжиг, не заботясь о том, чтобы технологический цикл изготовления приборов начинался с отжига при 700—800 °С.

#### **Л и т е р а т у р а**

1. Craven R. A., Kord H. W.// Solid state technology. 1989. V. 24. P. 55—61.
2. Shimura F. Semiconductor Silicon Crystal Technology// Academic Press, Inc., San Diego Calif., 1989. P. 361—367.
3. Wijaranakula W., Matlock J. H.// J. Electrochem. Soc. 1990. V. 137. № 4. P. 1262.
4. Borghesi A., Pivac B., Sassella A., Stella A.// J. Appl. Phys. 1995. V. 77. P. 4169—4270.
5. Cho W. J., Kuwano H.// Jpn. J. Appl. Phys. 2000. V. 39. P. 3277—3280.
6. Patent 5,994,761, US N 01 L 29/36, Falster R., Cornara M., Gambaro D., Olmo M., 11.30.99.
7. Suzuki T.// J. Appl. Phys. 2000. V. 88. P. 6881.
8. Костюков Е. В., Поспелова М. А., Русак Т. Ф., Трунов С. В.// Прикладная физика. 2003. Вып. 5. С. 102—105.
9. Ham. F. S.// J. Phys. Chem. Solids. 1958. V. 6. P. 335.
10. Istratov A. A., Huber W., Weber E. R.// J. Electrochem. Soc. 2003. V. 150. P. G244—252.

*Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.*