

УДК 53.06

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ЗАЗОРА МЕЖДУ ЧИПАМИ В МОЗАИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНЫХ МОДУЛЯХ

А. Р. Новоселов

*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8
E-mail: novoselov@oesd.ru*

Предложен способ формирования краёв чипов в целях уменьшения зазора между чипами в мозаичных фотоприёмных модулях, чувствительных в инфракрасном спектральном диапазоне: формирование несимметричных скрайбовых канавок лазерным излучением, откол края поверхности чипа, уходящей под него, и последующая корректировка вертикальности края лазерным излучением. Ширина зазора между чипами составляет 1–3 мкм.

Ключевые слова: мозаичные фотоприёмники, лазерное скрайбирование, фотоприёмники на гетероэпитаксиальных плёнках КРТ, фоточувствительные болометрические матрицы, кремниевые микросхемы.

DOI: 10.15372/AUT20160114

Введение. Потребность в увеличении дальности действия и пространственного разрешения тепловизионных систем стимулирует изготовление большеформатных фотоприёмников инфракрасного спектрального диапазона. Одним из известных способов их изготовления является использование мозаичных фотоприёмников (МФ), состоящих, например, из четырёх гибридных фотоприёмников (чипы с фоточувствительными элементами и мультиплексорами) форматом 1024×1024 и размером пиксела 27×27 мкм [1]. Однако за счёт большой технической зоны стыковки гибридных фотоприёмников расстояние между краевыми фоточувствительными элементами соседних фотоприёмников может составить до 283 фоточувствительных элементов [1], что приводит к потере информации в изображении. В работе [2] рассмотрен фотоприёмник, имеющий увеличенную геометрию краевых пикселей, закрывающих область стыковки с соседним фотоприёмником. При увеличении площади чипа уменьшается выход годных чипов из-за дефектов. В [3] показано уменьшение выхода годных мультиплексоров разных форматов: при 160×128 их количество 73 %, а при 320×256 — 16 %. В работе [4] отмечено, что при изготовлении монолитных МФ на приборной пластине между соседними чипами, в которых отсутствуют зазоры для скрайбирования, из-за дефектности пластины может быть очень низкий выход годных.

При изготовлении МФ технология минимизации расстояний между краевыми пикселями соседних фотоприёмников является чрезвычайно важной. В данной работе рассмотрен вариант минимизации таких расстояний на основе лазерного скрайбирования приборных пластин и их раскола.

Известно, что при любом способе разделения приборных пластин на чипы вокруг области воздействия возникают повреждения в материале (при скрайбировании алмазным резцом кремниевых пластин ширина области более 125 мкм [5], при лазерном скрайбировании кремния — около 35 мкм [6, 7], при разрезании алмазным кругом — 20–30 мкм [8]).

В ряде работ [9–12] показано, что мощные импульсные лазеры с наносекундной длительностью импульсов в ультрафиолетовом диапазоне позволяют уменьшить ширину области повреждения в полупроводниковых материалах до 5 мкм для мультиплексоров [12]

и до 8 мкм для чипов с фоточувствительными элементами на основе гетероэпитаксиальных плёнок КРТ на GaAs-подложках [13]. Во всех наших экспериментах был использован импульсный лазерный источник ЛГИ-21, имеющий длину волны 0,337 нм, длительность импульса 7 нс, частоту повторения 100 Гц и мощность энергии в импульсе 2 кВт.

На основе результатов исследования лазерного скрайбирования кремниевых болометрических матриц (ширина области повреждения 5 мкм) изготовлены МФ с расстоянием между краевыми пикселями соседних фотоприёмников до 26 мкм [14, 15]. Это стало возможным при выполнении следующих условий.

1. Применение многопроходного режима (не менее 30 проходов) лазерного скрайбирования полупроводниковых материалов при 50 %-ном коэффициенте перекрытия двух последовательно поступающих импульсов излучения [13]. При уменьшении площади перекрытия до 10 % ширина зоны повреждения не увеличивается, но боковая поверхность канавки становится более гладкой [16].

2. Нанесение плёнки фоторезиста на поверхность перед скрайбированием. В [13, 17] экспериментально показано, что при лазерном скрайбировании пластин с фоточувствительными элементами на основе плёнок КРТ на GaAs-подложках ширина области повреждения снижается с 13 до 8 мкм.

3. Получение качественных поверхностей раскола с неровностью края не более 2 мкм. Применение традиционных методов раскола, основанных на изгибе одной или двух сторон, не обеспечивает требуемого качества поверхности [18]. Ровная поверхность раскола была получена только с помощью метода, используемого на установках фирмы «Synova SA». Раскол осуществляется с помощью клина, который давит на чип непосредственно под скрайбовой канавкой с тыльной стороны. При таком способе раскола поверхность становится предсказуемой и достаточно ровной. Этот способ применён в предлагаемой работе.

Исследование метода получения минимальных расстояний между краевыми пикселями соседних фотоприёмников. Объектами исследования были чипы фоточувствительных элементов и мультиплексоров. Фотоприёмники состояли из следующих слоёв: диэлектриков Si_3N_4 и SiO_2 (суммарная толщина около 0,15 мкм), плёнок КРТ толщиной 10 мкм и GaAs-подложки. Диэлектрики на чипах для данной длины волны прозрачны. Механизм удаления диэлектрических плёнок с поверхностей КРТ и кремния описан в [19, 20]: удаление осуществляется давлением, возникающим при парообразовании в нижних слоях.

Формирование канавки лазерным излучением. На рис. 1, *a* показаны фотографии фрагментов поверхности гетероэпитаксиальных плёнок КРТ на GaAs-подложке после четырёх проходов под излучением со скоростью 120 мкм/с при плотности энергии около $2,6 \text{ Дж/см}^2$. Поверхность закрыта диэлектрическими слоями SiO_2 и Si_3N_4 суммарной толщиной около 0,15 мкм. Во время первого прохода происходит расплав и парообразование в верхнем слое поверхности плёнки КРТ в области пятна излучения. С поверхности образца давлением пара удаляются диэлектрики. При каждом следующем проходе канавка углубляется без увеличения её ширины. После второго прохода по образцу на краях канавки могут формироваться области с расплавом материала шириной не более 1–2 мкм и высотой 0,5–1 мкм. При следующих проходах давления паров КРТ и GaAs в выбросе недостаточно для выдавливания расплава на поверхность. На рис. 1, *b* представлена фотография полностью сформированной за 50 проходов канавки на том же образце при плотности энергии около $2,6 \text{ Дж/см}^2$. После лазерного скрайбирования с поверхности удалены диэлектрические слои SiO_2 и Si_3N_4 для повышения точности измерения расстояния. Фотография демонстрирует стенки канавки, покрытые слоем расплава, не выходящим за её пределы.

Канавка формировалась излучением, имеющим гауссоподобное распределение плотности энергии в пятне на поверхности.

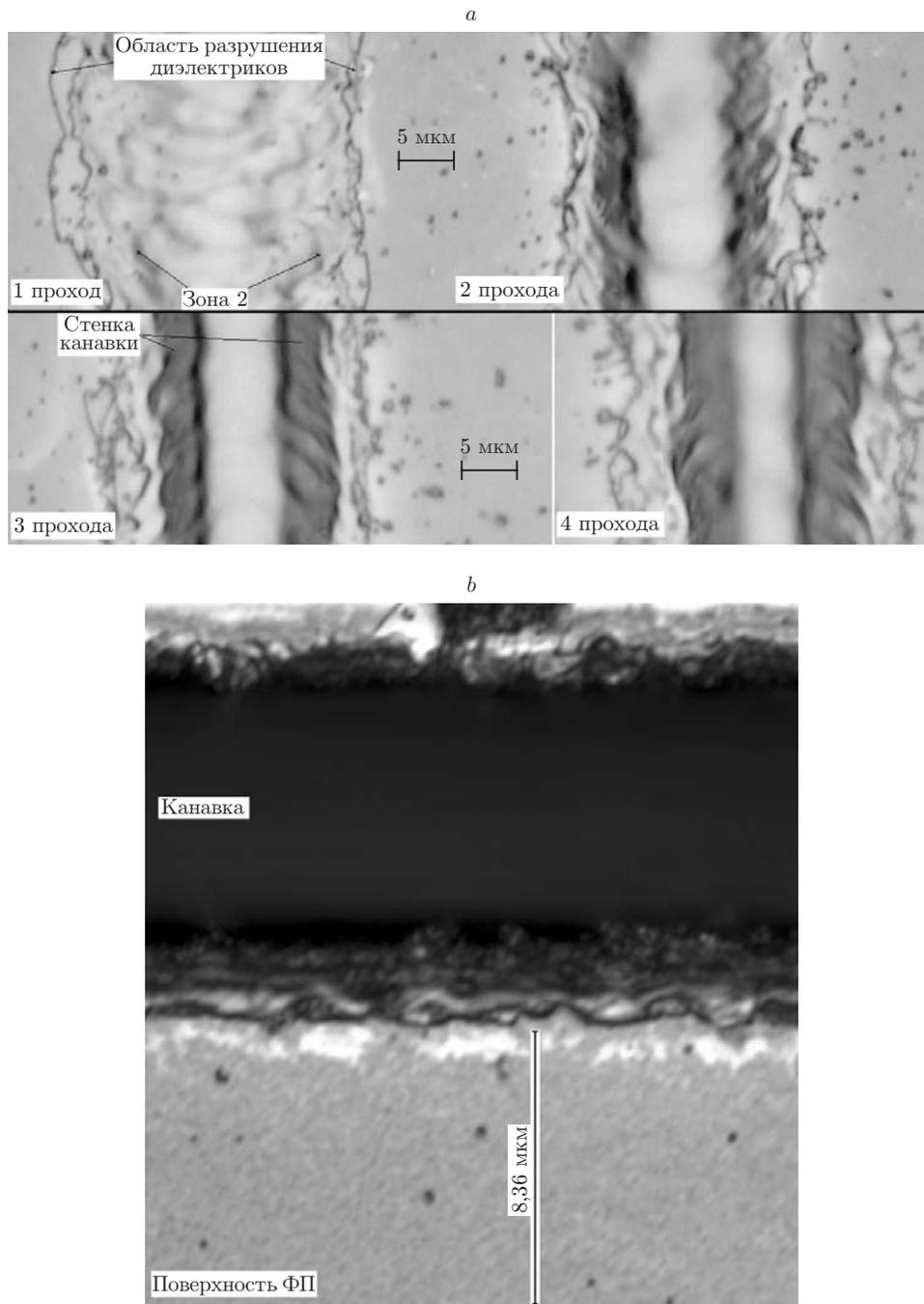


Рис. 1

Раскол приборной пластины на чипы. Поверхность после раскола пластины по симметричной V-образной канавке смещена относительно верхнего края канавки на половину её ширины. На рис. 2 показана РЭМ-фотография края гибридной сборки двух фрагментов мультиплексора с индиевыми столбами на поверхности. Кремниевый чип был скрайбирован лазерным излучением (со скоростью 120 мкм/с и плотностью энергии 3,6 Дж/см²), расколот, затем обе половинки совмещены и сдавлены для образования надёжного механического соединения индиевых столбов. Фотография иллюстрирует неровности поверхностей раскола.

При формировании несимметричной канавки, когда оптическая ось излучения не совпадает с нормалью к поверхности образца и отклонена на 12'' в поперечном направлении

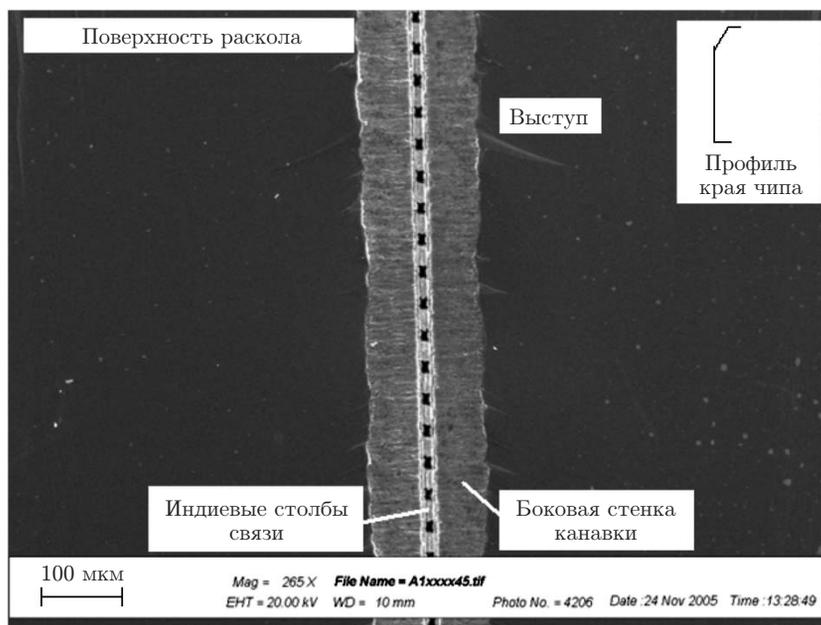


Рис. 2

движения образца, расстояние между верхним краем канавки и поверхностью раскола уменьшается и в идеале стремится к нулю [16].

При формировании несимметричной канавки и использовании предлагаемого способа раскола в идеальном случае ширина зазора между соседними чипами существенно уменьшается (до 8 мкм) при неровности поверхности раскола до 2 мкм, небольшом наклоне стенки канавки (до 3 мкм) и возможном выступе в области дна канавки до 1–2 мкм. Для дальнейшего уменьшения зазора между чипами необходимо убрать поверхность раскола под чип, удалить выступ в области дна канавки и наклон стенки канавки.

Первая задача решается смещением клина под чип при отколе края. Для решения второй задачи после лазерного скрайбирования и откола края чипа повторно формируется канавка с тыльной стороны, где расстояние смещения канавки (2–3 мкм) зависит от наклона боковой стенки. Результатом является ровная (шероховатость около 1 мкм) перпендикулярная планарной стороне плоскость, позволяющая совместить два фотоприёмника без зазора между ними.

Заключение. На основе результатов исследований оптимизированы формирование несимметричной V-образной канавки в многопроходном режиме, раскол приборных пластин, когда поверхность раскола уходит под чип при повторном лазерном скрайбировании, что позволяет уменьшить расстояние между краевыми пикселями соседних фотоприёмников в МФ для мультиплексоров до 17 мкм и фоточувствительных элементов на основе плёнок КРТ до 22 мкм. Это сравнимо с размером пикселя. В данном случае область повреждения материала на краях чипов фоточувствительных элементов составляет до 8 мкм, для мультиплексоров 5 мкм; зазор между чипами 3 мкм.

Предлагаемый технологический маршрут подготовки краёв чипов для стыковки друг с другом в мозаичном фотоприёмнике:

- 1) нанесение фоторезиста на поверхность приборной пластины;
- 2) стандартная технологическая операция разделения пластины на чипы;
- 3) лазерное скрайбирование края чипа излучением с длиной волны 0,337 мкм в многопроходном режиме с площадью перекрытия световых пятен до 10 %, углом наклона оптической оси излучения $12''$ к нормали поверхности;

- 4) откол края чипа с применением клина, смещённого под чип;
- 5) формирование второй канавки, смещённой на несколько микрометров, с тыльной стороны чипа (отрезание края чипа);
- 6) стандартная процедура снятия фоторезиста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Finger G., Beletic J. W.** Review of the state of infrared detectors for astronomy in retrospect of the June 2002 Workshop on Scientific Detectors for Astronomy // Proc. SPIE. 2003. **4841**. P. 839–852.
2. **Kraft P., Bergamaschi A., Brönnimann Ch. et al.** Characterization and calibration of PILATUS detectors // IEEE Trans. Nuclear Sci. 2009. **56**, N 3. P. 758–764.
3. **Parish W., Woolaway J. T., Kincaid G. et al.** Low cost 160 × 128 uncooled infrared sensor array // Proc. SPIE. 1998. **3360**. P. 111–119.
4. **Володин Е. Б.** Схемно-конструктивные особенности сверхдлинных интегральных многорядных фотоприёмных линеек 5532ХИ1Н4, 5532ХИ2Н4 форматов 3072 × 128 и 6144 × 128 с ВЗН // Тр. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. и шк. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: «НПО "Орион"», 2014. С. 209–213.
5. **Орлов А. М., Соловьев А. А., Явтушенко И. О., Скворцов А. А.** О перераспределении дислокаций в монокристаллах кремния вблизи концентраторов напряжений // Физика твердого тела. 2007. **49**, вып. 6. С. 1039–1043.
6. **Narayan J., Young F. W.** Growth of dislocations during laser melting and solidification // Appl. Phys. Lett. 1979. **35**, N 4. P. 330–332.
7. **Балдуллаева А., Власенко А. И., Кузнецов Э. И. и др.** Возбуждение поверхностных акустических волн в кристаллах *p*-CdTe при воздействии импульсным лазерным излучением // Физика и техника полупроводников. 2001. **35**, вып. 8. С. 960–963.
8. **Готра З. Ю.** Технология микроэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
9. **Garcia B. G., Martinez J., Piqueras J.** Laser melting of GaAs covered with metal layers // Journ. Appl. Phys. A. 1990. **51**, Is. 5. P. 437–445.
10. **Карпов С. Ю., Ковальчук Ю. В., Погорельский Ю. В.** Плавление полупроводников под действием импульсного лазерного излучения // ФТП. 1986. **20**, № 11. С. 1945–1969.
11. **Hong M. H., Lu Y.** Optical detection of laser plasma interaction during laser ablation // Proc. SPIE. 1999. **3618**. P. 37–44.
12. **Новоселов А. Р., Клименко А. Г.** Скрайбирование поверхности кремниевого кристалла излучением импульсного ультрафиолетового лазера на микронных расстояниях от активных элементов // Автометрия. 1998. № 4. С. 113–118.
13. **Новоселов А. Р.** Разработка высокоэффективных мозаичных фотоприёмников на основе линеек фоточувствительных элементов // Автометрия. 2010. **46**, № 6. С. 106–115.
14. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Клименко А. Г. и др.** Разработка мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приёмников инфракрасного и терагерцового спектральных диапазонов форматом до 3072 × 576 и более // УФН. 2014. **2**, № 2. С. 123–130.
15. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Клименко А. Г. и др.** Преобразование изображений в мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приёмниках инфракрасного и терагерцового диапазонов форматом до 3072 × 576 и более // Оптический журнал. 2014. **81**, № 3. С. 35–43.
16. **Пат. 2509391 РФ.** Способ формирования граней чипа для мозаичных фотоприёмных модулей /А. Р. Новоселов. Оpubл. 10.03.2014, Бюл. № 7.

17. **Новоселов А. Р.** Формирование граней чипа для мозаичных фотоприёмных модулей // Тр. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. и шк. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: «НПО "Орион"», 2014. С. 492–494.
18. **Черняев В. Н.** Технология производства интергальных схем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1977. 376 с.
19. **Новоселов А. Р., Клименко А. Г., Торлин М. А.** Исследование зоны термического поражения в CdHgTe и Si вблизи лазерных кратеров при ультрафиолетовом облучении наносекундными импульсами // Автометрия. 1998. № 5. С. 78–85.
20. **Novoselov A. R.** Laser application to IC correction // Proc. of the 5th World Multiconf. on Systemics, Cybernetics and Informatics and the 7th Intern. Conf. on Information Systems Analysis and Synthesis (SCI/ISAS'01). Orlando, USA, July 2001. P. 459–463.

Поступила в редакцию 12 декабря 2014 г.
